

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS**

### **UNIDAD DE TITULACIÓN**

#### **ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN UN TRAMO DE LAS AVENIDAS SIMÓN BOLÍVAR Y GONZALO PÉREZ BUSTAMANTE, DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERAS EN GEOLOGÍA**

**EVELYN CAROLINA MONTATIXE CHICAIZA**

eve5carolina@gmail.com

**DAYSI FERNANDA CHANGO ALVAREZ**

daysi\_fer@outlook.es

**Directora: Dra. Isabel Carolina Bernal Carrera**

isabel.bernal@epn.edu.ec

**Quito, 2018**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Evelyn Carolina Montatixe Chicaiza y Daysi Fernanda Chango Alvarez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Evelyn Carolina Montatixe Chicaiza

---

Daysi Fernanda Chango Alvarez

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Evelyn Carolina Montatixe Chicaiza y Daysi Fernanda Chango Alvarez bajo mi supervisión.

---

Dra. Isabel Carolina Bernal Carrera  
DIRECTORA DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTOS**

Por su dedicación, paciencia, confianza y por todo lo que me han dado a lo largo de mi carrera y de mi vida, estas palabras de agradecimiento son para ustedes.

El esfuerzo y las metas alcanzadas reflejan la dedicación y el amor que invierten los padres en sus hijos. Gracias a mis padres que me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible. A mi madre María por su fe, generosidad y sacrificio en todos estos años, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía. A mi padre Gonzalo por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de vida.

A mi hermana Wilma por ser el mejor ejemplo a seguir, en gran medida todo lo que soy ahora es por ti, gracias por ayudarme en las buenas y en las malas y por seguirlo haciendo.

A todos mis maestros de la facultad, en especial a la ingeniera Eliana Jiménez quien estuvo guiándome académicamente con su experiencia y profesionalismo, gracias por su tiempo para la realización de este proyecto de titulación.

A la Dirección de Gestión de Riesgos del Distrito Metropolitano de Quito por facilitar la información necesaria para este trabajo de titulación.

Al ingeniero Luis Albán quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo, aportando tanto a mi formación profesional como humana, gracias por su paciencia, apoyo, amistad y por siempre impulsarnos a continuar pese a todos los obstáculos que se presentaron a lo largo de esta investigación.

A mi amiga y compañera de tesis Daysi, gracias por tu apoyo, fue un largo camino hasta llegar a este día con altos y bajos, pero finalmente lo logramos.

Por los gratos momentos vividos durante mi etapa universitaria a mis amigos Vicky, Andrea, Shir, Daya, Paúl, Josué, Gabriel, Alexis, fueron un gran apoyo para poder lograr esta meta.

A mis amigas Emy, Flor Cinthia por apoyarme cuando más las necesito, por escucharme y entenderme. Gracias por sus locuras y por el amor brindado cada día

A mis amigas Dayana, Wendy, Gabriela que creyeron en la materialización de esta meta mucho antes de empezar.

*Evelyn Montatixe*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la fuerza, perseverancia y constancia, actitudes que permitieron lograr este objetivo.

A mis padres y hermanos, que permanecieron a mi lado, apoyándome y guiándome a lo largo de mi vida para lograr esta meta.

A Juan por su apoyo incondicional.

A mi familia, por su entereza en mis estudios y el avance en la carrera.

A mis maestros que a lo largo de toda la carrera guiaron mi camino con enseñanzas y conocimientos.

A la Dirección de Gestión de Riesgos del Distrito Metropolitano de Quito por ayudar con la información necesaria para la realización de este trabajo de titulación.

A Luis Albán, técnico de la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, por su ayuda y conocimiento para el desarrollo de este estudio; gracias por sus enseñanzas, paciencia y buenos deseos.

A la Ingeniera Eliana Jiménez, por su colaboración y recomendaciones al desarrollar este trabajo.

A Evelyn, mi compañera de Tesis y amiga, por todas las vivencias juntas, por todos los grupos de estudio, la perseverancia y paciencia, y por todas las actividades realizadas para este trabajo.

A mis amigos, que a largo de la carrera hicieron de la Universidad una experiencia inolvidable.

# DEDICATORIA

*A mi familia*

*Evelyn Montatixe*

# DEDICATORIA

*A mis padres Nelson y Eva*

*A mis hermanos Henry, David y Javier*

*A Juan*

*Daysi Chango*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA .....	V
DEDICATORIA .....	VI
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Justificación.....	4
1.3.1. Justificación teórica .....	4
1.3.2. Justificación metodológica .....	5
1.3.3. Justificación práctica .....	6
1.4. Hipótesis .....	7
1.5. Objetivo general.....	7
1.6. Objetivos específicos .....	7
1.7. Alcance .....	8
2. CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO .....	9
2.1. Descripción del área de estudio .....	9
2.1.1. Localización .....	9
2.1.2. Acceso .....	10
2.1.3. Población .....	10
2.1.4. Vegetación.....	11
2.1.5. Hidrografía .....	11
2.1.6. Clima y precipitaciones.....	12
2.1.7. Geomorfología.....	13
2.2. Geología regional.....	13
2.2.1. Marco geológico regional .....	13
2.2.2. Valle Interandino (IAV) .....	14
2.2.3. Cuencas del Valle Interandino .....	16
2.3. Geología local .....	18
2.3.1. Litoestratigrafía de la cuenca de Quito .....	18
2.4. Análisis de estabilidad de taludes .....	19
2.4.1. Criterios de rotura .....	20
2.4.2. Método de límite de equilibrio .....	21



2.4.3.	Método de retro análisis .....	24
2.4.4.	Factor de seguridad - FS.....	24
2.5.	Movimientos en masa.....	25
2.5.1.	Tipos de movimientos en masa .....	25
2.5.2.	Inventario de movimientos en masa .....	27
2.6.	Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes.....	27
2.6.1.	Levantamiento litoestratigráfico .....	28
2.6.2.	Características geomecánicas de los suelos.....	28
2.6.3.	Modelo digital de terreno.....	32
2.7.	Medidas de estabilización de taludes.....	32
3.	CAPÍTULO III: ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	37
3.1.	Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes.....	38
3.1.1.	Levantamiento litoestratigráfico .....	38
3.1.2.	Características geomecánicas de los suelos.....	39
3.1.3.	Modelo digital de terreno.....	42
3.2.	Análisis de estabilidad de taludes .....	43
3.2.1.	Método de estabilidad de taludes .....	43
3.2.2.	Método de retro análisis ( <i>back analysis</i> ).....	48
3.3.	Inventario de movimientos en masa - IMM .....	50
4.	CAPÍTULO IV: RESULTADOS .....	54
4.1.	Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes.....	54
4.1.1.	Levantamiento litoestratigráfico .....	54
4.1.2.	Características geomecánicas de los suelos.....	54
4.1.3.	Modelo digital de terreno.....	57
4.2.	Análisis de estabilidad de taludes .....	58
4.2.1.	Método de estabilidad de taludes .....	58
4.2.2.	Método de retro análisis .....	61
4.3.	Inventario de movimientos en masa.....	66
5.	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	72
5.1.	Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes.....	72
5.1.1.	Levantamiento litoestratigráfico .....	72
5.1.2.	Características geomecánicas de los suelos.....	75
5.1.3.	Modelo digital de terreno - DEM .....	76
5.2.	Análisis de estabilidad de taludes .....	76
5.2.1.	Método de estabilidad de taludes .....	76
5.2.2.	Método de retro análisis ( <i>back analysis</i> ).....	78
5.3.	Inventario de movimientos en masa.....	81

6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	83
Bibliografía.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2. 1</b> Ubicación del área de estudio.....	9
<b>Figura 2. 2</b> Grafica de precipitación acumulada para Quito. Tomado de Dirección Gestión Meteorológica Estudios e Investigaciones Meteorológicas, (2017).....	12
<b>Figura 2. 3</b> Mapa estructural simplificado del Ecuador , en recuadro la estructura IAV (Modificado de Winkler et al, 2002). Tomado de Villagómez, (2003).....	14
<b>Figura 2. 4</b> Hidrografía del IAV y su segmentación. Tomado de Villagómez, (2003). ..	15
<b>Figura 2. 5</b> Perfiles de la composición litológica de las principales subcuencas del IAV. Tomado de Winkler et al., (2005).....	16
<b>Figura 2. 6</b> Esquema estratigráfico de la Subcuenca Sur de Quito. Tomado de Peñafiel (2009).....	18
<b>Figura 2. 7.</b> Curva granulométrica. Tomado de Das, 2014.....	30
<b>Figura 2. 8</b> Detalle de zanjas de coronación para el control de aguas superficiales en un talud. Tomado de Suarez (2009). .....	33
<b>Figura 2. 9</b> Esquema en planta de canales colectores. Tomado de (Suarez, 2009). ...	34
<b>Figura 2. 10</b> Colocación del concreto lanzado. Tomado de (Suarez, 2009) .....	35
<b>Figura 2. 11</b> Esquema de una estructura de contención de suelo reforzado con geomalla. Tomado de (Suarez, 2009).....	35
<b>Figura 2. 12</b> Estructuras de contención. Tomado de (Suarez, 2009).....	36
<b>Figura 3. 1</b> Diagrama de flujo para realizar el análisis de estabilidad de taludes y soluciones. Fuente: propia. ....	37
<b>Figura 3. 2</b> Esquema final de la columna 15, desarrollada en el programa Strater 5. ...	39
<b>Figura 3. 3</b> Perfiles topográficos con datos 3D, desarrollados en el programa ArcGis.	43
<b>Figura 3. 4</b> Geometría del talud creada en el programa AutoCAD.....	44
<b>Figura 3. 5</b> Estabilidad de taludes estático con carga. ....	45
<b>Figura 3. 6</b> Mínimo Factor de Seguridad, programa Slide – estabilidad de taludes estático.....	47
<b>Figura 3. 7</b> Dibujo de la superficie de rotura, herramienta Add Surface programa Slide. ....	49
<b>Figura 3. 8</b> Cálculo del factor de seguridad, programa Slide .....	49
<b>Figura 3. 9</b> Ficha técnica utilizada en el levantamiento del IMM. Modificado de: (Proyecto Multinacional Andino, 2007).....	51
<b>Figura 4. 1</b> Mapa 1 de Factor de Seguridad crítico, método Spencer.....	63
<b>Figura 4. 2</b> Mapa 2 de Factor de Seguridad crítico, método Spencer.....	64
<b>Figura 4. 3</b> Mapa 3 de factor de seguridad crítico, método Spencer. ....	65
<b>Figura 4. 4</b> Mapa de inventario de movimientos en masa. ....	67
<b>Figura 4. 5</b> Mapa 1 resultado de la calibración metodológica, método Spencer. ....	69
<b>Figura 4. 6</b> Mapa 2 resultado de la calibración metodológica, método Spencer. ....	70
<b>Figura 4. 7</b> Mapa 3 resultado de la calibración metodológica, método Spencer. ....	71
<b>Figura 5. 1</b> ubicación de la zona de estudio en relación a la falla de Quito. ....	73
<b>Figura 5. 2</b> Evidencia de socavación en las capas de caída .....	74

**Figura 5. 3** Pérdida de soporte en las capas de cangahua por socavación de las capas de caída.....74

## ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

<b>Fotografía 1. 1</b> Movimientos en masa. En la parte superior se observa viviendas al borde de talud, mientras que en la parte inferior se evidencian zonas inestables. UTM: X: 778115.2, Y: 9972555.5. ....	3
<b>Fotografía 1. 2</b> Descarga directa de agua al pie de talud. UTM: X: 779355, Y: 9974337.5.....	3
<b>Fotografía 3. 1</b> Muestreo de suelos para realizar ensayos triaxiales. Coordenada UTM X: 778108 Y: 9972553 Z:3069.....	40

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2. 1</b> Métodos de análisis de estabilidad de taludes. Fuente (Suarez, 1998) .....	21
<b>Tabla 2. 2</b> Clasificación de los movimientos en masa encontrados en la zona. Tomada de Hungr, Leroueil, & Pcarelli, 2013 .....	26
<b>Tabla 2. 3</b> Sistema unificado de clasificación de suelos – SUCS. Modificado de (Bosch, 2010). .....	31
<b>Tabla 3. 1</b> Cargas sobre el talud en base a sus características.....	46
<b>Tabla 3. 2</b> Intervalos para la clasificación de Factores de Seguridad. Fuente: (Instituto Nacional de Concepciones, 2009) .....	47
<b>Tabla 3. 3</b> <i>Guía para completar los campos del formulario de movimientos en masa. Adaptado de Proyecto Multinacional Andino (2007).</i> .....	52
<b>Tabla 4. 1</b> Tipos de ensayos realizados en los diferentes niveles litológicos .....	54
<b>Tabla 4. 2</b> Resumen de resultados obtenidos en los ensayos triaxiales UU .....	55
<b>Tabla 4. 3</b> Resumen de resultados obtenidos en los ensayos triaxiales CU. ....	56
<b>Tabla 4. 4</b> Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de densidad de muestra. ....	56
<b>Tabla 4. 5</b> Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de clasificación SUCS. ....	57
<b>Tabla 4. 6</b> Datos de altura y pendiente promedio.....	57
<b>Tabla 4. 7</b> Factor de seguridad, método de estabilidad de taludes, programa Slide. ...	59
<b>Tabla 4. 8</b> Valores de cohesión y ángulo de fricción, método de back análisis, programa Slide. ....	61
<b>Tabla 4. 9</b> Factor de seguridad críticos, análisis de estabilidad, programa Slide. ....	61
<b>Tabla 4. 10</b> Valores de cohesión y ángulo de fricción para obtener FS aceptables. ....	66
<b>Tabla 5. 1</b> Comparación del Factor de Seguridad.....	77
<b>Tabla 5. 2</b> Comparación de parámetros geotécnicos .....	78
<b>Tabla 5. 4</b> Calificación de estabilidad de acuerdo a los FS críticos calculados. ....	79
<b>Tabla 5. 3</b> Influencia de la altura y la pendiente en los taludes.....	80

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO 1.</b> MAPA DE UBICACIÓN DE COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS, MUESTREO Y PERFILES TOPOGRÁFICOS.....	89
<b>ANEXO 2.</b> COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS.....	97
<b>ANEXO 3.</b> INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA .....	123
<b>ANEXO 4.</b> FOTOGRAFÍAS DE MOVIMIENTOS EN MASA .....	127

## RESUMEN

El presente estudio fue desarrollado al suroriente del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, en el tramo comprendido entre el desvío a la autopista General Rumiñahui y el puente de Guajaló, y está enfocado en el análisis de estabilidad de taludes.

El análisis de estabilidad de taludes está basado en el equilibrio límite, el cual es un concepto de la mecánica de suelos y rocas que permite comprender el equilibrio de las fuerzas presentes en el talud en condiciones estáticas, estos esfuerzos son de resistencia y de corte. Para el desarrollo de este estudio se ha utilizado el método de estabilidad de taludes y el método de retro análisis para lo cual se integró y combinó la información y parámetros de los aspectos litoestratigráficos, topográficos y geotécnicos de la zona.

Tras definir dichos parámetros se calcularon los Factores de Seguridad, lo cual ayudó a establecer el estado del talud y con esto el respectivo tipo de medidas estabilizadoras que deben ser aplicadas en caso de roturas potenciales

Del análisis de estabilidad se obtuvo que en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, con parámetros geotécnicos tomados en períodos secos, los taludes son estables, obteniendo Factores de Seguridad superiores a 1.5. Debido a que la zona enfrenta períodos lluviosos se realizó el análisis para estas condiciones consideradas críticas, con lo cual se obtuvo que, los taludes presenten calificaciones, según el Factor de Seguridad (FS), de inadmisibles a bajas, es decir menores a 1.25.

**Palabras clave:** Estabilidad de taludes, retro análisis, factor de seguridad, susceptibilidad, avenida Simón Bolívar, avenida Gonzalo Pérez Bustamante



## ABSTRACT

This study was developed in the south-east of the Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) in Simón Bolívar and Gonzalo Pérez Bustamante avenues, in the stretch between General Rumiñahui highway and Guajaló bridge and is focused on slope stability analysis.

The slopes stability analysis is based on the limit equilibrium, which is a concept of the mechanics of soils and rocks that allows to understand the balance of the forces present in the slope in static conditions, these efforts are of resistance and cutting. For the development of this study, the slope stability method and the back-analysis method were used for which the information and parameters of the lithostratigraphic, topographic and geotechnical aspects of the area were integrated and combined.

After defining these parameters, the factors of safety were calculated, which helped to establish the status of the slope and with this the type of stabilizing measures that should be applied in case of potential failure.

From the stability analysis was obtained that in Simón Bolívar and Gonzalo Pérez Bustamante avenues, with geotechnical parameters taken in dry periods, the slopes are stable, obtaining factors of safety greater than 1.5. Due to the fact that the area faces rainy periods the analysis was done for these conditions considered critical, getting that according to the factors of safety (FS), the slopes qualifications are inadmissible to low, (FS > 1.25).

**Key words:** *Slope stability, back analysis, factor of safety, susceptibility, Simón Bolívar Av., Gonzalo Pérez Bustamante Av.*

# 1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

La cuenca de Quito con aproximadamente treinta kilómetros de longitud y tres kilómetros de ancho se encuentra representada por una depresión topográfica en dirección N-S aproximadamente, (Alvarado, 1996), geográficamente limitada al occidente por los complejos volcánicos Pichincha y Atacazo-Ninahuilca y al oriente por las lomas Illumbisí-Puengasi, Batán-La Bota y Calderón-Catequilla, que son la expresión morfológica en superficie del sistema de fallas inversas activas de Quito (Villagómez, 2003). Esta morfología ha delimitado el crecimiento urbano del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), haciendo que se desarrolle de forma alargada, alcanzando una superficie aproximada de 423.001,21 hectáreas en las cuales predominan zonas rurales (bosques protectores, áreas agrícolas y preservación natural) con un 89,91% y el restante corresponde a la mancha urbana del Distrito con un 10,09% (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015).

El Distrito es un territorio multiamenazas respecto a eventos naturales tales como: sismos, erupciones volcánicas, movimientos en masa, lluvias, inundaciones, etc., situaciones que lo vuelven más susceptible y han causado pérdida de vidas humanas e impactos en obras de infraestructura. En el último período intercensal (2001 - 2010), Quito ha crecido a una tasa de 2,2% promedio anual (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015), esto en un escenario de urbanización desordenada y no planificada, este comportamiento se ha observado también en muchas ciudades en todo el mundo demostrando que las áreas urbanizadas se tornan más susceptible a deslizamientos en comparación a las no intervenidas (Suarez, 2009), ya que éstas últimas guardan sus características geológicas y/o topográficas naturales.

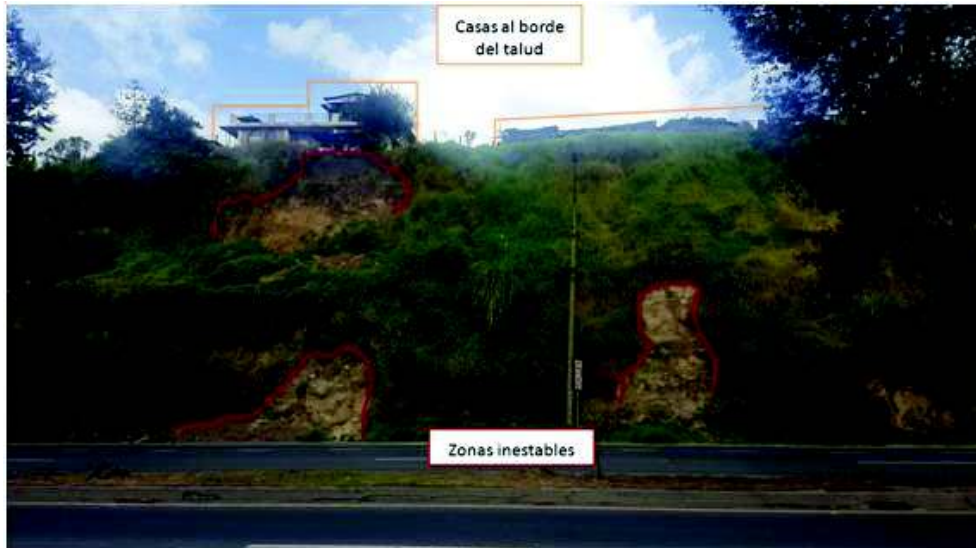
El continuo desarrollo urbano ha requerido la construcción de nuevos ejes viales, que descongestionen las principales vías de la capital, como la avenida Simón Bolívar, Ruta Viva, Inter-valles, Gonzalo Pérez Bustamante, entre otras; generando problemas geotécnicos asociados a los cortes de taludes, ya que no cumplen con la normativa vigente (norma ecuatoriana vial nevi-12 volumen 2), sumado a esto la construcción de viviendas sin las normas de construcción establecidas y saturación del suelo debido al inadecuado manejo de aguas servidas, etc., provocan un cambio en las características propias del terreno, volviéndolo más susceptible a la ocurrencia de eventos de remoción en masa como deslizamientos, derrumbes, hundimientos, etc.

## **1.2. Planteamiento del problema**

La continua transformación de los territorios en el Distrito, por parte del ser humano, tras la búsqueda de tierras para viviendas o para uso agroproductivo, se traduce en una degradación de los recursos naturales, lo cual conlleva a un aumento de la vulnerabilidad de los diversos sectores frente a las amenazas naturales (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015).

El estudio se desarrollará al suroriente del Distrito Metropolitano de Quito, en la avenida Simón Bolívar y su continuación al sur la avenida Gonzalo Pérez Bustamante, en el tramo comprendido entre el desvío a la autopista General Rumiñahui y el puente de Guajaló, con una zona de análisis de 100 metros medidos desde el eje vial hacia los taludes, estimando un área total de 2600 kilómetros cuadrados y 13 kilómetros de longitud. La problemática del área de estudio se encuentra marcada por la ocurrencia de movimientos en masa, debido a factores naturales y antrópicos, que generan inconvenientes como: interrupción del tráfico, accidentes vehiculares, pérdida de vidas humanas, daños en infraestructura pública y privada.

Dentro de los 34 barrios ubicados en la zona de análisis se ha observado fenómenos migratorios internos que han generado procesos de urbanización no planificada, exponiéndose a amenazas de tipo movimientos en masa, derivados de la inestabilidad del terreno debido al cambio en el uso de suelo, excavaciones antitécnicas de taludes, incremento de la humedad natural debido al inadecuado manejo de aguas servidas, modificación de los estados tensionales como resultado del aumento de carga sobre el talud (Fotografía 1.1 y 1.2)



**Fotografía 1. 1** Movimientos en masa. En la parte superior se observa viviendas al borde de talud, mientras que en la parte inferior se evidencian zonas inestables. UTM: X: 778115.2, Y: 9972555.5.



**Fotografía 1. 2** Descarga directa de agua al pie de talud. UTM: X: 779355, Y: 9974337.5.

El Centro de Operaciones de Emergencia del DMQ (2017), informó que debido a las intensas precipitaciones asociadas a una variación climática inusual entre el 06 de octubre de 2016 al 16 de mayo de 2017 han ocurrido 429 eventos de tipo movimiento en masa en todo el Distrito. Al catalogar la base de datos: eventos adversos del Centro de Operaciones de Emergencia (COE) del 2016, proporcionada por la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del DMQ, se han contabilizado 98 eventos dentro del área de estudio, de los cuales 59 eventos han sido registrados en el periodo de variación climática mencionada, dando evidencia del aumento de inestabilidad en la zona.

En los taludes existentes en la avenida Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, en el tramo comprendido entre el desvío a la autopista General Rumiñahui y el puente de Guajaló, debido al alto porcentaje de eventos de tipo movimientos en masa registrados en la base del COE, es importante realizar el análisis de estabilidad de taludes y retroanálisis para comprender la dinámica y evolución de los mismos, esto se lo realizará para determinar los tramos de mayor peligrosidad y así aportar a las autoridades locales con un insumo que los permita tomar decisiones para la mitigación de riesgo existente en el tramo propuesto.

### **1.3. Justificación**

#### **1.3.1. Justificación teórica**

"La mayoría de los taludes son aparentemente estables y estáticos, pero realmente son sistemas dinámicos en evolución" (Suarez, 2009). El transcurso del tiempo y la acción de factores preparatorios y desencadenantes provocan que un talud pueda desestabilizarse y se generen movimientos en masa, los cuales son procesos complejos que requieren un análisis detallado en el área de la estabilidad de taludes.

Al realizar obras de tipo vial, en donde son necesarias excavaciones y creación de taludes, la estabilidad de los mismos se vuelve una herramienta indispensable, se fundamenta en el uso de factores geométricos, hidrológicos, geológicos, geotécnicos para determinar el comportamiento del terreno. Varias son las causas que se atribuyen al movimiento de una ladera, aunque con frecuencia se trata de la acción de factores desencadenantes (activo) que provocan inestabilidad y factores condicionantes (pasivos) que dependen únicamente de la naturaleza propia del material (Gonzales de Vallejo, 2006). Para el estudio de una ladera o un talud es importante el cálculo del factor de seguridad, a partir del cual se estima la probabilidad de ocurrencia del fallamiento o ruptura del talud para calcular el riesgo considerando otros factores como el carácter y dimensiones de la ruptura, y las distancias de recorrido del movimiento en masa (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Según Gonzales de Vallejo (2006), los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico – matemático, para los cuales según las necesidades de este proyecto y los datos que se desean obtener se aplicará *métodos determinísticos*, los cuales muestran si el talud es estable o no, basándose en conocimiento o suposición de las condiciones en las que se encuentra.

Los métodos de equilibrio límite, analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable y comparan las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes

a lo largo de una superficie de rotura, por lo que se debe considerar una superficie de rotura de geometría tal, que permita el deslizamiento. Con estas fuerzas se establece la ecuación de equilibrio que provee un Factor de Seguridad (FS) para el área analizada, se considera al menor *coeficiente de seguridad* en el talud como potencial superficie de rotura (Gonzales de Vallejo, 2006).

El análisis retrospectivo de falla (*back analysis*) es otro método que permite estimar la resistencia *in situ* del suelo, está representado por parámetros de resistencia al corte en tensiones efectivas de Mohr-Coulomb, cohesión y ángulo de fricción interna. Este análisis es un método efectivo ya que incorpora factores de ensayos de laboratorio, asume un factor de seguridad igual a la unidad y considera la geometría original del momento de falla. Finalmente, se estima la resistencia al corte del suelo que fue movilizada en la falla consistente con un modelo 2D (Morales, 2011).

### **1.3.2. Justificación metodológica**

Para realizar el análisis de estabilidad de laderas o taludes es necesario integrar los aspectos litoestratigráficos, topográficos y geotécnicos caracterizados en el área de estudio, para esto es útil el uso de softwares enfocados en análisis geotécnico. En el DMQ no se cuenta con una base de datos completa con esta información y al suroriente, en la zona de estudio la información es más escasa. El Municipio del Distrito Metropolitano de Quito cuenta con un modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) con una precisión de un pixel/metro, además de estudios geotécnicos puntuales realizados por usuarios.

Se considera que estos datos no son suficientes para realizar el análisis de estabilidad de taludes, por lo cual en el estudio se obtendrán datos a partir de trabajo de campo y su posterior procesamiento, es así que mediante el muestreo de suelos y ensayos de laboratorio se determinarán las características geotécnicas de los taludes.

La litoestratigrafía será levantada mediante la caracterización de las diferentes capas que se encuentran en el lugar y finalmente se realizará el procesamiento del DEM proporcionado por el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, para obtener la topografía del lugar.

La base de datos será analizada, catalogada y procesada con el uso del programa Slide de la firma Rocscience, el cual es un software de análisis de estabilidad de taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de estabilidad, posee una amplia gama de aplicaciones, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas

geotécnicas, además integra capacidades de análisis de sensibilidad, probabilísticos y análisis retrospectivos (Rocscience, 2018).

Como resultado de la integración de los aspectos litoestratigráficos, topográficos y geotécnicos se podrán generar una nueva base de datos, la cual será útil, no solo en el análisis de estabilidad de taludes sino también, en diversos estudios que se pretendan realizar en un futuro.

### **1.3.3. Justificación práctica**

"El desarrollo moderno de las actuales vías de comunicación, tales como canales, caminos y el desenvolvimiento de obras de protección contra la acción de ríos, han puesto al diseño de taludes en un plano de importancia ingenieril, tanto por el aspecto de inversión como por las consecuencias derivadas de su falla" (De Matteis, 2003), por lo cual, se expone el siguiente caso de estudio en el que se aplicó la teoría de estabilidad de taludes.

Soluciones para la estabilidad de taludes de la carretera Canta – Huayllay entre las progresivas del km 102 al km 110, realizado para la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, en la cual Sackschewski (2017) muestra que por la excavación para la carretera Canta – Huayllay, entre los kilómetros 102 y 110 existen taludes de riesgo moderado a alto que requieren una intervención definitiva para lograr estabilizarlos, debido al peligro potencial por la ocurrencia de movimientos en masa. Posterior al análisis de estabilidad de talud a lo largo de las progresivas, el autor concluye que "la reconformación de taludes, el sellado de grietas y la colocación de cunetas de coronación en el sector del km 102+780 al km 103+020 de la carretera Canta – Huayllay, mejorarán la estabilidad del talud, ya que, de acuerdo con los análisis geológico-geotécnicos efectuados, presentan un factor de seguridad apropiado" (Sackschewski, 2017).

Como se observa en el caso anterior el análisis de estabilidad de taludes ha sido una herramienta importante que ha ayudado a mejorar la estabilidad en el área estudiada, ya que permite comprender los factores que causan su inestabilidad, previo al diseño de obras geotécnicas, así como señalar los tramos de mayor peligrosidad para la planificación de intervenciones que reduzcan los impactos, es por tal motivo que el presente estudio ha optado por este enfoque de análisis, con el cual se espera de igual forma comprender la problemática de los taludes en 13 kilómetros de las avenidas

Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante y, de esta manera, proponer soluciones geotécnicas básicas que mejoren la estabilidad de dicha zona.

En función de Convenio Marco firmado por la Escuela Politécnica Nacional y el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito para desarrollar proyectos de investigación que aporten con soluciones a la ciudad, el determinar zonas inestables en los taludes del área de estudio ayudará al Municipio a priorizar obras en los sectores que evidencien mayor inestabilidad.

#### **1.4. Hipótesis**

El análisis de la condición de la estabilidad de los taludes permitirá determinar la posibilidad de ocurrencia de un nuevo evento de movimiento en masa o la posible reactivación de un evento antiguo en los taludes en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante.

#### **1.5. Objetivo general**

Determinar zonas susceptibles ante movimientos en masa en un tramo de los taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, a partir del análisis de estabilidad y retro análisis de taludes.

#### **1.6. Objetivos específicos**

- Levantar la litoestratigrafía a detalle de los taludes en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante.
- Realizar la caracterización geomecánica de suelos en los taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante a través de muestreo de suelos y ensayos de laboratorio.
- Procesar la topografía a detalle de los taludes en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, con el uso del modelo digital de elevación para obtener perfiles topográficos.
- Analizar la estabilidad de taludes en zonas deslizadas y potencialmente deslizables, a través de la integración de los datos litoestratigráficos, topográficos y geomecánicos.
- Elaborar el inventario de movimientos en masa.
- Representar cartográficamente las zonas de mayor susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa.



- Sugerir posibles medidas de mitigación para reducción de la amenaza por movimientos en masa

## **1.7. Alcance**

Al realizar el análisis de estabilidad de taludes en el tramo propuesto se obtendrá el mapa de las zonas de mayor susceptibilidad frente a procesos de remoción en masa a escala 1:2000, además de proponer posibles medidas de mitigación para reducción del riesgo por movimientos en masa, esto permitirá al Municipio de Distrito Metropolitano de Quito priorizar obras que beneficien a los sectores más vulnerables. Al tener conocimiento del riesgo los mismos podrán trabajar en conjunto con la comunidad y guiarlos en un plan de concienciación, capacitación, prevención y respuesta.

## 2. CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Descripción del área de estudio

#### 2.1.1. Localización

El área de estudio se localiza en la región interandina del Ecuador, en la provincia de Pichincha, al suroriente del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ), en el característico rasgo en superficie del sistema de fallas activas inversas de Quito, conocido como la elevación de Puengasí, rasgo en el cual se desarrolló el eje vial de la avenida Simón Bolívar y su continuación al sur la avenida Gonzalo Pérez Bustamante. La zona corresponde a una superficie aproximada de 2600 kilómetros cuadrados y 13 kilómetros de longitud con una zona de análisis de 100 metros medidos desde el eje vial hacia los taludes, interviniendo en 4 parroquias del DMQ: Quitumbe, La Argelia, La Ferroviaria y Puengasí, específicamente el estudio se centrará en el tramo vial comprendido entre el sector Puente de Guajaló – Intercambiador avenida Simón Bolívar y Autopista General Rumiñahui. (Figura 2.1)

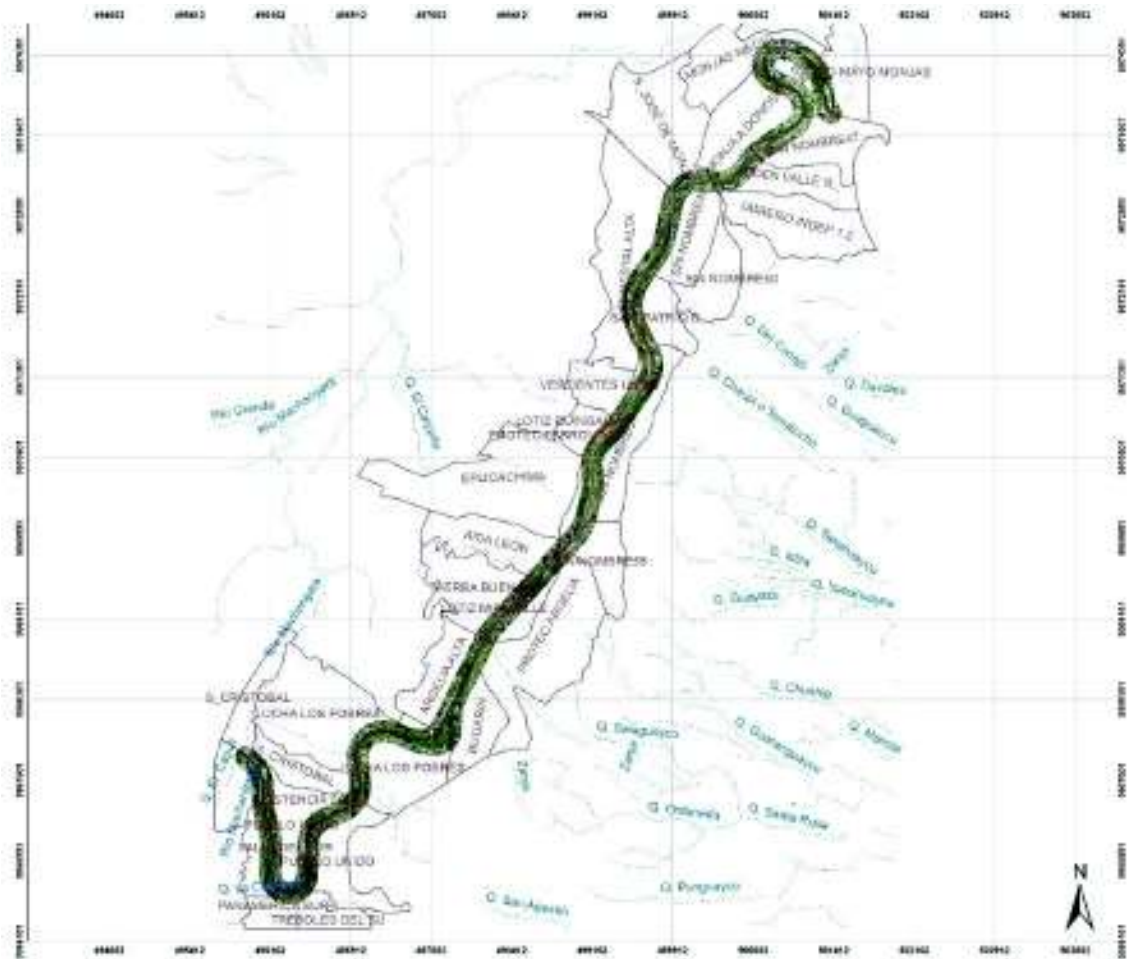


Figura 2. 1 Ubicación del área de estudio.

### **2.1.2. Acceso**

El área de estudio se encuentra dentro de la ciudad de Quito, capital del Ecuador, para el acceso a la misma existe mucha facilidad, además de que se encuentra en una de las principales arterias viales. El primer acceso, por el norte, es tomando la Panamericana Norte (E35) en dirección sur hasta incorporarse a la avenida Simón Bolívar (norte), seguir esta avenida en dirección sur, hasta encontrarse en el sector intercambiador avenida Simón Bolívar y Autopista General Rumiñahui, que es en donde empieza la zona de análisis.

Se cuenta con dos accesos más por el sur, el primero es seguir la carretera Panamericana en dirección norte hasta el sector “curva de Santa Rosa”, e incorporarse a la avenida Simón Bolívar (sur) y seguir aproximadamente unos 25 minutos en dirección norte, hasta el sector la Argelia, que es una de las zonas pertenecientes al área de estudio. La segunda ruta por el sur es, en el ya mencionado sector curva de Santa Rosa, tomar la avenida Pedro Vicente Maldonado y seguir en dirección norte hasta el sector puente de Guajaló, sitio donde se toma la avenida Gonzalo Pérez Bustamante hacia el este que es en donde se encuentra el barrio Asistencia Social, siendo este el final de la zona de estudio.

### **2.1.3. Población**

El DMQ cuenta en la actualidad con 2.414.585 habitantes repartidos en sus 65 parroquias urbanas y rurales. Dentro de las parroquias urbanas está concentrado el 70% de la población, que asciende a 1.688.628 habitantes, mientras que el área rural está conformada por el 30% restante, de unos 725.757 habitantes. La tasa de crecimiento de población de las parroquias rurales ha aumentado entre 2001 y 2010, habiéndose registrado en dicho periodo un aumento relativo de la población rural del 24% al 28%. Según proyecciones del Instituto de la Ciudad de Quito, en la actualidad las parroquias rurales ya albergan el 30% de la población del DMQ. De ser así, la tendencia de aumento del 4% cada década se mantiene. Las zonas suburbanas del distrito tuvieron, entre 2001 y 2010 según el censo de población, una tasa de crecimiento tres veces mayor que la del área urbana (Unidad del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del DMQ, 2014).

