

**DISEÑO DE EXPERIMENTO DE UN MOVIMIENTO EN MASA A ESCALA DE
LABORATORIO**

BRIAN NICOLÁS QUEVEDO BARRIOS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

BOGOTÁ D.C.

2017

Contenido

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	5
2. OBJETIVOS	6
2.1. OBJETIVO GENERAL	6
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. MARCO DE REFERENCIAS	8
4.1. MARCO LEGAL.....	8
4.2. MARCO TEÓRICO.....	11
4.2.1. Movimientos en Masa.....	11
4.2.2. Origen y formación de suelos.....	19
4.2.3. Propiedades geotécnicas del suelo.....	20
4.2.4. Caso de Estudio	24
4.2.5. Modelos análogos	44
4.2.6. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)	48
4.3. MARCO TÉCNICO	49
4.4. MARCO CONCEPTUAL	52
5. METODOLOGÍA.....	53
5.1. VARIABLES DE ESTUDIO E INSTRUMENTACIÓN	56
5.2. MODELO MATEMÁTICO	56
5.3. MATERIALES.....	58
6. RESULTADOS	61
6.1. SENSORES REMOTOS	61
6.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO.....	64
6.3. DEFINICIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO	65
6.4. DISEÑO DEL MODELO ANÁLOGO	66
6.5. MODELO COMPUTACIONAL	68
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
8. CONCLUSIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA.....	76

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante décadas algunas poblaciones colombianas se han hecho célebres por tragedias asociadas a fenómenos de remoción en masa. Eventos como los sucedidos en Quebrada Blanca (Meta) en 1974, Villatina (Medellín) en 1987, Páez (Cauca) en 1994, Bello (Antioquia) en el año 2010, Salgar (Antioquia) en 2015 y los registrados en las vías Pereira-Quibdó en 2016 y Medellín-Bogotá durante el año pasado y comienzos del presente, así como los eventos ocurridos en Mocoa y Manizales este año, han causado miles de pérdidas de vidas humanas, millonarios daños materiales y grandes inquietudes sobre el manejo que se les da a las zonas de ladera que presentan inestabilidad y son altamente susceptibles a presentar movimientos especialmente en épocas de lluvia.

El hecho de que gran parte del territorio colombiano se encuentre ubicado en un área geológicamente joven y con unas condiciones geográficas complejas que incluye la división de la cordillera de los Andes en tres ramales y por tanto la existencia de valles interandinos, sumado a la localización en una zona tropical de bajas presiones y altas precipitaciones, hacen que la amenaza de ocurrencia de eventos sea alta. Por otro lado, aproximadamente el 70% de la población Colombiana se encuentra asentada sobre la región Andina que incluye tanto las zonas montañosas como los valles interandinos, siendo esta región la más susceptible a presentar eventos de acuerdo a sus condiciones y características topográficas, por lo tanto, la vulnerabilidad se incrementa sustancialmente al existir un alto número de poblaciones en la zona, añadiendo que algunas de ellas se encuentran en zona de amenaza sísmica alta, algo que vuelve más compleja la situación.

De acuerdo con lo anterior, la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos es alta y coincide con áreas densamente pobladas lo cual aumenta el riesgo. Desafortunadamente la mala planeación y el crecimiento descontrolado de los municipios y grandes urbes, sumado a los problemas sociales que iniciaron a

mediados del siglo XX llevaron a que muchas familias poblaran sectores susceptibles, creando incluso grandes barrios que con el aval de algún funcionario público terminaba siendo legalizado. Aunque no solo la población más vulnerable socialmente se ha asentado en estas zonas, en los últimos años se ha observado un comportamiento creciente en la construcción de complejos urbanísticos de estratos medio y alto en zonas de ladera.

Esta situación es ampliamente conocida por entidades gubernamentales y la propia ciudadanía, la ausencia de cultura de prevención se constituye en parte del problema, el cual se muestra en la Figura 1. Los Planes de Ordenamiento Territorial es un tema del que se viene tratando desde el año 1994, pero que solamente desde la última década se viene aplicado con mayor rigurosidad; Las entidades de prevención y atención de desastres no fueron creadas hasta después de un evento nefasto como el de Armero en 1985 y apenas hace 5 años se adoptaron políticas asociadas a la gestión del riesgo, todo lo anterior en cuanto al aspecto gubernamental.

En el tema de establecimiento de sistemas de alertas tempranas el país presenta deficiencias, no cuenta con infraestructura suficiente para la toma de datos que permita pronosticar eventos y mediante canales de comunicación con la población evitar tragedias como las ya mencionadas. Solamente se tiene registro de experiencias locales como la de la Universidad Nacional Sede Manizales que junto con la participación de entidades oficiales y privadas de la capital Caldense, hace un monitoreo hidrometeorológico automático-telemétrico en tiempo real de variables del tiempo atmosférico y del comportamiento de los ríos generando un sistema de gestión del riesgo y alertas tempranas; Son este tipo de prácticas las que deberían ser aplicadas con mayor frecuencia en el país para lograr una cultura preventiva, asociada a la mitigación del riesgo.



Figura 1: Diagrama de árbol de problemas

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué parámetros hay que tener en cuenta al momento de diseñar un experimento donde se represente la ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa a escala de laboratorio?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un modelo análogo de un movimiento en masa a escala de laboratorio, tomando como caso de estudio un evento ocurrido en el municipio de Gramalote en el año 2010.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer las principales características composicionales, mecánicas, morfológicas y morfométricas del movimiento en masa que será tomado como caso de estudio.
- Analizar información cartográfica existente, fotografías aéreas y modelos de elevación digital, para establecer la escala apropiada del modelo.
- Identificar un material correlacionable genéticamente con el del caso de estudio, el cual pueda ser recolectado y caracterizado en laboratorio.
- Realizar una simulación computacional en el software especializado Plaxis 8 2D, para identificar desplazamientos y deformaciones del movimiento.

3. JUSTIFICACIÓN

A partir del diseño de un experimento a escala de laboratorio se tiene como propósito generar un aporte al establecimiento de sistemas de alertas tempranas para movimientos en masa, mediante la propuesta de un modelo donde sea posible simular las condiciones de un evento ocurrido.

El modelo que es netamente geotécnico permitirá poner a prueba una sensorica seleccionada que identificará cambios en las propiedades del material: humedad y presión de poros. Se pretende que el diseño propuesto sea tenido en cuenta durante una posterior fase práctica donde sea posible calibrar la sensorica, antes de ser llevada a campo para monitorear laderas potencialmente inestables.

Mediante la interpretación del fenómeno ocurrido, el análisis de las características del movimiento y la aplicación de conceptos básicos de la mecánica de suelos, geología y geotecnia, este proyecto busca aportar solución a una problemática asociada al alto número de eventos registrados en el país y a las precarias políticas de prevención; Por ello es sumamente importante tener en cuenta la importancia del diseño de modelos análogos como el presente, que contribuye desde un punto de vista ingenieril experimental al desarrollo de nuevas herramientas para mitigar el riesgo asociado a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

4. MARCO DE REFERENCIAS

4.1. MARCO LEGAL

Según Vargas (1999), a raíz de varios eventos ocurridos en el país como los deslizamientos de Quebrada Blanca (1974) y del Guavio (1983) o los terremotos en la Costa Pacífica (1979) y Popayán (1983), el Gobierno Colombiano decidió incluir los desastres naturales en la legislación.

En 1988 la Ley No. 46 “Por la cual se crea y organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, se otorga facultades extraordinarias al Presidente de la República y se dictan otras disposiciones” (Congreso de Colombia, 1988) fue una de las primeras aproximaciones en la estructuración de un sistema de planeación. En esta Ley se fijan los objetivos del Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, el cual está constituido por un conjunto de entidades públicas y privadas, y se da una jerarquización a nivel territorial para la prevención y atención de desastres.

Mediante el Decreto 919 (Presidencia de la República, 1989) se organiza el Sistema Nacional para la Prevención de Desastres, se tiene en cuenta el componente prevención de desastres en los Planes de Desarrollo de las entidades territoriales, se establece el análisis de vulnerabilidad como medida en la ejecución de obras civiles y se dictan otras disposiciones. Dicho decreto codifica todas las normas vigentes para la época y en consecuencia deroga la Ley 46 de 1988.

Tras la creación del Sistema Nacional de Vivienda de Interés Social mediante la Ley de 1993, el Decreto 0004 del mismo año (Presidencia de la República, 1993) -que reglamenta parcialmente dicha ley- considera las zonas de riesgo, las cuales son estudiadas por la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres,

el otrora INGEOMINAS¹ o el HIMAT² (esto según el contexto de la situación); Posteriormente de acuerdo al concepto por la correspondiente entidad, el INURBE³ definía si se entregaba el subsidio familiar de vivienda.

Ese mismo año se creó el Ministerio de Ambiente, se reordenó el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables y se organizó el Sistema Nacional Ambiental - SINA, a través de la Ley 99 (Congreso de la República, 1993), entre los principios generales ambientales la política ambiental colombiana contempla la prevención de desastres como una materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento; cabe anotar que en el título IV se establecen las Corporaciones Autónomas Regionales.

La Ley 388 (Congreso de la República, 1997), tiene entre sus objetivos establecer mecanismos que permitan al municipio promover el ordenamiento de su territorio y la prevención de desastres en asentamientos de alto riesgo. En el capítulo III de dicha ley (Reglamentado por el Decreto 879 de 1998), se normativizan los Planes de Ordenamiento Territorial -ya referidos previamente en la Ley 152 de 1994, Artículo 41- como instrumentos básicos para desarrollar el ordenamiento del territorio municipal. Una de las determinantes de los denominados POT consiste en políticas, directrices y regulaciones sobre prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos naturales.

En el año 2010, el Decreto 4702 (Presidencia de la República, 2010) modifica algunos Artículos del Decreto-ley 919 de 1989 en el tema del Fondo Nacional de Calamidades y del Comité Operativo Nacional para Atención de Desastres;

¹ INGEOMINAS: Instituto Nacional de Investigaciones Geociencias, Química y Minería

² HIMAT: Instituto de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras

³ INURBE: Instituto nacional de Vivienda de Interés Social y Reforma Urbana

Entretanto, el Decreto 4830 del mismo año realiza algunas modificaciones al Decreto 4702.

El 7 de diciembre del año 2010, debido a la alta tasa de precipitaciones presentadas en el país durante el Fenómeno de la Niña -mismo evento que generó el movimiento en masa en Gramalote-, fue declarada la “*situación de desastre nacional en el territorio colombiano*”, mediante el Decreto 4579 (Presidencia de la República, 2010), así como “*el estado de emergencia económica, social y ecológica por razón de grave calamidad pública*”, en el Decreto 4580 (Presidencia de la República, 2010).

Finalmente, la Ley 1523 del 2012 “Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones”, define la gestión del riesgo de desastres como un “proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres” (Congreso de la República, 2012); Además establece responsabilidades y principios de la gestión del riesgo y constituye el Sistema Nacional del Gestión del Riesgo de Desastres como conjunto de entidades tanto públicas como privadas. Adicionalmente en el documento, se instauran instrumentos de planificación, sistemas de información, mecanismos de financiación para la gestión el riesgo y aspectos asociados a la declaratoria de situaciones de desastre y calamidad pública.

Mediante esta última Ley –la cual es vigente- se deroga la Ley 46 de 1988 y el Decreto 919 de 1989 (a excepción del artículo 70, inciso primero, asociado al Fondo Nacional de Calamidades), así mismo se derogan algunos artículos de los Decretos 4702 y 4830 de 2010.

A partir de la expedición la Ley 1523, todos los municipios del país deben realizar estudios de riesgos naturales (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Movimientos en Masa

Debido a la confusión generada por la terminología, Cruden (1991) definió los movimientos en masa como todos aquellos que implican roca, detritos o tierras bajo la acción de la gravedad en una ladera o talud. Usualmente se tiende a emplear el término “deslizamientos” para caracterizar cualquier tipo de movimiento siendo esta una distinción errónea, es por ello que Varnes (1978) utiliza la palabra “movimientos de ladera” para referirse de manera global al fenómeno, puesto que el deslizamiento es apenas un tipo de movimiento como se mostrará más adelante.

Otra confusión está asociada a la definición de remoción y movimiento en masa, Vargas (1999) realizó una distinción entre los dos términos, donde el primero se refiere a desplazamientos de terreno y no incluye los procesos erosivos denudacionales. Entretanto, para el autor un movimiento en masa se define como todo desplazamiento vertical o con algún componente de inclinación de un volumen de material, en el cual el principal agente es la gravedad. Y es justamente la gravedad, junto al debilitamiento progresivo de los materiales (causado principalmente por la meteorización) y la actuación de otros fenómenos naturales, los que hacen que los movimientos en masa sean relativamente habituales en el medio geológico (González de Vallejo, et al., 2002). Los movimientos ocurren generalmente a lo largo de superficies de falla y aunque pueden diferir de acuerdo al tipo de material y su disposición dando origen a diferentes tipos de movimientos, de manera general presentan una zona de falla, una masa desplazada y un área de depósito.

Varnes realizó una clasificación de los “movimientos de ladera” en 1958, sin embargo, esta fue actualizada en 1978. El criterio del autor al presentar la clasificación es principalmente el tipo de movimiento y en segundo lugar el tipo de

material; De acuerdo a lo anterior los tipos de movimientos se clasifican en cinco grupos: caídas, volcamientos, deslizamientos, propagaciones y flujos, adicionalmente surge un sexto grupo denominado movimientos complejos conformado por la combinación de dos o más clases de movimientos. Entretanto los materiales pueden ser roca o suelo (desde el punto de vista ingenieril), este último se subdivide de acuerdo al tamaño de partícula (Varnes, 1978). La combinación de tipos de movimiento y tipos de material permite detallar con mayor claridad un determinado tipo de movimiento, para ello el autor elaboró un diagrama, el cual se muestra en la Figura 2:

TYPE OF MOVEMENT			TYPE OF MATERIAL		
			BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
				Predominantly coarse	Predominantly fine
FALLS			Rock fall	Debris fall	Earth fall
TOPPLES			Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	FEW UNITS	Rock slump	Debris slump	Earth slump
	TRANSLATIONAL		Rock block slide	Debris block slide	Earth block slide
			MANY UNITS	Rock slide	Debris slide
LATERAL SPREADS			Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS			Rock flow (deep creep)	Debris flow *	Earth flow (soil creep)
COMPLEX			Combination of two or more principal types of movement		

Figura 2: Clasificación de movimientos de ladera en función del tipo de movimiento y de material. Tomado de (Varnes, 1978)

Los tipos de movimiento pueden variar de acuerdo al material: por ejemplo, un deslizamiento implica movimiento relativo entre una masa estable y una móvil en las que los vectores de movimiento relativo son paralelos a la superficie de ruptura, además las masas se encuentran en contacto; mientras que un flujo se asocia el movimiento relativo entre partículas dentro de una masa móvil (Varnes, 1978). A continuación, se exponen las principales características de los principales tipos de movimientos:

- **Caídas**

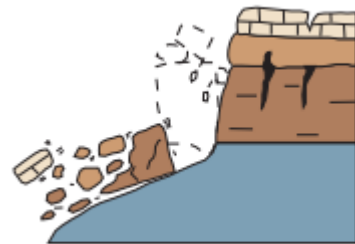
De acuerdo con la clasificación de Varnes (1978), se puede presentar caídas de rocas –como el del esquema, tomado de USGS (2004)-, detritos o tierra. En este tipo de movimiento, una masa de cualquier tamaño se desprende de una superficie sobre la cual ocurre poco o no ocurre desplazamiento cortante. Las caídas se presentan



usualmente en taludes con pendiente alta o acantilados (Varnes, 1978) y la gravedad es el principal agente del movimiento (Vargas, 1999), lo cual hace que los movimientos sean muy a extremadamente rápidos, aunque también están fuertemente influenciadas por el fracturamiento mecánico y la presencia de agua intersticial (USGS, 2004). De acuerdo con Vargas (1999), el volumen de material afectado es generalmente bajo.

- **Volcamientos**

De acuerdo con Varnes (1978), estos consisten en la rotación hacia adelante de una o varias unidades de roca alrededor de un punto de pivote ubicado por debajo del mismo, este movimiento puede ser ejercido por la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes o fluidos en las discontinuidades. Esquema tomado de (USGS, 2004).



- **Deslizamientos**

Son exclusivamente movimientos de masas, donde hay una zona de debilidad distinta (una superficie de discontinuidad) que separa el material estable con el móvil (USGS, 2004), el movimiento es progresivo y la masa desplazada puede deslizarse más allá de la superficie de ruptura (Varnes, 1978), produciendo una zona de acumulación de material desplazado bien

definida (Vargas, 1999). Ocurren en cualquier tipo de material y sobre todo tipo de pendientes, a diferentes velocidades, impulsados por el agua, viento o hielo como agentes (Vargas, 1999); de acuerdo a todos los posibles escenarios se obtienen como resultado diferentes tipos de mecanismo y formas de ruptura, siendo los más importantes los deslizamientos rotacionales y los traslacionales (Figura 3).

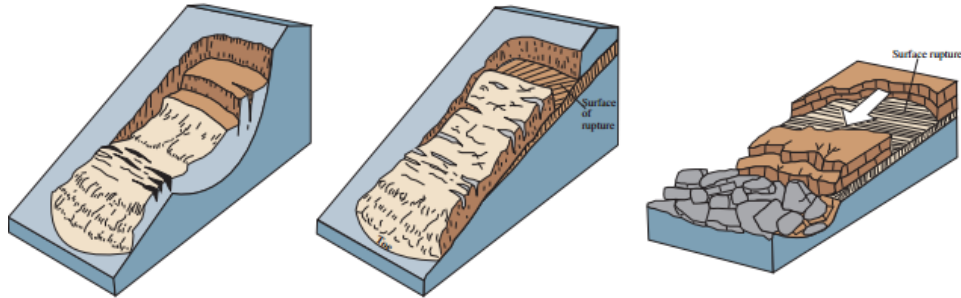


Figura 3: De izquierda a derecha. Deslizamiento rotacional, deslizamiento traslacional y deslizamiento planar. Imágenes tomadas de (USGS, 2004)

Los deslizamientos rotacionales son más frecuentes en suelos cohesivos “homogéneos”, depósitos inconsolidados y rocas muy alteradas o fracturadas, donde la rotura superficial o profunda da lugar a una superficie de falla circular cóncava hacia arriba. En este tipo de deslizamiento la masa móvil comienza a rotar alrededor de un eje que es paralelo a la superficie del suelo (USGS, 2004), dentro de la masa móvil incluso se pueden generar varios bloques que se deslizan entre sí, dando lugar a una serie de escalones (González de Vallejo, et al., 2002) formando un deslizamiento rotacional múltiple. A continuación, se muestra la nomenclatura empleada para las diferentes partes que conforman un deslizamiento rotacional típico (Suarez, 1998).

