

Modelamiento geotécnico para el análisis de movimientos en masa en el sector norte de
Bucaramanga

Yuseth Sebastián Gómez Neira

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Geotecnia

Director

Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

Doctor en Ingeniería del Terreno

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Geotecnia

Bucaramanga

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Aspectos Generales	14
1.1 Justificación	14
1.2 Objetivos	16
1.3 Metodología	16
1.4 Localización del área de estudio	18
2. Marco Geomorfológico.....	19
2.1 Marco geomorfológico regional	19
2.2 Coluvión de ciudad norte	21
2.1.1 Coluvión Mirador – Lizcanos	22
2.1.2 Coluvión de Villa Rosa	22
2.1.3 Coluvión Kennedy – Las Olas	22
2.2 Unidades geomorfológicas dentro del área de estudio	24
3. Marco Geológico	26
3.1 Litología general	26
3.1.1 Formación Diamante (PCd).....	27
3.1.2 Formación Tiburón (TRpt).....	28
3.1.3 Formación Bocas (TRb).....	28

3.1.4 Formación Bucaramanga (Qb).....	28
3.1.4.1 Miembro Órganos Inferior (QbO1).....	28
3.1.4.2 Miembro Órganos Superior (QbO2).....	29
3.2 Geología estructural	29
3.2.1 Sistema de Fallas de Bucaramanga (B2, B3 y B4)	29
3.2.2 Sistema de Fallas Transversales (TN2”, TN2, TN2-3 y TN3).....	29
3.3 Unidades geológicas superficiales	32
4. Caracterización de los materiales.....	34
4.1 Exploración directa	34
4.2 Exploración indirecta	37
4.3 Resultados tomografía de resistividad eléctrica.....	39
4.4 Resultados sísmica downhole	40
4.5 Ensayos de laboratorio	42
5. Modelo Geológico-Geotécnico	44
5.1 Geometría.....	44
5.2 Niveles freáticos.....	46
5.3 Propiedades geomecánicas.....	47
6. Factores Detonantes	48
6.1 Lluvia	48
6.2 Sismo.....	51
6.3 Escenarios	54

7. Análisis de Estabilidad	54
7.1 Hipótesis de movimientos	54
7.2 Método de equilibrio límite	57
7.3 Software de modelamiento	58
7.4 Mecanismo de falla	58
7.5 Modelo constitutivo y Métodos de análisis	58
7.6 Resultados	59
7.7 Método de elementos finitos	62
7.8 Software de modelamiento	63
7.9 Modelo constitutivo	63
7.10 Resultados	64
7.11 Comparación de los dos métodos	67
7.12 Escenarios sin sismo	67
7.13 Escenarios con sismo	70
8. Mapas de factor de seguridad	73
9. Recomendaciones para la Estabilización	75
10. Conclusiones	78
Referencias Bibliográficas	81

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Agrietamientos en la infraestructura del área de estudio.....	15
Figura 2. Localización de la zona de estudio.....	19
Figura 3. Marco geomorfológico	20
Figura 4. Gran Coluvión del Sector Norte.....	23
Figura 5. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.....	25
Figura 6. Mapa geológico de la zona de estudio.....	27
Figura 7. Mapa estructural de la zona de estudio.....	31
Figura 8. Mapa Unidades Geológicas Superficiales, UGI.....	32
Figura 9. Izq: Equipo de perforación. Cen: Vista de la Trinchera 1. Der: Ubicación.....	35
Figura 10. Localización de sondeos, apiques y trincheras para la zona Norte de Bucaramanga..	36
Figura 11. Ubicación de la exploración indirecta	38
Figura 12. TRE G7.....	39
Figura 13. TRE G11.....	40
Figura 14. Resultados Downhole S1.....	41
Figura 15. Gran coluvión del Sector Norte, topografía del año 1967.....	45
Figura 16. Perfil general 4.	46
Figura 17. Cuencas con influencia en el área de estudio.	49
Figura 18. Ubicación los sondeos con piezómetros y registro del periodo Junio-Agosto, 2017..	50
Figura 19. Sistemas de fallas cercanos al área de estudio.....	52
Figura 20. Ubicación en planta de los perfiles para el modelamiento.	55
Figura 21. Ejemplo de corte transversal al posible gran movimiento (Perfil general 1).	56

Figura 22. Ejemplo de corte longitudinal al posible gran movimiento (Perfil general 4). 56