Para el censo 2010 se muestra que la zona de estudio posee una densidad poblacional media de entre 5000.01 a 10000.00 habitantes/ km<sup>2</sup> y según los datos mostrados en el Atlas de amenazas naturales y exposición de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito la proyección de densidad poblacional para el 2020 se mantiene, esto debido

a que las personas buscas zonas planas y espacios libres, características que no se observan en la zona.

#### **2.1.4. Vegetación**

Actualmente existe en Quito una gran variedad de tipos de vegetación, diferenciados de acuerdo al tipo y la localización de los espacios urbanos, así como por los objetivos asignados a la cubierta vegetal por parte de los habitantes. Cada área posee también un potencial específico para sembrar y mantener vegetación en el futuro. Tanto para la zona urbana como para la periurbana existen diferentes tipos de vegetación entre estas: bosques, árboles frutales, ornamentales y arbustos, así como plantas herbáceas, pastos, flores y cultivos alimenticios. El tipo, la cantidad y localización de la vegetación en Quito, junto con elementos artificiales de la ciudad (edificios, infraestructura de servicios, calles, etc.) se combinan para definir la estructura y composición del ecosistema forestal urbano (Murray, 1998).

#### **2.1.5. Hidrografía**

La mayor parte del territorio del DMQ, se encuentra en la cuenca del río Guayllabamba, que a su vez forma parte de la cuenca alta del río Esmeraldas que desemboca en el océano Pacífico. El sistema hidrográfico está constituido básicamente por ríos de montaña (PNUMA, Fondo Ambiental DMQ, FLACSO, 2011), por lo cual es alimentado por diversos nevados, deshielos y vertientes con cursos alineados y cambios bruscos de dirección.

El área de la cuenca es de 3.450 km<sup>2</sup>, la longitud del río Guayllabamba es de 73,5 km, la densidad de drenaje es de 0,40 (unidad permeable), pendiente media del 3%, caudales medios 41,39 m<sup>3</sup>/seg (Valdivieso, 2005). Los principales ríos que recorren el territorio del Distrito son: el río Machángara, que se origina en el cerro Atacazo y en su recorrido circunda la ciudad de Quito. Este río confluye con el río San Pedro a una altitud de 2190 msnm y da origen al río Guayllabamba. El río Monjas se origina en las laderas orientales del volcán Rucu Pichincha y desemboca en el río Guayllabamba a una altitud de 1660 msnm, en la población de San Antonio de Pichincha (PNUMA, Fondo Ambiental DMQ, FLACSO, 2011).

La zona cuenta con varias quebradas que no poseen un nombre formal, sin embargo, alimentan a los principales drenajes del Distrito Metropolitano de Quito como al río Machángara, a las quebradas El Capulí, El Calzado al occidente y Salaguayco, Yanahuaycu y Cuscungo al oriente.

### 2.1.6. Clima y precipitaciones

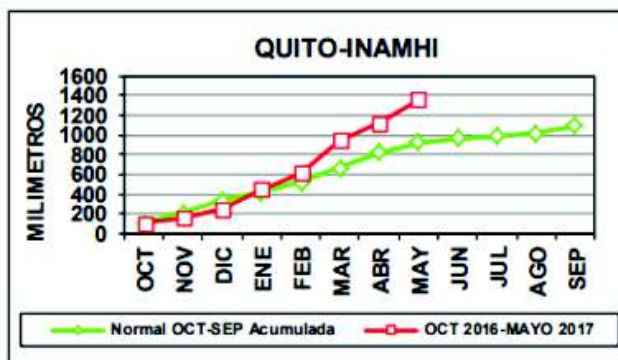
El clima de Quito es variable, debido a su orografía, topografía y a la presencia de muchos microclimas que existen en su entorno. Tiene dos estaciones: la lluviosa y la seca que se caracterizan en función al régimen pluviométrico. Cabe mencionar que en la actualidad estos períodos temporales han variado en intensidad, duración y también en frecuencia, debido a efectos de los cambios climáticos globales y locales (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015).

El factor meteorológico más relevante del clima en el DMQ es la precipitación (lluvia), cuyas fluctuaciones están condicionadas al comportamiento de los patrones meteorológicos locales, de ahí que se convierta en uno de los factores determinantes para eventos como deslizamientos, deslaves y flujos de lodo. Las precipitaciones máximas se dan al sur y van decreciendo hacia el norte, con una gradiente norte – sur de aproximadamente de 21 mm/km Las intensidades máximas están alrededor de 43 mm. en 30 minutos, y llueve un promedio de 172 días al año (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015).

Específicamente el área de estudio se emplaza al suroriente del Distrito Metropolitano de Quito, y cuenta con un clima mesotérmico semihúmedo, caracterizado por un período lluvioso de octubre a abril y uno seco de mayo a septiembre. El promedio anual de precipitaciones es de 960 mm (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015)

En el informe elaborado por el equipo técnico de la Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos (2017/05/20), detalla que en el mes de mayo de 2017 las estaciones meteorológicas de Ñaquito e Izobamba registraron datos de 227.9 mm y 213.9 mm de precipitación respectivamente.

En la figura 2.2 se presenta un volumen de precipitación acumulada que supera al valor promedio para el mes en cuestión.



**Figura 2. 2** Grafica de precipitación acumulada para Quito. Tomado de Dirección Gestión Meteorológica Estudios e Investigaciones Meteorológicas, (2017).

### **2.1.7. Geomorfología**

El área de estudio se encuentra emplazada en la ciudad de Quito, la misma que presenta una forma alargada, extendiéndose 40 km de norte a sur y de 5 a 6 km de este a oeste, según (EPN-HIGEODES, 2002) se han identificado dos zonas con características morfológicas distintas, la primera corresponde a la meseta de Quito y la segunda al edificio volcánico Pichincha.

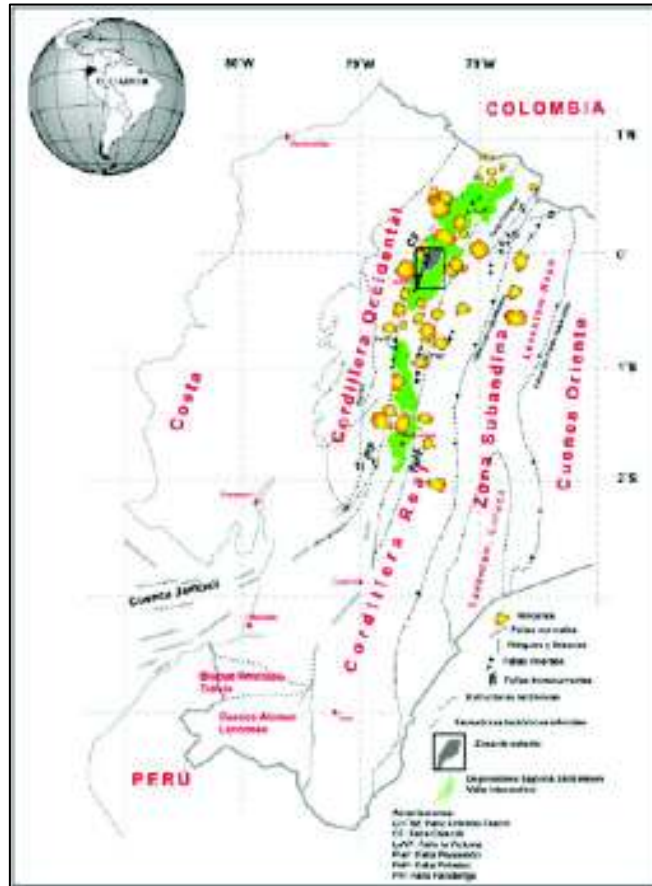
La meseta de Quito tiene un promedio de 2,5 km de ancho, comprendida entre las cotas 2700 a 2800 msnm, orientada en dirección norte-sur, con pendientes que se incrementan desde el centro hacia el este y el oeste, y varían entre 0-25%. La meseta está limitada al este por las lomas de Puengasí, Ilumbisí y el Batán-La Bota que tienen una dirección Norte-Sur, y al oeste el límite corresponde a las laderas del Complejo Volcánico Pichincha. Hacia el Sur, en el sector de Tambillo, la meseta se abre, mientras que hacia el norte desciende hasta encontrarse con la meseta de Pomasqui-San Antonio (cuenca del río Monjas). En el centro de la meseta se ubica El Panecillo que divide morfológicamente a la cuenca de Quito en los sectores sur y centro (Yugsi, 2004).

## **2.2. Geología regional**

### **2.2.1. Marco geológico regional**

El Ecuador se encuentra localizado en el noroccidente del continente Sudamericano, en la placa sudamericana, y se ve afectado por la dinámica convergente entre las placas Nazca y Sudamericana. La placa Nazca se subduce bajo la Sudamericana llevando consigo la cordillera asísmica de Carnegie lo que provoca deformación, levantamiento y volcanismo en el margen de la placa Sudamericana (Gutscher et al., 1999).

El proceso de convergencia entre placas, que se ha dado desde el Oligoceno hasta la actualidad, es el que ha dado lugar al sistema orogénico en Ecuador, que está compuesto de dos cadenas montañosas sub-lineares, de dirección aproximada N-S, referidas como Cordillera Real (en el este) y Cordillera Occidental (en el oeste), separadas por el Valle Interandino (IAV por sus siglas en inglés) (Villagómez, 2003). En este trabajo la geología regional se delimita a la descripción del Valle Interandino. (Figura 2.3).



**Figura 2. 3** Mapa estructural simplificado del Ecuador, en recuadro la estructura IAV (Modificado de Winkler et al, 2002). Tomado de Villagómez, (2003)

### 2.2.2. Valle Interandino (IAV)

El IAV constituye una depresión morfotectónica de dirección N-S a NNE-SSW, limitada al este por la Cordillera Real y al oeste por la Cordillera Occidental. Tiene aproximadamente 25 km de ancho, 300 km de largo (Procel, 2008). Según Winkler et al., (2004) los límites estructurales de esta depresión corresponden a fallas reactivadas, las cuales fueron formadas anteriormente durante eventos acrecionarios a lo largo del margen continental ecuatoriano.

De acuerdo con Villagómez (2003), el IAV se encuentra dividido en tres segmentos que son: Valle Interandino Norte (IAV norte) (Otavalo-Chota), Valle Interandino Central (IAV central) (Quito-Guayllabamba) y Valle Interandino Sur (IAV sur) (Latacunga-Riobamba). Esta división es a causa de dos nudos volcánicos importantes, los cuales marcan cambios importantes en la orientación de la depresión, teniendo así, segmento Otavalo-Chota dividido del segmento Quito-Guayllabamba por el nudo constituido por los volcanes Mojada y Cusín y segmento Quito-Guayllabamba dividido del segmento Latacunga-Riobamba por el nudo constituido por los volcanes Rumiñahui, Pasochoa, Cotopaxi e Illiniza (Figura 2.4).

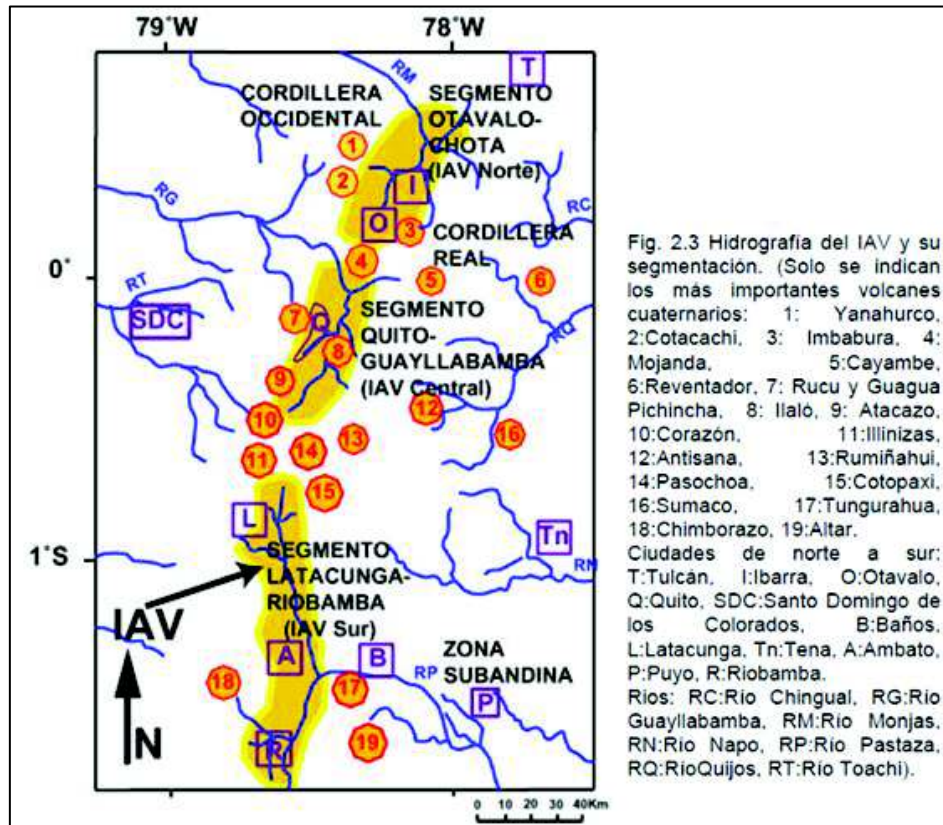


Figura 2. 4 Hidrografía del IAV y su segmentación. Tomado de Villagómez, (2003).

## Estructuras

La estructura de la Depresión Interandina está definida como una depresión topográfica de dirección norte-sur entre la Cordillera Real y la Cordillera Occidental de Ecuador, en el sur la depresión se desvía hacia el oeste en dirección del Golfo de Guayaquil disectando la topografía de la Cordillera Occidental (Winkler et al., 2005). En esta depresión se han reconocido varias estructuras tectónicas en compresión, muchas de ellas activas desde el Pleistoceno. Específicamente para el IAV central los principales límites estructurales son al oeste la falla Calacali-Pallatanga-Palenque y la falla Peltetec al este (Aspden & Litherland, 1991).

Villagómez en el 2003 definió como la característica geológica más prominente en el IAV Central al “Sistema de Fallas activas inversas de Quito”, el cual juega un rol fundamental en la evolución tectónica de la región. La expresión morfológica de este sistema es definida por un set de lomas con una orientación común N a NNE aproximadamente.





Las lomas Calderón-Catequilla, Batán-La Bota e Illumbisí-Puengasi son la expresión morfológica en superficie del Sistema de Fallas activas inversas de Quito, con una orientación común N a NNE aproximadamente, estas lomas dividen al joven IAV Central en tres subcuencas (Quito, San Antonio y Guayllabamba) y controlan la dinámica sedimentaria de éstas (Villagómez, 2003).

La depresión de Guayllabamba es una semi cuenca pull apart que empezó a formarse a finales del Pleistoceno debido a la interacción del Sistema de Fallas Inversas de Quito, la subcuenca de Quito es una cuenca de piggyback, sobre un segmento del sistema, se encuentra en el valle formado entre la cordillera Occidental (Complejo Volcánico Pichincha) y el segmento Batan-La Bota e Illumbisí-Puengasí (Villagómez, 2003).

La Cuenca de San Antonio de Pichincha es una depresión alargada en sentido NNE-SSW que se extiende por alrededor de 25 kilómetros cuadrados, ubicada al norte de Quito y que abarca a las poblaciones de San Antonio y Pomasqui, se encuentra limitada por el Volcán Casitagua al occidente y el Complejo Volcánico Pululahua al norte, la elevación Calderón – Catequilla es el límite oriental de la cuenca y la separa de la Cuenca de Guayllabamba (Pacheco, Andrade, & Alvarado, 2014). La subcuenca sur de Quito tiene un área aproximada de 127.7 kilómetros cuadrados, está limitada al norte por el domo El Panecillo y el río Machángara, al sur por la quebrada Saguanchi afluente del río San Pedro, al oeste por los complejos volcánicos Atacazo-Carcacha-Ninahuilca (CVACN) y Pichincha (estructura basal El Cinto) y al oeste por la loma de Puengasí, en esta subcuenca se distinguen tres rasgos morfológicos: los flancos orientales de los complejos volcánicos Atacazo-Carcacha-Ninahuilca y Pichincha, valle del sur de Quito y la Loma de Puengasí (Peñafiel, 2009).

Litoestratigráficamente la cuenca de Quito se ha desarrollado por aportes sedimentarios y de la depositación de material de origen volcánico a partir del Pleistoceno medio, en general la litología cuaternaria consiste en las siguientes unidades que van desde las más antiguas a las más jóvenes: formación Pisque (lavas y tobas), formación San Miguel (sedimentos lacustres), formación Guayllabamba (tobas y lavas), formación Chiche (lahares, aluviales y depósitos piroclásticos), y formación Cangahua (tobas, cenizas y caídas de piedra pómez) (Villagómez, 2003).

## 2.3. Geología local

### 2.3.1. Litoestratigrafía de la cuenca de Quito

#### Estratigrafía de la cuenca sur de Quito

Los materiales depositados en la subcuenca del sur de Quito fueron agrupados según Peñafiel 2009, en tres unidades litoestratigráficas, considerando la génesis, ambientes de depositación, aportes y distribución espacial (Figura 2.6).













			LITOLOGÍA
FORMACIÓN CANGAHUA Holoceno (0,01 Ma)			 Cangahua (Acuitardo)  Coluviales
FORMACIÓN MACHÁNGARA Pleistoceno Tardío	Mb. Quito	U. Fluvio - Lacustre El Pintado	 Turbas, paleosuelos y tobas  Niveles de arcilla verde y cenizas  Brechas, arcillas y areniscas finas
		U. Volcanosedimentaria Guamani aprox. 410 - 70 Ka.	 Cenizas y oleadas piroclásticas  Flujo piroclástico "block and ash" (Acuífero)  Toba blanca
FORMACIÓN MACHÁNGARA Pleistoceno Tardío	Mb. Volcánicos Basales	U. De Basamento	 Flujos de lodo proximales y distales  Avalanchas de Escombros (Acuífero)  Brecha volcánica soldada  Flujos de lava andesítica

Figura 2. 6 Esquema estratigráfico de la Subcuenca Sur de Quito. Tomado de Peñafiel (2009).

#### FORMACIÓN MACHÁNGARA

- **Unidad Basamento**

El basamento de la subcuenca sur de Quito está formado por flujos de lava, brechas volcánicas, avalanchas de escombros y flujos de lodo provenientes del Complejo Volcánico Atacazo-Carcacha-Ninahuilca y el Complejo Volcánico Pichincha (Peñafiel, 2009). Los flujos de lava afloran localmente a través de bloques levantados en la avenida Simón Bolívar, estos depósitos son de composición andesítica y textura afanítica, contienen cristales de plagioclasa, vidrio dentro de una matriz vítrea con una dirección de flujo hacia el este lo que sugiere que son productos del Complejo Volcánico Atacazo-Carcacha-Ninahuilca (Peñafiel, 2009).

- **Miembro Quito**

Está constituido:

- **Unidad volcanosedimentaria Guamaní**

Está formada por depósitos volcánicos primarios que incluyen flujos piroclásticos, caídas de pómez y ceniza. La base de la unidad es un depósito de tobas blancas altamente porosos y de baja densidad. La unidad volcanosedimentaria Guamaní sobreyace en discordancia erosiva a la unidad Basamento. Hacia el tope de la unidad se tiene una serie de cenizas y oleadas piroclásticas estratificadas sobreyacen concordantemente al flujo piroclástico *block and ash* (arena y grava) (Peñañiel, 2009).

Correlaciones realizadas por Peñañiel, 2009 sugiere tentativamente que la perforación exploratoria PS-2 (sector El Pintado) y la litología presente en la quebrada Saguanchi están correlacionadas y se encuentran presentes tanto al norte como al sur de la subcuenca (Peñañiel, 2009).

- **Unidad fluvio-lacustre El Pintado**

La base de la unidad está formada por brechas volcánicas intercaladas con estratos de areniscas finas y arcillas cuyos espesores oscilan entre 0.30 a 1 metro, sobreyaciendo a este conjunto se encuentran una serie de estratos de arcilla y arena de color verde con gradación normal y líticos de subredondeados, rasgos que indican que fueron depositadas en ambiente fluvial. Hacia el techo se presentan una serie de turbas, paleosuelos y tobas que en conjunto alcanzan un espesor de 20 metros y que se depositaron en un ambiente lacustre (Peñañiel, 2009).

## **FORMACIÓN CANGAHUA**

Es un depósito limo arenoso que consiste en tobas alteradas de color amarillento a marrón, comúnmente intercaladas con caídas de ceniza, pómez y paleosuelos, menos frecuentemente con flujos de lodo y canales aluviales con una edad sugerida de Pleistoceno Tardío - Holoceno (Villagómez, 2003).

A la base de la formación, especialmente en los flancos de los complejos volcánicos Atacazo-Carcacha-Ninahuilca y Pichincha, se presentan coluviales de hasta 2 metros de espesor, formados por bloques de andesita, dacita, y pómez dentro de una matriz limo arenosa color café. La formación Cangahua sobreyace en discordancia erosiva a la unidad volcanosedimentaria Guamaní (Peñañiel, 2009).

## **2.4. Análisis de estabilidad de taludes**

En los métodos de análisis de estabilidad intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan sobre el talud y determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en determinísticos y probabilísticos, para

este estudio en particular el método a seguir será el de límite de equilibrio, el cual se encuentra enmarcado dentro de los métodos determinísticos (Suarez, 2009).

### 2.4.1. Criterios de rotura

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante en un deslizamiento se realiza utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb (Suarez, 1998):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' \text{ (Para suelos saturados)}$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' + (\mu - \mu_a) \tan \phi'' \text{ (para suelos parcialmente saturados)}$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo de resistencia al corte

$\mu_a$  = Presión del aire intersticial

$c'$  = Cohesión o cementación efectiva

$\phi'$  = Angulo de fricción interna del material

$\sigma$  = Esfuerzo normal total

$\mu$  = Presión del agua intersticial o de poros

$\phi''$  = Angulo de fricción del material no saturado.

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones internas o de poros de acuerdo a la ecuación de Coulomb, en la cual el factor  $u$  está restando al valor de la presión normal. La presión resultante se le conoce con el nombre de presión efectiva  $\sigma'$  (Suarez, 1998).

$$\sigma' \text{ (Presión efectiva)} = \sigma - \mu$$

$\phi'$  = Angulo de fricción para presiones efectivas.

$c'$  = Cohesión para presiones efectivas.

**Ángulo de fricción:** Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física: Coeficiente de rozamiento =  $\tan \phi$  y depende de varios factores, entre ellos algunos de los más importantes son:

a. Tamaño de los granos

c. Distribución de los tamaños de granos

b. Forma de los granos

d. Densidad

**Cohesión:** Es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina Suelos no Cohesivos (Suarez, 1998).

#### 2.4.2. Método de límite de equilibrio

Los métodos de límite de equilibrio son más sencillos de utilizar y permiten analizar los casos de falla traslacional y de falla rotacional, así como las fallas de inclinación (“Toppling”) y las fallas en cuña. Un análisis de límite de equilibrio permite obtener un factor de seguridad a través de un análisis regresivo, obtener los valores de la resistencia al cortante en el momento de la falla (Suarez, 2009).

Una vez que se han determinado las propiedades de resistencia al cortante de los suelos, las presiones de poros y otras propiedades del suelo y del talud, se puede proceder a calcular el factor de seguridad del talud, este análisis de estabilidad consiste en determinar si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos de cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento (Suarez, 2009).

La mayoría de los métodos de límite de equilibrio tienen en común, la comparación de las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla. Las variaciones principales de los diversos métodos son, el tipo de superficie de falla y la forma cómo actúan internamente las fuerzas sobre la superficie (Suarez, 2009).

En la tabla 2.3 se describen las características de los métodos de equilibrio límite.

**Tabla 2. 1** Métodos de análisis de estabilidad de taludes. Fuente (Suarez, 1998)

MÉTODO	SUPERFICIES DE FALLA	EQUILIBRIO	CARACTERÍSTICAS
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface el equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobre determinada debido

			a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobre determinada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección $F_0$ para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Spencer (1967)	Cualquier forma de superficie de falla	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Dentro de estos métodos, los que destacan para este estudio son:

### **Método de Janbú simplificado (1967)**

La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. A diferencia de los otros métodos, en este caso la superficie de falla no debe ser obligatoriamente circular. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección  $f_0$ , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura (Sanhueza & Rodríguez, 2012).

Janbú simplificado (1968) presenta un método de dovelas para superficies de falla curvas, no circulares (ecuación modificada):

$$F.S. = \frac{f_o \sum \left\{ \left[ c' b + (W - ub) \tan \phi \right] \frac{1}{\cos \alpha m a} \right\}}{\sum (W \tan \alpha)}$$

Donde  $f_o$  depende de la curvatura de la superficie de falla,  $\alpha$  es ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centroide en cada dovela,  $W$  es el peso total de cada dovela,  $u$  es la presión de poros,  $b$  es el ancho de la dovela y  $C'$ ,  $\phi$  son los parámetros de resistencia del suelo (Suarez, 1998).

### Método de Spencer (1967)

El método se basa en el supuesto de que:

- Las fuerzas de conexión a lo largo de las superficies de división de cada rebanada están orientadas paralelamente entre sí e inclinadas con respecto a la horizontal de un ángulo  $\theta$ ;
- Todos los momentos son nulos  $M_i = 0 \quad i=1 \dots n$ .

Básicamente el método satisface todas las ecuaciones de la estática y equivale al método de Morgenstern y Price cuando la función  $f(x) = 1$ . Imponiendo el equilibrio de momentos respecto al centro del arco descrito por la superficie de deslizamiento se tiene:

$$(1) \sum Q_i \cdot R \cdot \cos(\alpha - \theta) = 0$$

Donde:  $Q_i = 0$  es la fuerza de interacción entre las rebanadas,  $R$  es el radio del arco circular,  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la fuerza  $Q_i$  respecto a la horizontal.

Imponiendo el equilibrio de las fuerzas horizontales y verticales se obtiene respectivamente:

$$\sum (Q_i \cdot \cos \theta) = 0$$

$$\sum (Q_i \cdot \sen \theta) = 0$$

Asumiendo las fuerzas  $Q_i$  paralelas entre sí, se puede también escribir:

$$(2) \sum Q_i = 0$$

$$Q_i = \{c/F_s \cdot (W \cdot \cos \alpha - \gamma_w \cdot h \cdot \sec \alpha) \cdot \tan \alpha / F_s - W \cdot \sin \alpha\} / \{\cos(\alpha - \theta) \cdot [(F_s + \tan \phi \cdot \tan(\alpha - \theta)) / F_s]\}$$

El método propone el cálculo de dos coeficientes de seguridad: el primero ( $F_{sm}$ ) se obtiene de (1), ligado al equilibrio de momentos; el segundo ( $F_{sf}$ ) falla (2) ligado al equilibrio de fuerzas. En práctica se procede resolviendo (1) y (2) para un intervalo dado de valores del ángulo  $\theta$ , considerando como valor único del coeficiente de seguridad aquel para el cual se obtiene:  $F_{sm} = F_{sf}$ . (GeStru, 2018).



La cantidad de métodos que se utilizan, los cuales dan resultados diferentes y en ocasiones contradictorios son una muestra de la incertidumbre que caracteriza los análisis de estabilidad. Los métodos más utilizados son los simplificados de Bishop y de Janbú, los cuales en su concepción teórica no satisfacen equilibrios de fuerzas o de momentos. Los valores de factores de seguridad que se obtienen por estos dos métodos generalmente, difieren en forma importante de resultados utilizando procedimientos que satisfacen el equilibrio, como son los métodos de Spencer y de Morgenstern-Price. Los métodos que satisfacen en forma más completa el equilibrio son más complejos y requieren de un mejor nivel de comprensión del sistema de análisis (Suarez, 1998).

### **2.4.3. Método de retro análisis**

El análisis retrospectivo (*back analysis*) es usado comúnmente en la ingeniería geotécnica para estimar la resistencia in situ del suelo. Esta resistencia se representa generalmente por los parámetros de resistencia al corte en tensiones efectivas de Mohr-Coulomb, cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ). El análisis retrospectivo de fallas de taludes es un método efectivo que incorpora importantes factores que muchas veces no son bien representados en ensayos de laboratorio, tales como la estructura del suelo, la no homogeneidad, influencia de fisuras en la resistencia al corte y el efecto de los planos de debilidad dentro de la masa de suelo (Arellano, Bielefeldt, & Correa, 2009).

El análisis retrospectivo asume un factor de seguridad igual a la unidad y considera la geometría original en el momento de la falla. Luego se estima la resistencia al corte del suelo que fue movilizada en la falla consistente con un modelo 2D realizado con un método seleccionado (Morgenstern-Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc.) para un  $FS=1$ . En muchos casos se dispone de poca información de las condiciones bajo las cuales ocurrió un deslizamiento, lo que reduce la confiabilidad de los valores de  $c$  y  $\phi$  obtenidos mediante análisis retrospectivo. Estos valores pueden ser utilizados para analizar la estabilidad de otros taludes en la misma formación geológica y recomendar medidas de estabilización si corresponde (Arellano, Bielefeldt, & Correa, 2009).

### **2.4.4. Factor de seguridad - FS**

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Suarez, 2009).

En un talud estable hay un equilibrio entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad. Si se colocan cargas adicionales en la parte superior del talud o se remueven en el pie, se puede

producir la inestabilidad de éste. Igualmente, la inestabilidad puede ocurrir por el aumento de la pendiente del talud (Suarez, 1998).

Por lo general, se tiende a asegurar la calidad o el buen comportamiento de un talud a partir del concepto de factor de seguridad global (fs). Este valor se usa para examinar el estado de la estabilidad de los taludes. El factor de seguridad global es un concepto que se origina del método de equilibrio límite en el análisis de estabilidad de taludes. Este factor es un índice que expresa la relación entre: la resistencia de corte media del material del macizo a lo largo de una potencial superficie de ruptura vs. la resistencia de corte estrictamente necesaria para mantener el terreno en equilibrio (Ludger & Suarez-Burgoa, 2016), expresada de la siguiente manera:

$$FS = \frac{\text{Resistencia al corte}}{\text{Esfuerzo al cortante}}$$

Terzaghi (1950), hizo una diferenciación entre los factores externos e internos que afectan la ocurrencia de los deslizamientos. Tanto las causas internas como las externas, afectan el estado de equilibrio de un talud de dos maneras diferentes o por la combinación de la disminución de la resistencia al cortante y el aumento de los esfuerzos de cortante. Las causas internas, son mecanismos que producen una reducción en la resistencia al cortante a un punto tal que inducen una falla (Bell 1983), tales como: meteorización, presión de poros, etc., la lluvia produce modificaciones en la humedad y en la presión de poros lo cual afecta la resistencia del suelo, mientras que las causas externas, son los mecanismos por fuera de la masa afectada, los cuales son responsables de un aumento de los esfuerzos por encima de la resistencia al cortante, tales como: sobrecargas, cortes, sismos, vibraciones, etc., (Suarez, 1998).

## **2.5. Movimientos en masa**

Como lo menciona Suarez (2009) los deslizamientos de tierra son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daños en las propiedades, por valor de decenas de billones de dólares cada año. Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra, debido a que generalmente se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tales como el relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas.

### **2.5.1. Tipos de movimientos en masa**

Hungr (2013) propuso la clasificación de los movimientos en masa en base al tipo de movimiento (dinámica) y si éstos se desarrollan en rocas o suelo, para este trabajo se

ha modificado la tabla mostrada en Hungr con respecto a los tipos de movimientos encontrados en la zona, como se muestra a continuación:

**Tabla 2. 2** Clasificación de los movimientos en masa encontrados en la zona. Modificada de Hungr, Leroueil, & Pcarelli, 2013.

Tipo de movimiento	Suelo
Caída	Cantos rodados, escombros o limo
Deslizamiento	Rotacional de arcilla / limo
	Traslacional de arcilla / limo
	Escombros, grava y arena
Derrumbe	Grava, material meteorizado

Hungr describió estas tipologías de la siguiente manera:

- Caída de cantos rodados, escombros o limo: Desprendimiento, caída, balanceo y rebote de fragmentos de suelo como grandes clastos en depósitos de suelo o bloques de suelo cohesivo (cementado o no saturado). El mecanismo de propagación es similar a la caída de rocas, aunque los impactos pueden reducirse fuertemente por la debilidad de las partículas en movimiento.
- Deslizamiento rotacional de arcilla / limo: deslizamiento de una masa de suelo (homogéneo y usualmente cohesivo) sobre una superficie rotacional de ruptura. Existe poca deformación interna con el escarpe principal sobresaliente y la cabeza deslizada hacia atrás, presenta velocidades de lentas a rápidas, pero puede ser extremadamente rápido en suelos sensibles o colapsables.
- Deslizamiento traslacional de arcilla / limo: deslizamiento de un bloque de suelo cohesivo sobre una superficie de ruptura planar inclinada, formada por una capa débil (a menudo pre cizallada). La cabeza de la masa deslizante se separa del suelo estable a lo largo de una grieta de tensión profunda (sin cuña activa). Puede ser lento o rápido.
- Deslizamiento de escombros grava / arena: deslizamiento de una masa de material granular sobre una superficie plana y paralela al suelo. Usualmente, la masa deslizante es una capa de coluvial, tierra meteorizada o depósitos piroclásticos deslizándose sobre un sustrato más fuerte. Muchos deslizamientos de escombros se vuelven fluidos después de moverse una corta distancia y transformarse en avalanchas de escombros extremadamente rápidos.

- Derrumbe: los derrumbes son movimientos de material meteorizado o erosionado, en taludes de menor pendiente y que bajan disgregados por la interacción entre fragmentos y fricción con el talud.

### **2.5.2. Inventario de movimientos en masa**

Un inventario de movimiento en masa es un registro ordenado de la localización y las características individuales de una serie de movimientos ocurridos en un área dada, y pueden emplearse para análisis de sensibilidad o importancia de un cierto factor en la condición de estabilidad de una ladera: por ejemplo, qué unidad geológica es más susceptible a los deslizamientos, o qué altura y pendiente de ladera puede ser crítica en cierta unidad geológica (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, a los flujos de agua subterránea, a los cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad (Suarez, 2009).

## **2.6. Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes**

Los procesos que ocurren en un talud son generalmente complejos y dependen de una gran cantidad de factores, los cuales interactúan entre ellos para definir un comportamiento (Suarez, 2009). La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos como su altura e inclinación, factores geológicos que condicionan zonas de debilidad, factores hidrogeológicos como la presencia de agua y factores geotécnicos relacionados con el comportamiento del terreno (Gonzales de Vallejo, 2006).

En la mayoría de los casos son varias las causas que contribuyen al movimiento de una ladera, aunque con frecuencia se le atribuye a la acción de algún factor desencadenante o activo que pueden ser consideradas como factores externos que provocan o desencadenan inestabilidades como lluvias, terremotos, etc., mientras que los factores condicionantes o pasivos dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno como propiedades físicas y resistentes de los materiales, características morfológicas y geométricas de la ladera, estructura geológica y discontinuidades, condiciones hidrogeológicas y estados tenso-deformacionales (Gonzales de Vallejo, 2006).

Cuando se habla de estabilidad, se trata de encontrar la altura crítica del talud o la carga de colapso aplicada sobre una porción del talud, para una geometría y características

de suelo dados. Evaluar la estabilidad de un talud implica un estudio en el cual se debe, entre otros eventos: caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil del talud, así como las condiciones de filtración y agua subterránea, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, finalmente, a partir de este factor de seguridad (el cual se elige en base al destino del talud) se deberá determinar la superficie de falla crítica (Morel, Beneyto, Mrogiski, & Di Rado, 2008).

Para determinar la posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, es preciso realizar un análisis de estabilidad de taludes, para lo cual es necesario la integración y combinación de información y parámetros de los aspectos litoestratigráficos, topográficos y geotécnicos levantados en el área de estudio.

### **2.6.1. Levantamiento litoestratigráfico**

El termino litología se refiere al estudio y descripción del carácter físico de las rocas/suelo, especialmente, en ejemplares de mano y afloramientos. También se usa, como un término que se refiere a las características físicas de las rocas/suelo tales como: tipo, color, composición mineral y tamaño de grano. Así las unidades litoestratigráficas son unidades de roca/suelo que se definen teniendo en cuenta sus propiedades físicas, y la litoestratigrafía tiene que ver con el estudio de las relaciones estratigráficas entre rocas/depósitos que se pueden identificar con base en la litología (Blandón, 2002).

### **2.6.2. Características geomecánicas de los suelos**

Los ensayos de laboratorio tienen como finalidad la caracterización y cuantificación de las propiedades geotécnicas de los distintos tipos de materiales descritos en el trabajo de campo (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

Las propiedades resistentes de los materiales, suelos y macizos rocosos, se obtiene mediante ensayos *in situ* y de laboratorio adecuados y la aplicación de criterios y correlaciones empíricas. Los ensayos de laboratorio más característicos para el diseño o estudio de taludes son los de clasificación, identificación, corte directo en suelos y discontinuidades, comprensión simple, densidades, entre otros (Gonzales de Vallejo, 2006).

#### **Ensayos de resistencia**

##### **a. Ensayo de corte triaxial**

Es el ensayo de laboratorio más difundido para el estudio de la resistencia al corte de los suelos, esta prueba resulta muy versátil y permite obtener una buena y variada

información sobre la resistencia del suelo en diversas condiciones controlables a voluntad (Gonzales de Vallejo, 2006).

Su objetivo es determinar el ángulo de rozamiento interno y la cohesión del suelo, que permiten establecer la resistencia al esfuerzo cortante aplicando a las probetas esfuerzos verticales y laterales que tratan de reproducir las condiciones naturales, (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

El ensayo triaxial consiste en preparar una probeta cilíndrica de suelo, de altura doble del diámetro que se rodea de una membrana impermeable. Si se desea permitir el drenaje y controlar las presiones intersticiales en el interior de la muestra, se colocan además sendas piedras porosas en la base y en la parte superior de la probeta (Gonzales de Vallejo, 2006).

