

**CARACTERIZACIÓN DE CONTRASTES DE RIGIDEZ DE UNA LADERA EN LA  
VEREDA EL YOLOMBO EN EL CORREGIMIENTO DE SAN CRISTÓBAL,  
USANDO MÉTODOS GEOFÍSICOS**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE GEÓLOGO**

**MATEO SANÍN ZULUAGA**

msaninz@eafit.edu.co

**ASESORES: PhD. GASPAR MONSALVE MEJÍA**

gmonsalvem@unal.edu.co

**EsP. JORGE ALEXANDER HURTADO SALGADO**

geotecnia@aimingenieros.com.co

**PREGRADO**

**PROYECTO**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA**

**MEDELLÍN, ANTIOQUIA**

**2017**

## **RESUMEN**

La zona de interés se encuentra localizada al norte de la antigua vía al mar, en la vereda El Yolombo del corregimiento de San Cristóbal, de la ciudad de Medellín, Antioquia. Esta zona está enmarcada por depósitos de vertiente y pequeños cúmulos de depósitos aluvio-torrenciales.

Este trabajo tiene como objetivo hallar con métodos indirectos de exploración del subsuelo perfiles de suelo con parámetros de rigidez en tres sectores de la ladera, con el fin de contribuir a la caracterización de los materiales involucrados en el movimiento en masa. Para este propósito se usan métodos ReMi (refracción de microtemores), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) y refracción sísmica. Además se tomaron muestras con tubo Shelby de forma manual en apiques alrededor del área de interés, con el propósito de ensayar en el laboratorio compresiones simples y así poder disminuir la incertidumbre de la exploración geofísica.

A partir de los datos recolectados a través de la geofísica, los procesos morfodinámicos superficiales y los datos de laboratorio, se concluye que en la parte más alta de la ladera los materiales más someros (capa 1) presentan propiedades geomecánicas deficientes debido a la saturación por agua. Eso genera una superficie de falla por contrastes de rigidez con la capa más profunda (capa 2). Además, la parte intermedia y baja de la ladera presenta contrastes de rigidez más marcados en comparación con la parte más alta y cierto basculamiento con materiales hondos de propiedades más aceptables dado que tienen cantos más grandes.

## CONTENIDO

LISTA DE ANEXOS .....	4
LISTA DE FIGURAS .....	4
LISTA DE TABLAS.....	6
LISTA DE ECUACIONES.....	6
GLOSARIO.....	7
1. INTRODUCCIÓN .....	8
2. JUSTIFICACIÓN .....	9
3. OBJETIVOS GENERALES .....	9
3.1 Objetivos Específicos.....	9
4. MARCO TEÓRICO.....	10
5. METODOLOGÍA.....	11
6. LOCALIZACIÓN .....	12
7. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	13
8. ANTECEDENTES .....	15
9. DESCRIPCIÓN DE LA EXPLORACIÓN .....	17
9.1 Procesos Morfodinámicos.....	21
9.2 Uso del Suelo.....	24
9.3 Mapa de Pendientes .....	25
9.4 Mapa estadístico focal .....	26
9.5 Aspecto .....	27
9.6 Hidrología.....	27
9.6.1 Dirección de Flujo .....	28
10. RESULTADOS .....	29
10.1 Exploración del subsuelo .....	29
10.1.1 Descripción del perfil de suelo .....	29
10.1.2 Descripción geológica de las muestras.....	32
10.1.3 Lectura de los piezómetros (Casagrande).....	34
10.1.4 Resultados de las líneas geofísicas.....	35
10.2 Resultados de los ensayos de laboratorio .....	48

11. DISCUSIÓN .....	53
12. CONCLUSIONES.....	55
13. RECOMENDACIONES .....	56
14. AGRADECIMIENTOS .....	56
15. REFERENCIAS.....	57
16. ANEXOS .....	60
16.1 Ecuaciones.....	60

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Resultados de ensayos de laboratorio.

ANEXO 2. Resultados de los ensayos geofísicos.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1: Localización de la zona de estudio. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011). .....	14
Figura 7.1: Mapa geológico simplificado del valle de aburra (la línea punteada representa la cuenca del río Medellín). Tomado de Aristizábal & Yokoya., (2008). .....	16
Figura 8.1: Modelo propuesto para la evolución de los depósitos del Valle de Aburrá. Tomado de: Aristizábal & Yokota, (2008). .....	17
Figura 9.1: Localización en planta de la instrumentación utilizada. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).....	21
Figura 9.1.1: A) Reptación aumentada por la actividad ganadera. Las líneas rojas indican la corona de deslizamiento B) flujo de detritos por reptación. La línea roja indica la corona de deslizamiento C) Reptación y movimiento rotacional a lo largo de la vía. Las líneas rojas horizontales indican la corona de deslizamiento y las inclinadas el flujo del deslizamiento rotacional .....	22
Figura 9.1.2: A) Falla de muro de contención por hundimiento de banca. B) Falla de muro de contención activa y por volcamiento hacia la vía. C) Hundimiento de la banca de aproximadamente 10°. D) Basculamiento de postes de luz de aproximadamente 7° .....	23
Figura 9.1.3: Mapa de procesos morfodinámicos. D-Rotacional (deslizamientos de geometría rotacional, Cicatrices_T_Ant (cicatrices mapeadas en trabajos anteriores), C_Fotos_OrtoF (cicatrices mapeadas a través del análisis de fotografías aéreas y orto-fotos). El recuadro rojo indica el área donde se encuentra	

la instrumentación. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).	25
Figura 9.2.1: Ganadería e infraestructura de la vereda El Yolombo.	25
Figura 9.3.1: Mapa de pendientes. Predominan pendientes que van de los 5° a los 30°, siendo de suaves a moderadas.	26
Figura 9.4.1: Mapa estadístico focal.	27
Figura 9.5.1: Mapa de aspecto.	28
Figura 9.6.1: Localización de la zona dentro de la cuenca de la quebrada La Iguaná. El polígono azul representa la cuenca de la quebrada la Iguana, el polígono rojo representa la cuenca la quebrada La García y el polígono amarillo representa la cuenca de una pequeña quebrada que desemboca en la quebrada La García. Foto tomada de Google EARTH (visita, febrero 7 de 2017).	29
Figura 9.6.1.1: Mapa de dirección de flujo. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).	30
Figura 10.1.3.1: Piezómetros instalados en la zona centro de la zona.	36
Figura 10.1.4.1: Localización de los sondeos geofísicos. L-1 línea 1, L-2 línea 2 y L-3 línea 3.	37
Figura 10.1.4.1.1: Espectro de velocidad de fase de onda Rayleigh para la línea 1 evento 1 (febrero 6 del 2017). La curva de dispersión puede trazarse buscando los pares frecuencia vs velocidad de fase donde las amplitudes sean máximas (colores rojos oscuros).	39
Figura 10.1.4.1.2: Perfil de velocidad de onda de corte para la línea 2 evento 1. La curva azul representa el modelo de distribución de Vs con la profundidad que mejor se ajusta a la curva de dispersión encontrada.	40
Figura.10.1.4.1.3: Perfiles de suelo calculados con el ensayo ReMi. Se muestra las 3 líneas con su respectiva “Vs” y su módulo de rigidez, según la época en que se tomaron. Los niveles freáticos (representada en las figuras por la línea azul) fueron tomados en los piezómetros artesanales.	44
Figura 10.1.4.2.1: A) Espectro de velocidad de fase de onda “Rayleigh” donde se seleccionó la curva de dispersión experimental. B) perfil experimental de velocidad de propagación de la onda de corte “Vs” en función de la profundidad. Para la línea 1 evento 2.	44
Figura 10.1.4.2.2: Perfiles de suelo calculados con el ensayo MASW. Se observa las 3 líneas con valores de onda de corte y módulo de cizalladura, conforme la época en que se obtuvieron. Los niveles freáticos (representada en los perfiles por la línea azul) fueron tomados en los piezómetros artesanales.	48
Figura 10.2.1: Localización de los sitios de donde se tomaron las muestras ensayadas. L-1 (línea 1), L-2 (línea-2) y L-3 (línea 3). Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).	50
Figura 10.2.1: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 1.1.	51
Figura 9.2.2: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 1.2.	52

Figura 10.2.3: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 2.1. ....	52
Figura 10.2.4: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 2.2. ....	53
Figura 11.1: Correlación de perfiles directos con el geofísico. ....	55

## LISTA DE TABLAS

Tabla 9.1: Coordenadas de los ensayos geofísicos. ....	19
Tabla 9.2: Coordenadas de los piezómetros. ....	19
Tabla 9.3: Coordenadas pluviógrafos. ....	20
Tabla 10.1.1.1: Descripción del apique 1. ....	32
Tabla 10.1.2.1: Descripción de las muestras donde se tomaron los tubos Shelby. ....	35
Tabla 10.1.4.1: Tipo de ensayo realizado en cada una de las líneas según la temporada. L1 (línea 1), L2 (línea 2) y L3 (línea 3). ....	38
Tabla 10.1.4.1.1: Resumen de los resultados inferidos a partir de los ensayos geofísicos ReMi de la línea 1. ....	41
Tabla 10.1.4.1.2: Resumen de los resultados inferidos a partir de los ensayos geofísicos ReMi de la línea 2. ....	41
Tabla 10.1.4.1.3: Resumen de los resultados inferidos a partir de los ensayos geofísicos ReMi de la línea 3. ....	41
Tabla 10.1.4.2.1: Resumen de los resultados geofísicos MASW de la línea 1. ....	45
Tabla 10.1.4.2.2: Resumen de los resultados geofísicos MASW de la línea 2. ....	45
Tabla 10.1.4.2.3: Resumen de los resultados geofísicos MASW de la línea 3. ....	46
Tabla 10.1.4.3.1: Resumen de las velocidades $V_p$ y espesores obtenidos con la sísmica de refacción. ....	49
Tabla 10.2.1: Resumen de los ensayos de laboratorio. ....	54

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 16.3.1: Elasticidad de Young ( $E$ ). ....	61
Ecuación 16.3.2: Poisson ( $\mu$ ). ....	62
Ecuación 16.3.3: Velocidad de onda compresional ( $V_p$ ). ....	62
Ecuación 16.3.4: Modulo de Bulk ( $K$ ). ....	62
Ecuación 16.3.5: Densidad ( $\rho$ ). ....	62
Ecuación 16.3.6: Velocidad de onda de corte ( $V_s$ ). ....	63
Ecuación 16.3.7: Profundidad de refracción ( $Z$ ). ....	63

## **GLOSARIO**

El siguiente glosario se hace con base en Milsom (2003), Tarbuck & Lutgens (2005), Lowrie (2007) y Dávila Burga (2011).

CDP: Punto de reflectores comunes. Son las trazas que proporcionan la imagen sísmica del terreno.

Corrección de Weathering: Consiste en elegir un plano bajo de la topografía donde se proyectan los puntos de generación de energía y ubicación de los geófonos. Conocida la velocidad de propagación de las ondas en esa capa superficial alterada, se calculan los tiempos de viaje de las ondas hasta la profundidad del plano de referencia o *datum* (sistema de referencia por coordenadas). Estos tiempos se descuentan en las mediciones y todo queda como si las perturbaciones y los geófonos hubieran estado sobre una superficie plana (Estrada, 2008).

Dispersión: Cambio de velocidad de las ondas en función de la frecuencia o bien separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar un material.

Dromocrona: Espacio-tiempo de las ondas sísmicas refractadas.

KnickPoint(s) (recodo, hendidura o repliegue): En geomorfología se refiere a un salto o forma irregular de un río. Puede ser estático o dinámico y es en función de la geología.

Microtremor: Micro-contracción.

Módulo de Bulk (K): Módulo de compresibilidad que mide la resistencia a la compresión uniforme de un material.

Módulo de rigidez (G): Constante elástica que caracteriza el cambio de forma que experimenta un material elástico cuando se aplican esfuerzos constantes.

Módulo de Young (E): Parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección donde se aplique una fuerza.

Ondas P: Son ondas primarias (las más rápidas) de cuerpo (que viajan al interior de la tierra con alta energía y corta longitud de onda) que se propagan de forma longitudinal, generan esfuerzos normales en la roca y se propagan tanto en sólidos como en líquidos.

Ondas S: Son ondas secundarias (las segundas en llegar) de cuerpo que se propagan solo en sólidos y se difunden en forma de cizalla.

Ondas Rayleigh: Son ondas primarias superficiales (que viajan en la superficie de la tierra con corta energía y amplia longitud de onda) que se propagan de forma longitudinal, generan esfuerzos normales en la roca y se difunden tanto en sólidos como en líquidos.

Ondas transversales: Son ondas secundarias superficiales que se propagan solo en sólidos y se difunden en forma de cizalla.

Poisson ( $\mu$ ): Distribución de probabilidad discreta o probabilidad de que ocurra un evento en determinado tiempo.

ReMi: Refracción de micro-tremores.

Refracción: Cambio de dirección y velocidad que experimenta una onda cuando cambia de medio.

Sísmica: Herramienta de exploración del subsuelo que permite conocer de forma indirecta propiedades físicas.

Velocidad de fase de una onda: Es la tasa a la cual la fase de una onda se propaga en el espacio.

Vs: Velocidad de onda cortante.

Vs30: Velocidad de onda cortante promedio para los primeros 30m de profundidad.

Vp: Velocidad de onda compresional.

Zona vadosa: Es la parte entre el nivel freático y la superficie, donde no todos los poros están llenos de agua.

Zona capilar: Sector por encima del nivel freático donde el agua se sostiene por capilaridad en los poros.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La zona de estudio se encuentra en la vereda El Yolombo del corregimiento San Cristóbal de la ciudad de Medellín. Abarca un área aproximada de 12 km<sup>2</sup>, la cual presenta zonas de inestabilidad que han generado hundimientos de banca en la antigua vía al mar y daños en las estructuras civiles a lo largo de toda la ladera. Todo esto aumentado por el uso no planeado del suelo.



Mediante el uso de métodos indirectos (Remi, MASW y sísmica de refracción) de exploración del subsuelo se hallaron perfiles de suelo con parámetros de rigidez en tres sectores de la ladera y se exploró su evolución en el tiempo. Estos perfiles permiten caracterizar los materiales involucrados en el movimiento en masa, además de diferenciar de manera descriptiva procesos morfodinámicos en el área de interés cada dos meses. Esto con el propósito de elaborar hipótesis plausibles de la causante del movimiento.

## **2. JUSTIFICACIÓN**

La caracterización de contrastes de rigidez usando métodos geofísicos tipo ReMi, MASW y sísmica de refracción es de gran ayuda en el área de la geotecnia, en la medida en que estos métodos hacen posible identificar de forma indirecta parámetros geomecánicos del material. La identificación de estos parámetros es de vital importancia para determinar la causante de falla de la ladera.

La inestabilidad asociada a la topografía, el régimen hidrológico y las propiedades del material han creado una situación de inestabilidad, lo que ha generado a su vez deslizamientos y reptaciones en la vía Medellín-Santa fe de Antioquia y en el sector de Pajarito. Esta problemática requiere de un estudio detallado e interdisciplinario que busque comprender la dinámica del movimiento en masa.

## **3. OBJETIVOS GENERALES**

Hallar con métodos indirectos de exploración del subsuelo, perfiles con parámetros de rigidez en tres sectores de la ladera y evaluar su evolución en el tiempo, para contribuir así a la caracterización de los materiales involucrados en el movimiento en masa.

### **3.1 Objetivos Específicos**

- Realizar una recopilación de datos bibliográficos y de monitoreo sobre procesos de inestabilidad en la zona.
- Identificar puntos críticos a partir de la cartografía base de la zona.
- Caracterizar de manera descriptiva procesos morfodinámicos en el área de interés cada dos meses.
- Realizar tres líneas geofísicas cada 2 meses para determinar la variación de rigidez y parámetros elásticos.
- Comparar y correlacionar la exploración directa con la indirecta con el fin de disminuir la incertidumbre de la exploración geofísica. Como exploración directa, se propone, además de las observaciones de campo, la realización de unos estimativos de rigidez en laboratorio.

- Elaborar hipótesis plausibles sobre la causa y la dinámica del movimiento en masa en la ladera con la información sísmica obtenida, en conjunto con datos hidrológicos, geoelectrónicos y de cartografía geotécnica recientemente adquiridos.

#### **4. MARCO TEÓRICO**

Los métodos sísmicos aprovechan las refracciones de las ondas sísmicas y los medios para propagarse haciendo que los materiales se deformen según el tipo de onda que los atraviesa (Knott, 1989). Las ondas P son las más rápidas y hacen vibrar las partículas de manera longitudinal (paralela a la dirección de propagación de la onda) generando esfuerzos normales en la roca y deformando el medio en el momento en que lo atraviesan. Se propagan tanto en sólidos como en líquidos. Las ondas transversales o S son las segundas en llegar. Se propagan solo en sólidos, generan cambios de forma en la roca, producen cizalla y hacen vibrar las partículas en dirección normal a la propagación de la onda. Tanto las P como las S son ondas de cuerpo (viajan al interior de la tierra) con alta energía y corta longitud de onda. Las ondas tipo Rayleigh, ondas superficiales de naturaleza dispersiva, se propagan con baja energía y amplia longitud de onda, haciendo vibrar las partículas del medio de forma elíptica en un plano vertical que va en la misma dirección de propagación de la onda (Lowrie, 2007).

La dispersión de las ondas sísmicas está definida por el cambio en la velocidad de propagación de las ondas en función de la frecuencia. Esta dispersión está ligada a la variabilidad en "Vs" (Velocidad de onda cortante). Análogamente este rasgo se ve controlado por propiedades como mineralogía, porosidad, compactación, cementación, porcentaje y tipo de matriz, contenido de arcillas, geometría de granos, etc.

Para la realización de ensayos sísmicos, los medios generadores de energía son: caídas de peso (hasta 50m de profundidad), explosivos (profundidad variable), cañones de aire (para prospección en el agua), vibroseis (para prospección de miles de metros) y naturales (sismos). Por otro lado, para la detección de estas señales se usan sismógrafos y geófonos. En los ensayos de refracción sísmica, se usa el tiempo de viaje de la onda entre la fuente de energía y el geófono, por lo cual se lee en función de tiempo y distancia y no de profundidad. Esto hace que se necesite de expresiones matemáticas para hallar la velocidad de la primera onda en llegar (onda P) y los espesores de las diferentes capas (Estrada, 2008).

Los métodos geofísicos indirectos empleados para el análisis de ondas superficiales son ReMi (refracción de micro-tremores) y MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves). Estos métodos se basan en la propiedad de

dispersión de las ondas superficiales tipo Rayleigh para calcular la velocidad de fase de estas ondas a distintas frecuencias. Luego, con una inversión no lineal, se busca un perfil teórico de velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) que se ajuste a la curva de dispersión experimental (Dal Moro, 2015a).