Figura 23. Análisis de estabilidad Perfil general 4, escenarios con nivel freático habitual. 60

Figura 24. Análisis de estabilidad Perfil general 4, escenarios para evento lluvioso extremo. 61

Figura 25. Contornos de deformación, Perfil general 4, escenarios con nivel freático habitual. . 65

Figura 26. Contornos de deformación, Perfil general 4, escenarios con evento lluvioso extremo.
..... 66

Figura 27. Superficies de falla, Perfil general 4, escenario con nivel freático habitual sin sismo.68

Figura 28. Superficies de falla, Perfil general 4, escenario con evento lluvioso extremo sin sismo.
..... 69

Figura 29. Superficies de falla, PG 4, escenario con nivel freático habitual + sismo, KST=0.2. 71

Figura 30. Superficies de falla, PG4, escenario con evento lluvioso extremo + sismo, KST=0.2.
..... 72

Figura 31. Comparativa de los factores de seguridad para los diferentes escenarios analizados. 74

Figura 32. Impacto en el modelo: escenario de lluvia extrema con subdrenes..... 76

Figura 33. Ráster de factor de seguridad: escenario con evento lluvioso y subdrenes. 77

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Unidades geomorfológicas, sector norte de Bucaramanga	24
Tabla 2. Salto Relativo del Contacto Segmentos Órganos Inferior (QbO1) Superior (QbO2).....	30
Tabla 3. Unidades Geológicas Superficiales.....	33
Tabla 4. Ubicación de las perforaciones realizadas en el área de estudio.....	34
Tabla 5. Normatividad para ensayos geotécnicos.	42
Tabla 6. Propiedades índice promedio	42
Tabla 7. Parámetros geomecánicos promedio.....	43
Tabla 8.. Parámetros para el análisis estadístico	48

Resumen

Título: Modelamiento Geotécnico para el Análisis de Movimientos en Masa en el Sector Norte de Bucaramanga*

Autor: Yuseth Sebastián Gómez Neira**

Palabras Clave: Geotecnia, Movimientos en Masa, Deslizamientos, Elementos Finitos, Equilibrio Límite

Descripción:

La aplicación de diferentes métodos de análisis para evaluar la estabilidad de taludes y laderas permite tener mayor certeza de la ubicación de las posibles superficies de falla y de la capacidad de los materiales involucrados para resistir a los factores externos detonantes de inestabilidad. El presente documento resume las consideraciones realizadas para el desarrollo del modelado geológico-geotécnico destinado a analizar, mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos, la problemática de movimientos del suelo causantes de agrietamientos en la infraestructura del sector norte de Bucaramanga. Para tal fin se usaron los paquetes de software disponibles en la universidad, Slide versión 7 para el estudio con equilibrio límite y RS2 versión 9 para el modelado con elementos finitos. Si bien los modelos, al ser simplificaciones de la realidad, presentan limitaciones como la reducción a dos dimensiones de un problema tridimensional o la capacidad del software de reproducir adecuadamente el comportamiento de los materiales del medio geológico, los resultados encontrados consiguen reflejar la problemática del sector al coincidir los sitios críticos del modelo con los sitios más agrietados evidenciados en campo, lo que permitió estimar la efectividad de las posibles medidas para mejorar las condiciones de estabilidad del área de estudio.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Merchán Jaimes, Ingeniero Civil, Magíster en geotecnia, Doctor en Ingeniería del Terreno

Abstract

Title: Geotechnical Modeling Applied to Slope Movement Analysis in The Northern Sector of Bucaramanga*

Author: Yuseth Sebastián Gómez Neira**

Keywords: Geotechnics, Mass Wasting, Slope Movement, Mass Movement, Finite Element, Limit Equilibrium

Description:

Applying different analysis methods to evaluate slope stability allows engineers to have greater certainty of possible failure surfaces location and materials capacity to resist the external factors triggering instability. This document summarizes the considerations made to develop the geotechnical modeling intended to analyze, through the limit equilibrium and finite elements methods, the soil movements that are causing cracking in the infrastructure of the northern sector of Bucaramanga. To this purpose, the software packages available at the university were used, Slide version 7 for the study with limit equilibrium and RS2 version 9 for the modeling with finite elements. Although the models, by being simplifications of reality, have limitations such as the reduction to two dimensions of a three-dimensional problem or the ability of the software to adequately reproduce geological materials behavior, the obtained results reflect the northern sector of Bucaramanga's slope instability problems, the critical sites on the model coincide with the most cracked sites evidenced in the field. The constructed geotechnical models allowed to estimate the effectiveness of the eventual installation of subdrainage systems as a way to improve the stability conditions of soils at the study area. Further works on the topic could use a three dimensional approach to the slope stability analysis.

