

Zonificación de la amenaza por movimientos en masa en un sector de la zona norte de
Bucaramanga, Santander

Paula Andrea Montoya Roa

Trabajo de Grado para optar al título de ingeniera civil

Director

Wilfredo Del Toro Rodríguez

Magíster ingeniería civil

Codirector

Oscar Fabián Sánchez Ortiz

Ingeniero Civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Civil
Bucaramanga
2019

Agradecimientos

Primeramente, a Dios y mi familia, porque sin ellos que son el motor de mi vida nada de esto hubiese sido posible.

Al póker y el tinto, la excusa perfecta para estar rodeada de las personas más increíbles que esta experiencia educativa me pudo dejar.

A todos aquellos que aportaron en mi crecimiento emocional e intelectual y que estuvieron allí, apoyándome y animándome a seguir adelante, a no desfallecer.

Y finalmente, dar mi infinita gratitud a mi codirector Oscar, por todas aquellas enseñanzas que se esforzó por dejarme, pese a mi terquedad, y, sobre todo, por la paciencia colosal que me tuvo.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	14
1. Objetivos.....	16
1.1 Objetivo General.....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1 Movimientos en masa.....	17
2.2 Tipos de deslizamientos.....	17
2.2.1 Deslizamiento rotacional.....	17
2.2.2 Deslizamiento traslacional.....	18
2.3 Geomorfología.....	19
2.4 Ingeniería geológica.....	19
2.5 Curvas IDF.....	19
2.6 Análisis de estabilidad.....	19
2.7 Amenaza.....	22
3. Área de estudio.....	22

4. Metodología.....	23
4.1 Formulación del modelo Geológico Geotécnico.....	25
4.2 Unidades de Geología para Ingeniería (UGI).....	27
4.3 Elementos Geomorfológicos.....	29
4.4 Recopilación de información existente sobre exploración geotécnica.....	29
4.5 Análisis de las unidades geotécnicas homogéneas.....	31
4.6 Factores Detonantes.....	32
4.6.1 Lluvia.....	32
4.6.2 Sismo.....	42
4.7 Cálculo de la amenaza.....	43
4.7.1. Probabilidad de falla por deslizamientos.....	44
4.7.2 Probabilidad de falla total.....	47
5. Resultados.....	47
5.1 Definición de las UGI.....	47
5.2 Definición de unidades de comportamiento geotécnico homogéneo y su modelo geológico - geotécnico asociado.....	47
5.3 Efectos de la lluvia en el análisis de estabilidad.....	51
5.4 Análisis de estabilidad.....	55

5.4.1 Falla en deslizamientos superficiales.	55
5.4.2 Falla en deslizamientos profundos..	57
5.5 Zonificación y mapa de amenaza	58
6. Conclusiones	60
7. Recomendaciones	61
Referencias Bibliográficas.....	63

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Métodos de análisis equilibrio limite</i>	21
Tabla 2 <i>Unidades geológicas para ingeniería según su origen</i>	28
Tabla 3 <i>Valores de coeficientes de las ecuaciones 5 a 8.</i>	35
Tabla 4 <i>Numero de curva de escorrentía para condiciones de humedad antecedente normal....</i>	39
Tabla 5 <i>Clasificación de humedad antecedente según precipitación acumulada</i>	40
Tabla 6 <i>Modelo geológico geotécnico conceptual para deslizamientos superficiales</i>	50
Tabla 7 <i>Modelo geológico geotécnico conceptual para deslizamientos profundos</i>	50
Tabla 8 <i>Valores de frente húmedo asociados a un tiempo de retorno y unidad geotécnica</i>	52
Tabla 9 <i>Estimación del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada</i>	54
Tabla 10 <i>Rango para clasificar la amenaza según la probabilidad de falla anual</i>	59

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Deslizamiento rotacional en suelo	18
<i>Figura 2.</i> Deslizamientos traslacionales del suelo.	18
<i>Figura 3.</i> Análisis de estabilidad ilustrativo..	20
<i>Figura 4.</i> Fuerzas analizadas en el método de Spencer.....	22
<i>Figura 5.</i> Norte de Bucaramanga Santander, zona de estudio para análisis de amenaza por movimientos en masa	23
<i>Figura 6.</i> Esquema Metodológico.	24
<i>Figura 7.</i> Esquema representativo de un modelo geológico geotécnico.	26
<i>Figura 8.</i> Exploración geotécnica recolectada.....	30
<i>Figura 9.</i> Frente húmedo por lluvia.....	36
<i>Figura 10.</i> Variables del método del SCS para el cálculo de las abstracciones de una tormenta.....	38
<i>Figura 11.</i> Representación y ejemplo del cálculo de la profundidad del nivel freático asociado a un periodo de retorno de 20 años.....	41
<i>Figura 12.</i> Curva de amenaza, aceleración máxima del terreno por fuentes para Bucaramanga.	42
<i>Figura 13.</i> Parámetros para el análisis de estabilidad por talud infinito bajo la acción del nivel freático.....	45
<i>Figura 14.</i> Mapa de unidades de geología para ingeniería (UGI) para la zona de estudio.	48
<i>Figura 15.</i> Modelo de unidades homogéneas profundas.....	49
<i>Figura 16.</i> Curvas LDF para la estación de la Universidad Industrial de Santander.	51

<i>Figura 17.</i> Posición media de la tabla de agua sobre el área de estudio a partir de los sondeos de exploración geotécnica recopilados.	53
<i>Figura 18.</i> Flujograma para análisis de falla en deslizamientos superficiales.	56
<i>Figura 19.</i> Amenaza a deslizamientos superficiales para (a) Frente húmedo y (b) Tabla de agua.....	57
<i>Figura 20.</i> Convergencia del método Híper Cubo Latino.	58
<i>Figura 21.</i> Perfil tipo analizado en el software Slide	58
<i>Figura 22.</i> Amenaza total del área de estudio.	59

Lista de Apéndices

“Los apéndices están adjuntos en el CD y puede visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A. Mapa de Elementos Geomorfológicos

Apéndice B. Mapa de Unidades de Geología para Ingeniería – UG

Apéndice C. Unidades Geotécnicas Homogéneas

Apéndice D. Profundidad Nivel Freático – Actual

Apéndice E. Profundidad Nivel Freático - Tiempo de Retorno 2.3 años

Apéndice F. Profundidad Nivel Freático - Tiempo de Retorno 5 años

Apéndice G. Profundidad Nivel Freático - Tiempo de Retorno 10 años

Apéndice H. Profundidad Nivel Freático - Tiempo de Retorno 20 años

Apéndice H. Profundidad Nivel Freático - Tiempo de Retorno 20 años

Apéndice J. Profundidad Nivel Freático - Tiempo de Retorno 100 años

Apéndice K. Amenaza a deslizamientos superficiales

Apéndice L. Perfiles Geotécnicos

Apéndice M. Amenaza a deslizamientos profundos

Apéndice N. Clasificación de la Amenaza

Resumen

TITULO: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN UN SECTOR DE LA ZONA NORTE DE BUCARAMANGA *

AUTOR: PAULA ANDREA MONTOYA ROA**

PALABRAS CLAVE: Evaluación de amenaza, estabilidad de taludes, deslizamientos, factor de seguridad, probabilidad, Colombia.

DESCRIPCIÓN:

La amenaza por la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC) para movimientos en masa a escala 1:2000 es controlada por factores condicionantes y detonantes. Para la zona norte de Bucaramanga se siguió la guía del SGC utilizando la cartografía de geología, geomorfología, uso y cobertura de suelo de 0.7 km² como factores condicionantes para la definición de un modelo geológico - geotécnico alimentado por más de 700 metros de perforaciones y 130 ensayos de penetración estándar (SPT). Además, se calcularon los factores detonantes de sismo por medio de curvas de amenaza sísmica para ciudades capitales y el factor lluvia por medio del uso de curvas sintéticas de lámina duración y frecuencia (LDF) estimadas con el método de ajuste a la distribución Gumbel por momentos ponderados por probabilidad (MPP). Se llevó a cabo un análisis probabilístico por medio del método de muestreo de estimativos puntuales para analizar la estabilidad a deslizamientos superficiales, y el método del Híper Cubo Latino para los deslizamientos profundos. Se encontró que las Unidades de Geología para Ingeniería (UGI) como factor condicionante tienen un efecto más importante que el de los factores detonantes para la zonificación de amenaza a deslizamientos superficiales y que los deslizamientos profundos controlan la zonificación total de la amenaza.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Msc, Wilfredo Del Toro Rodríguez. Codirector: Ing. Oscar Fabián Sánchez Ortiz

Abstract

TITULO: HAZARD ZONING MAP BY MASS MOVEMENTS IN THE NORTHERN AREA OF BUCARAMANGA *

AUTOR: PAULA ANDREA MONTOYA ROA**

PALABRAS CLAVE: Hazard assessment, slope stability, landslides, safety factor, probability, Colombia.

DESCRIPCIÓN:

The hazard by the methodology of the Colombian Geological Service (SGC) for landslides at a 1: 2000 scale is controlled by conditioning and triggering factors. For the northern area of Bucaramanga, the SGC guide will be followed using the geology, geomorphology, use and land cover cartography of 0.7 km² as determining factors for the definition of a geological - geotechnical model fed by more than 700 meters of perforations and 130 standard penetration tests (SPT) distributed throughout the study area. In addition, as a trigger factors, the earthquake will be calculated by the total seismic hazard curves for capital cities, and the rain factor using synthetic curves of duration and frequency sheet (LDF) estimated with the method of adjustment to the Gumbel distribution by weighted probability moments (MPP). A probabilistic analysis was carried out by the sampling method of point estimates to analyze the stability to surface landslides, and the Latin Hyper Cube method for deep landslides. It has been found that the Geology Units for Engineering (UGI) as a conditioning factor have a more important effect than the triggers for the hazard zoning to surface mass movements and found that deep landslides mainly control the total zoning of the hazard.

*Bachelor thesis

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Msc, Wilfredo Del Toro Rodríguez. Codirector: Ing. Oscar Fabián Sánchez Ortiz

Introducción

Los fenómenos por remoción en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra (GEMMA, 2007), estos se definen como los movimientos hacia abajo, hacia afuera, incluyendo los vuelcos o flujos de derrubios y en general, a casi todas las tipologías de movimientos de los materiales (rocas, suelos, derrubios o rellenos artificiales) que conforman las laderas (D. J. Varnes, 1978), (D. Varnes, 1984). Estos deslizamientos a lo largo de una pendiente pueden ser de forma súbita o lenta, dándose por efectos de la gravedad y obedeciendo a procesos naturales o actividades antrópicas desestabilizadoras (Gáfaró Duarte, 2013), (GEMMA, 2007). Su ocurrencia está condicionada a los escenarios geológicos, hidrológicos y geomorfológicos de la zona, así como a la modificación de los anteriores por procesos geodinámicos, de vegetación, uso del suelo y actividades humanas (Suarez, 1998).

En el evento de un deslizamiento, además de los factores condicionantes, se debe tener en cuenta algunos factores desencadenantes, por ejemplo: lluvia y sismo, quienes pueden modificar las condiciones de estabilidad de una ladera (SGC, 2016). El estudio sobre la influencia de la lluvia y el sismo a la inestabilidad de taludes es de mayor interés en la actualidad, ya que se ha logrado evidenciar que el mayor peligro ante movimientos telúricos se presenta en zonas afectadas por lluvias previas (Gáfaró Duarte, 2013).

El interés general por el conocimiento y evaluación de estos fenómenos naturales que causan grandes daños en materia prima y humana también es acogido por Colombia mediante leyes y decretos como la Ley 1523 de 2012 y el Decreto 1807 del 19 de septiembre de 2014 para la gestión del riesgo de desastres encaminados a la planificación del desarrollo seguro y a la gestión ambiental territorial sostenible. Debido a esto, la presente investigación plantea la identificación y clasificación de las zonas propensas a evidenciar deslizamientos en un territorio

afectado frecuentemente y desde tiempos remotos por eventos relacionados a movimientos de tierra en gran volumen como el sector norte del municipio de Bucaramanga, Santander (Ingeniería de Suelos LTDA., 2006). Para tal fin, se emplea la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC) para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa.

El análisis de amenaza, expuesto por esta guía, busca plantear escenarios probabilísticos de amenaza y su zonificación, evaluados a partir de factores condicionantes y detonantes. Los primeros vienen dados por cartografías temáticas (geología, geomorfología, uso y cobertura) a escalas adecuadas, incorporados y ajustados a la exploración y análisis geotécnico, y los segundos mediante una evaluación probabilística de la lluvia y el sismo incidente sobre la zona de estudio. La zonificación de la amenaza es una herramienta útil para la toma de decisiones en la planeación de futuros proyectos sobre la zona en que se evalúe y las acciones por realizar con las actuales problemáticas y sus habitantes. Se considera provechoso el uso de la presente guía por su aporte estructural en los procedimientos y consideraciones a realizar, eliminando así algunas de las innumerables subjetividades metodológicas derivadas de un tema versátil como este. Cabe resaltar que esta guía fue dispuesta con un fin comparativo respecto a otras metodologías, previendo así, una segunda fase de validación y ajuste de esta a partir de observaciones sugeridas (SGC, 2016).

1. Objetivos

El objetivo general y los objetivos específicos planteados para el desarrollo de la presente investigación se enuncian a continuación.

1.1 Objetivo General

Realizar un análisis de amenaza sobre el sector norte de Bucaramanga, Santander, delimitando las zonas de amenaza por deslizamientos a partir de factores detonantes como la lluvia y el sismo, de acuerdo con la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

1.2 Objetivos Específicos

Plantear las Unidades de Geología para Ingeniería (UGI) a partir de la geología ya identificada sobre la zona de estudio.

Elaborar un modelo conceptual Geológico-Geotécnico con base en la información secundaria.

Análisis de estabilidad por equilibrio límite, mediante el uso de los programas ArcGIS y Slide para la evaluación de deslizamientos superficiales y profundos respectivamente.

Zonificación de la amenaza de acuerdo con la probabilidad de falla.