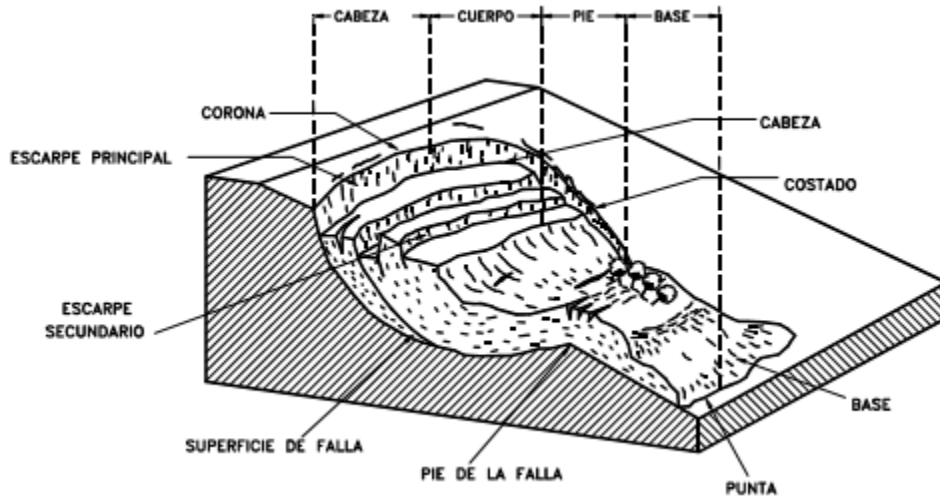


Figura 4: Nomenclatura de un deslizamiento rotacional típico (Suarez, 1998).

En los deslizamientos traslacionales, la superficie de ruptura se desarrolla en plano de debilidad preexistente (plano de estratificación o de foliación, contacto entre diferentes tipos de materiales, diaclasa, plano de falla o cualquier otro que represente una discontinuidad). Estos deslizamientos no suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzan grandes distancias, además generalmente son más rápidos que los rotacionales; Se pueden dar en suelos y rocas (González de Vallejo, et al., 2002).

- Propagación lateral

Estos movimientos se presentan en pendientes muy suaves o terrenos planos (USGS, 2004) e involucran rocas, suelos o detritos (Vargas, 1999).



El modo dominante de movimiento es de extensión lateral acomodado por fracturas de corte y tracción (Varnes, 1978). Usualmente en los desplazamientos laterales se da el movimiento de bloques rocosos o masas de suelo muy coherentes que suprayacen materiales blandos y deformables que presentan pérdida de resistencia y fluyen o se deforman bajo el peso de un material más rígido (González de Vallejo, et al., 2002), tal como se muestra en la figura tomada del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2004).

- **Flujos**

De acuerdo con Varnes (1978), este tipo de movimiento en masa, durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido. Los flujos pueden ser rápidos o lentos, saturados o secos. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento (ya sea un deslizamiento o una caída) y el material se desplaza a lo largo de una superficie de falla bien definida, dejando una forma alargada y estrecha usualmente (Vargas, 1999). De acuerdo con Wanatowski, et al., (2008) los flujos rápidos son los más peligrosos tipos de movimientos, siendo son un tipo usual de falla de taludes o laderas de suelos granulares que se caracterizan por una repentina pérdida de resistencia seguida de un desarrollo rápido de grandes deformaciones que traen como consecuencia efectos más devastadores que otros tipos de movimientos. Dentro de los flujos también se incluye la reptación o creep, que se caracteriza por ser de muy baja velocidad.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos establece cinco categorías básicas de flujos, estos son:

- i) **Flujos de detritos**, conformados por una combinación de material suelto, roca, materia orgánica, aire y agua movilizado como una suspensión que fluye ladera abajo a altas velocidades (USGS, 2004). Generalmente ocurren en zonas de material muy fracturado. Los flujos de detritos incluyen <50% finos y una fracción >20% de gravas y material de tamaño grueso (Jakob & Hungr, 2005). Figura 5a.
- ii) **Avalanchas de detritos**, definido como una variedad de flujos de detritos, donde el movimiento es muy rápido a extremadamente rápido. De acuerdo con Hutchinson (1988) en Jakob & Hungr (2005), las avalanchas de detritos a diferencia de los flujos corresponden a movimientos no canalizados, es decir, su movimiento se da sobre la ladera sin tener confinamiento lateral. Figura 5b.

- iii) **Flujos de tierra**, donde el material se licua y fluye hacia abajo, formando una depresión en la parte superior de la ladera y un flujo elongado de material finogranular (USGS, 2004), afecta generalmente suelos orgánicos o suelos residuales y en este caso el material movilizado se presenta húmedo mas no saturado (Vargas, 1999). De acuerdo con Jakob & Hungr (2005), los flujos de tierra se componen de una fracción menor al 20% de gravas y partículas de tamaño grueso. Figura 5c.
- iv) Los **flujos de lodo**, presentan condiciones similares a los flujos de tierra, pero en este caso el material está lo suficiente húmedo para fluir rápidamente (USGS, 2004), por tanto, el principal agente de movimiento es el agua que puede llegar a saturar el material y este comienza a fluir cuando se supera el límite de plasticidad (Vargas, 1999). En los flujos de lodos el material movilizado contiene al menos 50% de partículas tamaño arena, limo o arcilla.
- v) La **reptación o creep**, es un movimiento imperceptiblemente lento y constante. El movimiento es causado por un esfuerzo cortante suficiente para producir deformación permanente, pero demasiado pequeño para producir una falla por corte (USGS, 2004). Se evidencia en campo a través de vegetación inclinada y ondulaciones en el suelo usualmente. Figura 5d.

Otros autores como incluyen otras categorías dentro de la clasificación, siendo válidas y altamente utilizadas, por ejemplo, Vargas (1999) define los **flujos de escombros** como aquellos que se constituyen de una mezcla de suelos, rocas y restos vegetales, donde generalmente la masa presenta un alto grado de saturación y tiene un alto poder destructivo.

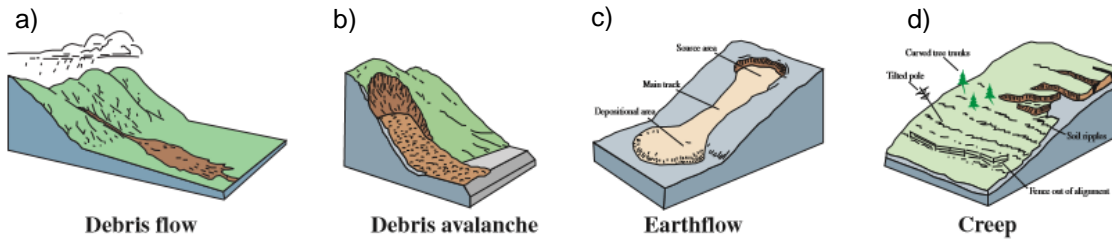


Figura 5: Esquemas de diferentes tipologías de flujo. a) Flujo de detritos b) Avalanchas de detritos c) Flujo de tierras d) Creep o reptación. (USGS, 2004).

Los tipos de flujos mencionados, y especialmente los de detritos, están compuestos de tres zonas: i) Iniciación, ii) Transporte y iii) Depósito. La iniciación se da en la zona de falla de la ladera, con pendientes entre los 20° y 45°. Por otro lado, el depósito se genera al disminuir el ángulo de la pendiente de la ladera, es usual la formación de depósitos con forma de abanico en el pie de la misma (Jakob & Hungr, 2005).

Pierson (1986) en Jakob & Hungr (2005), define la geometría de un aumento de flujo de detritos a través del esquema que se muestra en la Figura 6, es típica una forma de cuña, donde la parte frontal contiene el material más grueso y la parte trasera el material más fino. Hacia el segmento medio se encuentra una región altamente turbulenta.

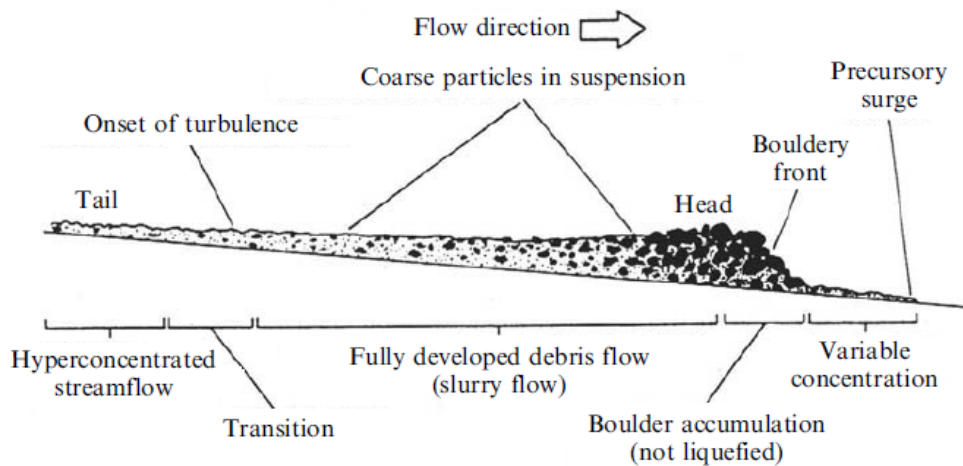


Figura 6: Diagrama del aumento de un flujo de detritos con un frente de bloques (Pierson, 1986). Tomado de (Jakob & Hungr, 2005).

- **Complejos**

Implican una combinación de uno o más de los principales tipos de movimientos descritos anteriormente, ya sea dentro de varias partes del movimiento en masa o en diferentes etapas en el desarrollo de los movimientos (Varnes, 1978).

4.2.2. Origen y formación de suelos

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos que son sometidos a la acción de procesos físicos de desintegración y procesos químicos de meteorización, tras estar expuestos a agentes atmosféricos como el agua. De acuerdo a los procesos genéticos, los suelos pueden ser transportados o residuales.

Los suelos transportados o sedimentarios son los que sufren la acción de agentes transportadores, formando depósitos aluviales (cuando son transportados por el agua), coluviales (transportados por la gravedad), eólicos (transportados por el viento) y glaciares (transportados por el hielo) (Pinto, 1977).

Los suelos residuales son aquellos originados por la meteorización y descomposición de la roca in situ, el cual no ha sido transportado de su localización original, se encuentran predominantemente en zonas tropicales, donde aparecen en grandes espesores y ocasionalmente conservan detalles estructurales de la roca madre. La estabilidad de taludes es complicada de un medio tropical, dado que la mayoría de suelos son de naturaleza residual sumado a otros factores que se vuelven desfavorables como el régimen hidrológico o la topografía. Desafortunadamente gran la mayor parte de estudios y teorías de la mecánica de suelos y la geotecnia han sido basadas en suelos de origen no residual, por lo que se vuelve una limitante más a la hora de la aplicabilidad de un criterio geotécnico sobre estos (Suarez, 1998).

Los procesos de formación de suelos residuales generan variaciones de composición, textura, estructura y color de manera gradual a diversas

profundidades, originando zonas o capas denominadas “horizontes” a lo largo de un perfil (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Un perfil típico de suelo residual desarrollado en zona tropical fue propuesto por Little (1969), este se compone por siete capas como se muestra en la Figura 7. Posteriormente otros sistemas de clasificación fueron propuestos basados principalmente en el grado de meteorización y en propiedades ingenieriles, entre los más conocidos se destacan los de Deere & Patton (1971), Tuncer & Lohnes (1977), Brand (1982) y Dearman (1974,1991), de acuerdo con lo documentado por Fredlund & Rahardjo (1993).

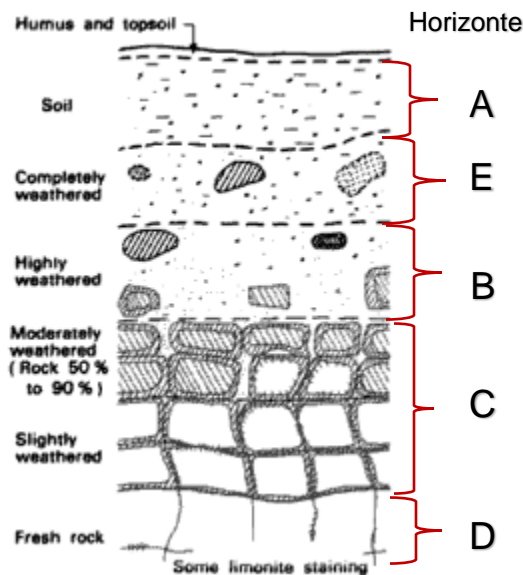


Figura 7: Diagrama esquemático elaborado por Little (1969), donde se muestra un perfil típico de suelo residual en una región tropical: La capa de suelo conforma el horizonte A; las capas donde el material está altamente a completamente meteorizado componen los horizontes E (zona de infiltración) y B (zona de acumulación) respectivamente. La roca madre ligera a moderadamente alterada corresponde al horizonte C, y la roca fresca o no meteorizada se denomina horizonte D. Imagen tomada y modificada (Fredlund & Rahardjo, 1993).

4.2.3. Propiedades geotécnicas del suelo

A continuación, se describirán las principales propiedades geomecánicas del suelo -definido como material agregado no cementado-, de manera muy breve y concisa, esto con el fin de comprender la incidencia de estas propiedades en el movimiento en masa del caso de estudio y en el desarrollo de modelos análogos realizados previamente.

- **Peso específico γ :** Es el peso del material (W) por su volumen unitario (V) (Das, 2001).

$$\gamma = W/V$$

- **Porosidad (n):** Se define como la razón del volumen de vacíos (V_v) respecto al volumen total (V) de una muestra de suelo (Das, 2001).

$$n = V_v/V$$

- **Relación de vacíos (e):** Se define como la razón del volumen de vacíos (V_v), pero esta vez respecto al volumen de material sólido (V_s) (Jimenez, s.f.).

$$e = V_v/V_s$$

- **Contenido de humedad ($\%w$):** Se llama también contenido de agua y se define como la relación del peso de agua (W_w) entre el peso de sólidos (W_s) en un volumen dado de material (Das, 2001).

$$\%w = W_w/W_s$$

El contenido de agua influye en las propiedades físicas y mecánicas del suelo en un movimiento en masa (Fang, et al., 2012), por ejemplo, tras un evento de lluvia el contenido de agua se incrementa después de la infiltración y modifica la estructura del suelo, generando una pérdida de resistencia del material.

- **Grado de saturación (S_r):** Es la relación entre el peso del agua que contiene la muestra y el que contendría si estuviera saturado (W_{sat}), tiene un rango de 0 a 100% (González de Vallejo, et al., 2002).
- **Permeabilidad:** Es la capacidad de circulación de agua en el suelo o en la roca de acuerdo a la interconexión de los poros, esta propiedad depende de la distribución granulométrica y densidad del material, así como de la forma

y orientación de las partículas (en el caso de los suelos). Se mide a través del coeficiente de permeabilidad k , un parámetro que determina la facilidad de circulación de agua en el suelo (González de Vallejo, et al., 2002).

- **Presión de poros (μ):** También conocida como presión hidrostática, es la presión interna del agua de saturación. La presión de poros dentro del suelo depende de la localización de los niveles freáticos, presiones internas de los acuíferos y características geológicas del sitio. Esta propiedad varía de acuerdo a las variaciones del régimen de aguas subterráneas y su incremento acelerado está asociado a eventos de lluvia, aunque depende de la intensidad de la precipitación, la tasa de infiltración del área, entre otros factores. La presión de poros puede ser positiva o negativa (cuando hay succión), un incremento de la positiva o una disminución de la negativa representa una disminución del esfuerzo efectivo del material, que conlleva a la reducción de la resistencia al cortante y de la estabilidad de la ladera o talud (Suarez, 1998).
- **Cohesión (c):** Es una medida de cementación o adherencia entre las partículas de suelo. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe cementante algún o material que genere adherencia, la cohesión se supone igual a cero (Suarez, 1998).
- **Ángulo de fricción interno (Φ):** Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento ($\tan \Phi$), el cual es un concepto básico de la física; Depende de varios factores como el tamaño, forma y densidad de los granos, así como de la distribución granulométrica (Suarez, 1998).

Las rocas y los suelos al fallar por corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Mohr-Coulomb (1):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) * \tan\phi \quad (1)$$

Donde, τ es el esfuerzo de resistencia al corte, c' es la cohesión efectiva, σ es el esfuerzo normal total, u la presión de agua intersticial o presión de poros y Φ el ángulo de fricción interna del material.

- **Succión:** Una de las principales creencias al momento de estudiar las fallas en los taludes está asociada a que estas ocurren principalmente debido al incremento del nivel freático pero esto no es del todo cierto, puesto que a medida que el nivel de la lámina de agua es más profunda, la presión hidrostática es negativa respecto a atmosférica (Hakro, et al., 2016) y se genera una zona succión matricial –asociada al efecto de la capilaridad debida a la tensión superficial en la interfase agua-aire (Meza, 2012) - o zona de presión de poros negativa que proporciona estabilidad al talud e influye positivamente en el factor de seguridad (Fredlund & Rahardjo, 1993), entonces se infiere que el suelo tendría una mayor resistencia en esta zona y el esfuerzo efectivo se incrementaría al tener presiones de poros negativas.

La relación existente entre el contenido de agua y la succión en un suelo, se define mediante la Curva Característica de Succión en el Suelo SWCC (Meza, 2012), mientras que la Curva Característica de Esfuerzo de Succión SSCC relaciona el grado de saturación del material con el esfuerzo de succión. Este par de curvas, fueron empleadas por Song, et al., (2016) durante la evaluación de estabilidad de un talud no saturado, allí se observó la variación del esfuerzo de succión en la capa de suelo ocasionado por la lluvia y además se evidenciaron continuas fluctuaciones del factor de seguridad consecuencia de la evaporación y la infiltración en la capa de suelo. En el mismo estudio se muestra que el factor de seguridad del talud cae notablemente durante y después de la lluvia, pero luego se recupera.