En geotecnia se usan los métodos geofísicos indirectos para identificar la profundidad del basamento, las condiciones de meteorización, la fracturación y la competencia de la roca, además de detectar fallas geológicas; Asimismo los métodos ReMi, MASW y sísmica de refracción se usan para cálculos de propiedades geomecánicas a partir de métodos iterativos y cálculo e interpretación de graficas de dispersión en los dos primeros casos, e interpretación de datos de tiempo de llegada de las ondas a los geófonos para determinar  $V_s$  y  $V_p$  en el caso de la refracción. Lo anterior puede aprovecharse como complemento de las propiedades geo-mecánicas calculadas de forma directa y para tener una caracterización geotécnica del sector a estudiar. Además la obtención de velocidades de onda de corte sirve como apoyo para diseños sismo-resistente y para conocer como es la oscilación de las partículas cuando estas son excitadas por los distintos tipos de ondas. Esta información sirve como base para estimar la capacidad portante de los materiales y base para cálculos de ángulos de fricción y cohesión.

## **5. METODOLOGÍA**

El proyecto se realizó siguiendo las siguientes etapas:

**5.1. Revisión bibliográfica:** se llevó a cabo la revisión de datos geológicos, geofísicos, geotécnicos, hidrológicos y morfodinámicos a escala regional y local.

**5.2. Elaboración de la cartografía base:** se realizó el análisis de imágenes multi-temporales de la zona, mapa de pendientes, mapa de curvatura, mapa estadístico focal, de aspecto, de acumulación y de dirección de flujo a escala 1:10.000. Todo esto con el fin de identificar los puntos críticos.

**5.3. Etapa de campo:** se realizaron tres campañas de campo, cada dos meses, con el fin de identificar la varianza de las propiedades geomecánicas del material del sector. Las campañas constaron de un monitoreo geofísico, de una recolección de muestras para laboratorio y de una descripción general de los procesos morfodinámicos en el lugar.

**5.3.1. Ensayos geofísicos y caracterización de los procesos morfodinámicos activos:** Se hicieron líneas sísmicas tipo Remi, MASW y refracción en tres sectores de la ladera. Además, se realizó la caracterización descriptiva y general de los procesos morfodinámicos y descripción de los apiques exploratorios.

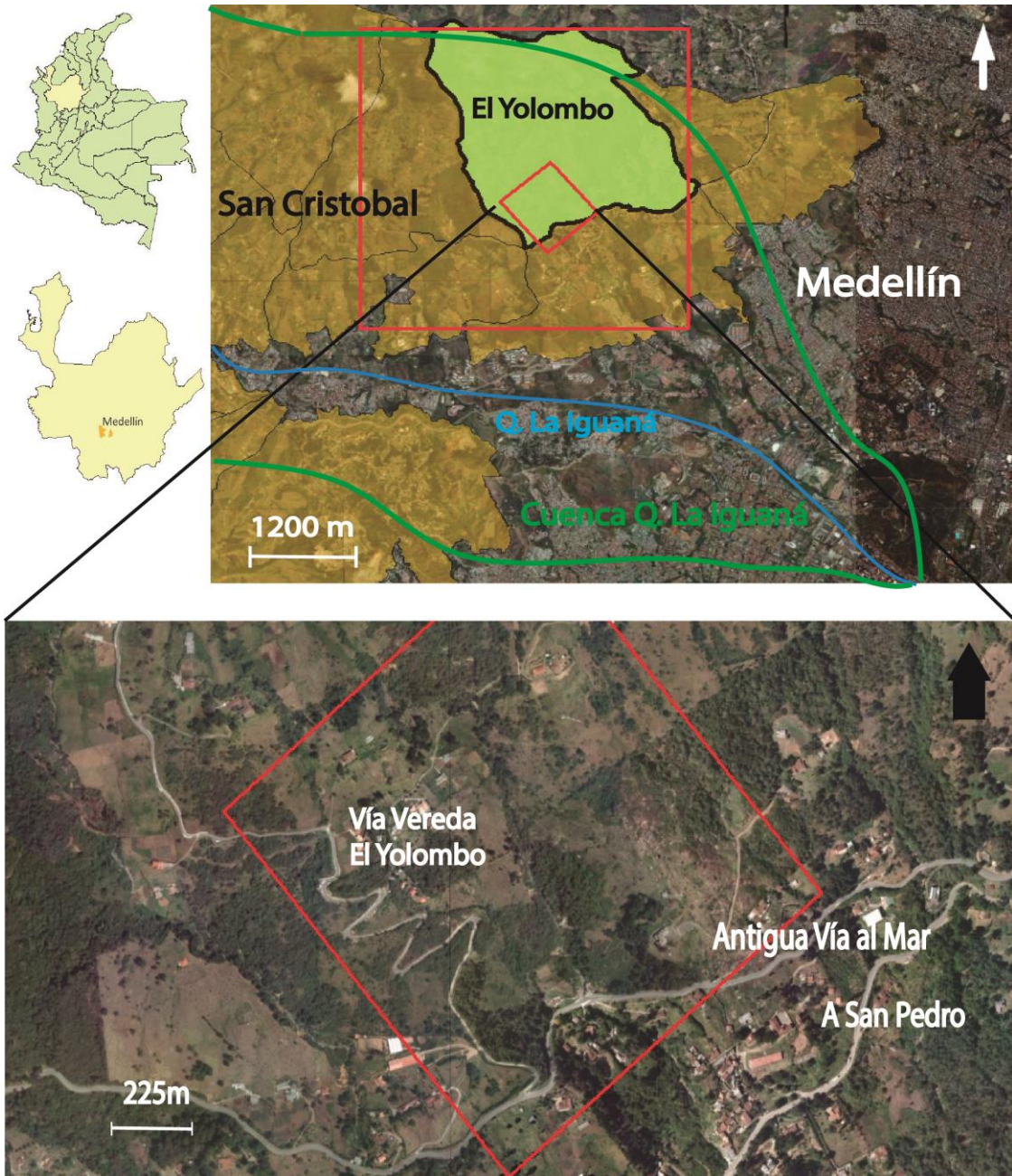
**5.3.2 Ensayos directos:** se tomaron muestras del suelo con tubo Shelby de forma manual para ensayar en el laboratorio una compresión simple, con el fin de obtener de manera directa el módulo de rigidez y así poder disminuir la incertidumbre de la exploración geofísica.

**5.4. Verificación y ploteo de la información:** se recopiló la información obtenida, se compararon los datos obtenidos en campo con los de laboratorio y se buscó una correlación con datos geofísicos e hidrológicos recientemente obtenidos (cf. los datos obtenidos por Arce Monsalve & Vahos Agudelo, 2016), con el fin de elaborar hipótesis sobre el tipo de falla de la ladera.

**5.5. Elaboración del producto final:** por último, se realizó el informe final en el que se presentan los contrastes de rigidez y su varianza. En él, además, se identifica la posible causante de la inestabilidad del sector.

## **6. LOCALIZACIÓN**

La zona de estudio está localizada al norte de la antigua vía al mar, en la vereda El Yolombo del corregimiento San Cristóbal de la ciudad de Medellín, Antioquia (figura 6.1). El área está comprendida en la plancha topográfica 146IIC2, escala 1:10 000 del Agustín Codazzi y en la vertiente norte de la cuenca de la quebrada La Iguaná (área del sector de estudio 12Km<sup>2</sup>).



*Figura 6.1: Localización de la zona de estudio. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).*

## **7. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL**

El Valle de Aburrá se encuentra localizado en la cordillera central colombiana, propiamente en el terreno Tahamí (Restrepo & Toussaint., 1988), el cual comprende el núcleo de la cordillera central colombiana, compuesto por rocas metamórficas del Triásico (Restrepo et al., 2009).

En el Valle de Aburrá afloran rocas como dunitas, meta-gabros, anfibolitas, granitos, secuencias volcano-sedimentarias, depósitos de vertiente y depósitos aluviales (González, 2001) (figura 7.1). Tectónicamente el sector está dominado por la interacción de las placas Sur Americana y Nazca, y localmente por el sistema de fallas de Cauca-Romeral.

La anfibolita de Medellín y el Meta-Gabro del Picacho son cuerpos que componen el depósito de vertiente objeto de estudio, han sido catalogados como cuerpos de una secuencia ofiolítica desmembrada (Pereira, et al., 2006) (Restrepo A, 2008) que se formó durante el Triásico, probablemente en el Pacífico, y, posteriormente, fue obducida sobre la margen occidental del Terreno Tahamí. Este cabalgamiento posiblemente ocurrió entre el Triásico Tardío y el Cretáceo Temprano (Restrepo A, 2008).

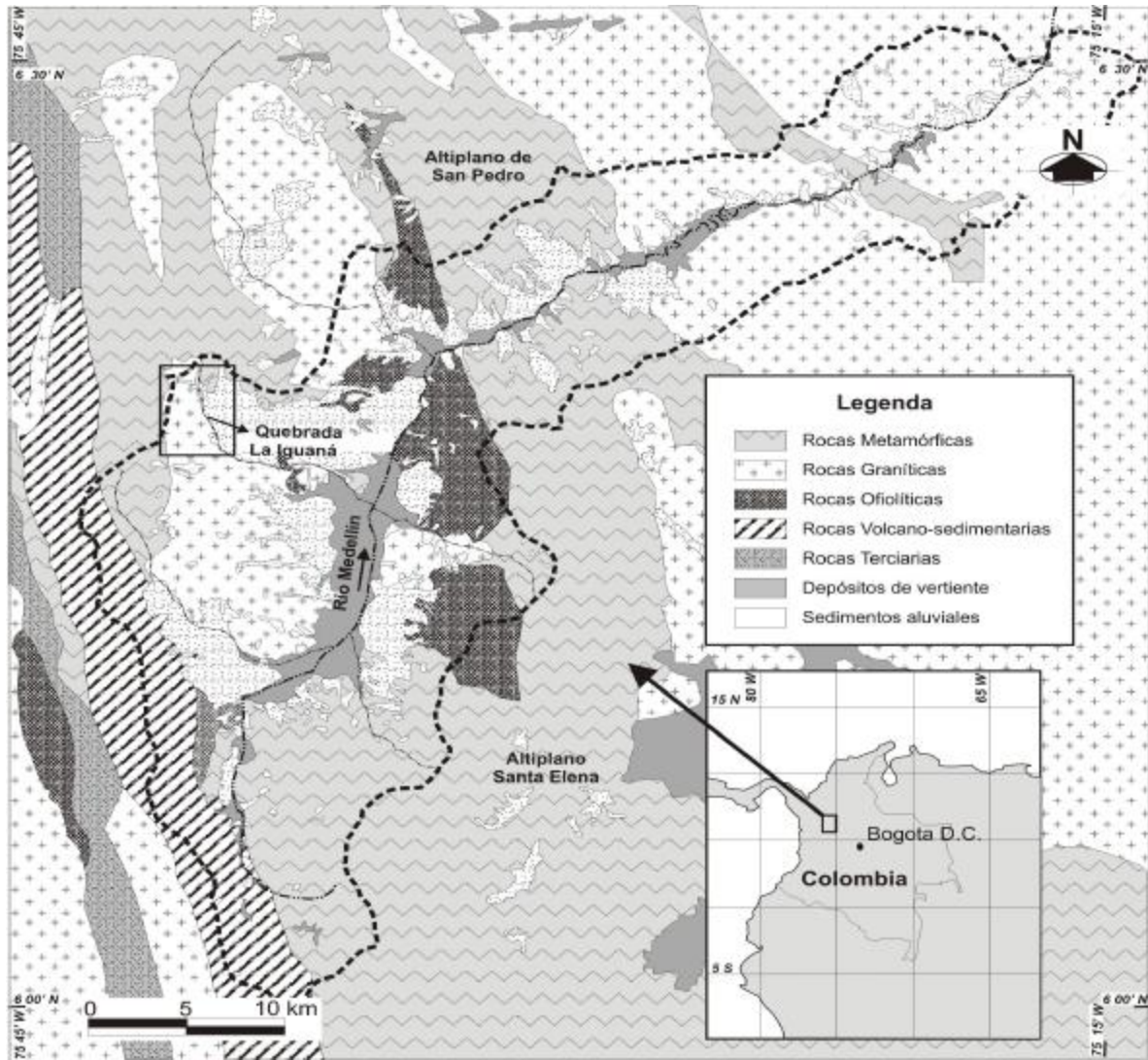


Figura 7.1: Mapa geológico simplificado del valle de aburrá (la línea punteada representa la cuenca del río Medellín). Tomado de Aristizábal & Yokota., (2008).

## 8. ANTECEDENTES

La ciudad de Medellín y el Valle de Aburrá ha sido escenario de múltiples deslizamientos producto de la erosión, la remoción de material y la alteración, infiltración y saturación de los suelos en pendientes mayores a 20 grados de inclinación (Rendón G, Toro V & Hermelin A, 2006). Muchos de estos flujos siguen por lo general los cauces de los drenajes existentes, como en el caso de la cuenca de la quebrada La Iguaná (Figura 6.1), y se depositan donde el canal se hace más chico, quedando traslapados por lo menos de 3 a 4 eventos depositacionales de derrubios de gravedad con intercalación de pequeños depósitos aluvio-torrenciales de algunas quebradas (Echeverry & Valencia, 2004) (Rendón G, Toro V & Hermelin A, 2006), (Aristizábal & Yokota, 2008).

En el valle de Aburrá y la cuenca de la quebrada La Iguaá se han adelantado estudios que correlacionan estadísticamente la ocurrencia de deslizamientos con geología, geomorfología e hidrología. Estos estudios han concluido que las condiciones detonantes de desplazamientos, independientemente de las litologías, son la erosión y meteorización físico-química durante todo el Pleistoceno superior y Holoceno, como factor principal de escurrimientos (Echeverry & Valencia, 2004), (Aristizábal, et al., 2005), (Aristizábal, et al., 2011). Estas conclusiones son apoyadas también por datos de trazas de fisión, carbono 14, entre otros (Aristizábal & Yokota, 2008). Lo anterior ha ayudado a entender la dinámica y la evolución del Valle de Aburrá, pudiendo establecer por lo menos tres eventos y tres migraciones de "Knick-Points" desde el Plioceno tardío al Pleistoceno (Aristizábal & Yokota 2008) (Figura 8.1).

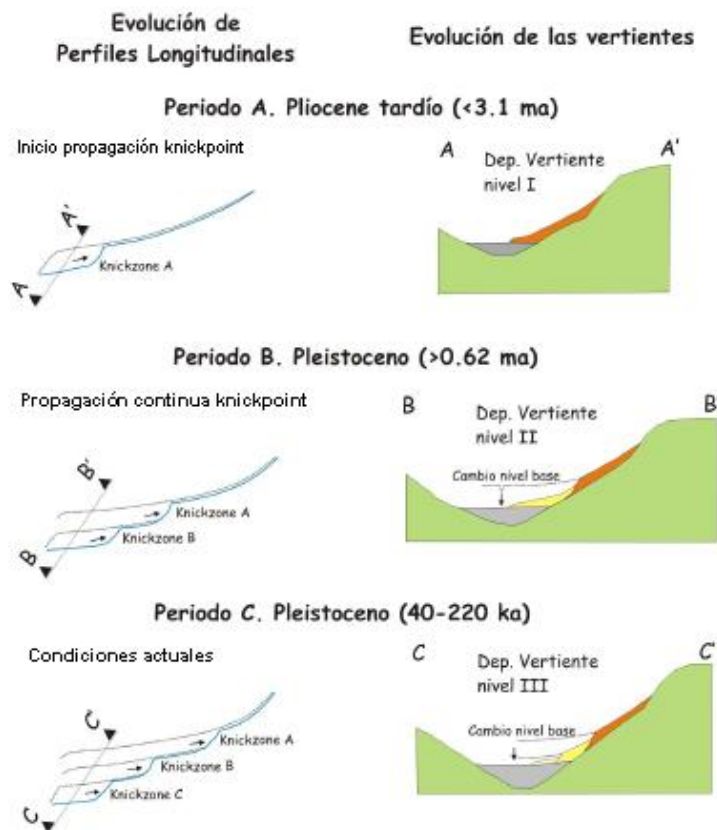


Figura 8.1: Modelo propuesto para la evolución de los depósitos del Valle de Aburrá. Tomado de: Aristizábal & Yokota, (2008).

La zona de estudio está constituida por derrubios provenientes de la parte más alta de la ladera (Alcaldía de Medellín, 2011). Estos constituyen un movimiento masivo (de gran magnitud) y lento, representando problemas de fundaciones para



estructuras civiles (Botero Arango, 1963). El depósito está constituido por bloques y arenas parcialmente meteorizadas a muy meteorizadas, mal seleccionadas y procedentes de la anfibolita de Medellín (Mejía, 1984).

En la vereda El Yolombo se presentan varios procesos de inestabilidad superficiales como reptación, derrumbe de detritos, desprendimiento por saturación en alta pendiente, cicatrices de deslizamiento activo e inactivo (AIM LTDA, 2007), (AIM LTDA, 2008), (Alcaldía de Medellín, 2011), (Arce Monsalve & Vahos Agudelo, 2016). A estos se les suman movimientos probados hacia el SE de la zona, detectados por medio de monitoreo de inclinometría, involucrando materiales con profundidades entre 0,5 y 20 m (AIM LTDA, 2013).

Arce Monsalve & Vahos Agudelo (2016) establecieron por métodos geo-eléctricos, cartográficos y de monitoreo hidrológico en la vereda El Yolombo, el perfil del depósito como un flujo de escombros subyacente por un depósito más consolidado, con nivel freático entre 2 m y 4 m de profundidad, el cual no presentó fluctuaciones significativas en un periodo de 6 meses. Sin embargo, en las zonas de altas pendientes observaron contenidos altos de humedad en el suelo, debido a que poca agua de la precipitación se convierte en escorrentía (por medio de ensayos infiltración, densidad aparente, densidades relativas y permeabilidad).

## **9. DESCRIPCIÓN DE LA EXPLORACIÓN**

Debido a la necesidad de conocer la disposición y clasificación de las capas de suelos y la disposición de los materiales no consolidados, se plantearon en consideración del alcance de este trabajo y las características de la zona, 3 ensayos ReMi, MASW y de sísmica de refracción (3 cada 2 meses) con arreglos de 24 geófonos (de 4,5 Hz) separados equidistantemente cada 0,5m.

La localización en planta del ensayo se realizó donde era más crítica la zona de estabilidad en relación con las cicatrices observadas en fotos aéreas y orto-fotos. En relación con la distribución de las zonas de análisis se realizaron, como bien se ha mencionado, 3 arreglos lineales mediante los cuales se pretendió realizar la caracterización y clasificación del perfil de suelo del sitio de interés (Tabla 9.1).

LINEA	PUNTO	COORDENADAS		
		X	Y	Z
1	INICIAL	1161829.947	1188196.064	2195
	FINAL	1161828.872	1188209.058	2195
2	INICIAL	1161841.193	1188153.13	2179
	FINAL	1161848.135	1188163.169	2176
3	INICIAL	1161876.611	1188080.334	2149
	FINAL	1161881.564	1188088.363	2157

*Tabla 9.1: Coordenadas de los ensayos geofísicos.*

Por otra parte, se hicieron lecturas de piezómetros artesanales (metodología Casagrande) en cada visita a campo, con el fin de conocer el nivel freático y su varianza en función del tiempo y la precipitación, para también obtener correlación con los datos geo-mecánicos y la saturación por agua (Tabla 9.2).