2. Marco Teórico

2.1 Movimientos en masa

Los deslizamientos en masa son parte de los procesos denudativos que modelan el relieve de la tierra (GEMMA, 2007), estos pueden ser definidos como los movimientos hacia abajo, hacia afuera, incluyendo los vuelcos o flujos de derrubios y en general, a casi todas las tipologías de movimientos de los materiales que conforman las laderas (D. J. Varnes, 1978), (D. Varnes, 1984). Estos deslizamientos a lo largo de una pendiente pueden ser de forma súbita o lenta, dándose por efectos de la gravedad y obedeciendo a procesos naturales o actividades antrópicas desestabilizadoras (Gáfaró Duarte, 2013), (GEMMA, 2007).

2.2 Tipos de deslizamientos

Son movimientos de masa deslizadas sobre varias superficies de falla y que pueden ser de un solo material o comprender varias unidades o masas, estos movimientos, a su vez, pueden ser progresivos y subdividirse en movimientos rotacionales y/o traslacionales (Suárez, 2003a).

2.2.1 Deslizamiento rotacional. La superficie de falla rotacional tiene concavidad hacia arriba (en forma de cuchara) y produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento la cual se acumula en el pie de la ladera. Estos deslizamientos tienen un centro de giro ubicado por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento (Suárez, 2003b).

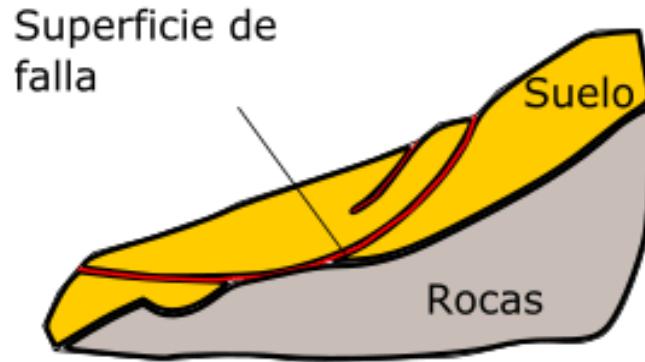


Figura 1. Deslizamiento rotacional en suelo. Geología, ramas y aplicaciones. (2019). Deslizamientos, tipos de deslizamientos y movimientos en masa. Retrieved 23 August 2019, from <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>

2.2.2 Deslizamiento traslacional. Este tipo de movimientos puede generarse en ambientes de suelo y roca a través de una superficie de falla más o menos plana o de poca profundidad, dicha superficie pueda estar encauzada por los planos de debilidad.

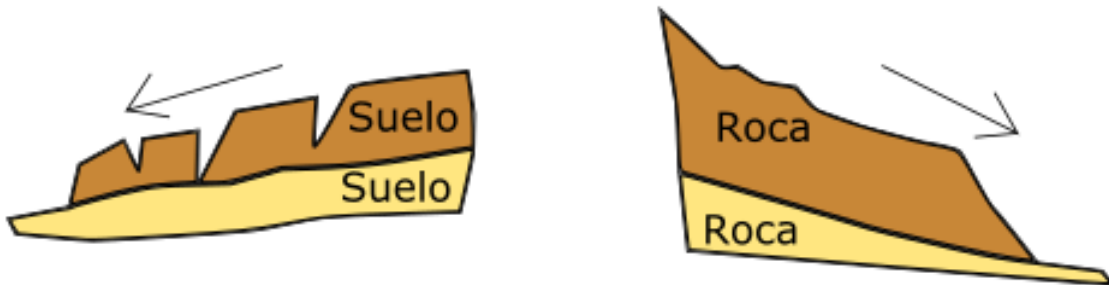


Figura 2. Deslizamientos traslacionales del suelo. Deslizamiento rotacional en suelo. Geología, ramas y aplicaciones. (2019). Deslizamientos, tipos de deslizamientos y movimientos en masa. Retrieved 23 August 2019, from <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/deslizamientos/tipos-de-deslizamientos/>

2.3 Geomorfología

Estudio de las formas de la tierra, materiales y sus procesos. El conocimiento de estos rasgos del relieve es importante en el manejo ambiental de los recursos y en la planeación urbana pues contribuyen a la identificación de amenazas naturales (Forero Gaona, 2014)

2.4 Ingeniería geológica

Ciencia aplicada al estudio y solución de problemas de ingeniería relacionados con el medio ambiente, las cuales son derivadas, en su mayoría, de las actividades antrópicas realizadas al medio geológico. Esta ciencia tiene como fin la consideración e interpretación de los factores geológicos en el tratamiento y mitigación de las amenazas naturales mediante obras de ingeniería (González De Vallejo, 2002).

2.5 Curvas IDF

Las curvas IDF son curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad de una tormenta en intervalos de diferente duración, y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o período de retorno (Témez Peláez, 1978). Como la intensidad y duración de las tormentas varían geográficamente, las curvas IDF dependerán de cada región, estas a su vez pueden ser construidas por diferentes métodos según el tipo de información con que se cuente.

2.6 Análisis de estabilidad

La modelación matemática de los taludes es parte de la práctica de la ingeniería geotécnica, con el objeto de analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales (Figura 3). Existe una gran cantidad de metodologías para la modelación matemática, la cual depende del objetivo del análisis y de los

resultados que se deseen obtener. Entre los objetivos principales está el determinar la condición de estabilidad, investigar el mecanismo de falla, los detonantes o factores principales que desencadenan la falla y medir la efectividad de obras de mitigación (Suarez, 2003).

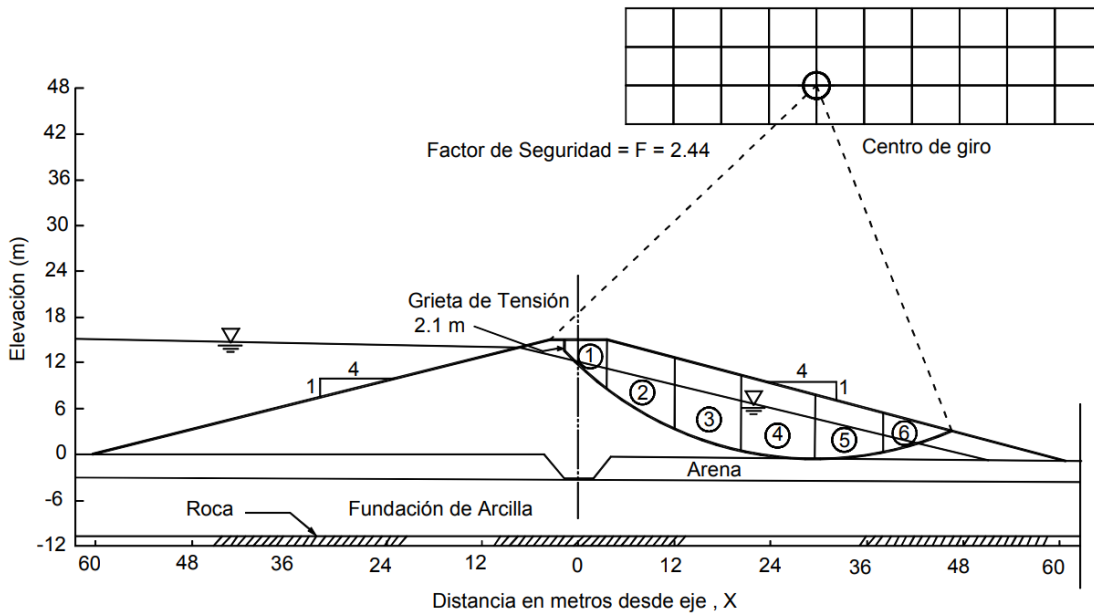


Figura 3. Análisis de estabilidad ilustrativo. Suarez, J. (2003). Análisis de Estabilidad C. 4. 1-46.

Los métodos de equilibrio límite son una de las técnicas para estimar la estabilidad geotécnica y es una de las más sencillas, estos métodos permiten analizar fallas de tipo traslacional, rotacional, entre otras, teniendo en cuenta los factores que llegan a producir el movimiento, además de realizar análisis con técnicas probabilísticas (Stead, Benko, Eberhardt, & Coggan, 2000). Este método permite conocer la resistencia del suelo frente a esfuerzos que tienden a causar el deslizamiento, otorgando un factor de seguridad el cual es relacionado con la amenaza para que el talud falle.

El cálculo de estabilidad mediante equilibrio limite requiere entre otras fuentes de información: la topografía, fricción, cohesión, peso unitario, nivel freático y cargas externas, como sismos o cargas distribuidas, para alimentar el software destinado para tal fin.

Los paquetes informáticos que emplean las técnicas de equilibrio limite utilizan diferentes métodos iterativos para analizar la estabilidad, siendo algunos de ellos más precisos que otros. Dentro de estos métodos iterativos se encuentran el método del talud infinito y de Spencer los cuales serán los dos métodos empleados para el desarrollo del análisis geotécnico del presente escrito.

Tabla 1.

Métodos de análisis equilibrio limite

Método	Superficie de Falla	Equilibrio	Características
Talud Infinito	Rectas	Fuerzas	Bloque delgado con nivel freático, falla paralela a la superficie.
Spencer (1967)	Cualquier forma	Momentos y Fuerzas	La inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada, pero son desconocidas.

Nota: Descripción de los métodos de equilibrio limite usados para analizar la estabilidad geotécnica del suelo en el área de estudio. Tomado y adaptado de Suarez, J. (2003). Análisis de Estabilidad C. 4 (pp. 1–46).

El uso de un modelo de talud infinito aplicando tecnología SIGs logra calcular el factor de seguridad para cada pixel determinando así, la probabilidad espacial de la amenaza (Suarez, 1998). El método de Spencer tiene como base el satisfacer mediante ensayo y error el equilibrio de esfuerzos y momentos producido por las fuerzas que interactúan en la superficie de falla luego de ser dividida en una serie de dovelas o tajadas como se muestra en la Figura 4.

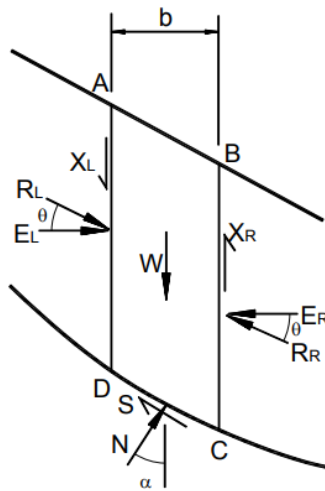


Figura 4. Fuerzas analizadas en el método de Spencer. Tomada de Suarez, J. (2003). Análisis de Estabilidad C. 4. 1–46.

2.7 Amenaza

Peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (SGC, 2016).

3. Área de estudio

Se acoge a Bucaramanga y en específico a su zona norte como caso de estudio de la presente investigación debido a los múltiples problemas asociados a movimientos de tierra en la zona, y a que se han realizado diferentes estudios de estabilidad geotécnica que la ubican como de amenaza media y alta [(UIS & AMB, 2017), (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2015),

(INGEOMINAS & CDMB, 2007)] sin embargo, no se han hecho estudios de amenaza detallada siguiendo la guía metodológica del SGC en el área, para lo cual, esta investigación propone desarrollar.



Figura 5. Norte de Bucaramanga Santander, zona de estudio para análisis de amenaza por movimientos en masa

4. Metodología

Para desarrollar el presente trabajo y con el fin de cumplir los objetivos propuestos, se lleva a cabo un modelo probabilístico, presentado en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa en cumplimiento al decreto compilatorio

1077 (que acogió al 1807), para la clasificación de la amenaza por movimientos en masa a escala 1:2000. Esta escala corresponde a un estudio a nivel detallado que sigue el esquema metodológico de la Figura 6 y el cual se realiza para zonas previamente clasificadas como de amenaza media y alta ante fenómenos de remoción en masa (SGC, 2016).

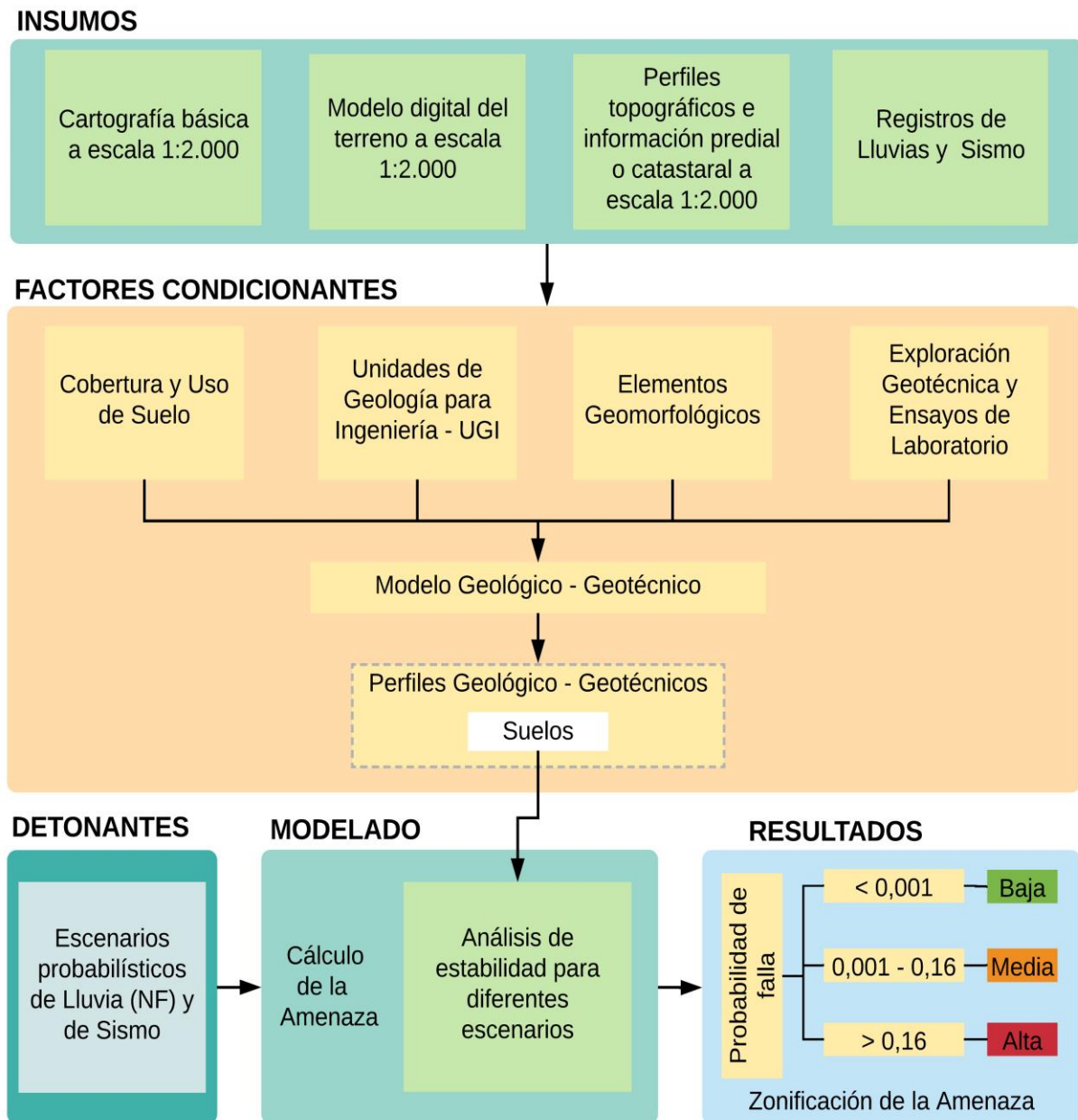


Figura 6. Esquema Metodológico. Adaptado de SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Retrieved from

Sobre toda el área en análisis, la cual consta de 0.67 km², se deberá cartografiar los diferentes insumos temáticos necesarios y los resultados de sus procesos con las características mínimas de área y espesor determinadas que para la escala 1:2000 se recomienda como valores mínimos un área de 400 m² y espesor de 2 m.