Los ensayos triaxiales se pueden clasificar en:

1. *Ensayo UU*, no consolidado no drenado o rápido, no se permite el drenaje de agua en ninguna fase, por lo que se produce una rotura rápida del suelo.
2. *Ensayo CU*, consolidado y no drenado o consolidado rápido, se permite el drenaje durante la primera etapa, solamente, por lo que la presión intersticial no es nula y se puede medir, mientras se continúa aumentando la fuerza hasta que se produzca la rotura obteniendo el círculo de Mohr en la situación de rotura en tensiones totales, la cohesión efectiva y el ángulo de rozamiento interno efectivo (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

Los ensayos triaxiales, se lo realizan con tres muestras del mismo suelo para presiones, en cámaras distintas y para cada muestra se representa el círculo de Mohr en la situación de rotura, obteniéndose los parámetros resistentes en situación de drenaje como la cohesión efectiva y el ángulo de rozamiento interno efectivo (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

## **Ensayos de densidad**

### **a. Densidad de muestra aparente**

La densidad aparente del suelo se define como la masa de una unidad de volumen de suelo seco a 105° C. Este volumen incluye tanto sólidos como los poros, por lo que la densidad aparente refleja la porosidad total del suelo. Valores de densidad aparente bajos indican una condición porosa del suelo. La densidad aparente es un parámetro muy importante para describir la calidad del suelo y la función del ecosistema. Los valores de densidad aparente altos expresan un ambiente pobre para el crecimiento de

raíces, aireación reducida y cambios indeseables en la función hidrológica como reducción de la velocidad de infiltración del agua (Gómez, 2013).

## Análisis granulométricos

### a. Métodos de análisis granulométricos

**Tamizado:** Para partículas grueso-granulares (gravas, arenas). Una vez se pasa el suelo por la estufa y se pulveriza, se hace pasar por una serie organizada de tamices con diámetros de agujeros de tamaños decrecientes y conocidos. El primer tamiz es el de mayor tamaño y es donde se inicia el tamizado, el grupo se protege tapándolo con el fin de evitar pérdidas de finos; el último tamiz está abajo y se apoya sobre un recipiente de la misma forma que los tamices y es el que recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz, con sacudidas horizontales y golpes verticales, mecánicos o manuales, se hace pasar el suelo para luego pesar por separado el suelo retenido en cada malla (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

### b. Curvas granulométricas

Los resultados de los ensayos de tamizado y sedimentación se representan en un gráfico denominado curva granulométrica, definida por un número de puntos equivalentes al número de tamices utilizados, en el eje de las abscisas, a escala logarítmica se representa el diámetro del tamiz y en las ordenadas, a escala aritmética, el porcentaje de muestra que pasa por un determinado tamiz (Figura 2.7) (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

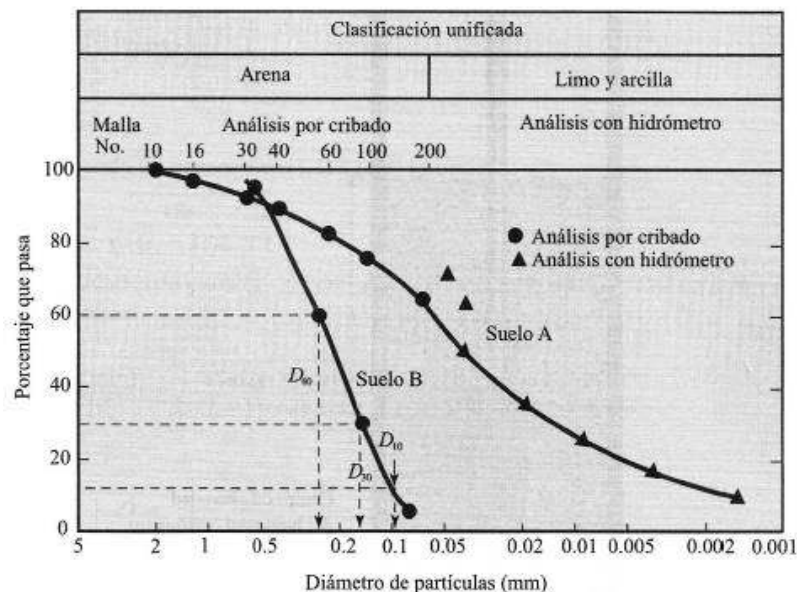


Figura 2. 7. Curva granulométrica. Tomado de Das, 2014.

### c. Clasificación del suelo

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos y subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada (Figura 2.8) (Mazariegos, Escolano, & Sánchez, 2015).

**Tabla 2. 3** Sistema unificado de clasificación de suelos – SUCS. Modificado de (Bosch, 2010).

DIVISIONES PRINCIPALES			SÍMBOLO DEL GRUPO	NOMBRE CLÁSICO	MÉTODO DE IDENTIFICACIÓN EN CAMPO EXCLUYENDO PARTÍCULAS MAYORES DE 75 mm			
Suelos de grano grueso Más de la mitad del material es mayor que el t. n° 200	GRAVAS Más de la mitad de los gruesos es >5mm	Para clasificación visual el tamiz n°4 equivale a 5 mm	Gravas limpias (poco ó ningún fino)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, poco ó ningún fino	Amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos		
			Gravas con finos (apreciable cantidad)	GP	Gravas pobremente graduadas, mezclas de grava y arena, poco ó ningún fino	Predomina un tamaño ó una serie de tamaños faltando algunos tamaños intermedios		
			Gravas con finos (apreciable cantidad)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	Finos no plásticos ó con baja plasticidad (para procedimiento de identificación ver grupo ML)		
				GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla	Finos plásticos (para procedimiento de identificación ver grupo CL)		
			ARENAS v Más de la mitad de los gruesos es	Para clasificación visual el tamiz n°4 equivale a 5 mm	Arenas limpias (poco ó ningún fino)	SW	Arenas bien graduadas, arenas con grava, poco ó ningún fino	Amplio margen de variación del grano y cantidades importantes de todos los tamaños intermedios de los granos
					Arenas con finos (apreciable cantidad)	SP	Arenas pobremente graduadas, arenas con grava, poco ó ningún fino	Predomina un tamaño ó una serie de tamaños faltando algunos tamaños intermedios
	Suelos de grano fino Más de la mitad del material es menor que el t. n°200	El tamaño del tamiz n° 200 es aproximadamente la menor partícula visible a simple vista	Limos y arcillas. Limite líquido menor que 50	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo	Finos no plásticos ó con baja plasticidad (para procedimiento de identificación ver grupo ML)		
				SC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla	Finos plásticos (para procedimiento de identificación ver grupo CL)		
				<b>Método de identificación en la fracción menor de tamiz n° 40 (0.4 mm)</b>				
					<b>Resistencia a la rotura</b>	<b>Dilatación</b>	<b>Plasticidad</b>	
				ML	Limos inorgánicos de baja compresibilidad	Ninguna a ligera	Rápida a lenta	Ninguna
				CL	Arcillas inorgánicas de baja a media compresibilidad arcillas con gravas, arcillas arenosas, arcillas limosas	Media a alta	Ninguna a muy lenta	Media
OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja compresibilidad	Ligera a media	Lenta	Ligera				
Limos y arcillas. Limite líquido mayor que 50	MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad	Ligera a media	Lenta a ninguna	Ligera a media			
	CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad	Alta a muy alta	Ninguna	Alta			
	OH	Arcillas y limos orgánicos de media a alta compresibilidad	Media a alta	Ninguna a muy lenta	Ligera a media			
Suelos altamente orgánicos			Pt	Turba y otros suelos altamente orgánicos	Fácilmente identificable por el color, olor, tacto esponjoso y a menudo textura fibrosa			



### **2.6.3. Modelo digital de terreno**

Un modelo digital del terreno es un conjunto estructurado de datos que define la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Su finalidad es obtener una representación del relieve basados en dos tipos de modelos: vectorial y raster. El modelo vectorial está basado en entidades u objetos geométricos, definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices, los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos valores y TIN (red de triángulos irregulares adosados); el modelo raster se basa en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie, que en el caso de imágenes son los píxeles (Cuesta, 2007).

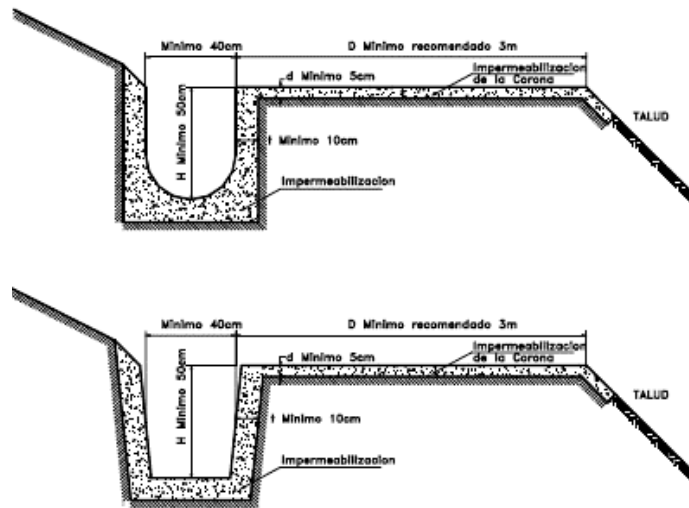
## **2.7. Medidas de estabilización de taludes**

La estabilización de los deslizamientos en actividad o potencialmente inestable, es un trabajo relativamente complejo que requiere de metodologías especializadas de diseño y construcción. Cada sistema tiene su base teórica y sus procedimientos constructivos (Suarez, 2009).

A continuación, se detallan las medidas de mitigación que se acoplan al área de estudio.

### **Zanjas de corona**

Las zanjas en la corona o parte alta de un talud son utilizadas para interceptar y conducir adecuadamente las aguas lluvias, evitando su paso por el talud. Estas no deben construirse muy cerca al borde superior del talud, para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento en cortes recientes o de una nueva superficie de falla (movimiento regresivo) en deslizamientos ya producidos; o se produzca la falla de la corona del talud o escarpe (Figura 2.8) (Suarez, 2009).



**Figura 2. 8** Detalle de zanjas de coronación para el control de aguas superficiales en un talud. Tomado de Suarez (2009).

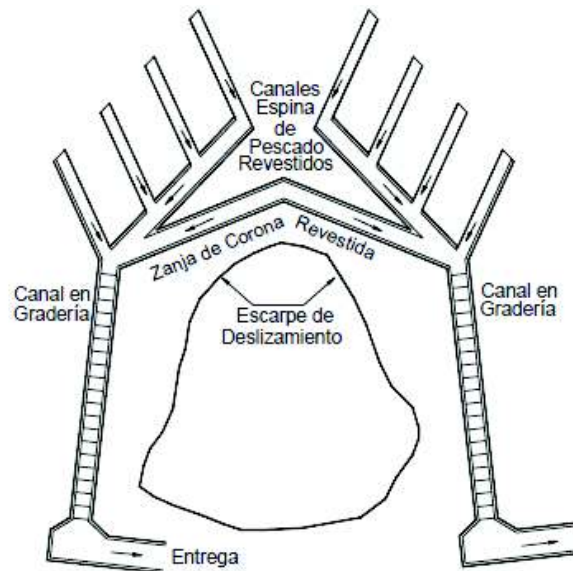
Las dimensiones y ubicación de la zanja pueden variar de acuerdo a la topografía de la zona y al cálculo previo de caudales colectados. Generalmente, se recomienda una zanja rectangular de mínimo 40 centímetros, de ancho y 50 centímetros de profundidad. Se procura que queden localizadas a lo largo de una curva de nivel para un correcto drenaje y que estén suficientemente atrás de las grietas de tensión en la corona. La separación mínima recomendada es de tres metros del borde de la corona (Suarez, 2009).

Se recomienda que las zanjas de coronación sean totalmente impermeabilizadas, así como debe proveerse una suficiente pendiente para garantizar un rápido drenaje del agua captada. Además, se debe adicionar con un correcto mantenimiento. Se sugiere que al menos cada dos años se deben reparar las zanjas de coronación para impermeabilizar las fisuras y grietas que se presenten (Suarez, 2009).

### **Canales interceptores a mitad de talud**

En suelos susceptibles a la erosión se recomienda construir canales de drenaje transversales a mitad de talud. Se recomienda construir canales interceptores en todas y cada una de las bermas intermedias del talud. Estos canales deben revestirse apropiadamente conduciendo las aguas a graderías de disipación de energía. Los canales a mitad de talud deben tener una pendiente tal que impida la sedimentación de materiales. Es muy común que estos canales se construyan con pendientes muy bajas y al taponarse produzcan cárcavas de erosión localizadas (Figura 2.9) (Suarez, 2009).

Las bermas deben ser lo suficientemente anchas para que exista un sobrecancho de protección para los canales, en el caso de producirse derrumbes de las coronas de los taludes resultantes (Suarez, 2009).



**Figura 2. 9** Esquema en planta de canales colectores. Tomado de (Suarez, 2009).

### **Concreto lanzado**

Es una mezcla de cemento y agregados, los cuales se pueden colocar en seco o por vía húmeda; generalmente, se ubica una malla de refuerzo previamente. Para facilitar el drenaje, se deben construir huecos o lloraderos que atraviesen la superficie de recubrimiento y de esta forma, evitar las presiones de poros por represamiento del agua subterránea. El concreto lanzado tiene la facilidad que se puede aplicar sobre superficies irregulares, pero es sensible a los asentamientos y agrietamientos (Suarez, 2009).

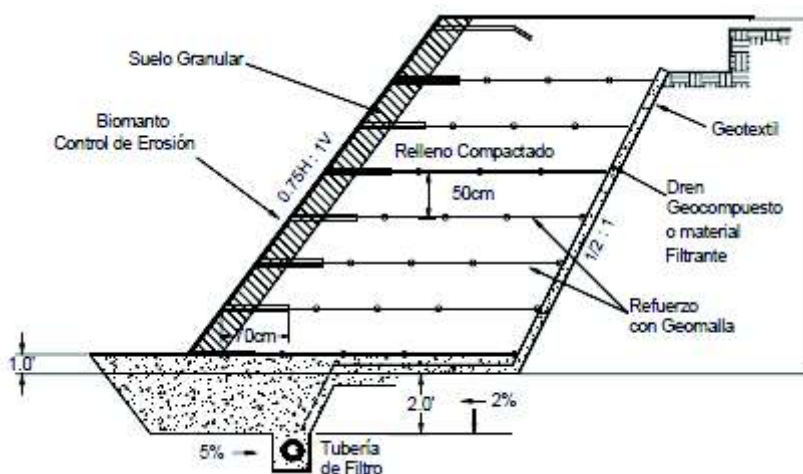
Este tipo de concreto, rellena los espacios entre la roca y produce una estructura de retención superficial, sin embargo, no impide totalmente el deslizamiento y se requiere en muchos casos que vaya acompañado de pernos o anclajes. El concreto lanzado debe reforzarse superficialmente utilizando una malla metálica (Figura 2.10) (Suarez, 2009).



**Figura 2. 10** Colocación del concreto lanzado. Tomado de (Suarez, 2009)

### Refuerzos geosintéticos

Generalmente se utilizan productos elaborados con polímeros. Las geomallas de polietileno de alta densidad (HDPE), comúnmente consisten en mallas uniaxiales, las cuales son ofrecidas comercialmente en hasta 6 diferentes resistencias, las geomallas de poliéster cubierto con PVC, generalmente consisten en geomallas que están caracterizadas por una tenacidad alta de las fibras de poliéster en el sentido longitudinal y los geotextiles de polipropileno o de poliéster son tejidos de alta resistencia, los cuales se utilizan principalmente para la estabilización de taludes (Figura 2.11) (Suarez, 2009).



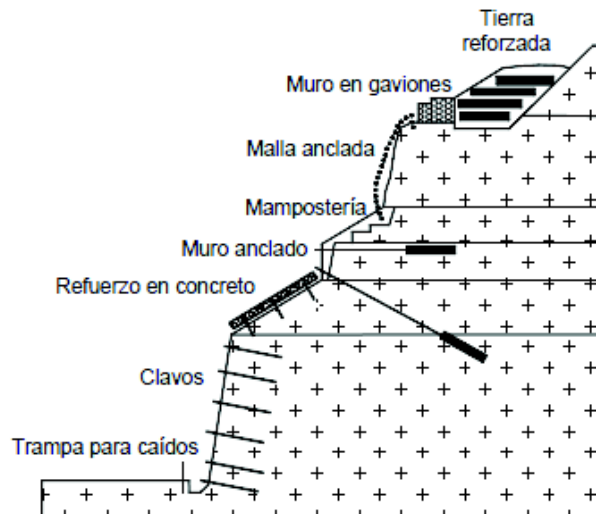
**Figura 2. 11** Esquema de una estructura de contención de suelo reforzado con geomalla. Tomado de (Suarez, 2009).

### Estructuras de contención

Según Suarez (2009), las estructuras de contención de tierras tienen por objeto la colocación de fuerzas adicionales que resistan el movimiento, el objetivo es colocar

fuerzas externas que aumenten las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes. Cada tipo de estructura tiene un sistema diferente de trabajo y se deben diseñar de acuerdo con su comportamiento particular. Entre los sistemas de contención para la remediación de deslizamientos, se encuentran los siguientes (Figura 2.12):

- Estructuras de gravedad, son muros que trabajan como un peso o contrafuerte en la parte inferior de un movimiento. Entre los tipos de muro de gravedad se encuentran los muros en concreto simple, concreto ciclópeo, gaviones, criba, mampostería, enrocado y muros MSE. El peso es un factor determinante en este tipo de estructura. Los muros de gravedad son rígidos a flexibles de acuerdo con el tipo de material utilizado para su construcción y son muy eficientes para estabilizar los deslizamientos poco profundos (Suarez, 2009).
- Estructuras ancladas, consisten en la perforación de inclusiones de acero dentro del suelo, las cuales comúnmente se inyectan para formar bulbos de anclaje o se cementan en toda su longitud, generalmente, se complementan con una pantalla o muro sobre la superficie del terreno en el cual se apoyan las anclas (Suarez, 2009).
- Estructuras de anclaje o refuerzo, incluyen cables o varillas que se colocan dentro del suelo para reforzarlo o para transmitir cargas a los suelos o rocas a profundidad. En este tipo de estructura están incluidos los pernos, los muros anclados, los nails y los micropilotes. De acuerdo con las características del talud y las necesidades de comportamiento, se escoge el tipo de anclaje más eficiente para el caso específico (Suarez, 2009).



**Figura 2. 12** Estructuras de contención. Tomado de (Suarez, 2009).

### 3. CAPÍTULO III: ASPECTOS METODOLÓGICOS

El análisis de estabilidad de taludes es parte de la práctica de la Geotecnia, teniendo como finalidad analizar las condiciones de estabilidad de los taludes naturales y la seguridad y funcionalidad del diseño en los taludes artificiales (Sackschewski, 2017).

Para efectuar el análisis de estabilidad de taludes en el tramo de 13 kilómetros de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante se realizó la interpretación de la información geológica obtenida en el levantamiento litoestratigráfico, las características geomecánicas de los suelos obtenidas de los ensayos de laboratorio y en el modelo digital de terreno, siguiendo la metodología en función del siguiente diagrama de flujo:

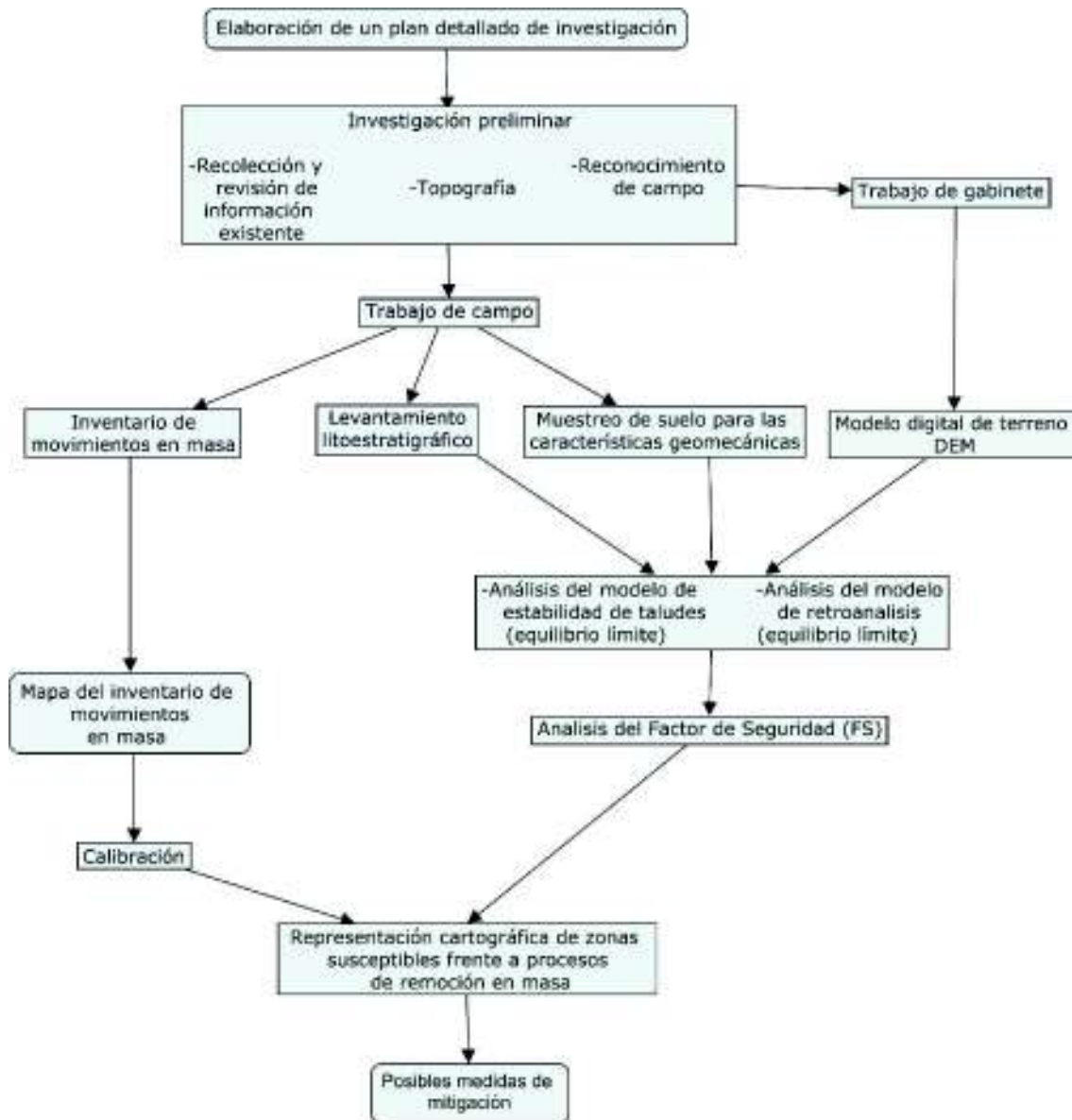


Figura 3. 1 Diagrama de flujo para realizar el análisis de estabilidad de taludes y soluciones.

Fuente: propia.

Como parte de la investigación preliminar se cuenta con archivos tipo *shape* y *raster* de una base de datos del año 2017, proporcionados por la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, estos archivos han sido procesados dentro de una base de datos en el programa *ArcGis 10.4.1*, generando una base de datos restringida al área de estudio para su mejor procesamiento, teniendo así archivos locales de: lotes, sectores barriales, administraciones zonales, ríos y quebradas, vías y el modelo digital de terreno (DEM por sus siglas en inglés).

### **3.1. Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes**

#### **3.1.1. Levantamiento litoestratigráfico**

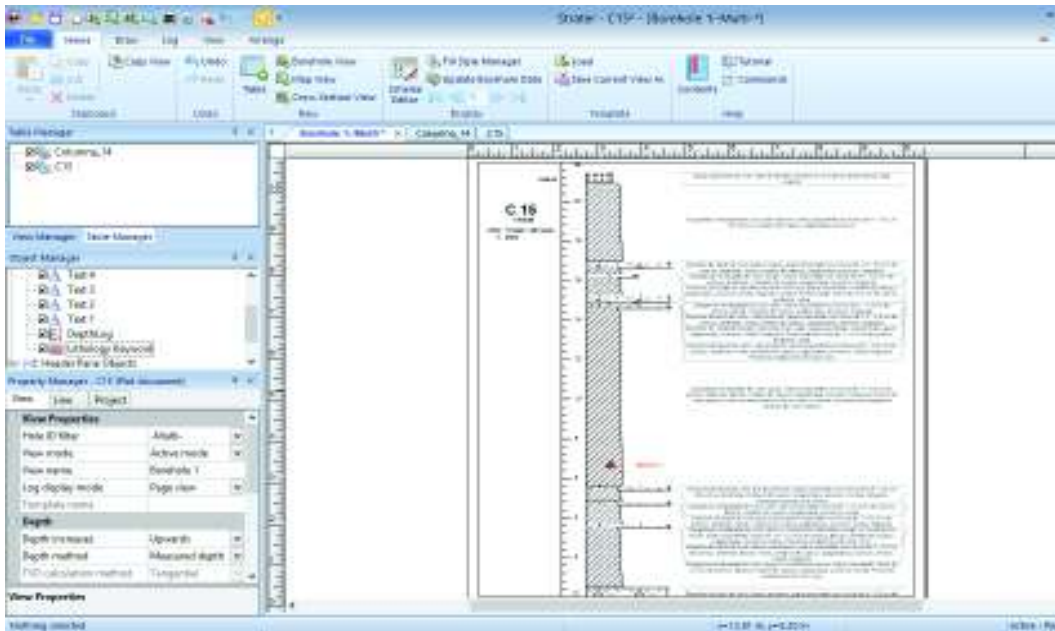
Como parte del trabajo de campo se realizó el levantamiento de columnas litoestratigráficas, en los taludes generados durante la construcción de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante. Algunos de estos taludes están cubiertos por cemento o mallas de contención, sin embargo, la mayoría se encuentran parcialmente cubiertos por vegetación herbácea, lo cual permitió el levantamiento de la información. Las columnas fueron levantadas de acuerdo a los afloramientos encontrados en la zona de estudio (Anexo 1).

Para el levantamiento, se realizó la descripción petrográfica de los materiales en los diferentes estratos, mediante una descripción de color, tamaño de grano, composición mineralógica, espesor del estrato, estas características fueron observadas de manera macroscópica por medio de una lupa de 20x y representadas gráficamente con un bosquejo inicial a escala en la libreta de campo.

Una vez terminado el trabajo de campo, la información fue procesada en gabinete utilizando el programa *Strater 5* en versión demo, obteniendo un esquema de representación de las columnas estratigráficas levantadas.

El programa *Strater 5* en versión demo se basa en códigos para representar cada atributo de la columna estratigráfica, por lo cual se trabaja en conjunto con el programa *Excel*. Para cada columna se elaboró una base de datos en *Excel* en la cual se representaron las características principales como: el nombre y ubicación de la columna, el espesor de cada capa, la litología de los materiales encontrados *in situ* con los respectivos tamaños de grano que varían de 1 a 100%, siendo 100% tamaño grava y 1% tamaño arcilla, además del tipo de gradación representados con una granulometría homogénea, creciente o decreciente.

Al validar las propiedades con los códigos respectivos del programa Strater 5 se obtuvieron los esquemas de cada columna estratigráfica, para mejorar la representación se añadió texto, leyenda, escala (Figura 3.2).



**Figura 3. 2** Esquema final de la columna 15, desarrollada en el programa Strater 5.

### **3.1.2. Características geomecánicas de los suelos**

Los parámetros de las características geomecánicas se obtuvieron mediante ensayos de suelo, realizados por el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Escuela Politécnica Nacional. El muestreo se realizó en los diferentes niveles de estratos, a lo largo del área de estudio, para lo cual se utilizaron las columnas estratigráficas levantadas. Las muestras se tomaron en función de la litología encontrada, siendo prioridad tener un ensayo por estrato de la columna. Además, dependiendo de la litología también se designó el tipo de ensayo con su respectiva toma de muestra. La ubicación de los ensayos se encuentra representada en el mapa del Anexo 1.

Para la toma de muestra de suelos en cangahua se utilizó el método denominado calicatas, este trabajo se efectuó de manera manual y consistió en obtener una muestra “inalterada” de suelo que conserve las características intrínsecas del material tales como humedad natural, cohesión, etc. Primero se limpió el terreno, lo cual asegura que el material orgánico superficial (vegetación herbácea) sea eliminado y no comprometa la muestra, después se realizó la excavación hasta obtener muestras de cangahua retrabajada (*in situ*) en forma cúbica que varían de 50 a 80 cm por lado, inmediatamente



se cubrió la muestra con plástico y fue etiquetada, se la guardó en una caja de madera. Finalmente fue transportada al laboratorio (Fotografía 3.1).

Para las capas de tefras o caídas de lapilli y cenizas volcánicas, las cuales se considera como materiales disgregados y se presenta como estratos intercalados en el talud se realizaron ensayos SUCS, el muestreo consiste en la recolección de este material suelto ya que no se puede realizar calicatas. En primer lugar, con la herramienta adecuada, se tomó el material disgregado de la capa para después colocarlo en una funda plástica de muestreo y etiquetarlo, para finalmente ser transportada al laboratorio.



**Fotografía 3. 1** Muestreo de suelos para realizar ensayos triaxiales. Coordenada UTM X: 778108 Y: 9972553 Z:3069

### **Ensayo triaxial UU y CU**

En laboratorio, el ensayo UU requiere de la división del bloque del muestreo in situ, en bloques más pequeños para obtener al menos tres cilindros, para esto, los bloques menores fueron tallados utilizando un cuchillo y una sierra de alambre fino de tal manera que la altura sea el doble del diámetro. Este tallado se realizó de forma cuidadosa, tratando que el material no se agriete, el tamaño del cilindro se mide con un molde, de esta manera se llega a las proporciones adecuadas que son de 35 mm de diámetro y una altura aproximada de 70 mm.

Para cada cilindro preparado se tomaron las medidas de altura, diámetro y peso, las cuales varían entre 75.1 y 78.1 mm de altura; 35 y 37 mm de diámetro superior, 35.3 y 37.8 mm de diámetro medio, 35.3 y 39 mm de diámetro inferior y un peso variable de entre 105 y 137 gr, luego se colocaron en la base una piedra porosa y papel filtro, y se

revistieron con una membrana de caucho asegurada con bandas elásticas en parte superior e inferior tratando de eliminar las burbujas que puedan quedar, después se colocó la muestra en la base de la cámara triaxial.

Para la realización del ensayo triaxial UU se aplicó una carga que varía entre 0.00 kg hasta 56.51 kg, en función de las diferentes probetas ensayadas.

Para realizar el ensayo triaxial CU, se realiza el mismo procedimiento y preparación de las muestras descritas para el ensayo triaxial UU, sin embargo, este ensayo comprende una primera fase de consolidación que consistió en la aplicación de una presión isotrópica (igual en todas direcciones) dentro de la cámara y de una presión intersticial, este proceso se lo realiza con la válvula de drenaje libre (abierto), en una segunda fase se aplicó un esfuerzo desviador creciente hasta la rotura.

### **Análisis granulométrico**

Para realizar este análisis se tomó una muestra de cada uno de los bloques que fueron tallados para los ensayos UU y CU, siendo un total de 19 muestras con un peso variable de entre 60.22 y 175.40 gr, posteriormente se procedió a pesarlas, luego se armó una serie de tamices que van desde el tamiz No. ½" hasta el No. 200, el material pasó por los diferentes tamices con la ayuda de agua y el material retenido en cada tamiz posteriormente fue pesado y registrado, esta operación se realizó desmontando primero los tamices de mayor diámetro y depositando el contenido en cápsulas sobre la balanza.

### **Ensayo de límite líquido y límite plástico.**

Para el ensayo de límite líquido se tomaron 19 muestras de los bloques tallados tomados *in situ*, estas fueron colocadas en una cápsula en donde se trituraron con una espátula hasta obtener el material totalmente disgregado, se añadió agua con una pipeta hasta formar una mezcla, luego se colocó una porción de muestra en la cuchara de Casa Grande asegurando la horizontalidad, después utilizando un ranurador se dividió la muestra a la mitad, se giró la manija para levantar y dejar caer la cuchara a razón de 2 golpes por segundo hasta que la abertura se cierre, esto dependerá de la cantidad de agua que contiene la muestra. Para obtener el límite líquido es necesario repetir el proceso tres veces para 30-35, 20-25, 15-20 golpes.

Después de anotar los resultados obtenidos en la cuchara de Casa Grande, se colocó la muestra dentro de una cápsula y se procedió a pesarla y ponerla dentro del horno de secado para obtener los parámetros de humedad.

Para realizar el ensayo de límite plástico se tomó una porción de muestra de la mezcla preparada anteriormente, con la ayuda de la palma de la mano se hace rodar sobre una placa de vidrio, aplicando una presión constante para formar cilindros alargados de aproximadamente 3 mm. Si los cilindros se resquebrajan antes de llegar al diámetro deseado significa que la muestra necesita mayor cantidad de agua, si al llegar al diámetro correcto en la muestra se visualiza grietas significa que la humedad es la adecuada. Después se procede a recolectar las muestras dentro de una capsula para pesarla y luego ponerla dentro del horno de secado para obtener los parámetros de humedad.

Debido a las características propias de los depósitos de caída no fue posible realizar los ensayos triaxiales para obtener los parámetros geotécnicos, es así que se optó por realizar el ensayo de densidad de muestra para obtener datos de peso unitario, mientras que para los parámetros geotécnicos se infirió los datos utilizando el trabajo: propuesta de un modelo hidro-geotécnico para prevención de riesgos en taludes Caso: La Forestal - Av. Simón Bolívar – Quito.

El trabajo mencionado presenta una tabla resumen de las propiedades físico mecánicas de los taludes (sector La Forestal), en el cual se encuentran valores tanto de capas de cangahua como de depósitos de caídas, es así que, primero se diferenció tomando en cuenta que las capas de cangahua tiene una clasificación ML mientras que los depósitos de caída tienen una clasificación SM y valores de cohesión nulos debido a la ausencia de arcillas, es así que, los datos de cohesión y ángulo de fricción inferidos son 0 [kN/m<sup>2</sup>] y 18 [°] respectivamente.

### **3.1.3. Modelo digital de terreno**

El modelo digital de elevación del terreno, o DEM con sus siglas en inglés, fue proporcionado por la Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Este DEM tiene un tamaño de celda de 1x1 m/pixel. Debido a que el área de estudio cubre 13 km de las avenidas Gonzalo Pérez Bustamante y Simón Bolívar al suroriente del DMQ, el *DEM* fue recortado en función del tamaño del área de estudio, utilizando el *software ArcGis*.

Los datos que provee el archivo *DEM* se utilizaron como entrada para cuantificar las características de la superficie del suelo y representarlas mediante un perfil topográfico del terreno en el programa *ArcGis*, por lo cual se creó un *shape* de líneas que sirvieron de base para la generación de perfiles topográficos. La ubicación de estas líneas se encuentra en función de la distribución espacial de las columnas estratigráficas y los

ensayos de laboratorio, esto debido a que para una correcta modelación es necesario tener la mayor información posible para los perfiles (Anexo 1).

Para obtener cada perfil con datos de altura es importante la interpolación del *shape* de líneas creado con los datos del archivo DEM (Figura 3.3).

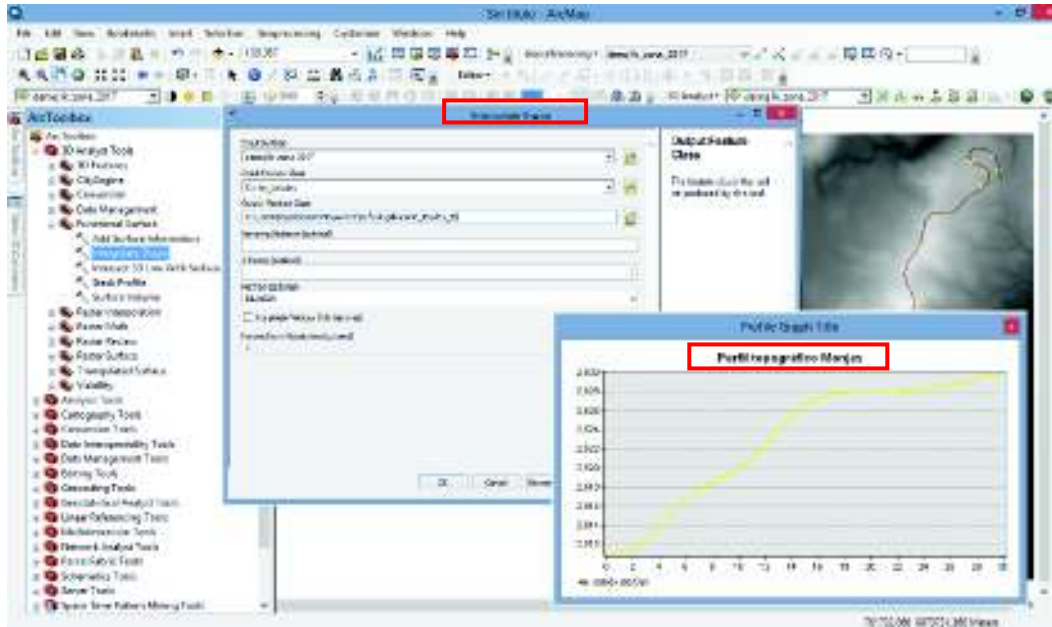


Figura 3. 3 Perfiles topográficos con datos 3D, desarrollados en el programa ArcGis.

## 3.2. Análisis de estabilidad de taludes

El estudio de estabilidad de taludes implica caracterizar la resistencia del suelo, establecer el perfil de talud, seleccionar una superficie de deslizamiento o falla y calcular su factor de seguridad, por lo cual, para la estabilidad de taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante fue necesario integrar y combinar la información y parámetros de los aspectos litoestratigráficos, topográficos y geotécnicos.