PIEZOMETRO	COORDENADAS		
	X	Y	Z
1	1161835.119	1188166.095	2179
2	1161844.285	1188137.148	2170
3	1161859.445	1188109.235	2162
4	1161880.593	1188083.357	2153

*Tabla 9.2: Coordenadas de los piezómetros.*

En tercer lugar, se procedió a revisar los datos hidrológicos de pluviógrafos con el fin de obtener datos de precipitación a lo largo del tiempo y compararlos con los datos geofísicos y piezométricos.

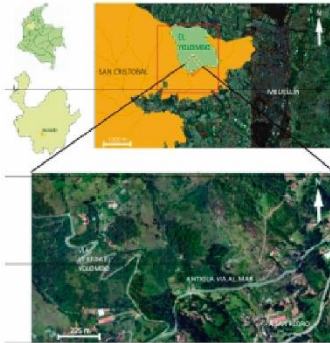
PLUVIÓGRAFOS SIATA	COORDENADAS	
	X	Y
20 Casa Claret	1162337	1188006
21 Escuela rural San José de la Montaña	1159198	1189049

*Tabla 9.3: Coordenadas pluviógrafos.*

En la figura 9.1 se muestra la ubicación en planta de las líneas geofísicas, el apique, los pluviógrafos y los piezómetros. Cabe destacar que las muestras obtenidas con tubo Shelby de forma manual fueron tomadas en las parcelas donde se hicieron las líneas y un apique al norte de la zona, con el fin de abarcar toda el área y tener menos incertidumbre a la hora de correlacionar la exploración directa con la indirecta.

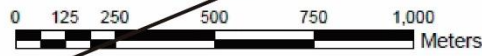
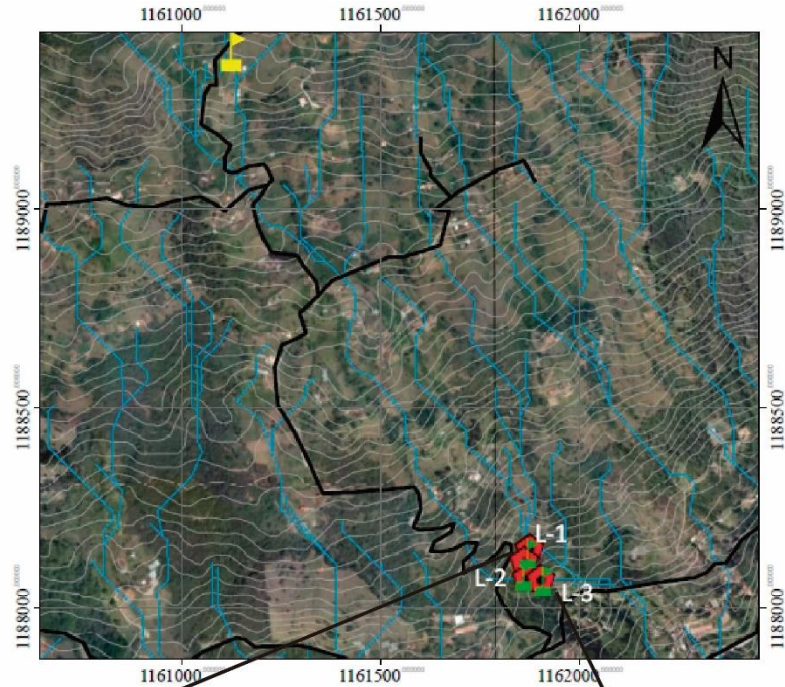
La localización de la instrumentación se hizo, según la delimitación de Arce Monsalve & Vahos Agudelo (2016), en las zonas con una situación de inestabilidad más crítica.

## Instrumentación Localización



### Leyenda

-  Apique
-  Sondeos\_GFSC
-  Piezometros
-  Vías
-  Drenajes1
-  C\_Nivel



1:9,000

Coordinate System: MAGNA Colombia Oeste  
 Projection: Transverse Mercator  
 Datum: MAGNA  
 False Easting: 1,000,000.0000  
 False Northing: 1,000,000.0000  
 Central Meridian: -77.0775  
 Scale Factor: 1.0000  
 Latitude Of Origin: 4.5962  
 Units: Meter

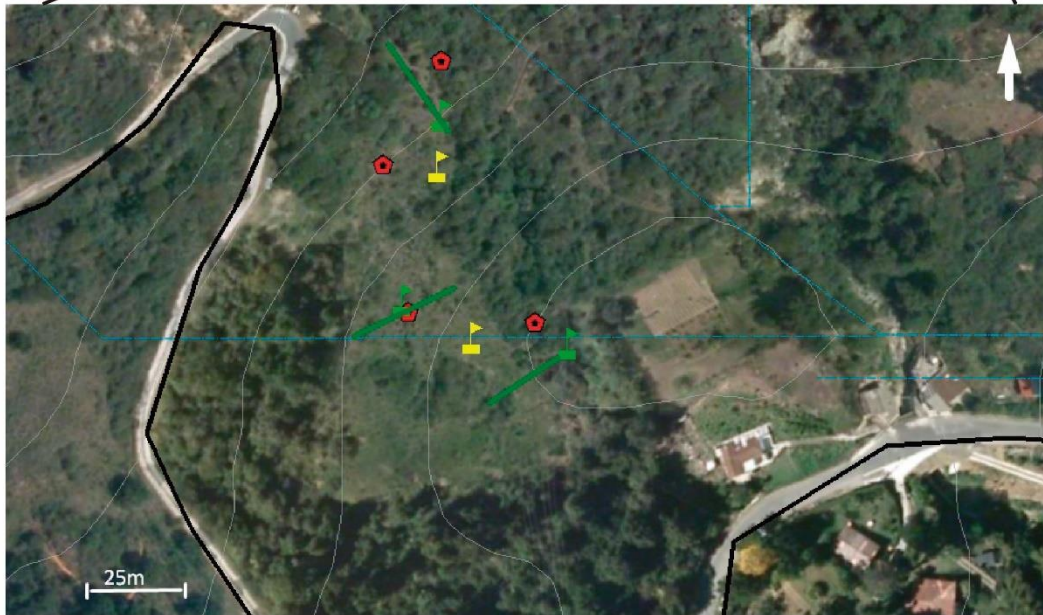


Figura 9.1: Localización en planta de la instrumentación utilizada. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).

## 9.1 Procesos Morfodinámicos

En el sector objeto de estudio se evidencian procesos antiguos de reptación y de deslizamientos de tipo rotacional enmascarados por la vegetación en estado inactivo o suspendido. Estos procesos tienen lugar en las zonas de pendiente más alta, en aquellas en las que la acción ganadera es más activa y cerca a los cauces de las quebradas (los cauces cortan levemente los depósitos de vertiente).

Los procesos morfodinámicos recientes que aún se encuentran sin vegetación presentan mayor susceptibilidad al desarrollo de procesos superficiales tales como reptación y movimientos rotacionales de etapa temprana y a veces cubiertos por la vegetación o reactivados en época de lluvia.

Se destaca que la zona sur del área de estudio presenta también mayor susceptibilidad al desarrollo de procesos superficiales tales como reptación, flujos de detritos y deslizamientos rotacionales, como se evidenció en la visita de campo (figura 9.1.1 A, B y C). Algunos de estos procesos en etapa temprana de evolución, podrían estar enmascarados por la cobertura vegetal.

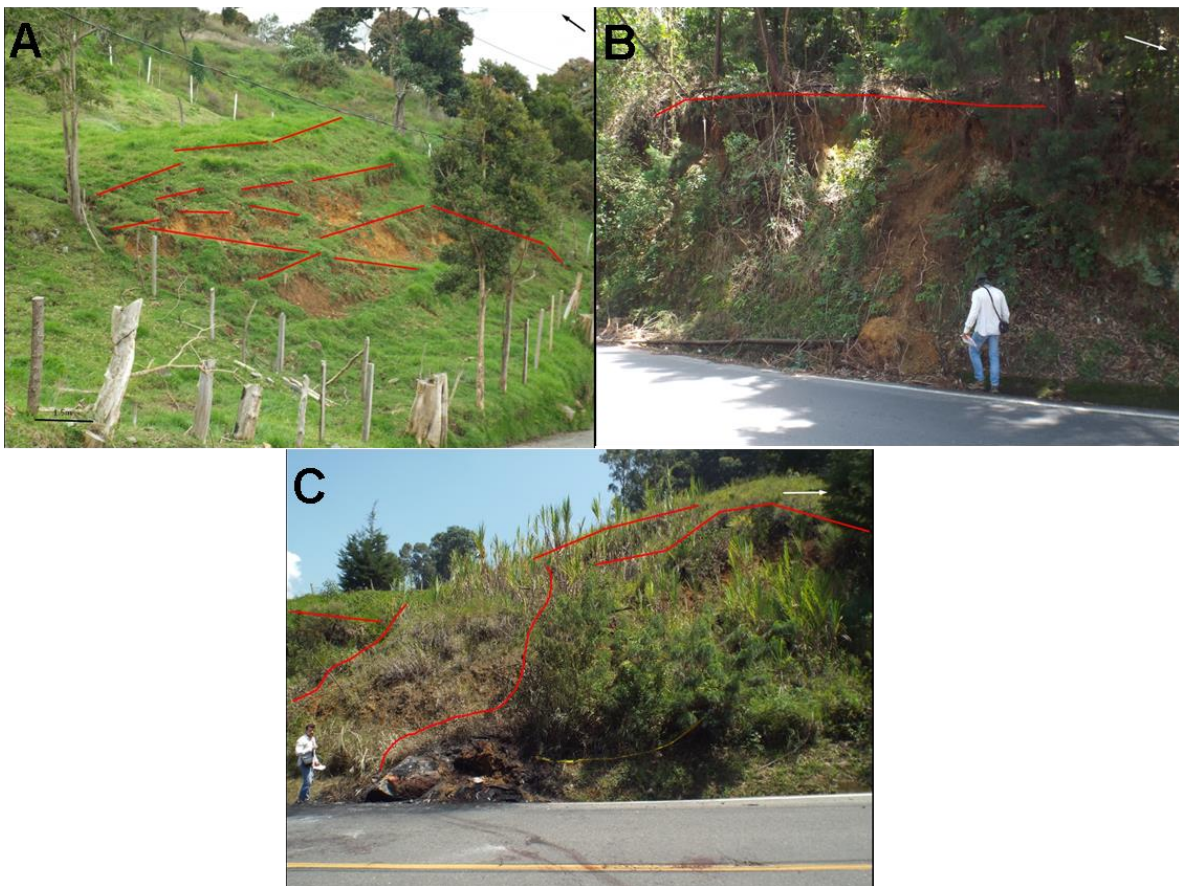


Figura 9.1.1: A) Reptación aumentada por la actividad ganadera. Las líneas rojas indican la corona de deslizamiento B) flujo de detritos por reptación. La línea roja

*indica la corona de deslizamiento C) Reptación y movimiento rotacional a lo largo de la vía. Las líneas rojas horizontales indican la corona de deslizamiento y las inclinadas el flujo del deslizamiento rotacional*

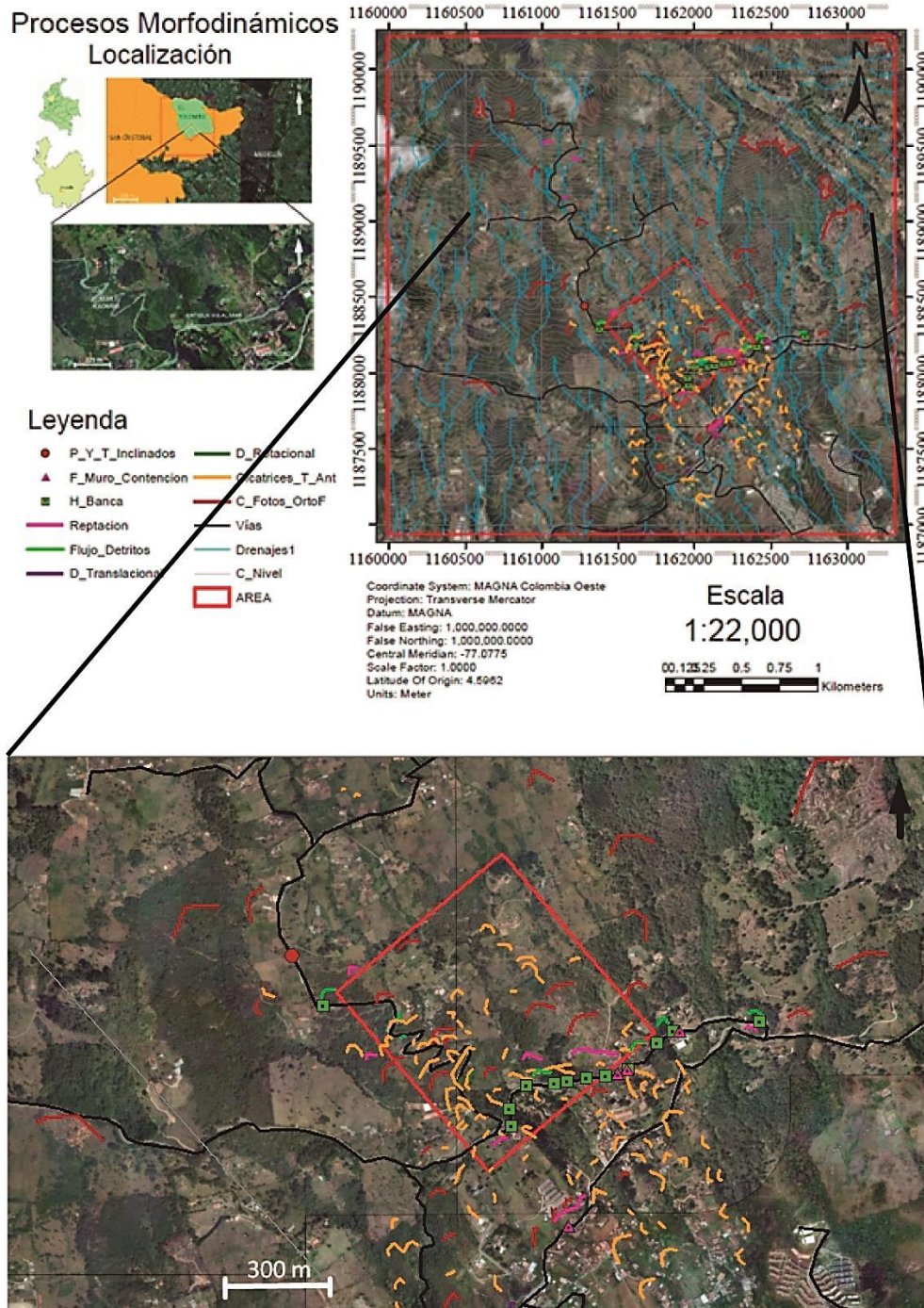
A lo largo del área son claros los procesos generadores de inestabilidad, evidenciado por las fallas en algunos muros de contención (figura 9.1.2 A y B), el hundimiento de banca en algunos segmentos de la vía (figura 9.1.2 C), el basculamiento de algunos postes (figura 9.1.2 D), entre otros daños en estructuras civiles. Estos déficits en estructuras son causados por la dinámica de los movimientos en masa, más crítica en épocas de lluvia.



*Figura 9.1.2: A) Falla de muro de contención por hundimiento de banca. B) Falla de muro de contención activa y por volcamiento hacia la vía. C) Hundimiento de la banca de aproximadamente 10°. D) Basculamiento de postes de luz de aproximadamente 7°.*

La actualización del mapa de procesos morfodinámicos (figura 9.1.3) se realizó a partir de Arce Monsalve & Vahos Agudelo (2016), de la recopilación de datos de

trabajos anteriores, orto-fotos, fotografías aéreas y visitas a campo. La zona está dominada por la reptación y la inestabilidad de algunos taludes cerca a la vía, que han sido influenciados por el sobre pastoreo. También cabe destacar que la zona central del sector y la zona SE son las que más presentan cicatrices (dominada por la reptación), y a su vez donde son más críticas las afectaciones a la infraestructura.



*Figura 9.1.3: Mapa de procesos morfodinámicos. D-Rotacional (deslizamientos de geometría rotacional, Cicatrices\_T\_Ant (cicatrices mapeadas en trabajos anteriores), C\_Fotos\_OrtoF (cicatrices mapeadas a través del análisis de fotografías aéreas y orto-fotos). El recuadro rojo indica el área donde se encuentra la instrumentación. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).*

## **9.2 Uso del Suelo**

La vereda El Yolombo es una zona rural que se localiza en la vertiente norte de la cuenca de la quebrada La Iguaná, un sector con zonas de amenaza alta y riesgo mitigable y no mitigable. Este territorio se ha clasificado como una zona de protección para la producción lechera y de cebolla (actividades que son de sustento económico para la comunidad); además de un sector adecuado para la recreación, el estudio, la salud y la vivienda (Instituto Tecnológico Metropolitano, 2006).



*Figura 9.2.1: Ganadería e infraestructura de la vereda El Yolombo.*



### 9.3 Mapa de Pendientes

El mapa de pendientes se hizo usando el programa Arcgis 10.1 y un "DEM" (píxel 12,5m) (Digital Elevation Map) tomado de "AlosPalsar" como base para elaborar el mapa de pendientes de la zona (USGS, 2016).

La zona se caracteriza por tener principalmente pendientes que van de moderadas a altas y pequeños sectores con baja y muy alta pendiente, siendo de morfología alomada y colinada de cimas redondeadas.