* Postgraduate Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Vladimir Merchán Jaimes, Ingeniero Civil, Magíster en geotecnia, Doctor en Ingeniería del Terreno

Introducción

El presente documento resume las consideraciones realizadas para el desarrollo del modelamiento geotécnico destinado a evaluar los movimientos en masa en los taludes y laderas del sector norte de Bucaramanga mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos. Éste constituye el producto del trabajo de aplicación desarrollado como requisito de grado para optar por el título de magíster en geotecnia, y tuvo lugar bajo el marco del convenio interadministrativo 324 de 2016 entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander cuyo objeto es elaborar los Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga.

La aplicación de dos métodos diferentes para el modelamiento permite tener mayor certeza de la ubicación de las posibles zonas de falla de los materiales involucrados; considerando los paquetes de software con licencias disponibles en la universidad, se implementó la suite de Rocscience con sus programas en 2D de equilibrio límite y de elementos finitos, Slide versión 7 y RS2 versión 9, respectivamente. Al ser el modelo una simplificación de la realidad, éste presenta limitaciones relativas al proceso de reducción del medio geológico a polígonos de materiales con propiedades específicas, al análisis bidimensional de un problema tridimensional y, a la capacidad del software para reproducir el comportamiento de los materiales; en este sentido, los programas de Rocscience carecen de modelos constitutivos adecuados para evaluar movimientos lentos de tipo reptación en 2D y la capacidad de determinar de un factor de seguridad con elementos finitos está condicionada al uso exclusivo de los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown.

A continuación, el lector encontrará un capítulo de aspectos generales sobre el trabajo de aplicación, seguido de los capítulos relativos los factores intrínsecos que dan origen al modelo geológico-geotécnico, posteriormente se describen los factores detonantes y se presenta el análisis de estabilidad con los dos métodos planteados, finalmente se muestra el impacto en la estabilidad de las medidas de mitigación propuestas.

1. Aspectos Generales

1.1 Justificación

El sector norte de la ciudad de Bucaramanga, constituido por urbanizaciones producto de procesos de inversión social, ha reportado problemas de agrietamientos en la infraestructura incluso desde la década de los 80, poco tiempo después de su construcción. Esta situación obedece a que tales asentamientos humanos tuvieron lugar sobre zonas mal drenadas susceptibles a movimientos en masa y con tipologías de cimentación inadecuadas para el tipo y espesor de los materiales sobre los que se edificaron.

Repetidos intentos de relocalización han fracasado puesto que a los predios desalojados no se les dio ningún uso y, al estar abandonados, fueron invadidos con un gran número de viviendas informales, resultando en un aumento en la cantidad de familias en zonas inestables.

En la actualidad, algunas de las viviendas se siguen agrietando y los efectos del movimiento lento del suelo se ven reflejados en la infraestructura del sector, encontrándose vías desplazadas y fracturadas o con escalones, muros de contención inclinados y susceptibles al colapso, pozos de alcantarillado rotos, etc., ver Figura 1.



Figura 1. Agrietamientos en la infraestructura del área de estudio. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

A causa de esta situación, tuvo origen el convenio interadministrativo 324 de 2016 entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander con el objeto de desarrollar los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo para el sector norte de Bucaramanga y dar soluciones definitivas a la problemática del lugar; es bajo el marco del mencionado convenio que se desarrolla el presente trabajo de aplicación encaminado a desarrollar el modelamiento geotécnico para los análisis de estabilidad de los taludes y laderas del área de estudio.

1.2 Objetivos

El presente trabajo de grado pretendió realizar el modelamiento geotécnico mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos para el análisis de movimientos en masa en el sector norte de Bucaramanga.

Para alcanzar el objetivo propuesto, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Recolectar la información de geomorfología y geología disponibles para la construcción del modelo geológico-geotécnico del área de estudio
- Definir las propiedades de las capas de suelo y construir los perfiles geotécnicos para el modelamiento del sector
- Analizar las condiciones de estabilidad del área de estudio mediante los métodos de equilibrio límite y elementos finitos.
- Proponer medidas para el mejoramiento de las condiciones de estabilidad del área de estudio.