Es importante notar que para este análisis se aplicó el método de estabilidad de taludes y el método de retro análisis, para desarrollar el primero se utilizó datos geotécnicos que fueron levantados en el área de estudio, mientras que para el segundo método los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna fueron calculados metodológicamente a partir de un  $FS=1$

### 3.2.1. Método de estabilidad de taludes

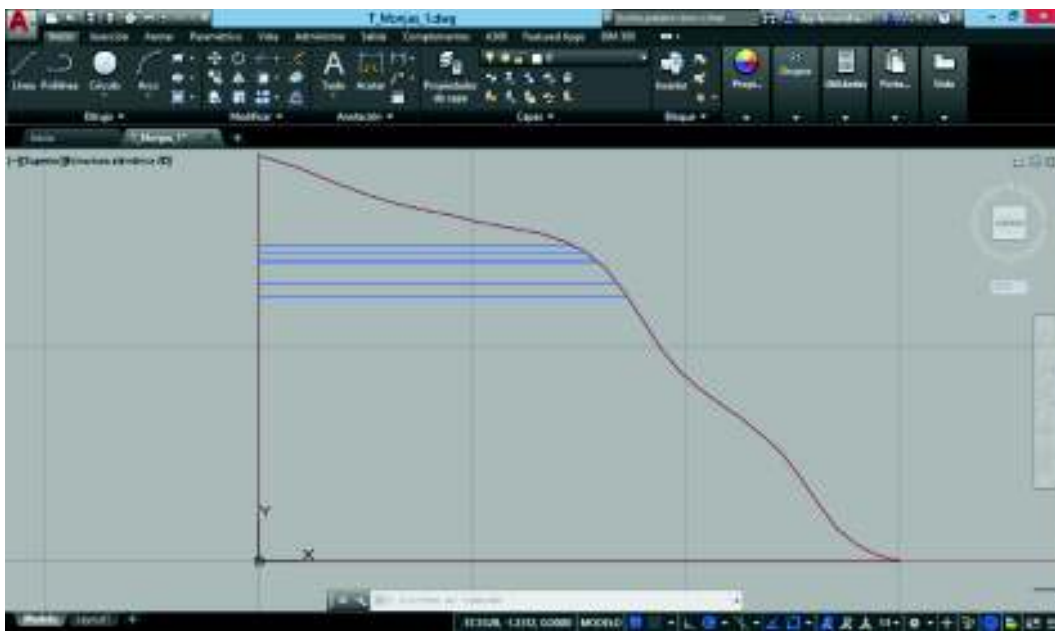
Este método se basa en estimar la estabilidad de taludes mediante la determinación del Factor de Seguridad y según el resultado obtenido, implementar medidas de estabilización adecuadas para reducir los impactos de movimientos en masa, para el

análisis se dispone de varias herramientas útiles para modelar y diseñar como son el uso de tablas o ábacos, análisis gráficos, cálculos manuales, uso de software.

Con el fin de facilitar el análisis y obtener resultados más precisos con un mayor número de iteraciones para este estudio se utilizó el software Slide versión 6.009 de la firma Rocscience, el cual trabaja con métodos de equilibrio límite y permite modelar las características de los taludes y el modo potencial de falla obteniendo los FS requeridos.

Es importante notar que el programa *Slide* trabaja con superficies cerradas de perfiles, por lo cual, para obtener la geometría del talud necesaria para el modelamiento se utilizó el programa AutoCAD 2018, obtenido en el sitio web *Autodesk*, el cual ofrece una licencia gratuita de tres años a estudiantes universitarios.

Para poder crear los polígonos se partió de los perfiles topográficos obtenidos del DEM, siendo importante conocer la altura y la distancia de cada perfil para poder crear las líneas que cerrarán el perfil, se tomó en cuenta también la orientación en la que se encuentran naturalmente el talud. Además, para completar el cuerpo geométrico se creó polilíneas que representan a los estratos de cada perfil para lo cual se utilizó la información levantada en cada columna estratigráfica (Figura 3.4)



**Figura 3. 4** Geometría del talud creada en el programa AutoCAD.

Como ya se mencionó, para el análisis de estabilidad de talud es necesario integrar la litología, el modelo digital de terreno y las características geotécnicas. Dentro del programa Slide la litología y el DEM se encuentran representados en el perfil y la geometría de las capas, los cuales son importados como archivos DXF, mientras que los parámetros geotécnicos como: peso específico, cohesión y ángulo de fricción interna

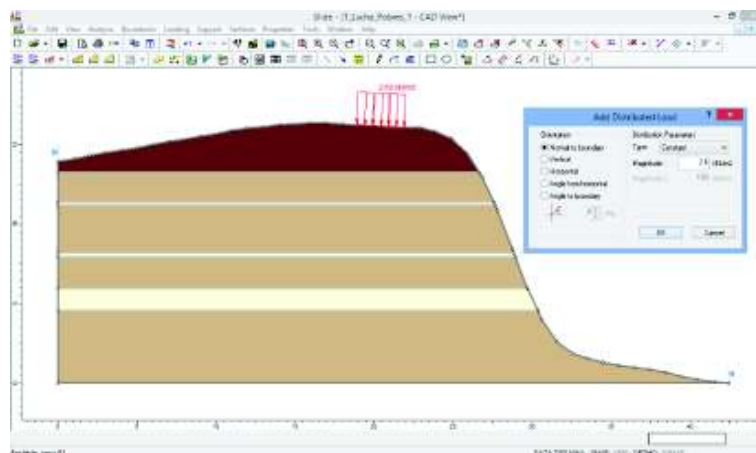
obtenidos como resultado de los ensayos de laboratorio fueron asignados uno por uno para cada perfil.

En los ensayos triaxiales UU y CU, se obtuvieron para un mismo material dos tipos de resultados en cuanto a parámetros de cohesión y ángulo de fricción, por lo cual se realizó modelaciones para condiciones naturales es decir considerando el suelo con su humedad natural y efectivas cuando en los ensayos de resistencia al corte se asegura el drenaje (ver valores de cohesión y ángulo de fricción interna en las tablas 4.2 y 4.3).

El software Slide permite modelar suelos homogéneos considerados como bloques rígidos, con superficies de deslizamiento de cualquier forma (recta, circular, espiral logarítmica) y con presencia de nivel freático, por lo cual una de sus principales características es que permite analizar la estabilidad del talud bajo diferentes modelos de equilibrio límite, tales como los propuestos por Fellenius ordinario, Bishop, Janbú simplificado, Corps of Engineers #1, Spencer y Morgenstern - Price, entre otros, todos ellos se encuentran explicados en el Capítulo 2.

Es así que para el cálculo de la estabilidad en este estudio se seleccionó los métodos de *Janbu simplified* y *Spencer*, ya que como se menciona en el capítulo II, tabla 2.4 ambos consideran cualquier forma de superficie de falla, lo cual se ajusta de manera satisfactoria con los criterios de superficies de falla encontradas en la zona (circulares y no circulares). Al trabajar con suelos el comportamiento de los materiales es modelado bajo el criterio de Mohr-Coulomb.

Con el fin de modelar los taludes con las características más cercanas a la realidad, se procedió a añadir cargas en los taludes en los cuales se observó en el trabajo de campo la presencia de viviendas u otras infraestructuras, esto para determinar la variación del FS por los efectos de la sobrecarga (Figura 3.5).



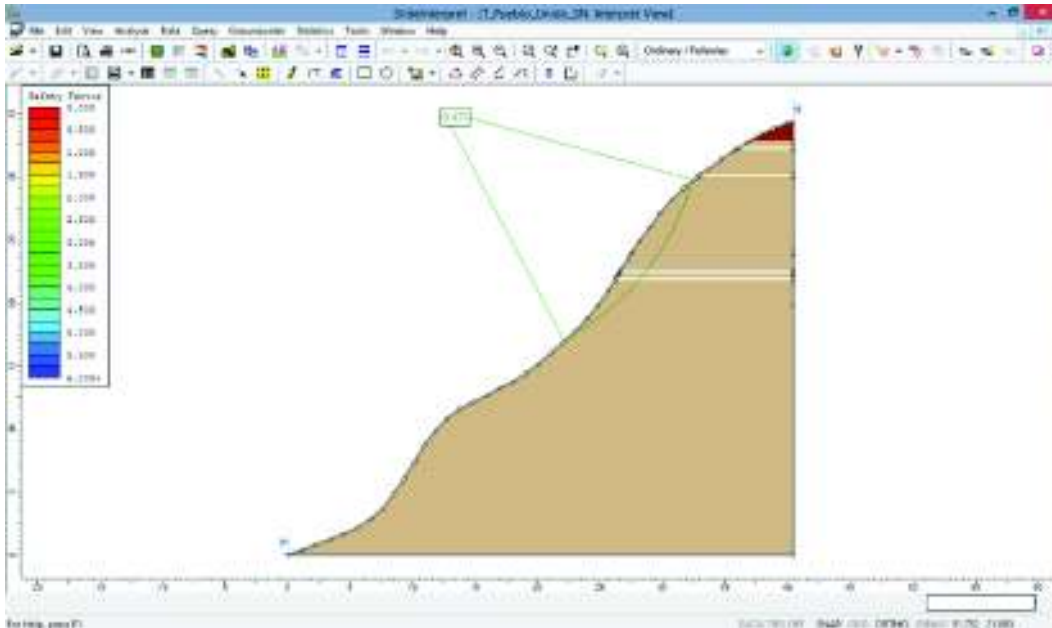
**Figura 3. 5** Estabilidad de taludes estático con carga.

Para el cálculo de la carga que ejerce cada construcción sobre el talud, se realizó una valoración de la misma en función del número de pisos de las viviendas, tipo de construcción, características generales de estructura (área de los plintos, longitud de las cadenas, longitud de vigas, peso de carpeta de compresión, nervios, bloques de alivianamiento). El resultado final es el peso por metro cuadrado de la edificación sobre el talud (tabla 3.2).

**Tabla 3. 1** Cargas sobre el talud en base a sus características.

Talud	Sector	Características	Descripción	Carga Construcción	
				[kg/m2]	[kN/m2]
P2	Valles del Sur	Back análisis- Estático con carga	La vivienda consta de tres pisos, la planta baja y media está constituida totalmente por hormigón armado, de dimensiones de 11.10 m de largo y 11 m de ancho, mientras que la planta alta consta de tres estructuras de bloque en las paredes y el techo con estructura de madera y cubierta de zinc, con dimensiones de 10 m de largo y 4.10 m de ancho, 2 m de largo y 2 m de ancho y 7.50 m de largo y 3.10 m de ancho.	1663.58	16.31
P5	Lucha de los Pobres	Estático con carga	La vivienda consta de un piso, constituido totalmente por una estructura de bloque en las paredes y el techo con estructura de madera y cubierta de zinc, de dimensiones 11.7 m de largo y 10.2 m de ancho.	264.69	2.60
P16	Loma de Puengasí	Efectivo-Carga	Las tres viviendas constan de un piso, constituido totalmente por una estructura de bloque en las paredes y el techo con estructura de madera y cubierta de zinc, dimensiones de la primera vivienda son: 10 m de largo y 5 m de ancho y de la segunda y tercera vivienda: 5 m de largo y 5 m de ancho.	378.67	3.71
P17	Conjunto habitacional La Carolina	Efectivo-Carga	La vivienda consta de dos pisos, planta baja constituida totalmente por hormigón armado, mientras que la planta alta consta de hormigón con techo de estructura de madera y cubierta metálica de zinc, con dimensiones de 7 m de largo y 10 m de ancho	832.96	8.17
P20	Patrimonio Familiar 2	Efectivo-Carga	La vivienda consta de dos pisos, la planta baja y alta están constituidas totalmente por hormigón armado, con dimensiones de 11 m de largo y 9.5 m de ancho en la primera planta y 9.5 m de largo y 9.50 m de ancho en la segunda planta.	667.46	6.55
P22	San José de Monjas	Efectivo-Carga	La vivienda consta de un piso, constituido totalmente por hormigón armado de dimensiones 24 m de largo y 10 m de ancho.	800.12	7.85

Una vez determinadas las propiedades de resistencia al cortante de los suelos y otras propiedades del talud, se procedió a calcular el Factor de Seguridad. Este análisis de estabilidad determina si existe suficiente resistencia en los suelos del talud para soportar los esfuerzos al cortante que tienden a causar la falla o deslizamiento. Los resultados de la falla asociada al mínimo Factor de Seguridad se presentan tal como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3. 6** Mínimo Factor de Seguridad, programa Slide – estabilidad de taludes estático

Siguiendo la metodología, se obtuvo para cada talud un mínimo Factor de Seguridad por cada método establecido. Para determinar la valoración de estabilidad según los factores obtenidos se utilizó la tabla 3.3, la cual indica que tan susceptible es el talud ante un deslizamiento.

**Tabla 3. 2** Intervalos para la clasificación de Factores de Seguridad. Fuente: *(Instituto Nacional de Concepciones, 2009)*

FS Estático	Clasificación
< 0.75	Inadmisible
0.75 – 1.00	Muy Bajo
1.00 – 1.25	Bajo
1.25 – 1.50	Aceptable
> 1.50	Ideal

Los valores de FS son datos puntuales dentro de un talud por lo cual fue necesario interpolar dichos datos a los taludes colindantes, para lo cual se utilizó como base los datos litológicos, geotécnicos y de pendiente, es así que los taludes cercanos que



poseen similares características obtuvieron una valoración de estabilidad igual, dicha interpolación se encuentra representada en los mapas con polígonos de diferentes colores: rojo, naranja, verde claro y verde oscuro catalogados como **inadmisible, muy bajo, bajo** y **aceptable** respectivamente.

### 3.2.2. Método de retro análisis (*back analysis*)

El análisis retrospectivo (*back analysis*) es usado comúnmente para estimar la resistencia *in situ* del suelo. Esta resistencia se representa generalmente por los parámetros de resistencia al corte en tensiones efectivas de Mohr-Coulomb: cohesión y ángulo de fricción interna, dichos parámetros son los que ejercen un mayor efecto sobre la estabilidad del talud, por lo cual objetivo de realizar este método es obtener estos parámetros cuando el Factor de Seguridad es igual a  $FS=1$ , el cual es el valor límite considerado para generación de la rotura.

Para estimar los parámetros resistentes de rotura de los movimientos en masa, se utilizó el software Slide versión 6.009 de la firma Rocscience, este análisis parte de la reconstrucción topográfica, por lo cual en este caso la capa de *External Boundary* en el programa corresponde a la superficie del talud anterior al deslizamiento mientras que el *Material Boundary* corresponde a la superficie del talud actual, la línea de contacto entre estas dos capas es la que actúa como superficie de rotura.

El análisis retrospectivo se lo aplicó a los taludes P2 y P12 ubicados en el sector Valles del Sur y La Forestal respectivamente, debido a que estos taludes presentan roturas no circulares se utilizó los métodos de Janbú simplificado y Spencer.

Definido los métodos y la geometría del talud se asignaron las propiedades de los materiales, en este caso se trabajó solo con las propiedades de la cangahua en condiciones naturales como efectivas, considerando un talud homogéneo, debido que para la reconstrucción topográfica el programa Slide considera un solo tipo de material tanto para el perfil antiguo como para el deslizado.

De igual forma para analizar los efectos sobre el FS generados por la sobrecarga, se procedió a añadir cargas en los taludes en los que se observó construcciones, en el trabajo de campo

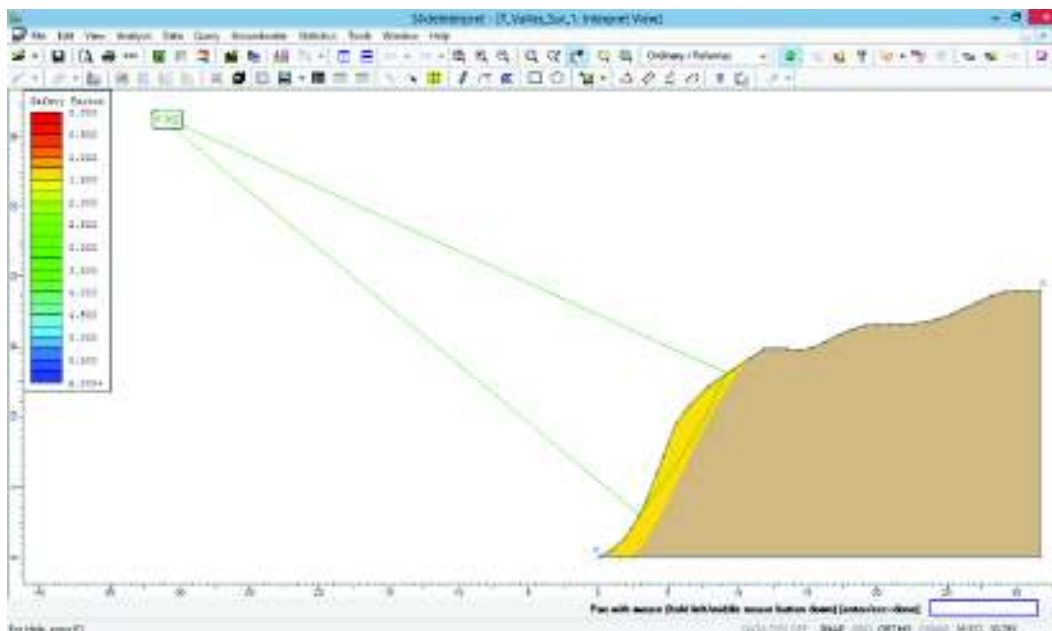
Luego, en la opción *Statistics* se seleccionó a la cangahua deslizada como la variable aleatoria para modificar al tanteo los valores de sus propiedades hasta obtener el factor de seguridad menor o igual a 1.

Es importante trazar la superficie de rotura, la cual no debe cortar el material que se encuentra *in situ*, para ello se utilizó la herramienta *Add Surface (three points)*, por las características del material con él se trabajó se consideró una superficie de rotura circular (Figura 3.7).



**Figura 3. 7** Dibujo de la superficie de rotura, herramienta Add Surface programa Slide.

Con las premisas dadas, se calculó el FS para la superficie de rotura determinada (Figura 3.8).



**Figura 3. 8** Cálculo del factor de seguridad, programa Slide

Finalmente, para obtener los valores de cohesión y ángulo de fricción en el que el factor de seguridad es la unidad, se interpretaron las gráficas de FS vs cohesión y FS vs ángulo de fricción, obtenidas con la herramienta *Sensitivity Plot*, en función de la curva dibujada.

Como ya se explicó el método de estabilidad de taludes se lo puede realizar con parámetros geotécnicos (cohesión y ángulo de fricción) obtenidos con ensayos de laboratorio de muestras in situ, una variación a este método es utilizar parámetros estimados, para ello y utilizando los valores obtenidos en el back analysis se realizó el análisis de la estabilidad de los taludes para condiciones críticas, es decir cuando FS es igual a la unidad.

### **3.3. Inventario de movimientos en masa - IMM**

Para el levantamiento del inventario de movimientos en masa se realizaron dos salidas de campo, la primera realizada el 05 de agosto de 2017, en la cual, se levantaron fichas de movimientos en masa a lo largo de los 13 kilómetros. La segunda salida se realizó el 17 de febrero de 2018 con la colaboración de los estudiantes de la materia Fenómenos de Remoción en Masa, semestre 2018–A de la carrera de Ingeniería Geológica de la Escuela Politécnica Nacional, para esta salida primero se realizó una inducción dirigida a los estudiantes con el propósito de presentar el formulario y la forma adecuada de completarlo, para el trabajo de campo los trece kilómetros fueron divididos en seis tramos de aproximadamente 2.2 kilómetros, para cada tramo fueron asignados tres estudiantes.

Para el levantamiento del inventario de movimientos en masa del área de estudio, se utilizó como base el formulario publicado en la guía de movimientos en masa para Latinoamérica desarrollada por el Proyecto Multinacional Andino, 2007, éste fue modificado en función de los objetivos, alcances y recursos que determinan este estudio (Figura 3.9).



**Tabla 3. 3** Guía para completar los campos del formulario de movimientos en masa. Adaptado de Proyecto Multinacional Andino (2007).

Encabezado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre del encuestador: Nombre (s) de la persona (s) que recopila los datos bien sea en campo, oficina o en ambos.</li> <li>Fecha: corresponde a la fecha en que se diligencia el formulario y no se debe confundir con la fecha de ocurrencia del evento que se solicita en el campo indicado de actividad del movimiento.</li> <li>Hora: corresponde a la hora en que se realiza el formulario.</li> </ul>
Localización geográfica – ubicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Localidad: corresponde al nombre del barrio en el caso de una ciudad.</li> <li>Coordenadas: deben darse en términos de grados, minutos y segundos (°, ', ") o indicando el tipo de proyección geográfica empleada.</li> <li>Referentes geográficos: se debe indicar algún accidente geográfico cercano o del mismo lugar de ocurrencia del evento, que permita localizar el movimiento con respecto él, por ejemplo, la distancia a un cruce de ríos o el abscisado de una vía.</li> </ul>
Actividad del movimiento – fecha de ocurrencia	<p>Este campo permite registrar la historia de ocurrencia del movimiento, se debe registrar la fecha conocida (o estimada) del primer movimiento y continuar hasta la fecha más reciente para el caso de reactivaciones o de eventos recurrentes.</p>
Tipo de movimiento	<p>En este espacio se propone una lista de siete tipos de movimientos con dos opciones para marcar en cada uno, ya que usualmente un evento de movimiento en masa suele involucrar más de un tipo de mecanismo. En las casillas bajo el número 1 se debe indicar el primer tipo de movimiento que ocurrió y en las que están bajo el número 2, el movimiento que siguió a éste.</p>
Litología y estratigrafía	<p>En el campo disponible se debe hacer una breve descripción de la litología y estratigrafía del área que conforma la ladera sobre la que ocurrió el movimiento.</p>
Nivel de humedad	<p>Humedad: tal como se muestra en el formulario, la humedad está subdivida en tres categorías: seco con saturación igual a 0%, húmedo con saturación <math>80\% &lt; S \leq 100\%</math> y muy húmedo igual a 100%.</p>
Causas del movimiento	<p>El formulario presenta un listado de las posibles causas del movimiento. Ya que varias de ellas pueden actuar bien como condicionante o como detonante del movimiento, se requiere indicar en los cuadros correspondientes todas aquellas que correspondan según el caso. Los aspectos en la columna izquierda representan los parámetros que reducen la resistencia al corte, mientras que los aspectos en la columna derecha representan los parámetros que aumentan los esfuerzos al cortante.</p>
Cobertura y uso del suelo	<p>En este caso en el cuadro a la izquierda se debe indicar el tipo de cobertura y tipo de uso del nombre. Se han dejado espacios con cuadros adicionales para otros tipos.</p>
Daños	<ul style="list-style-type: none"> <li>Población: se debe consignar el número de muertos, heridos o damnificados</li> <li>Infraestructura: En tipo se debe especificar el tipo de estructura afectada, por ejemplo: vivienda, hospital, vía, acueducto, bocatoma, línea de energía. En</li> </ul>

	intensidad y cantidad se debe especificar la cantidad de daño de acuerdo con la unidad de medida.
Esquema	Este espacio del formulario se debe utilizar para realizar un esquema en planta y perfil del movimiento, procurando emplear una escala apropiada con el mayor detalle posible de las características del mismo.
Registro fotográfico	El registro fotográfico del movimiento debe mostrar escenas relevantes del mismo. Se sugiere que al menos se tenga una foto panorámica, detalles del escarpe principal, del cuerpo principal y pie. Las fotografías deben incluir escala y fecha de toma.

Para completar la información se tomaron fotografías, al menos una por cada ficha levantada, algunas de estas fotografías se muestran en el anexo 4.

Los inventarios obtenidos de las salidas de campo fueron revisados, procesados y unificados de tal manera que se obtuvo una matriz general de la zona con la cual se generó el mapa de movimientos en masa, el cual permitió realizar una calibración de los resultados obtenidos en este trabajo en base a superposiciones entre el mapa de inventario de movimientos en masa con los mapas resultado del análisis de estabilidad de taludes para, de este modo, determinar el grado de concordancia, bajo la premisa de que la mayor cantidad de puntos de deslizamientos catalogados coincidan con una baja valoración del FS.

## 4. CAPÍTULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes

#### 4.1.1. Levantamiento litoestratigráfico

A lo largo de los 13 km que comprende el área de estudio, se levantaron 15 columnas estratigráficas, escogiendo los afloramientos más accesibles para el desarrollo de dicha labor (Anexo 1).

De manera general las capas se presentan periclinales (adaptadas a la topografía existente) y compuesta predominantemente por secuencias de cangahua retrabajada, depósitos de caída y en la parte superficial suelo orgánico.

En el Anexo 2, se muestra de forma general y detallada las características y descripciones petrográficas de cada columna.

#### 4.1.2. Características geomecánicas de los suelos

De los ensayos realizados por el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Escuela Politécnica Nacional, se obtuvieron un total de 7 triaxiales CU, 12 triaxiales UU, 5 densidades de muestra y 19 SUCS., tal como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 4. 1** Tipos de ensayos realizados en los diferentes niveles litológicos

CÓDIGO MUESTRA	LITOLOGÍA	TIPO DE ENSAYO			
		TRIAxIAL CU	TRIAxIAL UU	DENSIDAD DE MUESTRA	SUCS
MV_C1_1	Depósitos de caída			X	X
MV_C1_2	Cangahua retrabajada	X			X
MV_C2_1	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C2_2	Depósitos de caída			X	X
MV_C2_3	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C3_1	Depósitos de caída			X	X
MV_C3_2	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C3_3	Cangahua retrabajada		X		X
MV_C4_1	Cangahua retrabajada	X			X
SB_C6_1	Depósitos de caída			X	X
SB_C6_2	Cangahua retrabajada	X			X
SB_C6_3	Depósitos de caída			X	X
SB_C7_1	Cangahua retrabajada		X		X
SB_C9_1	Cangahua retrabajada		X		X
SB_C9_2	Cangahua retrabajada	X			X
SB_C10_1	Cangahua retrabajada		X		X

<b>SB_C10_2</b>	Cangahua retrabajada		X		X
<b>SB_C11_1</b>	Cangahua retrabajada		X		X
<b>SB_C11_2</b>	Cangahua retrabajada	X			
<b>SB_C12_1</b>	Cangahua retrabajada	X			
<b>SB_C13_1</b>	Cangahua retrabajada		X		
<b>SB_C13_2</b>	Cangahua retrabajada		X		X
<b>SB_C14_1</b>	Cangahua retrabajada		X		
<b>SB_C15_1</b>	Cangahua retrabajada	X			

En las siguientes tablas se ha resumido los resultados de los ensayos de laboratorio.

**Tabla 4. 2** Resumen de resultados obtenidos en los ensayos triaxiales UU

CÓDIGO	HUMEDAD	DENSIDAD	PESO UNITARIO	COHESIÓN		ANGULO FRICCIÓN
	%	gr/cm3	kN/m3	kg/cm2	kN/m2	°
<b>MV-C2-1</b>	21.11	1.73	16.95	0.86	84.34	29.90
<b>MV-C2-3</b>	6.58	1.57	15.39	0.99	97.09	56.66
<b>MV-C3-2</b>	15.35	1.53	14.99	0.97	95.13	40.36
<b>MV-C3-3</b>	21.94	1.61	15.78	0.74	72.57	35.75
<b>SB-C7-1</b>	17.36	1.66	16.27	0.78	76.49	35.75
<b>SB-C9-1</b>	23.44	1.45	14.21	0.33	32.36	46.67
<b>SB-C10-1</b>	27.43	1.76	17.25	1.30	127.49	34.22
<b>SB-C10-2</b>	50.51	1.45	14.21	0.05	4.90	54.46
<b>SB-C11-1</b>	38.55	1.66	16.27	1.45	142.20	39.35
<b>SB-C13-1</b>	14.82	1.81	17.74	0.63	61.78	48.24
<b>SB-C13-2</b>	34.72	1.52	14.90	0.52	51.00	56.31
<b>SB-C14-1</b>	15.16	1.55	15.19	1.66	162.79	44.42



Tabla 4. 3 Resumen de resultados obtenidos en los ensayos triaxiales CU.

CÓDIGO	HUMEDAD %	PARÁMETRO B %	DENSIDAD gr/cm3	PESO UNITARIO kN/m3	COHESIÓN		COHESIÓN EFECTIVA		ÁNGULO FRICCIÓN EFFECTIVO °	VELOCIDAD DE CARGA mm/min
					kg/cm2	kN/m2	kg/cm2	kN/m2		
MV-C1-2	34.30	100.00	1.67	16.37	0.91	89.24	0.79	77.47	20.81	0.15
MV-C4-1	44.06	100.00	1.47	14.41	0.52	50.99	0.37	36.28	16.17	0.15
SB_C6_2	17.46	100.00	1.57	15.39	0.26	25.50	0.12	11.77	41.67	0.15
SB_C9_2	4.59	100.00	1.44	14.11	0.83	81.40	0.72	70.61	40.36	0.15
SB_C11_2	27.48	100.00	1.61	15.78	0.60	58.84	0.41	40.21	26.10	0.15
SB_C12_1	24.59	100.00	1.60	15.68	1.38	135.33	1.09	106.89	25.64	0.15
SB_C15_1	30.29	100.00	1.35	13.23	0.13	12.75	0.28	27.46	50.89	0.15

Tabla 4. 4 Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de densidad de muestra.

CÓDIGO	TIPO DE ENSAYO	HUMEDAD %	DENSIDAD HUMEDA gr/cm3	DENSIDAD SECA gr/cm3	PESO UNITARIO kN/m3
MV-C2-2	Densidad de muestra	3.00	1.58	1.53	15.48
MV-C3-1	Densidad de muestra	1.94	1.21	1.19	11.86
SB-C6-1	Densidad de muestra	23.16	1.47	1.19	14.41
SB-C6-3	Densidad suelta	3.43	1.08	1.04	10.19
	Densidad compacta	3.43	1.27	1.23	12.45

**Tabla 4. 5** Resumen de resultados obtenidos en los ensayos de clasificación SUCS

Muestra	W %	LL %	LP %	IP %	Clasificación SUCS
MV-C1-1	14	NP	NP	NP	SM
MV-C1-2	32	33	21	12	ML-CL
MV-C2-1	22	24	22	1	ML
MV-C2-2	3	NP	NP	NP	SM
MV-C2-3	5	23	22	1	ML
MV-C3-1	6	NP	NP	NP	SM
MV-C3-2	16	NP	NP	NP	SM
MV-C3-3	22	NP	NP	NP	SM
MV-C4-1	45	43	37	6	ML
SB-C6-1	5	NP	NP	NP	SM
SB-C6-2	14	NP	NP	NP	ML
SB-C6-3	8	NP	NP	NP	SM
SB-C7-1	16	NP	NP	NP	SM
SB-C9-1	25	NP	NP	NP	SM
SB-C9-2	12	NP	NP	NP	SM
SB-C10-1	29	28	27	1	ML
SB-C10-2	48	57	53	5	MH
SB-C11-1	40	32	32	1	ML
SB-C13-2	29	41	40	1	ML

#### 4.1.3. Modelo digital de terreno

Con el procesamiento del DEM se logró obtener los datos de altura y pendiente de cada perfil (Tabla 4.6)

**Tabla 4. 6** Datos de altura y pendiente promedio.

Talud	Sector	Altura [m]	Pendiente [°]
P1	Valles del Sur	18.67	66
P3	Pueblo Unido	34.44	52
P4	Pueblo Unido	15.39	67
P5	Lucha de los Pobres	13.18	67
P6	Lucha de los Pobres	18.88	57
P7	Lucha de los Pobres	11.2	55
P8	Lucha de los Pobres	15.04	61
P9	La Argelia Alta	12.49	54
P10	La Argelia Alta	10.35	54
P11	La Argelia	24.84	60
P13	La Forestal	36.99	50
P14	La Forestal	11.07	58

P15	Loma de Puengasí	29.71	44
P16	Loma de Puengasí	23.44	65
P17	Patrimonio Familiar	19.87	53
P18	Patrimonio Familiar	20.77	54
P19	Patrimonio Familiar	21.19	60
P20	Patrimonio Familiar	15.86	61
P21	San Pedro de Monjas	18.9	55
P22	San Pedro de Monjas	32.72	63

## **4.2. Análisis de estabilidad de taludes**

### **4.2.1. Método de estabilidad de taludes**

En base a los datos obtenidos en el laboratorio, perfiles topográficos y aplicando los métodos de Janbú simplificado y Spencer se obtuvieron los FS para cada perfil (Tabla 4.7).

**Tabla 4. 7** Factor de Seguridad, método de estabilidad de taludes, programa Slide.

Talud	Sector	Coordenadas UTM X/Y	Altura [m]	Pendiente [°]	Ensayos	Cangahua		Condiciones	Carga [kN/m <sup>2</sup> ]	FS	
						Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]			Métodos	
										Janbú simplificado	Spencer
P1	Valles del Sur	774447.8 / 9967103	18.67	66	MV-C2-1 MV-C2-3	77.47	28.81	Estático natural		2,566	3,850
						84.34	29.90				
						97.09	56.66				
P3	Pueblo Unido	774814.9 / 9966719.6	34.44	52	MV-C1-2	84.34	29.90	Estático efectivo		2,126	2,134
						77.47	28.81				
						77.47	28.81				
P4	Pueblo Unido	774754.9 / 9966693.2	15.39	67	MV-C2-1 MV-C2-3	84.34	29.90	Estático natural		4,499	4,825
						97.09	56.66				
						97.09	56.66				
P5	Lucha de los Pobres	775180.9 / 9967665.8	13.18	67	MV-C3-2 MV-C3-3	97.09	56.66	Estático con carga	2.60	2,887	2,983
						95.13	40.36				
						72.57	35.75				
P6	Lucha de los Pobres	775327.3 / 9967697.2	18.88	57	MV-C3-2 MV-C3-3	84.34	29.90	Estático natural		3,322	5,175
						95.13	40.36				
						72.57	35.75				
P7	Lucha de los Pobres	775469.6 / 9968031.4	11.20	55	MV-C4-1	72.57	35.75	Estático efectivo		4,737	5,526
						36.28	27.47				
						72.57	35.75				
P8	Lucha de los Pobres	775830.9 / 9967923.9	15.04	61	MV-C4-1	36.28	27.47	Estático efectivo		2,191	2,179
						36.28	27.47				
						36.28	27.47				
P9	La Argelia Alta	776111.6 / 9968289.4	12.49	54	SB-C6-2	11.77	48.49	Estático efectivo		1,678	1,697
						36.28	27.47				
						36.28	27.47				
P10	La Argelia Alta	776146.8 / 9968345.6	10.35	54	SB-C6-2	11.77	48.49	Estático efectivo		1,702	1,736
						36.28	27.47				
						36.28	27.47				
P11	La Argelia	776864.6 / 9969360.5	24.84	60	SB-C6-2 SB-C7-1	11.77	48.49	Estático efectivo		1,575	1,619
						76.49	35.75				
						32.36	46.67				
P13	La Forestal	777985.5 / 9971488.2	36.99	50	SB-C9-1	32.36	46.67	Estático natural		1,891	1,961

P14	La Forestal	777831.2 / 9972036.6	11.07	58	SB-C10- 1	32.36	46.67	Estático natural	3,390	3,304
						127.49	34.22			
P15	Loma de Puengasí	778106.6 / 9972518.1	29.71	44	SB-C10- 2	4.90	54.46	Estático efectivo	2,657	2,851
						4.90	54.46			
P16	Loma de Puengasí	778424 / 9973116	23.44	65	SB-C11- 1	142.20	39.35	Estático efectivo con carga	2,126	2,227
						40.21	37.95			
P17	Patrimonio Familiar	779255.7 / 9973641.9	19.87	53	SB-C11- 2	4.90	54.46	Estático efectivo con carga	3,484	3,547
						142.20	39.35			
P18	Patrimonio Familiar	779313.4 / 9973933.2	20.77	54	SB-C12- 1	106.89	33.82	Estático efectivo con carga	3,322	3,318
						106.89	33.82			
P19	Patrimonio Familiar	779044.6 / 9974120	21.19	60	SB-C13- 1	61.78	48.24	Estático natural	2,174	2,214
						51.00	56.31			
P20	Patrimonio Familiar	779108.4 / 9974157	15.86	61	SB-C13- 2	40.21	26.1	Estático efectivo con carga	3,039	3,095
						61.78	48.24			
P21	San Pedro de Monjas	779448.3 / 9974238.5	18.90	55	SB-C13- 1	51.00	56.31	Estático efectivo con carga	3,363	3,822
						162.79	44.42			
P22	San Pedro de Monjas	779577.6 / 9973968.5	32.72	63	SB-C12- 1	162.79	44.42	Estático efectivo con carga	1,982	2,025
						27.46	53.06			
						51.00	56.31			
						27.46	53.06			

#### 4.2.2. Método de retro análisis

A partir del método de back análisis se obtuvieron los siguientes parámetros geotécnicos, para un Factor de Seguridad igual a la unidad (Tabla 4.8).

**Tabla 4. 8** Valores de cohesión y ángulo de fricción, método de back análisis, programa Slide.

Talud	Sector	Altura [m]	Pendiente [°]	Estado	Carga [kN/m <sup>2</sup> ]	FS	Métodos			
							Janbú simplificado		Spencer	
							Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]
P2	Valles del Sur	18.95	68	Estático natural con carga	16.31	1	9,16	28,89	9,21	29,01
P12	La Forestal	55.07	52	Estático efectivo		1	17,06	23,88	17,03	23,79


Con los parámetros geotécnicos (cohesión y ángulo de fricción) obtenidos en el método anterior se realiza la estabilidad de los taludes para todos los perfiles y se obtiene los FS considerados como críticos, tomando en cuenta la tabla 3.3 del Capítulo 3 (Tabla 4.9).