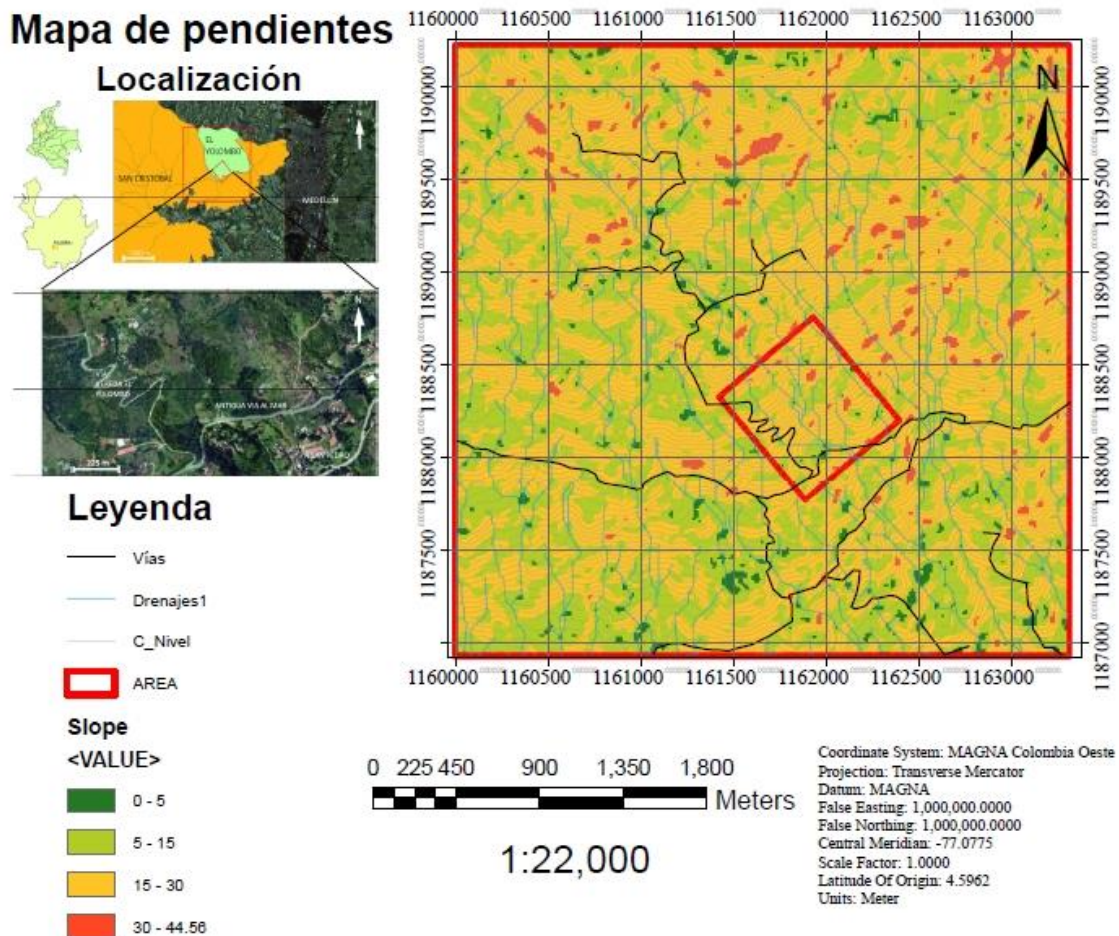


Figura 9.3.1: Mapa de pendientes. Predominan pendientes que van de los 5° a los 30°, siendo de suaves a moderadas.

Estas pendientes han sido modificadas a lo largo del tiempo por cambios tectónicos, climáticos y por intervención humana; van de bajas a muy altas y están cubiertas por vegetación, capas de lleno y concreto en algunas partes.

## 9.4 Mapa estadístico focal

El mapa estadístico focal se hizo usando el programa Arcgis 10.1 y un "DEM" (píxel 12,5m) (Digital Elevation Map) tomado de "AlosPalsar" como base para elaborar el mapa estadístico focal de la zona (USGS, 2016).

En la figura 9.4.1 se observa que no hay cambios abruptos significativos en la pendiente, excepto en la zona centro-oriental donde se identifican algunas cicatrices, reptación y pequeños desgarros en la ladera.

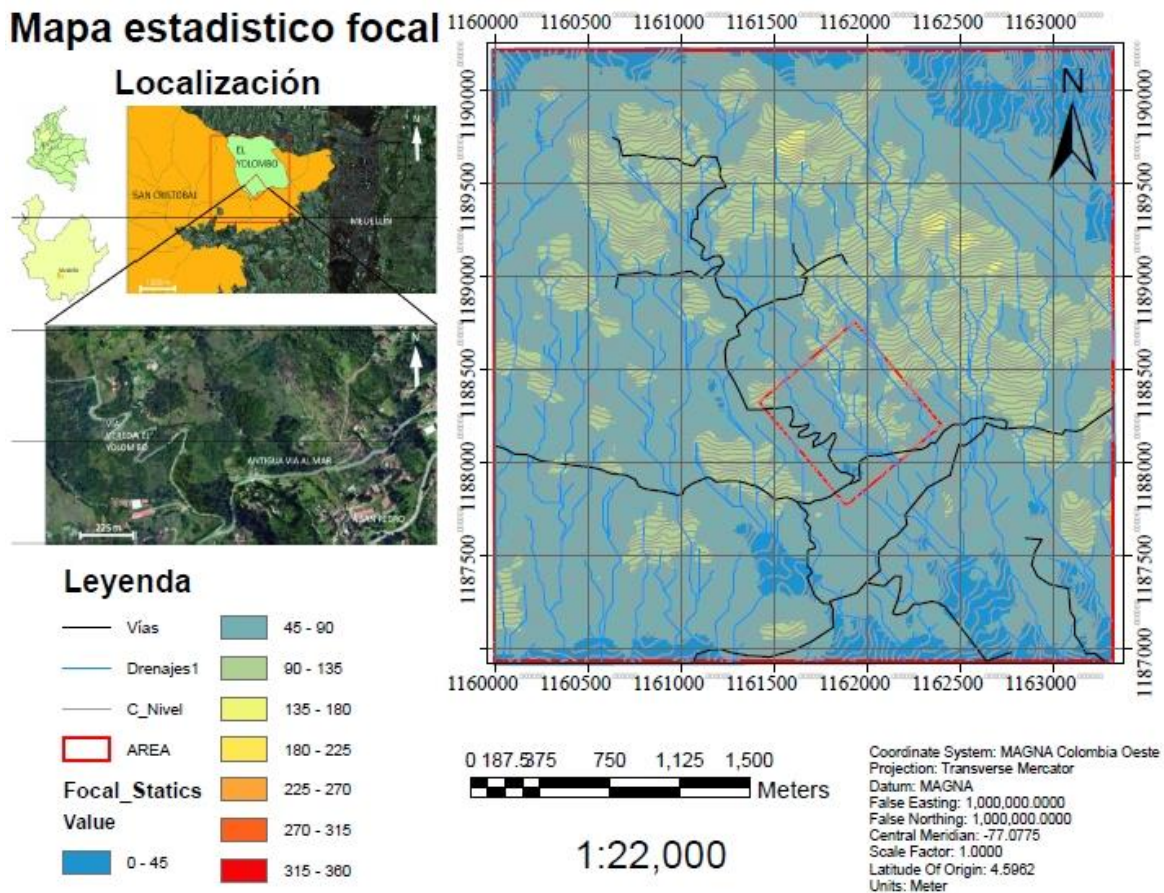


Figura 9.4.1: Mapa estadístico focal.

## 9.5 Aspecto

El mapa de aspecto se hizo también usando el programa Arcgis 10.1 y un "DEM" (píxel 12,5m) (Digital Elevation Map) tomado de "AlosPalsar" como base para elaborar el mapa de aspecto de la zona (USGS, 2016)

Este mapa (figura 9.5.1) permite identificar la orientación de las superficies de la zona siendo el norte el punto "0", y en el cual se puede destacar que hay predominancia de caras con sentido E-W y SW-SE. Esto se encuentra en concordancia general con la orientación de la cara de la ladera situada en la dirección de las vertientes del Valle de Aburrá en ese sector, dominada así por la denudación, el tectonismo y la litología que moldearon el sector.

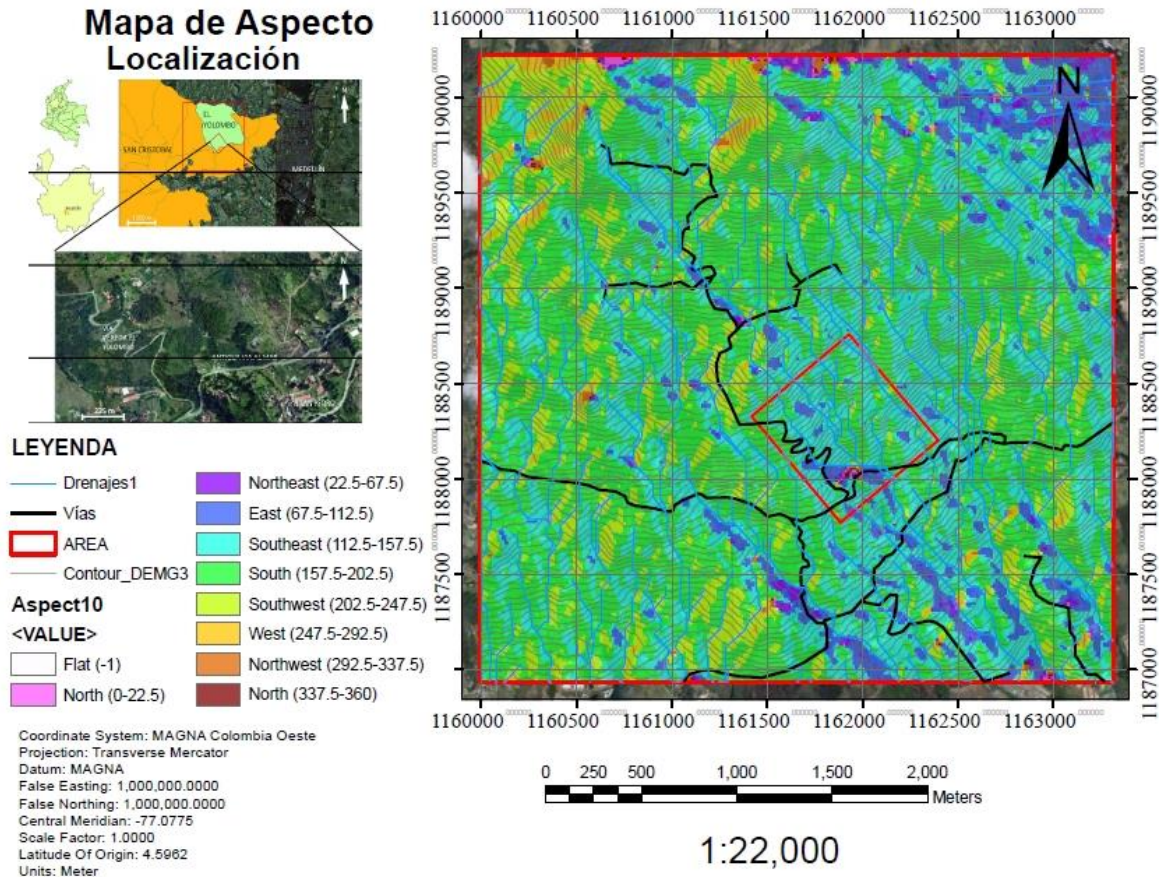


Figura 9.5.1: Mapa de aspecto.

## 9.6 Hidrología

La quebrada La Iguaná es la fuente principal en la zona de estudio, y afluentes a estas se encuentran pequeñas quebradas y cañadas de morfología dendrítica, paralela y subparalelas. Las quebradas y cañadas situadas en la zona son: La Gómez, La García, Juan bobo, La Corcovada, La Eolia, La Borbollón y La Colonia. Todas ellas se encuentran en la margen izquierda de la cuenca, que nace en el alto de las antenas repetidoras (sector La Montañita) en la cota 2950 m.s.n.m y desemboca en el río Medellín en la cota 1453 m.s.n.m, con un área aproximada de

52,5Km<sup>2</sup> (Alcaldía de Medellín, 2011), (Arce Monsalve & Vahos Agudelo, 2016) (Figura 9.6.1).



*Figura 9.6.1: Localización de la zona dentro de la cuenca de la quebrada La Iguaná. El polígono azul representa la cuenca de la quebrada la Iguaná, el polígono rojo representa la cuenca la quebrada La García y el polígono amarillo representa la cuenca de una pequeña quebrada que desemboca en la quebrada La García. Foto tomada de Google EARTH (visita, febrero 7 de 2017).*

### 9.6.1 Dirección de Flujo

El mapa de dirección de flujo se hizo usando el programa Arcgis 10.1 y un “DEM” (pixel 12,5m) (Digital Elevation Map) tomado de “AlosPalsar” como base para elaborar el mapa de dirección de flujo de la zona (USGS, 2016).

En la figura 9.6.1.1 se observa que las quebradas fluyen en sentido NNW al SSE, indicando que el agua tiende a fluir por estos corredores. Por el uso del suelo y la presencia de poca vegetación, el agua se desborda y fluye por las pendientes altas y sectores con cambios abruptos de pendiente, acumulándose en zonas de menor pendiente. Esto genera inestabilidad y saturación del suelo en la ladera.

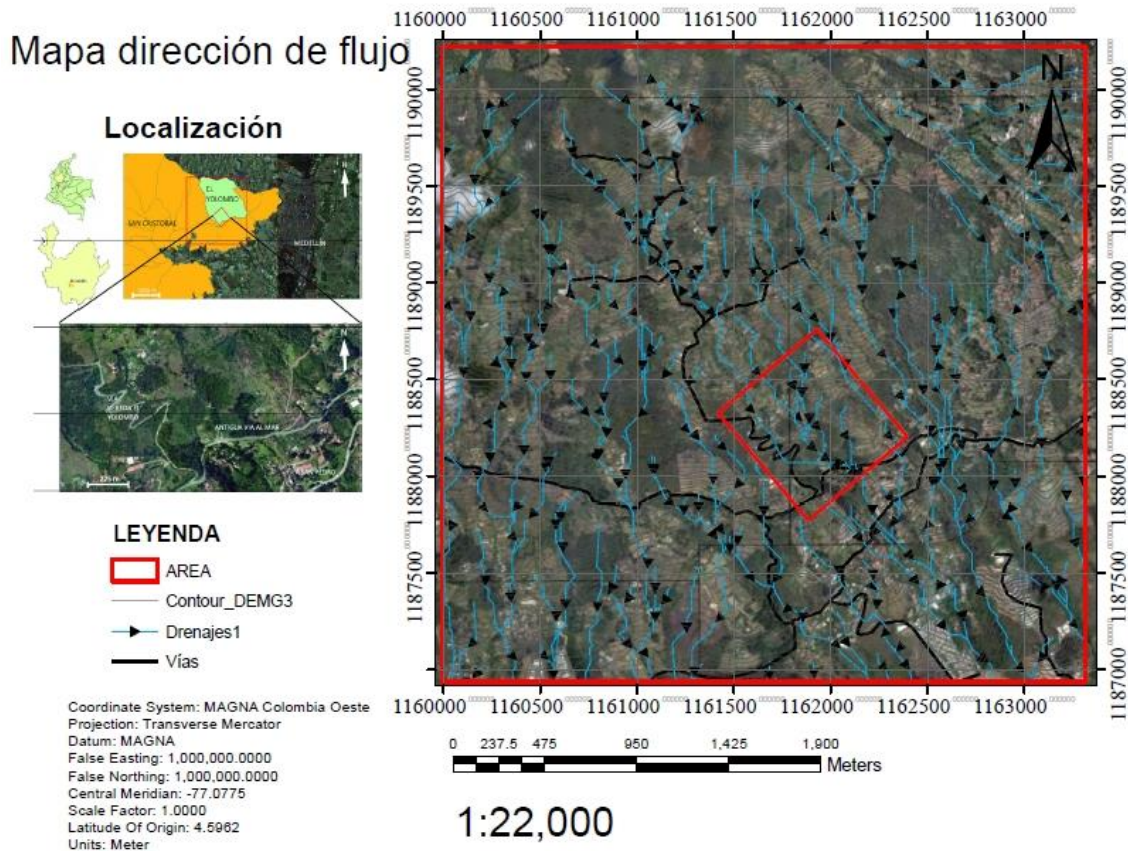


Figura 9.6.1.1: Mapa de dirección de flujo. Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).

## 10. RESULTADOS

En consideración con lo propuesto en la metodología y la delimitación que hacen Arce Monsalve & Vahos Agudelo (2016), se analizan los resultados en función de la resolución de la exploración geofísica y teniendo en cuenta las descripciones y exploración directa, con el fin de disminuir o acotar los contrastes de rigidez analizados.

### 10.1 Exploración del subsuelo

#### 10.1.1 Descripción del perfil de suelo

Con el fin de conocer la disposición de los materiales en perfil y poder abarcar toda el área de interés se realizó un apique exploratorio al norte de la zona de estudio. Se hizo para poder tener un contexto más global de la dinámica del sector, además de verificar que los materiales no varían mucho en la zona (Tabla 10.1.1.1).

FORMATO DESCRIPCIÓN APIQUES EXPLORATORIOS			
<b>APIQUE</b>	1	<b>LOCALIZACIÓN</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>FECHA</b>	4/27/2017	Vereda Yolombo El	No se detectó nivel freático y el uso del suelo en superficie es usado para ganadería
<b>COTA</b>	2632 m.s.n.m		
<b>COORDENADAS</b>	X: 1162198, Y: 1189630		
<b>U. GEOLÓGICA</b>	Depósito de vertiente con traslape de flujos de lodos		
<b>U. GEOMORFOLÓGICA</b>		Filos y cuchillas redondeadas con pendientes que van de 3° a 60°	
<b>VEGETACIÓN</b>	Bosques húmedos pre-montanos		
<b>USO DEL SUELO</b>	Ganadería y agricultura		
<b>I. TOPOGRÁFICA</b>	35°		
<b>TIPO DE DRENAJE</b>	Bien drenado		
<b>PROFUNDIDAD (m)</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>FOTOGRAFÍAS</b>	
0-0,50	<b>Capa orgánica (H):</b> Material de color negro intenso con plasticidad muy alta, poco denso y con restos de raíces y materia orgánica carbonizada.		
0,50-2,3	<b>Suelo residual a partir de depósito de vertiente (IA):</b> Material color naranja y pardo con pecas de oxidaciones de hierro y manganeso, muy plástico, poco denso y medianamente húmedo. Textura limo-arcillosa y sin estructura reconocible.		

2,3-3,6	<p><b>Flujo de lodos (Qvl):</b> Se observa material color naranja sin estructura reconocible, con textura franco-arcillosa, plástica, poco densa y medianamente húmeda. También se detectaron pequeños fragmentos de cuarzo angular, fragmentos de meta-gabro y anfibolita muy angulares.</p>	
3,6-5,5	<p><b>Flujo de lodos y escombros (Qvle):</b> Se observa depósito de vertiente matriz soportado en proporción clastos matriz 70-30 respectivamente; compuesto por cantos angulares de cuarzo, anfibolita y meta-gabro que van de 0,8cm a 35 cm de diámetro en su eje más largo. Los materiales se encuentran embebidos en una matriz de arenas finas con arcillas de igual composición y geometría.</p>	
5,5-5,85	<p><b>Flujo de lodos y escombros (Qvle-A):</b> Se detecta depósito de vertiente color crema matriz soportado en proporción clastos matriz 20-80 respectivamente; compuesto por fragmentos de cuarzo muy angulares y friables, embebidos en una matriz netamente arcillosa con presencia esporádica de arenas finas angulares de fragmentos líticos de anfibolita. La matriz es muy plástica, húmeda y muy poco densa.</p>	

Tabla 10.1.1.1: Descripción del apique 1.

### 10.1.2 Descripción geológica de las muestras



Las siguientes muestras fueron tomadas en el mismo lugar de donde se extrajeron las muestras con tubo Shelby, que fueron las que se ensayaron en laboratorio.



Las muestras 1.1 y 1.2 fueron tomadas en un apique exploratorio de 5,30m de profundidad localizado al norte de la zona de estudio (X: 1162198, Y: 1189630) con el fin de abarcar la mayor área posible de la ladera. Las muestras fueron tomadas a 1,80m y 4,60m de profundidad respectivamente, donde se observó que el suelo residual, a partir de un depósito de vertiente, y el flujo de lodos y escombros eran más representativos por sus características morfológicas y físicas (Tabla 10.1.2.1). Aunque este apique se encuentra a más de 1000m de la zona más crítica, se encontró conveniente porque conserva la misma estructura de un suelo residual a partir de un depósito de vertiente de las mismas características de la zona donde se concentra la instrumentación y, también, porque permite tener un contexto más global de toda la zona de interés.

