



# **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 Scoops 3D**

**Juan Felipe Luján Rivas**

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2019



# **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 Scoops 3D**

**Juan Felipe Luján Rivas**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Geotecnia**

Director(a):

Ph.D. Ludger O. Suarez. Burgoa

Línea de Investigación:

Estabilidad de Laderas

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación BIMs (Blocks in Matrix)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2019







## Resumen

En esta investigación se demuestra la aplicación de métodos de análisis de equilibrio límite (bishop simplificado), aplicado de manera tridimensional sobre un sector conocido popularmente como Vereda Monteloro, en el municipio de Ciudad Bolívar, Antioquia. Para dicho procedimiento se utilizan como insumos: información geográfica y de elevación contenida en un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés), parámetros de resistencia, específicamente ángulo de fricción y cohesion obtenido de ensayos de laboratorio ejecutados sobre muestras recolectadas en la zona de estudio. Como resultado se obtiene un mapa de calor de la zona trabajada en el cual se logra apreciar la distribución de factores de seguridad (que descienden hasta 1.46) y su correlación con factores como la pendiente y los mismos parámetros de resistencia. Adicionalmente se obtiene información cuantitativa, como el total de superficies de falla evaluados 1 665 954), así como volúmen y masa estimados del cuerpo de suelo con menor factor de seguridad encontrado, siendo estos valores 211,180m<sup>3</sup> y 534,24 kg respectivamente. Se detalla y ejemplifica el uso de Scoops3D como herramienta computacional para la generación del mapa de distribuciones de factores de seguridad.

## Abstract

This research demonstrates the application of limit equilibrium analysis methods (simplified bishop), applied in a three-dimensional slope located in Vereda Monteloro, in the municipality of Ciudad Bolívar, Antioquia. For this, the following data will be used as input: geographic and elevation information contained in a digital acceleration model (DEM), and resistance parameters of the soil, specifically the angle of friction and cohesion obtained from laboratory tests carried out on soil samples collected in the study zone. As a result, a heat map of the area is obtained in which it is possible to obtain the distribution of safety factors (going down as low as 1,46) and its correlation with variables such as the slope and the resistance parameters. Additionally, quantitative information is obtained, such as the total fault surfaces evaluated, 1665954 in this case), as well as the estimated volume and mass of the soil body with the lowest safety factor, these values being 211.180 cubic meters and 534.24 kg respectively. The use of Scoops3D as a computational tool for generating safety factor distribution maps is detailed and exemplified.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Resumen</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2 Metodología.</b>	<b>5</b>
<b>3 Fundamentos de los métodos de dobelas.</b>	<b>7</b>
3.1 Factor de seguridad ( $F$ ) . . . . .	9
<b>4 Scoops3D.</b>	<b>10</b>
4.1 Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D . . . . .	12
4.1.1 Limitaciones . . . . .	12
4.1.2 Inclinación del plano basal . . . . .	13
4.1.3 Volúmen de la columna . . . . .	13
4.2 Modelo de elevación digital. . . . .	17
4.2.1 ESRI ASCII . . . . .	18
4.3 Interfaz de usuario. . . . .	19
4.4 Archivos de salida. . . . .	24
<b>5 Zona de estudio.</b>	<b>27</b>
5.1 Condiciones atmosféricas. . . . .	30
5.2 Geología . . . . .	30

5.3 Geología Estructural . . . . .	32
5.3.1 Fallamiento . . . . .	33
5.4 Geomorfología. . . . .	33
<b>6 Análisis tridimensional en Scoops3D.</b>	<b>35</b>
6.1 Prueba piloto . . . . .	35
6.1.1 DEM usado en pruebas preliminares . . . . .	37
6.1.2 Pruebas Ejecutadas. . . . .	39
6.1.3 Parámetros de resistencia. . . . .	41
6.1.4 Pruebas Preliminares. . . . .	43
6.1.5 Interpretacion . . . . .	49
<b>7 Información de campo.</b>	<b>50</b>
7.1 Recorrido de campo . . . . .	50
7.2 Calsificaciíon del suelo. . . . .	53
7.3 Ensayos de laboratorio. . . . .	54
7.3.1 Ensayo de gravedad específica. Norma ASTM C-127 . . . . .	54
7.3.2 Ensayo de corte directo. Norma ASTM D-380 . . . . .	56
<b>8 Conclusiones y Recomendaciones.</b>	<b>64</b>
8.1 Conclusiones . . . . .	64
8.2 Recomendaciones . . . . .	66
<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>

# 1 Introducción

Desde sus comienzos en la década de los años 30, la estabilidad de laderas se ha concebido como un método para estimar la probabilidad de que un talud, escarpe o ladera presente inestabilidad o pueda ceder ante la incapacidad de los materiales que la componen para sostener su peso en estado parcial o totalmente saturado.

En el año 1937 Fellenius [14] propone el método tradicional de dobelas para simular la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos tipo rotacional en macizos de suelo. Para ello se selecciona un lugar que se considera representativo del macizo, en el cual se intersecta un plano imaginario ortogonal a la dirección de plunge de la ladera, para obtener un perfil de elevación bajo el cual se modelan los estratos que componen el macizo de suelo y roca.

Aplicado correctamente, este planteamiento ha probado ser acertado al extraer los análisis de la zona seleccionada al macizo en caso de estudio [3]. Para distintas formulaciones matemáticas han sido propuestas con el objetivo de simular de manera precisa la interacción de fuerzas que se produce entre dobelas.

Gracias a la capacidad de computo a la que se tiene acceso hoy en día, es posible evaluar tridimensionalmente una superficie con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) la cual es representada por medio de un Modelo de elevación Digital (*Digital Elevation Model*, DEM por sus siglas en inglés) el cual es un archivo raster, es decir, que se compone por celdas (pixeles) cada una de las cuales posee un valor de elevación sobre un nivel de

referencia.

De esta forma el método de dobelas pasa a ser un análisis de columnas que no se limita a una sección infinitesimalmente estrecha, sino que tiene la posibilidad de analizar toda una zona de interés, Scoops3D es un programa de computador desarrollado por el Servicio Geológico de Los Estados Unidos que sirve para este propósito.

Dicha aproximación ha sido empleada satisfactoriamente varias de las referencias consultadas, mediante software desarrollado a la medida. [24] [20] [33]

Como objetivo de este estudio se plantea realizar un 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 Scoops 3D. Su importancia de realizar este análisis se origina que la zona de estudio se encuentra altamente poblada [31] con abundancia de cultivos agrícolas que ha presentado ocurrencia documentada de movimientos en masa tipo rotacional.

El resultado del uso del software Scoops3D es una imagen raster monocromática en la cual el valor de cada píxel corresponde al factor de seguridad calculado por el método de Bishop para la totalidad de la zona trabajada. Finalmente, se podrá determinar la correlación que existe entre los factores de seguridad obtenidos y las variables tenidas en cuenta, como lo son: pendiente, cohesión de los materiales, resistencia al corte directo y humedad.

Para la realización de dicho estudio se plantean los siguientes objetivos específicos

- Proponer una metodología para la obtención de DEM, y parámetros de resistencia a usar en el software Scoops 3D.
- Producir un mapa de la zona de estudio sobre el cual puedan verse los factores de seguridad y su distribución en La Vereda Monteloro.
- Realizar control de calidad a información SIG y distribución de factores de seguridad

obtenidos.

- Interpretar la distribución del factor de seguridad obtenida y su correlación con los factores que controlan su variabilidad.

A continuación se detallan los motivos por los cuales fue seleccionada esta zona de estudio:

- Abundantes registros documentados sobre ocurrencia de movimientos en masa. (Base de datos SIMMA)
- Homogeneidad de litología en la cuenca de la misma quebrada.
- Cercanía con las zonas de estudio tratadas en el marco del grupo de estudio BIM de la Universidad Nacional Sede Medellín.

## 2 Metodología.

Con el propósito de llevar a cabo los objetivos específicos y el objetivo general anteriormente descritos se ha propuesto la siguiente metodología a desarrollar en el presente estudio

- Recolectar información bibliográfica de la zona de estudio.
- Adquirir, realizar control de calidad y adecuación de la información digital de la zona de estudio (DEM).<sup>1</sup>
- Ejecutar pruebas de control y pruebas preliminares de Scoops3D, usando parámetros de resistencia consultados en literatura y el DEM obtenido de la zona de trabajo.
- Recolectar muestras y extraer parámetros de resistencia por medio de ensayos de laboratorio.<sup>2</sup>
- Ejecutar Scoops3D con los parámetros obtenidos de las muestras de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

<sup>1</sup> Inicialmente se intentó adquirir el DEM de la zona de estudio por medio de la Gobernación de Antioquia, lo cual no fue posible. Se recurrió a información pública como se describe en la sección 6.1.1

<sup>2</sup> Usando las muestras descritas en la sección 7.1 se siguieron los procedimientos estandarizados ASTM C-127 para cálculo de gravedad específica y ASTM D-380 para el cálculo

de resistencia al corte directo. Mayor información sobre los ensayos de laboratorio se proporciona en el apartado 7.3

### **3 Fundamentos de los métodos de dobelas.**

Todos los cuerpos de roca y suelo en el planeta se ven afectados por la fuerza gravitacional, estos a su vez, tienden a permanecer en equilibrio y aparentemente inmóviles debido a las fuerzas ejercidas por cuerpos aledaños. Este estado sin embargo, puede ser engañoso, debido a que los cuerpos que aparentan estar en completo equilibrio y quietud pueden moverse muy lentamente hasta desencadenar un evento de deslizamiento súbito y violento. Agentes externos como flujos de agua o lluvia, o eventos esporádicos como movimientos sísmicos pueden provocar condiciones de inestabilidad entre las fuerzas internas de un cuerpo de masa, desencadenando eventos de deslizamiento de suelo y rocas.

El interés por comprender la estabilidad de laderas nace de una amplia variedad de necesidades entre las cuales pueden estar:

- Mantener el acceso a la ladera misma, por motivos de movilidad.
- Entender la génesis de una zona específica.
- Proteger poblaciones, infraestructura, zonas de tránsito.
- Estabilizar cuerpos de roca o suelo donde históricamente han ocurrido eventos de falla.

En los métodos de estudio de estabilidad de laderas, el acercamiento más acogido ha sido el de tomar el perfil altitudinal de una ladera y dividirlo en dobelas, para evaluar

independientemente las condiciones de estabilidad y fuerzas que actuan sobre cada una de ellas. El método normal propuesto por Bailey y Christian en 1969 [4] es similar al conocido método tradicional de Fellenius [14] en el sentido que ninguno considera fuerzas de interacción entre las doblas de una ladera. El factor que los diferencia principalmente es el concepto de presión de poro normal a la superficie de falla. Para lo cual el método tradicional utiliza el concepto de peso sumergido con la finalidad de evitar presiones de poro negativas en laderas con alta inclinación [15].

El método de Bishop propuesto en 1955 es la metodología usada con mayor frecuencia en la ingeniería para para casos de superficies de falla circular [18], asume que las fuerzas entre doblas son netamente horizontales, mientras que el equilibrio vertical de cada dobla está representada por su fuerza normal efectiva.

El método original de Spencer propuesto en 1967 [32] considera que las fuerzas entre doblas se presentan en un ángulo  $\delta$  respecto a la horizontal y perpendicular a ellas, tanto el equilibrio total de fuerzas como el de momentos para la dirección de  $\delta$ .

Los métodos de análisis de estabilidad de laderas por equilibrio límite, que tradicionalmente se efectuan sobre un espacio bidimensional, pueden llevarse a un espacio tridimensional. De esta manera, cada dobla (*slice*) de suelo, que anteriormente pertenecía a un perfil altitudinal, pasa a ser una columna perteneciente a una ladera. Dicha columna posee un volúmen, una masa y se considera no deformada y homogénea. [17]

Al realizar dicha presunción, se genera entonces la necesidad de conocer las fuerzas intercolumnares existentes entre cada una de las columnas de forma ortoedral que componen una ladera o masa de suelo. Para de esta manera, poder calcular la fuerza normal resultante que cada columna ejerce sobre la superficie de falla.[24]

Como se describió anteriormente, los cálculos resultantes de la interacción entre los laterales de las columnas y la fuerza resultante del peso de la columna (en la base de la misma) es una de las principales diferencias entre los métodos de cálculo del equilibrio límite. Por ello y dado que el método de Fellenius, tiende a generar factores de seguridad

considerablemente más bajos [25], el factor de seguridad ( $F$ ) generado por este método se sigue empleando como base para las posteriores iteraciones en la aplicación del método de Bishop. [15]

También es importante tener en cuenta que ambos métodos asumen en el momento en que se produce un deslizamiento, que este ocurre de manera simultánea y no progresivamente a lo largo de una superficie de falla. Para superficies de falla no circulares, el método de preferente aplicación es Spencer. [19]

### 3.1. Factor de seguridad ( $F$ )

El factor de seguridad  $F$  es una medida de estabilidad adimensional. Es producto de una relación entre la fuerza cortante máxima que puede resistir el suelo y las fuerzas de carga o estres aplicadas al suelo en un momento determinado, es decir.

$$F = \frac{s}{\tau}$$

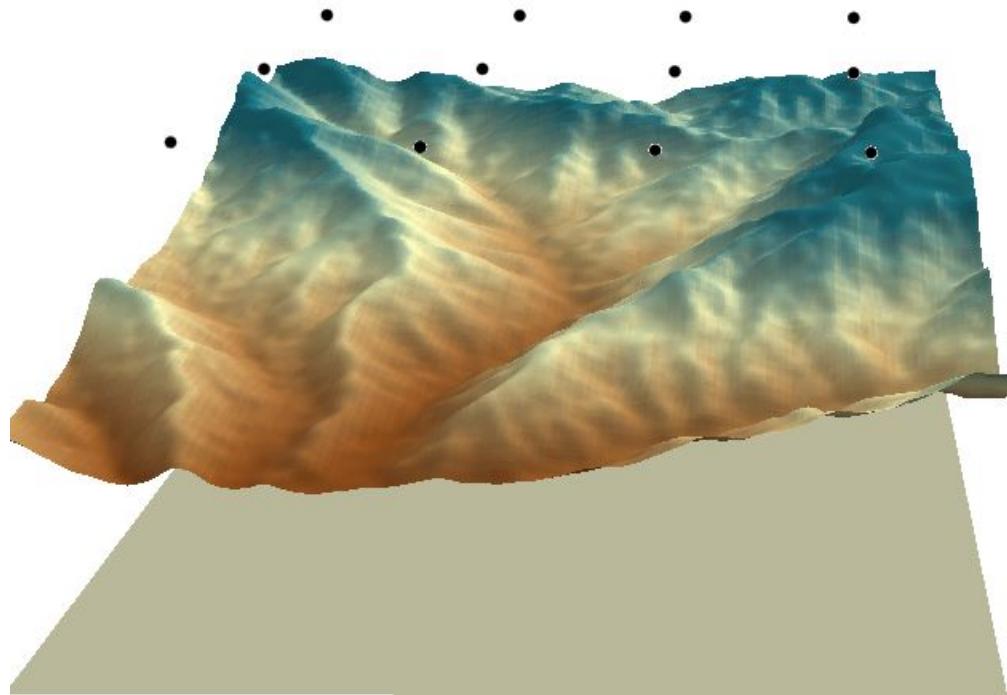
Donde  $s$  es la fuerza máxima de carga que el suelo es capaz de soportar, usualmente en dirección de la fuerza normal. Y  $\tau$  es el total de fuerza aplicado al suelo.