**Tabla 4. 9** Factor de Seguridad críticos, análisis de estabilidad, programa Slide.


Talud	Sector	Altura [m]	Pendiente [°]	Método				FS	
				Janbú simplificado		Spencer		Método	
				Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]	Janbú simplificado	Spencer
P1	Valles del Sur	18.67	66					0.705	0.712
P3	Pueblo Unido	34.44	52					0.814	0.87



**UBICACION EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA**



**UBICACION EN LA DE ESTUDIO**



**LEYENDA**

- Perfiles Topog
- Curvas de nivel
- Barridos Zona I

**Calificación FS - método Spencer**

- Inadmisible
- Muy Bajo
- Bajo
- Aceptable

Contiene:


**MAPA FACTOR DE SE CRITICO METODOS**

Elaborado por:  
**DAYSI CHANGO**  
**EVELYN MONTAÑE**






**UBICACION EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA**



**UBICACION EN LA DE ESTUDIO**



**LEYENDA**

- Perfiles Topog
- Curvas de nivel
- Barridos Zona I

**Calificación FS - método Spencer**

- Inadmisible
- Muy Bajo
- Bajo
- Aceptable

Contiene:

**MAPA FACTOR DE SE CRITICO METODOS**

Elaborado por:  
**DAYSI CHANGO**  
**EVELYN MONTAÑE**





UBICACION EN LA DE ESTUDIO

LEYENDA

- Perfiles Topog
- Curvas de nivel
- Barridos Zona I

Calificación FS - método Spencer

- Inadmisible
- Muy Bajo
- Bajo
- Aceptable

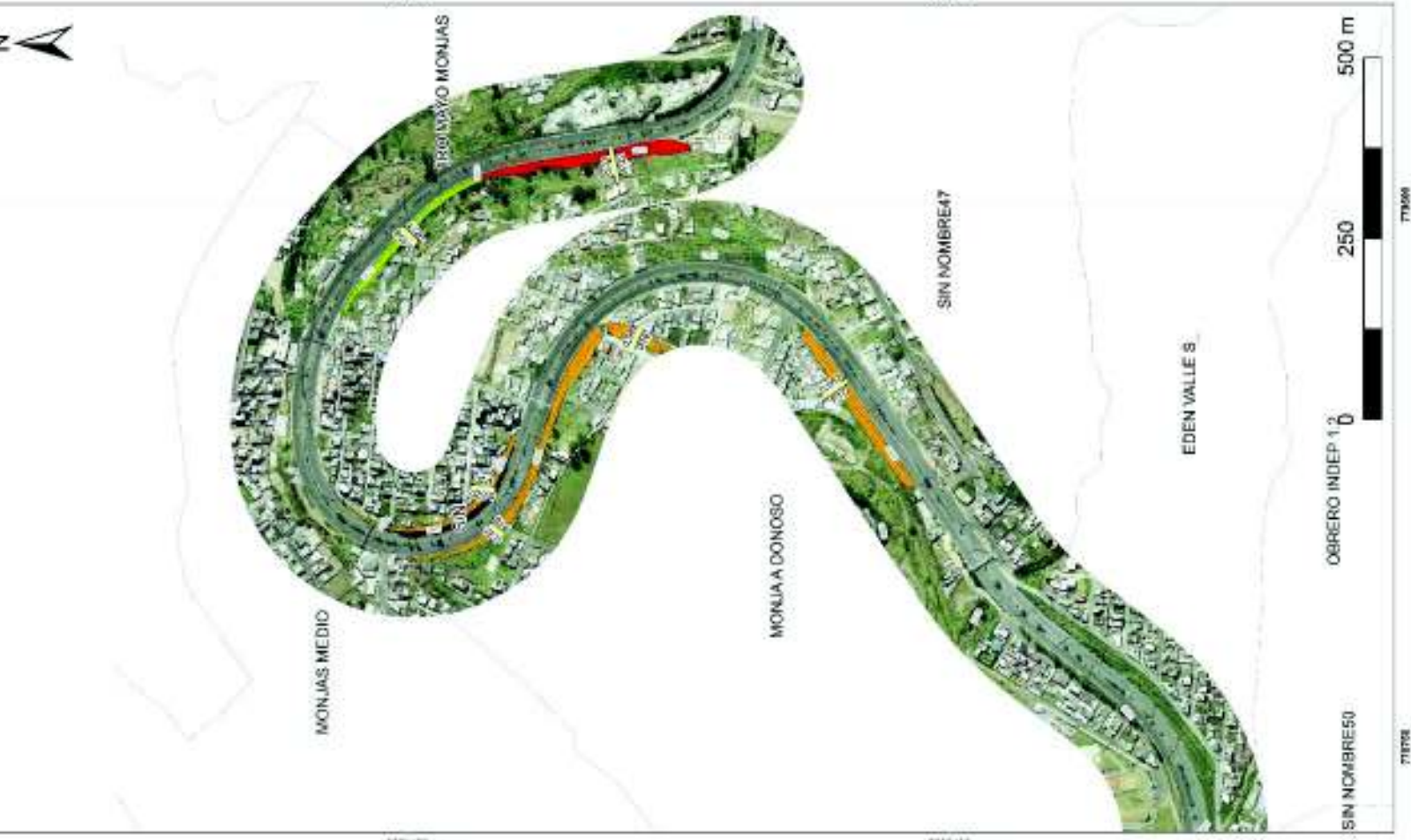
Contiene:

MAPA FACTOR DE SE CRITICO METODOS

Elaborado por:

DAYSI CHANGO

EVELYN MONTAÑE



Finalmente, se ha estimado los valores de los parámetros geotécnicos para los cuales el talud es considerado estable, es decir con FS mayor a 1.25 de acuerdo a la tabla 3.3. los resultados se han representado en la tabla 4.10.

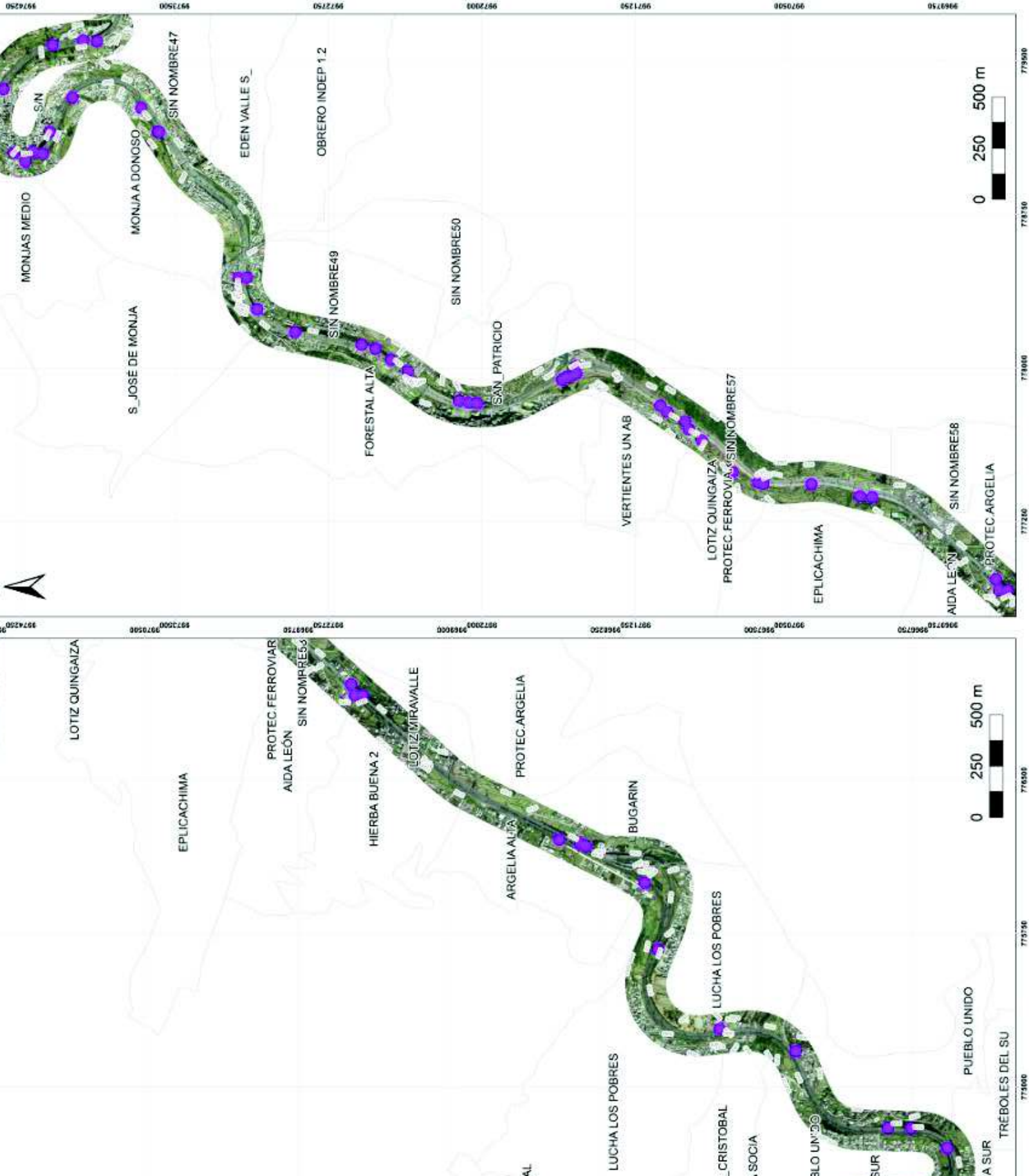
**Tabla 4. 10** Valores de cohesión y ángulo de fricción para obtener FS aceptables.

Talud	Sector	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]	Método	
				Janbú simplificado	Spencer
P1	Valles del Sur	<b>30.16</b>	<b>28.89</b>	1.254	1.252
P3	Pueblo Unido	<b>27.88</b>	<b>32.30</b>	1.250	1.332
P4	Pueblo Unido	<b>24.31</b>	<b>28.89</b>	1.251	1.350
P5	Lucha de los Pobres	<b>28.12</b>	<b>33.01</b>	1.252	1.290
P6	Lucha de los Pobres	<b>25.16</b>	<b>30.82</b>	1.253	1.263
P7	Lucha de los Pobres	<b>13.85</b>	<b>19.01</b>	1.252	1.264
P8	Lucha de los Pobres	<b>26.10</b>	<b>30.10</b>	1.251	1.330
P9	La Argelia Alta	<b>17.90</b>	<b>23.70</b>	1.251	1.267
P10	La Argelia Alta	<b>17.10</b>	<b>22.40</b>	1.253	1.25
P11	La Argelia	<b>27.01</b>	<b>30.01</b>	1.253	1.275
P12	La Forestal	<b>30.81</b>	<b>36.81</b>	1.253	1.324
P13	La Forestal	<b>25.06</b>	<b>33.06</b>	1.252	1.303
P14	La Forestal	<b>17.06</b>	<b>30.68</b>	1.252	1.25
P15	Loma de Puengasí	<b>25.03</b>	<b>29.54</b>	1.253	1.318
P16	Loma de Puengasí	<b>27.03</b>	<b>31.72</b>	1.253	1.253
P17	Patrimonio Familiar	<b>27.30</b>	<b>31.40</b>	1.252	1.289
P18	Patrimonio Familiar	<b>23.06</b>	<b>33.11</b>	1.253	1.301
P19	Patrimonio Familiar	<b>22.02</b>	<b>33.80</b>	1.252	1.294
P20	Patrimonio Familiar	<b>27.60</b>	<b>34.29</b>	1.252	1.266
P21	San Pedro de Monjas	<b>20.03</b>	<b>26.50</b>	1.252	1.309
P22	San Pedro de Monjas	<b>33.10</b>	<b>37.30</b>	1.251	1.278

### 4.3. Inventario de movimientos en masa


Para el inventario de movimientos en masa se obtuvo como resultado una matriz con 57 eventos, en los cuales predominan deslizamientos de tipo derrumbe y caída, también se observaron flujos y movimientos rotacionales, siendo estos eventos aislados. La zona en general se caracteriza por ser ligeramente húmeda ver Anexo 4.

Del inventario de movimientos en masa se obtuvo un mapa con densidad de puntos, en el cual se evidencian zonas inestables, de acuerdo a la acumulación de estos puntos que se observa en cada tramo (Figura 4.1).




Con la superposición del mapa de inventario de movimientos en masa y el mapa de factor de seguridad para los métodos de Janbú simplificado y el método de Spencer se obtuvieron mapas que sirvieron para la calibración metodológica, debido a la similitud en los resultados solo se muestra los mapas según el método de Spencer.

**UBICACION EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA**



**UBICACION EN LA DE ESTUDIO**



**LEYENDA**

- Inventario de mov. masa
- Curvas de nivel
- Barridos Zona Influ.

**Calificación FS - método Spencer**

- Inadmisible
- Muy Bajo
- Bajo
- Aceptable

Contiene:

**MAPA DE CALIBRACION METODO DE SPE**

Elaborado por:  
**DAYSI CHANGO**  
**EVELYN MONTAÑE**



**UBICACION EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA**

**UBICACION EN LA DE ESTUDIO**

**LEYENDA**

- Inventario de mov. masa
- Curvas de nivel
- Barridos Zona Influ.

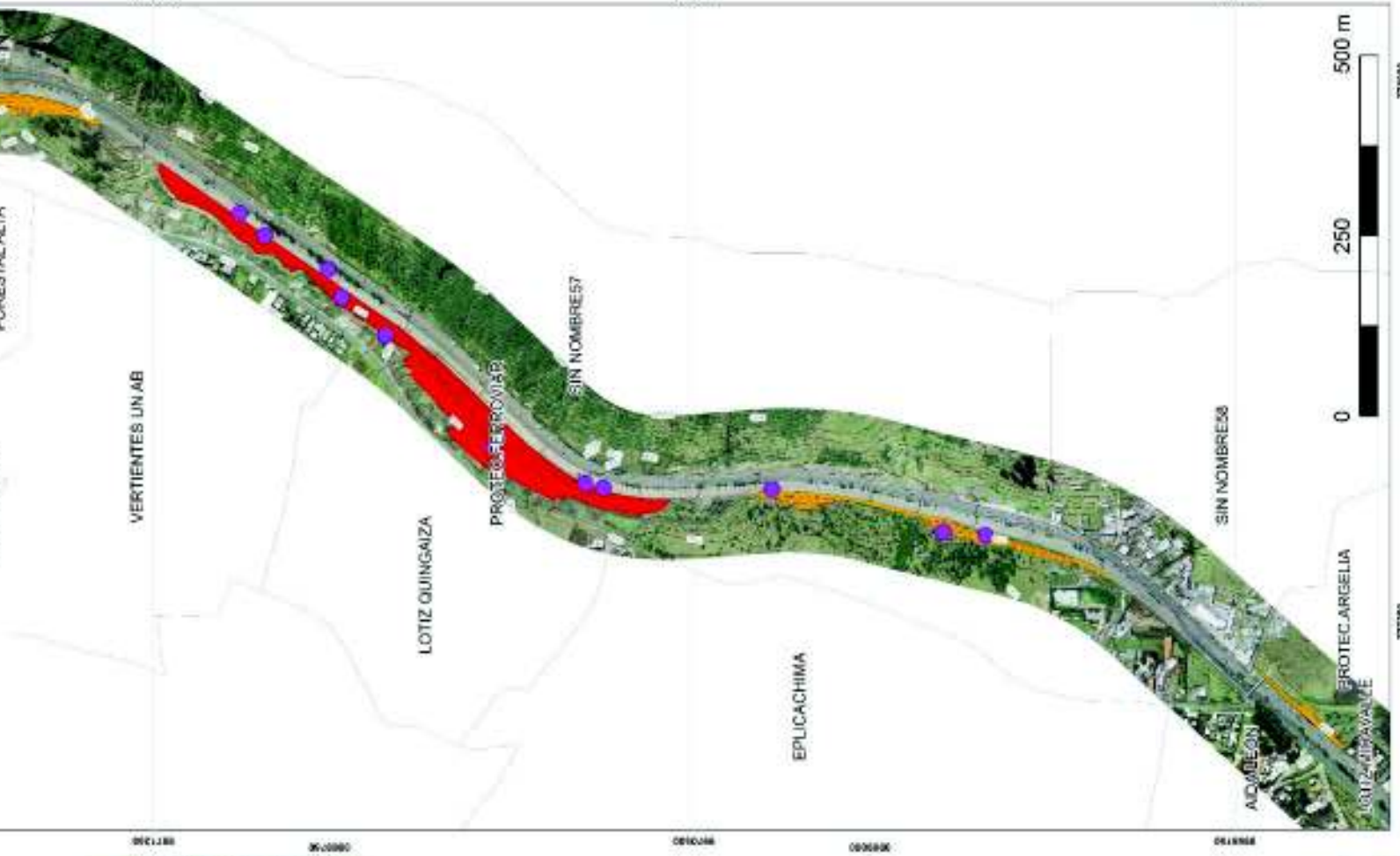
**Calificación FS - metodo Spencer**

- Inadmisible
- Muy Baja
- Baja
- Aceptable

Contiene:

**MAPA DE CALIBRACION METODO DE SPE**

Elaborado por:  
**DAYSY CHANGO**  
**EVELYN MONTAÑE**



UBICACION EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA



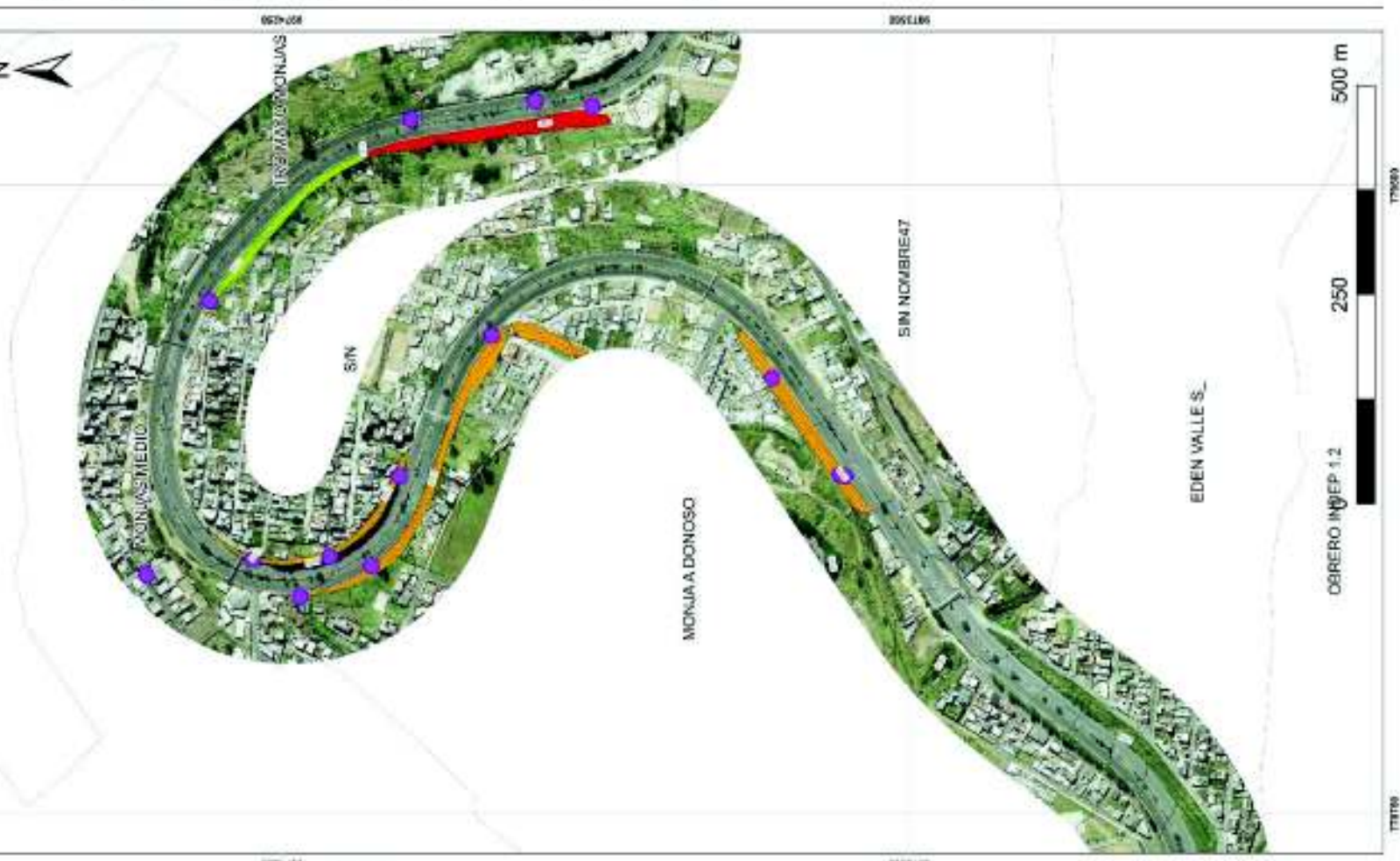
LEYENDA

- Inventario de mov. masa
- Curvas de nivel
- Barridos Zona Influ.

Calificación FS - metodo Spencer

- Inadmisible
- Muy Baja
- Baja
- Aceptable

Contiene:  
**MAPA DE CALIBRACION**  
**MÉTODO DE SPE**  
 Elaborado por:  
 DAYSI CHANGO  
 EVELYN MONTAÑE





## **5. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN**

### **5.1. Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes**

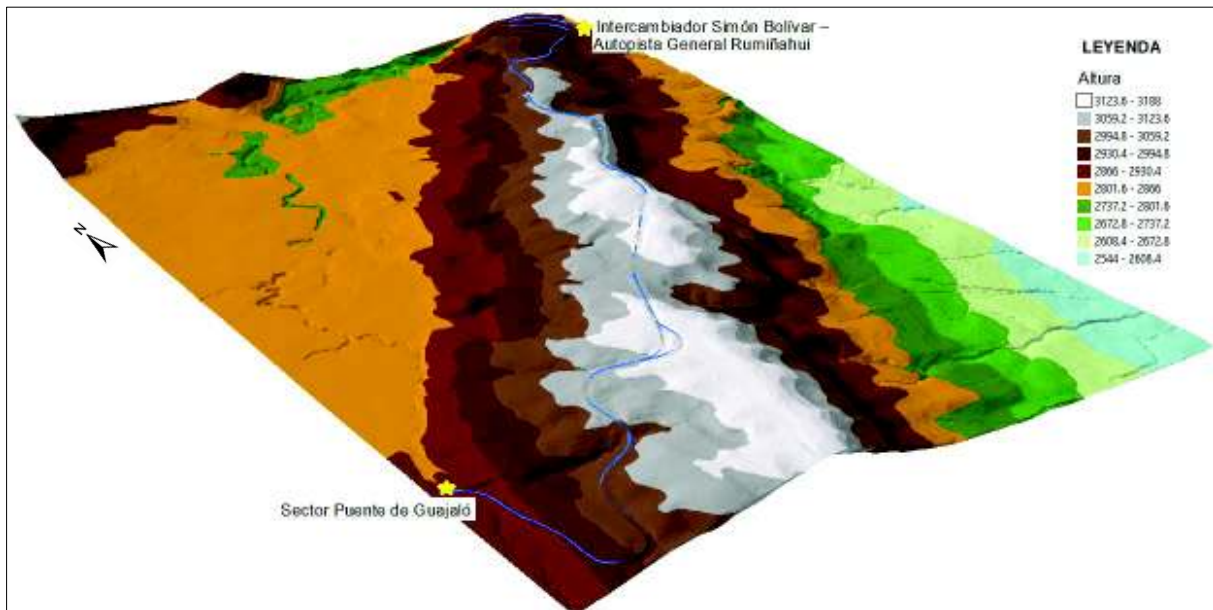
Suárez (2009) menciona que en un talud estable existe un equilibrio de las fuerzas resistentes y las fuerzas de corte, entre las cuales es determinante la fuerza de gravedad, de esta manera el talud se mantiene estable. La inestabilidad se produce cuando las fuerzas de corte sobrepasan las fuerzas de resistencia de la ladera, ya sea con cargas adicionales en la parte superior del talud con la construcción de infraestructuras, con la acción de un evento sísmico, lluvias, o si se remueven cargas en el pie de este.

El análisis de estabilidad de taludes en este estudio corresponde a un análisis estático, sin contar la acción de un evento sísmico o lluvias, sin embargo, se ha integrado parámetros como cargas sobre el talud generadas por las viviendas. Los tres parámetros integrados al programa para el cálculo del FS estático y el retro análisis de los taludes han sido: la litoestratigrafía, las características geomecánicas obtenidas de los ensayos triaxiales realizados y el modelo de terreno que ha proporcionado los perfiles topográficos de los taludes analizados.

#### **5.1.1. Levantamiento litoestratigráfico**

La litoestratigrafía juega un papel importante en el análisis de estabilidad de taludes, ya que permite conocer la distribución espacial de los estratos y sus características físicas. A lo largo de los 13 kilómetros de la zona de estudio, se levantaron 15 columnas, aproximadamente una por cada kilómetro, el nivel de detalle fue macroscópico (20x), con lo cual, se logró el objetivo de caracterizar la zona litoestratigráficamente.

Las columnas fueron levantadas a lo largo de los corte de talud realizados para el trazo de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, por lo cual la información litoestratigráfica obtenida está determinada por las variaciones de altura y en algunos casos los estratos pierden continuidad a lo largo del trazado vial, además varios estratos presentan deformaciones propias de la zona debido a la influencia de la falla de Quito, por lo cual para ciertas columnas las capas son inferidas (Figura 5.1).



**Figura 5. 1** Ubicación de la zona de estudio en relación a la falla de Quito.

El análisis de las columnas levantadas, mostradas en el Anexo 2, determina que la zona se encuentra principalmente formada por capas de cangahua retrabajada intercaladas con depósitos de caída, los espesores para las capas de cangahua van desde 10 cm hasta 12 m, mientras que para los depósitos de caída tamaño arena van desde 10 cm hasta 1.30 m y para depósitos de caída tamaño lapilli van desde 10 cm hasta 32 cm.

La secuencia de caídas encontradas en la avenida Gonzalo Pérez Bustamante, mostradas en la fotografía A.2, anexo 2, se definen como marcador característico para las columnas levantadas desde Valles del Sur hasta La Argelia Alta, al sur de la zona de estudio.

De las observaciones realizadas en campo se tiene que los depósitos de caída son más propensos a sufrir erosión, por lo cual se observa socavación en dichos estratos generando pérdida de soporte de la cangahua sobre las capas socavadas (Figura 5.2 y 5.3).



**Figura 5. 2** Evidencia de socavación en las capas de caída



**Figura 5. 3** Pérdida de soporte en las capas de cangahua por socavación de las capas de caída.

Las capas levantadas pertenecen a la formación Cangahua, la cual consiste en tobas alteradas de color amarillento a marrón, comúnmente intercaladas con caídas de ceniza, pómez y paleosuelos, con una edad sugerida de Pleistoceno Tardío – Holoceno como se describe en el capítulo 2.

En la fotografía A.6, anexo 2, se identifica una capa de cangahua retrabajada con la presencia de *Coprinisphaera ecuadoriensis* (fósiles de bolas nidadas de escarabajos peloteros), siendo este un índice de capas jóvenes asignando edades de pleistoceno superior, por lo cual se ha considerado a este estrato como la capa techo de las columnas estratigráficas levantadas en la zona.

Al realizar el trabajo de campo no se observa la presencia de material rocoso por lo cual el análisis que se realiza es únicamente para suelos.

### **5.1.2. Características geomecánicas de los suelos**

Las columnas litoestratigráficas permitieron determinar la ubicación de los análisis geotécnicos, de esta manera se realizaron alrededor de tres ensayos de laboratorio por cada columna de tipo triaxial, SUCS y de densidad de muestra para que los datos sean representativos para el análisis de estabilidad de taludes.

En la zona de estudio identificadas las capas, se ha considerado conveniente realizar: ensayos triaxiales en las capas de cangahua, obteniendo un total de 19 ensayos en la zona, ensayos de densidad de muestra en los depósitos de caída con un total de 5 ensayos en la zona y ensayos SUCS tanto en cangahua como depósitos de caída con un total de 19 ensayos en la zona.

Para los depósitos de caída, con la característica de ser materiales sueltos, se utilizó los resultados de la clasificación SUCS con el objetivo de obtener los valores de cohesión, ángulo de fricción y peso específico.

Los resultados obtenidos de acuerdo a la clasificación SUCS, mostrados en la tabla 4.5, indica que la zona se caracteriza por tener limos arenosos ML con presencia de arenas limosas SM, además de acuerdo a los límites de Atterberg, las muestras presentan un límite líquido (LL) menor al 50% cuando se trata de cangahua, esto debido a que poseen una cantidad de arcillas baja, mientras que para los depósitos de caída no fue posible la obtención de límite líquido y plástico debido a sus características propias.

Como ya se mencionó los taludes de la zona no se encuentran saturados, esto se refleja en los resultados mostrados en las tablas 4.2 y 4.3, en donde los valores de los pesos unitarios varían desde 13.23 hasta 17.74 [kN/m<sup>3</sup>], esto debido a que el peso unitario tiene relación con el grado de saturación, entendiendo que el volumen de vacíos es ocupado por el agua, aumentando la masa y manteniendo el volumen total.

Como se muestra en las tablas 4.2 y 4.3, la cangahua presenta una cohesión alta con un promedio de 76.96 [kN/m<sup>2</sup>], indicando un contenido de humedad bajo y un ángulo de fricción medio a alto con un promedio de 39 [°] indicando que las superficies de contacto son mayores entre sus partículas.

Para los ensayos de laboratorio las muestras fueron tomadas en el mes de junio correspondiente al periodo seco, es importante notar esto, debido a que la zona usualmente es afectada por precipitaciones, por lo cual los resultados obtenidos podrían variar con el periodo lluvioso.

### **5.1.3. Modelo digital de terreno - DEM**

El DEM es importante para el análisis de estabilidad de taludes debido a que mediante su procesamiento es posible obtener perfiles topográficos. Para el desarrollo de este análisis se dispone de un DEM de 1 m/pixel, del cual se obtiene 23 perfiles distribuidos a lo largo de las avenidas en la zona de estudio, en función de las columnas estratigráficas y ensayos de laboratorio.

La resolución del DEM de 1 m/pixel, que se utiliza en este estudio, genera perfiles topográficos que representan los rasgos superficiales de los taludes, con esta resolución se observan objetos iguales o mayores a 1 m, por lo cual se obtiene una representación cercana a la realidad.

De los 22 perfiles mostrados en la tabla 4.6, en la zona se obtiene alturas de entre 10.35 y 55.07 metros, con pendientes entre 53 y 67° en toda el área de estudio.

## **5.2. Análisis de estabilidad de taludes**

### **5.2.1. Método de estabilidad de taludes**

El método de estabilidad de taludes da como resultado el mínimo Factor de Seguridad (FS), el cual sirve para valorar la estabilidad de un talud, para este estudio se ha tomado la clasificación del FS como se muestra en la tabla 3.3 del capítulo 3, siendo la categoría más baja menor a 0.75 y la más alta mayor a 1.5 catalogándose como inadmisibles e ideales respectivamente, además se ha determinado que los taludes más susceptibles ante un deslizamiento son los catalogados en la menor categoría (inadmisibles, muy bajo, bajo), debido a que estas son las que representan  $FS < 1.25$ .

Como se muestra la tabla 4.7 tanto para el método de Janbú simplificado y Spencer, todos los factores de seguridad son mayores a 1.5, categorizándolos como ideales, es decir que bajo estas condiciones los taludes son estables.

Como se muestra la tabla 4.7 tanto para el método de Janbú simplificado y Spencer utilizados para caracterizar cualquier superficie de falla, todos los factores de seguridad son mayores a 1.5, categorizándolos como ideales, es decir que bajo condiciones secas los taludes son estables. El FS obtenido para los 22 perfiles está en la categoría ideal, debido a que el muestreo de suelos se realizó en el mes de junio, es decir en el período seco, esto muestra que la cangahua tiene buenas características de estabilidad en condiciones secas.

En la cabecera de los taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante se encuentran distintos tipos de edificaciones que modifican los esfuerzos al cortante, por lo cual se realizó la modelación asumiendo dichas cargas, los resultados de FS para estos taludes como se muestra en la tabla 4.7, pese a que disminuye en comparación a los que no poseen carga, de igual manera son mayores a 1.5 mostrando que la cangahua permite realizar cimentaciones para diversas tipologías de construcción siempre y cuando se mantenga en condiciones secas.

De la comparación de taludes, con características similares en sector, altura y pendiente, se observa que los que no presentan carga tienen FS más altos en comparación a los que presentan carga en su cabecera, como el caso de los taludes P4 y P5, siendo más estable el primero (Tabla 5.1).

**Tabla 5. 1** Comparación del Factor de Seguridad.

Talud	Sector	Altura [m]	Pendiente [°]	Carga [kN/m2]	FS	
					Métodos	
					Janbú simplificado	Spencer
P4	Pueblo Unido	15.39	67	-	4,499	4,825
P5	Lucha de los Pobres	13.18	67	2.6	2,887	2,983

Debido a que la zona comúnmente se enfrenta a precipitaciones es importante realizar el análisis de estabilidad de taludes en condiciones críticas, determinando así el comportamiento del talud

Con el objetivo de modelar la ruptura de taludes en condiciones críticas, es decir cuando la saturación de los suelos es alta por períodos de precipitaciones es importante realizar el análisis de estabilidad de taludes utilizando los parámetros geotécnicos obtenidos con el método de retro análisis, determinando así el comportamiento del talud en condiciones más cercanas a la realidad.

### 5.2.2. Método de retro análisis (*back analysis*)

El retro análisis determina los parámetros geotécnicos en los cuales el talud falla, es decir en condiciones de cohesión y ángulo de fricción críticas, por lo cual en los 13 kilómetros se aplica este método para dos taludes en los cuales se conoce la superficie de terreno anterior a la falla, como es el caso de los taludes P2 y P12, obteniendo los parámetros mostrados en la tabla 4.8 del capítulo 4.

Para establecer comparaciones de los resultados obtenidos en el método de retro análisis se realizó el método de estabilidad de taludes en perfiles cercanos, con lo cual se obtuvo que los parámetros geotécnicos resultantes del retro análisis son menores en comparación a los obtenidos en campo con los ensayos geotécnicos, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 5. 2** Comparación de parámetros geotécnicos

Talud	Sector	Método de retro análisis				Talud	Sector	Método de estabilidad de taludes	
		Janbú simplificado		Spencer				Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]
		Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]	Cohesión [kN/m <sup>2</sup> ]	Ángulo de fricción [°]				
P2	Valles del Sur	9,16	28,89	9,21	29,01	P1	Valles del Sur	97.09	56.66
P12	La Forestal	17,06	23,88	17,03	23,79	P13	La Forestal	32.36	46.57

Debido a que se obtuvo FS ideales en el método de estabilidad de taludes, en condiciones secas, se optó por realizar el mismo análisis, pero en esta vez en condiciones críticas, se considera condiciones críticas a los parámetros geotécnicos obtenidos a partir del retro análisis, cuando el FS=1, lo cual implicaría un aumento en la humedad del suelo, esto con el objetivo de determinar cuál es el comportamiento de los taludes en época lluviosa.

Al realizar la estabilidad de taludes utilizando parámetros geotécnicos obtenidos del retro análisis, los resultados de FS son menores en comparación a los obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes con parámetros obtenidos en campo, tanto para el método de Janbú simplificado como para Spencer, indicando que por el contrario la cangahua con el incremento de humedad y saturación debido a precipitaciones, pierde sus características de estabilidad volviéndose más susceptibles a generar deslizamientos.

En temporadas lluviosas los taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante tienen FS menores a 1.50, catalogándose como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 5. 3** Calificación de estabilidad de acuerdo a los FS críticos calculados.

Talud	Zona	Método de Janbú simplificado		Método de Spencer	
		FS Critico	Calificación de estabilidad	FS Critico	Calificación de estabilidad
P1	Valles del Sur	0.705	Inadmisible	0.712	Inadmisible
P5	Lucha de los Pobres	0.667	Inadmisible	0.676	Inadmisible
P12	La Forestal	0.748	Inadmisible	0.745	Inadmisible
P22	San Pedro de Monjas	0.700	Inadmisible	0.710	Inadmisible
P3	Pueblo Unido	0.814	Muy Bajo	0.870	Muy Bajo
P4	Pueblo Unido	0.779	Muy Bajo	0.788	Muy Bajo
P6	Lucha de los Pobres	0.770	Muy Bajo	0.788	Muy Bajo
P8	Lucha de los Pobres	0.845	Muy Bajo	0.873	Muy Bajo
P11	La Argelia	0.882	Muy Bajo	0.841	Muy Bajo
P13	La Forestal	0.852	Muy Bajo	0.887	Muy Bajo
P15	Loma de Puengasí	0.938	Muy Bajo	0.979	Muy Bajo
P16	Loma de Puengasí	0.856	Muy Bajo	0.851	Muy Bajo
P17	Patrimonio Familiar	0.859	Muy Bajo	0.887	Muy Bajo
P18	Patrimonio Familiar	0.955	Muy Bajo	0.988	Muy Bajo
P19	Patrimonio Familiar	0.900	Muy Bajo	0.920	Muy Bajo
P20	Patrimonio Familiar	0.817	Muy Bajo	0.826	Muy Bajo
P9	La Argelia Alta	1.020	Bajo	0.931	Muy Bajo
P10	La Argelia Alta	1.093	Bajo	1.122	Bajo
P14	La Forestal	1.104	Bajo	1.103	Bajo
P21	San Pedro de Monjas	1.104	Bajo	1.158	Bajo
P7	Lucha de los Pobres	1.276	Aceptable	1.347	Aceptable

En condiciones críticas los taludes no presentan FS ideal, mayor a 1.50, lo cual sugiere que los taludes de la zona, son susceptibles ante deslizamientos dependiendo de su categorización. Tomando en cuenta que, para los taludes con calificación de inadmisible, muy bajo y bajo será más probable que se produzcan deslizamientos. En función de los resultados de FS las zonas más susceptibles son: Valles del Sur y San Pedro de Monjas con calificación Inadmisible; Lucha de los Pobres y La Forestal con calificación de Inadmisible a Muy Bajo y Pueblo Unido, La Argelia, Loma de Puengasí y Patrimonio Familiar catalogadas como Muy Baja.

Teóricamente un talud es más susceptible a generar movimientos en masa cuando posee gran altura y alta pendiente, sin embargo, esto en la práctica no se cumple ya



que es necesario combinar varios parámetros para inducir la falla, un ejemplo de esto se muestra en la tabla 5.4, en la cual se muestra que el talud P5 presenta una altura baja y una pendiente alta, con una categorización de **inadmisibile**, mientras que el talud P19 presenta una mayor altura y menor pendiente, con una categorización de **muy bajo**, demostrando que una gran altura o alta pendiente no son características determinantes para generar deslizamientos.