De acuerdo a las mediciones realizadas a diferentes profundidades en el modelo (Song, et al., 2016), se observó que en condiciones de saturación, a

mayor profundidad, el esfuerzo de succión es mayor y por lo tanto el factor de seguridad es menor, esto se demuestra en la expresión (2) empleada para calcular el factor a través del método del talud infinito, donde σ^s es el esfuerzo de succión, mientras que en condiciones de no saturación (arriba del nivel de la lámina de agua) la succión matricial y el factor de seguridad son más altos y el esfuerzo de succión es menor.

$$FS = \frac{c' + (\gamma * z * \cos^2 \beta - \sigma^s) * \tan \phi}{\gamma * z * \sin \beta * \cos \beta} \quad (2)$$

La lluvia de diferentes maneras puede afectar la estabilidad de un talud o ladera, por ejemplo, los enlaces entre partículas de suelo pueden romperse debido a la saturación por continua entrada de agua al sistema (Hakro, et al., 2016), además el fluido en el material incrementa el arrastre friccional creando un efecto desestabilizador (Borja & White, 2010), se reduce la cohesión entre partículas arcillosas y son modificados los esfuerzos del suelo al aumentar μ (Duque & Escobar, 2002). Finalmente, el agua en el suelo aporta una carga adicional que condiciona la estabilidad del material.

- **Consistencia:** En función del contenido de humedad, las arcillas presentan diversos estados que van desde el líquido, con las partículas moviéndose independientemente en una masa acuosa, al plástico en que las capas de agua molecular de las partículas permanecen unidas por enlaces iónicos, y finalmente al sólido en el cual se establecen enlaces entre las redes moleculares de las propias partículas. Para determinar la transición de un estado al otro se utilizan los límites de Atterberg (Jimenez, s.f.).

4.2.4. Caso de Estudio

4.2.4.1. Geología

Tras el movimiento en masa que afectó el casco urbano del municipio de Gramalote por causa de las lluvias ocurridas durante el fenómeno de La Niña en el segundo

semestre de 2010, se publicó un estudio elaborado por el Servicio Geológico Colombiano con el fin de servir de apoyo para establecer un área de reubicación para el nuevo casco urbano de Gramalote. El documento denominado “*Estudios de geología y geomorfología escala 1:25.000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote, departamento Norte de Santander*” (Servicio Geológico Colombiano, 2012) incluye una caracterización de Unidades Geológicas Superficiales y Subunidades Geomorfológicas, la cual es de gran importancia para la elaboración de este documento, pues permite conocer la disposición y particularidades del material en el área adyacente al casco urbano, en este caso el interés se centra al occidente del mismo donde ocurrió el movimiento; Adicionalmente el documento ofrece un modelo estructural regional que permite entender los principales rasgos tectónicos y neotectónicos de la región.

4.2.4.1.1. Litología

De acuerdo con la Plancha *Cuadrángulo G-13 Cúcuta* y la *Memoria Explicativa del Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Norte de Santander* (Clavijo, 1994), del antiguo INGEOMINAS, en el área de interés afloran las formaciones Uribante, Cogollo –o Capacho, de acuerdo con la Memoria, en lo que sería un problema sinonimia- y La Luna, las cuales comprenden una edad Cretácica.

Estratigráficamente, la unidad más antigua en la zona occidental del casco urbano del municipio de Gramalote es la **Formación Uribante**, la cual se divide en tres miembros: Tibú, Mercedes y Aguardiente (INGEOMINAS, s.f.). El Miembro Tibú tiene areniscas de grano grueso con guijarros de cuarzo y ortoclasa, seguidas de una serie de calizas densas fosilíferas; el Miembro Mercedes tiene calizas intercaladas con arcillas pizarrosas negras (shales), las calizas son usualmente arenáceas y las arcillas tienden a ser calcáreas según la memoria explicativa (INGEOMINAS, s.f.), Finalmente, el Miembro superior Aguardiente contiene arenitas glauconíticas de grano fino a grueso, son muy duras y presentan

intercalaciones con algunas láminas de shale y lechos de caliza, este miembro suele encontrarse hacia el oriente del municipio.

Cabe anotar que (Ward, et al., 1973) elevó a Grupo la Formación Uribante y los Miembros Tibú, Mercedes y Aguardiente a Formaciones, debido a la variedad litológica; Pese a ello, no se trabajará esta nomenclatura, debido a que la información obtenida de diversas fuentes no es registrada de esta manera.

Suprayaciendo la Formación Uribante y en contacto transicional se encuentra la **Formación Cogollo**, la cual se compone de shales oscuros con intercalaciones de calizas macizas fosilíferas y delgadas capas de chert (INGEOMINAS, s.f.), esta unidad tiene un espesor entre 250 y 273 m (Servicio Geológico Colombiano, 2012); el casco urbano en teoría se encuentra ubicado sobre este material, claro está hay que tener en cuenta que afloran otras unidades superficiales las cuales se detallarán más adelante.

Finalmente, la **Formación La Luna** consiste en una sucesión de calizas finas fosilíferas, duras, de color gris oscuro y negro, que contienen concreciones de hasta 30 cm. Alternan a esta secuencia, capas delgadas de arcillolitas físciles piritosas de color gris con abundantes micas y niveles de arenitas fosfáticas (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

A continuación, se muestra un resumen de la columna estratigráfica Cretácica de las unidades que afloran en el área de Interés

EDAD	UNIDAD ESTRATIGRÁFICA	
<i>Turoniano – Coniaciano</i>	Formación La Luna (Ksl)	
<i>Albiano superior – Turoniano inferior</i>	Formación Cogollo (Kmc)	
<i>Aptiano superior – Albiano</i>	Formación Uribante (Kmu)	Miembro Aguardiente
		Miembro Mercedes
		Miembro Tibú

Tabla 1: Disposición de las unidades de la secuencia cretácica que afloran en el área de Gramalote.

4.2.4.1.2. Estructura

Según la Memoria Explicativa del Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Norte de Santander (Clavijo, 1994), en la localidad se encuentra un gran número de fallas y pliegues, predominando la existencia de fallas de rumbo hacia el occidente del departamento y las fallas inversas junto a pliegues de tipo anticlinal y sinclinal en el oriente del departamento. De acuerdo con el autor, el municipio de Gramalote se sitúa en el sector oriental donde el régimen es de tipo compresivo. En el esquema estructural del departamento publicado en la Memoria Explicativa, se observa que la Falla Gramalote es de tipo inverso, cuyo plano buza hacia el oeste y pone en contacto las unidades de la secuencia sedimentaria Cretácica, tal como se muestra en la Figura 8.

Por otro lado, en los Estudios de geología y geomorfología escala 1:25000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote, se propone un modelo estructural de la región compuesto por cinco rasgos predominantes (Servicio Geológico Colombiano, 2012) estos se muestran en la Figura 99. Cabe anotar que de manera general según la Plancha *Cuadrángulo G-13 Cúcuta*, en la zona afloran rocas cristalinas (ígneas y metamórficas) de edad pre-mesozoica, una secuencia cretácica conformada por las unidades mencionadas en el ítem anterior y rocas sedimentarias del Cenozoico.

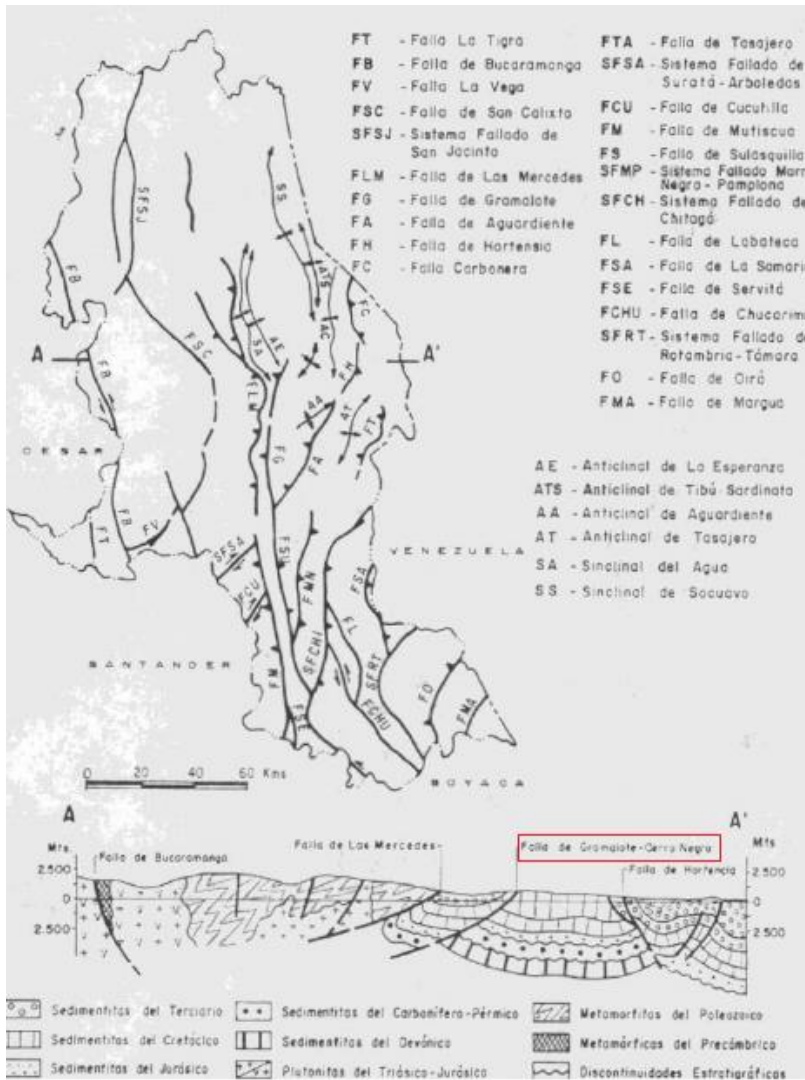


Figura 8: Esquema estructural del departamento de Norte de Santander. En el mapa y en el corte estratigráfico se observa la Falla de Gramalote FG, la cual es inversa y tiene un rumbo cercano al N-S. Imagen tomada y modificada de (Clavijo, 1994)

En primer lugar, el rasgo de mayor importancia son los límites mayores de la subcuenca sedimentaria, conformado por fallas cuya orientación tiende a ser NW-SE y NNE-SSW y que ponen en contacto el basamento cristalino con la secuencia sedimentaria, como por ejemplo la Falla Las Mercedes de naturaleza inversa. En el estudio se dice que la Falla de Gramalote ubicada al oeste del casco urbano del municipio que tiene su mismo nombre, es de tipo normal y afecta a las unidades de la secuencia Cretácica.

Adicionalmente, se observa una serie de plegamientos de las secuencias sedimentarias que muestran una tendencia general N-S, la mayoría son pliegues de

tipo anticlinal. Los demás rasgos están asociados a una dirección de transporte estructural hacia el E, fallas de rumbo dextrales con tendencia NE que como consecuencia generan zonas de compresión y extensión y cuerpos coluviales de origen tectónico –puesto que se localizan cerca a la fuente- cuyos espesores son variables (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

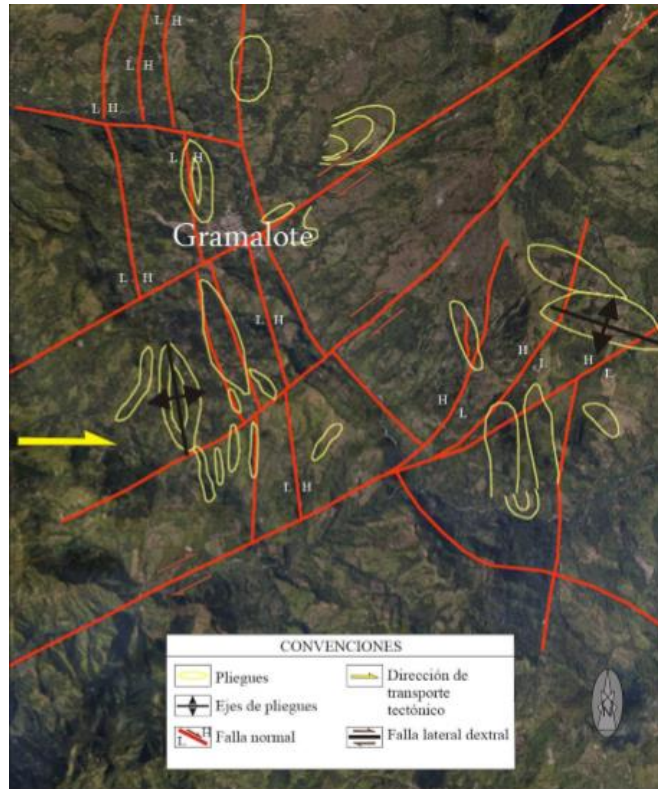


Figura 9: Interpretación geológica estructural del área de Gramalote. Imagen tomada de (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

La evolución geológica estructural del área de interés se muestra en la Figura 10 (Servicio Geológico Colombiano, 2012), en ésta se observa que sobre una cuenca en un ambiente de tipo extensional, se depositaron sedimentos de origen marino que dieron lugar a las secuencias de rocas del Cretáceo; posteriormente tras el continuo régimen de extensión se generó el hundimiento diferencial del basamento ocasionando el basculamiento de la secuencia sedimentaria, como consecuencia de este se desarrolló una fase de plegamiento en los estratos. Posteriormente, se produjo un fallamiento normal transmitido desde el basamento a la secuencia plegada, lo cual favoreció el escalonamiento y el desarrollo de escarpes por el movimiento descendente de los bloques colgantes, sobre estos escarpes se

depositaron diversos pulsos de flujos de material generando cuerpos coluviales de diferentes espesores, dada la cercanía a la fuente el origen de éstos depósitos es tectónico. Adicionalmente, cabe tener en cuenta que se desarrolló un régimen transtensivo y transpresivo generado por un fallamiento de rumbo de tipo dextral.

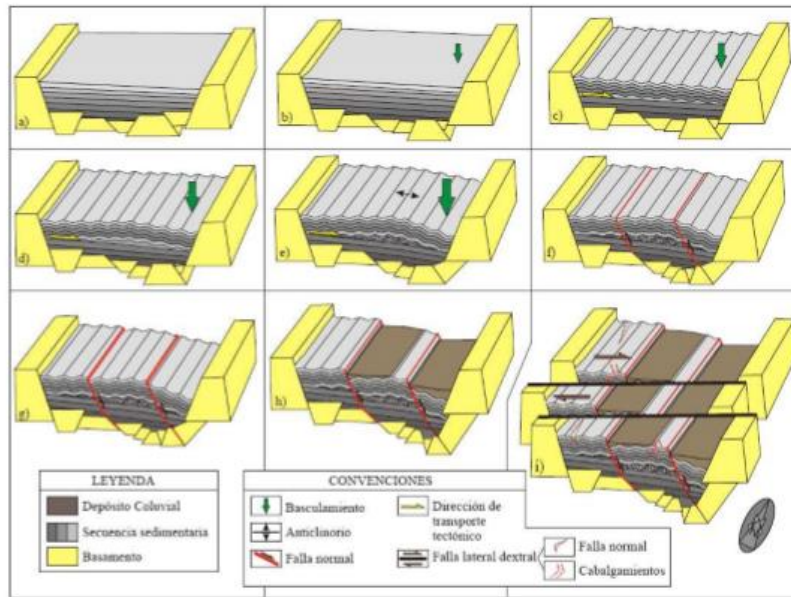


Figura 10: Esquema de evolución tectónica del área de estudio. Imagen tomada de (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

De acuerdo a lo anterior, existe una confusión asociada a la naturaleza de la Falla de Gramalote, pues mientras que en algunos estudios se dice que es normal, en otros se señala que es de tipo inversa (Figura 11). En su trabajo de grado, López (2014) realiza un control de campo, levantando, procesando e interpretando datos estructurales e indicadores cinemáticos con el fin de definir el estilo estructural de la zona.

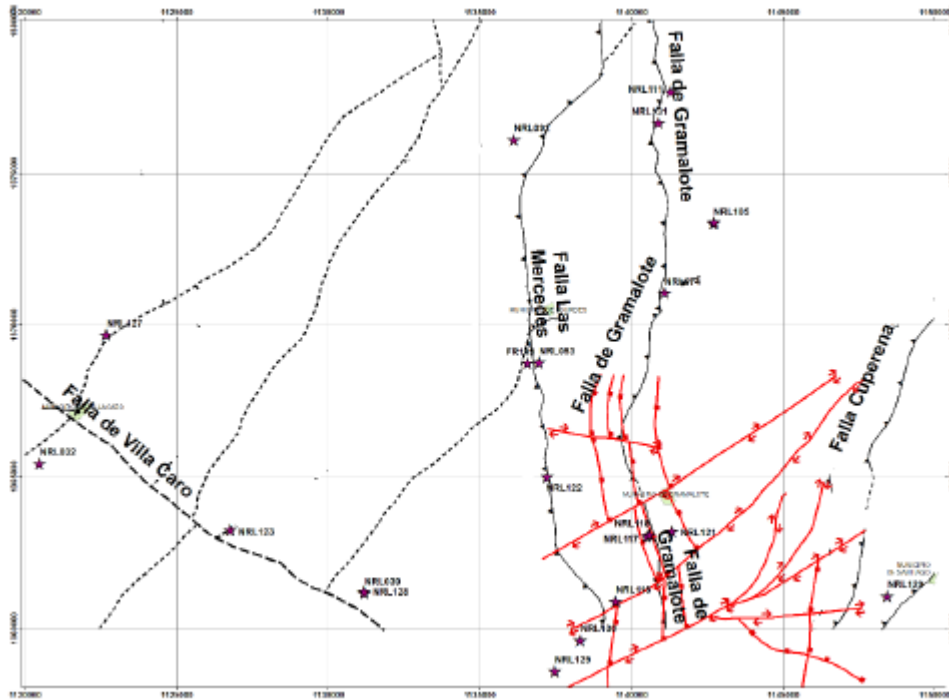


Figura 11: Mapa estructural de la plancha 87-III. Los trazos negros al este de la región corresponden a las fallas inversas cartografiadas por el Servicio Geológico Colombiano, mientras que, los trazos rojos representan las fallas normales y de rumbo registradas en el mapa de unidades geológicas superficiales del Estudio de geología y geomorfología escala 1:25.000 para la reubicación del casco urbano del Municipio de Gramalote (Servicio Geológico Colombiano, 2012). Imagen tomada de (López, 2014).

Para el autor, las fallas normales registradas en el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (Servicio Geológico Colombiano, 2012) coexistiendo con la Falla inversa de Gramalote –y también la de Las Mercedes-, son incompatibles en su formación bajo un mismo tensor de esfuerzos. Por lo tanto, estas fallas normales se habrían formado bajo un tensor de esfuerzos diferente y posiblemente más reciente que el calculado para el subconjunto de fallas inversas definidas como “incompatibles-incompatibles” (de acuerdo por una clasificación hecha por el autor) de rumbo N-S y con mayor compresión en dirección E-W. Finalmente las fallas dextrales de rumbo NE-SW que cortan y desplazan las fallas normales, serían compatibles con un tensor de esfuerzos “actual” (López, 2014).