## 4 Scoops3D.

Scoops3D es una herramienta software disponible por medio de una *Interfaz Gráfica de Usuario* (GUI, de las siglas en Inglés de *Graphical User Interface*) para plataformas Microsoft Windows, Mac y Unix. También se puede usar como un conjunto de módulos y funciones en procesos por lotes (i.e. *script*) en el lenguaje computacional Python para ser usado como una clase independiente. Fue desarrollado y es mantenido por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y tiene como finalidad llevar a cabo análisis de estabilidad en las laderas a partir de un modelo de elevación digital (DEM) introducido. [26]

Transformando cada píxel del DEM introducido en una columna, Scoops3D analiza automáticamente varias superficies de falla potenciales mediante análisis de equilibrio límite. Como resultado se obtiene un archivo de imagen (raster) con los factores de seguridad (indicadores de estabilidad) para la zona estudiada. [27]

La capacidad de trabajar sobre zonas que se extienden por miles de kilómetros cuadrados a la vez que se tienen en cuenta distintas características geológicas, geotécnicas y condiciones variables de saturación parcial en profundidad, le da a Scoops3D una gran ventaja sobre herramientas computacionales cuyo funcionamiento se limita a perfiles bidimensionales [2]. Scoops3D se fundamenta en los métodos de doblas de Bishop y Fellenius, lo que implica que solamente es aplicable al análisis de superficies de falla de tipo rotacional, tal como se especifica en la documentaciøn del software. [28]



**Figura 4.1:** Rejilla de centros de esfera de falla sobre la superficie digital que representa la zona de trabajo. Elaboración propia.

Es importante resaltar que, además de no estar contemplado entre los alcance ni objetivos de este proyecto, Scoops3D no posee la capacidad de simular el comportamiento de un eventual flujo de lodo o escombros desencadenado por un evento de deslizamiento o falla.

## 4.1. Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D

Como se ha mencionado anteriormente, Scoops3D se basa en la aplicación de los análisis de equilibrio límite por medio de los métodos de dobelas, que aplicado en un entorno tridimensional puede verse como una análisis por medio de columnas. Cada columna posee entonces lados de distancia equivalente, dados por el tamaño de pixel que posee el DEM especificado, mientras que la altura de la columna estará dada por la distancia entre la superficie del DEM y la superficie de falla.[5]

La superficie de falla que intersecta las dobelas en profundidad es una esfera con centro en cualquier lugar sobre la superficie del DEM y un radio  $r$ . Scoops3D incluye en el análisis de cada superficie de falla todas y cada una de las columnas cuyo píxel correspondiente posea 2 o mas vértices al interior de la superficie de falla.

La superficie de falla en la base de cada columna puede discretizarse como un plano con inclinación  $\xi$  el cual se encuentra a una distancia  $R$  del centro de la esfera de falla. [5]

### 4.1.1. Limitaciones

Scoops 3D no puede dar indicaciones sobre la influencia de cada una de las variables (pendiente, ángulo de fricción, cohesion) una vez finalizada su ejecución. Por lo cual es necesario la interpretación de un operador, asimismo es de bastante utilidad realizar varias iteraciones modificando los parametros de resistencia del material y pendiente del DEM utilizado.

## 4.1 Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D

### **4.1.2. Inclinación del plano basal**

A continuación se detalla el trasfondo matemático sobre el cual se fundamenta la transformación de los métodos tradicionales bidimensionales de equilibrio límite en análisis tridimensionales de estabilidad de laderas. Formulación basada en el manual de usuario de Scoops3D [29]

Partiendo de la ecuación para la generación de una superficie esférica:

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

por lo cual el buzamiento aparente  $\xi$  del plano estaría dado por

$$\xi = \cos^{-1}\left(\frac{1}{\sqrt{1 + (\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2}}\right)$$

mientras que el buzamiento real  $\alpha$  estaría representado por

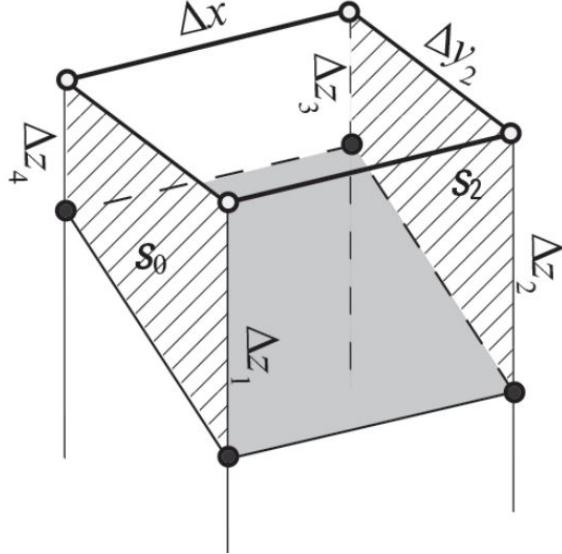
$$\alpha = \tan^{-1}((\partial z / \partial x) \cos \varphi + (\partial z / \partial y) \sin \varphi)$$

donde  $\varphi$  es la dirección de buzamiento de la ladera en el lugar donde se encuentra ubicada la columna

Teniendo entonces los límites de la columna de análisis, es posible calcular su volúmen, y posteriormente su peso.[29]

### **4.1.3. Volúmen de la columna**

Dado que scoops3D tiene en cuenta todas aquellas columnas que contengan 2 vértices al interior de la esfera de búsqueda, es posible que solo una parte de la columna este contenida dentro de dicha esfera, caso en el cual el volumen de dicha parte incluida debe ser calculado.

**Figura 4.2:** Columna de evaluación**Figura 4.3:** Representación gráfica de una columna completamente contenida dentro de una esfera de evaluación. Fuente: Manual de usuario de Scoops3D. [30]

En este caso y partiendo de la figura 3.2, se toma un plano intermedio  $S_1$  entre los planos  $S_0$  y  $S_2$

En los casos en los que una columna es contenida es su totalidad, es decir, que sus planos paralelos  $S_0$  y  $S_2$  tienen igual área. el volúmen ( $V$ ) estará dado por

$$V = (1/6) \Delta x (S_0 + 4S_1 + S_2)$$

donde el área del plano  $S_0$  estará dada por

$$S_0 = (1/2)(\Delta z_1 + \Delta z_1) + \Delta y_1$$

y el área del plano paralelo  $S_0$

$$S_2 = (1/2)(\Delta z_2 + \Delta z_3) + \Delta y_2$$

Finalmente, el peso  $W$  de la columna estará representado por

## 4.1 Funcionamiento de los métodos de estabilidad de laderas en Scoops3D

$$W = \int V\gamma(z) dz$$

Donde  $\gamma$  es el peso unitario del suelo, el cual puede variar con la profundidad  $z$

En general, los métodos de equilibrio límite definen el Factor de seguridad ( $F$ ) como la relación entre las fuerzas resistentes  $s$  y las fuerzas actuantes  $\tau$

$$F = \frac{s}{\tau}$$

Donde  $F$  inferior a uno (1) indica inestabilidad. Para áreas definidas, como el área en la base de cada columna ( $A$ )

La fuerza actuante ( $T$ ) sobre  $A$  estará dada por

$$T = \left(\frac{1}{A}\right) \int_A \frac{sA}{F} dA$$

Discretizando las componentes  $i$  y  $j$  correspondientes a las fuerzas resistentes  $x$  y  $y$  respectivamente, se tiene.

$$T = \frac{1}{F} \sum s_{i,j} A_{i,j}$$

$i,j$									
$i,j$									
$i,j$									
$i,j$									
$i,j$									
$i,j$									
$i,j$									
$i,j$									
$1,2$	$2,2$	$i,j$							
$1,1$	$2,1$	$i,j$							

La columna  $i = 1$  y  $j = 1$  serán aquellas ubicadas en la posición del píxel en la esquina inferior izquierda del DEM.

El equilibrio de momentos se calcula a lo largo de un eje rotacional basado en el centro de la esfera de falla, dicho eje es horizontal y normal a la dirección potencial de falla. El momento actuante está direccionado principalmente por la fuerza de la gravedad ( $W$ )

$$a_{i,j} = R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

Donde  $R_{i,j}$  es la distancia desde el centro de la esfera hasta el centro del área  $A$  en la base de la columna,  $\alpha_{i,j}$  es el buzamiento aparente del plano de área ( $A$ ) visto desde la posición del centro de la esfera. En  $R_{i,j}$  se puede apreciar una de las principales diferencias entre el análisis de equilibrio límite en 2D y 3D, ya que en 3D dicha distancia siempre es variable, por lo cual el momento actuante ( $M_{act}$ ) de cada columna debe calcularse independientemente, para lo cual se usa la expresión:

$$M_{act} = \sum R_{i,j} W_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

El momento resistente( $M_r$ ) está representado por la sumatoria de los productos de esfuerzos cortantes en la parte inferior de cada columna.

$$M_{Total} = \sum R_{i,j} \frac{s_{i,j} A_{i,j}}{F}$$

por lo que al reemplazar  $s_{i,j}$

$$M_{Total} = \sum R_{i,j} \frac{C_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - U_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}}{F}$$

Donde  $N_{i,j}$  es la fuerza normal correspondiente a cada columna.

El momento de equilibrio para una columna individual estará dada entonces por la expresión.

$$\Sigma M = \sum R_{i,j} \frac{c_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}}{F} - \sum W_{i,j} R_{i,j} \sin \alpha_{i,j}$$

Por lo que el factor de seguridad  $F$  está dado por:

$$F_{i,j} = \frac{\sum R_{i,j} (c_{i,j} A_{i,j} + (N_{i,j} - u_{i,j} A_{i,j}) \tan \phi_{i,j}}{\sum W_{i,j} (R_{i,j} \sin \alpha_{i,j})}$$

## 4.2. Modelo de elevación digital.

Un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) es un formato de archivo empleado para representar digitalmente una superficie, incluyendo sus variaciones e irregularidades. Para su elaboración pueden utilizarse herramientas como fotogrametría, interferometría, radar, laser, entre otros. [22]

Términos sinónimos a “modelo de elevación digital” son Modelo digital de terreno (DTM por sus siglas en inglés) y Modelo Digital de Superficie (DSM por sus siglas en inglés). La información contenida en un DEM puede representarse en forma Raster (rejilla de píxeles), de forma vectorial como un TIN (Triangular Irregular Network por sus siglas

en inglés) o simplemente por puntos de coordenadas XYZ a partir de los cuales se puede generar un DEM tipo RASTER o TIN. [35]

Gracias a la capacidad de cómputo que poseen las herramientas SIG actuales, los DEM generados por los sensores remotos actuales cuentan con resoluciones que alcanzar pocos centímetros por pixel y abarcan importantes extensiones de la superficie terrestre. [36] [16]

#### 4.2.1. ESRI ASCII

El modelo de superficie trabajado en este proyecto es un DEM RASTER en el formato ESRI ASCII (extensión **.asc**) posee el siguiente encabezado al abrirse desde un editor de texto.

```
NCOLS xxx
NROWS xxx
XLLCENTER xxx | XLLCORNER xxx
YLLCENTER xxx | YLLCORNER xxx
CELLSIZE xxx
NODATA_VALUE xxx
row 1
row 2
...
row n
```

De este encabezado puede obtenerse el número de celdas, número de columnas, tamaño de celda (metros sobre la superficie terrestre que representa cada píxel, debe ser mayor a cero), coordenadas x,y del origen y valor que representa la ausencia de información. ASTER GDEM V2 la segunda versión de ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) GDEM (Global Digital Elevation Model) fue realizada por la NASA (United States National Aeronautics and Space Administration) y publicada el 17 de Octubre

de 2011. Esta adquisición consta de topografía digital a escala global y comprende hasta un 99 % de la superficie terrestre, siendo esta la adquisición de datos topográficos con mayor extensión hecha pública hasta la fecha. La resolución máxima de pixel en esta adquisición es de hasta 30m por pixel DEM Usado. Sus detalles técnicos se pueden consultar en el documento ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 [34] El modelo de elevación digital empleado en este trabajo corresponde a una muestra tomada de ASTER GDEM V2 comprendida entre la coordenadas 650354.816N 8469349.749 W 641724.797 S 8457102.358 E (metros mercator).La resolución de pixel obtenida para esta zona es de 38m según consta en el encabezado del DEM Arc ASCII. El sistema de coordenadas asignado al DEM es *MAGNA\_SIRGAS\_Colombia\_West\_zone*.

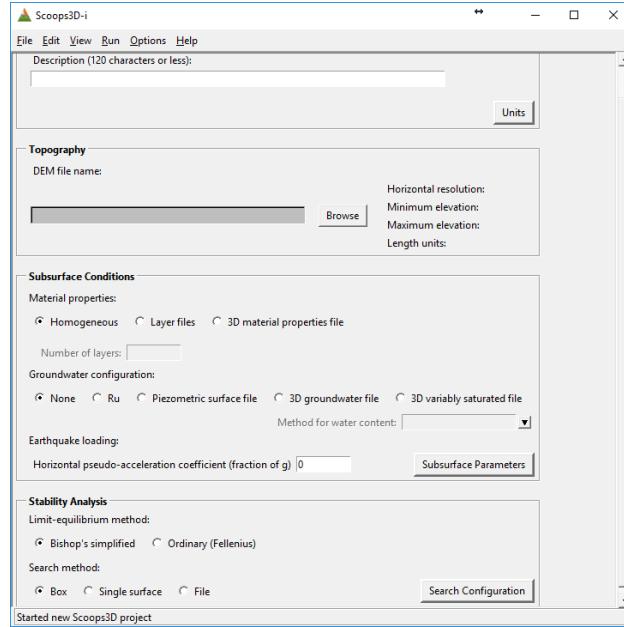
ncols	182
nrows	151
xllcorner	1108419.546
yllcorner	1137605.366
cellsize	38.218514142587
NODATA_value	-9999

El DEM usado en este proyecto se muestra en la imagen 7.12

### 4.3. Interfaz de usuario.

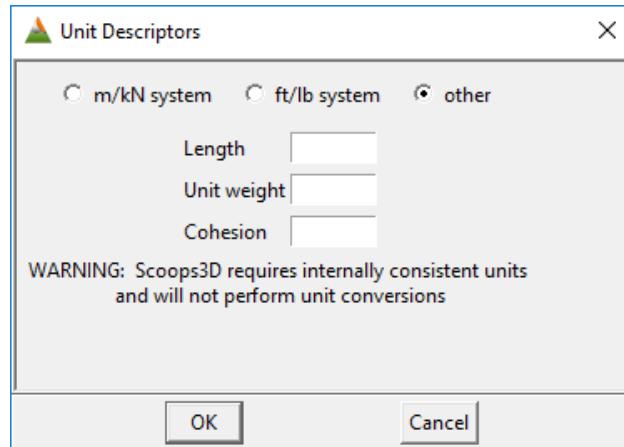
A continuación se describen las herramientas disponibles en Scoops3D empleadas en las pruebas preliminares (sección 6.1.4) y la posterior ejecución de con datos extraídos de las muestras recolectadas en campo. Esta sección se ha compuesto a partir del manual de usuario de Scoops3D y de la experiencia obtenida con el uso del software.

La interfaz de usuario principal de Scoops3D cuenta con 4 secciones principales tituladas Description, Topography, Subsurface Conditions y Stability Analysis. En la sección



**Figura 4.4:** Captura de la ventana principal de Scoops3D en el sistema operativo Windows. Elaboración propia.

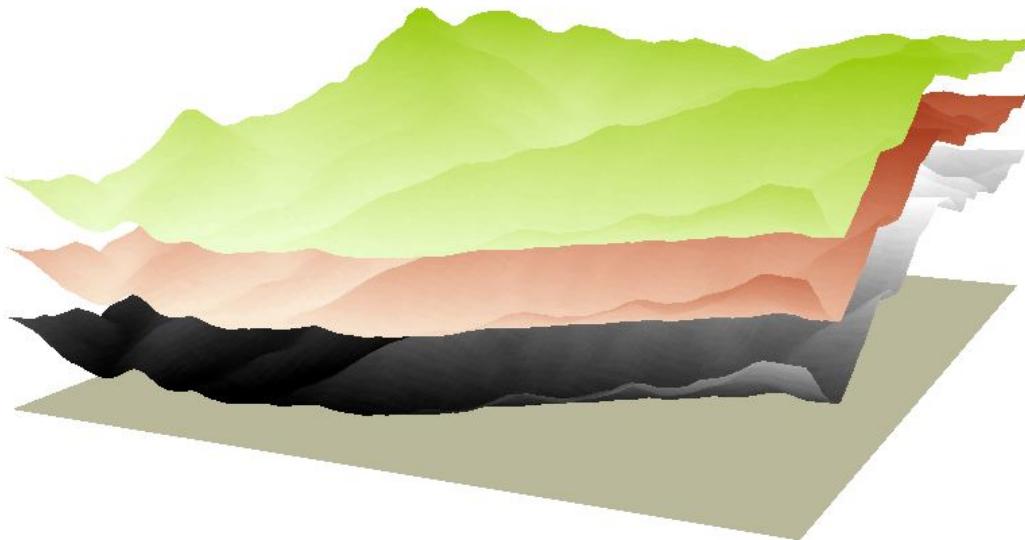
Description se cuenta con un recuadro de texto en el cual el usuario puede introducir una descripción del proyecto a realizar, adicionalmente, se cuenta con un botón titulado Units (unidades) cuyo funcionamiento se describe a continuación.