4.1 Formulación del modelo Geológico Geotécnico

Las condiciones intrínsecas que determinan la estabilidad de un terreno presentan variabilidad espacial, por ello, resulta conveniente identificar unidades de comportamiento similar a partir de las características geológicas y geomorfológicas del terreno, refinadas mediante la exploración geotécnica del subsuelo y ensayos de laboratorio, de tal manera que se pueda establecer un modelo conceptual e indicativo (ver figura 7) que identifique los parámetros característicos y propios de la zona a tal modo que permita analizar y calcular la amenaza por remoción en masa sobre el área de estudio.

La definición de estas unidades genera la necesidad de identificar tres modelos: (1) El modelo geológico que representa la distribución espacial de los materiales y sus datos geomorfológicos, (2) El modelo geomecánico, que representa la caracterización geotécnica e hidrogeológica de los materiales, y, (3) El modelo geotécnico, el cual simboliza la respuesta del terreno durante y después de la construcción de una obra, estos modelos son derivados de la aplicación de la ingeniería geológica a la ingeniería civil (González De Vallejo, 2002).

El trabajo de crear un modelo consta de varias etapas de trabajo e inicia con la recopilación de los diferentes elementos topográficos (Tomás, Cuenca, Delgado, & Doménech, 2004), para conocer la superficie del área en estudio se hizo uso de tecnología Lidar, tomado a partir del estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo (AVR) realizado en el año 2017 por el grupo de

Investigación Geomática de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en convenio con el Área Metropolitana de Bucaramanga (UIS & AMB, 2017). El modelo producto de esta tecnología será la base principal para calcular la variación de la pendiente del terreno de forma espacial y así mismo, ser la topografía base de las diferentes capas temáticas que componen el modelo geológico-geotécnico.

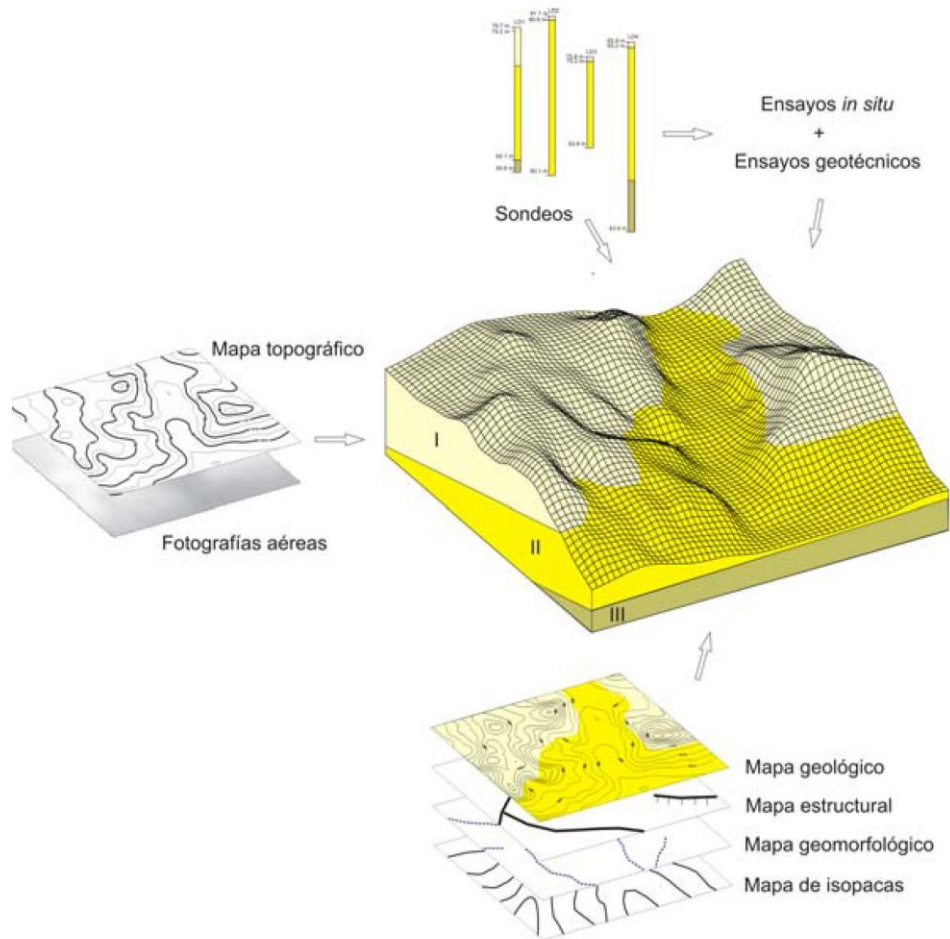


Figura 7. Esquema representativo de un modelo geológico geotécnico. Tomás, R., Cuenca, A., Delgado, J., y Doménech, C. (2004). Diseño De Un Modelo Geológico-Geotécnico 3D De La Vega Baja Del Río

Segura (Alicante, Se España). In *Egraficaunizares*. Retrieved from <http://www.egrafica.unizar.es/ingegraf/pdf/Comunicacion16983.pdf>

4.2 Unidades de Geología para Ingeniería (UGI)

Para realizar el análisis de unidades geológicas para ingeniería (UGI) se debe contar con una plancha cartográfica de geología base, para lo cual se consultan diferentes fuentes oficiales y particulares que permitan cotejar y establecer la cartografía respectiva sobre el área de estudio.

Se determina a la propuesta geológica presentada en la tesis “Geología para la Estabilidad del Escarpe Norte de Bucaramanga” (Aldana Becerra & Ariza Villamil, 2000) como la base esquemática de los materiales y formaciones presentes en el área, para que, consecutivamente, sean clasificados según su origen como se indica en la tabla 2, y así, conformen la base para la generación de las UGI.

Sobre la base cartográfica de geología acogida, se consideró necesario identificar aquellas zonas erigidas por efectos antrópicos que tienen influencia considerable en la caracterización de los materiales de acuerdo con sus propiedades mecánicas. Estas zonas se logran identificar luego de realizar distintos procesos de fotointerpretación, comparando un modelo digital de elevación (DEM) del año 1967, levantado por la CDMB y el modelo producto de la tecnología Lidar, mencionado anteriormente.

La definición de estas unidades de geología para ingeniería debe ir acorde a las características mínimas de área y espesor cartografiable, además de ser asociadas a un sistema de nomenclatura propuesto por (SGC, 2016) y el cual está diferenciado para unidades de suelo o roca. El esquema utilizado para nombrar las unidades presentes en el área sigue como se muestra:

- Para la primera letra (S) o (R), en mayúscula según corresponda a suelo o roca.
- La segunda letra indicará el origen: transportado (t), residual (r) o antrópico (a).
- A partir de la tercera letra se indican características propias del material.

Ej. Stca – Suelo transportado coluvial antiguo

Tabla 2

Unidades geológicas para ingeniería según su origen

ORIGEN DE LA UGI	TIPO DE UGI
Derivadas de roca In situ	Roca inalterada Saprolito Suelo residual
Depósitos aluviales	Aluviones recientes o de lecho de río Llanuras aluviales Abanicos o conos aluviales Terrazas aluviales Depósitos fluviotorrenciales
Depósitos lacustres y paludales	Planicie lacustrina, artesa lagunar, plano anegadizo
Depósitos de ladera, de vertiente o coluviales	Coluviones Talus Flujos (de lodo, tierra y de escombros) Derrubios de pendiente
Depósitos costeros	Deltas, barras, playas, etc.
Depósitos volcánicos	Tefras Surges Flujos de piroclastos Ignimbritas Flujos de lodos volcánicos Lahares Cenizas Coladas de lava
Depósitos eólicos	Dunas, medanos Loess Cenizas volcánicas
Depósitos glaciares	Morrenas y tillitas Fluvioglaciares, valle glaciario, abanicos de lavado
Depósitos antrópicos	Rellenos sanitarios o de basuras Rellenos de excavaciones Escombreras o botaderos

Nota: Clasificación e identificación de UGI según el origen. Tomado de SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19776>

4.3 Elementos Geomorfológicos

En atención al planteamiento de un modelo conceptual con zonas de características de comportamiento geotécnico similar, se hace necesario disponer de un mapa de elementos geomorfológicos definido por los rasgos del relieve, morfometría y microrelieves (Carvajal Perico, 2012). El objetivo principal de este mapa es familiarizar las geoformas y el ambiente geomorfológico presente en el área de estudio, así como el de caracterizar zonas de comportamiento similar en conjunto con el mapa de geología para ingeniería. Para lo anterior, se toma el mapa de geomorfología (Ver Apéndice A) elaborado por Darío Villamizar (UIS & AMB, 2017) en su componente geomorfológico.

4.4 Recopilación de información existente sobre exploración geotécnica

La etapa de exploración geotécnica, para el presente estudio, tiene sus fundamentos en los sondeos y ensayos que se han realizado para estudios anteriores en el norte de Bucaramanga. En consecuencia, se realiza una recopilación de información en donde las fuentes principales fueron Geotecnología S.A.S y la Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación Geomática gestión y optimización de sistemas. A esta información encontrada se le aplica una depuración de datos innecesarios y ubicados fuera del área de estudio, obteniendo así, aproximadamente 14 estudios realizados en años anteriores con cerca de 130 puntos entre sondeos de penetración estándar (SPT), apiques y trincheras, más de 700 m en sondeos con recuperación de núcleo dividido en perforaciones entre 70 y 150 m de profundidad y adicionalmente, alrededor de 380 muestras que incluyen ensayos de granulometría, pruebas de

corte directo, pesos unitarios y permeabilidad, distribuidas en toda el área de interés y a diferentes profundidades.

Este inventario de exploración geotécnica (*Figura 8*) es el principal insumo para el ajuste y calibración de las UGI y las unidades geotécnicamente homogéneas, además de establecer los parámetros de resistencia a partir de sus resultados.

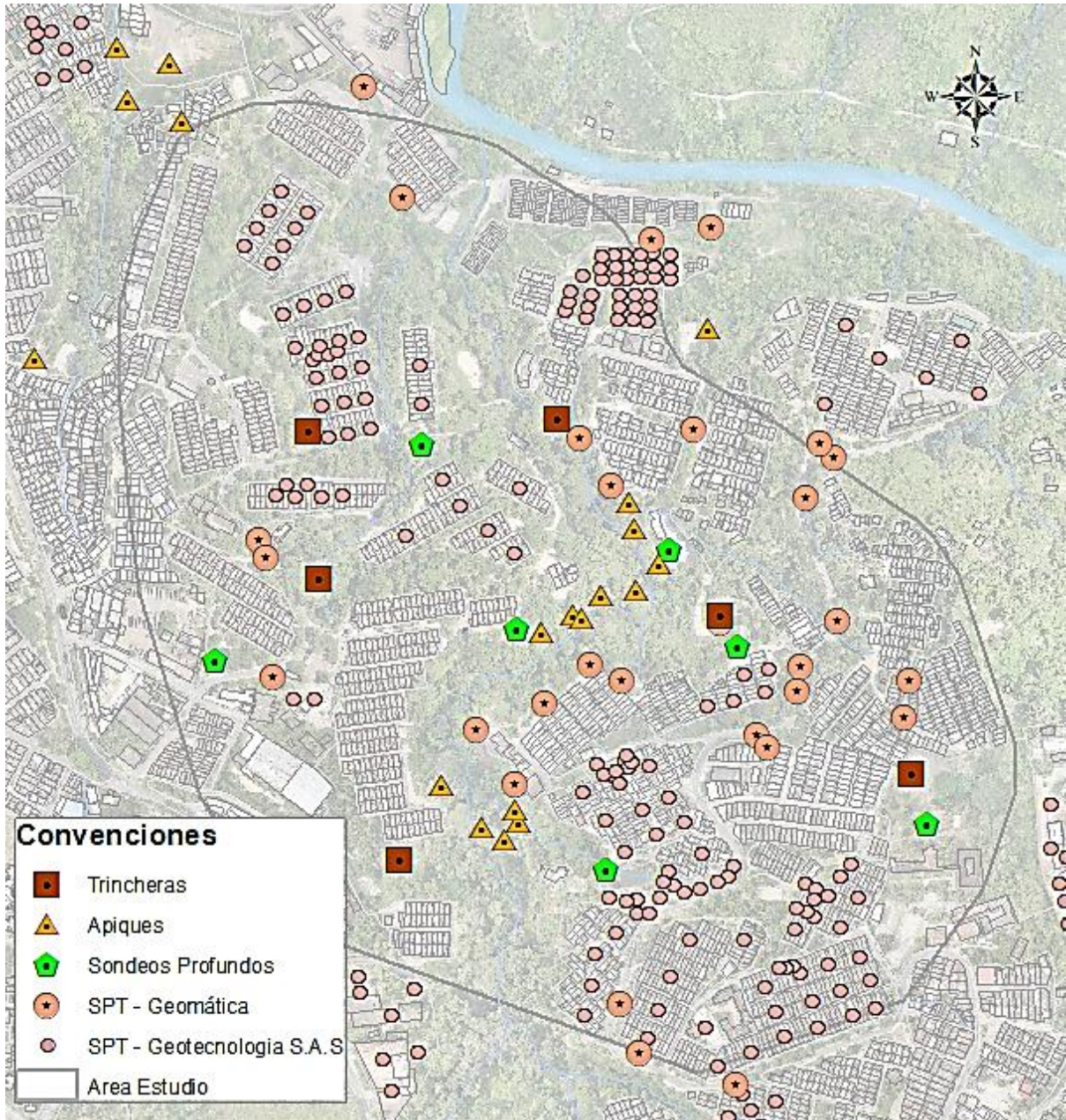


Figura 8. Exploración geotécnica recolectada.