**Tabla 5. 4** Influencia de la altura y la pendiente en los taludes.

Talud	Sector	Altura [m]	Pendiente [°]	Método Janbú simplificado FS	Método Spencer FS
P5	Lucha de los Pobres	13.18	67	0.667	0.676
P19	Patrimonio Familiar	21.19	60	0.9	0.920

Para conservar la estabilidad que poseen en condiciones secas los taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, es importante mantener los parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo de fricción superiores a los mostrados en la tabla 4.9 del capítulo 4.

Para mantener los taludes con FS mayores o iguales a 1.25, que es cuando se consideran estables, es necesario experimentar con los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, es así que se ha obtenido los valores de la tabla 4.10, los cuales son referenciales y resultado de un ejercicio académico, ya que existe n combinaciones posibles para obtener dicho FS. Si se desea obtener parámetros diferentes a los sugeridos se debe tener en cuenta que, si se modifica el valor de un parámetro se debe compensar en la misma proporción al segundo, hasta obtener valores de FS igual o mayores a 1.25.

Del análisis de los Factores de Seguridad mostrados en las tablas 4.7, 4.9 y 4.10 se observa que pese a utilizar dos métodos distintos, las variaciones en los FS no son significativas, por lo cual se obtiene para los taludes calificaciones similares, exceptuando el caso del talud P9, que cuenta con una calificación Baja para el método de Janbú simplificado y Muy Baja para el método de Spencer.

Todas las premisas mencionadas demuestran que con el análisis de estabilidad es posible determinar las zonas más susceptibles ante la ocurrencia de un nuevo evento de movimiento en masa o la posible reactivación de un evento antiguo en los taludes en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, confirmando la hipótesis de este trabajo.

En función de los resultados obtenidos se proponen medidas de mitigación generales, las cuales pueden ser aceptadas o descartadas. Es importante notar que no se realizan cuantificaciones exactas de lugares, longitudes, distancias y alturas, ya que no se ha utilizado metodologías de diseño o construcción. Es así que se recomiendan zanjas de corona, canales interceptores a mitad del talud, concreto lanzado y refuerzo con geosintéticos, sin embargo, si se dispone con el suficiente capital se podría utilizar estructuras de contención como anclajes o pernos, pantallas ancladas, pilotes o muros de contención.

Por las características de la zona se debe contemplar métodos de estabilización que controlen el agua, una ventaja de estos es que generalmente son más económicos que otras construcciones, siendo el objetivo principal disminuir la presión de poros, considerada como principal elemento desestabilizante de los taludes.

En las zonas donde existe construcciones cercanas al borde del talud, no se recomienda realizar métodos de reconfiguración topográfica, como terraceo, conformación de la pendiente o remoción de los materiales de la cabeza del talud, debido a la falta de espacio que existe.

### **5.3. Inventario de movimientos en masa**

La sistematización del Inventario de movimientos en masa que se observa en el mapa de la figura 4.7, muestra que en la zona existen 57 eventos, de los cuales 29 son de tipo derrumbe, 26 de tipo caída y 2 movimientos de tipo rotacional.

De acuerdo con la información proporcionada por los moradores de la zona y evidencia del trabajo de campo ciertos taludes presentan movimientos tipo flujo asociado a una caída inicial, esto en gran medida por el alto grado de saturación que existe en época lluviosa.

Del mapa de inventario de movimientos en masa mostrado en la figura 4.7, se deduce que cada talud en los 13 km presenta al menos un tipo de movimiento en masa.

Del inventario de movimientos en masa, presentada en la tabla B.1 anexo 3, se observa que en general los taludes presentes en la zona de estudio son húmedos a ligeramente húmedos, y las causas de movimiento son lluvias sumado a un mantenimiento deficiente del sistema de drenaje.

Con la superposición del mapa de inventario de movimientos en masa y el mapa de factor de seguridad crítico, mostrados en las figuras 4.8 a 4.13, tanto para los métodos de Janbú simplificado como Spencer, se obtuvo un porcentaje de concordancia del

89,5%, demostrando que la metodología empleada se ajusta a la realidad, además la mayor cantidad de movimientos en masa se encuentran en las zonas calificadas como inadmisibles y muy bajas, con un porcentaje de concordancia de 24,6% y 52,6% de movimientos en masa respectivamente.

## 6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- Los taludes de las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante litológicamente están determinadas por estratos de cangahua retrabajada intercaladas con depósitos de caída.
- Los espesores de las capas de cangahua varían desde 10 cm hasta 12 m, para los depósitos de caída tamaño arena varían desde 10 cm hasta 1.30 m y para depósitos de caída tamaño lapilli varían desde 10 cm hasta 32 cm.
- Del análisis geotécnico se concluye que la zona se caracteriza por limos arenosos (ML) con presencia de arenas limosas (SM).
- De los resultados obtenidos de acuerdo a los límites de Atterberg para las muestras se obtiene un límite líquido (LL) menor al 50%, indicando que poseen una cantidad de arcillas baja.
- Los valores de los pesos unitarios son bajos y varían desde 13.23 hasta 17.74 [kN/m<sup>3</sup>], indicando que los taludes no se encuentran saturados, debido a que el peso unitario tiene relación con el grado de saturación.
- La cangahua presenta una baja cohesión que indica que su contenido de humedad es bajo y un ángulo de fricción medio a alto que indica que las superficies de contacto son mayores entre sus partículas.
- Los taludes presentes en la zona de estudio varían de 10 a 55 m de altura y poseen una pendiente de entre 53 y 67°.
- Para el análisis de estabilidad de taludes en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, con parámetros geotécnicos tomados en períodos secos, los taludes son estables, obteniendo Factores de Seguridad superiores a 1.5, evidenciando que la cangahua en condiciones secas posee buenas características de estabilidad y permite realizar diversas tipologías de construcción.
- Como se mostró en el análisis, el aumento de la carga en los taludes analizados representa un incremento en el esfuerzo al cortante lo cual se refleja un menor Factor de Seguridad.
- En la estación lluviosa los taludes se saturarán, disminuyendo los parámetros geotécnicos lo cual probablemente hará que alcancen FS menores a 1.25 y se produzcan deslizamientos.
- Del análisis de estabilidad de taludes en condiciones críticas, en las avenidas Simón Bolívar y Gonzalo Pérez Bustamante, se obtiene valores menores a 1.25 calificándose como inadmisibles o bajas.

- Los taludes de los sectores de Valles del Sur y San Pedro de Monjas tienen calificación inadmisibles, por tanto, tienen una mayor probabilidad de generar fenómenos de remoción en masa durante períodos lluviosos.
- Los taludes de los sectores de Lucha de los Pobres y La Forestal tienen calificación de inadmisibles a muy bajo, por tanto, tienen una probabilidad alta de generar fenómenos de remoción en masa durante períodos lluviosos.
- Los taludes de los sectores de Pueblo Unido, La Argelia, Loma de Puengasí y Patrimonio Familiar son catalogados como muy baja, por tanto, tienen una probabilidad media de generar fenómenos de remoción en masa durante períodos lluviosos.
- El incremento de la humedad natural y saturación debido a precipitaciones o la descarga directa de agua al talud hace que la cangahua pierda sus características de estabilidad volviéndose susceptible ante deslizamientos
- Un deficiente mantenimiento del sistema de drenaje a largo plazo provocaría que los taludes, incluso en periodos secos sean susceptibles ante deslizamientos.
- La cangagua pierde soporte y estabilidad debido a la erosión de los depósitos de caída, generando movimientos en masa como caídas y derrumbes.
- De la superposición de mapas realizado se tiene una concordancia del 89.5 % por lo cual este ejercicio académico es aceptable, siendo así que en zonas calificadas como inadmisibles se obtiene una concordancia de 24,6% en relación a los movimientos en masa, mientras que para las zonas calificadas como muy bajas se obtiene concordancia de 52,6%.
- Al aplicar los métodos Janbú simplificado y Spencer como se observa en la tabla 5.4 no existen variaciones significativas de FS, obteniendo las mismas calificaciones para ambos métodos.
- La disminución de las condiciones intrínsecas de los materiales como cohesión y ángulo de fricción disminuyen el FS de los taludes tal como se observa en la tabla 4.9.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Actualmente los taludes se encuentran estables, sin embargo, en la estación lluviosa, se recomienda mantener las condiciones geotécnicas de los taludes en valores iguales o mayores a los obtenidos en la tabla 4.5, asegurando la estabilidad de los mismos.
- Para conocer la variación de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna en condiciones críticas, se recomienda realizar los ensayos de laboratorio en época lluviosa.
- La cangahua en condiciones secas se mantiene en condiciones estables por ello se recomienda controlar los niveles de humedad del suelo.
- Para este análisis de estabilidad de taludes no se consideró el nivel freático, pese a tener FS mayor a 1.5 en condiciones secas, en cierta medida los resultados podrían variar si se considera este parámetro, por lo cual se recomienda realizar trabajos para determinar el nivel freático de la zona.
- En caso de realizar las obras de mitigación, se debe dar prioridad a los taludes catalogados como inadmisibles y muy bajos.
- Para las zonas catalogadas como inadmisibles se recomienda la construcción de muros de contención con anclajes.
- Para las zonas catalogadas como muy bajas se recomienda la implementación de obras con concreto lanzado y refuerzos geosintéticos
- En las zonas catalogadas como bajas se recomienda la construcción de canales interceptores a mitad de talud y cunetas de coronación.
- Se recomienda socializar la información proporcionada por este estudio a la comunidad que se encuentra influenciada por dicha amenaza.

## Bibliografía

- Alcántara, E. (2017). ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LADERAS Y TALUDES CON LOS SOFTWARES SLIDE V7, RS2 V9 Y FLAC V8. *ResearchGate*.
- Alvarado, A. (1996). *Evolución geológica cuaternaria y paleosismicidad de la Cuenca de Quito*. Quito: Tesis de Grado, EPN.
- Álvarez, N., & Torres, H. (2014). *Propuesta de un modelo hidro-geotécnico para prevención de riesgos en taludes Caso: La Forestal.- Av. Simón Bolívar - Quito*. Quito: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.
- Arellano, R., Bielefeldt, J., & Correa, D. (2009). *Análisis de taludes mediante ensayos y back análisis de fallas*. Obtenido de <https://www.u-cursos.cl>: [https://www.u-cursos.cl/diplomados/2009/2/DMS-TFD/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=264950](https://www.u-cursos.cl/diplomados/2009/2/DMS-TFD/1/material_docente/bajar?id_material=264950)
- Aspden, J. A., & Litherland, M. (1991). The geology and Mesozoic Collisional history of the Cordillera Real, Ecuador . *Elsevier Science Publishers B. V*, 187-204.
- Blandón, A. (2002). *Principios de estratigrafía* . Obtenido de [bdigital.unal.edu.co](http://bdigital.unal.edu.co): <http://bdigital.unal.edu.co/12331/1/42968477.2002.Parte1.2.pdf>
- Bosch, D. (2010). *Unidad IV: Identificación y clasificación de suelos*. Obtenido de [ing.unne.edu.ar](http://ing.unne.edu.ar): <http://ing.unne.edu.ar/pub/Geotecnia/2k8-04-10/u-iv-b.pdf>
- Cruden, D. M. (1991). A simple Definition of a Landslide Bulletin of the International Association of Engineering Geology. *National Academy Press*, 27-29.
- Cuesta, R. (2007). *Los Modelos Digitales del Terreno y su uso en Cartografía Temática*. Obtenido de [geoportaligm.gob.es](http://geoportaligm.gob.es): [http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/?wpfb\\_dl=33](http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/?wpfb_dl=33)
- Das, B. M. (2001). *FUNDAMENTOS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA*. Sacramento: Thomson Learning.
- De Matteis, A. (2003). *Estabilidad de Taludes*. <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Estabilidad%20de%20Taludes.pdf>.
- Dirección Gestión Meteorológica Estudios e Investigaciones Meteorológicas. (2017). *Boletín Meteorológico mes: Mayo de 2017*. Obtenido de [Serviciometeorológico.gob.ec](http://www.serviciometeorologico.gob.ec): [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/boletines/bol\\_men.mayo.pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/boletines/bol_men.mayo.pdf)
- Egüez, A. D., & Beate, B. C. (1992). *Estratigrafía y tectónica de la cuenca intramontañosa del Chota*. Quito: Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Geología.
- EPN-HIGEODES. (2002). *Estudios geológicos y de peligrosidad debida a fenómenos geodinámicos. Informe de evaluación geológica de los sitios de obras específicas*. Quito: Subprograma de manejo de laderas. EMAAP-Q.
- GeStru. (2018). *Estabilidad de taludes*. Obtenido de [GeoStru](https://www.geostru.eu/es/estabilidad-de-taludes/): <https://www.geostru.eu/es/estabilidad-de-taludes/>
- Gómez, J. C. (2013). *Servicio Nacional de Aprendizaje* . Obtenido de Manual de prácticas de campo y del laboratorio de suelos.:

[https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/2785/1/practicas\\_campo\\_laboratorio\\_suelos.pdf](https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/2785/1/practicas_campo_laboratorio_suelos.pdf)

- Gonzales de Vallejo, L. I. (2006). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Instituto Nacional de Concesiones. (2009). *ALCANCE PROGRESIVO DEL PROYECTO VÍAL ÁREA METROPOLITANA DE CÚCUTA Y NORTE DE SANTANDER ESTUDIOS Y DISEÑOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA SEGUNDA CALZADA DE LA VÍA CÚCUTA PAMPLONA Y LA CONSTRUCCIÓN DE LA VARIANTE PAMPLONA EN DOBLE CALZADA*. Cúcuta: Concesionaria San Simón S.A.
- Lavenu, A., Baudino, R., & Ego, F. (1996). Stratigraphie des depots Tertiaires et Quaternaires de la Depression Interandine d'Equateur (entre 0° et 2°15S). *Bulletin Institut Francais d'Etudes Andines*, 1-15.
- Ludger, O., & Suarez-Burgoa. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes*. Medellín: Independiente.
- Mazariegos, A., Escolano, F., & Sánchez, J. (2015). *EL ESTUDIO GEOTÉCNICO. Campaña de campo y ensayos de laboratorio*. Madrid: Garceta.
- Morales, I. C. (2011). *Slideshare*. Obtenido de Metodologías para Análisis Retospectivo Goetécnico de Fallas: <https://es.slideshare.net/icamobu/metodologa-de-analisis-retrospectivo-geotecnico-de-fallas-ivan-c-morales-b-icamobu>
- Morel, C., Beneyto, P., Mrogiski, J., & Di Rado, A. (Junio de 2008). *Universidad Nacional del Nordeste*. Obtenido de EVALUACIÓN DEL MÉTODO Y CRITERIOS PARA LA INCORPORACIÓN DEL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES AL PROGRAMA FECCUND : <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/investigacion/com2008/E-030.pdf>
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2015). *Atlas de amenazas naturales y exposicion de infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito*. Quito: Distrito Metropolitano de Quito.
- Murray, S. (1998). *Silvicultura Urbana y Periurbana en Quito, Ecuador: Estudio de Caso*. Obtenido de Departamento de Montes. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: <http://www.fao.org/docrep/W7445S/w7445s04.htm#3>. el ecosistema forestal urbano en quito
- Pacheco, D., Andrade, D., & Alvarado, A. (2014). Estratigrafía Cuaternaria de la Cuenca San Antonio de Pichincha. *Revisata EPN*, 1-9.
- Peñafiel, L. A. (2009). *Geología y Análisis del Recurso Hídrico Subterráneo de la Subcuenca del Sur de Quito*. Quito: Tesis de Grado, EPN.
- PNUMA, Fondo Ambiental DMQ, FLACSO. (2011). *Perspectivas del ambiente y cambio climático en el medio urbano: ECCO Distrito Metropolitano de Quito*. Obtenido de Flacsoandes.edu.ec: <http://www.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/54250.pdf>
- Procel, S. T. (2008). *Modelación del acuífero Pusuquí - San Antonio de Pichincha*. Quito: Tesis de Grado.
- Proyecto Multinacional Andino. (2007). *Movimientos en masa en la Región Andina. Una guía para la evaluación de amenazas*. Canada: Publicación Geológica Multinacional.



- Rivera, D. (s.f.). Obtenido de <https://es.slideshare.net/fk99/practica-preprofesional>
- Rocscience. (2018). *Rocscience*. Obtenido de Slide:  
<https://www.rocscience.com/rocscience/products/slide>
- Sackschewski, C. E. (2017). *Soluciones para la estabilidad de taludes de la carretera Canta – Huayllay entre las progresivas del km 102 al km 110*. Lima: Tesis previo título de ingeniero Geólogo. UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS .
- Sanhueza, C., & Rodríguez, L. (2012). *Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales*. Obtenido de [www.redalyc.org](http://www.redalyc.org): <http://www.redalyc.org/pdf/1276/127628890003.pdf>
- Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga - Colombia: Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos .
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos técnicas de remediación. Tomo 2*. Colombia: UNIV. Industrial de Santander.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis geotécnico*. Colombia: U. Industrial de Santander.
- Unidad del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del DMQ. (7 de Noviembre de 2014). *Diagnostico del territorio de DMQ*. Obtenido de [gobiernoabierto.quito.gob.ec](http://gobiernoabierto.quito.gob.ec):  
<http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/pdf/diagnosticoterritorio.pdf>
- Valdivieso, J. M. (Febrero de 2005). *Propuesta para la Gestión Integral del Suelo no urbanizable en el Distrito Metropolitano de Quito*. Obtenido de [Flacsoandes.edu.ec](http://www.flacsoandes.edu.ec):  
<http://www.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/45422.pdf>).
- Villagómez, D. R. (2003). *Evolución Geológica Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en el Ecuador (Zona de Quito y Guayllabamba - San Antonio)*. Quito: Tesis de Grado, EPN.
- Yáñez, G. (2011). *Ensayo Parafina*. Obtenido de Scribd.com:  
<https://es.scribd.com/doc/58265845/ENSAYO-PARAFINA>
- Yugsi, F. (2004). *Caracterización de los fenómenos de remoción en masa producidos en las laderas surorientales del Complejo Volcánico Pichincha*. Quito-Ecuador : Tesis previo a la obtención del título de Ingeniero Geólogo.

**ANEXO 1. MAPA DE UBICACIÓN DE COLUMNAS  
ESTRATIGRÁFICAS, MUESTREO Y PERFILES TOPOGRÁFICOS.**



Figura A. 1 Mapa 1 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.

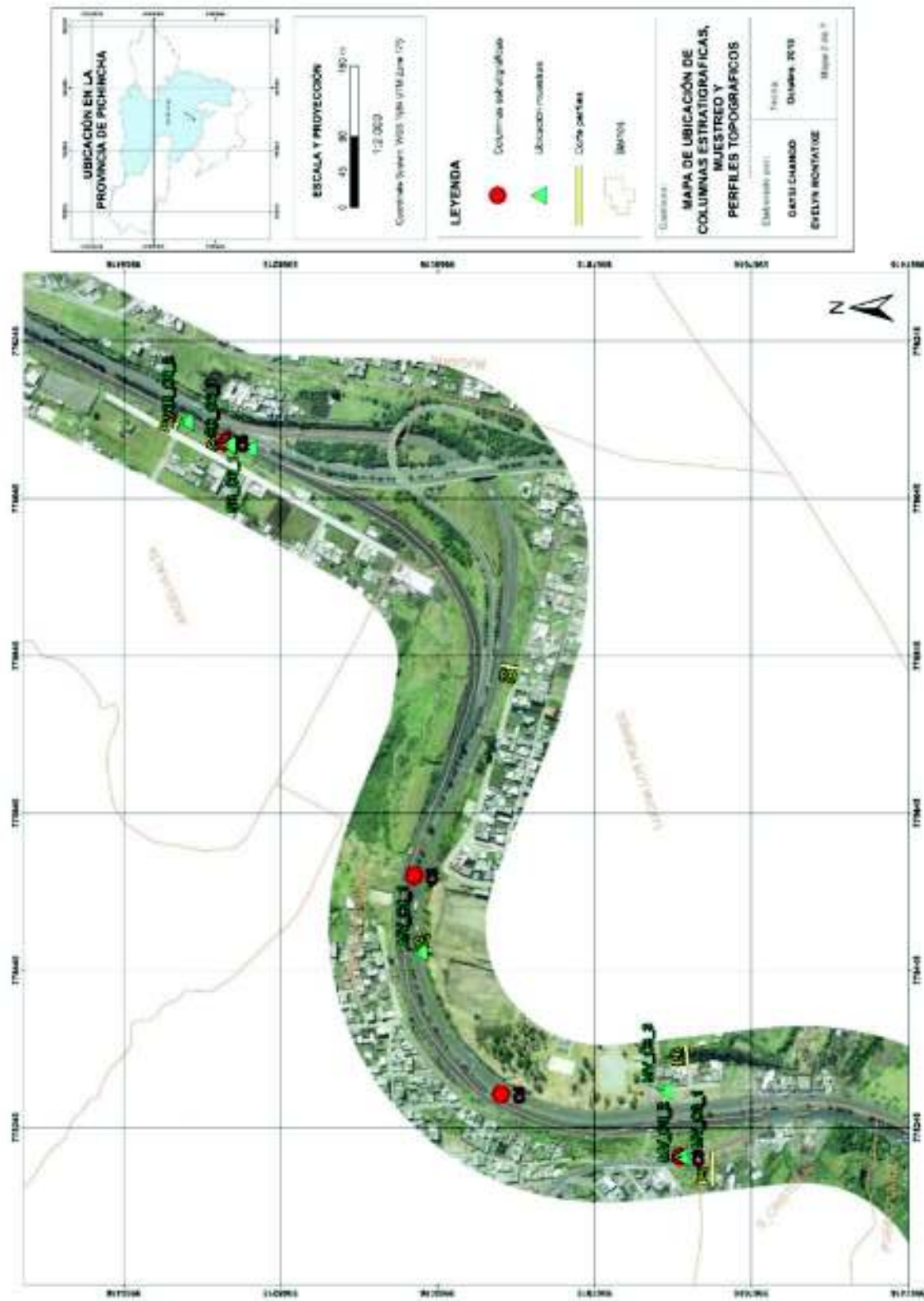


Figura A. 2 Mapa 2 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.

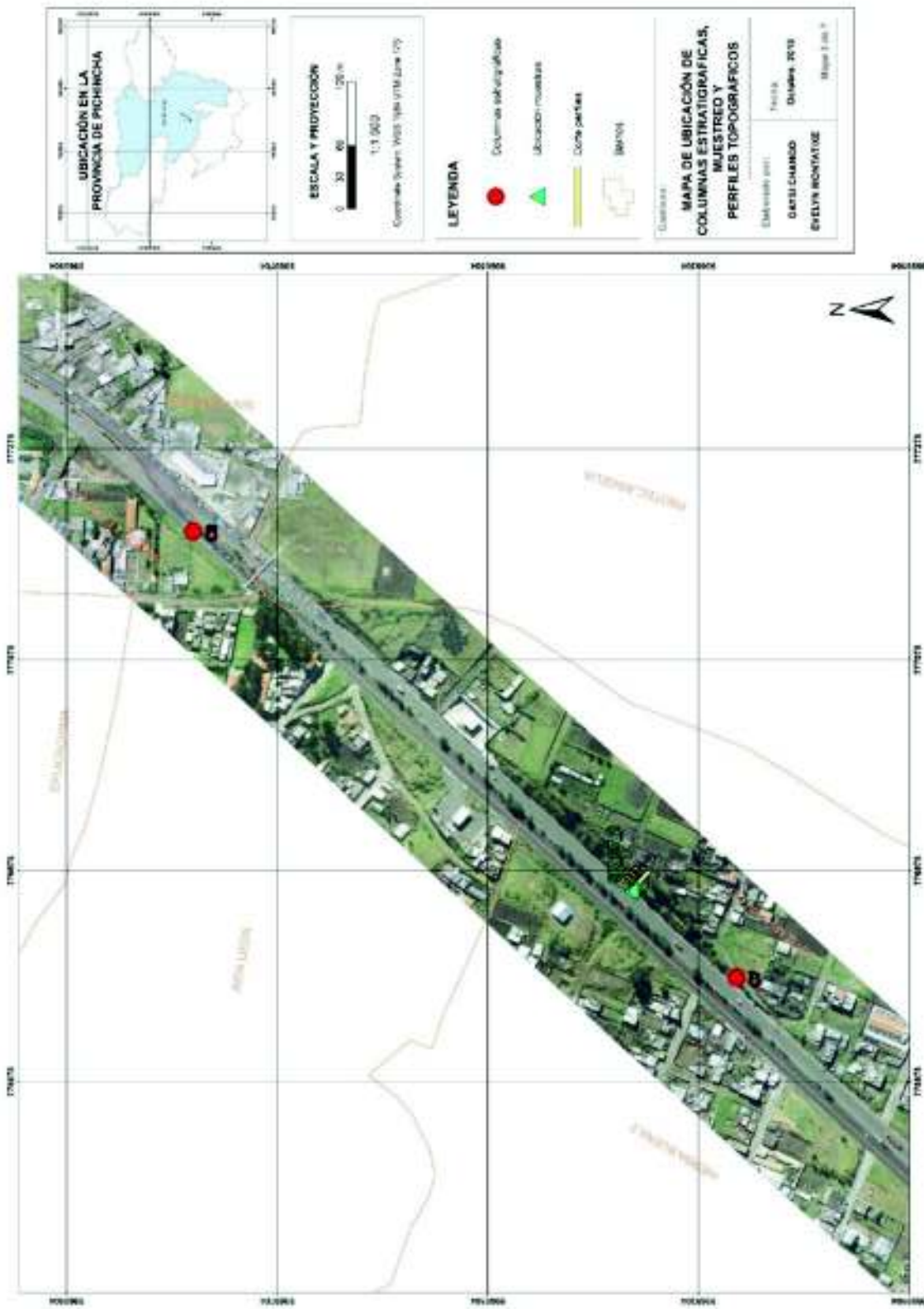


Figura A. 3 Mapa 3 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.

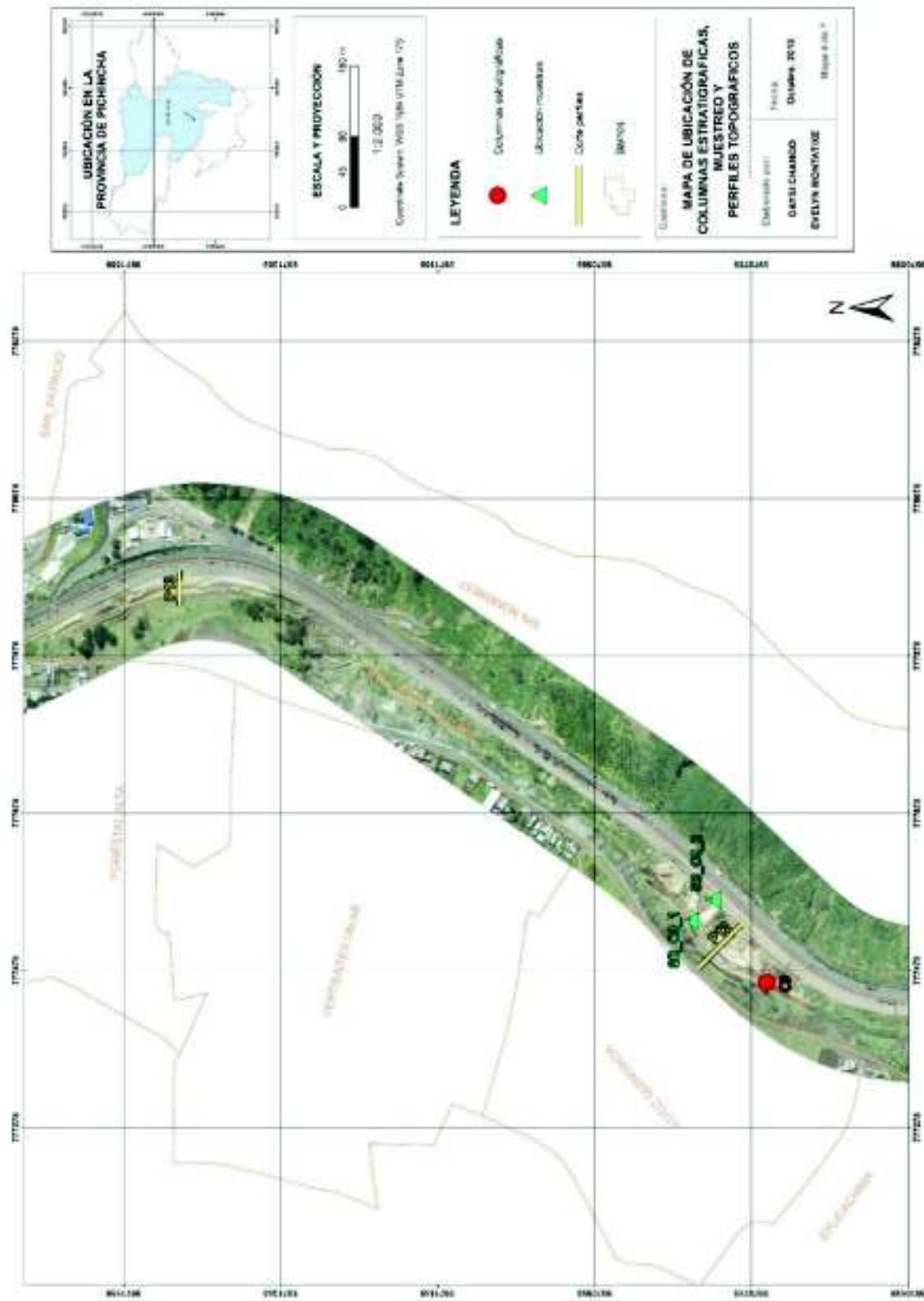


Figura A. 4 Mapa 4 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.

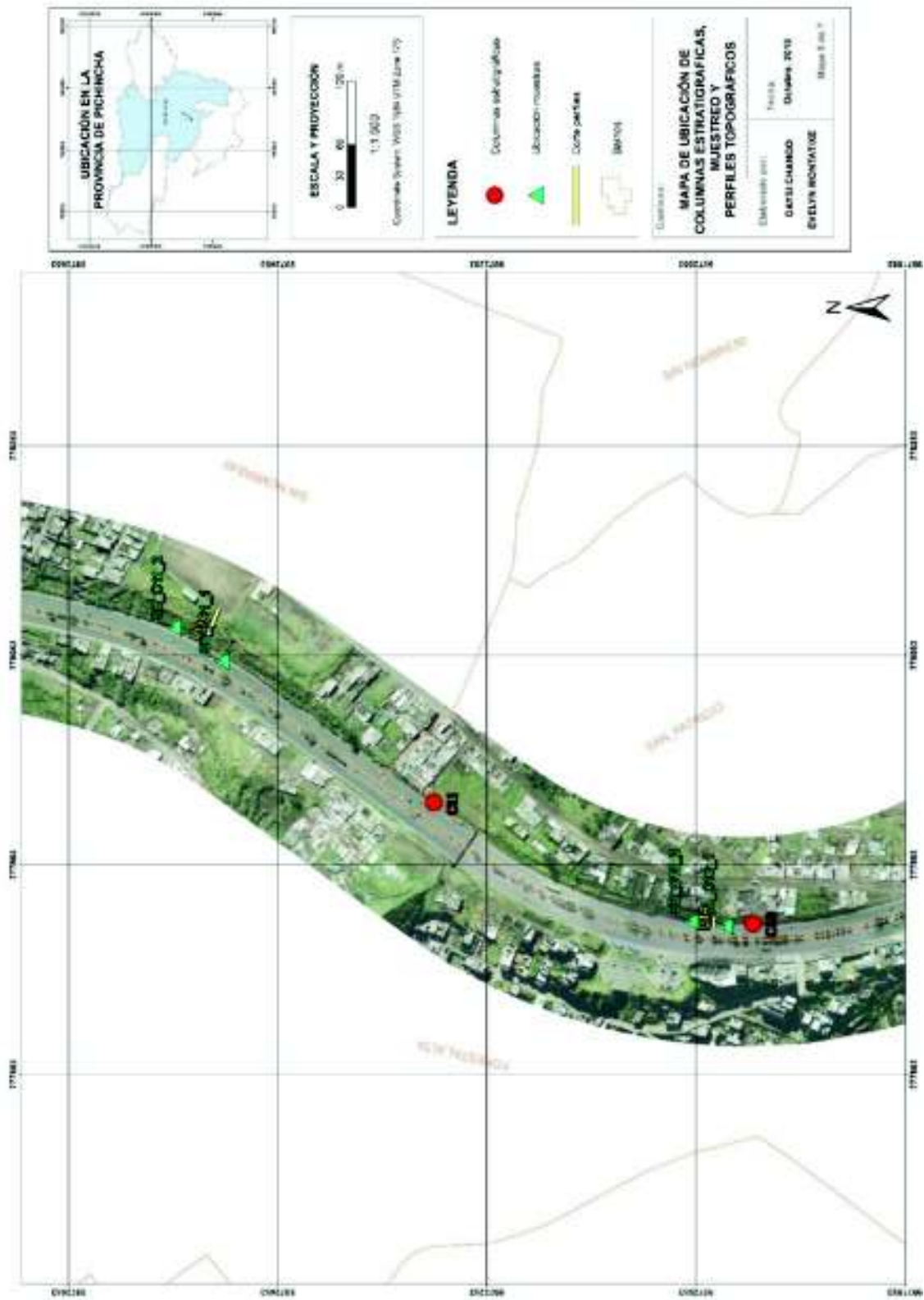


Figura A. 5 Mapa 5 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.



Figura A. 6 Mapa 6 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.



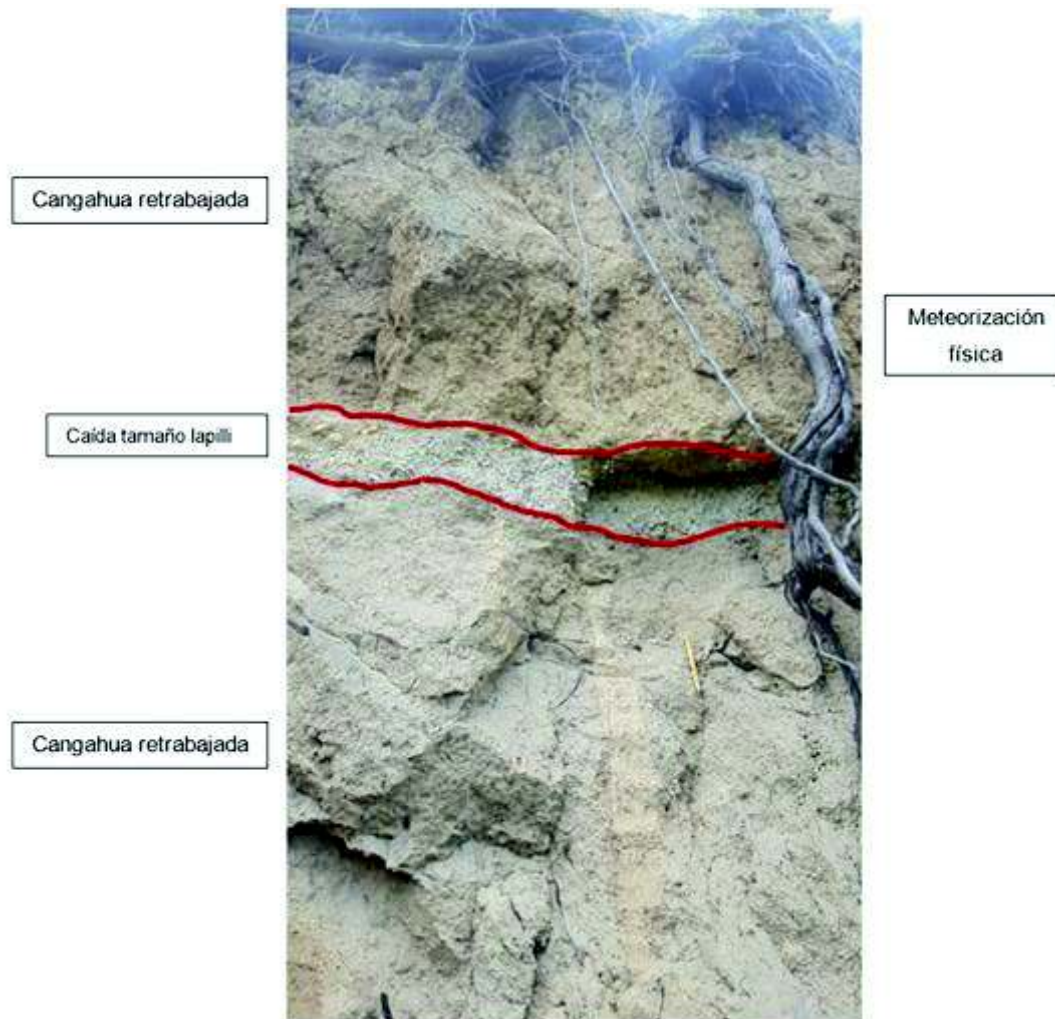


Figura A. 7 Mapa 7 de ubicación de columnas estratégicas, muestreo y perfil topográfico.

## **ANEXO 2. COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS**

Resumen de la información levantada para la construcción de las columnas:

**Columna 1, C1:** Se encuentra ubicada en el sector Pueblo Unido, en sentido SN, UTM: 774800 / 9966751, h 3028 m. Presenta una altura de 14.6 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabajada y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.40 cm hasta 6 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento y meteorización por acción de las raíces de los árboles (fotografía A.1).