**Figura 4.5:** Las unidades seleccionadas pueden modificarse posteriormente.

En la ventana de selección de unidades el usuario puede seleccionar las unidades de

esfuerzo a trabajar, o trabajar en sus propias unidades personalizadas. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta que Scoops3D no realiza conversión alguna al momento de su ejecución. Por lo cual se debe tener claridad sobre las unidades longitudinales que posee el DEM así como las unidades de área ingresadas en la ventana de búsqueda de superficie de falla. Su estructura se ilustra en la figura 4.5



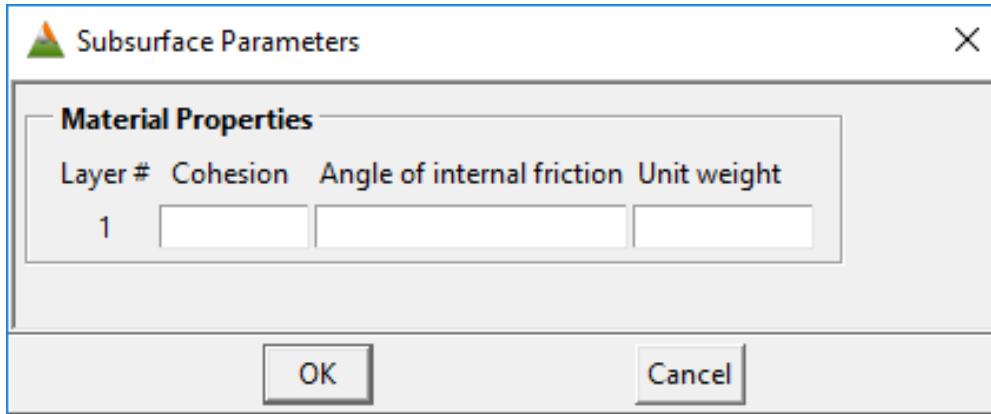
**Figura 4.6:** Representación de distintas geológicas (verde, rojo, negro). Elaboración propia.

### Condiciones superficiales.

Scoops3D posee la capacidad de integrar distintas unidades estratigráficas en la simulación de superficie de falla. La representación geométrica de dichas unidades se pueden ingresar a Scoops3D por medio de DEM que representen el techo de cada unidad. Para usar esta funcionalidad se debe marcar el checkbox layer files en la ventana principal de Scoops3D.

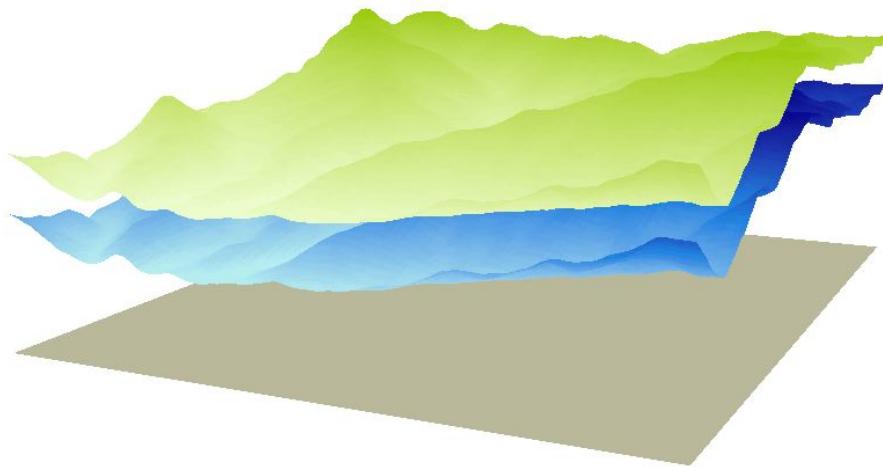
En caso de ser necesario el uso de varias unidades estratigráficas, es necesario ingresar los parámetros de resistencia de cada una de los materiales representados, para lo cual se hace uso de la ventana de parámetros subsuperficiales. ilustrada en la figura 4.7. En esta

ventana no es necesario digital las unidades (MPa) o símbolo alguno para representar los grados del parámetro  $f_i$



**Figura 4.7:** Captura de la ventana de introducción de parámetros de resistencia de unidades geológicas sup-superficiales. Elaboración propia.

De la misma manera, la cabeza piezométrica o nivel freático se puede representar por medio de un modelo de elevación digital como se ilustra en la figura 4.8



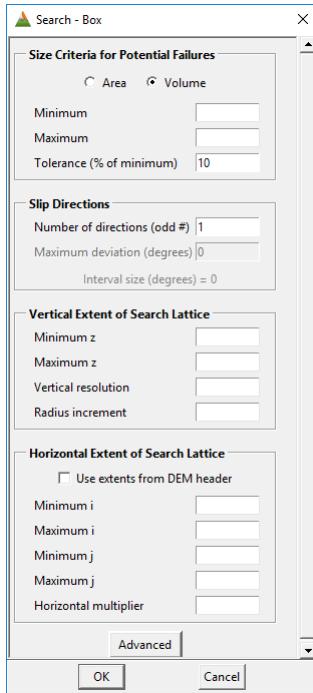
**Figura 4.8:** Representación de un nivel priezométrico (azul) como una superficie bajo el DEM superficial (verde). Elaboración propia.

### **Análisis de estabilidad**

En el apartado de análisis de estabilidad de la ventana principal de Scoops3D se puede seleccionar el método de análisis de estabilidad de laderas que se desea emplear. Las opciones disponibles son Bishop simplificado y Fellenius. Asimismo se puede seleccionar el método de búsqueda de superficie de falla, las opciones disponibles son caja, cuyo funcionamiento se detalla en el uso de la ventana search-box. Superficie específica, el cual evalúa la posibilidad de ocurrencia de superficies de Falla respecto a un único centro de esfera determinado por el usuario. Y por último el método de búsqueda por medio de un archivo de coordenadas XYZ las cuales deberán corresponder a los centros de esfera de falla a evaluar.

### **Método de Búsqueda por caja**

Inicialmente se definen las dimensiones de la caja de trabajo (figura 4.9) en la cual Scoops3D buscará superficies de Falla. La extensión de dicha caja estarán dadas por la altitud mínima y máxima del DEM a trabajar y el alcance norte-sur y este-oeste del mismo, el usuario es libre de modificar estas características y trabajar con una extensión superior o inferior a las del DEM.



**Figura 4.9:** Ventana de parámetros de la caja de búsqueda de superficies de falla, la resolución de dicha rejilla de búsqueda impacta directamente en el tiempo que toma la ejecución de Scoops3D, este, al ser un programa basado en la arquitectura bits) no obtiene mayor ventaja con el uso de altas cantidades de memoria RAM ni procesadores con elevado número de núcleos

## 4.4. Archivos de salida.

Scoops3D tiene la capacidad de producir una gran variedad de archivos de salida los cuales le posibilitan al usuario obtener información acerca del análisis realizado así como obtener un estimativo de la distribución espacial de los factores de seguridad para las zonas contenidas en el DEM base, teniendo en cuenta los parámetros de resistencia introducidos. Cada archivo de salida está compuesto principalmente por el nombre del proyecto ejecutado, seguido por el carácter guión bajo (\_) y el nombre respectivo del archivo generado. En la siguiente tabla se listan los archivos estándar de salida junto con su respectiva descripción.

**Tabla 4.1:** Tabla descriptiva de los archivos generados en una ejecución estándar de Scoops3D.

_out.txt	Este archivo en formato de texto plano contiene los parámetros de resistencia y parámetros de búsqueda introducidos en la interfaz de usuario de Scoops3D, así como información básica de la prueba realizada, método de análisis de estabilidad usado, listado de archivos de salida generados, dimensiones del DEM base y DEMs generados.
_fos3d_out.asc	Este archivo tipo ASCII DEM posee las mismas dimensiones del DEM original, contiene la distribución de factores de seguridad calculados para cada píxel
_fosvol_out.asc	Este archivo tipo DEM contiene la magnitud de masa o metros cúbicos de material desplazado en un área cuyo factor de seguridad sea inferior a 1
_fosarea_out.asc	Este archivo DEM que expresa la ubicación y altura del centro de esfera de las superficies de falla encontradas y a su vez que tienen factor de seguridad inferior a 1
_spheres_out.okc	Este Archivo DEM es un mapa pendientes del modelo de elevación digital original.
_slope_out.asc	Este archivo de texto plano contiene las advertencias encontradas durante la ejecución de Scoops3D. Cabe destacar que la existencia de notas o errores en este archivo no implica una mala ejecución o mala calidad de los archivos de salida del proyecto de Scoops3D
_errors_out.txt	

Adicionalmente se cuenta con el archivo Boundcheck. Este es un archivo raster en el cual se puede observar si los límites de la rejilla de búsqueda ha sido una limitante para la detección de superficies de falla. Considerando, por ejemplo, una ladera de baja pendiente

**Tabla 4.2:** Representación de los valores posibles del archivo boundcheck

código	Caso encontrado
0	ninguno
100	ancho mínimo muy alejado
900	ancho máximo muy cercano
10	alto mínimo muy elevado
90	alto máximo muy bajo
1	elevación mínima muy alta
9	elevación máxima muy baja
-9999	no se encontraron superficies de falla

compuesta por materiales de baja competencia los cuales presentan una superficie de falla ante determinadas condiciones de humedad o longitud de la ladera. En este caso, el centro de la esfera que sigue la trayectoria de dicha superficie de falla rotacional se encontraría ubicado en una altitud considerable respecto a la ladera en cuestión.

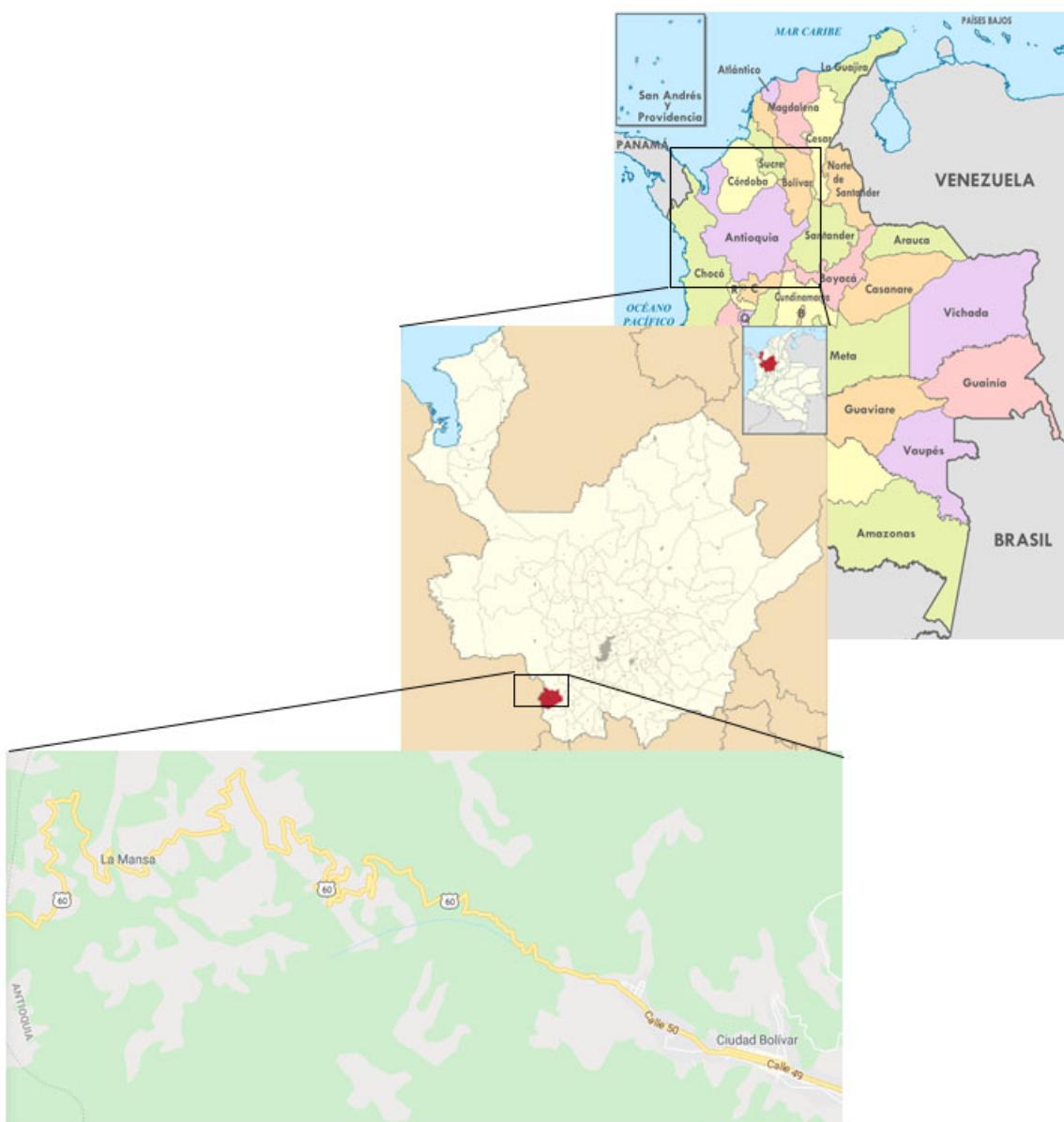
A medida que la ladera posee una pendiente menos pronunciada, el centro de la esfera de falla tendería a encontrarse en una altitud infinita.

Dado que a partir de determinados parámetros de resistencia la aplicación del método de Bishop comienza a producir factores de seguridad cada vez mas elevados, no es necesario realizar pruebas en búsqueda de centros de esfera que se aproximen a infinito. Sin embargo sí es posible realizar una búsqueda en la cual la altura máxima de centros de esfera sea una limitante para hayar superficies de falla que posean factor de seguridad considerablemente bajo. Para ello, el archivo boundcheck muestra distintos valores en función del comportamiento del centro de esfera respecto a los límites verticales y laterales de la caja de búsqueda.