4.2.4.1.3. Unidades Geológicas Superficiales

De acuerdo al mapa de Unidades Geológicas Superficiales (Servicio Geológico Colombiano, 2012) el casco urbano del municipio de Gramalote se encuentra ubicado sobre roca intermedia y roca blanda de la Formación Cogollo, la roca intermedia corresponde a un material alterado (el porcentaje de roca fresca varía entre 10%-15%), moderadamente fracturado, de dureza media a blanda, con un índice de fracturamiento moderado J_v ⁴ (entre 4 y 30 fracturas/m³) y un Índice Geológico de Resistencia GSI⁵ regular a bueno (GSI= 30-60%). Entretanto la roca blanda es un material muy fracturado ($J_v= 30$ fracturas/m³) y altamente meteorizado, presenta un Índice Geológico de Resistencia pobre a muy pobre (GSI= 0-30%), dado el alto fracturamiento del macizo es común encontrar harina de falla en zonas locales, así como alta plasticidad de las zonas finogranulares; el control de este material blando es predominantemente tectónico.

Al oeste del municipio afloran rocas intermedias de la Formación La Luna, éste material presenta propiedades geomecánicas similares a las rocas intermedias de la Formación Cogollo puesto que su índice de fracturamiento es moderado, aunque en zonas afectadas por la falla de Gramalote y otros sistemas de falla asociados éste índice es muy alto. Las discontinuidades se encuentran espaciadas entre 15 y 30 cm, su persistencia oscila entre 30 y 60 cm y los contactos entre capas son planos y de baja rugosidad (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

En la parte alta de la ladera situada al oeste del municipio afloran rocas intermedias de la Formación Uribante, las cuales son las areniscas cuarzosas de grano medio a grueso descritas en el capítulo de litología, pero en este caso el porcentaje de roca fresca es menor al 5%.

⁴ J_v : Volumetric joint count. Expresión que indica la densidad de diaclasas se expresa en número de diaclasas por m³.

⁵ GSI: Geological Strength Index. Índice que evalúa la calidad del macizo rocoso, en función del grado y las características de fracturamiento de la estructura geológica, el tamaño de los bloques y la condición de las discontinuidades. Se expresa en rangos de porcentajes.

Las unidades descritas anteriormente se encuentran cubiertas por material transportado producto de eventos de remoción en masa ocurridos principalmente sobre el área occidental de Gramalote, afectando el casco urbano; dadas las diferencias texturales y genéticas del material, es posible reconocer dos unidades: un suelo coluvial matriz soportado, y un depósito ocasionado por un flujo de detritos reciente que causó graves consecuencias en la cabecera municipal. El suelo coluvial tiene una matriz limoarenosa de color gris, consistencia poco firme, humedad natural baja a media y plasticidad baja; los clastos corresponden a fragmentos de lodolitas calcáreas y silíceas, chert y bloques angulares de areniscas de tamaño de grano medio. El material está compuesto aproximadamente por un 70% de matriz, la selección de los clastos es moderada, aunque cabe anotar que se identifican algunos bloques angulares de hasta 1 metro de diámetro (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Estos suelos desarrollados a partir de depósitos coluviales, se describen como materiales parentales de lodolitas, lodolitas calcáreas y arenitas. Se encuentran situados entre 250 y 2000 m.s.n.m., con pendientes usuales entre 3-7% a 25-50% (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1973).

Suprayaciendo el suelo coluvial se encuentra un depósito de suelo transportado originado por un flujo de detritos, como se muestra en la Figura 12, este material es producto de movimientos en masa antiguos y recientes que involucran suelos transportados, residuales y roca. La naturaleza de estos depósitos es heterogénea y presentan una configuración matriz-soportada, donde la matriz es arcillosa, húmeda, de permeabilidad media-alta y consistencia baja; los clastos varían de tamaño, son predominantemente angulares, estos corresponden a fragmentos de calizas, arenitas y lodolitas. En estos depósitos es usual encontrar restos de materia orgánica.

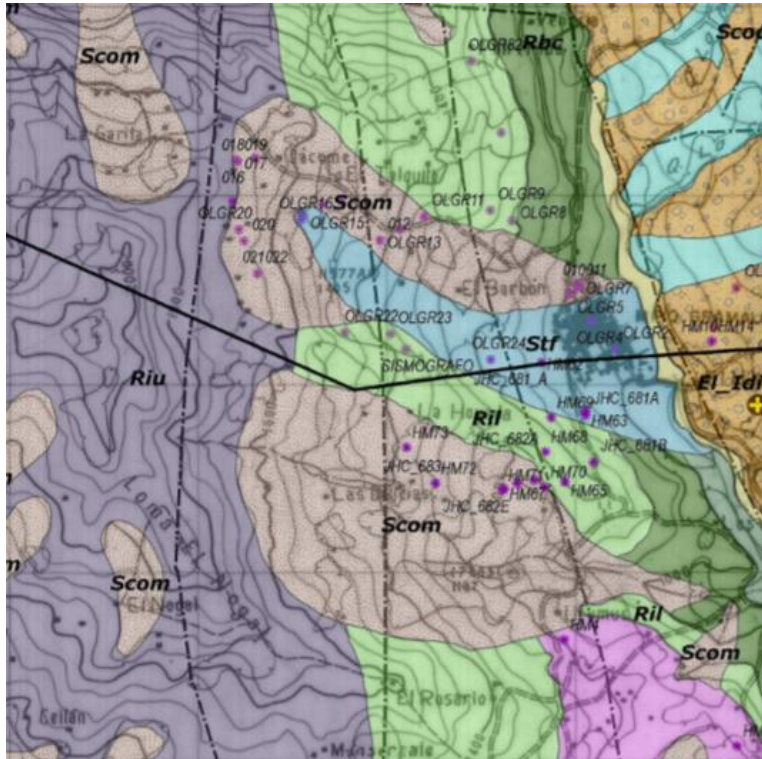


Figura 12: Mapa de Unidades Geológicas Superficiales del área de estudio. Imagen tomada de (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

A raíz del evento registrado en el año 2010, se realizaron estudios de exploración directa e indirecta en la parte baja de la ladera, al este del municipio de Gramalote, sobre la margen derecha de la quebrada La Calderera, 150 m aguas abajo de Puente Cuervo en el acceso vial al casco urbano. La exploración fue realizada en una zona de un deslizamiento que podría implicar el desplazamiento de una masa hacia la quebrada, represando el flujo de agua y causando una tragedia mayor.

Fueron efectuados tres (3) sondeos a 20 metros, dos (2) tomografías eléctricas, un (1) sondeo eléctrico vertical, una (1) línea de refracción sísmica y se elaboró un perfil estratigráfico de la zona, el cual muestra que hay un depósito coluvial con fragmentos y bloques de arenisca, calizas y limolitas de tamaño variable embebidos en una matriz limo-arcillosa y arenosa. El espesor de este depósito es de hasta 23 metros de espesor en la parte superior del deslizamiento, pero tiende a ser menor a 7 metros en la parte baja del deslizamiento, en cercanías al cauce de la quebrada La Calderera. Subyaciendo este material, se encontró un basamento rocoso correlacionable con el material de Formación Cogollo (Pineda, 2014).

En el Trabajo de Aplicación de Pineda (2014), adicionalmente se tomaron datos estructurales sobre las rocas aflorantes en cercanías a la quebrada, mostrando que la orientación de las lutitas y calizas correlacionables con la Formación Cogollo es N08°E/21°NW, mostrando que el buzamiento ocurre en dirección contraria a la pendiente y al deslizamiento local. Cabe anotar que el autor estudia un fenómeno local, que podría estar asociado al movimiento regional presentado en diciembre de 2010.

Por otro lado, durante los estudios de prefactibilidad de sitios de reubicación para el casco urbano del Municipio de Gramalote también se realizaron exploraciones directas e indirectas en las localidades de Pomarroso y Miraflores, ubicados dentro del municipio. Allí se identificaron algunos materiales correlacionables con los descritos al principio de este capítulo, además se identificaron las propiedades geomecánicas de estos, obtenidas mediante exploración indirecta o ensayos de laboratorio a las muestras obtenidas en las perforaciones o apiques (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

4.2.4.2. Geomorfología

De acuerdo con el documento *“Estudios de geología y geomorfología escala 1:25.000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote, departamento Norte de Santander”* (Servicio Geológico Colombiano, 2012), las geoformas de la zona de Gramalote presentan un control estructural y denudacional dados los procesos endógenos y exógenos en la región. Sobre el área de interés se identifican lomos estructurales, laderas moderadas, escarpes de movimientos en masa antiguos, “flujos de detritos y escombros”, además de depósitos de movimientos en masa recientes, como se muestra en la Figura 13.

Según el documento, los lomos estructurales generados por procesos endógenos, corresponden a divisorias de aguas que exhiben terminación en forma de crestas semiredondeadas, aplanadas e incluso llanas, tienen pendientes mayores a 10° y se encuentran al occidente del casco urbano.

En cuanto a las geoformas de origen denudacional (originados por procesos exógenos), su génesis está asociada a las condiciones climáticas de la zona, puesto que, la escorrentía superficial producto de las precipitaciones es el principal agente de los procesos erosivos que se desarrollan. Las laderas moderadas (superficie natural del terreno), tienen pendientes onduladas con inclinaciones entre 10° y 40° , sobresale su buena cobertura vegetal. Los escarpes de movimientos en masa son superficies casi verticales que se desarrollan en la corona de la ladera, allí es común la formación de grietas de tracción; en el caso del área de estudio esta geoforma se reconoce en el Alto El Nogal al occidente del casco urbano.

Los flujos de detritos y escombros son movimientos rápidos de material desprendido que es arrastrado hasta ser depositado en algún cauce o lavado por las corrientes. Finalmente, los depósitos de movimientos en masa recientes se componen de detritos, escombros, suelo y bloques de roca de hasta 7 m de diámetro, esta geoforma se generó tras la reactivación de un antiguo movimiento en masa procedente desde la parte alta del cerro El Nogal correspondiendo a una masa reactivada del 65% del movimiento antiguo (Servicio Geológico Colombiano, 2012), gran parte de este material fue arrastrado hacia el casco urbano del municipio de Gramalote, evento ocurrido el 17 de diciembre de 2010.

a sentirse la transición de una fase cálida a fría del Pacífico tropical que trajo como consecuencia el inicio del “Fenómeno de la Niña” reflejado en lluvias excesivas desde abril hasta septiembre y en noviembre y diciembre (IDEAM, 2011).

El IDEAM⁶ publicó en el año 2014 un mapa de alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia de un fenómeno típico de La Niña, basado en información tomada de eventos sucedidos en años anteriores. En el mapa que se muestra en la *Figura 14*, se observa que en la región centro-oriental del departamento de Norte de Santander, se presenta un excedente severo porcentual de probabilidad de precipitación, permitiendo inferir que los eventos que se han registrado han sido lo suficientemente importantes para que se llegue a considerar este nivel de alteración (el más alto).

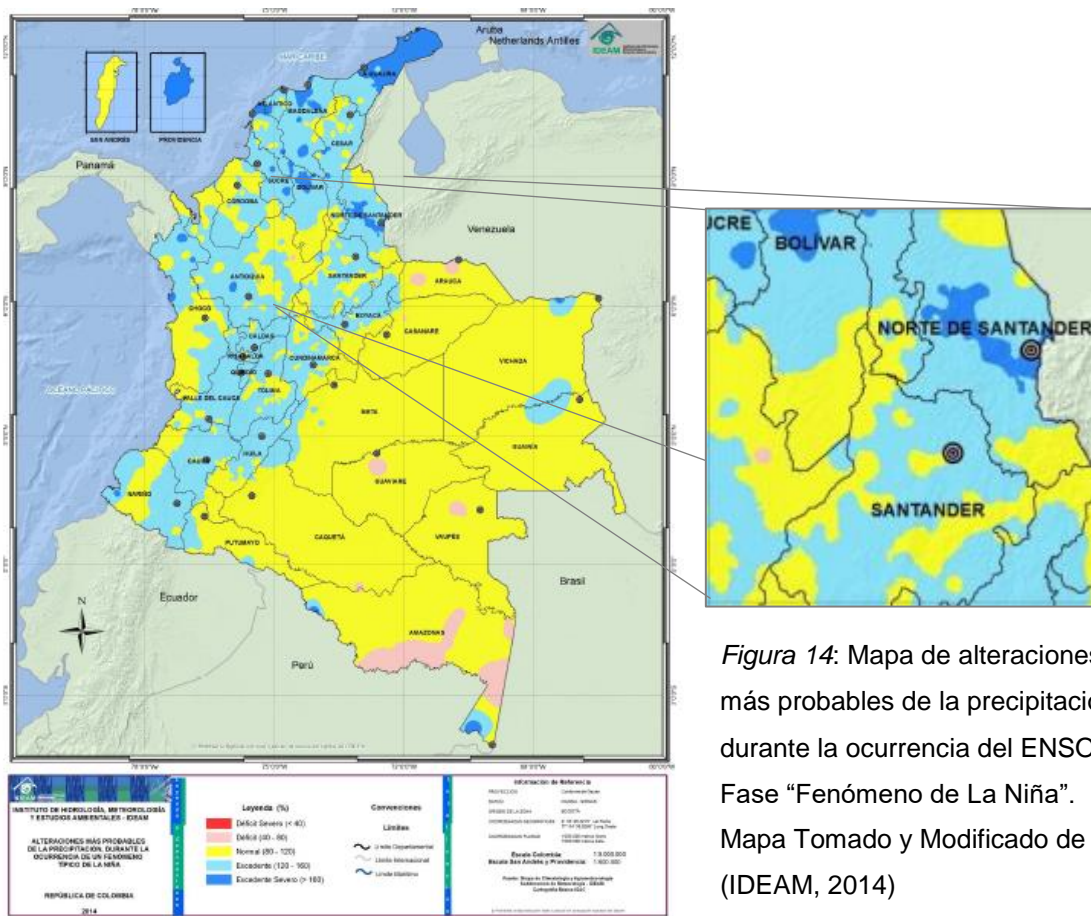


Figura 14: Mapa de alteraciones más probables de la precipitación durante la ocurrencia del ENSO Fase “Fenómeno de La Niña”. Mapa Tomado y Modificado de (IDEAM, 2014)

⁶ IDEAM: Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

4.2.4.4. Movimiento en Masa

El Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano, presentó un reporte detallado del movimiento en masa que afectó al municipio, la información fue registrada con el apoyo de la Universidad de Caldas. De acuerdo con el SIMMA el evento que se registró desde 12 de diciembre de 2010 fue de tipo compuesto (Servicio Geológico Colombiano, 2014), puesto que ocurrió un flujo de detritos, bloques y escombros en la parte alta de la ladera causado por la saturación del material y la alta inclinación de la pendiente, seguido de un movimiento de tipo rotacional (Figura 15).

La formación de grietas de tracción y los primeros deslizamientos fueron registrados en la Vereda Jácome -ubicada en la parte alta del municipio- a comienzos del mes diciembre, posteriormente se generó el flujo que se encausó hacia el oriente en dirección al casco urbano, pero antes de llegar allí, provocó una sobrecarga en la ladera ocasionando una falla de tipo rotacional a la altura de la silleta del Sistema de Fallas de Gramalote como se muestra en la Figura 16. Finalmente, como consecuencia del deslizamiento rotacional se habría producido un levantamiento de hasta 8 metros de material especialmente en la parte oriental del municipio ocasionando la destrucción de las edificaciones, resultado de una tasa de desplazamiento de hasta 4 m/hora (Pedroza, 2012).

Cabe anotar que durante el evento, las intensas precipitaciones no solo causaron la saturación y posterior sobrecarga de material sino al atravesar el espesor del coluvial alcanzó niveles de shales y arcillolitas que de acuerdo con el SIMMA son rocas de la Formación Cogollo (Servicio Geológico Colombiano, 2014), este material con la acción del agua cambió dramáticamente su consistencia y redujo considerablemente su resistencia al esfuerzo cortante, lo que condujo a la falla de tipo rotacional, cuya superficie habría pasado bajo los niveles de cimentación de las edificaciones de la población, evidenciándose a través del levantamiento y volteo de las mismas (Pedroza, 2012).