4.5 Análisis de las unidades geotécnicas homogéneas

Para la definición de estas unidades de comportamiento geotécnicamente homogéneo se debe realizar un cruce entre el mapa de elementos geomorfológicos y UGI, incorporando un ajuste a las delimitaciones preliminares con base en los resultados de la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio (SGC, 2016).

En esta misma etapa se define el modelo conceptual que contiene los parámetros de resistencia mecánica de las unidades consideradas de comportamiento homogéneo. Para dicho modelo se consideran que los materiales en superficie presentan parámetros diferentes a los encontrados a mayor profundidad, dado, entre otras razones, por el confinamiento, efectos climáticos y antropológicos, como la meteorización o rellenos hechos a baja profundidad. En consecuencia, se opta por tomar parámetros característicos y representativos para las UGI que conforman el modelo geológico geotécnico en función del espesor y tipo de deslizamiento en análisis (superficial y profundo).

Según revisiones bibliográficas, se considera que la falla superficial se encuentra, en su mayoría, a una profundidad aproximada de 1.22 m (Pradel & Raad, 1993), para efectos de análisis a la estabilidad superficial en esta investigación, se opta por encontrar la superficie de falla a partir de sondeos mecánicos SPT, identificando los puntos en donde se presentan cambios fuertes de resistencia. Los valores geomecánicos para las UGI analizadas en los deslizamientos superficiales se calculan a partir de los resultados de laboratorio de muestras tomadas en el rango de 0 m hasta la profundidad a la que sea encontrada la superficie de falla.

El análisis a deslizamientos profundos tiene como base para el cálculo de los parámetros de resistencia el mismo principio descrito para la estabilidad superficial. Esto es, estimar los valores

medios y desviaciones de los diferentes parámetros de las UGI reconocidas, utilizando las muestras ubicadas en cada estrato identificado.

4.6 Factores Detonantes

De acuerdo con la guía acogida, se toma en cuenta como factores que promueven a los movimientos en masa, a la lluvia y el sismo, mediante la combinación de escenarios probables en los que puede ocurrir un evento específico. La información requerida y el tratamiento de estos se indica a continuación.

4.6.1 Lluvia. El análisis de amenaza detallado requiere contar con cierta información de campo para evaluar la inestabilidad resultante de la acción hídrica relacionada con el frente húmedo, por un lado, y con la profundidad del nivel freático por el otro.

La información de precipitación es uno de los principales insumos dentro del análisis de la lluvia como detonante a deslizamientos (SGC, 2016). Esta información se puede disponer, entre otras formas posibles, como un registro pluviográfico o pluviométrico de la estación más cercana a la cabecera municipal por un periodo no inferior a 15 años.

Para efectos del presente estudio se lleva cabo una estimación de datos faltantes del registro histórico según lo propuesto por Linsley., et al en (Ray K, Max A, & Joseph L.H, 1977) haciendo uso del método de la razón normal a la estación 23195040 UNIV IND SANTANDER , empleando las estaciones del IDEAM, Bucaramanga y Floresta LA, además de la estación de la CDMB, Club Campestre, así:

$$h_{p_x} = \frac{1}{n} \left[\frac{P_x}{P_1} h_{p_1} + \frac{P_x}{P_2} h_{p_2} + \dots + \frac{P_x}{P_n} h_{p_n} \right] \quad (1)$$

Donde:

h_{p_x} = Precipitación faltante

h_{p_i} = Precipitación estación auxiliar

P_x = Precipitación media anual estación objeto

P_i = Precipitación media anual estación auxiliar

Para este método se recomienda un número de estaciones (n) mínimo de tres, para que los datos sean considerados confiables.

4.6.1.1. Análisis de curvas LDF. Para determinar la frecuencia de ocurrencia de posibles deslizamientos actuales o futuros detonados por lluvias, a partir de registros pluviométricos, se considera estimar las relaciones LDF (lámina de agua precipitada-duración-frecuencia) por los métodos probabilísticos establecidos para la regionalización de curvas de duración-intensidad-frecuencia según (Vargas & Diaz, 1998) y (Díaz-Granados & Puente, 2008).

Este método (descrito a continuación) propone que, a partir de la precipitación media anual multianual, el número promedio de días con lluvia y la elevación de la estación en msnm, se realice un ajuste a la distribución Gumbel con momentos ponderados por probabilidad (MPP) y así lograr obtener las curvas LDF e IDF para cada estación en análisis.

Para esta investigación se establece el conjunto de duraciones (t) de una lluvia, igual a: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 240, 720 y 1440 minutos y los periodos de retorno de 2.3, 5, 10, 20, 50 y 100 años, los cuales se tendrán en cuenta para la estimación del aumento del nivel freático con el tiempo.

El cálculo de los coeficientes $M_{1\text{diario}}$, $M_{0\text{diario}}$, $(M_1/M_0)_{\text{diario}}$ de la estación, se realiza a partir de las ecuaciones (2) y (3) en donde n es el número de años de datos históricos y x_i el valor de la precipitación diaria máxima anual, i , ordenada de menor a mayor.

$$M_{0\text{diario}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$M_{0\text{diario}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{n-i}{n-1} \quad (3)$$

Seguidamente, se deben estimar para cada duración establecida los valores M_{1t} y M_{0t} . Para cada duración mayor o igual a una hora se calculan los valores de M_{0t} empleando la ecuación (4) a partir de los coeficientes k_1 , k_2 , k_3 y k_4 mostrados en las ecuaciones (5) a (8) y la Tabla 3.

$$M_{0t} = K_1 + K_2 M_{0\text{diario}} + K_3 (P_A/N) + K_4 E \quad (4)$$

$$k_1 = a_1 + b_1 t + c_1 t \ln(t) + d_1 t^{0.5} \ln(t) + e_1 t^{-1.5} \quad (5)$$

$$k_2 = a_2 + b_2 t \ln(t) + c_2 t^{2.5} + d_2 t^{0.5} \ln(t) \quad (6)$$

$$k_3 = a_3 + b_3 t + c_3 \ln(t) + d_3 t^{-0.5} + e_3 t^{-1.5} \quad (7)$$

$$k_4 = a_4 + b_4 t + c_4 t^{1.5} + d_4 t^2 + e_4 e^{-t} \quad (8)$$

Las duraciones menores a una hora utilizan la ecuación (9) para el cálculo de M_{0t} , la cual emplea el valor de M_{0t} para una hora, calculado previamente.

$$M_{0t} = [0.3027 * \ln(t) - 0.2806] * M_{0t \text{ 1hora}} \quad (9)$$

Tabla 3

Valores de coeficientes de las ecuaciones 5 a 8.

Coeficiente	Subíndice			
	1	2	3	4
a	-761.087	0.22288	16.809	-0.01290
b	741.947	-0.07566	0.2340	0.004169
c	-103.788	0.0005667	-5.8561	-0.001365
d	-586.892	0.32844	-17.8728	0.0001313
e	38.8200	-	2.3229	0.0145950

Nota. Adaptado de Díaz-Granados, M., & Puente, X. (2008). Estimación de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia a partir de Información Pluviométrica. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cartagena de Indias Colombia, septiembre 2008*, (2).

A raíz de lo anterior, se estiman las curvas LDF para los valores seleccionados de tiempo de retorno a partir de la ecuación (10).

$$X_T = m - a \ln \left[- \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (10)$$

Donde:

$$m = M_{0t} - \varepsilon a$$

$$\varepsilon = 0.5772$$

$$a = (M_{0t} - 2 * M_{1t}) / \ln (2)$$

$$M_{1t} = (M_1 / M_0)_{\text{diario}} * M_{0t}$$

4.6.1.2. Efectos superficiales de la lluvia. Los deslizamientos superficiales son aquellos en los cuales el plano deslizante no tiene una profundidad apreciable, el cual alcanza una posición promedio de 1.22 m de profundidad (Pradel & Raad, 1993) y que afecta las formaciones superficiales que recubren el terreno (Santacana, Baeza, Corominas, de Paz, & Marturià, 2003). Para el análisis de estabilidad superficial por frente húmedo (acotado como Z_w)

se considera el flujo subsuperficial presente en el suelo, inducido por la lluvia y considerado paralelo a la superficie de la ladera (SGC, 2016) según lo descrito por Pradel & Raad, 1993.

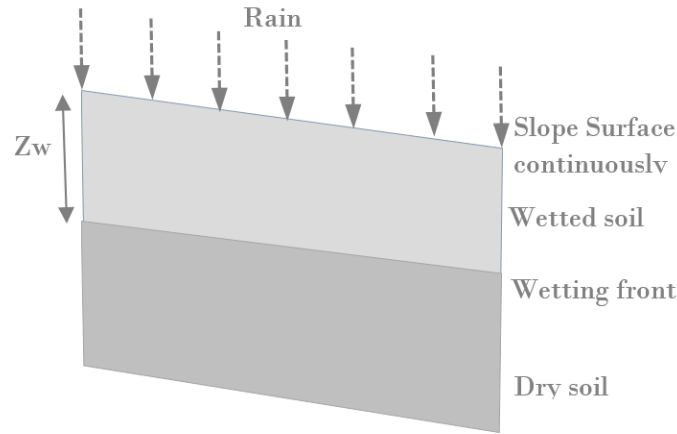


Figura 9. Frente húmedo por lluvia. Adaptado de Pradel, D., & Raad, G. (1993). Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes, *119*(2), 315–332.

La incidencia de la lluvia, como frente húmedo, en deslizamientos superficiales parte del cálculo de la precipitación mínima en 24h para diferentes profundidades de frente húmedo supuestos (SGC, 2016), estas profundidades serán tomadas de 0 hasta 1.5 m.

$$P_{min} = I_{min} * 24 \tag{11}$$

$$I_{min} = \frac{\mu}{24} \left[z_w - \psi \ln \left(\frac{\psi + z_w}{\psi} \right) \right] \left(\frac{z_w + \psi}{z_w} \right) \tag{12}$$

Para el cálculo de esta precipitación mínima se hace necesario conocer algunos parámetros que vienen del modelo de infiltración propuesto por (Green & Ampt, 1911), los cuales pueden ser obtenidos a partir de ensayos que estiman las propiedades de retención de agua del suelo. A razón de no contar con estos ensayos, los parámetros son estimados a partir de correlaciones para la textura de los materiales (W. J. Rawls, D. L. Brakensiek, & B. Soni, 2013), estas relaciones son posibles a partir de los resultados de ensayos de clasificación granulométrica.

Para que se logre asociar un valor de profundidad de frente húmedo (Z_w) a cada uno de los periodos de retorno (Tr) establecidos anteriormente, se debe estimar la media de la precipitación diaria superior o igual al P_{min} , empleando todo el registro histórico, y ubicar estos valores sobre las curvas LDF asociando así un valor de Z_w a un Tr por su posición relativa.

Estos valores de Z_w , a su vez, deben ir relacionados a cada unidad homogénea delimitada, ya que el cálculo de los parámetros que involucran a I_{min} viene dado en función de la textura del suelo la cual es diferente para cada UGI identificada.

4.6.1.3. Efecto de la lluvia en deslizamientos profundos. En el presente estudio se desea analizar y evaluar el efecto que tiene el ascenso del nivel freático en taludes y su posibilidad de condicionar la inestabilidad a deslizamientos. El Servicio Geológico Colombiano (SGC), en su guía metodológica (SGC, 2016), considera que el detonante de esta clase de deslizamientos está relacionado con la cantidad de agua acumulada por periodos de lluvia anteriores.

Esta suposición indica que se debe calcular la fluctuación del nivel freático a partir de la cantidad de precipitación infiltrada diaria, teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente del suelo, lo cual se evaluará según el método lluvia escorrentía del Soil Conservation Service (SCS) (USDA-SCS, 1972).

Este método calcula la cantidad de agua que se convierte en escorrentía directa (P_e), por lo que aquí, se plantea estimar el complemento, es decir, la lluvia que se infiltra (P_i) que corresponde a la suma de las abstracciones iniciales (I_a) y la profundidad de agua infiltrada (F_a) (ver *Figura 10*).

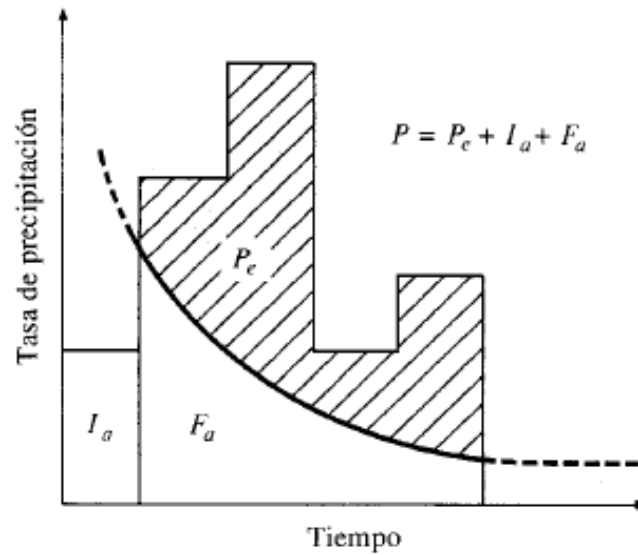


Figura 10. Variables del método del SCS para el cálculo de las abstracciones de una tormenta.

Adaptado de Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Larry W, M. (1994). Hidrología Aplicada.

Se hace necesario establecer el número de curva (CN) representativo del área en función del grupo hidrológico del suelo y su descripción de uso de acuerdo con la Tabla 4, la cual presenta valores de número de curva para condiciones de humedad antecedente normal (AMC II, por sus siglas en inglés). Para estimar el CN se hace uso de las descripciones de uso del suelo presentados en la cartografía temática de cobertura y uso de suelo del estudio AVR por deslizamientos en masa del año 2017 (UIS & AMB, 2017).