En la medida de lo posible, no se debe limitar la detección de superficies de falla a los límites verticales y laterales de la caja de búsqueda empleada

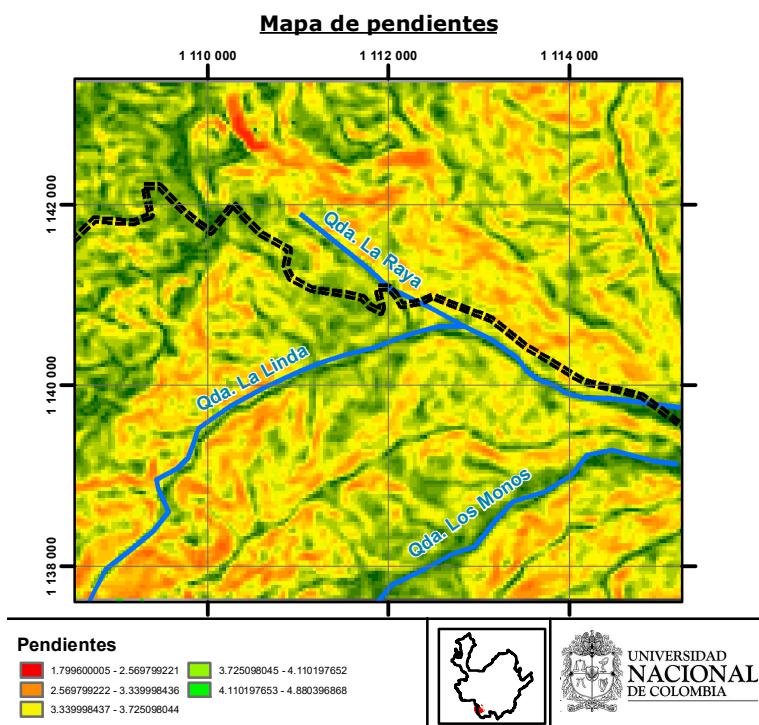


## 5 Zona de estudio.



**Figura 5.1:** Mapa de ubicación de la zona de estudio, vía Medellín Quibdo en cercanías a Ciudad Bolívar.

La zona de estudio se encuentra localizada en las afueras del perímetro urbano del municipio de Ciudad Bolívar en el Departamento de Antioquia. Las laderas noroxidental y suroriental de la quebrada La Linda poseen pendientes que oscilan entre el 20% y 30%. La Quebrada La Linda no posee afluente alguno, sus aguas desembocan en su totalidad en la quebrada La Raya. Las pendientes más pronunciadas de la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda se encuentran aguas arriba en las cercanías del Batolito Farallones, tal como se puede apreciar en la Figura 5.2.



**Figura 5.2:** Mapa de pendientes de la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda y sus zonas circundantes. Elaboración propia

El acceso a la zona de estudio se encontró a 14 Km partiendo del Parque principal del Carmen de Bolívar por la carretera en dirección a la ciudad de Quibdó.

## 5.1. Condiciones atmosféricas.

La precipitación en la zona de estudio está influenciada principalmente por la presencia de la orogenia andina, mas específicamente al flanco occidental de la cordillera occidental. La precipitación anual en la zona comprendida en la plancha 165 - Carmen de Bolívar oscila entre los 5000 y 7000 mm. [13] La clasificación del sector corresponde a bosque húmedo premontano [7]

## 5.2. Geología

En la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda se encuentran 3 unidades geológicas, una sedimentaria la cual corresponde al Miembro Urrao de la Fm. Penderisco y aguas arriba de la Quebrada La Linda se encuentra el Batolito Farallones.

**Batolito Farallones.Tmcf** Ubicado al Sur del Stock de Cerro plateado de y de formación contemporánea a este. El Batolito Farallones recibe su nombre por encontrarse localizado al Este de la localidad de Farallones. El Batolito Farallones de edad Mioceno datado por el método *K/Ar* como originado hace 11 +- 2 m.a. [8]. Presenta una aureola de contacto extensa (500m aprox), fuertemente fallada y plegada con los sedimentos cretácicos que lo rodean en su extremo norte. Su altura alcanza aproximadamente los 3400msnm exhibiendo escarpes casi totalmente verticales. Su clasificación se determinó como intrusivo monzonítico.

**Fm. Penderisco Miembro Urrao. Ksaau** La sedimentación de la formación penderisco se ubica entre el cretaceo temprano a tardío como producto de flujos de turbiedad. Está compuesta por estratos de rocas que varían en calibre desde areniscas pasando por limolitas y lodoletas (siendo esta la facie predominante) hasta chert, este último se presenta frecuentemente como interestratificaciones finas. Se presentan igualmente conglomerados de tamaño de clasto altamente variable (polimictico), los cuales presentan espesores y arreglos

altamente variables. Tanto algunas lodolitas como estratos de areniscas exhiben estructuras de polaridad como estratificación cruzada, Su estructura fue fuertemente modificada por el emplazamiento del Batolito Farallones en Neógeno temprano. [9]ver figura 5.3

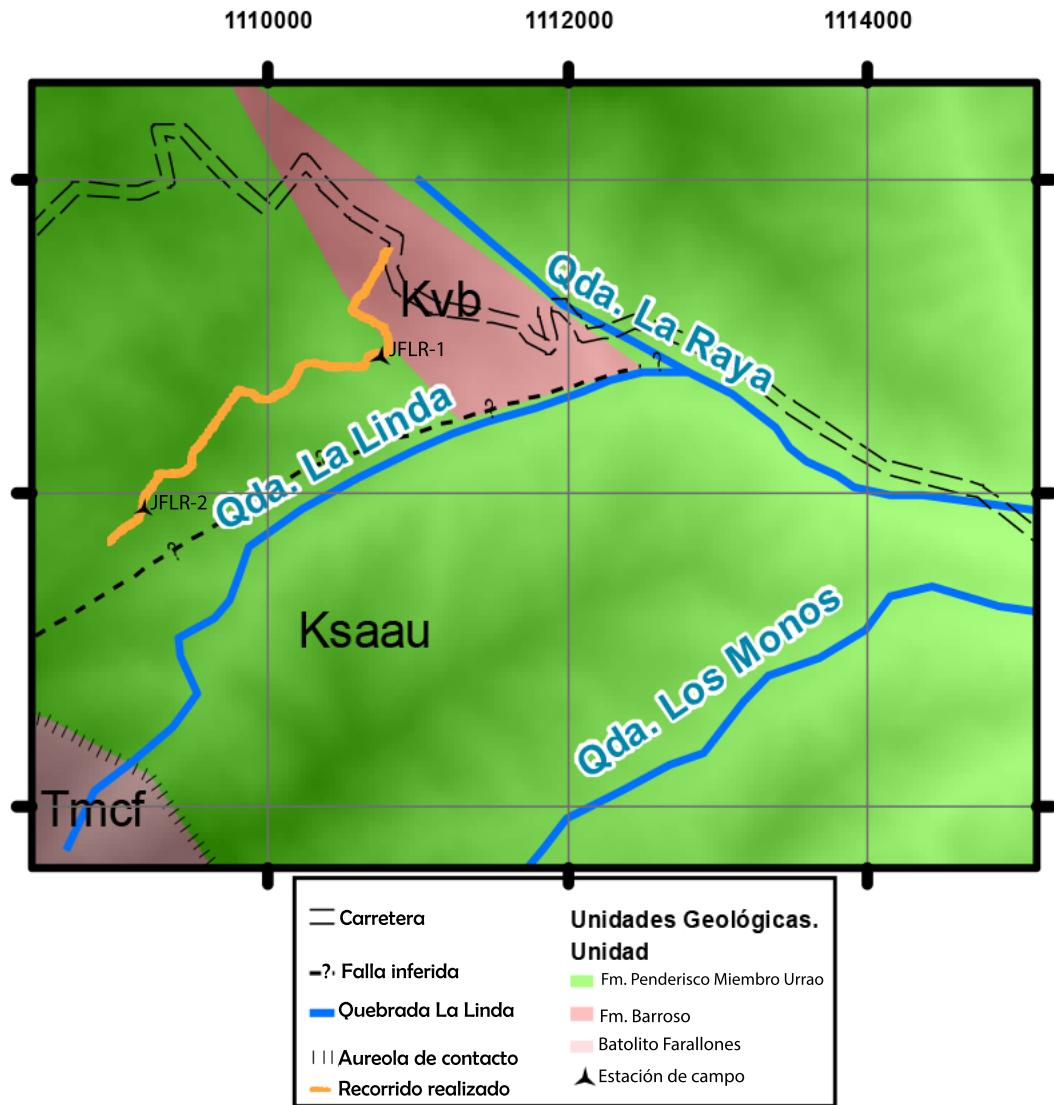
### **Fm. Barroso. Kvb**

Las rocas de esta formación abarcan una extensa variedad composicional. Desde basaltos y rocas andesíticas contenidas en flujos lávicos hasta rocas afaníticas. Mineralógicamente se presentan con mayor ocurrencia espilitas seguidas de diabasas, basaltos porfídicos, aglomerados y brechas.

Hacia el este de la Plancha 135 se presentan rocas masivas y frescas de coloración oscura con alto grado de deformación. Su composición mineralógica contiene clinopiroxenos y ortopiroxenos, plagioclasa, ilmenita, clorita y leucoxeno.

En la zona de trabajo se presenta en un punto aislado sobre la vía que de Ciudad Bolívar conduce a Quibdó. Allí su ocurrencia se presenta en forma de diabasa altamente fracturada y de color oscuro, con intercalaciones de chert. [10],

La descripción geológica retomada de la información bibliográfica oficial sirvió en los ensayos preliminares del software Scoops3D (sección 6.1.4) como referencia para seleccionar los parámetros de resistencia a usar en dichos ensayos.



**Figura 5.3:** Mapa geológico de la zona de estudio basado en [6]. Se marca la ruta realizada durante la salida de campo y las estaciones de donde se tomaron las muestras para ensayos de laboratorio

### 5.3. Geología Estructural

Las características estructurales predominantes de la cordillera occidental se encuentran controladas por la presencia de la orogenia andina producida por el choque de placas oceánica

y continental, de allí la presencia de ofiolitas, rocas volcánicas efusivas y cuerpos intrusivos. Dicho proceso inicia en el cretaceo y continua hasta la actualidad [11]

### 5.3.1. Fallamiento

La zona que abarca la Plancha 165 Carmen de Atrato es sísmicamente activa, a pesar de la predominante capa vegetal que enmascara las marcas del tectonismo altamente influyente. Los sistemas de fallas allí presentes tienen direcciones predominantes *SE – NW* NS y *NE – SW*.[11]

#### Falla La Mansa

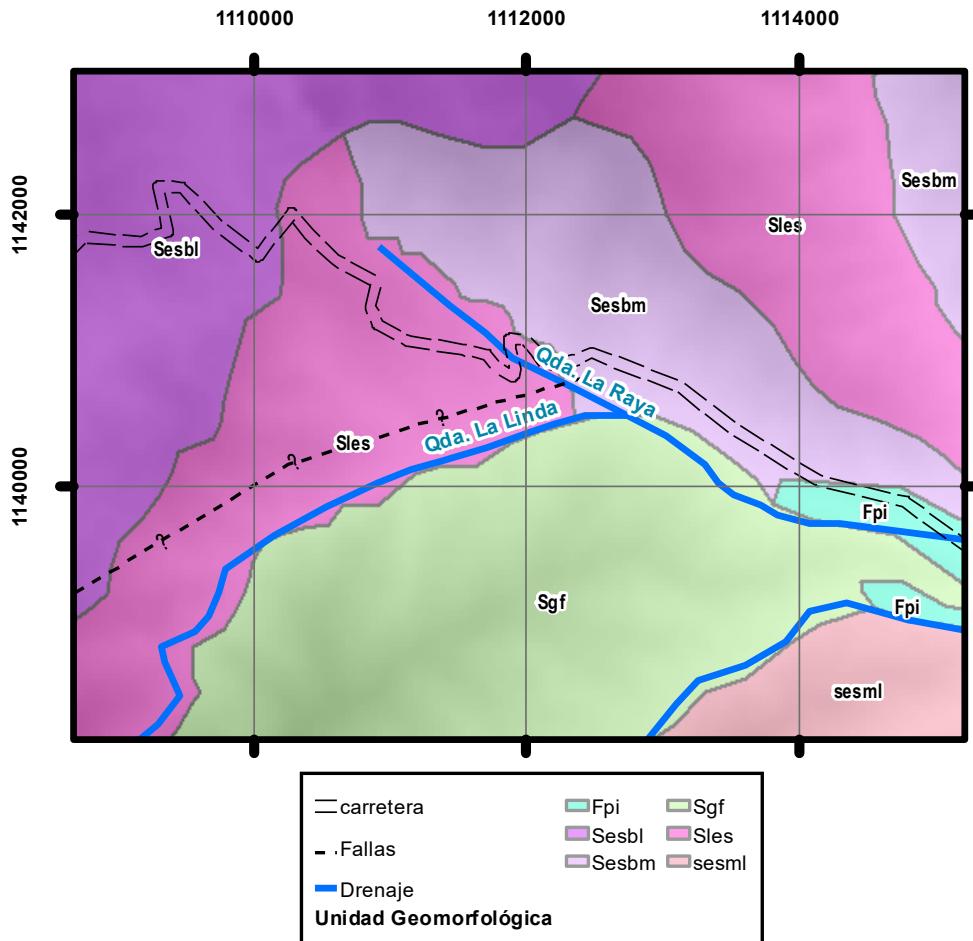
Se encuentra al Este de la Plancha 165 El Carmen de Atrato, al Noroeste del casco urbano de Ciudad Bolívar. Su dirección es N-NW con buzamiento predominante al Este, hacia el extremo norte muestra su expresión mas clara controlando el sistema de drenaje y manifestándose mediante abundantes deslizamientos. [11]

Durante el recorrido de campo realizado, no se logró ver la expresión directa de la Falla La Mansa. Sin embargo el cañón de la quebrada La Linda parece estar influenciado fuertemente por un fallamiento con dirección NE que por su dirección, intersectaría las proximidades del Batolito Farallones y su aureola de contacto, descrita en la Memoria geológica y geoquímica de la plancha 165 Carmen de Atrato.

## 5.4. Geomorfología.

La geomorfología de la zona de estudio se presenta en la figura 5.4, está caracterizada principalmente por laderas con 23 % de pendiente con desviación estándar del 10 %. En la

zona presenta una fuerte influencia estructural lo cual se refleja en abundante fallamiento y plegamiento, de ahí que la expresión morfológica de la zona exhiba laderas de pendiente media a larga con pendientes de inclinación abrupta. En la Ladera norte de la Qda. La Linda se presenta un patrón de drenaje subdendrítico, por lo cual se clasifica esta unidad como un Gancho de Inflexión (Sgf), mientras que en la ladera sur el patrón de drenaje es Subparalelo, por lo cual la unidad se caracteriza como un Espolón Moderado de longitud larga (Sesml). Ambas laderas muestran cicatrices de movimientos en masa tipo rotacional, adicionalmente se presentan movimientos tipo translacional en el Sesml.[9]



**Figura 5.4:** Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Basado en Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Plancha 165 El Carmen. Acercamiento.

# **6 Análisis tridimensional en Scoops3D.**

Tanto las pruebas preliminares como la corrida final de Scoops3D se realizaron en un equipo de computo usando el sistema operativo Windows 10 Pro con las siguientes características: Modelo MSI Procesador Intel Core i7 6700HQ. 8GB de memoria RAM DDR4, GPU Nvidia GeForce 940mx.