Figura 15: Movimiento de masa tipo compuesto que involucró un flujo previo a un deslizamiento de tipo rotacional por sobrecarga. Imagen tomada de (Pedroza, 2012)

Con base a lo explicado, el siguiente esquema expone la secuencia de eventos del movimiento de tipo compuesto:

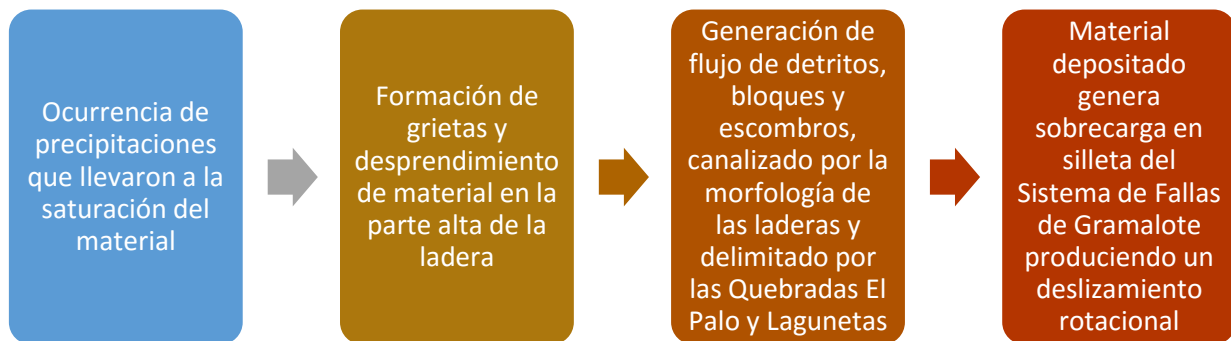
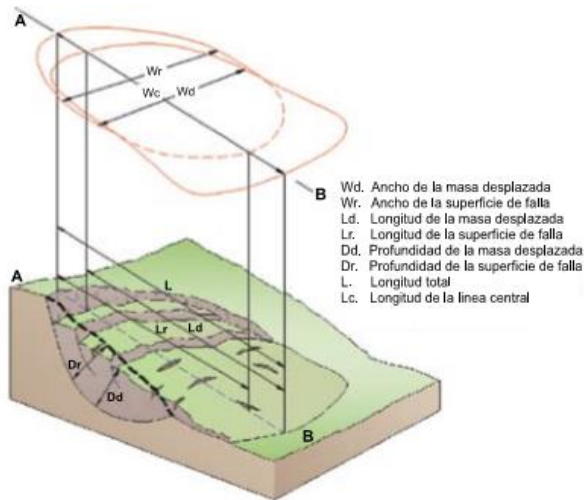




Figura 16: a) La imagen satelital muestra las unidades cretácicas en el área del movimiento y los trazos del Sistema de Fallas de Gramalote. b) La fotografía detalla el área de influencia del coluvión, el cual se encuentra limitado por las dos quebradas que fluyen en sentido oeste-este. También se observan evidencias de los primeros movimientos en la parte alta de la ladera, los flujos y el posterior deslizamiento. Imágenes tomadas de (Pedroza, 2012)

En el Reporte presentado por el SIMMA, adicionalmente se da una caracterización morfológica general del movimiento con base a mediciones en campo, estos son de gran utilidad y apoyo para la elaboración del modelo. Los datos registrados y el esquema realizado (Servicio Geológico Colombiano, 2014) se exponen a continuación:

PARÁMETRO	VALOR
Azimut del talud	190°
Dirección del movimiento	100°
Diferencia de altura corona a punta	762 m
Longitud Horizontal corona a punta	2621 m
Pendiente de ladera en pre-falla	30°
Pendiente de ladera en post-falla	45°



PARÁMETRO	VALOR
Wd	464 m
Dd	6 m
Ld	2530 m
L	2530 m

Tabla 2 y Tabla 3: Parámetros morfométricos medidos en campo (Servicio Geológico Colombiano, 2014). Figura 17: Esquema de dimensiones de un deslizamiento tomado de (Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007)

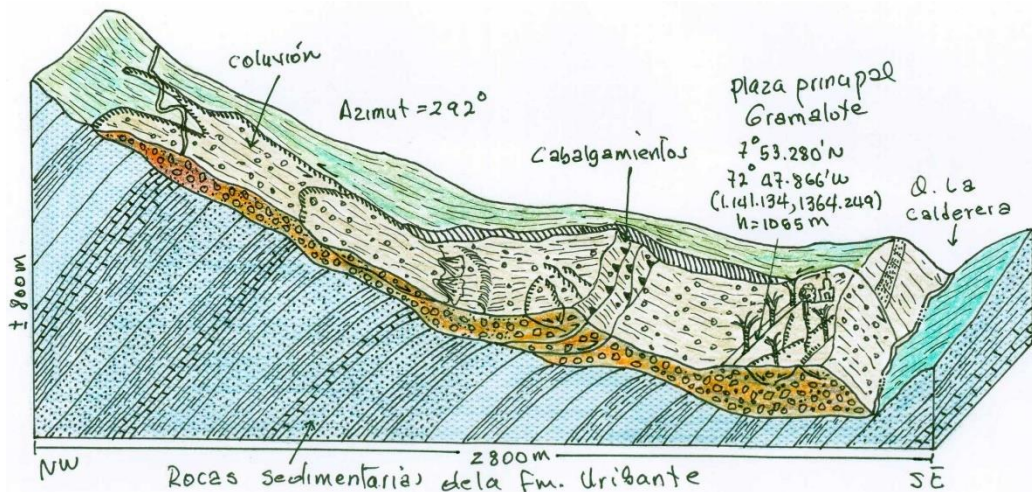


Figura 18: Perfil de la ladera afectada por el movimiento en masa. (Servicio Geológico Colombiano, 2014)

4.2.4.5. Sismicidad

De acuerdo con el boletín de sismos de la Red Sismológica Nacional de Colombia –RNSC-, para los días 17 y 18 de diciembre se presentaron cinco eventos de los cuales uno de ellos fue considerado destacado, su epicentro fue en cercanías al municipio de Salazar de las Palmas (Norte de Santander), a tan solo 20 km al suroeste de Gramalote. Los sismos se exponen en la Tabla 4 (INGEOMINAS, 2010), mientras que la Figura 19 muestra la localización de los mismos respecto al municipio de Gramalote. A pesar de ser de que el evento más importante fue baja magnitud (El mayor fue de ML=3,8 en la escala de Richter), esta serie de sismos pudo favorecer la aceleración del movimiento en masa.

EVENTO	FECHA	HH:MM:SS (Local)	LAT	LONG.	Z	ML (RICHTER)	UBICACIÓN
E1	17/12/2010	08:22:46,4	7,77	-72,93	Superficial (1,2 km)	3,8	Salazar de las Palmas
E2	17/12/2010	16:49:7,5	7,78	-72,93	Superficial (3,2 km)	2,3	Salazar de las Palmas
E3	17/12/2010	17:19:23,7	7,79	-72,93	Superficial (3,6 km)	2,8	Salazar de las Palmas
E4	17/12/2010	20:39:40,2	7,76	-72,93	Superficial (2,8 km)	2,3	Salazar de las Palmas
E5	18/12/2010	03:55:11,9	7,80	-72,92	Superficial (2,5 km)	1,0	Salazar de las Palmas

Tabla 4: Listado de sismos registrados en cercanías al municipio de Gramalote por la Red Sismológica Nacional Colombiana, en rojo se observa un evento destacado dada su magnitud. La profundidad superficial incluye un rango entre 0 y 30 km. Información tomada de (INGEOMINAS, 2010)



Figura 19: Localización de los epicentros de los sismos registrados en la región de Gramalote los días 17 y 18 de diciembre de 2010. Información tomada de (INGEOMINAS, 2010) e imagen tomada de Google Earth ©2016 Google.

Desafortunadamente este no ha sido el único evento que ha afectado al municipio de Gramalote. Tras el terremoto de Cúcuta en 1875 de 7,3 en la escala de Richter, el casco urbano fue reubicado a la locación en la que estuvo hasta el año 2010, la solución encontrada no fue la más adecuada, pues Gramalote se asentaría sobre un depósito coluvial (Pedroza, 2012) de material suelto y susceptible a movimientos en masa; adicionalmente el uso agrícola de la zona occidental del municipio sumado a la deforestación habrían comprometido la estabilidad del terreno.

4.2.5. Modelos análogos

Los mecanismos que generan movimientos en masa de cualquier naturaleza, pueden ser entendidos por medio de elementos simples ensayados en pequeños especímenes bajo condiciones idealizadas (Wang & Sassa, 2003). De acuerdo con White (2011), la elaboración de cualquier modelo experimental debería cumplir con una similitud geométrica, cinemática y dinámica respecto al prototipo o ejemplar original. La similitud geométrica se cumple solamente si todas las dimensiones del cuerpo en las tres coordenadas tienen la misma tasa de escala lineal y todos los

ángulos del prototipo se conservan en el modelo; Adicionalmente las orientaciones del modelo y el prototipo respecto a sus alrededores debe ser idéntica (White, 2011).

En cuanto a la escala cinemática, se requiere que tanto el modelo como el prototipo tengan la misma proporción de longitud y tiempo, resultando por lo tanto una tasa de velocidad igual para ambos. Finalmente la similitud dinámica consiste en una misma proporción de longitud, tiempo y fuerza (o masa) entre el modelo y el prototipo (White, 2011).

Modelos en canales artificiales han sido ampliamente empleados para estudiar los factores desencadenantes y mecanismos de movimiento de flujos inducidos por lluvia, siendo posible simular los procesos de infiltración del agua lluvia en una ladera, monitoreando parámetros como la presión de poros a lo largo de la zona de movimiento (Wang & Shibata, 2007), o la humedad. Para ello, diferentes autores han simulado varias condiciones hidrológicas y de suelo, planteando numerosos escenarios y controlado ciertas variables.

En 2003, Wang & Sassa, mediante experimentos mostraron que el tamaño de grano y contenido de partículas finas en un movimiento inducido por lluvia, tenían un impacto significativo en la movilidad del mismo, en el comportamiento de la falla y en el incremento de la presión de poros luego de haber ocurrido la falla; Los autores concluyeron que los flujos se generan en el material más fino (probablemente debido a la menor permeabilidad y al hecho de que sea más fácil para los granos finos flotar durante el movimiento), mientras, que deslizamientos retrogresivos ocurren con material más grueso, donde la presión de poros registrada fue menor (Wang & Sassa, 2003).

Lourenço, Sassa & Fukuoka (2006), analizaron el comportamiento de la presión hidrostática y del comportamiento de la falla al modelar dos capas de material en su experimento: una de "arenas gruesas" con tamaño de grano promedio de 0,25 mm, y una de arenas muy finas con tamaño de grano promedio de 0,05 mm. Los autores

situaron una serie de transductores a diferentes profundidades y estudiaron el fenómeno bajo diferentes escenarios, modificando la superposición de las capas y la entrada del flujo de agua (descendente o ascendente), creando al menos cuatro condiciones para analizar. En el estudio se indica que las condiciones de falla dependen principalmente de la posición de las capas, mientras que la distribución de la presión de poros en las dos capas está estrechamente influenciada por la dirección de infiltración, esta presión de poros durante la falla siempre decrece (Lourenço, et al., 2006).

La influencia de la permeabilidad del suelo en un movimiento a escala de laboratorio, fue estudiada por Wang & Shibata en 2007, como propiedad básica que juega un papel importante en el balance entre la generación y la disipación de la presión de poros, fundamental para el inicio de un flujo. Se muestra que hay una relación óptima entre la intensidad de lluvia y la permeabilidad del material, pues para cierta intensidad, los flujos pueden ocurrir en suelos con un limitado rango de permeabilidad. El material con mayor permeabilidad tuvo el mayor suministro de agua y a su vez tuvo la mayor tasa de acumulación de agua en los poros, así mismo hubo una mayor disipación de la presión de poros frente al material menos permeable, en el cual la tasa de generación de presión de poros fue mayor que la de disipación causando como consecuencia flujos con alta movilidad (Wang & Shibata, 2007).

En 2008 un grupo de investigadores simuló tres condiciones desencadenantes diferentes: exfiltración de agua desde el basamento, infiltración de lluvia prolongada (como lo habían hecho Lourenço et al., 2006) y aplicación de ráfagas intensas de lluvia. Asimismo se planteó un modelo con variación en las densidades del material en función de la relación de vacíos; De esta manera fueron ilustrados distintos procesos hidrológicos con diferentes porosidades iniciales del material, demostrando que este conjunto de condiciones conducen a tiempos muy diferentes de falla e influyen en el comportamiento del movimiento. De acuerdo con los autores, en suelos sueltos (con $n > 0,44$) se presentó una rápida contracción del

material durante la falla causando un incremento dramático de la presión de poros y conduciendo a un flujo de alta velocidad, entretanto, en el material denso ($n < 0,44$) se produjeron movimientos lentos condicionados por la dilatación del material, la caída de la presión de poros y su posterior recuperación de forma lenta originando un nuevo movimiento, mostrando así un comportamiento cíclico (Reid, et al., 2008).

Fang, Ciu, Pei & Zhou en 2012, partieron de un caso de estudio, empleando material de la región de Wenchuan en China, afectada por un terremoto en el año 2008, que causó un gran número de movimientos en masa. Para ello elaboraron un modelo a escala utilizando suelo suelto, típico de la zona de interés. Los investigadores tomaron como variable el ángulo de inclinación del talud modelado y midieron la presión de poros y la humedad del material. Al tratarse de un material suelto y de alta porosidad se facilita un incremento abrupto de la presión de poros, además, las lluvias probablemente causan la concentración de partículas finas a lo largo de un plano a cierta profundidad de la ladera o talud. En dicho plano se reduce la tasa de porosidad y permeabilidad del material y se incrementa súbitamente la presión hidrostática alcanzando un estado crítico, favoreciendo la ocurrencia de un movimiento, por tanto este plano de acumulación de finos se convierte en una superficie de deslizamiento potencial. Durante los ensayos, se observó que el contenido de humedad tuvo un aumento rápido en el sensor situado en el pie del talud, respecto a los otros puntos, y que para las pruebas realizadas con mayor ángulo de inclinación del modelo el material tuvo un comportamiento de dilatación, seguido por contracción (Fang, et al., 2012), tal como el explicado por Reid, et al., 2008.

Gallage, Jayakody & Uchimura, también estudiaron los efectos de la inclinación de la ladera en el mecanismo de falla. Para ello elaboraron dos modelos con ángulos de inclinación 30° y 60° y posteriormente aplicaron agua al sistema en forma de lluvia. Los resultados de los ensayos permiten a los autores concluir que cuando el ángulo de inclinación de la ladera es alto (incluso mayor que el ángulo de fricción del material), la falla se produce por una pérdida de succión en el suelo, mientras

que para ángulos de inclinación bajos, el desarrollo de presiones de poros positivas hacia el pie de la ladera es la principal causa de la falla, la cual se caracteriza por ser relativamente lenta y progresiva (Gallage, et al., 2012)

Uno de los estudios más recientes, muestra la importancia de la compactación del material, pues una mayor densidad del mismo dificulta el desencadenamiento de la falla del talud o la ladera incluso en condiciones de lluvias intensas o con humedad antecedente en el material térreo. En el caso de la presión de poros, esta se incrementa súbitamente después de ocurrida la falla y depende del espesor y la velocidad del material que se desliza, sin embargo, cuando la falla es pequeña esta presión de poros no se incrementa repentinamente. Cabe tener en cuenta que la presión de poros registrada es más alta en el pie del talud que en la corona, y además es mayor en la base que en las superficies poco profundas; Para el contenido de humedad ocurre una situación similar. En condiciones de humedad antecedente la escorrentía producida erode el pie del talud produciendo cárcavas y la presión de poros y el contenido de humedad se incrementan rápidamente. Finalmente, se apreció que el flujo puede ocurrir en bajas o altas profundidades, e involucra considerables espesores de material. (Hakro, et al., 2016)

4.2.6. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es una constelación de satélites que proporcionan señales desde el espacio, transmitiendo datos de posicionamiento y tiempo a receptores (European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2016), este aglutina sistemas como el GPS y otros menos conocidos en este hemisferio como el ruso GLONASS. Los GNSS son precisos, confiables, ofrecen cobertura mundial y capacidad ilimitada de usuarios.

Los GNSS mediante sistemas sencillos y de bajo costo han sido empleados para el monitoreo de deslizamientos, estos proporcionan una precisión subcentimétrica y permiten el procesamiento digital de información en tiempo real. Para obtener una

mayor capacidad de precisión en sistemas de alerta temprana se requieren nuevos desarrollos y mejoras en los GNSS día a día, así mismo la falta de cobertura y el desarrollo de una red de sensores, se convierten en los principales desafíos para los mismos (Heunecke, et al., 2011).

La aplicación de estos sistemas se ha realizado en campo (in-situ). Una muestra de ello es evaluación de estabilidad de un talud insaturado en bajo condiciones de lluvia, allí se emplearon pluviómetros y sensores TDR (Time-domain reflectometer) con el fin de medir la cantidad de lluvia y el contenido volumétrico de agua en el suelo (Song, et al., 2016). Otro ejemplo de aplicación es el monitoreo de un deslizamiento usando equipos GNSS de bajo costo en los Alpes, teniendo una precisión aceptable (Heunecke, et al., 2011).

4.3. MARCO TÉCNICO

El *Manual de Estabilidad de Taludes Geotecnia Vial* del INVÍAS ⁷ (García, et al., 1998) es un documento donde de acuerdo con sus autores, se combinan las técnicas de análisis existentes a escala mundial y la experiencia de los profesionales en el campo de la estabilidad de taludes. Pese a que el enfoque del manual es principalmente hacia los taludes viales y no hacia las laderas, conceptos de señales de movimiento, instrumentación y análisis de estabilidad son aplicables al caso de estudio. Cabe anotar que el documento no es un reglamento, no obstante, en este se realizan recomendaciones asociadas a la prevención de movimientos y a métodos de estabilización para los taludes de las carreteras colombianas. En el manual se realiza un reconocimiento e identificación de zonas inestables en el país, de acuerdo con el mapa de amenaza relativa de García (1996) el área de estudio se encuentra en una zona de “amenaza alta”.

De acuerdo con García, et al., (1998) existen varios instrumentos y métodos de investigación para determinar el tamaño de un movimiento, su tasa y dirección, así

⁷ INVÍAS: Instituto Nacional de Vías

como la profundidad del plano de falla, la localización de la lámina de agua en el cuerpo que se desliza y la presión del fluido en el material desestabilizado. La instrumentación facilita el análisis de las condiciones actuales de la estabilidad del terreno a través de los registros directos obtenidos en el área de estudio, con estos mismos registros es posible inferir eventos futuros y tomar medidas preventivas.

Una de las utilidades de la instrumentación es para la previsión básica en los sistemas de alarma; Para que la instrumentación sea óptima es necesario realizar una adecuada planificación que consiste en determinar el tipo de mediciones requeridas, la elección de los instrumentos apropiados - ya sean primarios, que miden desplazamientos horizontales y presión de poros, y/o secundarios que miden esfuerzos y deformaciones in situ-, dónde serán colocados, cuántos y a qué profundidad, establecer técnicas confiables de adquisición de datos y realizar una programación del manejo y presentación de los datos obtenidos (García, et al., 1998).

En el Manual de Estabilidad de Taludes se indica que los costos derivados de la instrumentación y prevención de movimientos en masa son bastante menores que los producidos por la ocurrencia de eventos, siempre y cuando se desarrollen con materiales de bajo costo, pero sin poner en entredicho la confiabilidad de obtención de datos.

Por otro lado, el Servicio Geológico Colombiano publicó en el año 2015 la *Guía Metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa*, en ella se describen los lineamientos metodológicos para realizar estudios de riesgo por movimientos en masa a escala detallada o local y se presentan los procesos que se deben seguir para cumplir con la normatividad en lo relacionado con las etapas de evaluación del riesgo por movimientos en masa, en este caso la normatividad vigente es la ya citada Ley 1523 de 2012. (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

En el documento se realiza la distinción de los términos: “amenaza”, “vulnerabilidad” y “riesgo”, esto con el fin de establecer con claridad la diferencia de este grupo de conceptos y garantizar uniformidad de significados al momento de seguir los lineamientos metodológicos propuestos en la guía. A continuación se exponen tales definiciones.