Las muestras 2.1 (X: 1161873, Y: 1188118) y 2.2 (X: 1161883, Y: 1188068) fueron tomadas en dos apiques que funcionan con instrumentos de recolección de agua, ubicados a 20m ladera abajo de la línea geofísica 1 (donde se tomó la muestra 2.1 a 1,20m de profundidad) y a 36,5m ladera abajo de la línea geofísica 2 (donde se tomó la muestra 2.2 a 0,80m de profundidad) (Tabla 10.1.2.1).

<b>FORMATO DE DESCRIPCIÓN DE SONDEOS EXPLORATORIOS</b>		
<b>Profundidad (m) (de techo a base).</b>	<b>Uso del suelo:</b> Ganadería y agricultura	<b>Localización:</b> Vereda el Yolombo
	<b>Unidad geológica:</b> Depósito de vertiente (Qv) y flujos de lodos (Qvf).	<b>Observaciones:</b> Solo se evidencio nivel freático en las parcelas 2.1 y 2.2 a 0,90m y 0,75m respectivamente
	<b>Uso del suelo:</b> Ganadería y agricultura	<b>Vegetación:</b> Bosque húmedo pre-montano
	<b>Unidad geomorfológica:</b> Filos y cuchillas que van de 3° a 60°	<b>Localización:</b> Vereda el Yolombo
	<b>Tipo de drenaje:</b> Medianamente drenado a bien drenado.	<b>Apiques:</b> 1 (zona norte. Muestras 1.1 y 1.2), 2 (zona central. Muestra 2.1) y 3 (zona central. Muestra 2.2).
	<b>Descripción</b>	<b>Fotografía</b>



1,8	<p><b>Muestra 1.1 (Suelo residual a partir de depósito de vertiente (IA)):</b> En muestra de bolsa se observa suelo residual a partir de depósito de vertiente de textura franco arcillosa sin estructura reconocible, plástico, poco denso y húmedo. El color es pardo a naranja y presenta algunos granos tamaño arena angular de meta-gabro y anfibolita en poca proporción</p>	
4,6	<p><b>Muestra 1.2 (Depósito de vertiente (Qv)):</b> En muestra de bolsa se observa material de depósito de vertiente de tipo matriz soportado en proporción clastos matriz 30%-70% respectivamente, compuesto por clastos de anfibolita y meta-gabro de geometría angular con diámetro en su eje más largo de 2 cm a 12 cm, embebidos en una matriz limo-arcillosa color pardo a naranja sin estructura reconocible poco plástica y poco densa.</p>	

1,2	<p><b>Muestra 2.1 (Suelo residual a partir de depósito de vertiente (IA)):</b> En muestra de bolsa se observa (suelo residual) a partir de un flujo de lodos y escombros de color gris oscuro con textura arcillo-arenosa compuesto por cantos angulares y muy angulares de anfíbolita que van de 1 mm a 2 cm en su eje más largo. Plasticidad media, humedad media y densidad medianamente alta. El material es un suelo residual a partir de un depósito de vertiente.</p>	
0,8	<p><b>Muestra 2.2 Suelo residual a partir de depósito de vertiente (IA)):</b> En muestra de bolsa se observa suelo residual a partir de depósito de vertiente, compuesto por un material color amarillo a gris oscuro de textura franco arcillo-limoso, plasticidad muy alta, humedad media y densidad medianamente alta. La composición de los cantos identificables, es de tamaño arena y grava, esporádicas de anfíbolita de 1mm a 1cm de diámetro en su eje más largo. La proporción clastos matriz es 2-98 respectivamente.</p>	

*Tabla 10.1.2.1: Descripción de las muestras donde se tomaron los tubos Shelby.*

### 10.1.3 Lectura de los piezómetros (Casagrande)

Se realizaron lecturas de piezómetros artesanales (metodología Casagrande) en cada visita a campo, para conocer el nivel freático y su cambio en función del

tiempo y la precipitación. Lo anterior se hizo para obtener la correlación con los datos geo-mecánicos y la saturación por agua.

A lo largo de la parte central de la zona de estudio se instalaron 4 piezómetros (de 3m de profundidad) (Figura 10.1.3.1) para la toma de medidas de nivel freático. En la primera visita a campo se encontraron los piezómetros secos. En la segunda, se detectó agua en el piezómetro 1 a 1,75m, en el 2 a 1.83m, en el 3 a 1,90m y en el 4 a 1,12m. En la tercera visita, se encontró el agua en el piezómetro 1 a 7cm, en el 2 a 20cm y los 3 y 4 se encontraron completamente saturados (1cm y 2cm respectivamente). Cabe resaltar que las mediciones se tomaron en las visitas en las que se hicieron los ensayos geofísicos (se puede observar su medida en los perfiles de los ensayos ReMi y MASW (figuras 10.1.4.1.3 y 10.1.4.2.2).



*Figura 10.1.3.1: Piezómetros instalados en la zona centro de la zona.*

#### **10.1.4 Resultados de las líneas geofísicas**

Los ensayos geofísicos se realizaron con cierta temporalidad (cada 2 meses) con el fin de detectar e inferir si existe una variación en las propiedades geomecánicas según el régimen hidrológico.

En la tabla 10.1.4.1 y la figura 10.1.4.1 se presentan los ensayos realizados de forma indirecta, mostrando tres líneas con tres ensayos según su temporada climática. Esto con el fin de comparar qué tanto varían las propiedades geomecánicas según la época climática y analizar posibles cambios que indiquen variación en las propiedades del material en función del agua que entra al sistema.

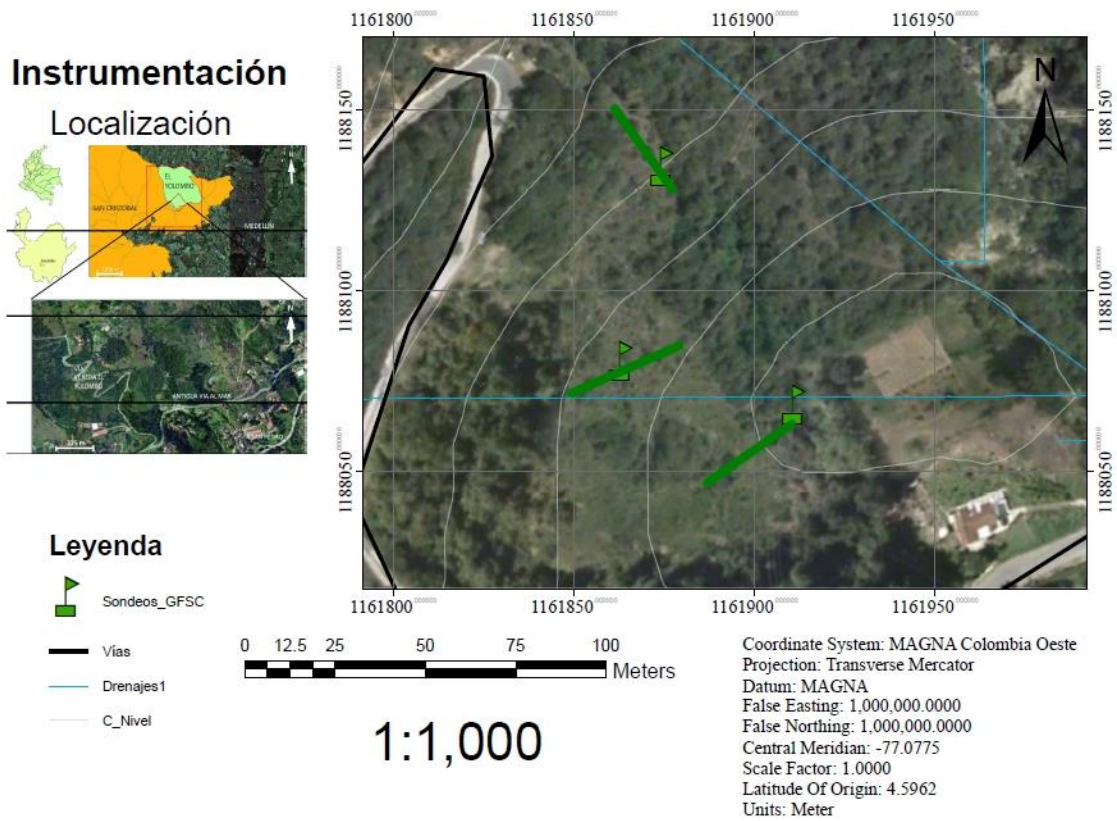


Figura 10.1.4.1: Localización de los sondeos geofísicos. L-1 línea 1, L-2 línea 2 y L-3 línea 3.

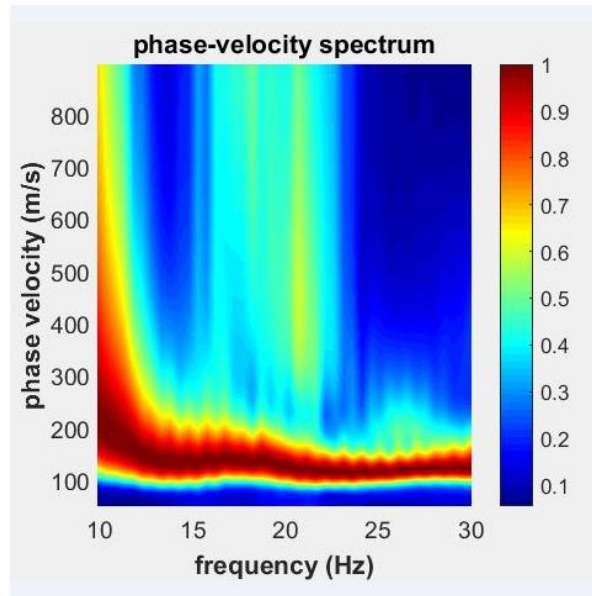
Sondeo		Tipo de ensayo	Temporada Climatica
Línea 1	L1-febrero 6-2017	ReMi, MASW Y Refracción	Inicio temporada lluvias
	L1-marzo 13 2017	ReMi, MASW Y Refracción	Lluviosa
	L1-abril 26 2017	ReMi, MASW Y Refracción	terminando temporada de lluvias
Línea 2	L2-febrero 6-2017	ReMi, MASW Y Refracción	Inicio temporada lluvias
	L2-marzo 13 2017	ReMi, MASW Y Refracción	Lluviosa
	L2-abril 26 2017	ReMi, MASW Y Refracción	terminando temporada de lluvias
Línea 3	L2-febrero 6-2017	ReMi, MASW Y Refracción	Inicio temporada lluvias
	L2-marzo 13 2017	ReMi, MASW Y Refracción	Lluviosa
	L2-abril 26 2017	ReMi, MASW Y Refracción	terminando temporada de lluvias

*Tabla 10.1.4.1: Tipo de ensayo realizado en cada una de las líneas según la temporada. L1 (línea 1), L2 (línea 2) y L3 (línea 3).*

Las lecturas geofísicas fueron tomadas con un sismógrafo GEA-24 (PASI®), los datos ReMi y MASW fueron procesados en el Software WinMASW® (a partir de MatLab®), y los datos de sísmica de refracción se procesaron en los softwares PICKWIN® y PlotRefra®.

#### **10.1.4.1 ReMi**

El registro de ondas pasivas se realizó en intervalos de tiempo altos (60s a 120s), lo que permitió generar diferentes espectros de velocidad de fase de onda "Rayleigh" vs. Frecuencia para los diferentes tiempos de muestreo, por ello, se selecciona el espectro que mejor evidencie el modo o los modos de vibración, para así determinar la mejor aproximación a la curva de dispersión experimental (figura 10.1.4.1.1).



*Figura 10.1.4.1.1: Espectro de velocidad de fase de onda Rayleigh para la línea 1 evento 1 (febrero 6 del 2017). La curva de dispersión puede trazarse buscando los pares frecuencia vs velocidad de fase donde las amplitudes sean máximas (colores rojos oscuros).*

Posterior al cálculo del espectro de velocidades, se realizó la inversión de los datos de dispersión para determinar el perfil de  $V_s$ , mediante un proceso iterativo en el cual se consideran múltiples modelos y se escoge el que represente el mejor ajuste (figura 10.1.4.1.2).

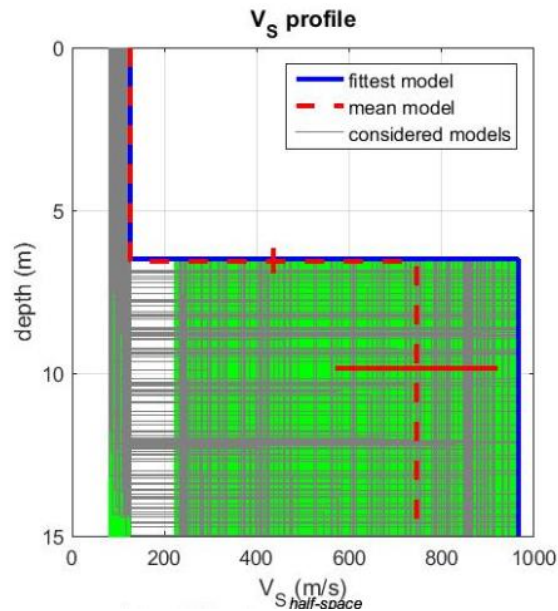


Figura 10.1.4.1.2: Perfil de velocidad de onda de corte para la línea 2 evento 1. La curva azul representa el modelo de distribución de  $V_s$  con la profundidad que mejor se ajusta a la curva de dispersión encontrada.

Fue posible identificar los parámetros del suelo a partir de gráficas de dispersión y teoría de inversión (Dal Moro, et al., 2006) para inferir la velocidad de onda de corte " $V_s$ ". y la onda de compresional " $V_p$ " se calcula de acuerdo a la relación de "Poisson". Sin embargo, hay que destacar que las anteriores son directamente proporcionales y con estas se calculan los demás parámetros geomecánicos, de acuerdo a las formulaciones de las normas ASTM: D 2845-95, (1997) y ASTM D5777, (2011). Posterior a la selección de la curva de dispersión experimental y con los parámetros de Dal Moro et al., (2006), se obtuvo el perfil de velocidad de propagación de la onda de corte (Figura 10.1.4.1.1). Posteriormente se procedió a calcular los parámetros elásticos de los materiales del perfil (Tabla 10.1.4.1.1 a 9.1.4.1.3). Sin embargo, hay que tener en cuenta que los valores de módulo de Young (E) y el módulo de rigidez (G) han sido estimados (a partir de " $V_s$ ") para rangos de deformación muy bajos (E-max y G-Max  $1 \times 10^{-4}$ ); por lo tanto, se debe tener sumo cuidado con el uso de estos, debido que los órdenes de magnitud son drásticamente diferentes.

Linea	Linea 1. evento 1		Linea 1. evento 2		Linea 1. evento 3	
	1	2	1	2	1	2
Capa	1	2	1	2	1	2
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,63	1,81	1,72	2,07	1,68	2,19
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1630	1810	1720	2070	1680	2190
Vs (m/s)	83	177	120	568	101	836
Vp (m/s)	173	361	251	1063	210	1740
E (Pa)	30329698,6	152170310	66965484,3	1736622107	46255912,3	4132384858
E (MPa)	30,3297	152,1703	66,655	1736,62	46,2559	4132,38
poisson ( $\mu$ )	0,35	0,35	0,35	0,3	0,35	0,35
Espesor (m)	3,3	11,7	6	9	5,1	9,9
Profundidad (m)	3,3	15	6	15	5,1	15
Modulo de rigidez G (MPa)	11	55	25	667	17	1530
Vs30 (m/s)	155		324		374	

Tabla 10.1.4.1.1: Resumen de los resultados inferidos a partir de los ensayos geofísicos ReMi de la línea 1.

Linea	Linea 2. Evento 1		Linea 2. Evento 2		Linea 2. Evento 3	
	1	2	1	2	1	2
Capa	1	2	1	2	1	2
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,73	2,2	1,74	2,24	1,77	2,25
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1730	2200	1740	2240	1770	2250
Vs (m/s)	126	965	131	1150	149	1200
Vp (m/s)	262	1805	273	2151	310	2245
E (Pa)	74133061,4	5326162359	80648090,8	7701541066	106081935	8424009000
E (MPa)	74,1331	5326,16	80,6481	7701,54	106,082	8424,01
poisson ( $\mu$ )	0,35	0,3	0,35	0,3	0,35	0,3
Espesor (m)	6,5	8,5	7,3	7,7	8,8	6,2
Profundidad (m)	6,5	15	7,3	15	8,8	15
Modulo de rigidez G (MPa)	27	2049	30	2963	39	3241
Vs30 (m/s)	395		396		391	

Tabla 10.1.4.1.2: Resumen de los resultados inferidos a partir de los ensayos geofísicos ReMi de la línea 2.

Linea	Linea 3. Evento 1		Linea 3. Evento 2		Linea 3. Evento 3	
	1	2	1	2	1	2
Capa	1	2	1	2	1	2
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,76	2,06	1,71	2,14	1,75	2,25
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1760	2060	1710	2140	1750	2250
Vs (m/s)	144	559	114	680	137	1202
Vp (m/s)	300	1046	237	1415	285	2249
E (Pa)	98560234,2	1673790709	59979831,7	2671456410	88666591	8452530580
E (MPa)	98,5602	1673,79	59,9798	2671,46	88,6666	8452,53
poisson ( $\mu$ )	0,35	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3
Espesor (m)	5,3	9,7	2,7	12,3	8,8	6,2
Profundidad (m)	5,3	15	2,7	15	8,8	15
Modulo de rigidez G (MPa)	37	645	22	989	33	3252
Vs30 (m/s)	370		472		367	

Tabla 10.1.4.1.3: Resumen de los resultados inferidos a partir de los ensayos geofísicos ReMi de la línea 3.



En la figura 10.1.4.1.3 se observan los perfiles obtenidos en comparación con los datos hidrológicos obtenidos de las estaciones 20 y 21 del SIATA (sistema de alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburrá). Estos datos representan parámetros de rigidez en función de la época climática que fluctúa de 50mm a 300mm (la escala de precipitación de estos datos se encuentra de forma mensual; esto con el fin de visualizar mejor en comparación con el tiempo), mostrando así que para la época que menos llovió los módulos geomecánicos presentaron sus valores más bajos y que estos aumentan a medida que la precipitación también lo hace. Sin embargo, se necesita una temporalidad más larga (quizás de años) para poder definir si en realidad este es un factor que hace aumentar los contrastes de rigidez.