## **6.1. Prueba piloto**

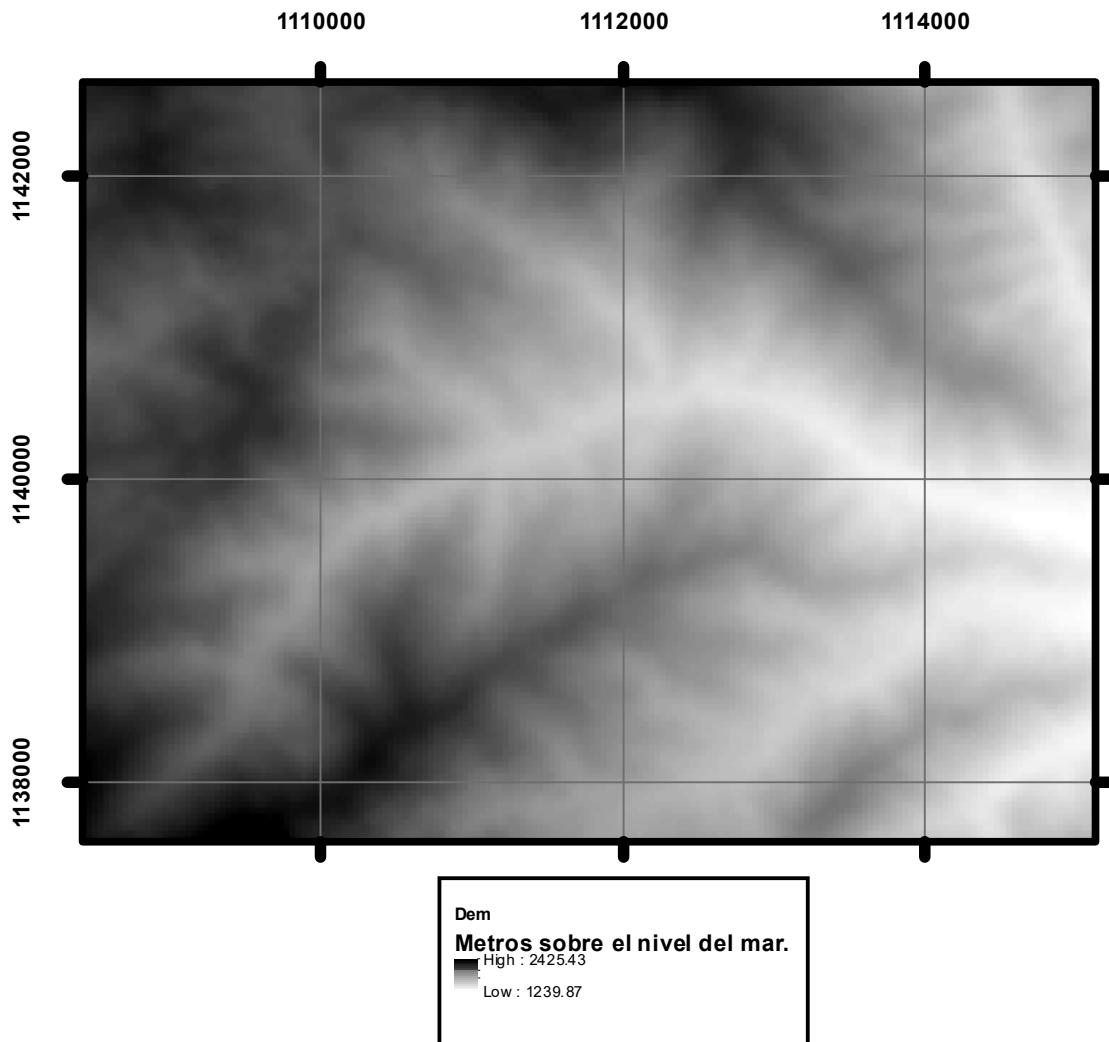
Las pruebas piloto en Scoops3D se realizaron desde la concepción de este proyecto y estuvieron encaminadas a brindar información sobre los siguientes conceptos.

1. Preparar la información geográfica a las necesidades de funcionamiento de Scoops3D.
2. Evaluar la calidad del DEM a usar como insumo base en Scoops3D.
3. Adquirir familiaridad con la interfaz gráfica de usuario de Scoops3D para lograr una mejor documentación de su forma de uso.
4. Conocer el formato de entrada de los parámetros de resistencia en la interfaz de usuario de Scoops3D.
5. Determinar la extensión espacial y resolución de la rejilla de búsqueda de superficie de falla en Scoops3D.

6. Optimizar los parámetros de búsqueda de superficies de falla para reducir tiempo de cómputo.
7. Comprender y correlacionar los distintos archivos de salida de información que proporciona Scoops3D.

Durante este proceso ha sido de vital importancia contar con conocimientos en Sistemas de Información Geográfica para preparar adecuadamente los archivos de entrada, así como para interpretar los archivos de salida.

### 6.1.1. DEM usado en pruebas preliminares



**Figura 6.1:** Imagen monocromática del DEM trabajado desplegado en escala de grises. Altura mínima 1239 msnm, altura máxima 2425msnm. Elaboración propia.

Para las pruebas iniciales se usó un sector de ASTER GDEM V2 dada su fácil y rápida adquisición por medio del software Global Mapper desarrollado por Blue Marvel. El software Global Mapper tiene la capacidad de exportar el formato ESRI ASCII que utiliza Scoops3D como insumo base, se recomienda exportar el DEM con la mayor resolución posible, en caso de requerir agilizar el tiempo de procesamiento en Scoops3D, se recomienda disminuir reso-

lución espacial al DEM. Lo cual se puede lograr fácilmente con la herramienta Resample de ArcGIS en sus versiones 10 y superior ( Tool Geoprocessing toolboxes (\systemtoolboxes \datamanagementtools.tbx\raster\rasterprocessing\resample) y posteriormente la herramienta **Raster to ASCII** (toolboxes\systemtoolboxes\conversiontools.tbx\fromraster\rastertoascii) en el software Qgis con la herramienta Raster Calculator.

Debido a que Scoops3D no acepta sistemas de coordenadas geográficas sino proyectadas, se trabajó con el sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS Colombia West zone. Se pudo comprobar que el idioma y la configuración regional puede causar que el archivo DEM base pueda no ser compatible con Scoops3D debido al formato de separación de decimales y unidades de miles. A continuación se muestra un archivo DEM incompatible y uno compatible con Scoops 3D.

```
ncols 2
nrows 2
xllcorner 0
yllcorner 0
cellsize 1
NODATA_value -9999
0,5 1,5
2,5 -9999
```

Nótese que la separación de decimales se realiza con el carácter coma (,). Esto como resultado de la configuración por defecto del sistema operativo Windows 10 en regiones como américa latina y españa. Al introducir un archivo DEM con el formato anteriormente ejemplificado en Scoops3D, se obtiene el siguiente error.

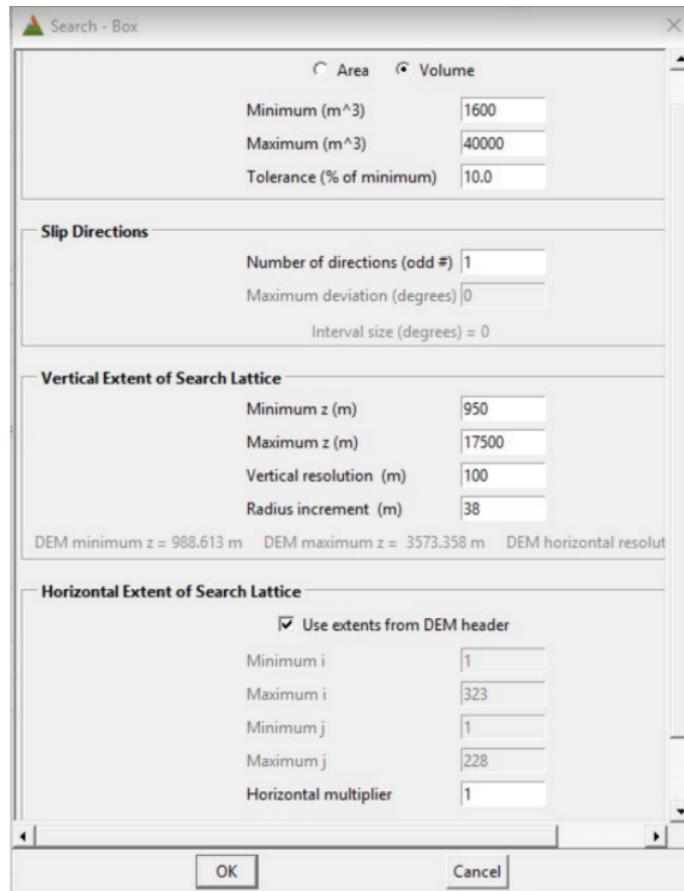
```
ncols 2
nrows 2
xllcorner 0
yllcorner 0
cellsize 1
NODATA_value -9999
0.5 1.5
2.5 -9999
```

El formato adecuado de DEM para usar con Scoops3D debe ser con separación de decimales con punto (.). Finalmente se decidió trabajar con un DEM de tamaño de pixel 38m×38m, esta es resolución obtenida de ASTER GDEM V2 sin modificación alguna para la zona de trabajo en el municipio de Ciudad Bolívar. Este Ráster se compone de 27.482 píxeles, cubre en total **104.4** hectáreas, comprende alturas entre los 1293 y los 2425 msnm. En la zona de trabajo, con base en la información trabajada, se cuenta con laderas cuyas pendientes alcanzan el 43 %.

En caso de no tener acceso al software Global Mapper, es posible obtener la totalidad o apartes de la adquisición ASTER GDEM v2 desde los sitios web de NASA EARTHDATA y LP DAAC Global Data Explorer.

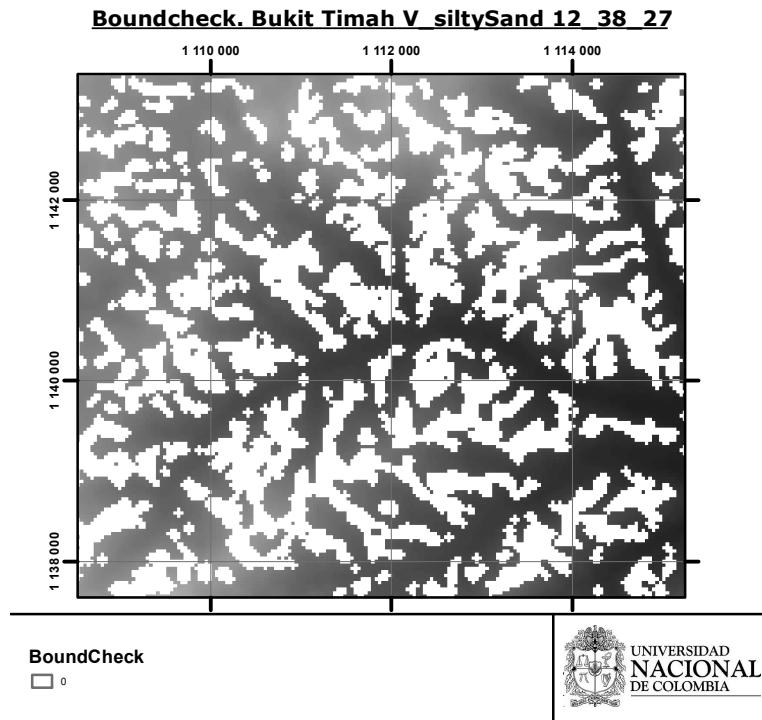
### **6.1.2. Pruebas Ejecutadas.**

En la siguiente captura de pantalla se muestran los parámetros del la caja de búsqueda empleados en las pruebas realizadas con Scoops3D.

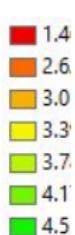


**Figura 6.2:** Parámetros usados en la ejecución de pruebas preliminares.

Se trabajó con el rango de búsqueda de movimientos en masa por rango de volumen, basado en los movimientos registrados en la base de datos SIMA para la zona de trabajo. Para cada nodo de búsqueda se analiza solamente una dirección de deslizamiento. En la extensión vertical de las dovelas de falla se toma una altura ligeramente inferior a la altura menor existente en el DEM y como altura máxima se tomó una altura de 17500 msnm, esta última se determinó luego de múltiples pruebas variando la altura máxima hasta que se pudo apreciar que no se detectaban nuevas superficies de falla(de área significativa) al continuar aumentando la altura máxima del nodo central, para lo cual se usó el archivo Boundcheck, de acuerdo con las recomendaciones contenidas en el manual de Scoops3D. Una ilustración del archivo Boundcheck de la prueba realizada con parámetros de resistencia menos competentes se muestra en la figura 6.3



**Figura 6.3:** Mapa de distribuciones del factor Boundcheck mencionado en la sección 4.4. Nótese que en su totalidad, el archivo raster Boundcheck está compuesto por valores 0 (blanco) y -9999 (transparente)



Se ha implementado una escala de calor para los valores de factor de seguridad a los pixeles de los archivos fos3D\_out.asc, aunque se han obtenido factores de seguridad hasta un valor de 100, a los pixeles con valor superior a 5 se les ha asignado la misma tonalidad de verde.

### 6.1.3. Parámetros de resistencia.

Los parámetros de resistencia para las pruebas preliminares se han seleccionado con base en las características geológicas descritas para el Miembro Urrao de la Fm. Penderisco y de los diarios de campo descargados de la base de datos SIMMA [12]. Los proyectos se

han nombrado en función de los parámetros de resistencia usados, separados por el carácter guión bajo y sin incluir decimales, por ejemplo 14\_45\_26

En el estudio consultado *Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering* [23] ademas de presentar similitud en las condiciones geológicas de la cuenca hidrográfica de la quebrada la linda, también se describen condiciones atmosféricas similares a las del área de estudio, como precipitaciones anuales entre 2000mm y 3000mm, humedad relativa de 84% y temperatura promedio de 26 grados centigrados. En dicha referencia se muestran los parametros de resistencia obtenidos del muestreo realizado a la formación Bukit Timah (granítica) y Jurong (sedimentaria). En ambas formaciones se han analizado varias muestras pertenecientes a distintos horizontes de meteorizacion separados de acuerdo a la denominacion de Little 1969. [21]

Adicionalmente se han realizado pruebas con parámetros correspondientes a areniscas y Limolitas frescas de formaciones estandarizadas como La Fm.Pottsville(Maryland, West Virginia, Ohio. EEUU) y Fm. Repetto (South California .EEUU)

Las muestras tomadas como referencia son:

	Denominación de la muestra	c	phi	gamma
Control	Arenisca Pottsville	14	45	2.6
	Limolita Repetto	34	32	2.34
Fm. Bukit Timah	Limo arenoso grado VI	26	27	2.55
	Arena limosa grado V	13	35	2.66
	Arena limosa grado V (mas profunda)	12	38	2.78
Fm. Jurong	Arena limosa Morada	125	42	2.65
	Arena limosa Morada	55	51	2.7
	Arena limosa Naranja	35	45	2.7
	Arena limosa Morada	225	50	2.75

**Tabla 6.1:** Parámetros de resistencia empleados en pruebas preliminares. Tomado de *Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering* [23]

#### 6.1.4. Pruebas Preliminares.

##### Parámetros de control.

Dado que no se está realizando el análisis de una localidad específica sino un área considerable, no se ha considerado necesario trabajar con cartografía de detalle. A manera de ensayo, se realizó una corrida, con la misma extensión del DEM mostrado en la figura 7.12 y la misma configuración ilustrada en la figura 4.7, empleando un DEM de tamaño de pixel de 5x5 metros. Bajo esta configuración la ejecución de Scoops3D se prolongó durante 30 horas sin obtener un resultado final.