Se evalúa la condición de humedad antecedente para todos los días del registro de precipitación histórica, teniendo en cuenta que esta puede clasificarse en tres estados de acuerdo con el rango de precipitación acumulada para los cinco días previos al día en análisis, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de humedad antecedente según precipitación acumulada

Condición	Siglas	Precipitación acumulada [mm]
Seca	AMC I	> 35
Normal	AMC II	35 - 53
Húmeda	AMC III	< 53

Nota: Adaptado de Chow, V. Te, Maidment, D. R., & Larry W, M. (1994). Hidrología Aplicada.

En aras de obtener un cálculo de las abstracciones más acercadas a las condiciones hidrológicas reales del área en estudio, se realiza un ajuste al valor de CN, retención potencial máxima (S) y abstracción inicial (I_{α}), según la condición de humedad antecedente como sigue:

$$S_i = \frac{25400}{CN_i} - 254 \quad (15)$$

$$I_{\alpha_i} = 0,2 * S_i \quad (16)$$

Para todos los registros diarios de precipitación se obtiene la precipitación infiltrada (Pi) teniendo en cuenta las condiciones expuestas por el método del SCS y empleando la siguiente expresión.

$$P_e = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P + 0,8 * S} [mm] \quad (17)$$

El análisis de amenaza en función de la variabilidad del nivel freático debe añadir a la posición media del nivel freático (\bar{P}_f), estimada a partir de la exploración geotécnica, la variabilidad de la lluvia infiltrada en función de la desviación estándar expresada en términos del coeficiente de variación. Para esto, se deben acumular los valores de P_e estimados para cada año

del registro y calcular su media, desviación y coeficiente de variación (CV) de tal forma que pueda ser empleada la ecuación (18) que determina la profundidad del nivel freático asociado a un periodo de retorno.

$$P_f = (\bar{P}_f - Z * CV * \bar{P}_f) - (I_i * 24) \quad (18)$$

Se asume que la serie de lluvia infiltrada anual sigue una distribución normal por ser suma de eventos individuales, y de esta forma, se le asigna a la variable Z de la ecuación (18) el valor Z de la distribución normal estándar asociado a la probabilidad de excedencia de cada tiempo de retorno. La variable I_i corresponde a la intensidad de lluvia infiltrada diaria (en 24 horas) para el periodo de retorno en análisis, este dato es estimado de las curvas LDF analizadas previamente.

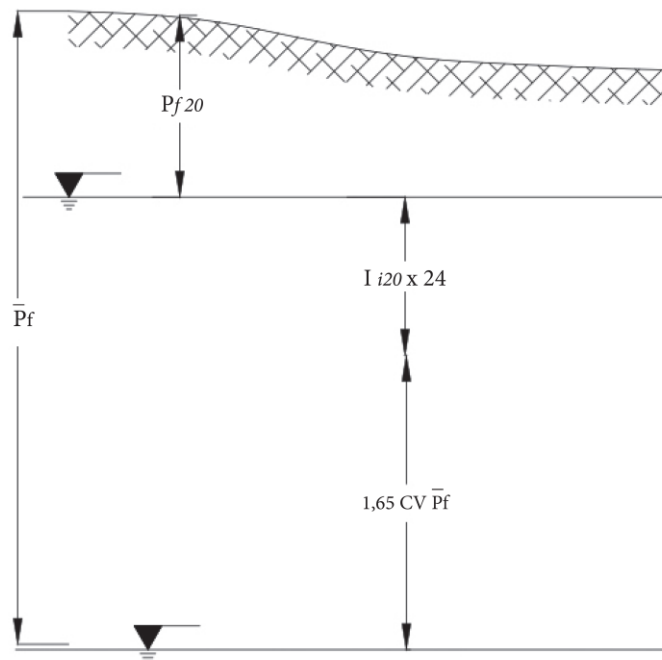


Figura 11. Representación y ejemplo del cálculo de la profundidad del nivel freático asociado a un periodo de retorno de 20 años. Adaptada de SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19776>

4.6.2 Sismo. Se tendrá en cuenta el efecto de la fuerza inercial sísmica para sismos con periodos de retorno de 32, 225 y 475 años a través del coeficiente de aceleración horizontal, calculado a partir de curvas de amenaza sísmica o de un análisis de amenaza sísmica simplificado (SGC, 2016).

En el análisis de amenaza sísmica, realizado para la presente investigación manteniendo la escala detallada requerida, genera una baja confiabilidad de los resultados producida por la insuficiencia de datos en la zona de interés que superen el sismo controlador de magnitud $M_w=4.0$, dictaminado en el estudio de amenaza sísmica de Colombia (AIS, UNIANDES, & INGEOMINAS, 2009) para este tipo de análisis. Por esta razón, se opta por utilizar la curva de amenaza sísmica total para la ciudad de Bucaramanga (*Figura 12*), a partir de la cual se obtiene el coeficiente de aceleración horizontal para los periodos de retorno requeridos.

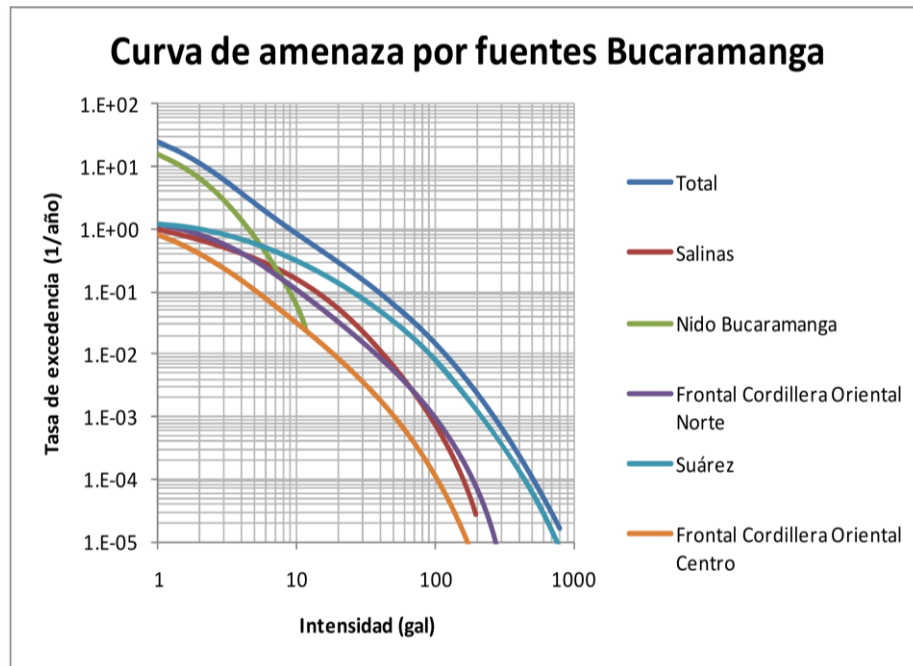


Figura 12. Curva de amenaza, aceleración máxima del terreno por fuentes para Bucaramanga.

Adaptado de AIS, UNIANDES, & INGEOMINAS. (2009). Estudio general de la Amenaza Sísmica de Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., 1, 225.

4.7 Cálculo de la amenaza

El cálculo de la amenaza para este tipo de estudios, definidos en términos probabilísticos y que consideran factores detonantes, se realiza a partir del cálculo de probabilidades de falla (P_f) de una ladera en las cuales el factor de seguridad de estabilidad sea inferior o igual a 1.0 cuando ocurre una lluvia y un sismo determinado (SGC, 2016).

$$P_f = p(FS \leq 1.0 | h_w | k) p(h_w) p(k) \quad (19)$$

En esta línea de análisis se considera a la ecuación de factor de seguridad como una función determinista, y a las variables que la conforman, aleatorias, que vendrían siendo los parámetros del suelo cohesión, fricción y peso unitario.

La ecuación (19) debe ser analizada para la combinatoria de los diferentes periodos de retorno establecidos como puntos de análisis para el efecto de la lluvia y el sismo en la estabilidad superficial y profunda de laderas. A estos diferentes periodos de retorno, se les debe asociar una probabilidad de ocurrencia o excedencia calculada discriminadamente como sigue:

$$P_{II} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{Tr} \right)^L \right) \quad (20)$$

$$P_s = 1 - e^{-\frac{1}{Tr}} \quad (21)$$

Donde L es el tiempo de vida útil igual a 50 años.

En continuidad a los insumos relacionados en la ecuación (19), se establecen las funciones con las cuales se obtiene el factor de seguridad para deslizamientos superficiales en suelo causados por la acción del frente húmedo (ecuación 20 y Figura 9) y el nivel freático (ecuación 21 y Figura 13). En deslizamientos superficiales se usa el método de talud infinito y se recurre al

método de estimativos puntuales para lograr el cálculo del FS que toma en cuenta todas las combinaciones posibles en una unidad de píxel.

$$FS = \frac{c + \gamma z_w \cos^2 \alpha \tan \phi}{\gamma z_w \sin \alpha \cos \alpha} \quad (22)$$

$$FS = \frac{c}{\gamma h \sin \alpha + \cos \alpha} + \left[\frac{\cos \alpha - k \sin \alpha}{\sin \alpha + k \cos \alpha} - \frac{\gamma_w h_w}{\gamma h} \sec \alpha \right] \tan \phi \quad (23)$$

El análisis de estabilidad para deslizamientos profundos se debe realizar por equilibrio límite usando los métodos de Spencer y/o Morgenstern & Price. Se hace uso del programa Slide 2018 para evaluar la estabilidad de laderas usando el método de Spencer debido a su forma de cálculo sencilla, en comparación con el método de Morgenstern & Price, y a que sus resultados son similares.

4.7.1. Probabilidad de falla por deslizamientos. Se realiza el cálculo de la probabilidad de falla ante deslizamientos superficiales (ecuación 24) utilizando el índice de confiabilidad (β) y el inverso de la función Z para los valores de β encontrados a partir del método de estimativos puntuales.

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (24)$$

Para los deslizamientos profundos se estima la probabilidad de falla empleando Slide 2018 en su análisis probabilístico por el método de muestreo del Híper cubo latino, el cual hace que las simulaciones converjan más rápido que el método de Monte Carlo.

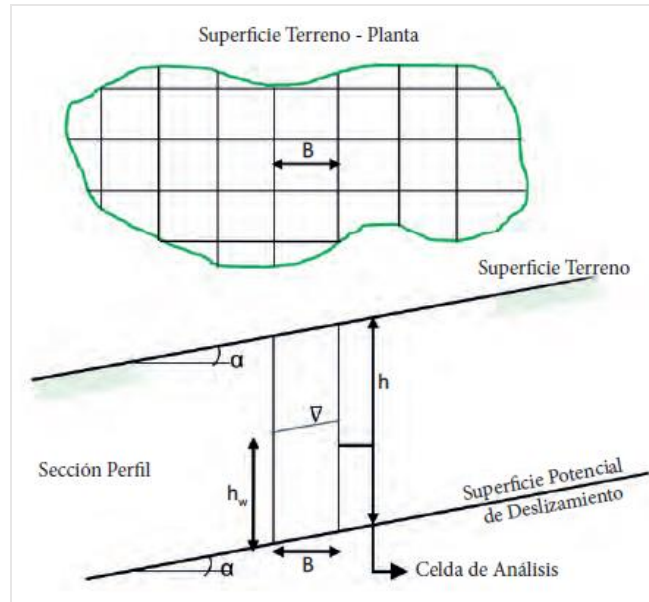


Figura 13. Parámetros para el análisis de estabilidad por talud infinito bajo la acción del nivel freático. Adaptada de SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19776>

4.7.1.1 Índice de confiabilidad (β). El cálculo de este índice viene dado por la media y desviación estándar para cada una de las ecuaciones de FS establecidas en 4.7. Estos valores estadísticos pueden ser satisfechos a partir del método de estimativos puntuales (Gregory B. Baecher, 2005).

$$\beta = \frac{\mu_{FS} - 1}{\sigma_{FS}} \quad (25)$$

El método se aplica cuando se tiene una función Y determinística (factor de seguridad), que cuenta con variables aleatorias X, asociadas a una función de distribución de probabilidad y en donde $Y=g(X)$. Las variables X pueden ser las propiedades del suelo (cohesión, fricción y peso unitario) o bien pueden ser parámetros geométricos, sísmicos y de cargas, etc. (Gregory B. Baecher, 2005). Este método de aproximar numéricamente momentos de bajo orden para las

variables aleatorias X y así mismo para la variable dependiente Y , se ha convertido en un elemento básico de los análisis de confiabilidad geotécnica por su facilidad de uso y conocimientos mínimos sobre la teoría de la probabilidad (Harr, 1987).

El método de estimativos puntuales escoge 2^n puntos, llamados puntos de muestreo, de tal manera que se tenga valores de cada variable X a una desviación estándar por arriba (X^+) y por debajo (X^-) de la media.

Las funciones de comportamiento (FS) se deben evaluar en 2^n puntos que resultan de todas las combinaciones posibles de las variables aleatorias X^+ y X^- que se tengan. Para este análisis se considera como variables aleatorias a los tres parámetros principales del suelo, que son cohesión, fricción y peso unitario.

Finalmente, se calculan los dos momentos centrales de las funciones de comportamiento, tomando en cuenta las concentraciones de probabilidad, también llamadas pesos (P_i), que determinan la influencia de cada una de las variables aleatorias en la función de comportamiento. Para el caso en el cual las variables aleatorias son independientes entre sí, P_i se reduce al valor de $1/2^n$ (Gregory B. Baecher, 2005).

$$\mu_{Y(x_i)} = \sum_{i=1}^{2^n} P_i Y(X_i = x_i) \quad (26)$$

$$\sigma_{Y(x_i)}^2 = \sum_{i=1}^{2^n} P_i [Y(X_i = x_i) - \mu_{Y(x_i)}]^2 \quad (27)$$

4.7.2 Probabilidad de falla total. La probabilidad de falla total viene determinada por el producto de los 3 escenarios considerados y los cuales son: 1) Deslizamiento superficial por acción del frente húmedo, 2) Deslizamientos superficiales a razón de la fluctuación del nivel freático y 3) Deslizamientos profundos.

$$P_{ft} = 1 - (1 - P_{f1})(1 - P_{f2}) \dots (1 - P_{fn}) \quad (28)$$

5. Resultados.

5.1 Definición de las UGI

De la geología, se encuentra que, en general el área de análisis esta principalmente constituida por depósitos no consolidados, tales como coluviones, materiales aluviales (Qal - Sttb), depósitos de deslizamiento (Qd – Stco y Stca) y la Formación Bucaramanga, constituida por el miembro Órganos (Qmbo - Stf). A partir de esta información se obtiene el mapa definitivo (Apéndice B) de las unidades de geología para ingeniería, en toda el área de estudio (Figura 14), el cual constituye el insumo más importante desde el punto de vista de homogeneización para el modelo geológico – geotécnico (SGC, 2016).