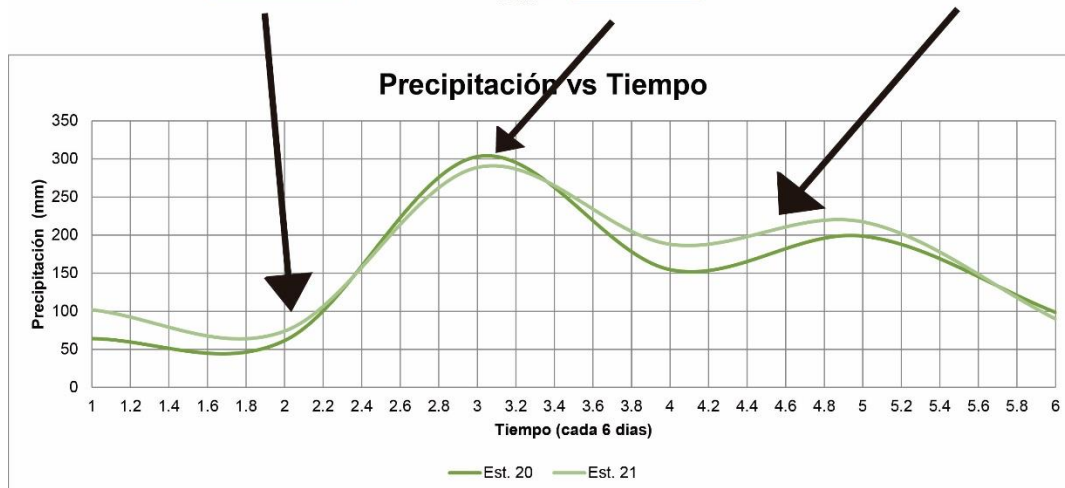
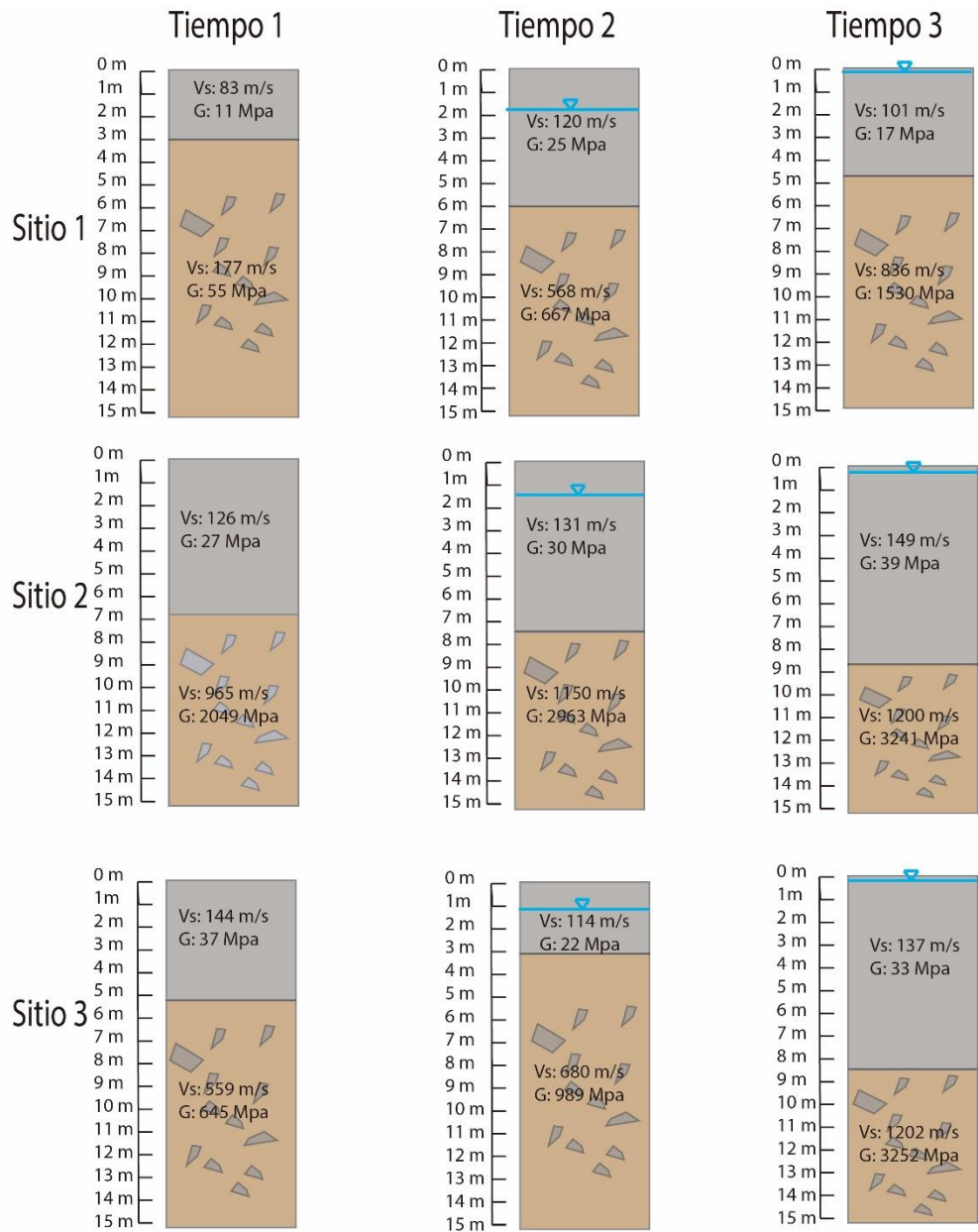


Figura.10.1.4.1.3: Perfiles de suelo calculados con el ensayo ReMi. Se muestra las 3 líneas con su respectiva “Vs” y su módulo de rigidez, según la época en que se tomaron. Los niveles freáticos (representada en las figuras por la línea azul) fueron tomados en los piezómetros artesanales. El gráfico de la base representa la serie de precipitación durante el tiempo de medición.

Los resultados del ensayo ReMi para las líneas 1, 2 y 3 que se encuentran en la parte más alta, en la media y en la baja de la ladera respectivamente, arrojaron a lo largo de los 6 meses un cambio notable en las propiedades geomecánicas, además de un contraste identificable de propiedades entre la capa 1 y la capa 2. Por otra parte, la capa 1 por lo general parece no cambiar su velocidad ni su módulo de cizalladura a lo largo del tiempo, en contraste con la capa 2, donde sí se observa un aumento en la rigidez.

### 10.1.4.2 MASW

Se determinaron los parámetros del suelo en función de la velocidad compresional ( $V_p$ ) y velocidad de onda de corte ( $V_s$ ), y se caracterizó el perfil del suelo por capas a través de gráficas de dispersión. Posterior a la selección de la curva de dispersión experimental (figura 10.1.4.2.1 A) y con los parámetros propuestos por Dal Moro et al., (2006) se obtuvo el perfil de velocidad de propagación (figura 10.1.4.2.1 B).

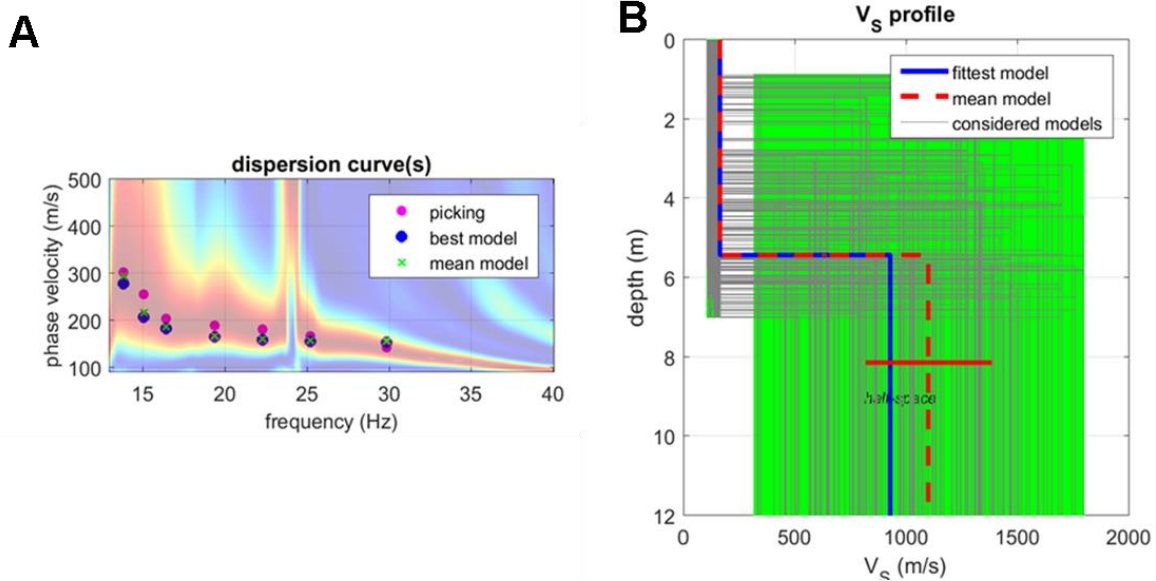


Figura 10.1.4.2.1: A) Espectro de velocidad de fase de onda “Rayleigh” donde se seleccionó la curva de dispersión experimental. B) perfil experimental de velocidad

de propagación de la onda de corte “Vs” en función de la profundidad. Para la línea 1 evento 2.

Una vez estimados el perfil de velocidad de onda de corte en profundidad, al igual que los valores de densidad y módulo de Poisson, se procedió a calcular los parámetros elásticos de los materiales del perfil (Tabla 10.1.4.2.1 a 10.1.4.2.3). Estos cálculos se efectuaron con las especificaciones de ASTM: D 2845-95 (1997) y ASTM D5777, (2011). Sin embargo, es preciso tener en cuenta que los valores de Young (E) y el módulo de rigidez (G) han sido obtenidos para rangos muy bajos; por lo tanto, se debe tener sumo cuidado con el uso de estos.

Linea	Linea 1. evento 1		Linea 1. evento 2		Linea 1. evento 3	
Capa	1	2	1	2	1	2
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,76	2,06	1,79	2,21	1,68	2,38
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1760	2060	1790	2210	1680	2380
Vs (m/s)	140	546	163	929	154	1139
Vp (m/s)	291	1022	339	1933	320	2131
E (Pa)	93099075,4	1597064092	128373850	5149097492	113919651	7555790112
E (MPa)	93,0991	1597,06	128,374	5149,1	113,92	7555,79
poisson ( $\mu$ )	0,35	0,3	0,35	0,35	0,35	0,3
Espesor (m)	9,1	5,9	5,4	9,6	8,5	6,5
Profundidad (m)	9,1	15	5,4	15	8,5	15
Modulo de rigidez G (MPa)	34	614	58	1911	42	2903
Vs30 (m/s)	291		502		406	

Tabla 10.1.4.2.1: Resumen de los resultados geofísicos MASW de la línea 1.

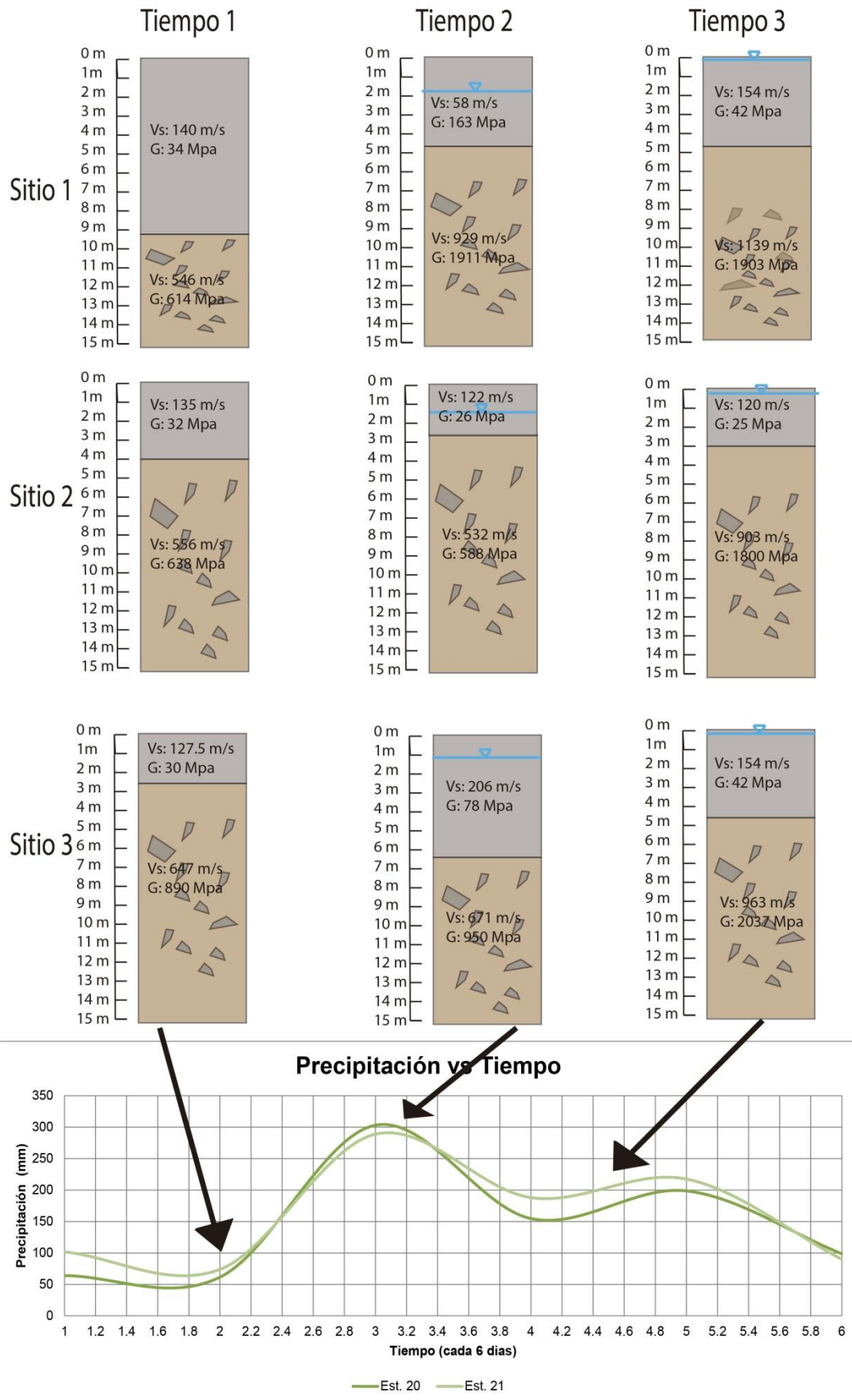
Linea	Linea 2. Evento 1		Linea 2. Evento 2		Linea 2. Evento 3	
Capa	1	2	1	2	1	2
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,75	2,06	1,72	2,08	1,72	2,21
Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1750	2060	1720	2080	1720	2210
Vs (m/s)	135	556	122	532	120	903
Vp (m/s)	282	1040	253	1108	251	1879
E (Pa)	86198818,1	1655608426	69044950,6	1589692118	66965484,3	4864988407
E (Mpa)	86,1988	1655,61	69,045	1589,69	66,9655	4864,99
poisson ( $\mu$ )	0,35	0,3	0,35	0,35	0,35	0,35
Espesor (m)	4	11	2,8	12,2	3	12
Profundidad (m)	4	15	2,8	15	3	15
Modulo de rigidez G (MPa)	32	638	26	588	25	1800
Vs30 (m/s)	393		405		543	

Tabla 10.1.4.2.2: Resumen de los resultados geofísicos MASW de la línea 2.

Capa	Linea 3. Evento 1		Linea 3. Evento 2		Linea 3. Evento 3	
Capa	1	2	1	2	1	2
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,72	2,13	1,85	2,11	1,78	2,2
Densidad $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	1720	2130	1850	2110	1780	2200
Vs (m/s)	127,5	647	206	671	154	963
Vp (m/s)	265	1348	671	1255	320	1802
E (Pa)	75460025,3	2408019355	227350440	1113600075	113919651	5305047577
E (MPa)	75,46	2408,02	227,35	1113,6	113,92	5305,5
poisson ( $\mu$ )	0,35	0,35	0,35	0,3	0,35	0,3
Espesor (m)	2,6	12,4	6,7	8,3	4,4	10,6
Profundidad (m)	2,6	15	6,7	15	4,4	15
Modulo de rigidez G (MPa)	30	890	78	950	42	2037
Vs30 (m/s)	472		447		542	

*Tabla 10.1.4.2.3: Resumen de los resultados geofísicos MASW de la línea 3.*

Como bien ya se mencionó en los perfiles obtenidos para los ensayos ReMi. En la figura 10.1.4.2.2 se muestra los resultados obtenidos para el ensayo MASW con sus respectivos datos hidrológicos. Los cuales fluctúan de 50mm a 300mm (la escala de precipitación de estos datos se encuentran de forma mensual, esto con el fin de visualizar mejor en comparación con el tiempo), mostrando que para la época que menos llovió las propiedades geomecánicas fueron más bajas (menos rigidez) y que estas aumentaron cuando hubo más lluvia. No obstante, se necesita una temporalidad más larga (quizás de años) para poder definir si en verdad este es un factor que hace aumentar los contrastes de rigidez.



*Figura 10.1.4.2.2: Perfiles de suelo calculados con el ensayo MASW. Se observa las 3 líneas con valores de onda de corte y módulo de cizalladura, conforme la época en que se obtuvieron. Los niveles freáticos (representada en los perfiles por la línea azul) fueron tomados en los piezómetros artesanales. El gráfico de la base representa la serie de precipitación durante el tiempo de medición.*

Los resultados del ensayo MASW para las líneas 1, 2 y 3, que se encuentran en la parte más alta, la media y la baja de la ladera respectivamente, arrojaron a lo largo de los 6 meses un cambio notable en las propiedades geomecánicas que aumentó en función del tiempo y la precipitación, además de un notable contraste de propiedades entre la capa 1 y la capa 2. Por otra parte, la capa 1 por lo general parece no cambiar en contraste con la capa 2, que sí aumenta (la variación se encuentra entre el margen de error del ensayo; puesto que no es una medida directa, este implica cierta incertidumbre).

#### **10.1.4.3 Sísmica de refracción**

Los sondeos de sísmica de refracción realizados en la zona se repitieron cada dos meses para efectos de obtener datos representativos de los suelos desde una época relativamente seca hasta una lluviosa y para comparar sus propiedades y geometría según las fluctuaciones climáticas en función del tiempo y la precipitación.

Fue posible identificar 2 capas y velocidades de ondas  $V_p$  y caracterizar la sección del suelo a través de la interpretación de gráficas de tipo tiempo vs distancia con dromocrona.

Las velocidades de onda compresional obtenidas para este ensayo, refleja que esta tiene una relación directamente proporcional con el módulo de rigidez, donde se observa un claro contraste entre las capas 1 y 2, que aumenta en función del tiempo. Además, en la capa 2 se detectó un aumento de velocidad debido al papel que juega el agua en el medio. Sin embargo, no se detectaron velocidades entre 1400 m/s y 1800 m/s, que indicarían presencia de saturación masiva producto de un nivel freático superficial. Esto supone una limitación del método usado, como señala Redpath (1973). Los resultados arrojaron velocidades para un suelo superficial que se encuentra encima de uno mal seleccionado, indicando así un nivel freático colgado y una corriente que se detiene o llega muy tarde a la capa 2 debido a su mala selección.

En la tabla 10.1.4.3.1 se observan las velocidades y espesores obtenidos y se evidencia que las primeras aumentan a medida que aumenta la profundidad. Sin

embargo, los espesores detectados permanecen relativamente constantes ya que por la simetría del arreglo no es posible obtener más profundidad.