1.3 Metodología

- **Aprestamiento:**

Implicó la recopilación y revisión de información de estudios previos relacionada con el sector de interés, los reportes de movimientos en masa, artículos y demás fuentes que permitieran conocer los antecedentes de la problemática en el sector de interés.

Como complemento a la revisión de información secundaria, se realizaron visitas de reconocimiento e inspección visual para establecer un diagnóstico preliminar de los problemas de inestabilidad y sus posibles detonantes.

- Levantamiento de datos y verificación de información secundaria

Durante esta etapa se participó del levantamiento de información geológica, geomorfológica y geofísica junto con el equipo multidisciplinar de profesionales involucrados en el proyecto bajo el que se desarrolló el presente trabajo de grado. Esta fase tuvo por objeto actualizar y verificar la información recolectada en la revisión de información secundaria. Posteriormente, se asistió en la caracterización geomecánica de los suelos del sector mediante la realización de ensayos de laboratorio.

- Construcción del modelo geológico-geotécnico

Se usó la información generada en la fase anterior para construir el modelo geológico-geotécnico necesario para verificar las condiciones de estabilidad del área de estudio mediante paquetes de software para geotecnia.

- Caracterización de factores detonantes

Se incorporó al modelo la información generada bajo el marco del estudio en lo relativo a hidrología superficial y subterránea y sismicidad.

- Análisis de estabilidad

Se estudió el funcionamiento de los métodos de equilibrio límite y elementos finitos y se realizaron los análisis de estabilidad de los taludes y laderas del área de estudio mediante dichas técnicas.

- Comparación de resultados

Se cotejaron los resultados de los análisis de estabilidad obtenidos de la aplicación de los dos métodos en términos de superficies de falla o zonas críticas y factores de seguridad.

- Proposición de recomendaciones para mejorar la estabilidad

Se usó la información recopilada para revisar la efectividad de las obras ya construidas en el sector para evitar repetir errores y modelar el efecto de las medidas de estabilización más adecuadas para el área de estudio.

1.4 Localización del área de estudio

Al noroeste del país, sobre la Cordillera Oriental, se sitúa la ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander, en cuyo sector norte se encuentra el área de estudio correspondiente a 70 Ha que abarcan barrios históricamente afectados por movimientos en masa, ver Figura 2).

Con una altitud entre 640 y 880 m.s.n.m, el área de estudio encierra parte de los barrios Lizcano I y II, Esperanza III, Mirador, José María Córdoba, Villa Helena, Villa Rosa y Villa María; consta de 2.412 predios y un aproximado de 12.060 habitantes.