5.2 Definición de unidades de comportamiento geotécnico homogéneo y su modelo geológico - geotécnico asociado.

A partir de la interpretación entre el cruce de los mapas de geomorfología y UGI, se establecieron unidades homogéneas de forma preliminar, las cuales se ajustaron a la información

recolectada de las exploraciones en campo, con lo cual se generó el mapa definitivo de unidades geotécnicas homogéneas superficiales, Apéndice C.







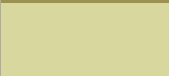
UGI	Descripción
	Sa Suelo antrópico
	Stca Suelo transportado coluvial antiguo
	Stco Suelo transportado coluvial reciente
	Stf Suelo transportado fluviotorrencial
	Sttb Suelo transportado de terraza baja.

Figura 14. Mapa de unidades de geología para ingeniería (UGI) para la zona de estudio. Adaptado de Aldana Becerra, W. O., & Ariza Villamil, S. (2000). Geología para la estabilidad del escarpe norte de Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander.

Y un modelo de unidades homogéneas profundas, tomado del estudio para el diseño de ingeniería de detalle para una galería de drenaje en el barrio Esperanza II ubicado en el municipio de Bucaramanga (UIS & AMB, 2018), el cual fue establecido a partir de una interpretación geológica de los sondeos profundos con un ajuste de la geología de campo.

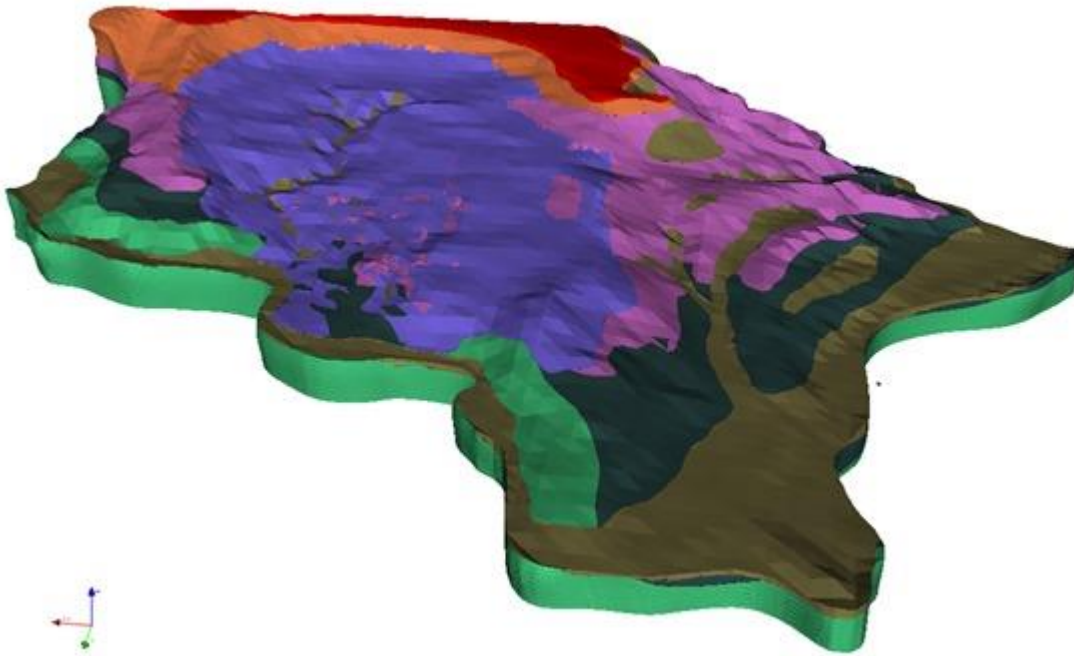


Figura 15. Modelo de unidades homogéneas profundas. Tomado de UIS, & AMB. (2018).

Estudio de factibilidad y los diseños de ingeniería de detalle, para la construcción de una galería de drenaje en el barrio la Esperanza II del municipio de Bucaramanga, como medida para la reducción del riesgo por movimiento en masa profundos.

Para cada una de las unidades definidas se estableció un modelo geológico-geotécnico conceptual, diferenciado, según lo expuesto en la metodología, para los materiales que se consideran con efecto para los deslizamientos superficiales y otro para los materiales con efecto

en deslizamientos profundos. Este modelo, a su vez, contiene el valor medio de los parámetros de resistencia geomecánica y su desviación estándar asociada, calculados a partir de las muestras ensayadas en laboratorio y agrupadas según su ubicación en planta y profundidad.

Tabla 6

Modelo geológico geotécnico conceptual para deslizamientos superficiales

UGI	Fricción [φ°]		Cohesión [kPa]		Peso unitario [Ton/m ³]	
	φ_{med}	φ_{desv}	C_{med}	C_{desv}	Υ_{med}	Υ_{desv}
Sa1	29	2,0	5,0	6,4	1,8	0,3
Stca1	36,9	7,3	52,9	1,9	1,6	0,5
Stca2	25,4	2,6	19	7,4	1,8	0,2
Stca3	33,0	6,7	22,2	5,7	1,8	0,3
Stco1	30,5	1,1	17,5	1,3	1,7	0,6
Stco2	28,1	5,9	45,6	9,4	2,0	0,3
Stf1	53,5	9,2	45,2	2,6	1,6	0,1
Sttb1	32,5	2,3	8,0	9,6	1,8	0,2

Nota. Valores de resistencia mecánica para las unidades identificadas como de comportamiento geomecánico homogéneo con efectos en los deslizamientos superficiales.

Tabla 7

Modelo geológico geotécnico conceptual para deslizamientos profundos

UGI	Fricción [φ°]		Cohesión [kPa]		Peso unitario [Ton/m ³]	
	φ_{med}	φ_{desv}	C_{med}	C_{desv}	Υ_{med}	Υ_{desv}
Stco3	31,3	7,7	30,2	10,0	2,2	4,0
Stf2	29,3	5,5	15,9	5,0	1,9	1,8
Stf3	29,7	3,7	23,2	7,0	1,9	1,8

Nota. Valores de resistencia mecánica para las unidades identificadas como de comportamiento geomecánico homogéneo con efectos en los deslizamientos profundos.

5.3 Efectos de la lluvia en el análisis de estabilidad

Se dispuso de un registro de precipitación pluviométrica diaria de 21 años [1983-2003] de la estación IDEAM 23195040 UNIV IND SANTANDER con el cual fue posible establecer las curvas de lámina duración y frecuencia (LDF) para 2.3, 5, 10, 20, 50 y 100 años como se muestra en la *Figura 16*. La posición de estas curvas se encuentra íntimamente relacionada con los deslizamientos superficiales y profundos. En el caso del primero, el valor de profundidad de frente húmedo (Z_w), viene condicionado al intercepto de los valores medios de precipitación mayor a la precipitación mínima con las curvas de cada periodo de retorno, y en el caso del segundo, establece la intensidad de lluvia proyectada para cada tiempo de retorno en el análisis de la variación de la posición del nivel freático.

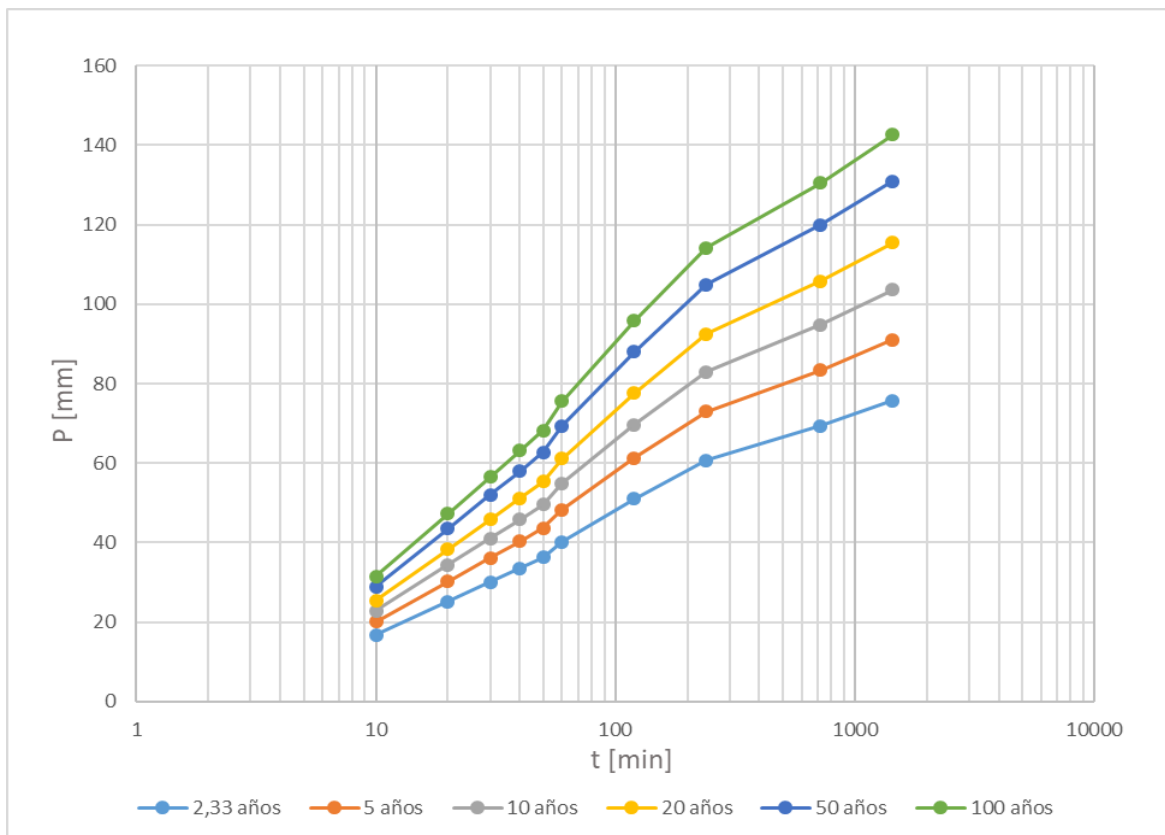


Figura 16. Curvas LDF para la estación de la Universidad Industrial de Santander.

En el proceso de establecer el valor de frente húmedo a cada periodo de retorno mediante el contraste de los valores de precipitación media y las curvas LDF se encontraron valores de profundidad para el frente húmedo (Z_w) en un rango de 0.5 a 1.1 m (Tabla 8) que no exceden los valores típicos esperados (Pradel & Raad, 1993), (Santacana et al., 2003) y por lo cual se le da confiabilidad a los resultados del proceso aplicado.

Tabla 8

Valores de frente húmedo asociados a un tiempo de retorno y unidad geotécnica

Tr [años]	Z_w [m]							
	Sa1	Stca1	Stca2	Stca3	Stco1	Stco2	Stf1	Sttb1
2,3	0,51	0,55	0,54	0,52	0,50	0,55	0,58	0,57
5	0,52	0,70	0,60	0,57	0,58	0,59	0,60	0,62
10	0,57	0,80	0,65	0,60	0,65	0,62	0,70	0,67
20	0,65	0,90	0,70	0,65	0,73	0,70	0,75	0,82
50	0,75	1,00	0,80	0,73	0,77	0,78	0,85	0,88
100	0,80	1,10	0,85	0,85	0,84	0,83	0,93	0,93

Se estimó la distribución espacial de la posición media del nivel freático en la zona de estudio por medio de los ensayos de exploración geotécnica recolectados y en los cuales se había identificado la posición del nivel freático. Para un total de 90 puntos con información y el uso del software ArcGIS 10.6 se obtiene un estimado de la posición de la tabla de agua (Apéndice D), encontrándose, en la mayor extensión de área analizada, a una profundidad cercana a los 2m como se puede evidenciar en la *Figura 17*.

La variabilidad del nivel freático está dada en términos del coeficiente de variación (cv) de los acumulados anuales de precipitación infiltrada calculados como se muestra en la Tabla 9. A partir de esto, se obtuvo la profundidad media a la cual se puede encontrar el nivel freático en

determinado tiempo de retorno, con lo cual, en comparación con la posición actual se logra observar la fluctuación que sufre el nivel freático a lo largo del tiempo. La distribución espacial de la profundidad de la tabla de agua para cada periodo de retorno en análisis se puede observar en los Apéndices E, F, G, H, I, J.