Refracción				
Línea	Vp Capa 1 (m/s)	Vp Capa 2 (m/s)	Espesor capa 1 (m)	Espesor capa 2 (m)
Línea 1. Evento 1	296	559	2,3	3,7
Línea 2. Evento 1	292	568	2,4	3,6
Línea 3. Evento 1	132	800	2	4
Línea 1. Evento 2	304	721	3,5	2,5
Línea 2. Evento 2	399	674	1,8	4,2
Línea 3. Evento 2	146	846	2	4
Línea 1. Evento 3	180	836	2,5	3,5
Línea 2. Evento 3	303	714	2,3	3,7
Línea 3. Evento 3	108	940	2,1	3,9

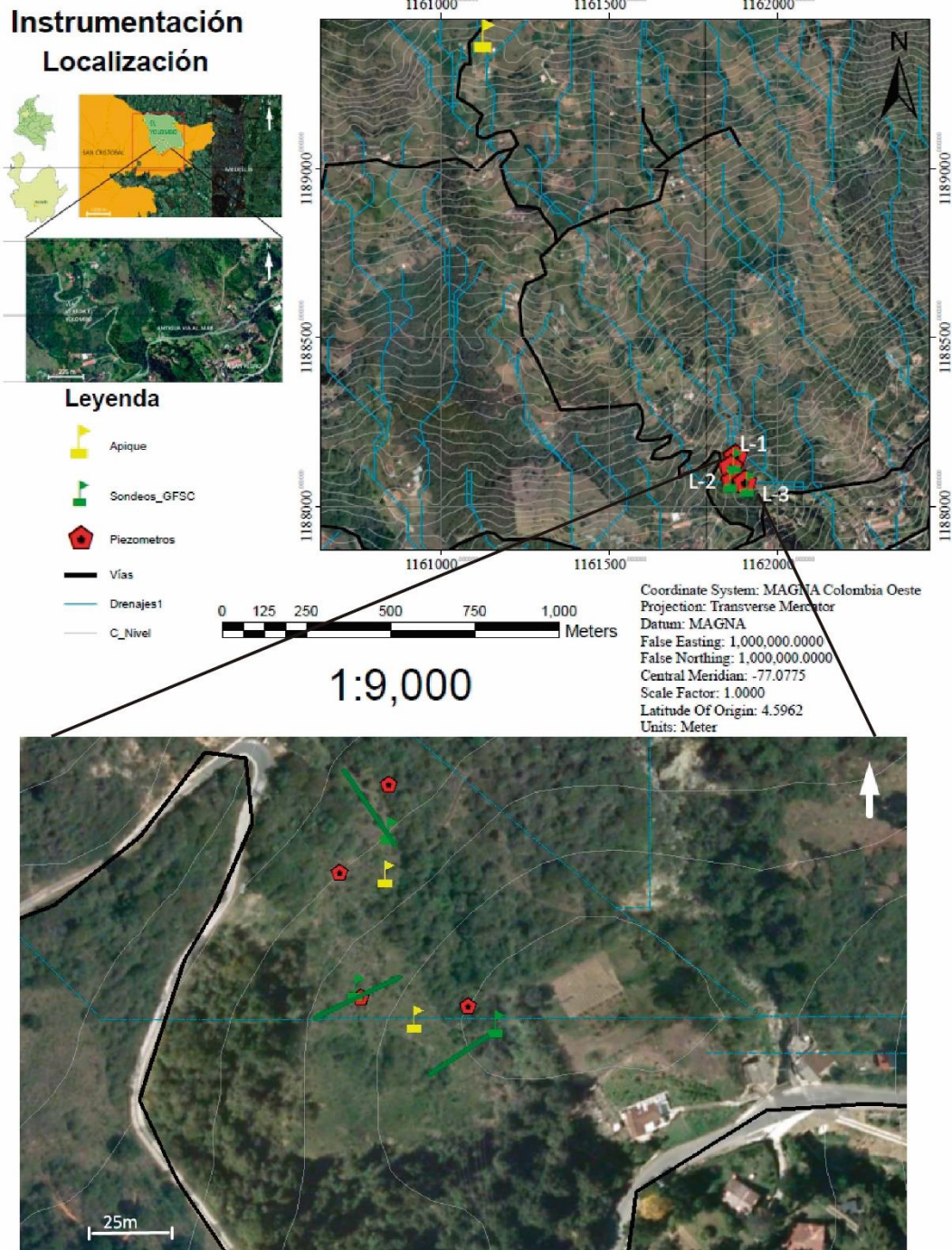
*Tabla 10.1.4.3.1: Resumen de las velocidades Vp y espesores obtenidos con la sísmica de refracción.*

## 10.2 Resultados de los ensayos de laboratorio

Se realizaron 4 compresiones simples a 4 muestras tomadas de forma manual con tubo Shelby, con el fin de conocer el módulo de rigidez de forma directa y así correlacionarlo con la exploración geofísica.

En la figura 10.2.1 se observa la ubicación del apique exploratorio de donde se tomaron muestras (1.1 y 1.2) y también la localización de las líneas geofísicas y piezómetros que se encuentran en cercanías de donde se sacaron las muestras 2.1 y 2.2.





*Figura 10.2.1: Localización de los sitios de donde se tomaron las muestras ensayadas. L-1 (línea 1), L-2 (línea-2) y L-3 (línea 3). Orto-foto tomada de: Catastro Departamental - Gobernación de Antioquia, (2011).*

Las muestras 1.1 y 1.2 fueron tomadas en un apique exploratorio de 5,30m de profundidad localizado al norte de la zona de estudio (X: 1162198, Y: 1189630)

con el fin de abarcar la mayor área posible de la ladera. Dichas muestras, fueron colectadas a 1,80m y 4,60m de profundidad respectivamente, donde las mismas eran más representativas por sus características morfológicas y físicas. Además, en este apique, se determinó de forma directa la existencia de un suelo residual a partir de un depósito de vertiente y un flujo de lodos y escombros en intercalación con este depósito.

Las muestras 2.1 y 2.2 fueron tomadas en dos apiques que funcionan con instrumentos de recolección de agua, que se ubican a 20m ladera abajo de la línea 1 (allí se colectó la muestra 2.1 a 1,20m de profundidad) y a 36.5m ladera abajo de la línea 2 (donde se tomó la muestra 2.2 a 0,80m de profundidad). Lo anterior se hizo con el fin de determinar el módulo de rigidez en la capa más superficial, donde se sospechó que la situación era más crítica por la presencia de reptación de forma masiva.

En la figura 10.2.1 se observa el esfuerzo vs deformación de la muestra 1.1 y se detecta un pico máximo a  $0,29 \text{ kg/cm}^2$  cuando se tiene una carga de 8,2kg (punto donde empieza a fallar la muestra). La muestra presentó una humedad promedio de 129.6% y grietas verticales.

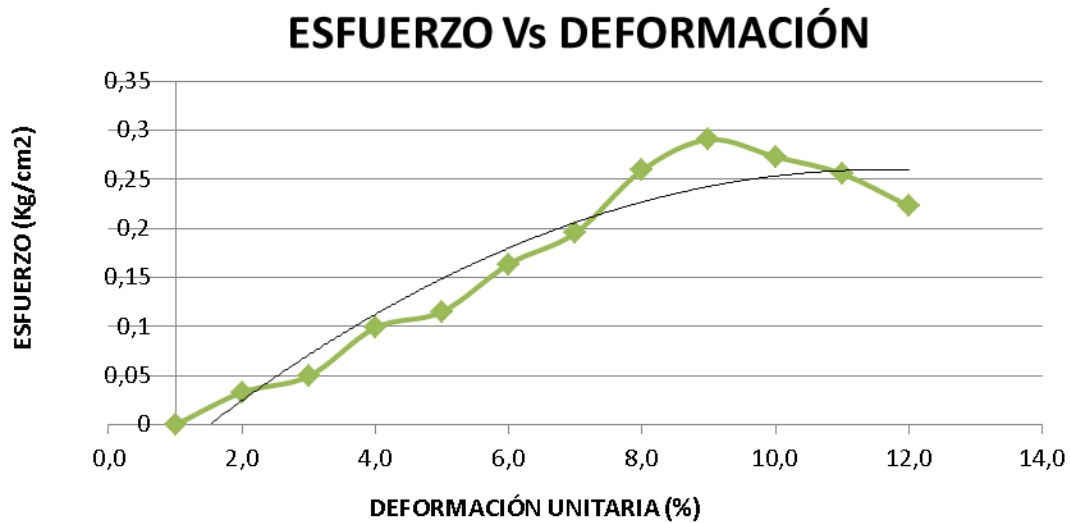


Figura 10.2.1: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 1.1.

En la figura 10.2.2 se observa el esfuerzo vs deformación de la muestra 1.2 y se detecta un pico máximo a  $0,34 \text{ kg/cm}^2$  cuando se tiene una carga de 10kg (punto donde empieza a fallar la muestra). La muestra presentó una humedad promedio de 48.7% y grietas verticales.

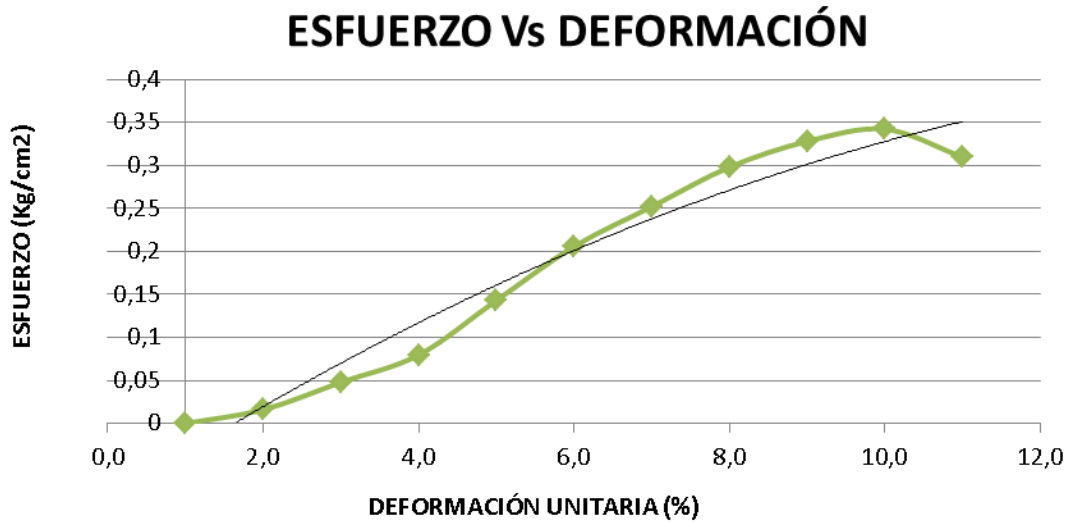


Figura 9.2.2: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 1.2.

En la figura 10.2.3 se observa el esfuerzo vs deformación de la muestra 2.1 y se detecta un pico máximo a 0,38 Kg/cm<sup>2</sup> cuando se tiene una carga de 11.2 kg (punto donde empieza a fallar la muestra). La muestra presentó una humedad promedio de 31.1% y tipo de falla de grietas verticales.

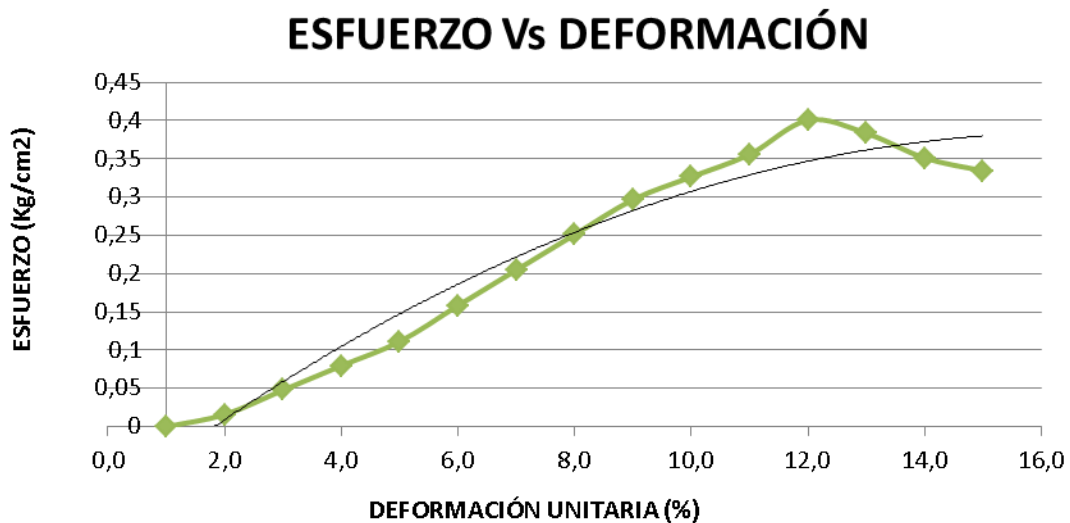


Figura 10.2.3: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 2.1.

A continuación se muestran (figura 10.2.4) los valores obtenidos después de realizar el ensayo de compresión simple para la muestra 2.2, la cual presentó un

esfuerzo máximo a  $0,29 \text{ Kg/cm}^2$  cuando se tiene una carga de  $8,6 \text{ kg}$  (punto donde empieza a fallar la muestra) y a una deformación en la muestra del  $10\%$ . La misma, presentó una humedad promedio de  $26,1\%$  y el tipo de falla observada fue grietas verticales.

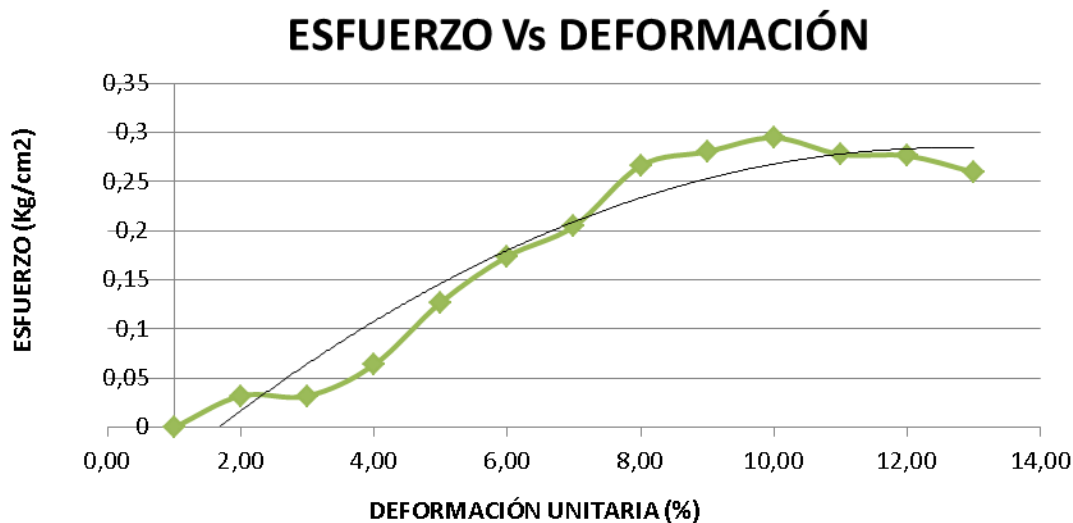


Figura 10.2.4: Gráfica esfuerzo vs deformación de la muestra 2.2.

En la tabla 10.2.1 se observa el resumen de los parámetros calculados a través de los ensayos de compresión simple en suelos, en los cuales se detecta una constancia en módulos de rigidez en las muestras que fueron tomadas a profundidades menores de  $3\text{m}$ , variando de  $36,56 \text{ MPa}$  a  $39,44 \text{ MPa}$  y aumentando  $713,5326 \text{ MPa}$  en la muestra de  $4,60\text{m}$ . Esto confirmaría un contraste de rigidez importante de las capas superficiales con la más profunda, que incrementa gradualmente a medida que se pierde el suelo residual y empieza el depósito en una etapa un poco más consolidada y con selección moderada a muy mala. Análogamente, las magnitudes obtenidas en los ensayos geofísicos para el módulo de cizalladura oscilan en promedio para la capa 1 entre  $25\text{MPa}$  y  $42\text{MPa}$  y un promedio para la capa 2 de  $1606,2 \text{ MPa}$ . Por lo tanto, las magnitudes obtenidas en los ensayos directos tienen similitud con los indirectos.

<b>Resumen de los datos geomecánicos obtenidos</b>			
<b>Muestra 1.1</b>		<b>Muestra 2.1</b>	
Esfuerzo maximo (kg/cm2)	0.29	Esfuerzo maximo (kg/cm2)	0.38
50% resistencia pico	0.145	50% resistencia pico	0.19
Deformacion axial	0.00139	Deformacion axial	0.00177
E (Mpa)	104.3165468	E (Mpa)	107.3446328
G (Mpa)	38.19160385	G (Mpa)	39.44443321
<b>Muestra 1.2</b>		<b>Muestra 2.2</b>	
Esfuerzo maximo (kg/cm2)	0.34	Esfuerzo maximo (kg/cm2)	0.29
50% resistencia pico	0.17	50% resistencia pico	0.145
Deformacion axial	0.000088	Deformacion axial	0.001457
E (Mpa)	1931.818182	E (Mpa)	99.51956074
G (Mpa)	713.5326076	G (Mpa)	36.56925139

*Tabla 10.2.1: Resumen de los ensayos de laboratorio.*

## **11. DISCUSIÓN**

Los materiales de la capa 1 se clasificaron como arcillosos, de color pardo, muy húmedos, plásticos y con propiedades geomecánicas deficientes en comparación con la capa 2. Esta última capa es un material de depósito de vertiente (secuencia de flujos de lodos y escombros) clasto soportado y con cantos de diámetro en su eje más largo desde 0,5 cm hasta 68 cm de la anfibolita de Medellín. Los fragmentos son angulosos y están embebidos en una matriz limosa color pardo a gris verdoso. Con lo anterior se interpreta que hay un desarrollo de suelo (capa 1) en el depósito (capa 2), que genera un efecto patín en una superficie de falla identificable, donde el contraste aumenta cuando la capa 1 se satura de agua; el límite aproximado entre capas está entre 0,8m y 4,6m (perfiles directos (figura 11.1)), y su profundidad depende de la pendiente. Esto a su vez puede estar ligado a hundimiento de banca, reptación y movimientos rotacionales a lo largo de la ladera.

En la figura 11.1 se observa la correlación entre los perfiles de suelo de la zona con lo obtenido en la exploración geofísica, donde el contacto entre la capa 1 y 2 es de tipo gradacional, siendo la primera un suelo residual a partir de un depósito de vertiente y, la segunda, una secuencia de capas de flujos de lodos y escombros. Con lo anterior y los datos geofísicos se define un perfil con una capa 1 de 35MPa y un contacto a 4m entre la capa 2 y 1 de 713,5MPa (dato de laboratorio) y a partir de este punto un aumento de “G” en función de la

profundidad. Sin embargo, la geofísica no permite en este caso determinar si la capa 1 está en “situ” o si es un material transportado, pero los procesos morfodinámicos presentes en la zona dan la impresión de que están siendo trasportados a una tasa muy lenta.