A manera de control, 2 de las corridas preliminares se realizaron empleando los parámetros correspondientes a rocas sanas, es decir a la arenisca de la FM. Pottsville y Limolita de la Fm. Repetto. Los DEM resultantes se muestran en las figuras 6.4 y 6.5. Asimismo, entre los archivos de texto producto de ambas corridas, específicamente el archivo `.out.txt`, se puede observar



**siltySand\_12\_38\_27.out.txt****3D POTENTIAL FAILURE - GLOBAL MINIMUM**

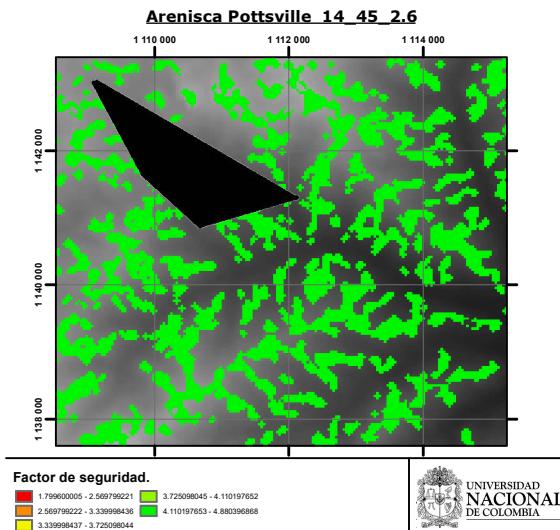
Bishop's 3D factor of safety:	15.1517
Ordinary 3D factor of safety:	15.1517
Volume (m ^3):	3.33350E+04
Horizontal surface area (m ^2):	5.78697E+03
Slip surface area (m ^2):	5.80648E+03
Weight (kg):	8.66710E+05

**34\_32\_23.out.txt****3D POTENTIAL FAILURE - GLOBAL MINIMUM**

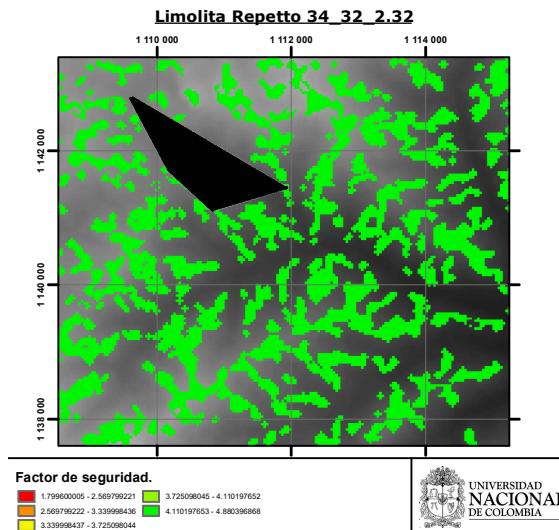
Bishop's 3D factor of safety:	12.2276
Ordinary 3D factor of safety:	12.2276
Volume (m ^3):	3.33350E+04
Horizontal surface area (m ^2):	5.78697E+03
Slip surface area (m ^2):	5.80648E+03
Weight (kg):	7.66705E+05

Nótese además que los factores de seguridad mínimos son 15.15 y 12.22 para los ensayos realizados con los parámetros de la Fm. Repetto y Fm. Pottsville respectivamente, y las masas de material removido son de 8,66<sup>5</sup> Kg y 7,66<sup>5</sup>Kg

### Parámetros de prueba: Fm. Bukit Timah.



**Figura 6.4:** Simulación con parámetros tomado de la arenisca de Fm. Pottsville.



**Figura 6.5:** Simulación con parámetros tomado de la limolita de Fm. Repetto.

Al usar los parámetros correspondientes a los distintos niveles de meteorización de la formación Bukit Timah, se puede apreciar que a medida que se incrementa el nivel de clasificación, mayores extensiones de área muestran reducción en el factor de seguridad. Se aprecia igualmente que los fondos de los valles así como los filos de las laderas no exhiben ocurrencia de superficies de falla, ello debido a la disminución en las pendientes existentes, aun cuando se ha buscado centros de esfera a alturas superiores a los 17.000 msnm.

### Parámetros de prueba: Fm. Jurong.

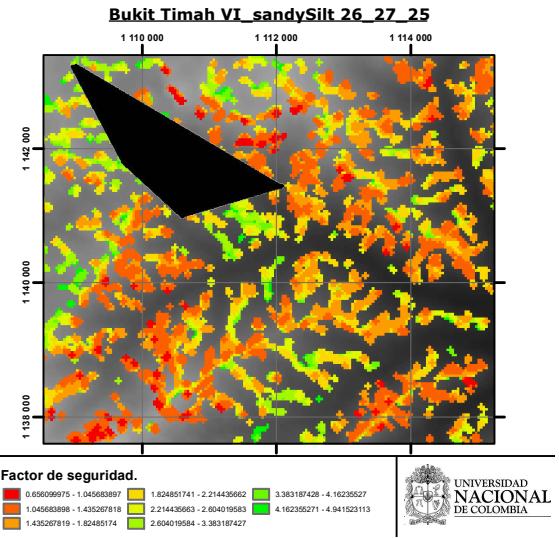


Figura 6.6

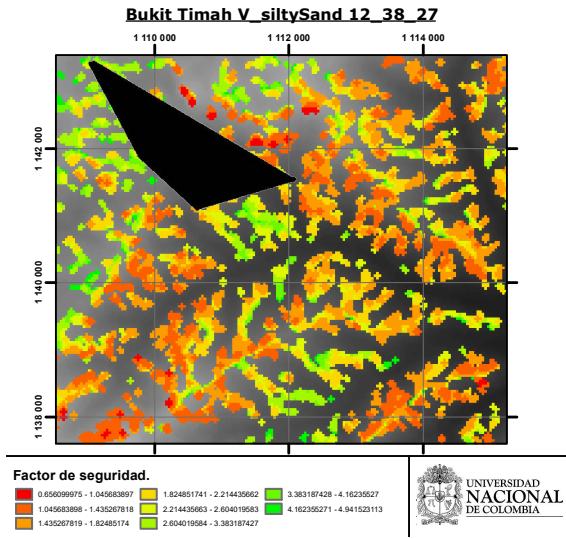


Figura 6.7

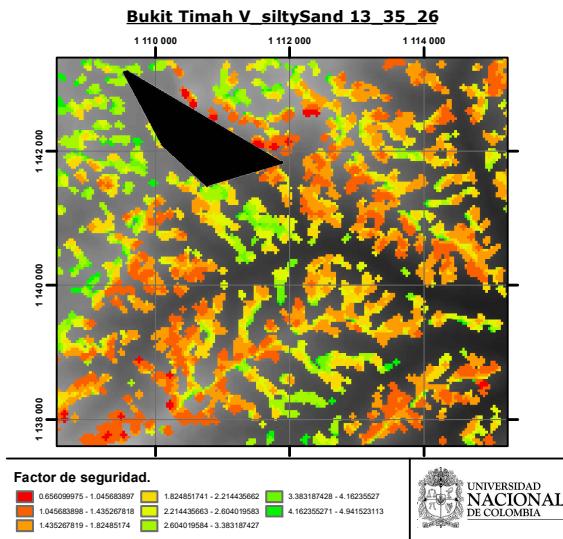


Figura 6.8

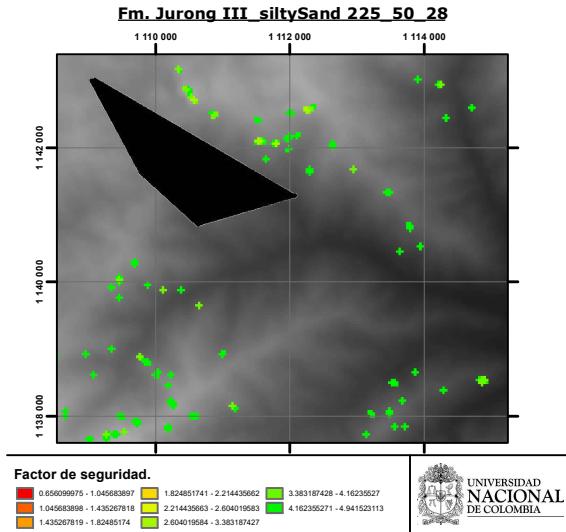


Figura 6.9

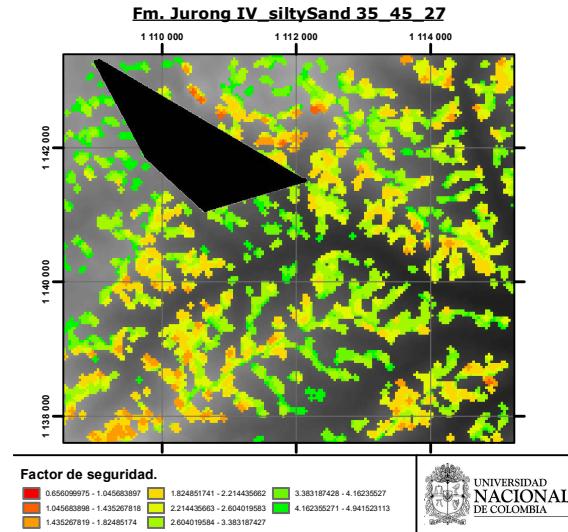


Figura 6.10

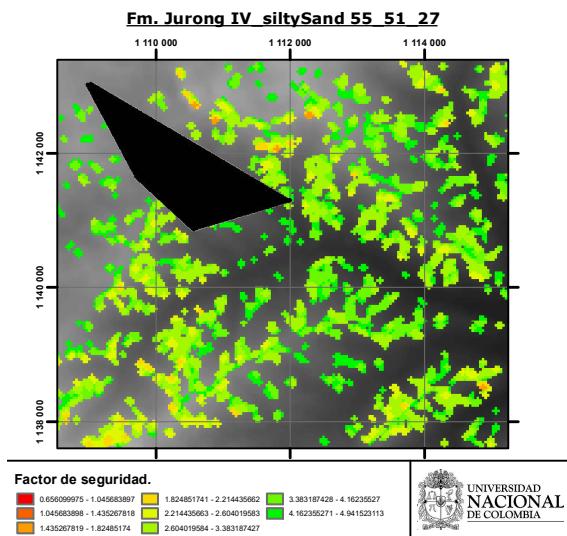


Figura 6.11

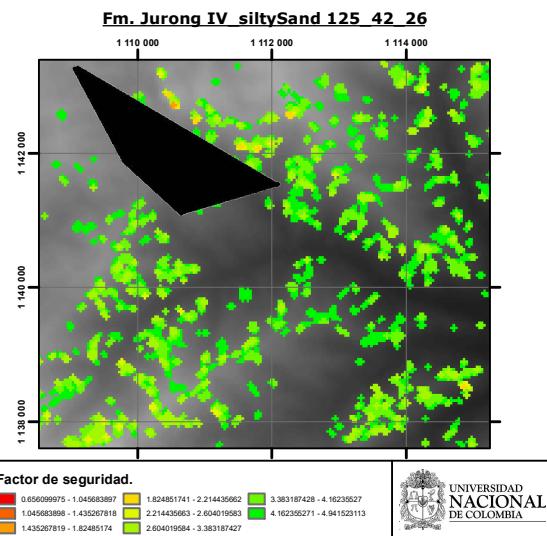


Figura 6.12

Se puede apreciar que en las pruebas realizadas con parámetros correspondientes a muestras más superficiales, la dispersión de colores rojizos y anaranjados es mas predominante sobre la zona de trabajo. Ello indicando una disminución en los factores de seguridad en las laderas de la zona de estudio. Se expluye la formación Barroso, representada en color negro, dado que no es un suelo muestreable para los ensayos de laboratorio.

### **6.1.5. Interpretacion**

Es posible apreciar, basado en los resultados obtenidos en la Subsección 6.1.4 que debido a la alta variabilidad de pendientes que se presentan en la zona de trabajo, las cuales varían desde bajas hasta altas y muy altas, sumado a la importante longitud de las laderas. Que el rango de factores de seguridad obtenidos con el software Scoops3D varía desde valores inferiores a 1 que implican falla, hasta valores que tienen como resultado factores de seguridad superiores a 5. Es importante tener en cuenta que esta simulación no contempla factores externos como la sobrecarga de la cobertura vegetal ni la actividad antrópica, que se da fuertemente en la zona y cuya presencia puede implicar la existencia en la zona de agentes químicos que debiliten la agregación de partículas y contribuya en una potencial disminución de la cohesión de los materiales.

Asimismo se puede apreciar que a medida que las pruebas realizadas con materiales que indican un estado más avanzado del proceso de meteorización, y por ende poseen una mayor proporción de fracción arcillosa y óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, tienen como resultado una marcada disminución en los factores de seguridad. Tal como se puede apreciar al comparar las imágenes 6.11 o 6.12 de las pruebas realizadas con los parámetros de resistencia de la Fm. Jurong.

Basado en el origen y tipo de materiales presentes en la cuenca hidrográfica de la Qda.La Linda, se esperaría que los parámetros de resistencia obtenidos de las muestras recolectadas en campo se aproximen considerablemente a los usados para la simulación ilustrada en las figuras 6.10 o 6.11.

# **7 Información de campo.**

## **7.1. Recorrido de campo**

El recorrido de campo se realizó entre los días 22 y 24 de noviembre de 2017. La zona recorrida se tuvo como propósito divisar y en lo posible muestrear aquellos lugares que mostraron menor factor de seguridad en las pruebas preliminares y apreciar el estado de las unidades geológicas que muestra la cartografía estudiada.

En campo se pudo corroborar la consistencia de la unidad geológica predominante  $K_{saau}$  (limolita), dicho material se pudo apreciar en todo el recorrido, con leve variación en su grado de meteorización, principalmente en zonas de abundante vegetación. La morfología abrupta de las laderas permitió apreciar abundantes cicatrices de anteriores desprendimientos de material, principalmente en sectores de alta pendiente y en el trazado de la carretera que une las poblaciones de La Mansa hacia Quibdó en el departamento de Chocó.



**Figura 7.1:** Lugar de toma de muestra de la estación 1. Aquí se descartaron las zonas con material inalterado para toma de muestra en tubos PVC. Dichas muestras se tomaron donde se podía observar que el suelo conservaba su estructura original. JFLR1

Se trabajó en dos estaciones, en cada una de las cuales se realizó la respectiva toma de muestra, siendo la primera de ellas la que más información proveería en los posteriores ensayos de laboratorio. Para la toma de muestra se tuvo la precaución de seleccionar un lugar que no presentase retrabajamiento del material y en el cual se pudiese observar que el suelo presentase unas condiciones representativas del material observado durante el recorrido realizados. Las muestras tomadas en la segunda estación se tomaron a una profundidad más somera (no mayor al metro) con la intención de posteriormente obtener los parámetros de resistencia de instancias más avanzadas de meteorización de la limonita. Esto dado que las cicatrices de movimientos en masa observadas aparentaban que aquellos eventos ocurridos se dieron hace un tiempo considerable (a juzgar por el crecimiento nueva cobertura vegetal). Asimismo, el testimonio obtenido de una habitante del lugar, corrobora que no son frecuentes movimientos que comprendan altos volúmenes de material, habiendo ocurrido el último

aproximadamente cinco años antes de la visita de campo.

La estación primera se realizó en las coordenadas  $5,8712778, -76,0848778$ , mientras que la estación segunda se realizó en las coordenadas  $5,8612472, -76,0927833$ . El recorrido realizado y la localización de las estaciones JFLR1 y JFLR2 se muestran en la figura 5.3  
A continuación se detalla la información de ambas estaciones.

### Muestras recolectadas

De la estación JFLR1 se obtuvo:

- muestra al interior de cuatro tubos PVC de 2" de diámetro y aproximadamente 15 cm de alto;
- un bloque de muestra inalterada de aproximadamente  $40cm \times 40cm \times 30cm$ ;
- una masa de 200 g de muestra alterada.

De la estación JFLR2 se obtuvo:

- Muestra al interior de 3 tubos PVC de 2" de diámetro y aproximadamente 15 cm de alto.



**Figura 7.2:** Momento de toma de muestra inalterada, se tomó muestra en bloque así como muestra confinada en tubos PCV de dos pulgadas. Estación JFLR1

## 7.2. Calsificación del suelo.

El horizonte muestreado concuerda con un Typic Hapludands [1] por su textura moderadamente fina y fina, coloración amarillenta y pardo oscuro, y ubicación en laderas de menor pendiente. Como luego se corroboraría con los ensayos de laboratorio, su capacidad de retención de humedad es media. De acuerdo con el Estudio General de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia [1] este tipo de suelo frecuentemente generan pendientes escarpadas, y presentan una alta susceptibilidad a la erosión y movimientos en masa.