La amenaza se refiere al “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. La caracterización de la amenaza debe incluir su ubicación, clasificación, magnitud o intensidad, y se evalúa en función de probabilidad de ocurrencia espacial y temporal. La magnitud o intensidad de la amenaza se pueden expresar en términos de volumen, área, velocidad, intensidad o energía”, (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Por otro lado, la vulnerabilidad se define como “la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos”, (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Finalmente el riesgo es “la medida de la probabilidad y severidad de un efecto adverso a la vida, salud, propiedad o el ambiente. Corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, o antrópico no intencional, en un periodo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; Por consiguiente, el riesgo se deriva de la combinación de la amenaza y la

vulnerabilidad. Según la manera como se defina el elemento en riesgo, este puede medirse según la pérdida económica esperada, según el número de vidas perdidas o según la extensión del daño físico a la propiedad” (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

4.4. MARCO CONCEPTUAL

De acuerdo con la información obtenida en libros, guías, manuales, leyes y documentos consultados, conceptúo que la ausencia de políticas de gestión del riesgo para la fecha de la ocurrencia del evento fue un factor que influyó en la problemática presentada en el municipio de Gramalote, pues es bien conocido que el casco urbano afectado, se encontraba ubicado en un área geológicamente inestable de acuerdo a las características del material (tanto roca como suelo) y las condiciones tectónicas de la zona. Sin embargo, fue solamente después del evento que se realizaron estudios detallados en la zona, así como se adoptó una Política Nacional de Gestión del Riesgo que fue decretada mediante ley en el Congreso y que conllevaría posteriormente al desarrollo de una guía metodológica específica para movimientos en masa tres años después.

Desafortunadamente, el evento en Gramalote fue resultado de una sumatoria de factores y variables que desencadenaron en un movimiento en masa de tipo complejo. Como ya se había indicado, la geología del sector y los continuos procesos tectónicos asociados al Sistema de Fallas de Gramalote tuvieron gran incidencia, a ello se suman las condiciones topográficas y geomorfológicas de la región, la temporada de lluvias que azotó gran parte de la nación a finales de 2010 -que fue precisamente el factor desencadenante del movimiento-, y la ocurrencia de sismos superficiales de baja magnitud que habrían contribuido al movimiento de un material ya desestabilizado.

Las lluvias, como agente desencadenante y su interacción con el material (roca o suelo) se ha estudiado empleando instrumentación sensorica desde dos perspectivas: a través de modelos análogos y en campo (in situ). En el primer caso

se puede tener el control de diferentes variables, ya sea la intensidad de la lluvia, la composición o distribución espacial del material que compone ladera modelada. Esto es favorable en términos de investigación porque se puede analizar el comportamiento del movimiento al modificar las variables y además es posible medir parámetros del material (por ejemplo: humedad o presión de poros) en función de dichos cambios, aunque se necesita de una alta precisión y conocimiento del evento real para simularlo a la escala adecuada. En el segundo caso, el desarrollo de estudios en campo con sensorica tiene unos fines más prácticos, se aprovecha la escala real del lugar lo cual se convierte en una ventaja, pero se tiene la limitante de no poder controlar las variables externas. A pesar de tener notables divergencias, los dos casos de estudio tienen una relación importante: las mediciones instrumentales de parámetros realizadas en campo son la aplicación práctica del desarrollo de un modelo análogo que fue calibrado.

Es aquí donde toman relevancia los Sistemas Globales de Navegación por Satélites (GNSS), pues a través de la recolección de datos en campo en tiempo real es posible el monitoreo de parámetros importantes en la estabilidad de una ladera. Para ello es necesario conocer las condiciones normales y críticas del material estudiado, esto con el fin de establecer los valores máximos admisibles que comprometen la estabilidad de la ladera o al menos la sitúan en un equilibrio metaestable. El avance acelerado de los GNSS en los últimos años ha permitido la implementación y desarrollo de Sistemas de Alertas Tempranas o vigilancia instrumental, mediante la recolección y procesamiento de información en una base de datos donde sea posible evaluar la situación de la ladera y se logre pronosticar eventos próximos que puedan afectar a una comunidad.

5. METODOLOGÍA

Se realizó el diseño de un modelo análogo a escala de laboratorio que permitiera simular algunas condiciones de un evento registrado en el año 2010. En este caso la investigación fue cualitativa de tipo descriptiva, puesto que, se estudió

detalladamente un evento ocurrido para tomarlo como referencia en el desarrollo del diseño de un experimento a escala de laboratorio. La investigación también fue de tipo cuantitativo, en lo que respecta al estudio del material seleccionado, ya que fue necesario determinar algunas propiedades del suelo que luego fueron utilizadas como datos de entrada para el modelo computacional por medio del software Plaxis 8 2D.

Para garantizar una alta confiabilidad del modelo diseñado, fue necesario estudiar la mayor cantidad de condiciones presentadas en el evento real ocurrido en Gramalote. Para ello, se realizó una búsqueda profunda de la información disponible asociada a dicho evento, así como de modelos análogos elaborados previamente que sirvieran como herramienta para el planteamiento del modelo matemático. Posteriormente se analizó la información recolectada (cartografía, fotografías aéreas, estudios geotécnicos, productos obtenidos a través sensores remotos, registros históricos de lluvias, entre otros) para definir el área de influencia del movimiento y la escala del modelo. Además, se optó por modelar el evento en un software (Plaxis 8 2D), con el fin de observar el comportamiento de la ladera bajo la influencia de ciertas variables.

Previo al diseño del modelo, se realizó la interpretación de fotografías aéreas de la zona (Tabla 5) y se generaron como productos una serie de mapas de sombras a escala 1:250.000, empleando para estos últimos el Modelo Digital de Elevación ASTER GDEM (30m x 30m) del área de interés. En esta fase se analizaron principales lineamientos y rasgos morfo-estructurales en el área de Gramalote.

Vuelo	Sobre	Año	Fotografías
2222	33162	1985	132-133
2482	36339	1992	67- 68
2731	39565	2004	92 - 93

Tabla 5: Fotografías aéreas empleadas para interpretación

Cabe anotar que para la elaboración del modelo a escala se propone utilizar un material con naturaleza similar al de la zona, correlacionable con el material parental de los suelos transportados del área de interés. Dicho material fue identificado, recolectado y caracterizado en laboratorio, tras este procedimiento fue sellado cuidadosamente para que mantuviera su humedad natural y quedó a disposición de la Universidad para la ejecución de una eventual fase experimental.

A continuación se muestra un esquema de la metodología seguida, durante la elaboración del proyecto:



Se espera que el diseño del modelo se emplee como línea base para modelos computarizados y aplicaciones de sensorica en sistemas de alerta temprana a escala real.

5.1. VARIABLES DE ESTUDIO E INSTRUMENTACIÓN

- Humedad: Se sugiere el uso de sensores tipo TDR (Reflectómetro de dominio de tiempo) para calcular el contenido de agua del material, cuya condición inicial sea la humedad natural del suelo.
- Presión de poros: Se requieren piezómetros para determinar la presión ejercida por el agua en los espacios intergranulares, cabe anotar que esta presión se incrementa al aumentar el nivel de la lámina de agua, no obstante, las condiciones iniciales del ensayo no involucrarán la presencia de alguna lámina de agua.

5.2. MODELO MATEMÁTICO

El suelo se considera como un medio continuo (conformado por infinitas partículas discontinuas) e isotrópico, que falla por cortante generando superficies de fractura circulares o semicirculares.

Previamente han sido desarrollados métodos de superficies circulares o semicirculares de falla que aplican para la mayoría de suelos, sin embargo, los mecanismos de falla en roca blanda y suelo residual, así como en material de depósitos aluviales y coluviales no los tiene en cuenta la mecánica de suelos clásica (Suarez, 1998).

Para efectos prácticos y teniendo en cuenta que la falla registrada en Gramalote fue rotacional, se puede determinar el factor de seguridad de una superficie de falla para un suelo cohesivo ($c \neq 0$) de la siguiente manera:

$$FS = \frac{M_{Resistente}}{M_{Actuante}}$$

Donde $M_{Resistente}$ y $M_{Actuante}$ corresponden a los momentos (fuerza por distancia) que condicionan el equilibrio de la ladera, estos momentos se expresan de la siguiente manera:

$$FS = \frac{M_{Resistente}}{M_{Actuante}} = \frac{c * L * R}{w * d}$$

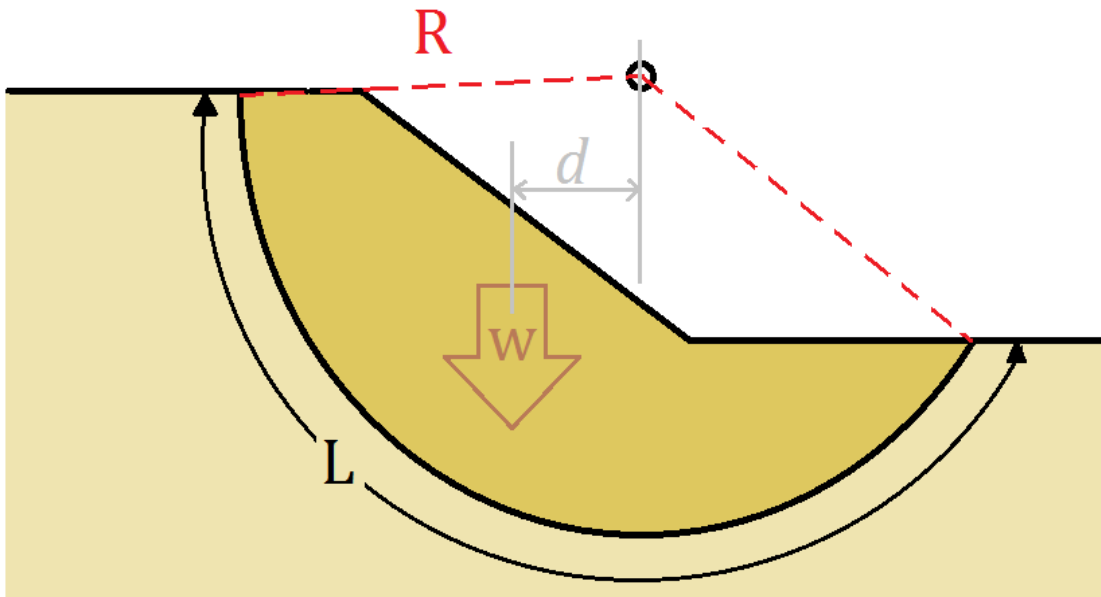


Figura 20: Esquema de una falla rotacional para un suelo cohesivo

En donde:

- c , corresponde a la cohesión del material, valor que corresponde a la mitad de la resistencia a la compresión ($qu/2$). Se expresa en T/m^2 .
- L , es la longitud de la falla en metros.
- R , es el radio del círculo de falla en metros.
- w , es el peso del cuerpo.
- d , es la distancia de la fuerza w al centro de curvatura o centro de momentos en metros.

Para obtener el peso del cuerpo, es necesario estimar el volumen del material que se encuentra sobre la superficie de falla, así como el peso unitario del material γ , este último valor se obtiene mediante un ensayo de laboratorio.

Cabe anotar que para el caso de estudio la magnitud del momento resistente es menor al del movimiento, por lo tanto, el factor de seguridad $FS > 1$ y eso explica que la ladera falle.

Por otro lado, se dice que usualmente los suelos tienen permeabilidad suficiente para disipar el exceso de presión hidrostática μ comportándose en condiciones drenadas. Se recomienda que para los casos donde la causa de la falla es el aumento de μ el problema debe analizarse como condición drenada (Suarez, 1998).

5.3. MATERIALES

Para simular las condiciones del movimiento, fue necesario conseguir un material de naturaleza similar al que falló en el área de Gramalote. Estratégicamente se seleccionó una localidad donde el material tuviese una génesis similar representada en características composicionales y texturales a las del suelo coluvial matriz-soportado descrito en el capítulo *4.2.4.1.3. Unidades Geológicas Superficiales*.

El material adecuado para el desarrollo del experimento corresponde a un suelo transportado, cuyo material parental son las areniscas cuarzosas con intercalaciones de lodolitas y shales de la Formación Une, correlacionable estratigráficamente con la Formación Uribante, ubicada también sobre la Cordillera Oriental Colombiana. La localidad de interés para la selección material se encuentra ubicada sobre el kilómetro 12 de la vía Choachí- La Calera en el departamento de Cundinamarca, la Figura 22 muestra la localización de la zona donde fue extraído el material.

Allí se encuentra un afloramiento sobre el carreteable que conduce a la Vereda Mundo Nuevo (La Calera), compuesto por una intercalación de cuarzoarenitas y lodolitas laminares (shales) pertenecientes a la Formación Une, cubierto localmente por un flujo de detritos con material matriz soportado y fragmentos de roca tamaño grava y bloques. La longitud del desplazamiento es de unos 15 metros y no afecta

al trazado vial. En la Figura 23, se observa el movimiento en masa que se encuentra en estado activo.



Figura 21: Localización del área donde fue recolectado el material



Figura 22: Afloramiento ubicado sobre la margen derecha del carreteable Choachí-La Calera (Kilómetro 12). Las líneas punteadas delimitan el movimiento y la flecha indica su dirección.

El muestreo fue realizado siguiendo la normatividad pertinente, en este caso la norma INV E-101-13 (INVIAS, 2013), se recolectaron 54,3 kg de material (Figura 23), suficientes para caracterizar en laboratorio y para disponer en la caja de acrílico diseñada. De acuerdo con la norma, “el tamaño de las muestras alteradas puede variar a discreción del encargado de la investigación” pero se sugiere una cantidad entre 500 g a 2,5 kg de material para realizar análisis granulométrico de suelos finos. Las muestras destinadas a la determinación de la humedad natural se sellaron, con el fin de evitar pérdidas de la misma.

El material fue descrito e identificado de acuerdo con la norma INV E-102-13 (INVIAS, 2013), posteriormente fue llevado al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Militar Nueva Granada, donde se realizaron los ensayos de granulometría (INV E-123-13), contenido de agua o humedad (INV E-122-13) y peso unitario .



Figura 23: Fase de muestreo y recolección de material en campo



Figura 24: Ejecución de ensayos de laboratorio a una fracción de la muestra

6. RESULTADOS

6.1. SENSORES REMOTOS

Previo al diseño del modelo, se realizó la interpretación de tres pares estereoscópicos de diferentes escalas, con el fin de identificar rasgos geomorfológicos y unidades en la zona. A continuación, se presentan las fotografías con sus respectivos acetatos, donde se demarcaron drenajes, lineamientos, movimientos en masa, escarpes y algunas geoformas:

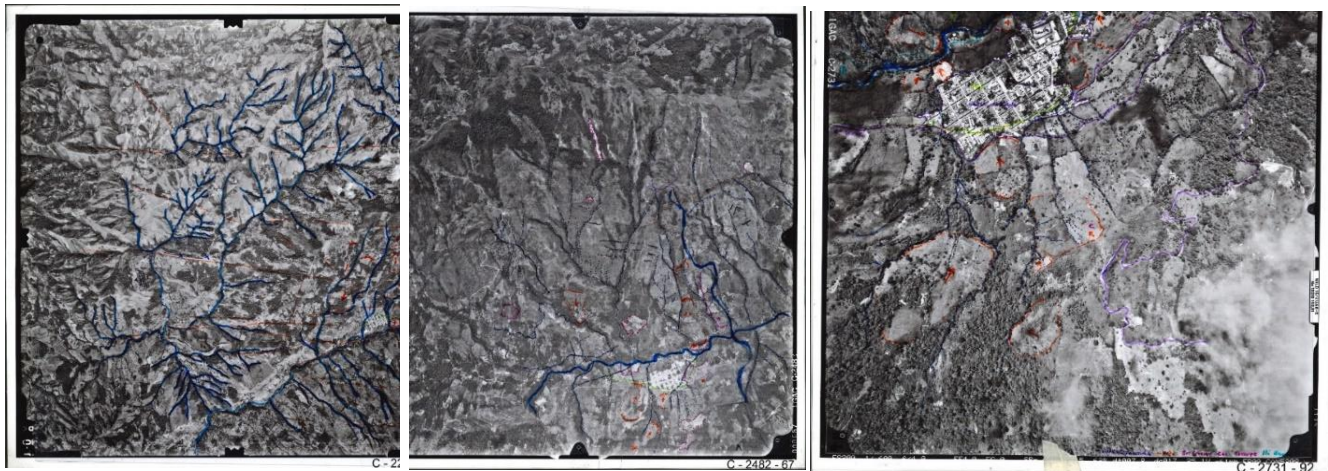


Figura 25: Fotografías áreas de la zona de influencia del movimiento interpretadas. Fuente IGAC.

Por otro lado, fueron elaborados cuatro mapas de sombras a partir del Modelo de Elevación Digital de la zona ASTER GDEM (30m x 30m), utilizando como herramienta el software ArcGIS 10.4, lo que permitió obtener como resultado una cartografía adecuada para identificar lineamientos y patrones que evidencian la acción de los esfuerzos tectónicos en la zona. Estos mapas tienen como función la representación de sombras en función de los niveles de radiación solar sobre el terreno; En el caso puntual de este proyecto, se generaron dos tipos de mapas en función del azimut o ángulo desde el que el sol ilumina la escena: uno a 45° y otro a 315°, permitiendo comparar patrones de lineamientos desde dos perspectivas diferentes. Se generaron dos mapas complementarios, superponiendo información geológica y de los cursos de agua de la zona de estudio. En la Figura 27, se exponen los productos generados, mientras que los hallazgos realizados serán discutidos en el siguiente capítulo.