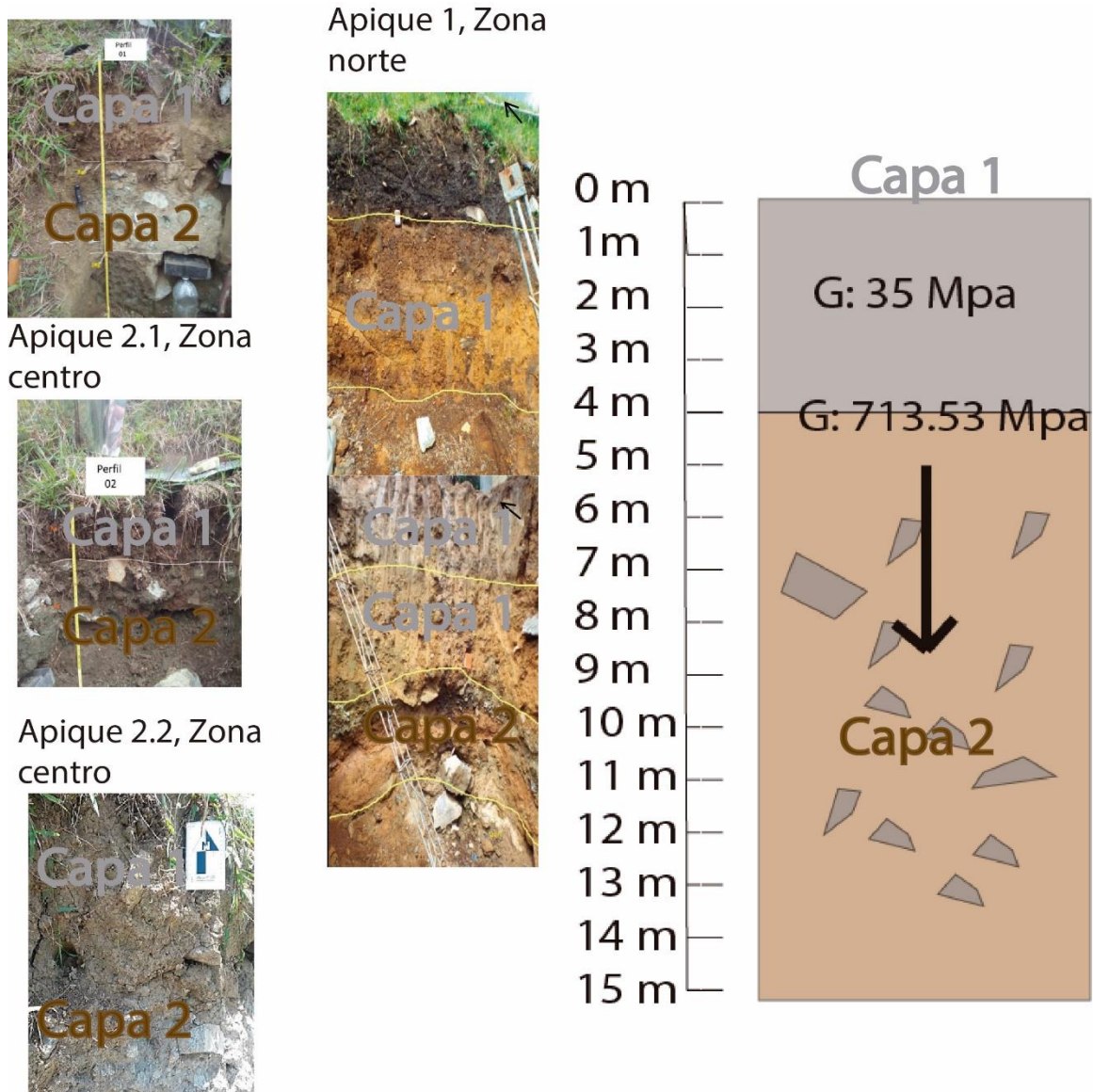


Figura 11.1: Correlación de perfiles directos con el geofísico.

La relación de las propiedades geomecánicas de cada ensayo obtenidas refleja en comparación con los datos obtenidos directamente en el laboratorio, que las diferencias de los valores obtenidos con los diferentes tipos de ensayos se deben a que utilizan principios y metodologías distintas: el ReMi es un método pasivo de análisis de ondas superficiales, el MASW es un método activo para análisis de ondas tipo “Rayleigh” y el ensayo de sismica de refracción analiza ondas de

cuerpo de tipo compresional. En contraste, los ensayos directos (en teoría más confiable) están de acuerdo con lo obtenido en la geofísica.

El posible aumento de los contrastes de rigidez se debe que cuando se hicieron las lecturas posteriores la capa dos tenía menos agua en comparación con la capa uno que se encontraba parcialmente saturada a saturada. Aparte de eso, la capa 1 fue la que permaneció con propiedades relativamente constantes. Con lo anterior se plantean en consideración del alcance de este trabajo las siguientes posibilidades: 1) La capa 2 no deja fluir el agua o por lo menos lo hace muy lentamente, porque el agua no llega a dicha capa en la ventana de tiempo que se hacen las lecturas (lentes y pequeñas capas de arcillas evidenciadas en el depósito por medio de la descripción de los apiques). 2) El agua llega a la capa 2, pero esta lo hace muy lentamente, puesto que en una ventana de 6 meses no fue claramente identificable su flujo. 3) Un nivel freático más profundo que lo indicado por los piezómetros artesanales, el cual debe recargarse muy lentamente (indicando niveles freáticos colgados). Lo anterior puede mirarse a la luz del aumento en el módulo de cizalladura y la velocidad de onda cortante cuando el material está menos saturado, porque la onda cortante es incapaz de propagarse en fluidos y a su vez la succión del agua disminuye los espacios vacíos y a su vez aumenta la resistencia del material (Lima, et al., 2008), (Dong & Ning, 2016).

## **12. CONCLUSIONES**

De acuerdo con lo estipulado en el capítulo A.2.4.4. de la NSR-10, adoptando el criterio de la media de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros  $V_{s30}$ , al perfil de la zona de estudio le corresponde una velocidad de onda de corte promedio en  $V_{s30}$ . El perfil de la zona de estudio corresponde a uno de suelo tipo C para las líneas 2 y 3 y de tipo D para la línea 1, que hace parte del segmento más alto de la ladera. Esta constituye un depósito muy heterogéneo suprayacido por un suelo residual a partir del mismo, con una velocidad de onda promedio del perfil de  $V_{s30}$  para la línea 1 en todos los tiempos climáticos de 342 m/s, 420.5 m/s para la línea 2 y 445 m/s para la línea 3 en promedio para todos los tiempos.

Se determinó que el aumento de las velocidades y módulos de rigidez a lo largo del tiempo en la capa 2 se debe a un nivel freático colgado, infiriendo que el agua no llega hasta la capa más profunda por las características físicas del depósito y, además por la relación cantos-matriz del mismo, el agua no alcanza a fluir o lo hace muy lentamente por esta capa.

Los datos de laboratorio indicaron, en comparación con los resultados geofísicos, que la capa uno para el módulo de cizalladura se encuentra en un rango de 30

MPa a 42 MPa y un punto de 713.56 MPa. A partir de este último punto, a medida que empieza la secuencia de depósitos, el módulo crece considerablemente.

Los procesos morfodinámicos aumentaron y se reactivaron en época de lluvia. También se determinaron coronas no mayores a 5m, indicando que la capa superficial es la más crítica en cuestión de inestabilidad. Este dictamen es soportado por los parámetros calculados en el laboratorio y en los ensayos geofísicos. Siendo los procesos morfodinámicos más críticos en las zonas de alta pendiente, en sectores con cambios bruscos de pendiente, en cercanías de las quebradas y en sectores donde la ganadería y la agricultura son más intensas.

Los cálculos de módulo de Young (E) y el módulo de rigidez (G) han sido estimados (a partir de "Vs") para rangos de deformación muy bajos (E-max y G-Max  $1 \times 10^{-4}$ ); por lo tanto, se debe tener sumo cuidado con el uso de estos, debido que los órdenes de magnitud son drásticamente diferentes.

### **13. RECOMENDACIONES**

Se recomienda un estudio de redes de flujo en la ladera para determinar cómo corre el agua por este medio, cómo son los volúmenes de infiltración, a cuánto equivale la pérdida de agua en época seca, la cantidad de agua que puede drenarse para una obra de ingeniería, el flujo probable de agua cuando la ladera es intervenida y la fluctuación del nivel freático y cómo son sus niveles colgados.

En el caso de obras de ingeniería se recomienda monitoreo por inclinometría para conocer cuánto es la tasa de movimiento en ese sector en particular y, también, monitoreo de niveles freáticos por piezómetros de hilo vibrátil, para saber los niveles y presiones del agua. Por último, se propone el diseño de obras de ingeniería (flexible) para mitigar o estabilizar los procesos morfodinámicos a partir de un estudio geotécnico de detalle.

### **14. AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo hace parte de los proyectos estipulados por la Universidad EAFIT como requisito de grado para optar por el título de geólogo. Recibí el apoyo y la dirección de Gaspar Monsalve Mejía, profesor de la facultad de minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, y Jorge Alexander Hurtado Salgado, director del departamento de geotecnia de AIM SAS; además del apoyo en la parte de instrumentación del profesor Juan Carlos Loaiza Úsuga, de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Por otra parte, recibí el apoyo de AIM SAS y la Universidad EAFIT en la parte de laboratorio, préstamo de equipos y uso de software, además del respaldo de los estudiantes del curso de geofísica del semestre 2017-1 de la Universidad Nacional de Colombia sede



Medellín, a los cuales guardo un profundo agradecimiento por sus asesorías, manejo de instrumentación sísmica, manejo de software, datos, capacitaciones y acompañamiento en la elaboración de este trabajo. Agradezco también a Andrés Giraldo Sánchez, profesor de humanidades de la Universidad EAFIT, que me ayudo con la revisión de estilo. Por último, agradezco en especial el apoyo incondicional de mis padres y hermanos.

## 15. REFERENCIAS

AIM LTDA, 2007. *Estudio Geológico-Geomorfológico Carretera Pajarito-San Pedro de los Milagros*, Medellín: Geo Ingeniería LTDA, AIM LTDA.

AIM LTDA, 2008. *Análisis de Estabilidad Pajarito*, Medellín: J.P.S, AIM LTDA.

AIM LTDA, 2013. *Inclinometría UH Pajarito, La Aurora*, Medellín: AIM LTDA, Consorcio VAC, Arquitectura y Concreto.

Alcaldía de Medellín, 2011. *Descripción de Zonas Homogéneas Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín*, Medellín: Departamento Administrativo de Planeación.

Arce Monsalve, L. & Vahos Agudelo, L. S., 2016. *Cartografía, Geofísica y Monitoreo Hidrológico de Movimientos en Masa, Ubicados en la Vereda El Yolombo, Corregimiento de San Cristobal*, Medellín: Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Aristizábal, E. y otros, 2011. Análisis de Umbrales Empíricos de Lluvia Para el Pronóstico de Movimientos en Masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *EIA*, Issue 15, pp. 95-111.

Aristizábal, E., Roser, B. & Yokota, S., 2005. Tropical Chemical Weathering of Hillslope Deposits and Bedrock Source in the Aburrá Valley, Northern Colombia Andes. *Engineering Geology*, Issue 81, pp. 389-406.

Aristizábal, E. & Yokota, S., 2008. Evolución Geomorfológica del Valle de Aburrá y sus Implicaciones en la Ocurrencia de Movimientos en Masa. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, ISSN 0120(24), pp. 5-18.

ASTM D5777, 2011. Standard Guide For Using The Seismic Refraction Method For Subsurface Investigation. *Copyright © ASTM International*, III(1), pp. 1-14.

ASTM: D 2845-95, 1997. Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rocks. *Copyright © ASTM International*, XIV(02), pp. 257-262.

Botero Arango, G., 1963. *Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia*, Medellín: Talleres de la tip Gares.

Catastro Departamental - Gobernación De Antioquia, 2011. *Catastro Departamental*. [En línea] Available at: <http://www.antioquia.gov.co/index.php/component/search/?searchword=ortofotos&searchphrase=all&Itemid=9999> [Último acceso: 27 Julio 2015].

Comisión Asesora Permanente Para el Régimen de Construcción Sismo Resistente , 2010. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, Bogotá D.C, Colombia: AIS (Agencia Nacional De Infraestructura).

Dal Moro, G., 2015. *Surface Wave Analysis for Near Surface Applications*. Seventh ed. Udine, Italy: EL SEVIER.

Dal Moro, G., 2015. *winMASW User Manual*. Seventh ed. Udine, Italy: ELIOSOFT.

Dal Moro, G., Pipan, M. & Gabrielli, P., 2006. Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion Via Genetic Algorithms And Marginal Posterior Probability Density Estimation. *Journal of Applied Geophysics*, 39(55), pp. 39-55.

Dávila Burga, J., 2011. *Diccionario geológico*. Callaó, Peru: INGGEMET.

Dong, Y. & Ning, L., 2016. Dependencies of Shear Wave Velocity and Shear Modulus of Soil on Saturation. *J. Eng. Mech*, Volumen ASCE, ISSN 0733-9399, pp. 1-8.

Echeverry, O. & Valencia, Y., 2004. Análisis de los Deslizamientos en la Cuenca de la Quebrada la Iguaná de la Ciudad Medellín a Partir de la Integración Lluvia-Pendiente-Formación Geológica. *DYNA*, 71(142), pp. 33-45.

Estrada, L. A., 2008. *Apuntes de prospección sísmica*, Tucuman: Universal Nacional de Tucuman-Facultad de Ciencias Naturales.

González I, H., 2001. *Memoria Explicativa Del Mapa Geológico De Antioquia, Escala 1:400 000*, Medellín: s.n.

Google EARTH, 2017. *Google Earth*. [En línea] [Último acceso: 7 Febrero 2017].

Instituto Tecnológico Metropolitano, 2006. *Legalización urbanística asentamientos consolidados en el poligono Z2\_de\_4*, Medellín: Alcaldía de Medellín.

Knott, C., 1989. Reflexión y Refracción de Ondas Elásticas con Aplicaciones Sismológicas. *Philosophical Magazine*, Issue 48, pp. 64-97.

Lima, A., Romero, E., Pineda, J. A. & Gens, A., 2008. *Low-strain shear modulus dependence on water content of a natural stiff clay*, Barcelona: Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya.

Lowrie, W., 2007. *Fundamentals of Geophysics*. Second ed. Edinburg: Cambridge University.

Mejía, M., 1984. *Geología y Geoquímica de las planchas 146-Medellín occidental y 130 Santa Fe de Antioquia-escala 1:100 000-memoria explicativa*, Medellín: INGEOMINAS.

Milsom, J., 2003. *Field Geophysics (the geological field guide series)*. Third ed. London: WILEY.

Pereira, E., Ortiz, F. & Richard, H., 2006. Contribución al conocimiento de las anfibolitas y dunitas de Medellín (Complejo ofiolítico de aburra). *DYNA*, 73(149), pp. 17-30.

Redpath, B. B., 1973. *Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigation*, Livermore, California: NTIS.

Rendón G, D. A., Toro V, G. E. & Hermelin A, M., 2006. Modelo Cronoestratigráfico para el Emplazamiento de los Depósitos de Vertiente en el Valle de Aburrá. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, ISSN 0120(18), pp. 103-118.

Restrepo A, J. J., 2008. Obducción y metamorfismo de ofiolitas triásicas en el flanco occidental del terreno Tahamí, Cordillera Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, Issue 22, pp. 49-100.

Restrepo, J. J., Ordóñez Carmona, O., Martens, U. & Correa, A. M., 2009. Terrenos, complejos Y provincias en la cordillera central de Colombia. 9(2), pp. PP: 1-8.

Restrepo, J. J. & Toussaint, J. F., 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. Episodes. *IGCP*, 3(11), pp. 189-219.

Tarback, E., Lutgens, F. & Tasa, D., 2008. *International Stratigraphic Chart*, Paris: The International Commission on Stratigraphic.

USGS (United States Geological Service) And NASA (National Aeronautics And Space Administration), 2016. *AsterGdem-EARTH DATA*. [En línea] Available at: <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> [Último acceso: 1 September 2016].

## 16. ANEXOS

### 16.1 Ecuaciones

Las siguientes ecuaciones fueron tomadas de ASTM D5777, (2011), ASTM: D 2845-95, (1997) y La NSR 10, título A, capítulo A.2 (Comisión Asesora Permanente Para el Régimen de Construcción Sismo Resistente, 2010).

#### Elasticidad de Young

$$E = \frac{(\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2))}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

*Ecuación 16.3.1: Elasticidad de Young (E).*

E= Modulo de elasticidad de Young (Pa).

P=Densidad (Kg/m<sup>3</sup>).

V<sub>s</sub>= Velocidad de onda cortante.

V<sub>p</sub>= Velocidad de onda compresional.

#### Poisson

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

*Ecuación 16.3.2: Poisson (μ).*

μ= Poisson.

V<sub>s</sub>= Velocidad de onda cortante.

V<sub>p</sub>= Velocidad de onda compresional.

#### Velocidad de onda compresional

$$Vp = \sqrt{\frac{\left(K + \frac{4}{3}\mu\right)}{\rho}}$$

*Ecuación 16.3.3: Velocidad de onda compresional (Vp).*

Vp= Velocidad de onda compresional.

K= Modulo de Bulk.

P= Densidad.

μ= Poisson.

### **Módulo de Bulk**

$$K = \frac{\rho(3Vp^3 - 4Vs^2)}{3}$$

*Ecuación 16.3.4: Modulo de Bulk (K).*

K= Modulo de Bulk.

P= Densidad.

Vp= Velocidad de onda compresional.

### **Densidad**

$$\rho = \frac{1}{Vs^2(k - 2)}$$

*Ecuación 16.3.5: Densidad (ρ).*

P= Densidad (Kg/m<sup>3</sup>).

Vs=Velocidad de onda de corte

K= Vp (velocidad de onda compresional)/Vs (velocidad de onda de corte)

### **Velocidad de onda cortante**

$$Vs = \frac{\sum_{i=1}^n di}{\sum_{i=1}^n \frac{di}{Vsi}}$$

*Ecuación 16.3.6: Velocidad de onda de corte (Vs).*

Vs= Velocidad media de onda cortante.

di= espesor de la capa.

**Profundidad de refracción.**

$$Z = \frac{t_i}{2} \frac{V_2 \cdot V_1}{\sqrt{(V_2^2) - (V_1^2)}}$$

*Ecuación 16.3.7: Profundidad de refracción (Z).*

Z= Profundidad de refracción.

ti= Tiempo de intercepción.

V2: Velocidad sísmica en la capa 2.

V1: Velocidad sísmica en la capa 1.

**Módulo de rigidez o cortante.**

$$G = \rho V_s^2$$

*Ecuación 16.3.8: Modulo de rigidez (G).*

G= Modulo de rigidez.

Vs= Velocidad de onda cortante.

p=Densidad.