## 7.3. Ensayos de laboratorio.

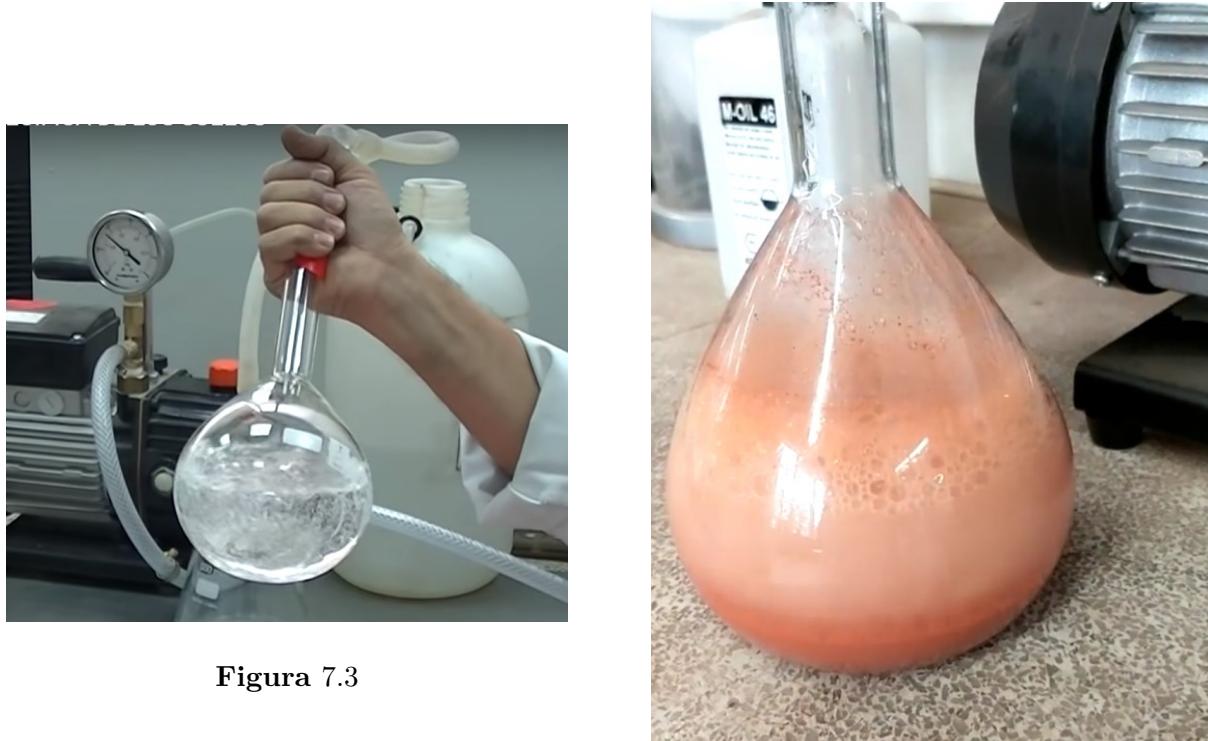
Las muestras recolectadas fueron analizadas en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Como resultado de los ensayos se pudo determinar una humedad natural del 21 %. La gravedad específica de los sólidos, según el procedimiento descrito en la norma ASTM C-127 fue de 2,53. Con estos valores se procedió a realizar los ensayos de corte directo según la norma ASTM D-380. Se decidió realizar los ensayos bajo condiciones de suelo saturado, es decir, habiendo sumergido totalmente la muestra de suelo durante un periodo de 24 horas, lo anterior con el propósito de obtener parámetros correspondientes a eventos de alta precipitación que puedan presentarse en la zona de trabajo.

### 7.3.1. Ensayo de gravedad específica. Norma ASTM C-127

La gravedad específica es la relación entre la masa de una muestra de suelo y la masa del mismo volumen de agua a la misma temperatura. Inicialmente se toma un picnómetro y se llena con una cantidad conocida de agua deslitala. Acto seguido se extrae el aire disuelto en el agua por medio de una bomba de vacío. El nivel del agua no debe sobrepasar la marca indicada en la boca del picnómetro, de esta manera se garantiza un volumen conocido de agua. Acto seguido se toman 4 mediciones de la masa y temperatura del picnómetro. En la figura 7.3 se muestra el picnómetro con agua durante el proceso de extracción de aire. Una vez se tiene dicha información se repite el mismo procedimiento, esta vez incluyendo 50Gr de muestra tamizada, específicamente el pasante de la malla 200. Poniendo atención de no sobrepasar la marca en la boca del picnómetro. Se toman nuevamente 4 mediciones de peso y temperatura. En la figura 7.4 se muestra el picnómetro con la muestra de suelo de la estación JFLR 1, durante el proceso de extracción de aire.

La gravedad específica está dada por la fórmula

$$Gs = \frac{Ws \times Ws}{Wpw + Ws - Wps}$$

**Figura 7.3****Figura 7.4**

El ensayo se repitió 2 veces, usando los picnómetros 2 y 4 del laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Medellín. Reemplazando los valores obtenidos se obtiene.

Picnómetro 2.

$$Gs = \frac{53.1 \times 1}{661.94 + 56.33 - 696.33}$$

$$Gs = 2,56$$

Picnómetro 4.

$$Gs = \frac{57.76 \times 1}{667.97 + 57.76 - 702.68}$$

$$Gs = 2,501$$

Por lo que promediando se obtiene un valor de 2.53

### 7.3.2. Ensayo de corte directo. Norma ASTM D-380

En el ensayo de corte directo se inserta una muestra de suelo inalterado (no desagregado) en la caja de corte y se sumerge durante 6 horas en agua destilada. Pasado ese tiempo se asume que la muestra ha adquirido su máximo estado de saturación. Esto se hace con el propósito de que simular el estado de mayor debilidad estructural. figura 7.5 Simultáneamente se realiza se realiza el proceso de carga de esfuerzos normales (consolidación). Sobre la esfera plateada que se muestra en la figura 7.6 se imprime un esfuerzo normal al esfuerzo de cizalla. Esto con el propósito de simular el esfuerzo de carga normal que un cuerpo de suelo ejerce sobre sí mismo. El montaje completo se ilustra en la figura 7.7

Posteriormente inicia el proceso de aplicación de esfuerzos de cizalla, la velocidad de movimiento de las partes de la caja de cizalla fue de 0.06 mm por minuto. Hasta obtener un desplazamiento de entre 12 % y 15 % del diámetro de la caja de cizalla. El equipo usado fue Humboldt HM-5760.3F, que registra los esfuerzos automáticamente en una hoja de cálculo. El resultado final se muestra a continuación.



**Figura 7.8:** Muestra de la estación JFLR1 en su estado posterior al ensayo de corte directo. Desplazamiento total 6.6 mm



**Figura 7.5**



**Figura 7.6**

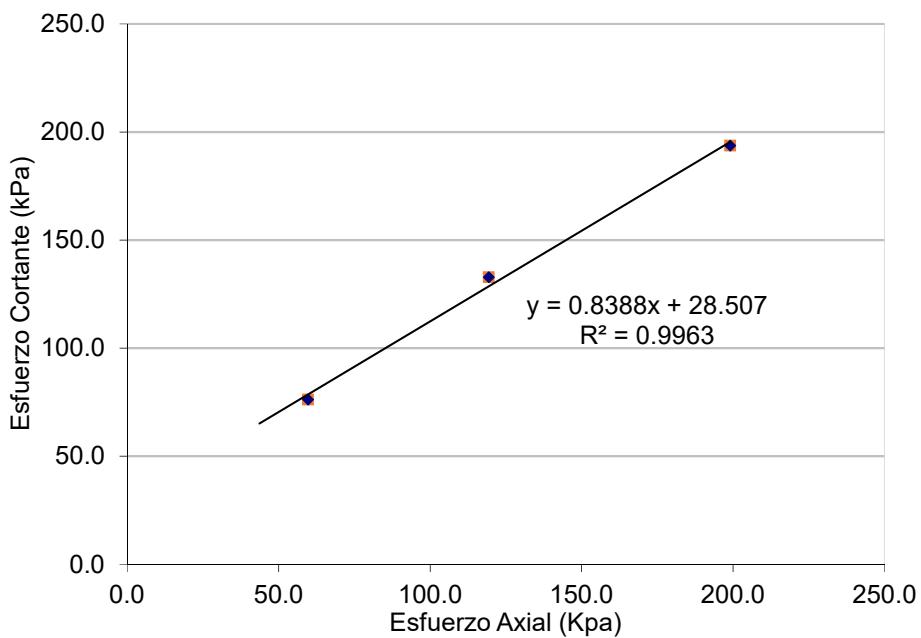


**Figura 7.7**

**Tabla 7.1:** Características físicas de las muestras sometidas al ensayo de corte directo.

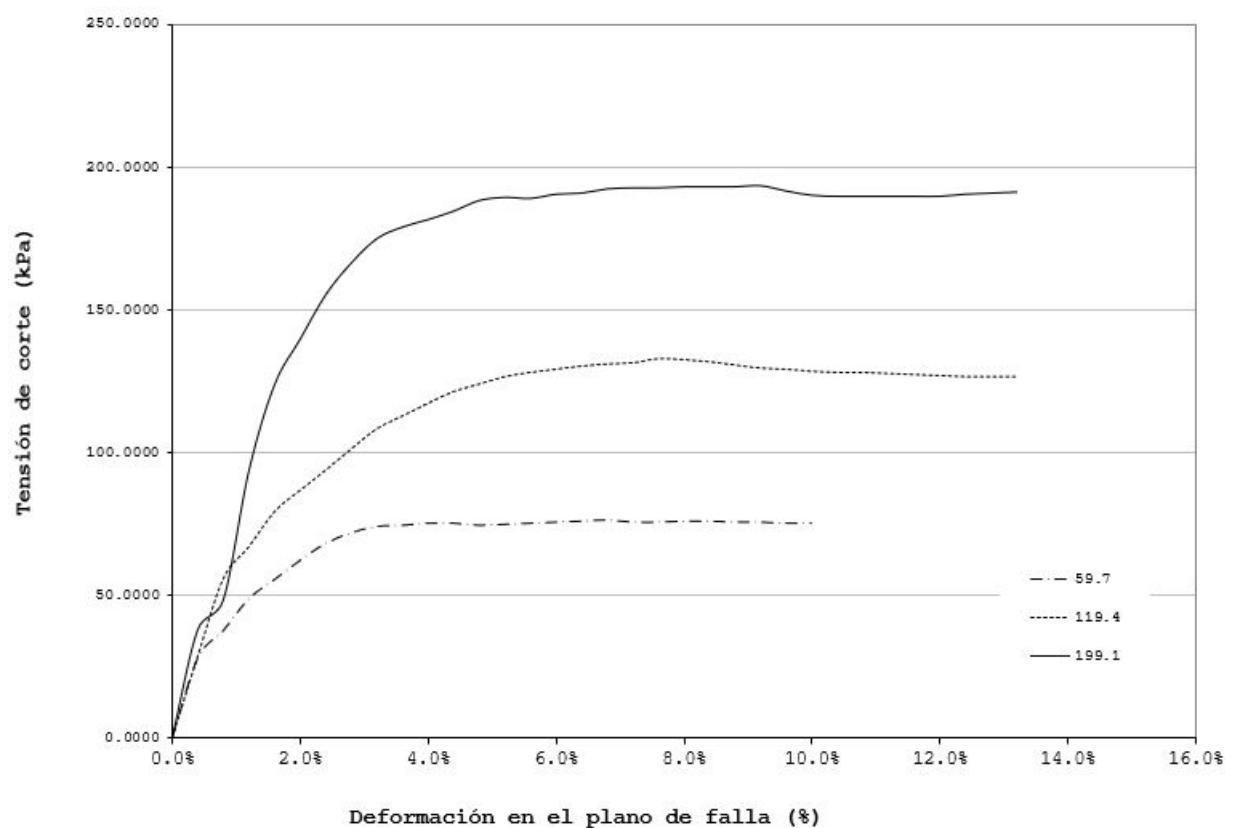
	Altura Inicial (mm)	Diámetro (mm)	Peso inicial (g)	Tension total(kPa)
Muestra JFLR 1.1	25.28	50.09	80.8	59.7
Muestra JFLR 1.2	25.38	50.09	90.83	119.4
Muestra JFLR 1.3	25.38	50.09	87.44	199.1

Los parámetros de resistencia obtenidos son ángulo de fricción de  $40^\circ$  y cohesión de 29 kPa. Las hojas de cálculo de estos ensayos se adjuntan como anexos al presente trabajo. En la tabla 7.2 se exponen los valores de resistencia al corte obtenido por cada muestra y la carga aplicada. Y en la figura 7.9 se grafican los puntos máximos de resistencia de cada muestra

**Figura 7.9:** Estimación de parámetros de resistencia al corte basados en los datos de las muestras analizadas en la estación 1.

**Tabla 7.2:** Resultado de esfuerzo cortante para cada etapa de carga (Esfuerzo Axial) obtenida para las 3 muestras recolectadas en la estación 1.

Muestra	JFLR 1.1	JFLR 1.2	JFLR 1.3
Esfuerzo Cortante ( $kPa$ )	76.2	132.8	194
Esfuerzo Axial ( $kPa$ )	59.7	119.4	199.1
Angulo de Fricción	40		
Cohesión ( $kPa$ )	29		



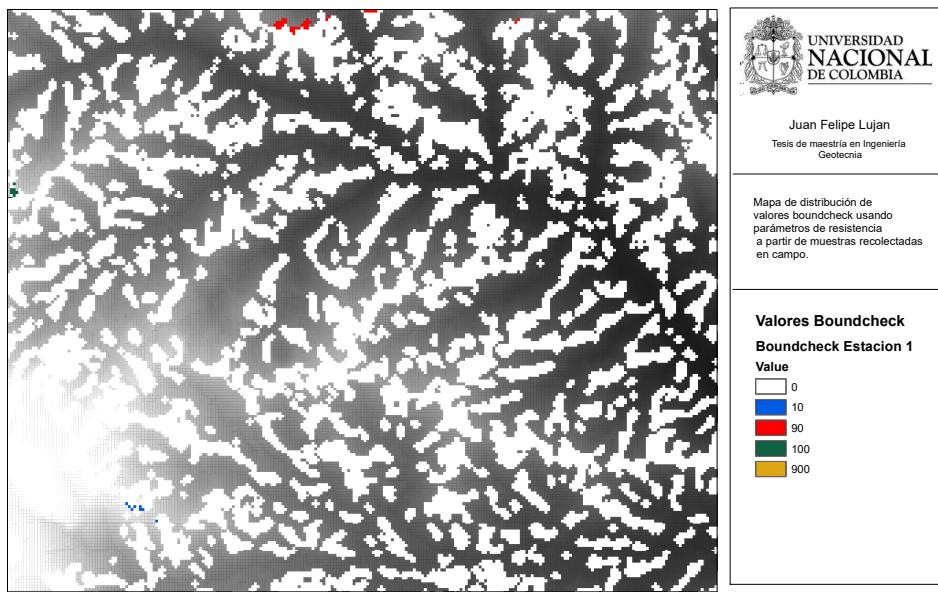
**Figura 7.10:** Diagrama tensión deformación para las muestras de la estación 1. Se puede observar como se presenta un comportamiento plástico al haber alcanzado un dial de deformación que se encuentra entre un 10 % y un 14 % del diámetro de la muestra.

**Estación 2.** Las muestras de los tuvos PCV recolectadas en la estación JFLR2 recibieron la misma preparación realizada sobre las muestras de la estación JFLR1. Sin embargo al momento de realizar el ensayo de corte directo, se produjo una deformación inusual en este ensayo, provocando que un lado de la muestra cediera y se comprimiera más que otro. Dicha deformación ocurría a lo largo de la ejecución del ensayo produciendo una deformación vertical progresiva a medida que se presentaba la deformación lateral producida por el esfuerzo cortante, invalidando los datos obtenidos. El procedimiento se revisó meticulosamente con ayuda del personal de laboratorio, obteniendo el mismo resultado en repetidas ocasiones. Motivo por el cual no fue posible obtener una envolvente para las muestras pertenecientes a dicha estación.



**Figura 7.11:** Muestra recolectada de la estación JFLR2 posterior al ensayo de corte directo. Nótese la deformación anormal en la parte izquierda del fragmento superior de la muestra, el cual presenta un grado de compresión mayor a su lado opuesto, invalidando el ensayo.

**Scoops3D.** Tomando los resultados de laboratorio expuestos anteriormente se procedió a ingresar los valores correspondientes al ángulo de fricción, cohesión y gravedad específica en Scoops3D. Se mantuvo la configuración de caja de búsqueda descrita en la figura 6.2.