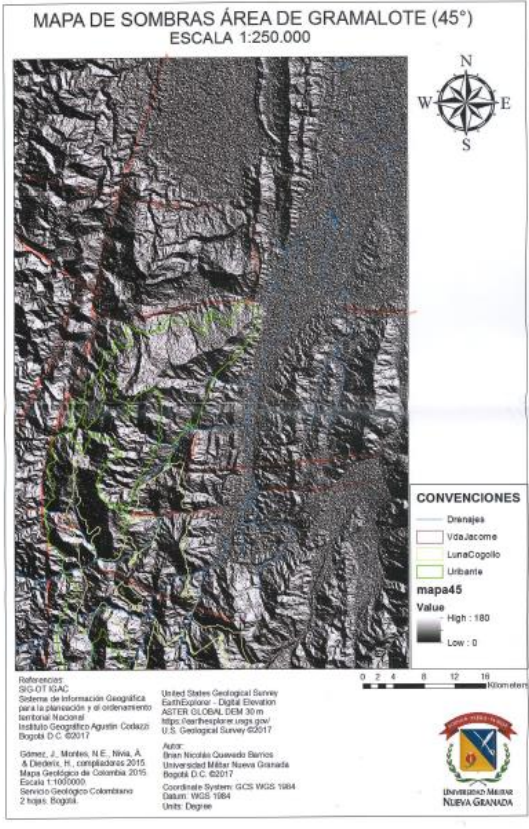
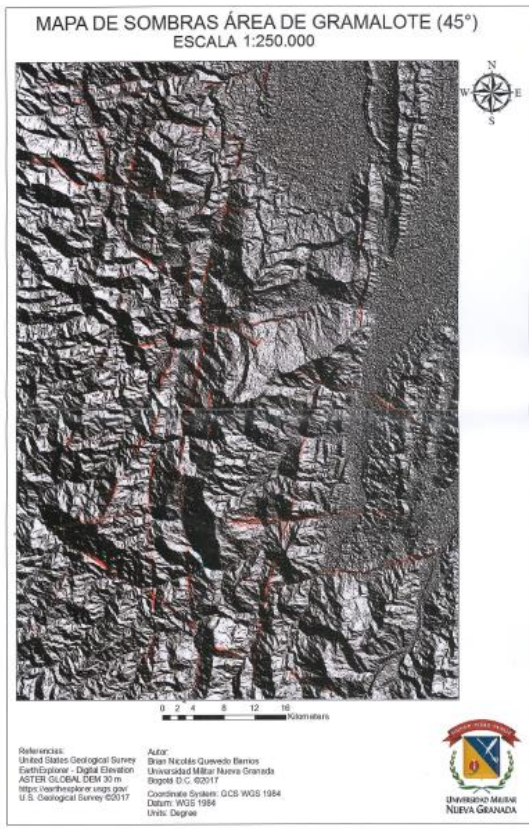
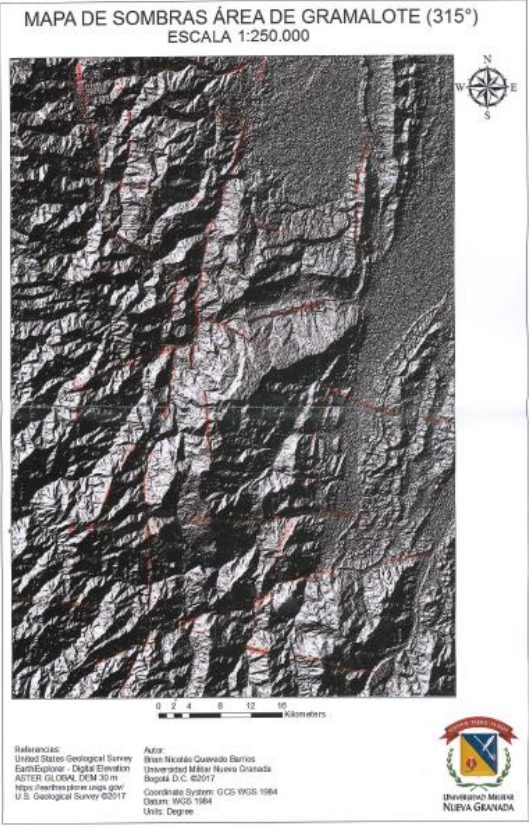
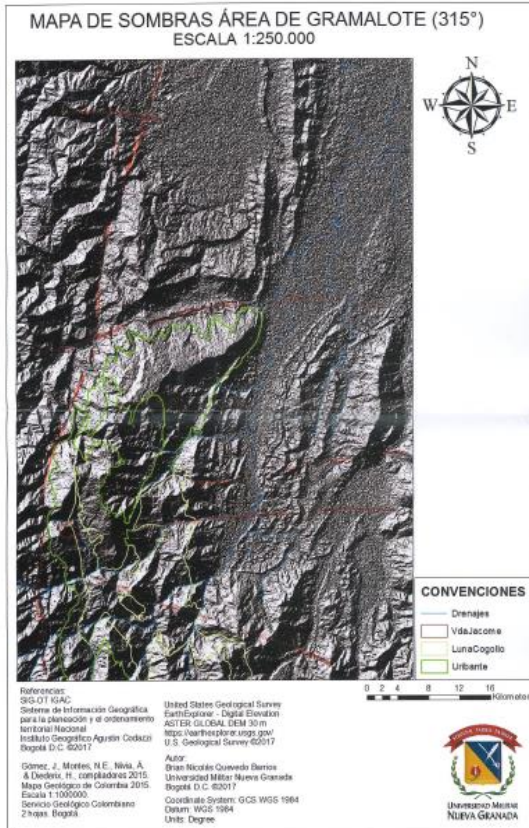


Figura 26: Mapas de sombras del área de Gramalote generados en ArcGIS.

6.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO

Por otro lado, se realizaron una serie de ensayos a la muestra de suelo, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Ensayo de Granulometría	
Gravas	37,3%
Arena Gruesa	17,1%
Arena Media	25,6%
Arena Fina	18,5%
Finos	1,5%
D ₁₀	0,18 mm
D ₃₀	1,4 mm
D ₆₀	8,5 mm
C _u	4,7
C _c	1,28
Clasificación SUCS	SP (Arenas limpias mal gradadas)
Contenido de agua (Humedad)	
Humedad Natural	22,9 %
Ensayo de Peso Unitario	
Peso Unitario Húmedo	2,0 g/cm ³
Peso Unitario Seco	1,7 g/cm ³

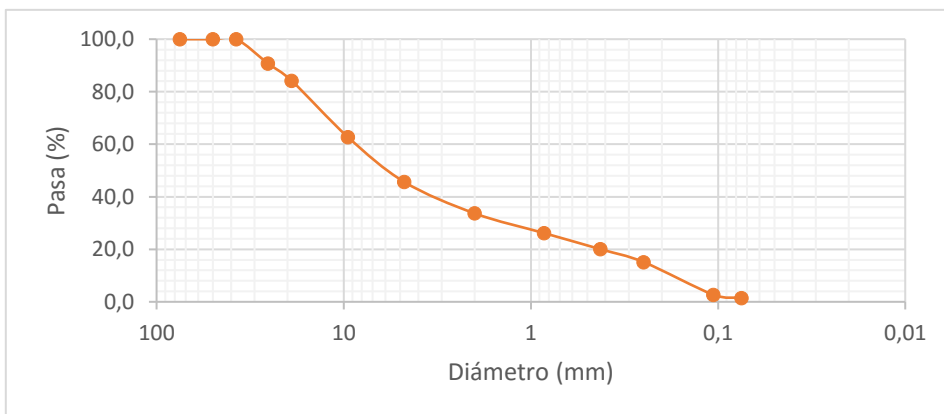


Figura 27: Curva granulométrica de la muestra.

6.3. DEFINICIÓN DE LA ESCALA DEL MODELO

La zona de influencia del movimiento está limitada lateralmente por dos cursos de agua que fluyen de oeste a este y son afluentes de la Quebrada Calderero. Para definir el área de estudio, fue indispensable la información registrada por el Sistema de Información de Movimientos en Masa y representada en el perfil mostrado en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** El modelo debe involucrar tanto la zona donde se desarrolló el flujo (parte alta de la ladera), como el lugar donde ocurrió el deslizamiento rotacional (pie de la ladera donde se encontraba el casco urbano del municipio. De acuerdo a lo anterior fue definida un área de 1,514 km², la cual será modelada y corresponde al área de influencia del movimiento, a continuación se muestra el área a modelar y la posición geográfica de sus límites.



Figura 28: Área seleccionada para ser modelada, la cual incluye al este el casco urbano del municipio de Gramalote. Tabla 6: Ubicación de los límites del área.

UBICACIÓN DE LOS LÍMITES DEL ÁREA		
NORTE	ESTE	Z (m.s.n.m)
7°53'17,07"	-72°49'06,96"	1881
7°53'34,25"	-72°49'05,23"	1842
7°53'25,04"	-72°47'39,72"	1002
7°53'05,46"	-72°47'42,10"	970

De acuerdo a las dimensiones reales del área y las facilidades para representar el movimiento en laboratorio, se opta por emplear una escala **1:1500**. En la siguiente tabla se muestran las dimensiones reales y las dimensiones del modelo empleando la escala sugerida:

	Escala Real	Escala Modelo
Longitud Total	2750,0 m	183,33 cm
Diferencia de Altura corona a punta	850,0 m	56,67 cm
Ancho de la masa desplazada (Wd)	564,0 m	37,60 cm
Profundidad de la masa desplazada (Dd)	6,0 m	0,40 cm
Área superficial	1,514 km ²	0,689 m ²

Tabla 7: Dimensiones reales y del modelo análogo a escala 1:1500

6.4. DISEÑO DEL MODELO ANÁLOGO

Como se indicó en el ítem anterior, las dimensiones de la caja propuesta son 1833 mm x 567 mm x 376 mm, esta debe ser de acrílico para garantizar la visibilidad del experimento. Se sugiere que el calibre del acrílico de las paredes sea de 15 mm y sea ensamblada de tal manera que en las aristas no se presente fuga de material al momento de ejecutar el experimento.

Para simular las condiciones del macizo rocoso que subyace al suelo coluvial matriz-soportado en el área del caso de estudio, debe emplearse un material cuya rugosidad represente la interfase roca-suelo. El planteamiento surge debido a la dificultad de disponer un bloque de roca cuyas dimensiones se ajusten a la escala del modelo, por lo tanto, sobre la base de la caja se recomienda sean colocados 6892 cm² de lija gruesa de calibre 60 a 80, permitiendo la fricción entre el material granular y la base de la caja.

Al modelo se le suministrará agua por medio de un sistema de aspersion fina, simulando las condiciones de lluvia como factor desencadenante del movimiento en masa. Debido a la complejidad que implica simular las condiciones reales de lluvia a escala, arbitrariamente se suministrará un caudal de mínimo de 0,9 l/min por medio de 3 aspersores colocados en la parte superior de la caja de acrílico y separados como se muestra en los planos (Ver anexo 1), con el fin de garantizar

cobertura a lo largo de toda la ladera simulada. Para el suministro de agua, se sugiere el uso de un tanque de almacenamiento de agua con 10 Litros de capacidad, donde debe ser colocada una bomba sumergible, con el fin de impulsar el agua por medio de una tubería en PVC para conducirla a cada uno de los aspersores.

El mecanismo de aspersión consistirá en una boquilla de aspersión plana, que debería ser ubicada a una altura media de 40 cm de la ladera simulada, para garantizar un ángulo de cobertura de 80° sobre la vertical.

La instrumentación requerida para la medición del contenido de agua (humedad) y presión de poros del suelo se debe seleccionar garantizando los principios de precisión, sensibilidad y cobertura de los rangos esperados. En primer lugar, se consultaron los rangos de humedad obtenidos en trabajos de exploración directa en la zona. Pineda (2014) registra que la firma INGEOEXPLORACIONES realizó sondeos en la parte baja de la ladera afectada por el movimiento en masa, en cercanías a la Quebrada La Calderera, allí tras ensayos de laboratorio se reportaron humedades para las muestras de suelo coluvial matriz-soportado entre 7,1% y 41,0%, donde los valores más altos pertenecen a muestras con una fracción más fina. Cabe anotar que el muestreo se realizó en el mes de julio de 2013, temporada del año seca, lo que representa condiciones muy diferentes a las registradas en diciembre de 2010.

Los datos permiten establecer un rango de humedad entre el 5% y el 40%, no obstante, este valor puede incrementarse en condiciones de lluvias intensas como las registradas en 2010, pero difícilmente superarán el 100%, por eso se sugiere que los sensores de humedad sean los adecuados para medir incrementos importantes en el contenido de agua. Como los sensores que serán colocados en la matriz tenderán a registrar los valores más altos de humedad, se sugiere una instrumentación que permita medir rangos de humedad típicos entre el 10% y el 100%.

En el caso de la presión de poros, al tratarse de un modelo análogo se esperan valores bajos, del orden de los kilopascales. De acuerdo a experiencias anteriores se obtienen rangos típicos entre -12 y 5 kPa, naturalmente los valores negativos o positivos dependen de la calibración de la instrumentación.

Se sugiere la instalación de dos transductores de humedad y dos de presión de poros, los cuales deben ubicarse estratégicamente para garantizar representatividad durante el registro de datos. Para ello, se sugiere situar un par en la parte media de la ladera y el otro en la parte baja (Ver Anexo 1), donde se espera el mayor incremento de la presión de poros. Se recomienda además que todos los sensores sean instalados a 1 cm de profundidad, pues de acuerdo con la escala corresponderían a 15 metros en campo.

Finalmente, durante la ejecución del experimento se recomienda emplear cámaras fotográficas y de video para registrar en tiempo real el momento de la falla de la ladera en el modelo análogo, estas pueden ser ubicadas lateral y frontalmente respecto a la caja de acrílico con el objetivo de obtener información gráfica suficiente para realizar un análisis cualitativo del movimiento.

6.5. MODELO COMPUTACIONAL

Se empleó el software Plaxis 8 2D, con el fin de conocer los desplazamientos y las deformaciones de una ladera con pendiente constante, cuyo ángulo de inclinación es de $7,62^\circ$ y longitud 1200 m. Como datos de entrada se definió un volumen aproximado del material depositado procedente del flujo de detritos, escombros y bloques en la parte alta de la ladera, este se simuló como una cuña que aporta carga a la ladera.

Los parámetros geomecánicos de los materiales (suelo y roca) fueron obtenidos a través de estudios previos de reubicación del casco urbano y trabajos de grado, donde se realizó exploración directa e indirecta y ensayos de laboratorio,

garantizando fiabilidad en aquellos datos. En una posterior fase, se ajustaron los parámetros humedad, peso unitario y la granulometría del suelo a los obtenidos tras la caracterización de la muestra de suelo en laboratorio, el material que aporta la carga se consideró de la misma naturaleza del suelo coluvial matriz soportado. La Tabla 8 expone los parámetros de ingreso al software Plaxis 8 2D:

Suelo coluvial matriz- soportado		
Tipo de Modelo	Mohr-Coulomb	
Condición	Drenada	
γ_d	16,7 kN/m ³	
γ_{sat}	19,6 kN/m ³	
Relación de vacíos e	0,64	
Módulo de elasticidad E'	300 kN/m ²	
Módulo de Poisson ν'	0,30	
Cohesión c'	20,0 kN/m ²	
Ángulo de fricción Φ	20°	
Granulometría	<2 μ m	1%
	2 μ m - 50 μ m	1%
	50 μ m – 2mm	98%
Roca (basamento)		
Tipo de Modelo	Hoek-Brown	
γ_d	25,0 kN/m ³	
Relación de vacíos e	0,10	
GSI	30	
σ_c	75 MPa (75000 kN/m ²)	

Tabla 8: Parámetros de ingreso al software Plaxis 8 2D.

El modelo se diseñó en 2 fases: previo y posterior a la aplicación de una carga de suelo en forma de cuña. El software utilizó el método de los elementos finitos para el cálculo de desplazamientos y deformaciones en una malla simulada. A continuación, se muestran los resultados arrojados por el software:

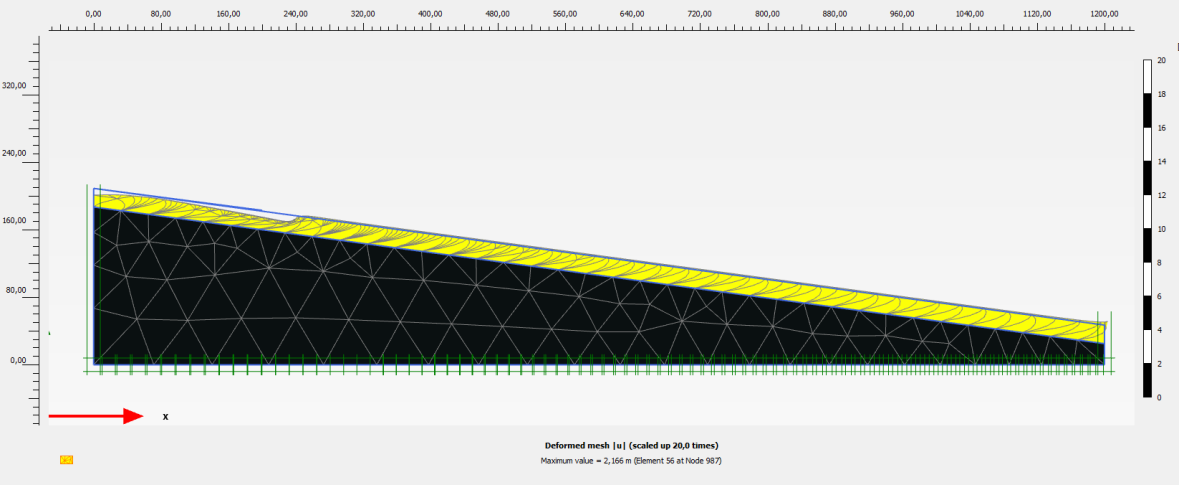


Figura 29: Deformación de la malla al aplicar la una carga en la parte alta de la ladera simulada.

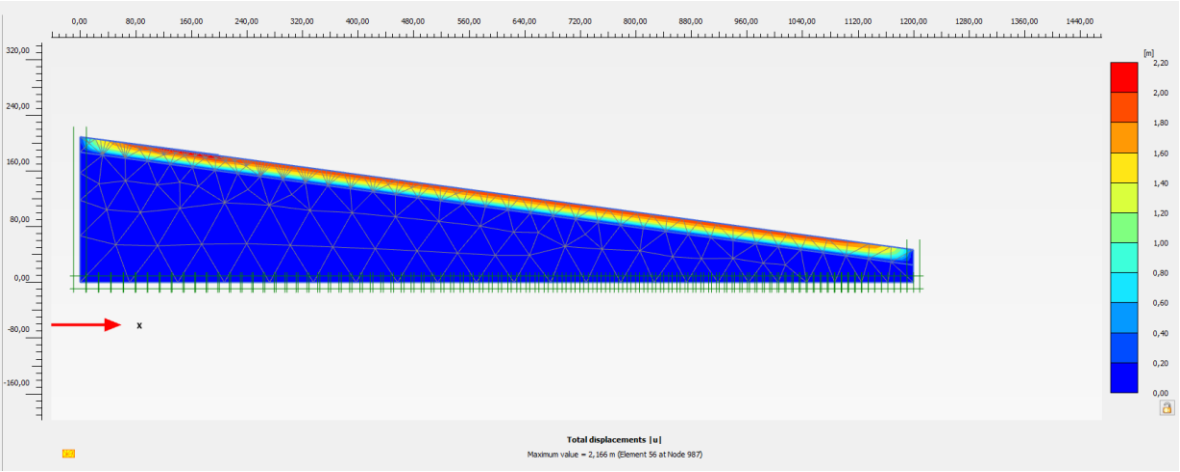


Figura 30: Desplazamientos totales de la ladera simulada, en metros.