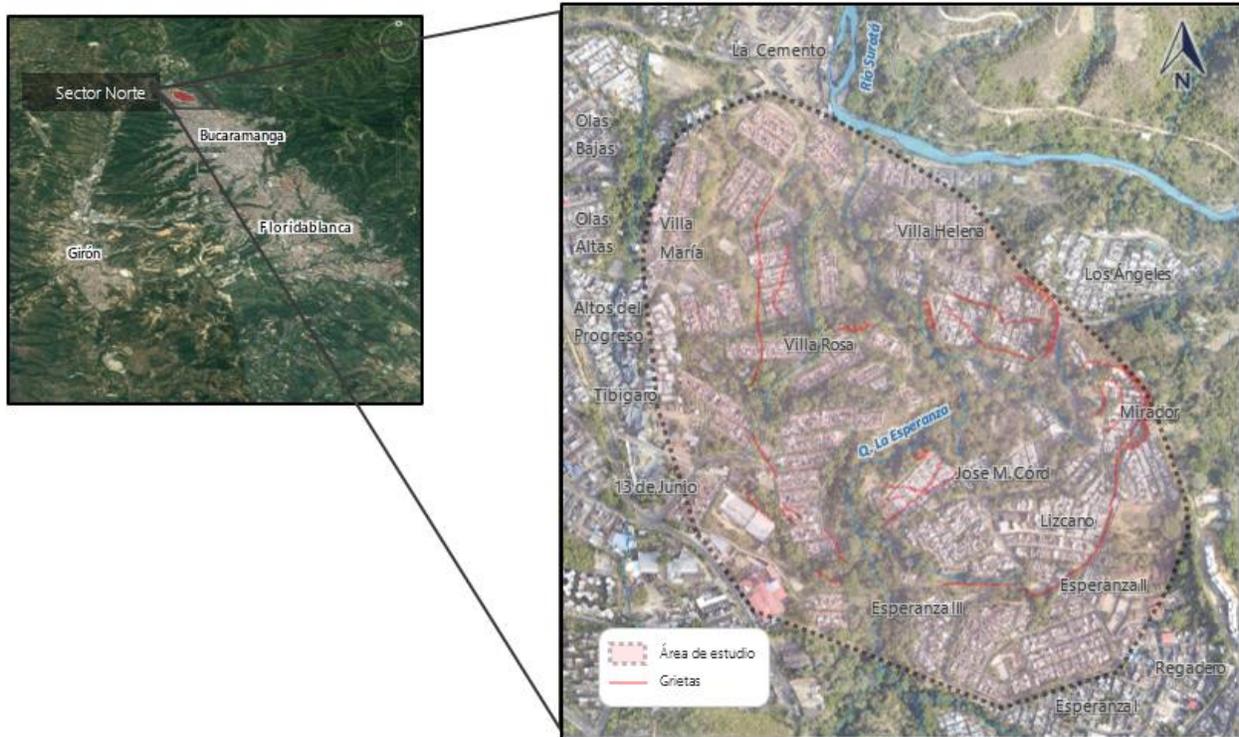


Figura 2. Localización de la zona de estudio. Fuente: Base cartográfica UIS, Google Earth

2. Marco Geomorfológico

2.1 Marco geomorfológico regional

La llamada meseta de Bucaramanga consiste en un área extensa a modo de plano inclinado hacia el occidente, compuesta de una gran acumulación de sedimentos, de forma digitada hacia el occidente y escarpada por el costado norte. La escarpa norte comprende los terrenos localizados entre el borde norte de la meseta y el cauce del río Suratá, y viene siendo disectada o profundizada

por el accionar erosivo de corrientes de agua como las quebradas Chitota, Tiburones y La Esperanza que descienden hacia este río (Villamizar, 2017).

Geomorfológicamente se pueden diferenciar varios contextos dentro de la escarpa norte, al oriente el escarpe Chitota con un escalón hacia su parte baja, seguido al occidente por el doble saliente Acueducto – Tiburones, más al occidente, por el gran coluvión de ciudad norte, con su escarpe dominado por el borde norte de la terraza de Bucaramanga y su cuerpo deslizado hacia el norte (donde se encuentra el área de estudio del presente trabajo). Finalmente, la digitación, especie de flanco longitudinal montañoso La Virgen – Kennedy – Café Madrid, que delimita la escarpa norte por su costado occidental (Villamizar, 2017), como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Marco geomorfológico. Fuente: El autor con base en Villamizar (2017)

2.2 Coluvión de ciudad norte

De acuerdo con Villamizar (2017), se trata de un antiguo y potente movimiento de remoción en masa (a modo de un gran coluvión como se les conoce ingenierilmente) con una evidente cicatriz de despegue en su parte superior, debajo de la cual, se tienen terrenos ondulados en descenso hasta las orillas del río Suratá, estos últimos constituyen una espesa acumulación de materiales removidos encauzados por el saliente Tiburones al oriente y occidentalmente por una digitación topográfica acá denominada La Virgen – Kennedy – Café Madrid. La gran masa removida está drenada por la quebrada La Esperanza, la cual se encuentra canalizada con gaviones en su trayecto inferior; en los tramos superiores, sin canalización, presenta procesos de socavación reciente y gran profundización ocasionando desestabilización de las altas laderas que dominan su encajonado cauce.

Si bien Vargas (2017) sostiene que el gran deslizamiento es posterior al basculamiento de la depresión tectónica de Bucaramanga hacia el norte y la formación del río Lebrija, según Villamizar (2017), no se puede establecer con claridad si se trata de un único movimiento a partir de los terrenos de la meseta de Bucaramanga o si se trata de varios eventos superpuestos, como suele ser frecuente en este tipo de materiales. Aunque el deslizamiento es posterior a la aparición de las fallas identificadas en el sector norte, éstas posiblemente continuaron activas afectando los materiales removidos en el deslizamiento (Vargas (2017)).