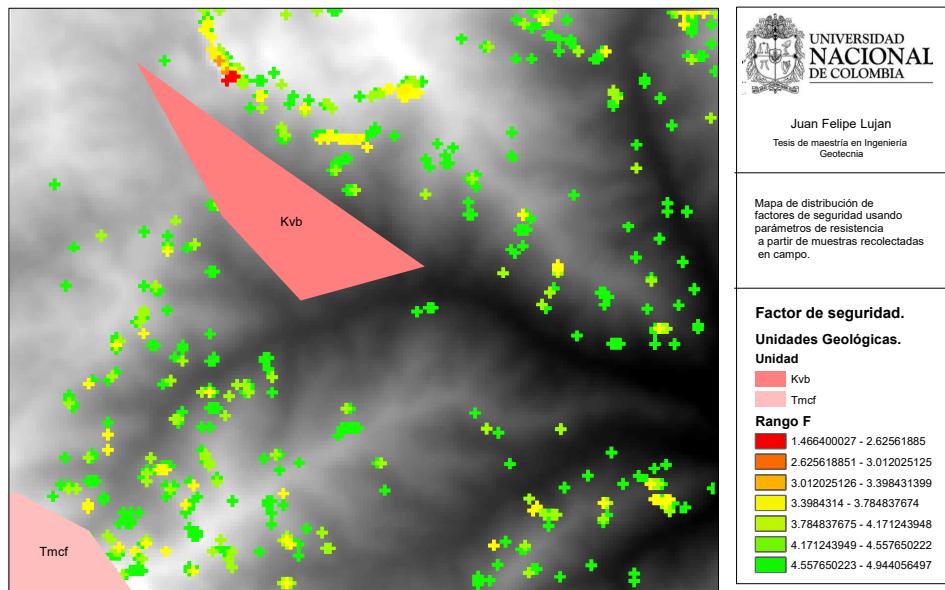
**Figura 7.12:** Control de calidad a la corrida de Scoops3D con datos de campo por media del análisis del archivo de salida Boundcheck. Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar en el archivo de salida boundcheck que la caja de búsqueda propuesta en las pruebas preliminares es aplicable los datos obtenidos de las muestras recolectadas en campo. Dicho comportamiento era esperado debido a la abundancia de pendientes pronunciadas en esta zona del municipio de Ciudad Bolívar.

Los píxeles marcados con color azul en el sector suroccidental de la zona de trabajo indican que la extensión de la caja de búsqueda hacia el extremo sur fue una limitante para aplicar el método bishop (centro de la superficie de falla por fuera de la caja de búsqueda, en dirección sur) lo mismo ocurre con los píxeles marcados de color rojo hacia el extremo norte de la zona de trabajo (centro de la superficie de falla por fuera de la caja de búsqueda, en dirección norte)

Sin embargo, dado que la cuenta de píxeles donde se presenta dicho comportamiento

es de 89 sobre un total de 28057, se puede decir que la caja de búsqueda usada es aplicable en un 99.996 % a la zona de trabajo. Para aumentar la cobertura sería necesario realizar pruebas en equipos de computo con mayores capacidades de computo a las descritas en el capítulo 5.



**Figura 7.13:** Resultado de la ejecución de Scoops 3D usando la configuración usada en las pruebas preliminares (caja de búsqueda).

Como resultado del análisis probabilístico por medio del método Bishop utilizando las valores de resistencia obtenidos en los análisis de laboratorio realizadas a las muestras recolectadas del área de trabajo se obtiene el mapa de *distribuciones de factores de seguridad* presentado en la figura 7.13. Donde se analizaron un total de 1 665 954 superficies de falla.

Se puede apreciar que, en los extremos sur occidental (a lo largo de las laderas que componen la cuenca de la quebrada La Linda) y norte de la zona de trabajo se presentan acumulaciones de lugares con disminución de factores de seguridad los cuales varían frecuentemente entre 3 y 5. Se expluye del análisis la zona donde se localiza la formación Barroso.

El sector con menor valor de F se encuentra ligeramente al norte de la Formación

Barroso(Kvb) donde los suelos de la Formación Penderisco alcanzan  $F$  de 1.91. Mediante las métricas entregadas por Scoops3D se puede determinar que dicha zona está compuesta por 534,24 kg de material y su volumen es de 211,18m<sup>3</sup>

Aún considerando un valor de  $F$  mayor a 3.0 , en la zona de trabajo se encontraron un total de 1280 píxeles con  $F$  inferior a este valor. Teniendo en cuenta que el área de cada píxel es de 1460,65 m<sup>2</sup> el área equivalente bajo tal *cutoff* es de 1'869, 636m<sup>2</sup>

# **8 Conclusiones y Recomendaciones.**

## **8.1. Conclusiones**

Si bien los mapas de distribución de  $F$  obtenidos en las pruebas preliminares no guardan mayor correlación con el generado usando los parámetros resultantes de pruebas de laboratorio, la etapa de ensayos preliminares fue bastante útil para conocer el flujo de trabajo necesario una vez se obtuvieron los parámetros de resistencia de las muestras recolectadas en campo.

Realizar un muestreo mas denso en dicha zona, y evaluar la influencia de los estratos arenosos y limosos incluidos en la descripción lítologica del Miembro Urrao. Para lo cual es necesario realizar el respectivo modelamiento geológico e incluir los estratos encontrados en Scoops3D

La zona con menores factores de seguridad encontrados en el DEM analizado se encuentran fuera de la cuenca hidrográfica de la quebrada La Linda. dicha zona posee pendientes que promedian el 80

Si bien no fue posible obtener los parámetros de resistencia de la estación 2. Las muestras recolectadas en la estación 1 presentaron una fuente confiable de información al presentar un valor de  $R^2$  superior a 99 % al momento de graficar la envolvente con los datos de corte directo.

Aunque se han encontrado zonas con factor de seguridad considerablemente bajo, estas no poseen alta cobertura, ni tampoco se han detectado masas de suelo de gran embergadura con  $F$  inferior a 3.0. Sin embargo, la distribución de zonas con  $F$  cercano a 3.0 es amplia (incluso ligeramente inferior a 3.0. Llegándose a presentar casos en los que dichas zonas coinciden espacialmente con lugares habitados en la vereda Monte Loro.

La posibilidad de extender los métodos tradicionales de equilibrio límite a 2 dimensiones y zonas extensas permite detectar sitios de baja estabilidad y sus posibles afectaciones a comunidades que allí habiten, lo cual tomaría mas tiempo (o pasar desapercibido) si se realiza un estudio de cartografía básica y equilibrio límite sobre cortes longitudinales.

El mapa de distribución de factores de seguridad obtenido guarda alta correlación con lo visto en campo y corroborado por la base de datos SIMMA, movimientos en masa (o cicatrices de los mismos) dispersos, de baja cobertura.

En la gran mayoría de los casos, no es necesario el desarrollo interno de una herramienta computacional para realizar análisis de equilibrio límite en 3 dimensiones. Simplemente con los valores de cohesion, ángulo de fricción y peso específico tradicionalmente usado en Bishop simplificado para dos dimensiones puede usarse como insumo para extender el análisis de equilibrio límite a 3D dimensiones mediante el uso de herramientas computacionales ya disponibles como Scoops3D.

Se puede mejorar considerablemente la calidad del producto generado por Scoops3D si se implementa de información SIG de alto nivel de detalle, toda vez que ello reduce la aparición de multiples subsets por esfera de búsqueda. Esto a su vez, implica la necesidad de equipos de computo con altas capacidades de procesamiento.

La posibilidad de extender los métodos tradicionales de equilibrio límite a 2 dimensiones y zonas extensas permite detectar sitios de baja estabilidad y sus posibles afectaciones a comunidades que allí habiten, lo cual tomaría mas tiempo (o pasar desapercibido) si se realiza un estudio de cartografía básica y equilibrio límite sobre cortes longitudinales.

## 8.2. Recomendaciones

Previo al uso de la herramienta Scoops3D se recomienda realizar un proceso de control de calidad sobre el DEM a ser utilizado. Con el propósito de extraer los metadatos correspondientes a extensión horizontal y vertical. Estos valores son necesarios para calcular las dimensiones de la caja de búsqueda que se empleará en la ejecución de Scoops3D.

La extensión vertical de la caja de búsqueda se recomienda que sea 3 veces la elevación máxima presente en la zona de estudio. Mientras que la extensión horizontal puede ser un 10 % superior a la embergadura horizontal del DEM.

Limitar la extension del archivo DEM suministrado a Scoops3D únicamente en la zona de trabajo requerida, esto permite reducir significativamente tiempo de ejecución de Scoops3D. Scoops3D no permite realizar modificación alguna a los archivos de entrada, por lo que este proceso debe realizarse previamente. Para lo cual se recomienda emplear herramientas SIG como QGIS o ArcGIS.

Seleccionar siempre la opción de Bishop dentro del menu de selección de análisis de estabilidad, ya que esta opción calcula el factor de seguridad tanto por Bishop simplificado como por el método de Fellenius.

Siempre realizar corridas de prueba en Scoops3D con parámetros de resistencia estimados, para evaluar la óptima configuración de Scoops3D, específicamente para verificar que la caja de búsqueda no sea una limitante al momento de evaluar los métodos bishop y fellenius al DEM usado. Desplegar \_boundcheck\_out.asc. con un visor de DEM ASCII y revisar el archivo \_out.txt

Al utitlizar modelos de elevación digital de alta resolución ( $5m^2$  o inferior tamaño de pixel) es aconsejable usar servicios de computación en la nube como Google Cloud Platform (GCP) o Amazon Web Services (AWS) y la línea de comando (CLI) en Python. Esto para acelerar los tiempos de ejecución de Scoops3D.

En caso de necesitar modificar el código fuente de Scoops3D se recomienda usar una API de alto rendimiento como Tensorflow.

# Bibliografía

- [1] AGROLÓGICA, Instituto Geográfico. Agustín Codazzi.-S. ; DE ESTADÍSTICA, Colombia. Departamento Administrativo N.: *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Antioquia.* Vol. 2. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, 2000
- [2] ALBATAINEH, Nermene: *Slope stability analysis using 2D and 3D methods*, University of Akron, Tesis de Grado, 2006
- [3] ALONSO, E ; GENS, A ; LLORET, A ; DELAHAYE, C: Effect of rain infiltration on the stability of slopes. En: *PROCEEDINGS OF THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS/UNSAT'95/PARIS/FRANCE/6-8 SEPTEMBER 1995. VOLUME 1*, 1995
- [4] BAILEY, William A. ; CHRISTIAN, John T.: *ICES LEASE-I: A Problem-oriented Language for Slope Stability Analysis: Users Manual*. Soil Mechanics Division and Civil Engineering Systems Laboratory, 1969
- [5] CHEN, Rong-Her J.: Three-dimensional slope stability analysis. (1981)
- [6] COLOMBIANO, Servicio G. *Mapa. Geología de la plancha 165 Carmen de Atrato.* 1984
- [7] COLOMBIANO, Servicio G.: Geología y geoquímica de la plancha 165 Carmen de Atrato. (1986), p. 8

- [8] COLOMBIANO, Servicio G.: Geologia y geoquimica de la plancha 165 Carmen de Atrato. (1986), p. 50
- [9] COLOMBIANO, Servicio G.: Geologia y geoquimica de la plancha 165 Carmen de Atrato. (1986), p. 60
- [10] COLOMBIANO, Servicio G.: Geologia y geoquimica de la plancha 165 Carmen de Atrato. (1986), p. 32
- [11] COLOMBIANO, Servicio G.: Geologia y geoquimica de la plancha 165 Carmen de Atrato. (1986), p. 86–90
- [12] COLOMBIANO, Servicio G.: Plancha 165, Libreta de campo Consuelo Durango. (2013)
- [13] COLOMBIANO, Servicio G.: Memoria explicativa de la zonificacion de la susceptibilidad y la amenaza relativa por movimientos en masa escala 1:100000 Plancha 165 - Carmen de Atrato. (2014), p. 21
- [14] FELLENIUS, Wolmar: Calculation of stability of earth dam. 4 (1936), p. 445–462
- [15] FREDLUND, DG ; KRAHN, J: Comparison of slope stability methods of analysis. En: *Canadian geotechnical journal* 14 (1977), Nr. 3, p. 429–439
- [16] HIRT, Christian ; FILMER, MS ; FEATHERSTONE, WE: Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. En: *Australian Journal of Earth Sciences* 57 (2010), Nr. 3, p. 337–347
- [17] HUANG, Ching-Chuan ; TSAI, Cheng-Chen: New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis. En: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126 (2000), Nr. 10, p. 917–927
- [18] HUANG, Yang H. [u. a.]: *Slope stability analysis by the limit equilibrium method: fun-*

- damentals and methods.* American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013. – 238 p.
- [19] HUANG, Yang H. [u. a.]: *Slope stability analysis by the limit equilibrium method: fundamentals and methods.* American Society of Civil Engineers (ASCE), 2013. – 242 p.
- [20] HUNGR, Oldrich ; SALGADO, FM ; BYRNE, PM: Evaluation of a three-dimensional method of slope stability analysis. En: *Canadian geotechnical journal* 26 (1989), Nr. 4, p. 679–686
- [21] LITTLE, AL: The Engineering Classification Of Residual Tropical Soils. En: *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*, 1969
- [22] MUKHERJEE, Sandip ; JOSHI, Pawan K. ; MUKHERJEE, Samadrita ; GHOSH, Aniruddha ; GARG, RD ; MUKHOPADHYAY, Anirban: Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). En: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21 (2013), p. 205–217
- [23] RAHARDJO, Harianto ; AUNG, KK ; LEONG, Eng C. ; REZAUR, RB: Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. En: *Engineering Geology* 73 (2004), Nr. 1-2, p. 157–169
- [24] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: *Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape.* 2015
- [25] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. En: *Tech. Rep. US Geological Survey Techniques and Methods.* 2015, p. 8
- [26] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. En: *Tech. Rep. US Geological Survey Techniques and Methods.* 2015, Kapitel 2, p. 27

- [27] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. En: *Tech. Rep. US Geological Survey Techniques and Methods.* 2015, Kapitel 2, p. 19
- [28] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. En: *Tech. Rep. US Geological Survey Techniques and Methods.* 2015, Kapitel 2, p. 55
- [29] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. En: *Tech. Rep. US Geological Survey Techniques and Methods.* 2015, Kapitel 2, p. 7–21
- [30] REID, Mark E. ; CHRISTIAN, Sarah B. ; BRIEN, Dianne L. ; HENDERSON, S: Software to Analyze Three Dimensional Slope Stability Throughout a Digital Landscape. En: *Tech. Rep. US Geological Survey Techniques and Methods.* 2015, p. 13
- [31] SGC: Memoria Explicativa de la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza Relativa por Movimientos en Masa Escala 1:100.000 Plancha 165 - Carmen de Atrato. (2013)
- [32] SPENCER, E: A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. En: *Geotechnique* 17 (1967), Nr. 1, p. 11–26
- [33] STARK, Timothy D. ; EID, Hisham T.: Performance of three-dimensional slope stability methods in practice. En: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering* 124 (1998), Nr. 11, p. 1049–1060
- [34] TACHIKAWA, Tetushi ; KAKU, Manabu ; IWASAKI, Akira ; GESCH, Dean B. ; OIMOEN, Michael J. ; ZHANG, Zheng ; DANIELSON, Jeffrey J. ; KRIEGER, Tabatha ; CURTIS, Bill ; HAASE, Jeff [u. a.]: ASTER global digital elevation model version 2-summary of validation results / NASA. 2011. – Informe de Investigación
- [35] TACHIKAWA, Y ; SHIIBA, M ; TAKASAO, T: DEVELOPMENT OF A BASIN GEO-

MORPHIC INFORMATION SYSTEM USING A TIN-DEM DATA STRUCTURE 1.  
En: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 30 (1994), Nr. 1, p.  
9–17

- [36] ZHANG, Jian: *A comparison of digital photogrammetric and LIDAR high resolution digital elevation models.* West Virginia University Libraries, 2002