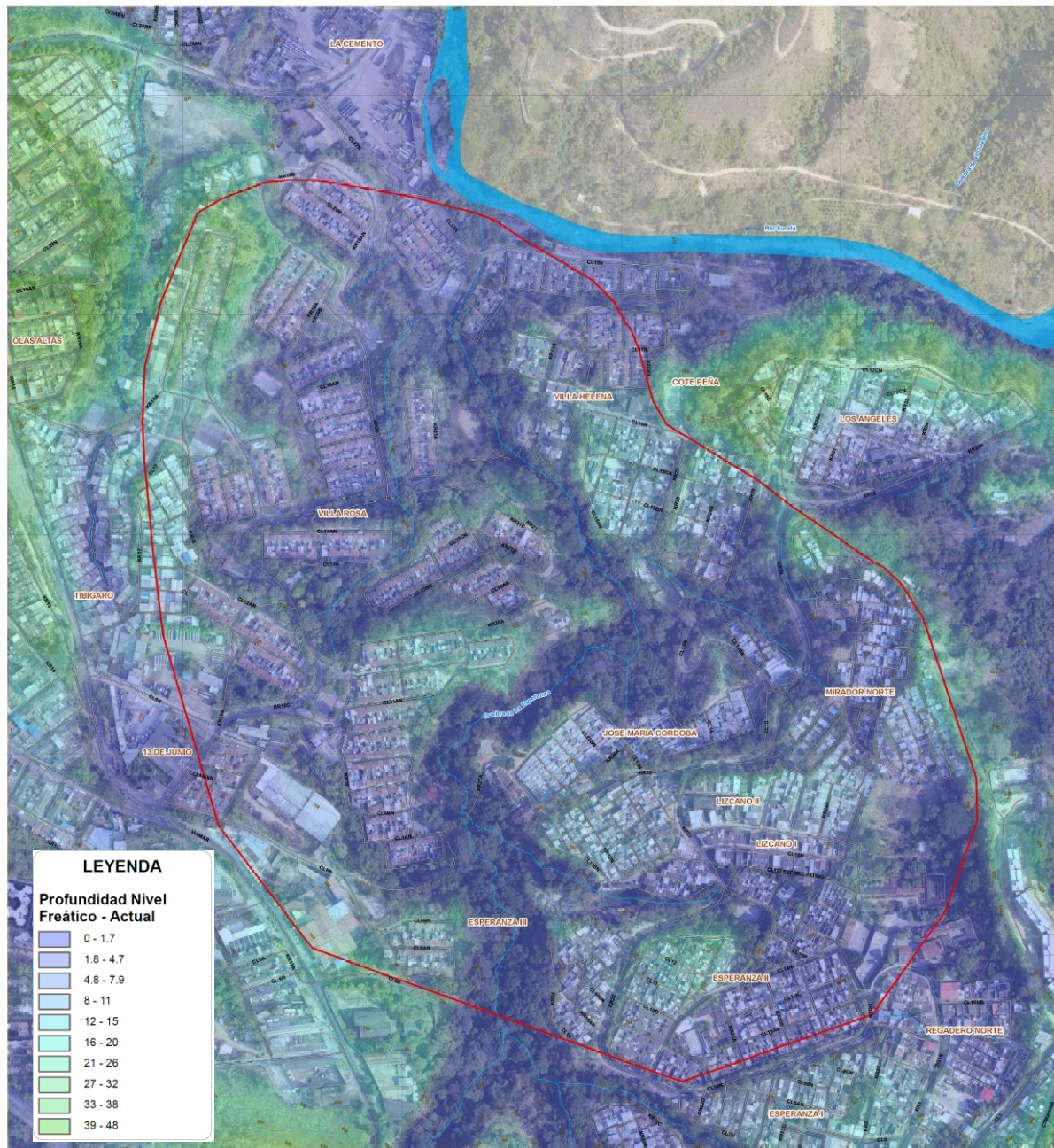


Figura 17. Posición media de la tabla de agua sobre el área de estudio a partir de los sondeos de exploración geotécnica recopilados.

Tabla 9

Estimación del coeficiente de variación de los acumulados anuales de precipitación infiltrada

Años	Infiltración Anual*	Infiltración Anual ajustada**	Lluvia Anual
1983	1038.00	1162.88	1247.90
1984	994.79	1042.67	1252.60
1985	1132.40	1271.29	1465.00
1986	1179.15	1305.87	1399.20
1987	970.16	1107.22	1251.40
1988	1348.31	1514.94	1675.30
1989	1091.98	1225.83	1396.20
1990	1093.42	1207.53	1350.30
1991	927.03	1033.54	1079.60
1992	870.22	948.79	1006.80
1993	956.12	1050.61	1092.57
1994	788.88	833.54	847.68
1995	936.15	1034.63	1136.72
1996	1075.01	1168.34	1252.20
1997	891.10	982.32	1085.40
1998	1017.70	1117.37	1261.26
1999	1156.51	1239.33	1401.10
2000	986.67	1096.10	1259.00
2001	934.61	1041.94	1212.00
2002	850.43	922.23	990.10
2003	548.38	576.82	588.43
Media	989.86	1089.70	1202.42
Desviación	163.43	190.83	232.13
Cv	0.17	0.18	0.19

Nota. *Acumulados anuales de precipitación diaria infiltrada en condiciones de humedad antecedente normal. **Acumulados anuales de precipitación diaria infiltrada teniendo en cuenta la condición de humedad antecedente según rangos de la Tabla 5.

5.4 Análisis de estabilidad

Del análisis de estabilidad realizado, acorde con la metodología, se encontró lo siguiente:

5.4.1 Falla en deslizamientos superficiales. Para realizar el cálculo de falla a la estabilidad superficial se hizo necesario estimar el índice de confiabilidad para todos los puntos de muestreo acogidos en el método de estimativos puntuales.

Este proceso el cual es un sistema de operaciones entre mapas tipo raster se ejecutó realizando 35 combinatorias producto de los 7 periodos de retorno asociados a la lluvia (0, 2.3, 5, 10 ,20, 50, 100 años) y los 4 periodos de retorno asociados al sismo (0, 32, 225, 475 años), sumando los 7 escenarios (0, 2.3, 5, 10 ,20, 50, 100 años) de flujo subsuperficial (Z_w) el cual no considera el sismo. Para cada uno de estos se realizó un flujograma como el que se observa en la *Figura 18*.

Para cada uno de los 35 escenarios mencionados se tiene el cálculo del factor de seguridad (FS) en sus 8 (2^3) subescenarios de variables aleatorias (ϕ , c , γ) que corresponden a la combinatoria del método de estimativos puntuales. Con lo anterior se calcula la media y desviación estándar del factor de seguridad de todos los escenarios y a partir de esto se obtienen 35 mapas tipo raster de confiabilidad y de probabilidad cada uno asociado a un escenario de sismo y lluvia específico.

Los deslizamientos superficiales influenciados por la acción del frente húmedo y de la posición del nivel freático son mostrados en la *Figura 19*. Aplicando el teorema de probabilidad total a los resultados de falla probable para estos dos efectos, es posible determinar la amenaza por deslizamientos superficiales en la zona de estudio como se muestra en el Apéndice K.

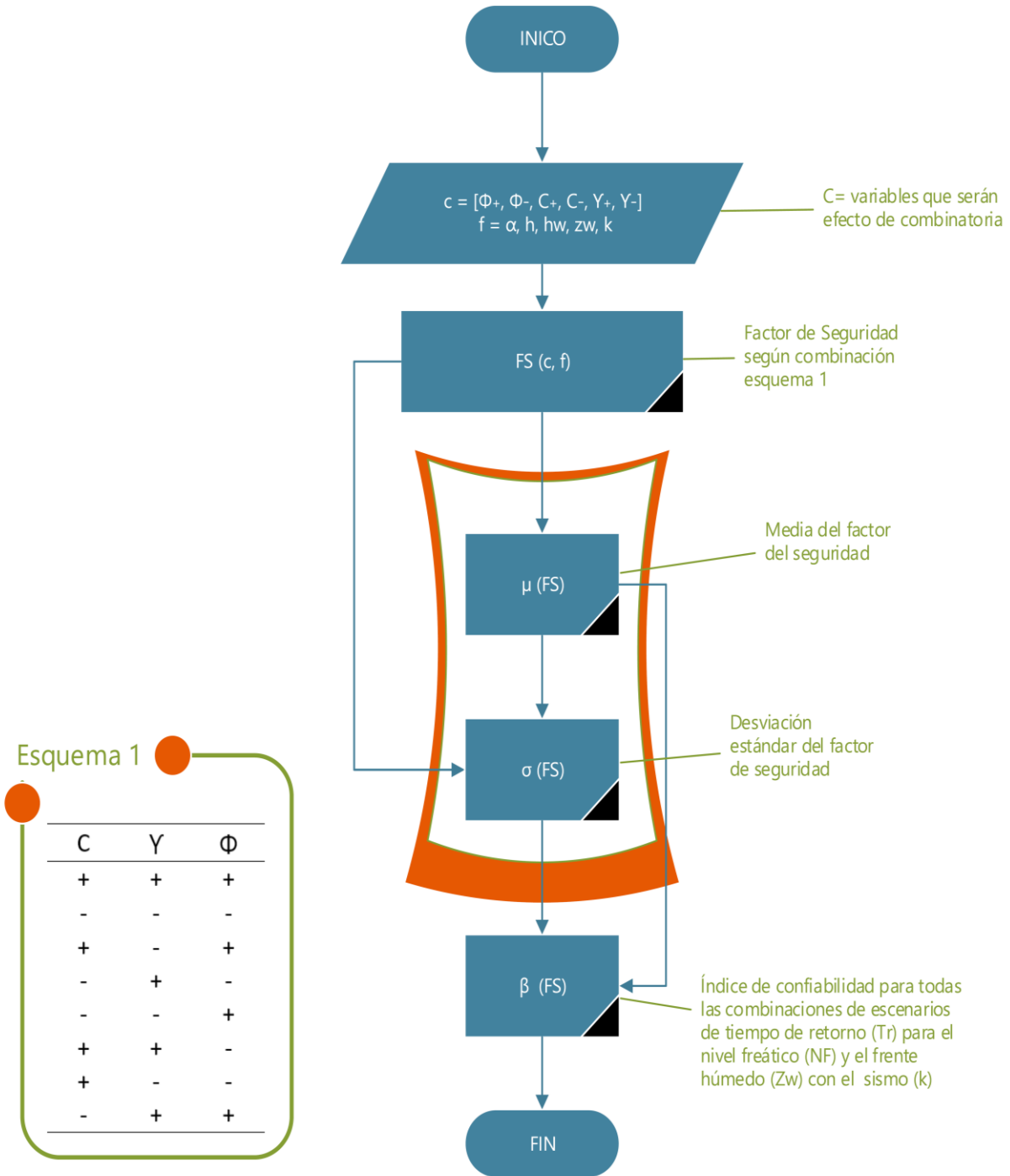


Figura 18. Flujoograma para análisis de falla en deslizamientos superficiales.

5.4.2 Falla en deslizamientos profundos. El estudio para los deslizamientos profundos es realizado para diferentes perfiles trazados sobre el área de estudio y usando el programa Slide 2018 mediante un análisis de tipo estadístico por el método del Híper Cubo Latino. Para este método se estimó el número de iteraciones necesarias que validan la técnica, mediante un análisis de sensibilidad entre la respuesta de este (probabilidad de falla) y el número de muestras analizadas. La Figura 20 exhibe el punto de estabilidad (considerado como de 150 a 200 iteraciones) a partir del cual el cálculo iterativo de la probabilidad de falla no tiene cambios considerables y opta una tendencia constante.

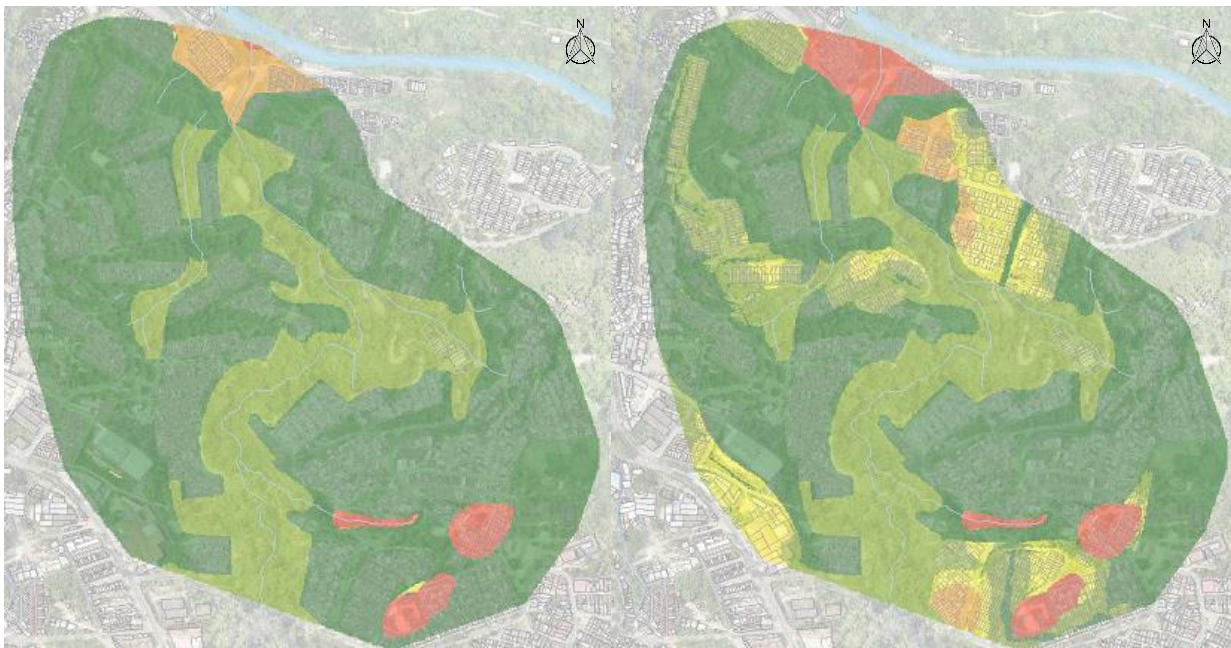


Figura 19. Amenaza a deslizamientos superficiales para (a) Frente húmedo y (b) Tabla de agua

Se analizaron 23 perfiles (ver tipología en Figura 21) trazados a lo largo de toda el área de estudio (Apéndice L), para efectos de análisis, cada uno de estos fue seccionado en dos o tres partes con el fin de obtener una falla que ajustada a los cambios importantes de geometría a lo largo del perfil. De la estabilidad por equilibrio límite empleando el método de Spencer para el análisis de estabilidad a deslizamientos profundos (Apéndice M) se deduce que la mayor

probabilidad de falla se localiza en las zonas de mayor pendiente y cercanas a los cuerpos de agua.

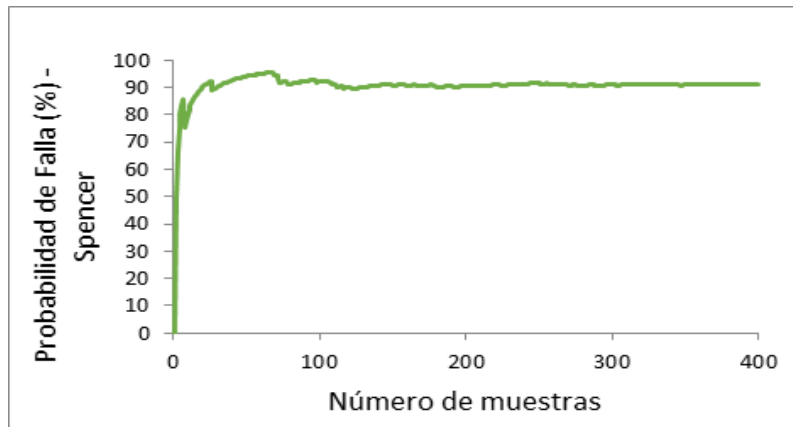


Figura 20. Convergencia del método Híper Cubo Latino.