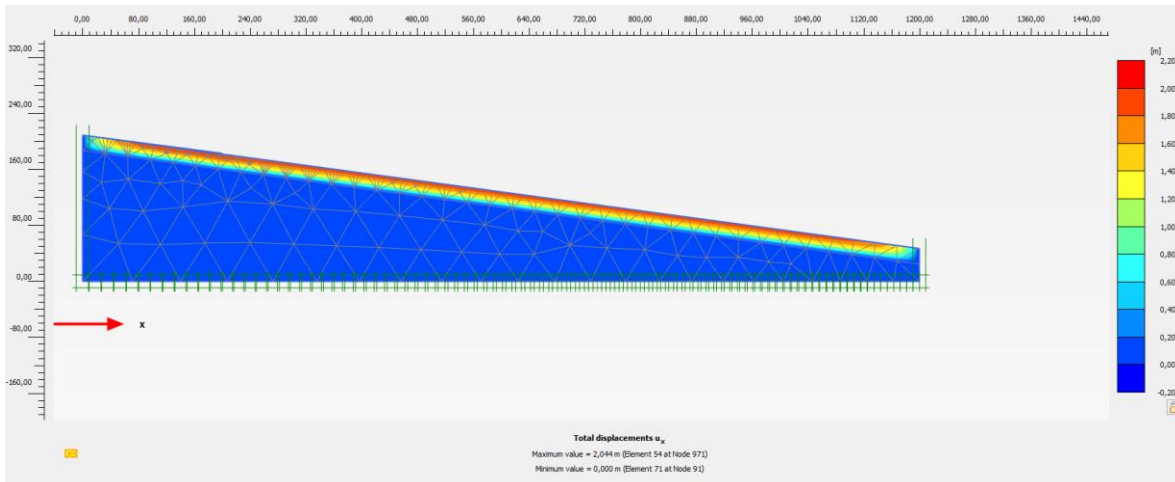


Figura 31: Desplazamientos a lo largo del eje x de la ladera simulada, en metros.

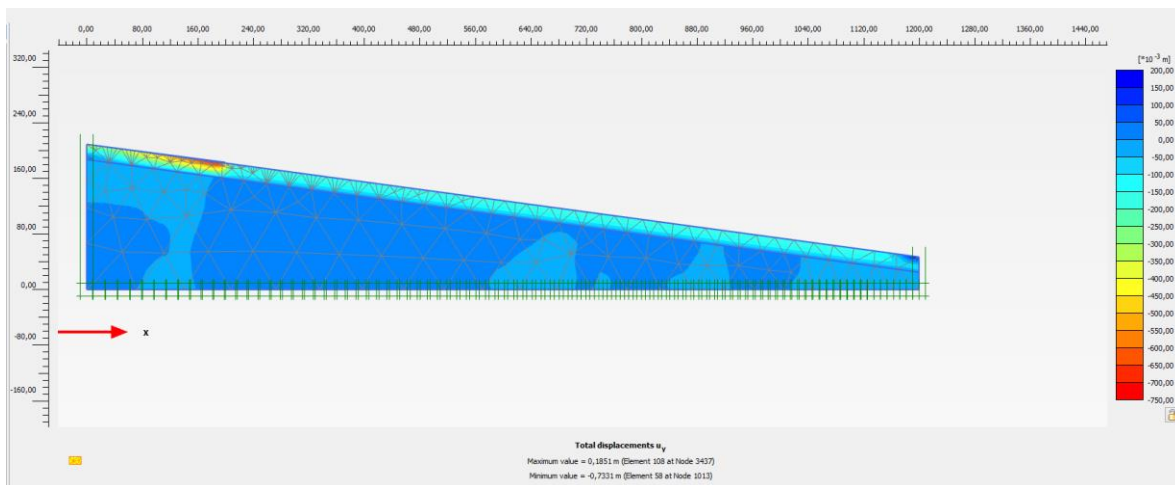


Figura 32: Desplazamientos a lo largo del eje y de la ladera simulada, en milímetros.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través de la fotointerpretación, se identificaron patrones de drenaje dendrítico en la zona, asociado a zonas con distribución homogénea de material. Los cursos de agua identificados fluyen hacia un drenaje principal que se trata de la Quebrada Calderero, la cual sobresale por tener algunos meandros a la altura del casco urbano del municipio.

En las fotografías 67 (vuelo C-2482) y 132 (vuelo C-2222), se identificaron algunos lineamientos con orientación Norte-Sur y que en el caso de la fotografía 132 (Vuelo

C-2222) cortan transversalmente la red de drenaje marcada. En la fotografía 67, fueron marcados unos pequeños escarpes que se generan en la parte alta de la ladera oriental del valle de la Quebrada Calderero, estos pueden corresponder a zonas asociadas a grietas de tracción, áreas afectadas por erosión y potencialmente pueden desarrollar movimientos en masa.

Asimismo se identificaron movimientos en masa en las fotografías, cabe anotar que estas fueron tomadas previas al evento de interés, pues las más recientes datan del año 2004. En las tres escalas se identificaron cicatrices de movimientos antiguos o inactivos sobre las vertientes de la Quebrada Calderero, caracterizados por poseer una forma lobular, una concavidad en la parte alta cercana a la corona y convexidad en el área de depósito de material. Sobre la ladera occidental del casco urbano del municipio de Gramalote se identificaron 3 movimientos importantes para las diferentes épocas y escalas, que antecedieron el deslizamiento rotacional del año 2010.

Por otro lado, se observó que el casco urbano de Gramalote se encontraba ubicado en una terraza aluvial sobre la margen derecha de la Quebrada Calderero, allí se identificaron fenómenos de socavación por acción del curso de agua y algunos movimientos en masa en la base de la ladera que incluso pudieron haber obstruido el cauce generando en algún momento la amenaza de una avenida torrencial. De manera general se evidenció en las fotografías -especialmente en las de menor escala- la acción de procesos erosivos, evidentes principalmente al oriente y sur del casco urbano.

Los lineamientos registrados en fotografías aéreas fueron comparados con los delimitados en los mapas de sombras a escala 1:250.000, en estos mapas fueron identificados principalmente lineamientos con dirección preferencial Norte-Sur y Noreste-Suroeste, lo que indicaría la posible presencia de fallas y por lo menos dos tensores de esfuerzos, así como una alta actividad tectónica en la zona. La gran cantidad de discontinuidades generadas en el material y que afecta principalmente

a las rocas de la secuencia sedimentaria Cretácica que aflora en el área de Gramalote, sería una de las causas de los numerosos movimientos en masa registrados, pues el material es fracturado, disgregado y queda expuesto a los agentes de meteorización.

Hay dos lineamientos que llaman la atención: uno de ellos se encuentra al occidente de la ladera donde se produjo el movimiento (Vereda Jácome), el cual tiene una dirección Norte-Sur y una continuidad evidente a lo largo de todo el mapa elaborado. El otro lineamiento se encuentra al oriente de la Quebrada Calderero, y aunque no se evidenció continuidad en la zona del movimiento, este par de lineamientos pudo tener influencia en los cambios de configuración de esfuerzos en la zona, conduciendo a lo descrito en el párrafo anterior.

Tras caracterizar la muestra en laboratorio, se observa que esta se compone principalmente de arenas (61,2%) y fragmentos de lodolitas y cuarzoarenitas tamaño grava (37%), mientras que el porcentaje de finos (limos y arcillas) no supera el 1,5%, mostrando en general un material heterogéneo poco uniforme y bien gradado pues su coeficiente de uniformidad C_u es menor a 3 y el de curvatura C_c entre 1 y 3.

El modelo realizado en el software Plaxis 8 2D, cuyo fundamento es el análisis de elementos finitos, muestra los desplazamientos y deformaciones generados en el material. Es principalmente el suelo coluvial matriz-soportado el que presentó una mayor tasa de deformación y desplazamiento frente a la roca subyacente. La capa de suelo transportado (cuyo espesor modelado es de 23 metros), presenta un desplazamiento total de hasta 2,20 m el cual ocurre en la parte más superficial y es predominante a lo largo del eje x, pues el desplazamiento a lo largo del eje y es de apenas unos 0,75 m evidentes principalmente en el área donde fue colocada la sobrecarga. Cabe anotar que el volumen de sobrecarga está compuesto por el mismo material de suelo coluvial, procedente de la parte alta de la ladera y removido de una zona de deslaves.

8. CONCLUSIONES

- Se evidenció la presencia de dos patrones de lineamientos (dirección nortesur y noreste-suroeste) en los mapas de sombras elaborados, que indicarían la presencia de discontinuidades en el material de la zona. Como consecuencia, las rocas se encuentran fracturadas y expuestas a agentes de meteorización que reducen las propiedades geomecánicas del material y que ante un factor desencadenante pueden producir movimientos en masa como el evento registrado en el año 2010 o los antecesores registrados en las fotografías aéreas.
- Se determinó que la escala apropiada para el modelo debe ser 1:1.500, de acuerdo a la zona de influencia del movimiento delimitada y la facilidad para representar el evento en laboratorio. En el modelo es pertinente la instalación de por lo menos dos transductores de humedad y presión de poros ubicados en la parte media y baja de la ladera, instalados a una profundidad de 1 cm.
- Se identificó un material correlacionable estratigráficamente con el suelo coluvial matriz-soportado -cuyo material parental corresponde a rocas de la Formación Uribante-, el cual fue recolectado en un movimiento en masa registrado localidad de Choachí, sobre la cordillera oriental colombiana. Tal material está compuesto por un 61% de arenas, 37% de gravas y 2% de finos, su contenido de humedad natural es del 23% y es adecuado para la simulación del movimiento en masa ocurrido en Gramalote.
- Se estudió la humedad y presión de poros, como los parámetros del suelo cuantificables durante la ejecución del experimento, definiendo sus posibles rangos así como la ubicación de los dispositivos más apropiada en la ladera simulada, con el fin de garantizar representatividad en los datos registrados.

- Se evidenció al simular computacionalmente que tras la aplicación de una carga en la parte alta de la ladera (cuyo material componente es un suelo coluvial matriz-soportado removido como consecuencia de un flujo), se presentan desplazamientos que superan los 2,0 metros y junto a las deformaciones, se concentran principalmente en el extremo de la cuña de material.

BIBLIOGRAFÍA

- Borja, R. I. & White, J. A., 2010. Continuum deformation and stability analyses. *Acta Geotechnica*, Volumen 5, pp. 1-14.
- Clavijo, T., 1994. *Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Norte de Santander*. Bucaramanga : INGEOMINAS: Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química.
- Congreso de Colombia, 1988. *Ley No. 46 de 1988*. Bogotá D.C.: s.n.
- Congreso de la República, 1993. *Ley 99 de 1993*. Bogotá D.C: s.n.
- Congreso de la República, 1997. *Ley 388 de 1997*. Bogotá D.C.: s.n.
- Congreso de la República, 2012. *Ley 1523*. Bogotá D.C.: s.n.
- Cruden, D. M., 1991. A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Volumen 47, pp. 27-29.
- Das, B. M., 2001. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Thomson Learning.
- Duque, G. & Escobar, C. E., 2002. *Mecánica de los suelos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- European Global Navigation Satellite Systems Agency, 2016. *What is GNSS*. [En línea] Available at: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> [Último acceso: 22 Mayo 2017].
- Fang, H., Cui, P., Pei, L. Z. & Zhou, X. J., 2012. Model testing on rainfall-induced landslide of loose soil in Wenchuan earthquake region. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Volumen 12, pp. 527-533.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H., 1993. Slope Stability. En: *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., pp. 320-345.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H., 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Gallage, C., Jayakody, S. & Uchimura, T., 2012. *Effects of Slope Inclinaation on the Rain-induced Instability of Embankment Slopes*. Kuala Lumpur, Malaysia, Second International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp. 14-16.
- García, M., 1996. *Diagnóstico sobre el estado del conocimiento en estabilidad de taludes en carreteras de Colombia y la eventual necesidad de usar nuevas tecnologías*. Bogotá: Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías.
- García, M., Moya , J. & Cañón , J., 1998. *Manual de Estabilidad de Taludes*. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. Deslizamientos y otros movimientos del terreno. En: *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Prentice Hall, pp. 621-663.
- Hakro, M. R., Hamonangan, I. S. & Memon, I. A., 2016. Model Experiment on Rainfall-induced Slope Failures with Moisture Content Measurements. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 13(2), pp. 122-130.

- Heunecke, O., Glabsch, J. & Schunbäck, S., 2011. Landslide Monitoring Using Low Cost GNSS Equipment - Experiences from Two Alpine Testing Sites. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, pp. 661-669.
- Hutchinson, J. N., 1988. General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrogeology. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Volumen 1, pp. 3-36.
- IDEAM, 2011. *Análisis del impacto*. [En línea]
Available at:
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%A1lisis+Impacto+La+Ni%C3%B1a.pdf/640a4a18-4a2a-4a25-b7d5-b3768e0a768a>
- IDEAM, 2014. *Alteraciones más probables de la precipitación, durante la ocurrencia de un Fenómeno típico de La Niña*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- INGEOMINAS, 2010. *Boletín de Sismos: Diciembre de 2010*, Bogotá: Subdirección de Amenazas Geológicas y Entorno Ambiental Red Sismológica Nacional de Colombia.
- INGEOMINAS, s.f. *Memoria del cuadrángulo G-13 Cúcuta*, Bogotá: INGEOMINAS.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1973. *Estudios general y semidetallado de suelos de los municipios de Lourdes, Santiago, San Cayetano, Gramalote y Arboledas*. Bogotá D.E.: Esplanargos.
- INVIAS, 2013. *INV E-101-13 Investigación de suelos y rocas para propósitos de ingeniería*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- INVIAS, 2013. *INV E-102-13 Descripción e identificación de suelos (Procedimiento visual y manual)*. Bogotá: Instituto Nacional de Vías.
- Jakob, M. & Hungr, O., 2005. *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*. Chichester, UK: Springer - Praxis Publishing.
- Jimenez, J. A., s.f. Introducción a la mecánica del suelo. En: *Manual de Ingeniería Geológica*. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, pp. 3/1-3/21.
- López, N. R., 2014. *Estilo estructural asociado al Sistema de Fallas Las Mercedes en el sector de Lourdes y Gramalote, Norte de Santander*, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología.
- Lourenço, S., Sassa, K. & Fukuoka, H., 2006. Failure process and hydrologic response of a two layer physical model: Implications for rainfall-induced landslides. *Geomorphology*, Issue 73, pp. 115-130.
- Meza, V. E., 2012. Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la Cátedra Universitaria. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Issue 31, pp. 23-38.
- Pedroza, A. O., 2012. *Causas y efectos de la desaparición de Gramalote*. Cúcuta, s.n.
- Pierson, T. C., 1986. Hillslope Processes. En: A. Abrahams, ed. *Flow behaviour of channelized debris flows*. Boston: Allen & Unwin, pp. 269-296.
- Pineda, J. R., 2014. *Evaluación geotécnica y mitigación del riesgo por deslizamiento utilizando pilas, en la margen derecha de la Quebrada La Calderera, aguas abajo de Puente Cuervo, Municipio de Gramalote (Norte de Santander)*, Bucaramanga: Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Civil.

Pinto, H., 1977. Origem e Formação dos Solos. Pedologia. Composição Química e Mineralógica. En: *Mecânica dos Solos e suas aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., pp. 15-22.

Poveda, G., 2004. La Hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, Junio, XXVIII(107), pp. 201-222.

Presidencia de la República, 1989. *Decreto 919 de 1989*. Bogotá D.C.: s.n.

Presidencia de la República, 1993. *Decreto 0004 de 1993*. Bogotá D.C.: s.n.

Presidencia de la República, 2010. *Decreto 4570 de 2010*. Bogotá D.C.: s.n.

Presidencia de la República, 2010. *Decreto 4580 de 2010*. Bogotá D.C.: s.n.

Presidencia de la República, 2010. *Decreto 4702 de 2010*. Bogotá D.C.: s.n.

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007. *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*. s.l.:Servicio Nacional de Geología y Minería Publicación Geológica Multinacional.

Reid, M. E. y otros, 2008. *Deciphering landslide behavior using large-scale flume experiments*. Tokio, Association for Disaster Prevention Research.

Servicio Geológico Colombiano, 2012. *Estudios de geología y geomorfología escala 1:25.000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote, departamento Norte de Santander*, Bogotá D.C.: Ministerio de Minas y Energía.

Servicio Geológico Colombiano, 2012. *Zonificación de estabilidad de los sectores de Pomarros y Miraflores escala 1:5.000 para la reubicación del casco urbano del municipio de Gramalote en Norte de Santander*, Bogotá D.C.: Grupo de Edición y Diagramación de Información del Servicio Geológico Colombiano.

Servicio Geológico Colombiano, 2014. *Sistema de Información de Movimientos en Masa*. Bogotá: s.n.

Servicio Geológico Colombiano, 2015. *Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá: s.n.

Song, Y.-S., Chae, B.-G. & Lee, J., 2016. A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall. *Engineering Geology*, Volumen 210, pp. 84-92.

Suarez, D. J., 1998. *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda..

Tarbutck, E. J. & Lutgens, F. K., 2005. Meteorización y suelo. En: *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Prentice Hall, pp. 175-200.

USGS, 2004. *Landslide Types and Processes*, s.l.: U.S. Geological Survey.

Vargas, G., 1999. *Guía Técnica para la Zonificación de la Susceptibilidad y la Amenaza por Movimientos en Masa*. Villavicencio: GTZ-Secretaría del Medio Ambiente.

Varnes, D. J., 1978. Chapter 2: Slope Movement Types and Processes. En: *Landslides - Analysis and Control*. Washington D.C.: Transportation Research Board, pp. 11-33.

Wanatowski, D., Chu, J. & Lo, R. S., 2008. Types of Flowslide Failures and Possible Failure Mechanisms. *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*, pp. 244-253.

Wang, F. & Shibata, H., 2007. Influence of soil permeability on rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Issue 44, pp. 1128-1136.

Wang, G. & Sassa, K., 2003. Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineering Geology*, Issue 69, pp. 109-125.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, J. & Restrepo, H., 1973. Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H13, Pamplona. *Boletín Geológico*, XXI(1-3), p. 132.

White, F. M., 2011. Dimensional Analysis and Similarity. En: *Fluid Mechanics*. New York: Mc Graw Hill, pp. 293-346.