Tanto en las cabeceras como en la gran masa removida, se asentaron los diferentes barrios que conforman la denominada *Ciudad Norte*. La fotointerpretación sugiere la presencia de coluviones

internos dentro de la gran masa, a continuación, se presenta la descripción elaborada por Villamizar (2017) para cada uno de éstos.

2.1.1 Coluvión Mirador – Lizcanos. En el costado oriental de la gran masa deslizada, al pie del filo de la digitación Tiburones, se ubica el escarpe que domina el coluvión acá identificado como Mirador – Lizcanos, que sería una masa deslizada desde la parte media baja de la digitación Tiburones hacia la quebrada La Esperanza, en la que se han establecido planos antrópicos urbanizados ligeramente inclinados, donde se construyeron los barrios Mirador del norte, Lizcanos I y II, J.M. Córdoba.

2.1.2 Coluvión de Villa Rosa. Al occidente del anterior coluvión, entre la quebrada La Esperanza al oriente y la quebrada Las Olas al occidente, con su escarpe bordeado por la vía al mar, se extiende hacia el norte lo que sería otro coluvión, acá denominado Coluvión de Villa Rosa, con interdigitaciones lineales y sinuosas, en cuyas cimas se efectuaron explanaciones que albergan un importante número de urbanizaciones. Algunos de sus drenajes han sido intervenidos con construcciones urbanas. Dentro de este coluvión, se identifican cinco escalones separados por escarpes arborizados, como si se tratase de bloques desplazados descendentemente hacia las partes bajas del coluvión.

2.1.3 Coluvión Kennedy – Las Olas. Hacia el costado occidental, se encuentra otro probable coluvión secundario, delimitado por un escarpe superior abajo de los terrenos del hospital local del norte, que comprende los terrenos del barrio Kennedy y los llamados Olas Alto y Olas Bajo. Este coluvión presenta condiciones semiplanas y estables en su parte alta, mientras que los terrenos

más bajos, donde se ubican los ya citados Olas Alto y Bajo y el barrio Villa María, están intervenidos por el incipiente desarrollo hidrológico de esta parte de la microcuenca de la quebrada La Esperanza. Por la ubicación geomorfológica del barrio Villa María, son de esperarse problemas de inestabilidad, relacionados con el tipo de suelo.

La Figura 4 muestra el Gran Coluvión del Sector Norte, su cicatriz de despegue, los posibles coluviones internos y la ubicación del área de estudio dentro del Gran Coluvión del Sector Norte.