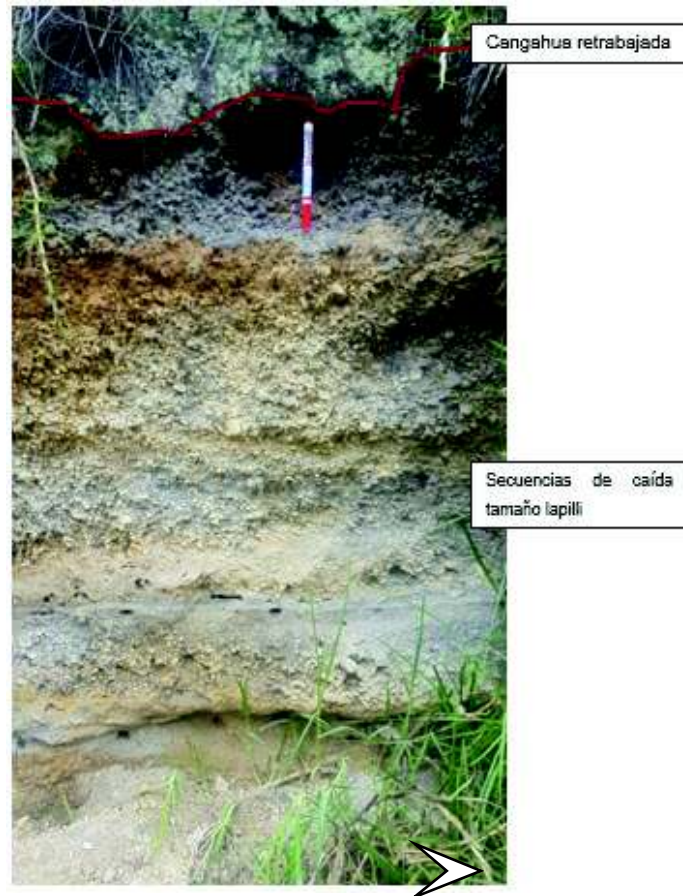


**Fotografía A. 1** Litologías predominantes de la columna C1.

**Columna 2, C2:** Se encuentra ubicada en el sector Pueblo Unido, en sentido NS, UTM: 774768 / 9966715, h 3013 m. Presenta una altura de 16 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabajada y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.20 cm hasta 6 m. Los estratos presentan

erosión superficial por lluvia y viento y meteorización por acción de las raíces de los árboles.

Esta columna se destaca por tener una secuencia de caídas de al menos 8 eventos con alrededor 1.41 metros, macroscópicamente se observan líticos de pómez y rocas ígneas de composición intermedia, esta secuencia fue usada como un marcador de correlación para las columnas presentes en la avenida Gonzalo Pérez Bustamante (fotografía A.2).



**Fotografía A. 2** Capa de secuencia de caídas. En la parte superior se observa lo que se ha denominado cangahua retrabajada y en la parte inferior la secuencia de caídas tamaño lapilli. Coordenada UTM X: 774772 Y: 9966701 Z:3016 m.

**Columna 3, C3:** Se encuentra ubicada en el sector Lucha de los Pobres, en sentido NS, UTM: 775208 / 9967707, h 3062 m. Presenta una altura de 10.40 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabajada y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.20 cm hasta 3.5 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento y meteorización por acción de las raíces de los árboles.

En esta columna a la base se observa la misma secuencia de caídas descrita en la columna 2, con la particularidad que se encuentran falladas localmente (fotografía A.3).



**Fotografía A. 3** Presencia de fallas locales, columna C3.

**Columna 4, C4:** Se encuentra ubicada en el sector Lucha de los Pobres, en sentido SN, UTM: 775288 / 9967935, h 3083 m. Presenta una altura de 8 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.20 cm hasta 4 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento y meteorización por acción de las raíces de los árboles (fotografía A.4).

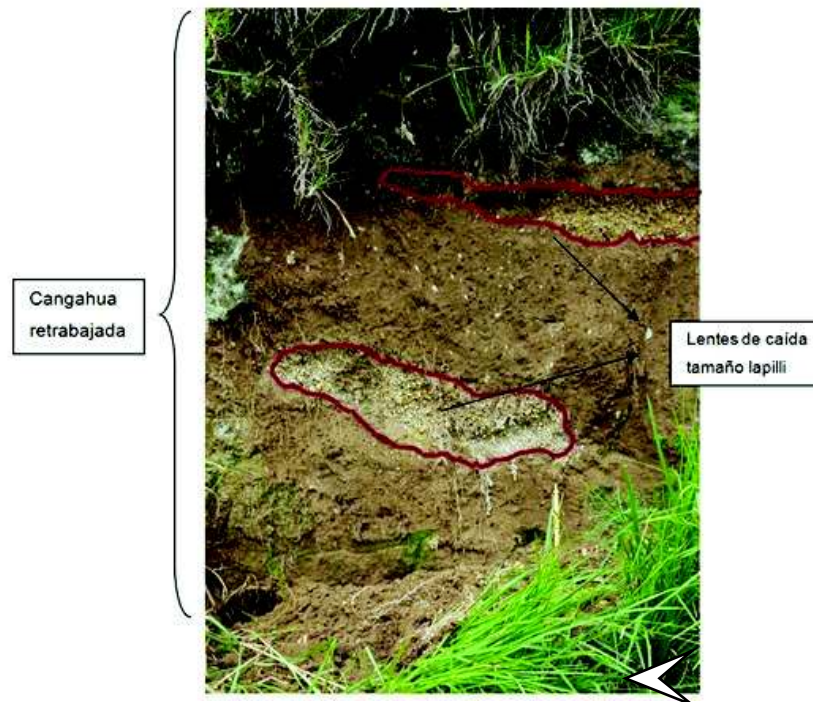


**Fotografía A. 4** Estratos con presencia de erosión superficial por lluvia, viento y meteorización por acción de las raíces de los árboles.

**Columna 5, C5:** Se encuentra ubicada en el sector Lucha de los Pobres, en sentido SN, UTM: 775566 / 9968046, h 3112 m. Presenta una altura de 13 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de

caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.20 cm hasta 6 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento y meteorización por acción de las raíces de los árboles.

El área de estudio se encuentra bajo la influencia de la falla de Quito, lo cual favorece la deformación y erosión de las capas o estratos, por lo cual, a lo largo de los 13 kilómetros como evidencia de la influencia de la erosión, se ha encontrado capas de cangahua re TRABAJADA con lentes de caída (fotografía A.5).



**Fotografía A. 5** Identificación de capa de cangahua re TRABAJADA con lentes. La fotografía corresponde a la columna C5.

**Columna 6, C6:** Se encuentra ubicada en el sector La Argelia Alta, Intercambiador Simón Bolívar, en sentido NS, UTM: 776117 / 9968288, h 3148 m. Presenta una altura de 16.5 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua re TRABAJADA y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.15 cm hasta 10 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento.

En esta zona es el último punto donde se observa la secuencia de caídas descrita en la fotografía 4.2. Además, se identificó una capa de cangahua re TRABAJADA con la presencia de *Coprinisphaera ecuadoriensis* (fósiles de bolas nidadas de escarabajos peloteros) (fotografía A.6).



**Fotografía A. 6** Cangahua retrabajada con presencia de *Coprinisphaera ecuadoriensis* X:  
776284 Y: 9968608 Z: 3130 m.

**Columna 7, C7:** Se encuentra ubicada en el sector La Argelia, en sentido SN, UTM: 776774 / 9969268, h 3138 m. Presenta una altura de 17 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 0.15 cm hasta 6 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento, además las capas de cangahua presentan una humedad visible (fotografía A.7). En esta columna al techo también se observa la capa cangahua con presencia de *Coprinisphaera ecuadoriensis* descrita en la fotografía A.6.



**Fotografía A. 7** Estratos con presencia de erosión superficial por lluvia y viento.

**Columna 8, C8:** Se encuentra ubicada en el sector La Argelia, cercano al colegio Ludoteca, en sentido NS, UTM: 777197 / 9969784, h 3166 m. Presenta una altura de

20.5 m y está compuesta principalmente por cangahua retrabada. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 4 m hasta 15 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento. En esta columna al techo también se observa la capa cangahua con presencia de *Coprinisphaera ecuadoriensis* descrita en la fotografía 4.6. El motivo por el cual no se tiene un mayor detalle de esta columna es por la presencia de árboles colocadas para la estabilización del talud y arbustos naturales de la zona (fotografía A.8).



**Fotografía A. 8** Presencia de árboles y arbustos, columna C8.

**Columna 9, C9:** Se encuentra ubicada en el sector La Forestal, deslizamiento La Forestal, en sentido NS, UTM: 777463 / 9970739, h 3145 m. Presenta una altura de 27.5 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, las cuales se encuentran intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 15 cm hasta 8 m. Los estratos presentan una alta erosión superficial por lluvia y viento (fotografía A.9).

En esta columna se observó la presencia de capas deformadas, segmentadas y dispuestas en forma aleatoria, a causa del gran deslizamiento ocurrido antiguamente.





**Fotografía A. 9** Capas afectadas por erosión superficial por lluvia y viento, columna C9.

**Columna 10**, C10: Se encuentra ubicada en el sector La Forestal, en sentido SN, UTM: 777826 / 9971999, h 3063 m. Presenta una altura de 10.8 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 15 cm hasta 4 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia, viento y un mal manejo de drenaje (fotografía A.10).



**Fotografía A. 10** Capas afectadas por erosión superficial por lluvia, viento y mal manejo de drenaje, columna C10.

**Columna 11**, C11: Se encuentra ubicada en el sector Loma de Puengasí, en sentido SN, UTM: 777942 / 9972304, h 3064 m. Presenta una altura de 26 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de

caída, intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 15 cm hasta 12 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia, viento y un mal manejo de drenaje (fotografía A.11).



**Fotografía A. 11** Talud sin vegetación con el cual se pudo levantar la columna C11.

**Columna 12, C12:** Se encuentra ubicada en el sector Patrimonio Familiar, en el conjunto habitacional La Carolina, en sentido NS, UTM: 779082 / 9973540, h 2965 m. Presenta una altura de 8.5 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 15 cm hasta 3 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento (figura A.12).



**Fotografía A. 12** Capas afectadas por erosión superficial por lluvia y viento, columna C12.

**Columna 13, C13:** Se encuentra ubicada en el sector Patrimonio Familiar, en sentido NS, UTM: 779338 / 9973983, h 2953 m. Presenta una altura de 22.2 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 15 cm hasta 4 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia y viento (fotografía A.13).



**Fotografía A. 13** Capas afectadas por erosión superficial por lluvia y viento.

**Columna 14, C14:** Se encuentra ubicada en el sector Patrimonio Familiar, en sentido SN, UTM: 779048 / 9974282, h 2936 m. Presenta una altura de 18.8 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 15 cm hasta 5 m. Los estratos presentan erosión superficial por lluvia, viento (fotografía A.14).



**Fotografía A. 14** Capas afectadas por erosión superficial

**Columna 15**, C15: Se encuentra ubicada en el sector Monjas, en sentido SN, UTM: 779352 / 9974348, h 2924 m. Presenta una altura de 21.5 m y está compuesta principalmente por dos litologías predominantes, cangahua retrabada y depósitos de caída, intercaladas entre sí. Los contactos entre capas son irregulares con espesores de estratos desde 10 cm hasta 10 m. Los estratos presentan alta erosión superficial por lluvia, viento e inadecuado mantenimiento del sistema de drenaje (fotografía A.15).



**Fotografía A. 15** Capas afectadas por erosión superficial e inadecuado sistema de drenaje.

Con la información levantada se construyeron las siguientes columnas litoestratigráficas:

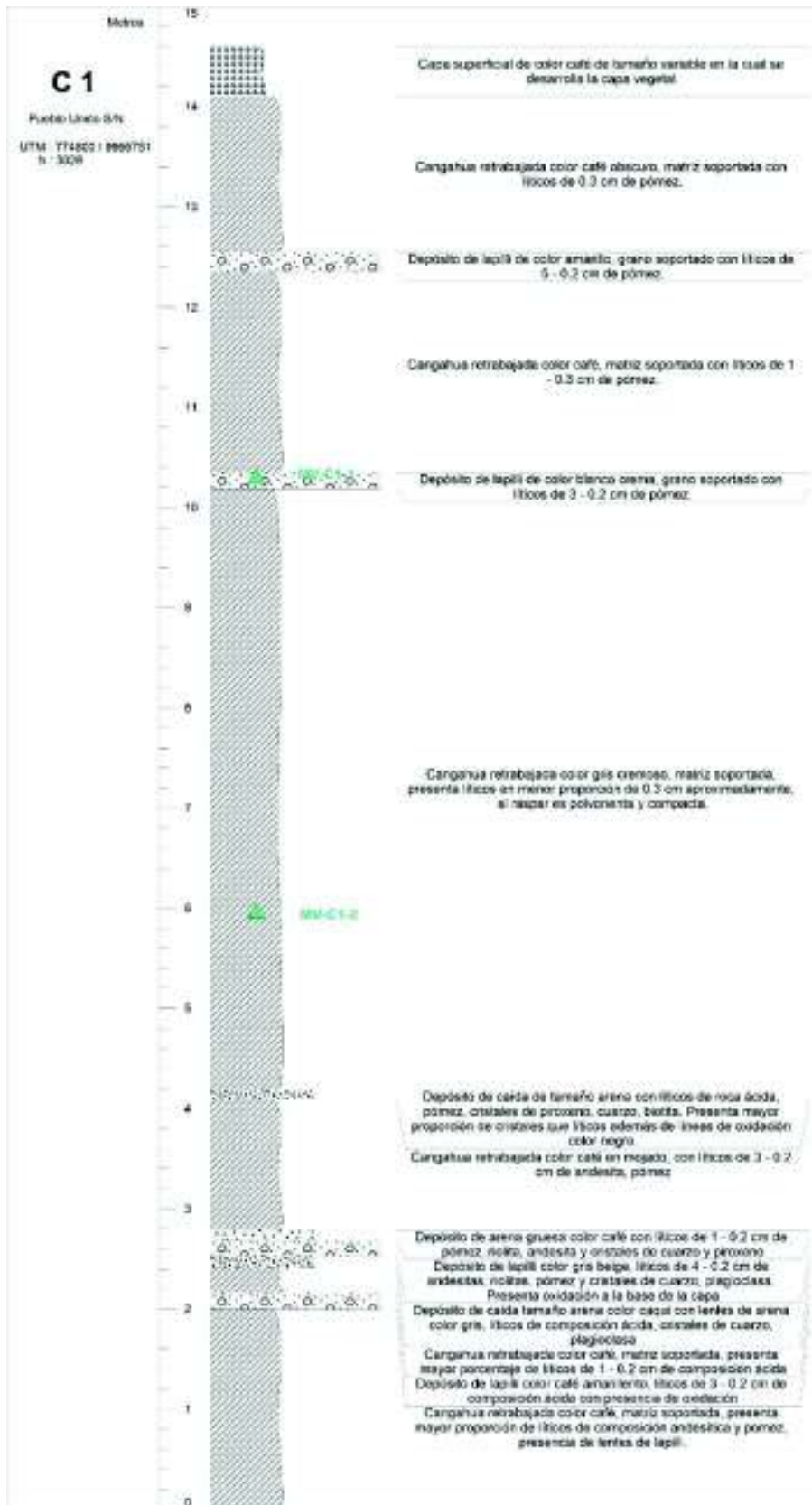


Figura B. 1 Representación y descripción de la columna C1.

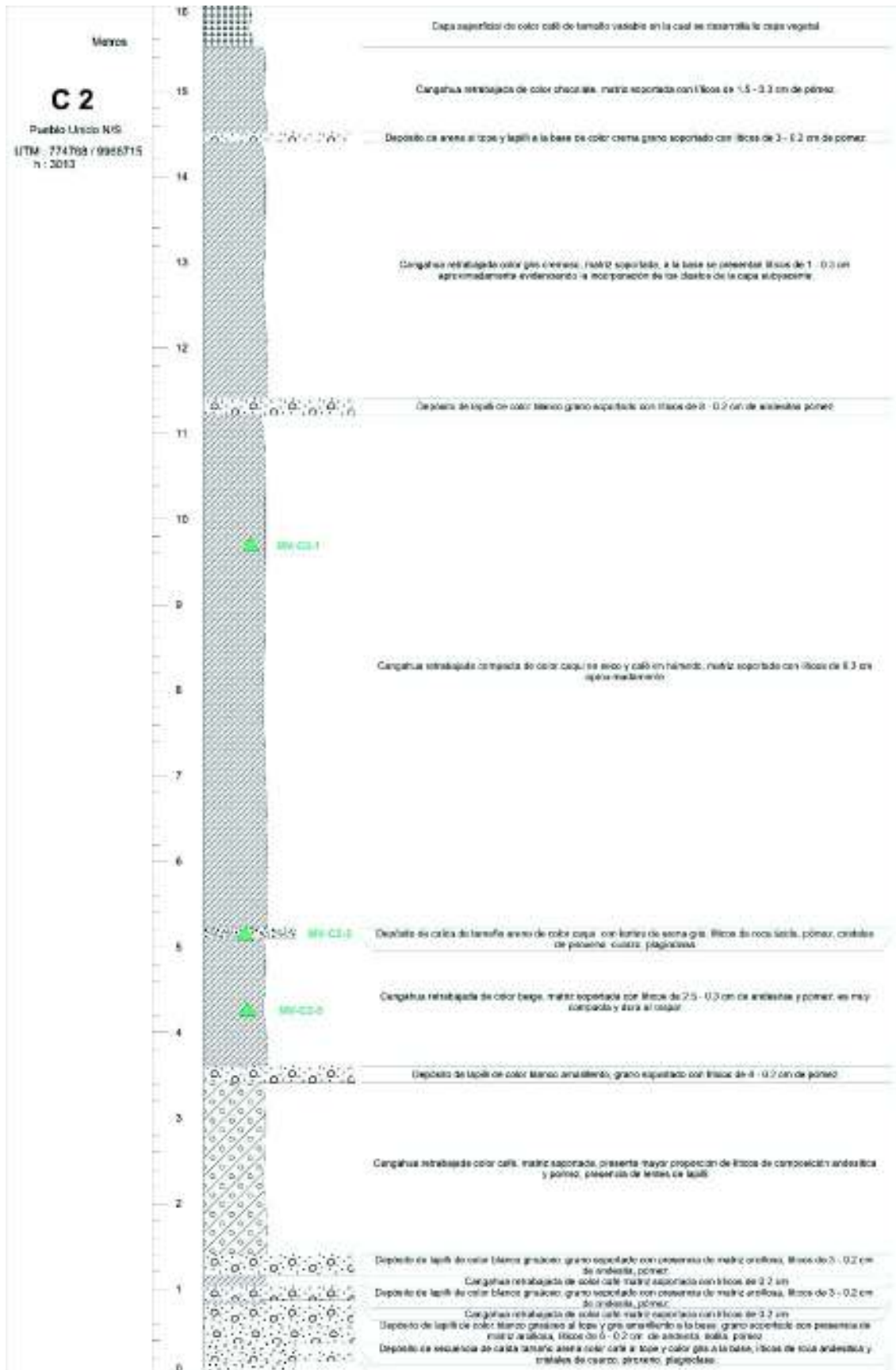


Figura B. 2 Representación y descripción de la columna C2.

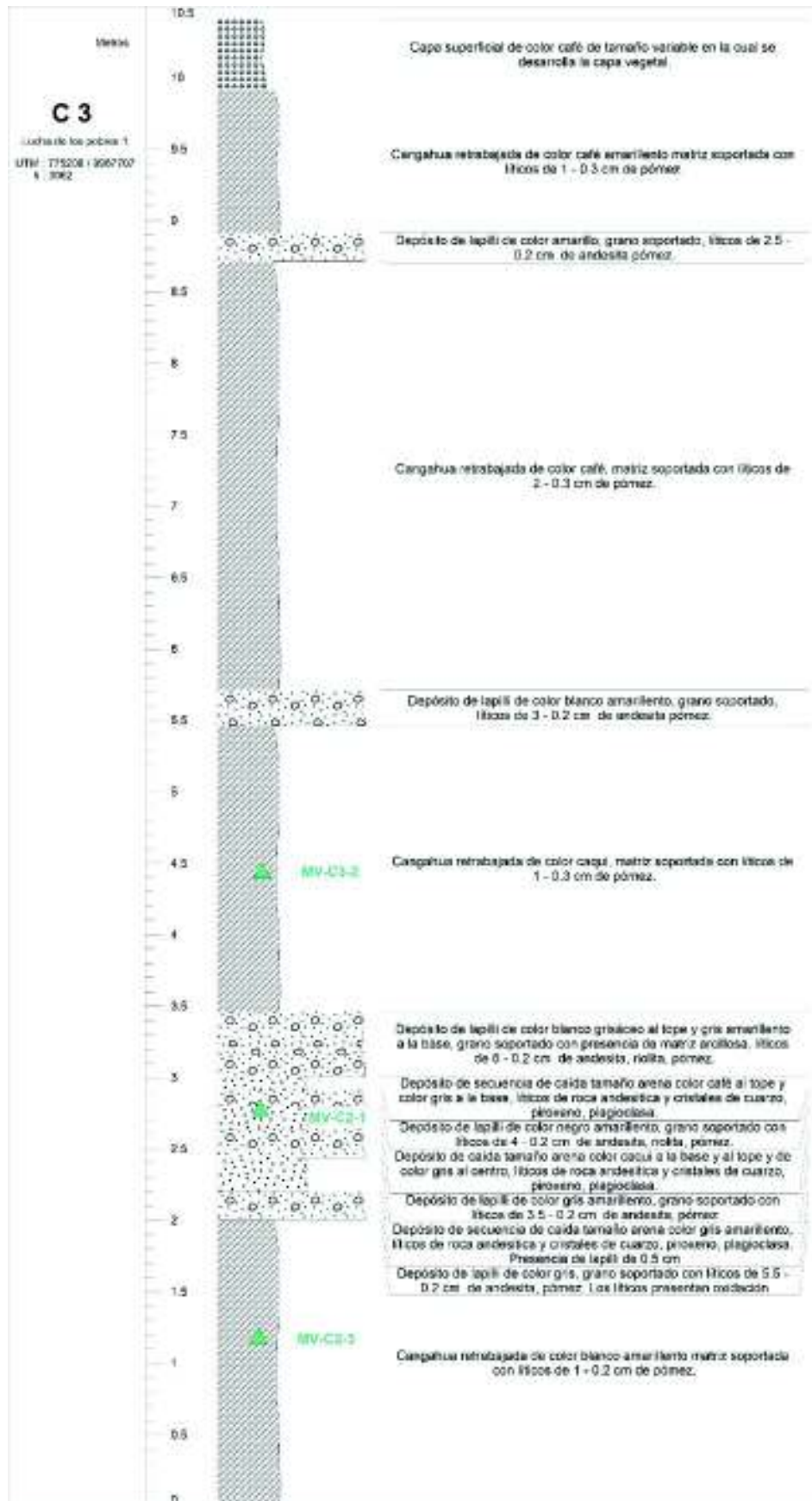
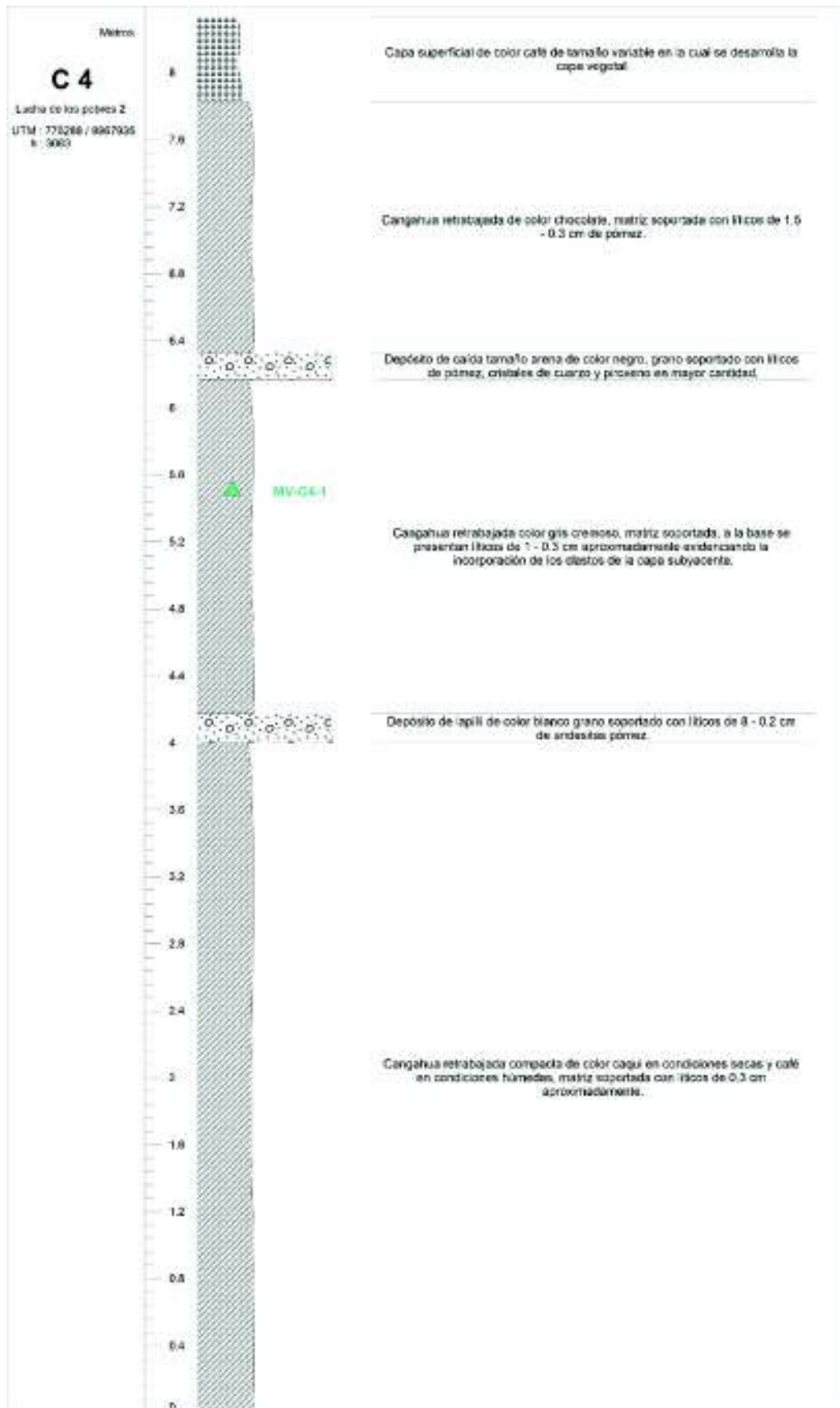


Figura B. 3 Representación y descripción de la columna C3.



**Figura B. 4** Representación y descripción de la columna C4.



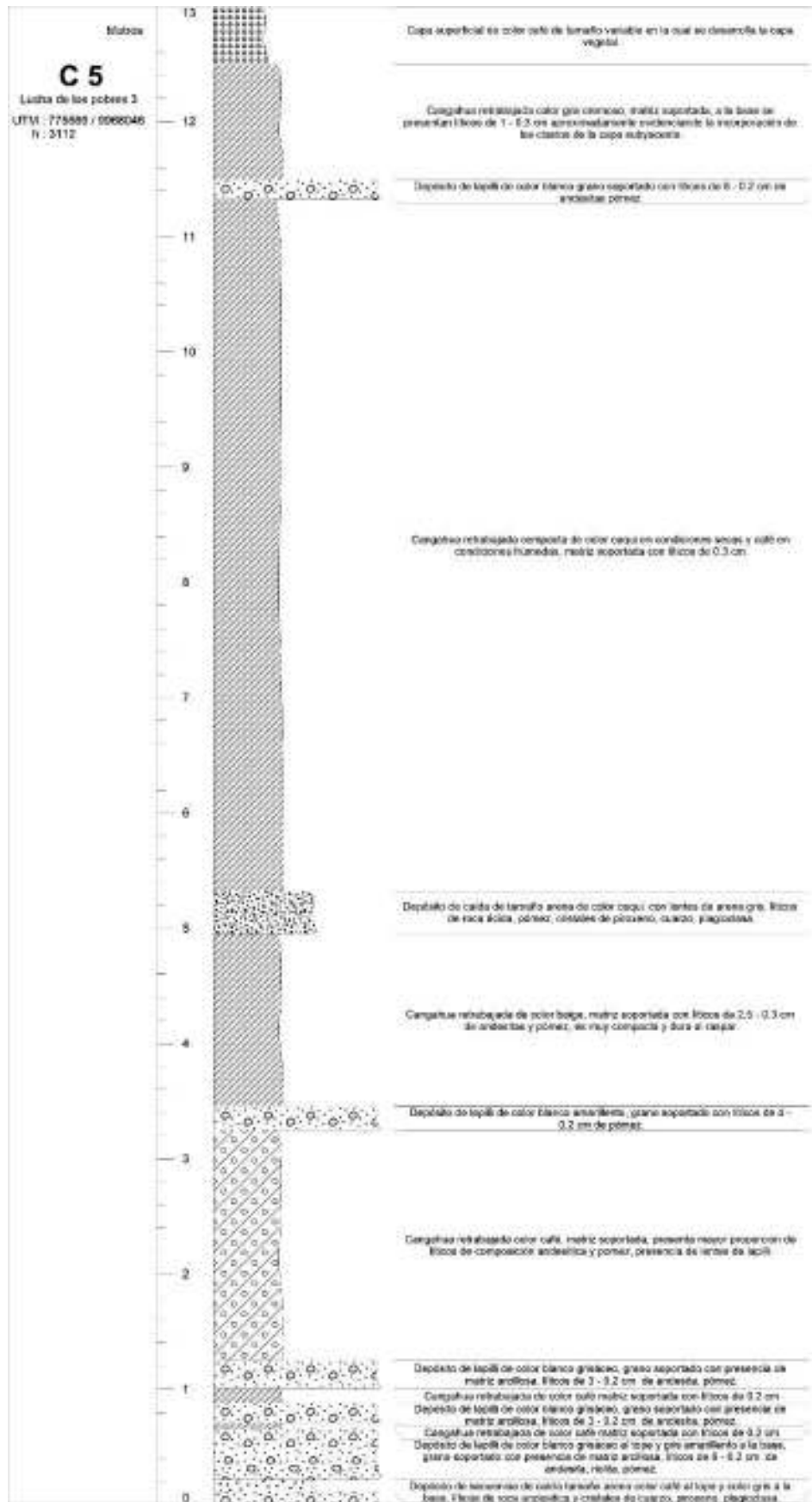


Figura B. 5 Representación y descripción de la columna C5.

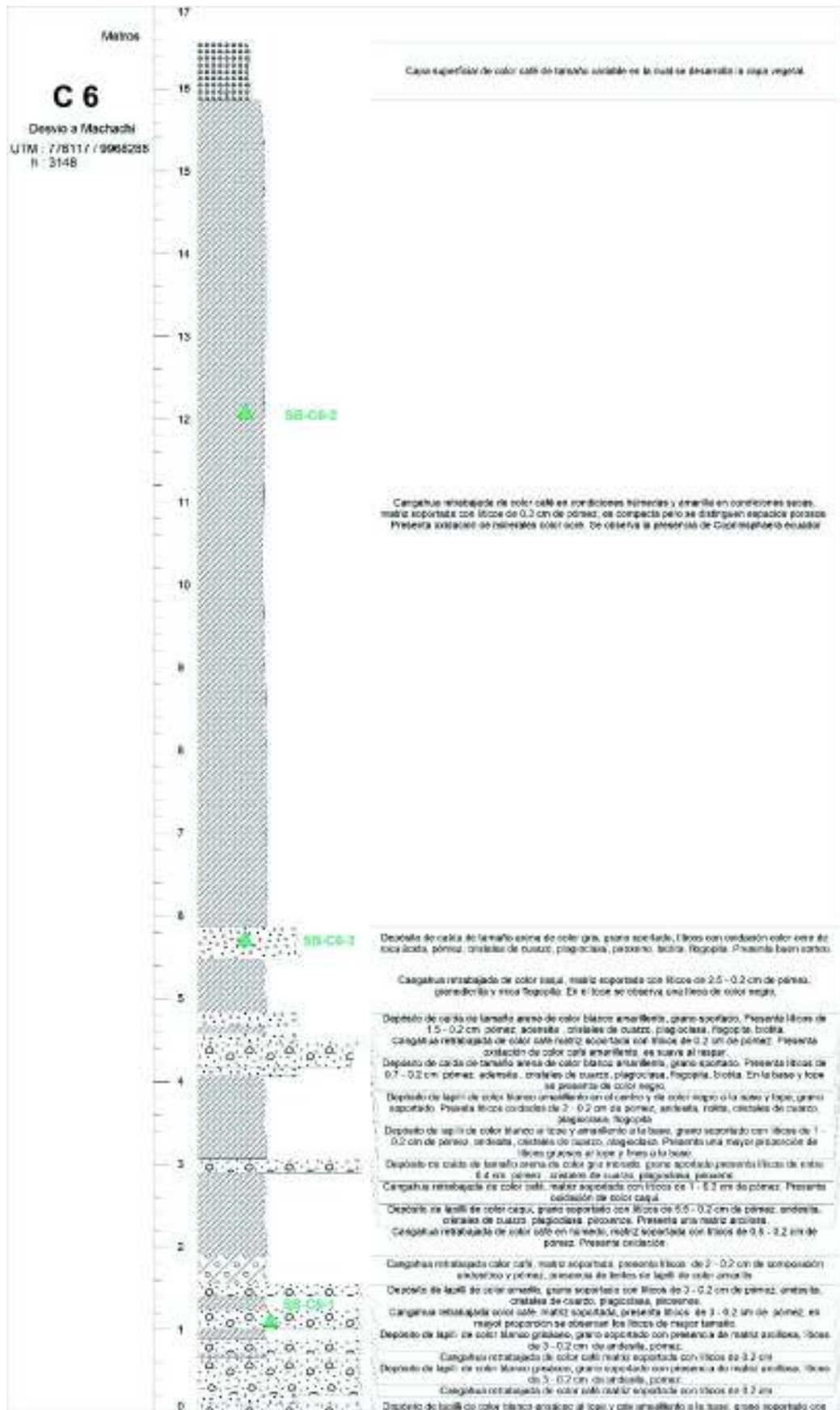


Figura B. 6 Representación y descripción de la columna C6.

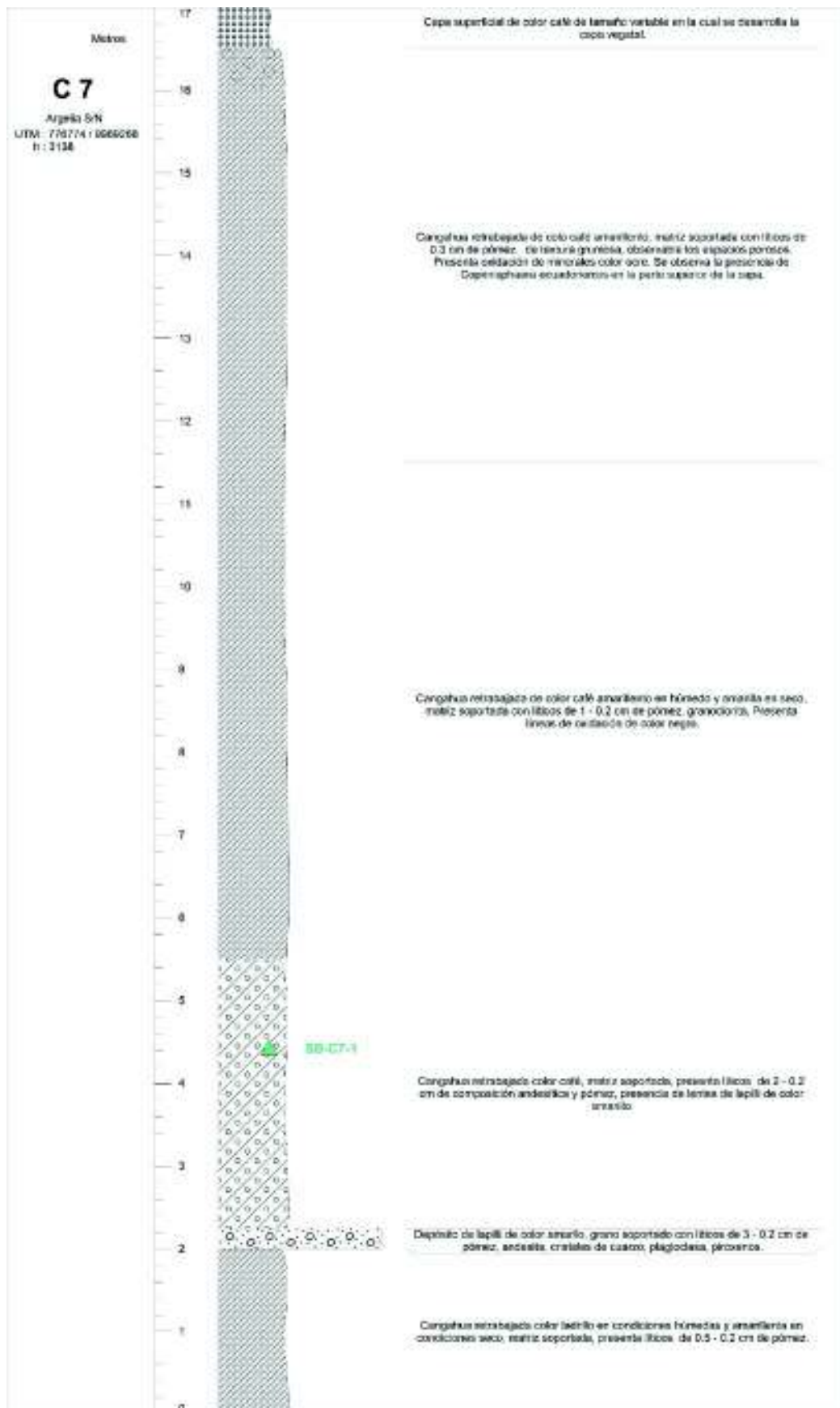
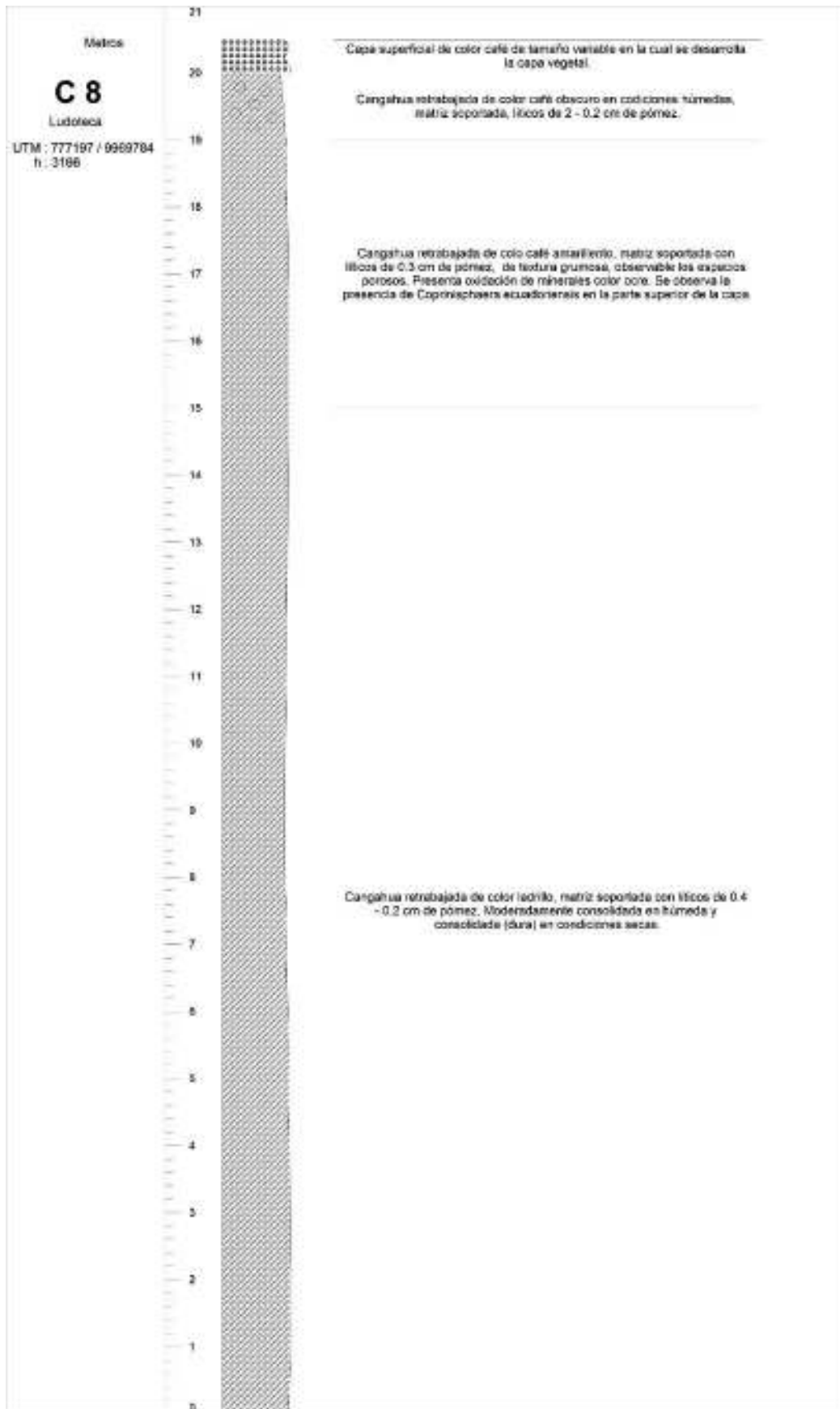


Figura B. 7 Representación y descripción de la columna C7.