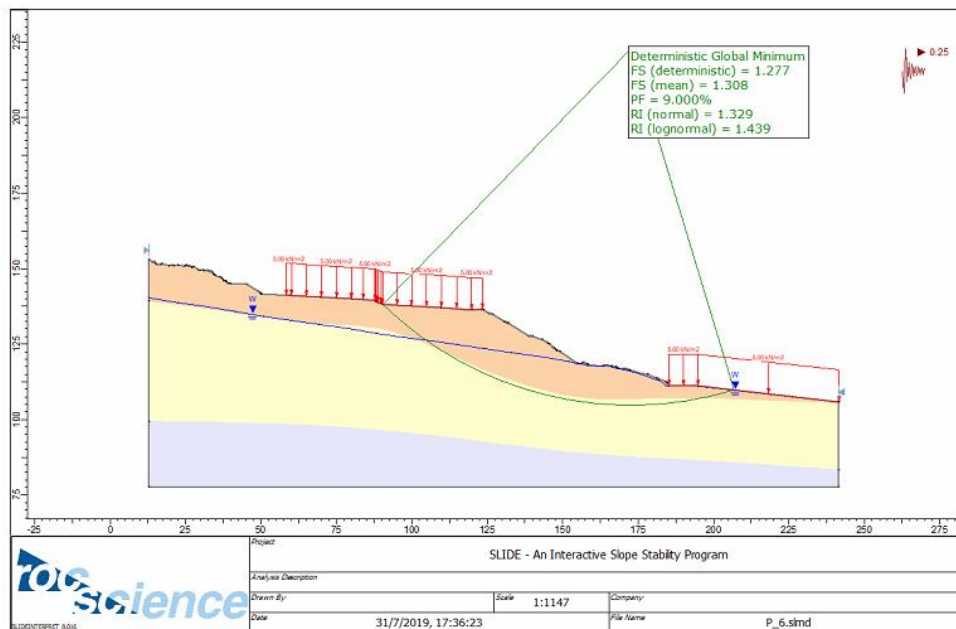


Figura 21. Perfil tipo analizado en el software Slide

5.5 Zonificación y mapa de amenaza

A partir de la aplicación del teorema de la probabilidad total a los mapas definidos como de estabilidad superficial y profunda, se obtiene el mapa de amenaza total (Figura 22) para el área de estudio según lo explicado en 4.7 y los rangos establecidos en la Tabla 10. Este mapa

representa la amenaza que tienen algunos barrios del norte de Bucaramanga a que ocurran movimientos en masa ante un movimiento telúrico y el régimen de lluvia característico. Para mayor detalle ver Apéndice N.

Tabla 10

Rango para clasificar la amenaza según la probabilidad de falla anual

Nivel de Amenaza	Probabilidad anual de Falla
Baja	< 0.001
Media	0.001 - 0.16
Alta	> 0.16

Nota. Servicio Geológico Colombiano (SGC), Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. 2016.

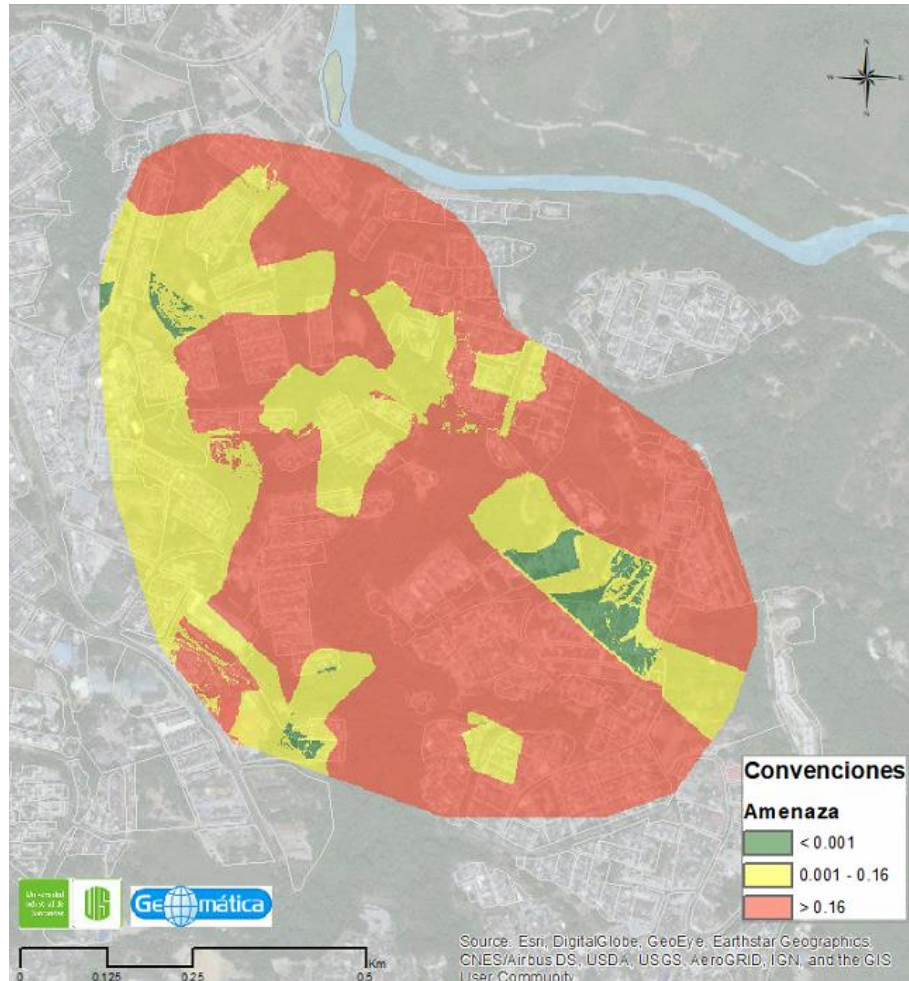


Figura 22. Amenaza total del área de estudio.

6. Conclusiones

Las unidades de geología para ingeniería sobre la zona de estudio se definen conforme a la geología expuesta en (Aldana Becerra & Ariza Villamil, 2000) y a partir de la cual se identifican cinco materiales de tipo suelo, con cuatro de ellos de origen transportado y uno de origen antrópico.

La información secundaria necesaria para realizar un modelo geológico-geotécnico se compone de la geología (en su forma de unidades de geología para la ingeniería), geomorfología del terreno y una etapa de exploración geotécnica de campo con puntos que deberán estar ubicados estratégicamente para que abarquen toda el área de estudio y permitan una caracterización mecánica acorde y real.

La variabilidad del nivel freático puede ser estimada con resultados de la posición real y no como función de la infiltración de la lluvia, si se contara con un registro mínimo de 15 años de información con lecturas de piezómetros ubicados en el área de interés.

Los valores de profundidad de frente húmedo estimados se encuentran por debajo del valor esperado, igual a 1.22 m (Pradel & Raad, 1993), que puede atribuirse a la baja permeabilidad del suelo que impide el avance del frente húmedo.

Del análisis y observación de los dos efectos considerados para la estabilidad superficial, se encuentra que los factores condicionantes son los que controlan la amenaza para este tipo de deslizamientos, por encima de los factores detonantes.

La ecuación de talud infinito, que involucra la posición del nivel freático aunado con una fuerza sísmica horizontal, tiene mayor influencia en el análisis de estabilidad por deslizamientos superficiales, que la ecuación tomada de (Pradel & Raad, 1993) para flujo subsuperficial, puesto que esta solo analiza el efecto del frente húmedo en el suelo bajo condiciones estáticas.

De los mapas obtenidos como resultado de los diferentes análisis se evidencia que los deslizamientos profundos, analizados por medio de perfiles distribuidos sobre toda el área en estudio, son los que rigen la estabilidad general de la zona y por ende tienen la mayor influencia en la clasificación de la amenaza.

7. Recomendaciones

La definición de zonas de comportamiento homogéneo viene íntimamente ligada a las unidades de geología para ingeniería, por lo que se recomienda el trazado de estas últimas refinadamente con el fin de obtener un modelo geológico realizado a detalle y más cercano a la realidad.

Se recomienda realizar ensayos en laboratorios que permitan calcular los parámetros de la zona no saturada con el fin de obtener confiabilidad en los análisis de deslizamientos superficiales productos del frente húmedo.

Para el régimen de lluvia incidente sobre la zona de estudio se recomienda trabajar con información pluviográfica, la cual permite generar curvas IDF reales y no sintéticas.

Contar con un registro sísmico más amplio para realizar un análisis sísmico simplificado que es más preciso y acertado a las condiciones del terreno, o en su defecto, considerar la magnitud del sismo controlador con base en la información disponible.

A causa de que el presente estudio solo analiza la amenaza en unidades de suelo, se recomienda realizar este tipo de análisis para áreas que incluyan material de tipo roca.

Aunque en la guía metodológica no se contempla ningún tipo de calibración, se recomienda llevar a cabo una validación con la ocurrencia de futuros deslizamientos o fechando los ya existentes en la zona de estudio para calibración de parámetros geotécnicos.

Realizar un modelo de estabilidad, de forma probabilística, en el cual se evalúe el deslizamiento profundo que afecta principalmente al norte de Bucaramanga para así realizar una caracterización de la amenaza de la grieta exterior reportada en (UIS & AMB, 2017).

Se sugiere recalcular la amenaza para las obras de mitigación que buscan abatir el nivel freático para corroborar si con estas medidas disminuye la amenaza y en qué proporción lo hacen.

Referencias Bibliográficas

- AIS, UNIANDES, & INGEOMINAS. (2009). Estudio general de la Amenaza Sísmica de Colombia. *Asociación Colombiana de Ingeniera Sísmica.*, 1, 225.
- Aldana Becerra, W. O., & Ariza Villamil, S. (2000). *Geología para la estabilidad del escarpe norte de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.
- Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización Cartografía Geomorfológica*. Bogotá, D.C.: Servicio Geológico Colombiano.
- Díaz-Granados, M., & Puente, X. (2008). Estimación de Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia a partir de Información Pluviométrica. *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Cartagena de Indias Colombia, Septiembre 2008*, (2).
- Forero Gaona, J. H. (2014). *Evaluación conceptual de amenaza vulnerabilidad y riesgo por fenómenos de remoción en masa al derecho de vía del gasoducto gibraltar-bucaramanga desde el pk60+000 al pk 118+000*.
- Gáfarro Duarte, M. A. (2013). *Zonas de amenazas por deslizamientos, a partir de modelamiento de datos espaciales para el casco urbano del municipio de San José de Cúcuta*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10596/1422>
- GEMMA. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. *Publicación Geológica Multinacional*, 4(0717–3733), 432. Retrieved from <http://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/442884/GuiaEvaPeligros.pdf>
- González De Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Green, H. W., & Ampt, G. A. (1911). *Studies on soil physics. IV*.
- Gregory B. Baecher, C. J. T. (2005). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. In *Technometrics* (Vol. 47). <https://doi.org/10.1198/tech.2005.s838>

- Harr, M. E. (1987). *Reliability-based design in civil engineering*. New York, McGraw-Hill.
- Ingeniería de Suelos LTDA. Estudio sobre el deslizamiento de ciudad norte, Bucaramanga. , Repositorio Institucional Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres § (2006).
- INGEOMINAS, & CDMB. (2007). *Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa de Algunas Laderas de los Municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta*.
- Pradel, D., & Raad, G. (1993). *Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes*. 119(2), 315–332.
- Ray K, L., Max A, K., & Joseph L.H, P. (1977). *Hidrología para Ingenieros*.
- Santacana, N., Baeza, C., Corominas, J., de Paz, A., & Marturià, J. (2003). Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Aplicación a La Pobla de Lillet (Pirineo Oriental). *Mapas de Susceptibilidad a Los Movimientos de Ladera Con Técnicas SIG. Fundamentos y Aplicaciones En España*. IGME. Madrid, 55–82.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2015). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa a escala 1:100.000*. Bogotá, D.C.
- SGC. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19776>
- Stead, D., Benko, B., Eberhardt, E., & Coggan, J. (2000). Mechanisms of failure of complex landslides: a numerical modelling perspective. *VIII International Symposium on Landslides*. Thomas Telford, Cardiff, 1401–1406.
- Suarez, J. (1998). Zonificación de Susceptibilidad Amenaza y Riesgo. In *Deslizamientos: Analisis Geotecnico* (pp. 528–587). Retrieved from www.erosion.com.co
- Suarez, J. (2003). *Análisis de Estabilidad C. 4*. 1–46.

- Suárez, J. (2003a). Capítulo 1. Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos. *Deslizamientos: Análisis Geotécnico, I*, 1–36.
- Suárez, J. (2003b). Capítulo 1. Nomenclatura y Clasificación de los Movimientos. In *Deslizamientos: Análisis Geotécnico* (Vol. 1, pp. 1–36).
- Témez Peláez, J. R. (1978). Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. *Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX. Madrid*.
- Tomás, R., Cuenca, A., Delgado, J., & Doménech, C. (2004). Diseño De Un Modelo Geológico-Geotécnico 3D De La Vega Baja Del Río Segura (Alicante, Se España). In *Egraficaunizares*. Retrieved from <http://www.egrafica.unizar.es/ingegraf/pdf/Comunicacion16983.pdf>
- UIS, & AMB. (2017). *Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga (Barrios Lizcano, Esperanza II, Mirador, José María Cordoba, Villa Helena, Villa Rosa, Villa María)*.
- UIS, & AMB. (2018). *Estudio de factibilidad y los diseños de ingeniería de detalle, para la construcción de una galería de drenaje en el barrio la Esperanza II del municipio de Bucaramanga, como medida para la reducción del riesgo por movimiento en masa profundos*.
- USDA-SCS. (1972). Part 630 Hydrology National Engineering Handbook Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook*.
- Vargas, R., & Diaz, M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. 200. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Varnes, D. (1984). Landslide Hazard Zonation: a Review of Principles and Practice. *Natural Hazards*, (3), 63. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/281932>
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Transportation Research Board*

Special Report, (176), 11–33. <https://doi.org/10.17018/revista.intrane.176> In Special report 176: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board, Washington, D.C.

W. J. Rawls, D. L. Brakensiek, & B. Soni. (2013). Agricultural Management Effects on Soil Water Processes Part I: Soil Water Retention and Green and Ampt Infiltration Parameters. *Transactions of the ASAE*, 26(6), 1747–1752. <https://doi.org/10.13031/2013.33837>