**Figura B. 8** Representación y descripción de la columna C8.

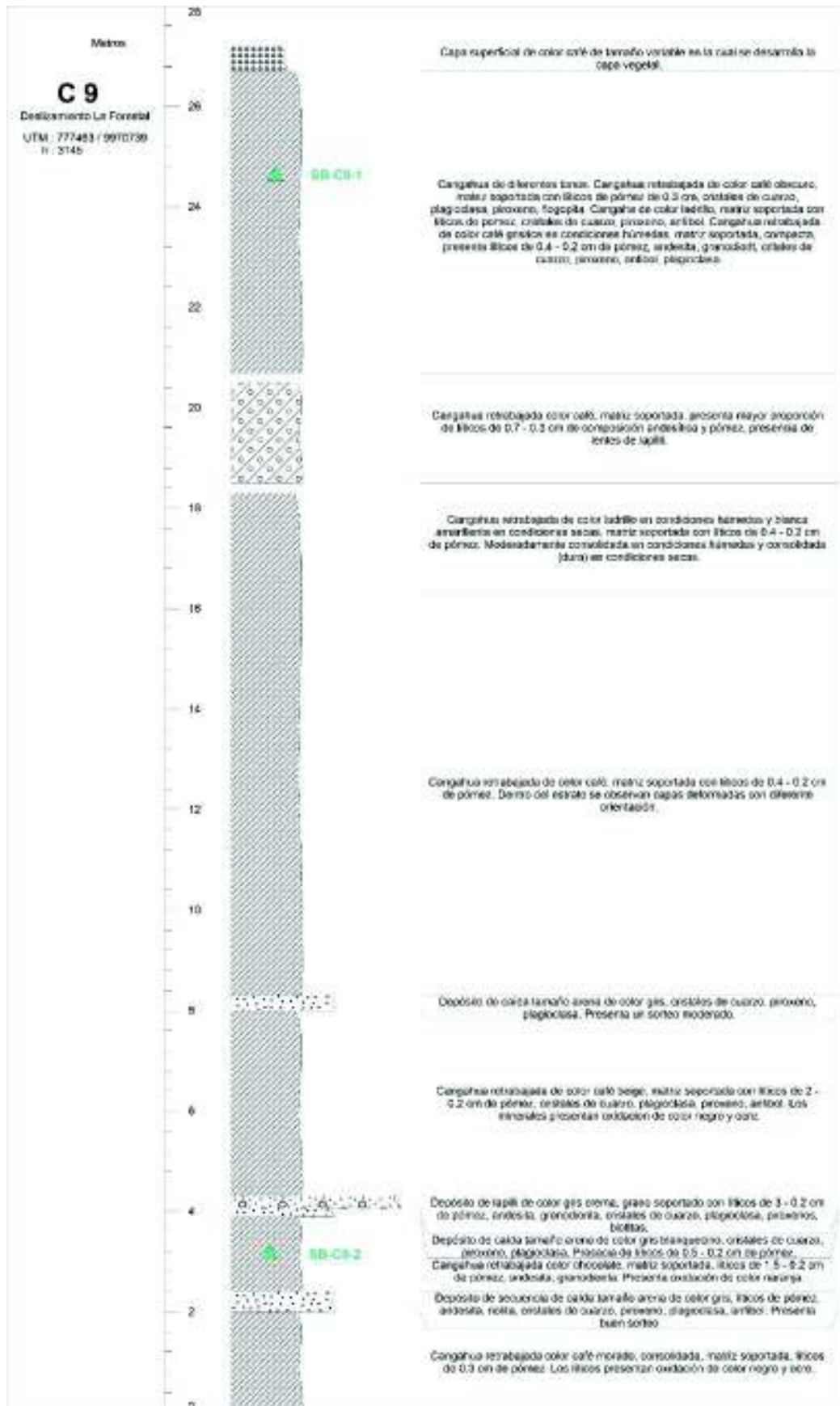


Figura B. 9 Representación y descripción de la columna C9.

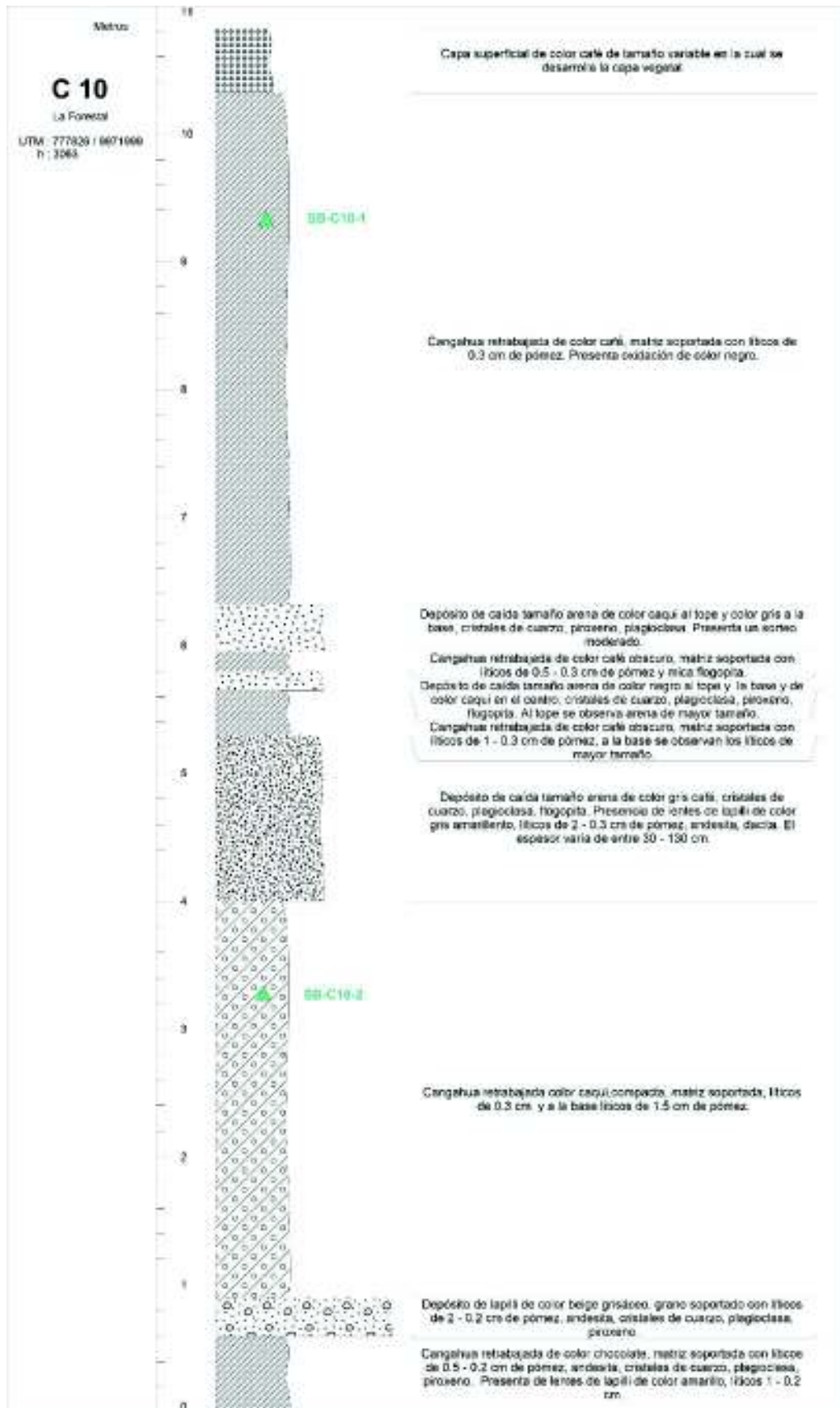


Figura B. 10 Representación y descripción de la columna C10.

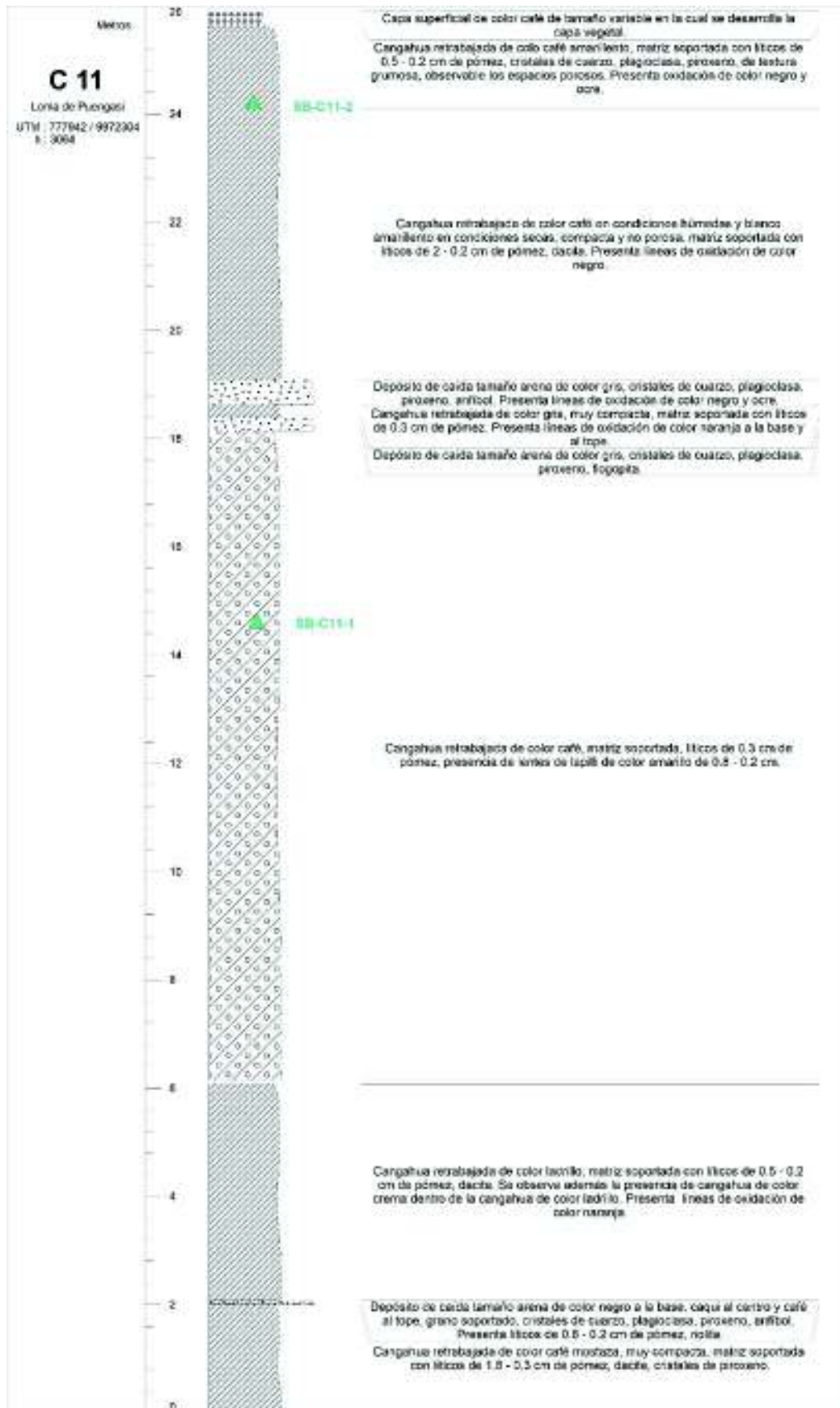


Figura B. 11 Representación y descripción de la columna C11.

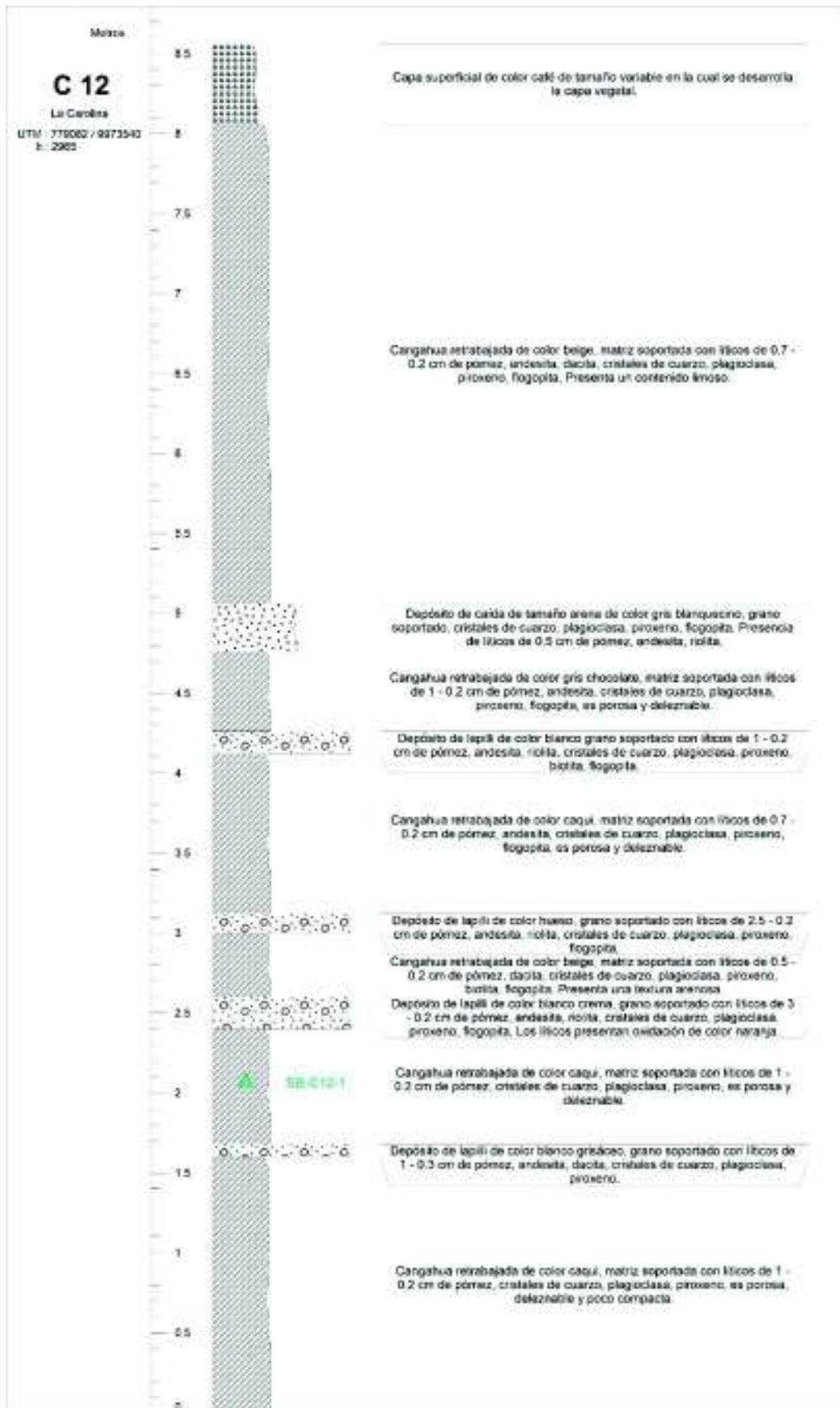


Figura B. 12 Representación y descripción de la columna C12.



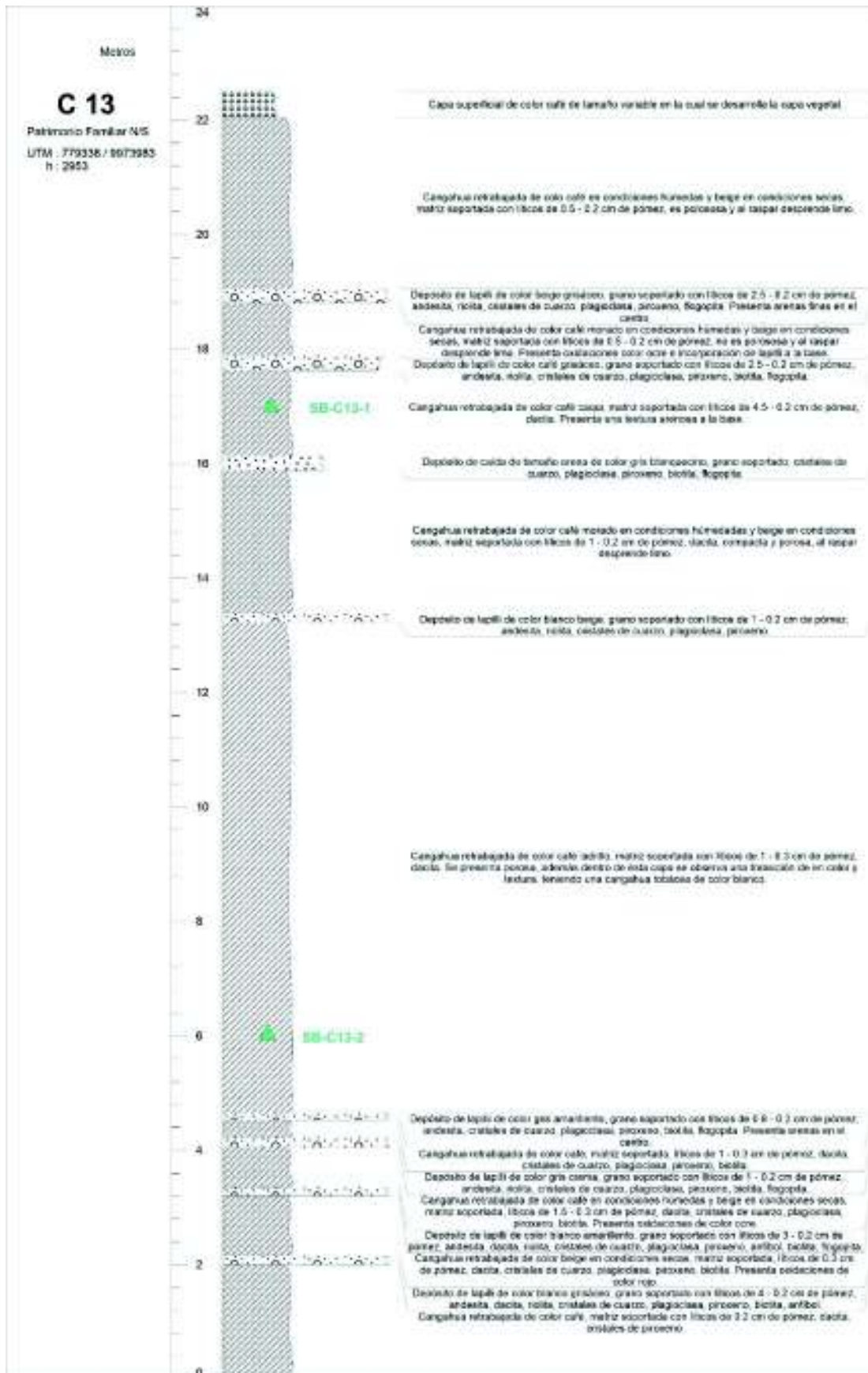


Figura B. 13 Representación y descripción de la columna C13.

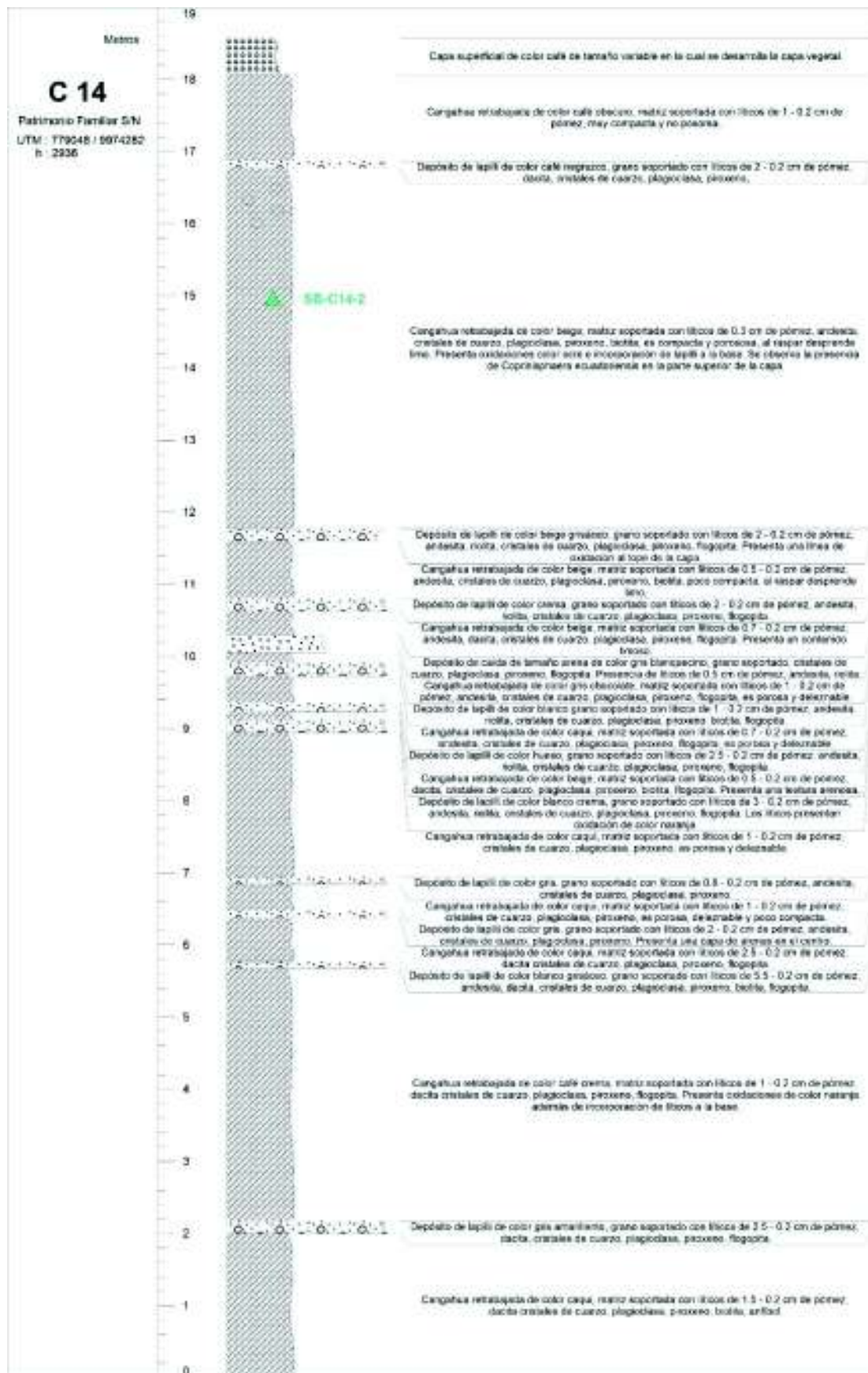


Figura B. 14 Representación y descripción de la columna C14.

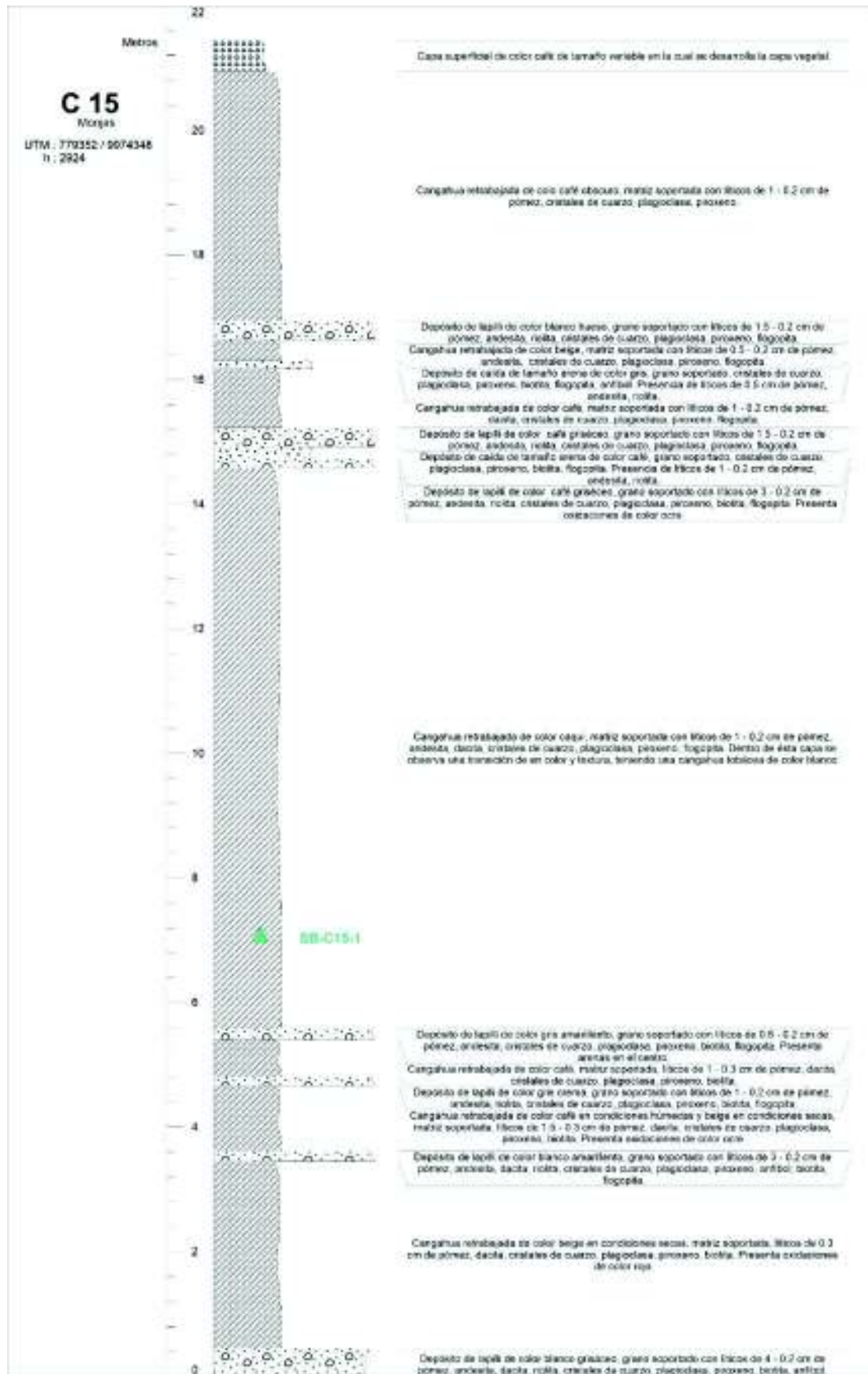


Figura B. 15 Representación y descripción de la columna C15.

### **ANEXO 3. INVENTARIO DE MOVIMIENTOS EN MASA**

**Tabla B. 1** Inventario de movimientos en masa.

CÓDIGO	COORDENADAS		ALTURA	TIPO DE MOVIMIENTO		NIVEL DE HUMEDAD	CAUSAS DEL MOVIMIENTO	
	X	Y		1	2			
SB-1	779595	9973879	2899	Derrumbe		Ligeramente húmedo	Material deleznable. Erosión superficial. Mantenimiento deficiente de drenaje.	Lluvias. Socavación al pie de talud
SB-2	779601	9973948	2902	Derrumbe		Húmedo	Material deleznable. Erosión superficial. Mantenimiento deficiente de drenaje.	Lluvias. Socavación al pie de talud, carga.
SB-3	779579	9974096	2893	Derrumbe		Húmedo	Material fisurado o agrietado, erosión superficial	lluvias, carga
SB-4	779362	9974336	2906	Derrumbe		Húmedo	Material fisurado o agrietado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	lluvias, carga
SB-5	779053	9974285	2938	Derrumbe		Seco	Material deleznable. Erosión superficial. Mantenimiento deficiente de drenaje.	lluvias
SB-6	779009	9974228	2945	Derrumbe		Húmedo	Material deleznable. Erosión superficial. Mantenimiento deficiente de drenaje.	lluvias, socavación al pie de talud
SB-7	779057	9974193	2945	Derrumbe		Húmedo	Erosión superficial	Lluvias, socavación al pie de talud.
SB-8	779046	9974143	2945	Derrumbe		Seco	Material deleznable. Erosión superficial. Mantenimiento deficiente de drenaje.	lluvias, Socavación al pie de talud, carga
SB-9	779153	9974109	2959	Derrumbe		Húmedo	Erosión superficial	Lluvias, socavación al pie de talud.
SB-10	779035	9974412	2941	Caída		Húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	lluvias, carga
SB-11	779321	9973999	2964	Derrumbe		Húmedo	Material de meteorización. Erosión superficial	lluvias, carga
SB-12	779270	9973664	2959	Caída		Húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	lluvias, carga
SB-13	779155	9973583	2966	Caída		Húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	lluvias, carga
SB-14	779153	9973577	2975	Derrumbe		Húmedo	Material deleznable, fisurado o agrietado. Erosión superficial, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	Lluvias, carga
SB-15	778440	9973188	3018	Caída		Ligeramente húmedo	Materia fisurado o agrietado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias, carga
SB-16	778441	9973149	3024	Caída		Ligeramente húmedo	Materia fisurado o agrietado, erosión superficial	Lluvias, carga
SB-17	778287	9973097	3027	Caída		Húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	Lluvias, carga
SB-18	778175	9972912	3032	Derrumbe		Húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	Lluvias, carga
SB-19	778113	9972588	3054	Derrumbe	Caída	Ligeramente húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, erosión superficial	Lluvias, carga

<b>SB-20</b>	778094	9972520	3056	Caída		Ligeramente húmedo	Materia fisurado o agrietado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias, carga
<b>SB-21</b>	778040	9972444	3059	Caída		Ligeramente húmedo	Materia fisurado o agrietado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias, carga
<b>SB-22</b>	777983	9972361	3065	Derrumbe		Húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, erosión superficial	Lluvias, carga
<b>SB-23</b>	777839	9972112	3070	Caída		Seco	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje,	Lluvias, carga
<b>SB-24</b>	777831	9972063	3071	Caída		Seco	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje,	Lluvias, carga
<b>SB-25</b>	777827	9972025	3067	Derrumbe		Húmedo	Material deleznable, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias, carga
<b>SB-26</b>	777942	9971610	3079	Caída		Ligeramente húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-27</b>	777955	9971584	3081	Caída		Ligeramente húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-28</b>	777968	9971552	3084	Caída		Ligeramente húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-29</b>	777973	9971540	3092	Caída		Ligeramente húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-30</b>	778011	9971540	3095	Deslizamiento rotacional		Ligeramente húmedo	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	Lluvias, carga
<b>SB-31</b>	777816	9971130	3106	Caída		Ligeramente húmedo	Material deleznable	Lluvias
<b>SB-32</b>	777785	9971096	3085	Caída	Flujo	Húmedo	Material deleznable, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	Lluvias
<b>SB-33</b>	777738	9971008	3100	Caída		Ligeramente húmedo	Erosión superficial	Lluvias, carga
<b>SB-34</b>	777699	9970989	3137	Derrumbe		Seco	Erosión superficial, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje	Lluvias
<b>SB-35</b>	777647	9970928	3137	Caída	Flujo	Ligeramente húmedo	Erosión superficial, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, material meteorizado	Lluvias
<b>SB-36</b>	777491	9970778	3135	Deslizamiento rotacional		Húmedo	Erosión superficial, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, material meteorizado	Mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, Lluvias
<b>SB-37</b>	777441	9970651	3133	Derrumbe		Ligeramente húmedo	Material meteorizado, material fisurado o agrietado	Lluvias
<b>SB-38</b>	777435	9970626	3133	Caída		Ligeramente húmedo	Erosión superficial, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje, material deleznable	Lluvias
<b>SB-39</b>	777433	9970392	3139	Caída		Seco	Material plástico débil, deleznable, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-40</b>	777374	9970154	3145	Caída		Seco	Material fisurado o agrietado, material deleznable	Lluvias
<b>SB-41</b>	777369	9970096	3155	Caída		Seco	Material fisurado o agrietado, material deleznable	Lluvias

<b>SB-42</b>	776914	9969476	3155	Caída	Derrumb e	Ligeramen te húmedo	Material fisurado o agrietado, material deleznable, erosión superficial, mantenimiento deficiente del sistema de drenaje.	Lluvias, carga
<b>SB-43</b>	776968	9969492	3154	Caída		Húmedo	Material fisurado o agrietado, material deleznable, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-44</b>	776912	9969435	3151	Derrumbe		Húmedo	Material fisurado o agrietado, material deleznable, erosión superficial	Lluvias
<b>SB-45</b>	776208	9968477	3093	Derrumbe		Seco	Material deleznable y meteorizado, orientación desfavorable, erosión superficial	Lluvias, socavación al pie de talud, carga
<b>SB-46</b>	776190	9968375	3150	Derrumbe		Ligeramen te húmedo	Material deleznable y meteorizado, orientación desfavorable, erosión superficial	Lluvias, socavación al pie de talud, carga
<b>SB-47</b>	776178	9968346	3151	Derrumbe		Ligeramen te húmedo	Material deleznable y meteorizado, orientación desfavorable, erosión superficial	Lluvias, socavación al pie de talud, carga
<b>MV-1</b>	775997	9968060	3150	Derrumbe		Ligeramen te húmedo	Material deleznable y meteorizado, orientación desfavorable, erosión superficial	Lluvias, socavación al pie de talud
<b>MV-2</b>	775671	9967994	3124	Derrumbe		Húmedo	Material deleznable y meteorizado, orientación desfavorable, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	lluvias
<b>MV-3</b>	775285	9967694	3067	Derrumbe		Ligeramen te húmedo	Material deleznable y meteorizado, orientación desfavorable, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	lluvias, carga
<b>MV-4</b>	775176	9967322	3072	Derrumbe		Ligeramen te húmedo	Material fisurado o agrietado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	lluvias
<b>MV-5</b>	774800	9966872	3025	Derrumbe		Seco	Material meteorización, material fisurado o agrietado	lluvias
<b>MV-6</b>	774799	9966759	3023	Caída		Ligeramen te húmedo	Material meteorización, material fisurado o agrietado	lluvias
<b>MV-7</b>	774703	9966583	3002	Derrumbe	Caída	Húmedo	Material meteorización, material fisurado o agrietado, mantenimiento deficiente de drenaje	lluvias
<b>MV-8</b>	774458	9966794	3014	Caída		Ligeramen te húmedo	Material meteorización, material fisurado o agrietado, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias
<b>MV-9</b>	774462	9966870	2930	Derrumbe		Húmedo	Material fisurado, meteorizado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias
<b>MV-10</b>	774453	9967024	2943	Derrumbe		Ligeramen te húmedo	Material fisurado, meteorizado, erosión superficial, mantenimiento deficiente de drenaje	Lluvias

## **ANEXO 4. FOTOGRAFÍAS DE MOVIMIENTOS EN MASA**





**Fotografía B. 1** Movimiento en masa de tipo caída: UTM: X: 777410.8; Y: 9970353, sector La Forestal



**Fotografía B. 2** Movimiento en masa de tipo caída: UTM: X: 777102.1; Y: 9969629.9, sector La Argelia.



**Fotografía B. 3** Movimiento en masa de tipo flujo asociado a una caída inicial: UTM: X: 777720.5; Y: 9971015.7, sector La Forestal.



**Fotografía B. 4** Movimiento en masa de tipo caída: UTM: X: 778439.7; Y: 9973191.7, sector Loma de Puengasí.



**Fotografía B. 5** Movimiento en masa de tipo caída: UTM: X: 779548.1; Y: 9974078.1, sector San Pedro de Monjas.