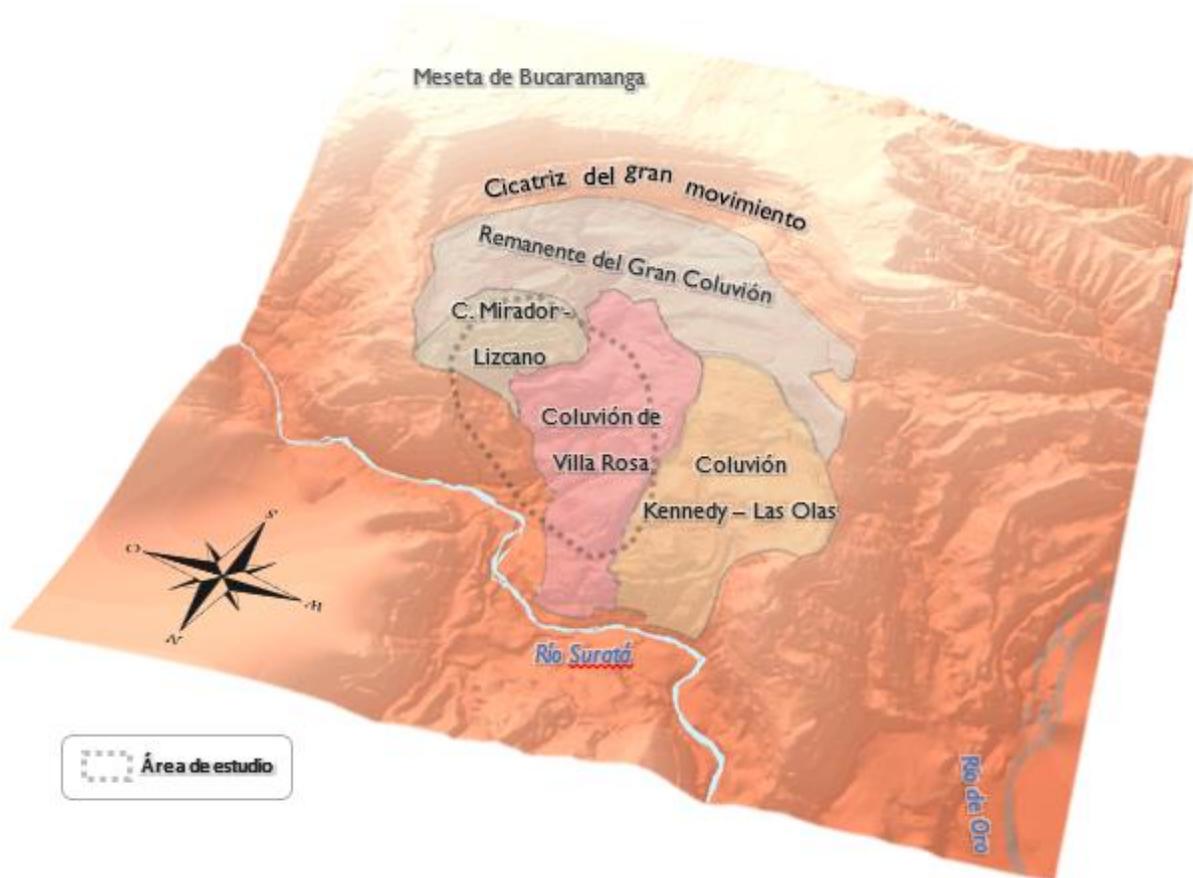


Figura 4. Coluviones internos dentro del Gran Coluvión de Ciudad Norte. Fuente: El autor con base en Villamizar (2017)

2.2 Unidades geomorfológicas dentro del área de estudio

Con base en el análisis morfométrico (mapa de pendientes) y en los procesos geomorfológicos, estos últimos, asociados a la tectónica reciente, los procesos de erosión e intervenciones antrópicas, se diferencian 16 geoformas agrupadas en 7 grupos según su origen, producto de la combinación de los procesos estructurales (levantamiento y fisuramiento tectónico), procesos fluvio-torrenciales, coluvio-aluviales antiguos y recientes, y procesos antrópicos como cortes, explanaciones para la adecuación de vías y/o superficies para desarrollos urbanísticos formales e informales. En la Tabla 1, se resumen las geoformas identificadas, su distribución puede apreciarse en la Figura 5.

Tabla 1.

Unidades geomorfológicas, sector norte de Bucaramanga

Origen	Geoforma		Descripción
Estructural Denudacional Tectonizado	Escarpe Rocosó	ER	Calizas Conglomeráticas o Conglomerados Calcáreos de la Formación Tiburón
	Escarpe Rocosó Denudado	ER D	Calizas Conglomeráticas o Conglomerados Calcáreos de la Formación Tiburón Tectonizados
Fluvio Torrencial Sintectónico Denudativo	Ladera Denudacional Escarpada	LD	Segmento Órganos en laderas escarpadas
	Cima Denudacional	CD	Segmento Órganos con superficie convexa, ligeramente inclinada
Aluvial	Vegas Baja	VB	Depósitos Aluviales Actuales
	Vegas Altas	VA	Depósitos Aluviales Recientes
Antrópico Aluvial	Vegas Altas Urbanizadas	VAU	Depósitos Aluviales Recientes, intervenidos y nivelados para la construcción
Antrópico Fluvio Torrencial Sintectónico Denudacional	Corte Vial	CV	Cortes, Talud, Vías sobre depósitos Fluvio Torrenciales de la Formación Bucaramanga; algunos con estructuras de contención y obras de geotecnia
	Vía Pavimentada	VP	Vías pavimentadas con cunetas, de 6 a 15 metros de ancho; vías intermunicipales (Vía al mar y Bucaramanga- Matanza; incluyen las conexiones viales entre barrios.)
	Talud Interurbano	TIU	Talud excavado entre explanaciones urbanizadas de menos de 5 metros

	Explanación Urbanizada	EU P	Áreas de corte urbanizadas en áreas planas, incluye calles internas y perimetrales de los barrios.
		EU I	Áreas de corte urbanizadas en áreas inclinadas
	Explanaciones en corte	Exp	Explanaciones sobre terreno natural donde fue removido este terreno
Antrópico Agradacional	Relleno	R	Material de corte depositado en las laderas al momento de explanar lotes.

Fuente: Vargas (2017)

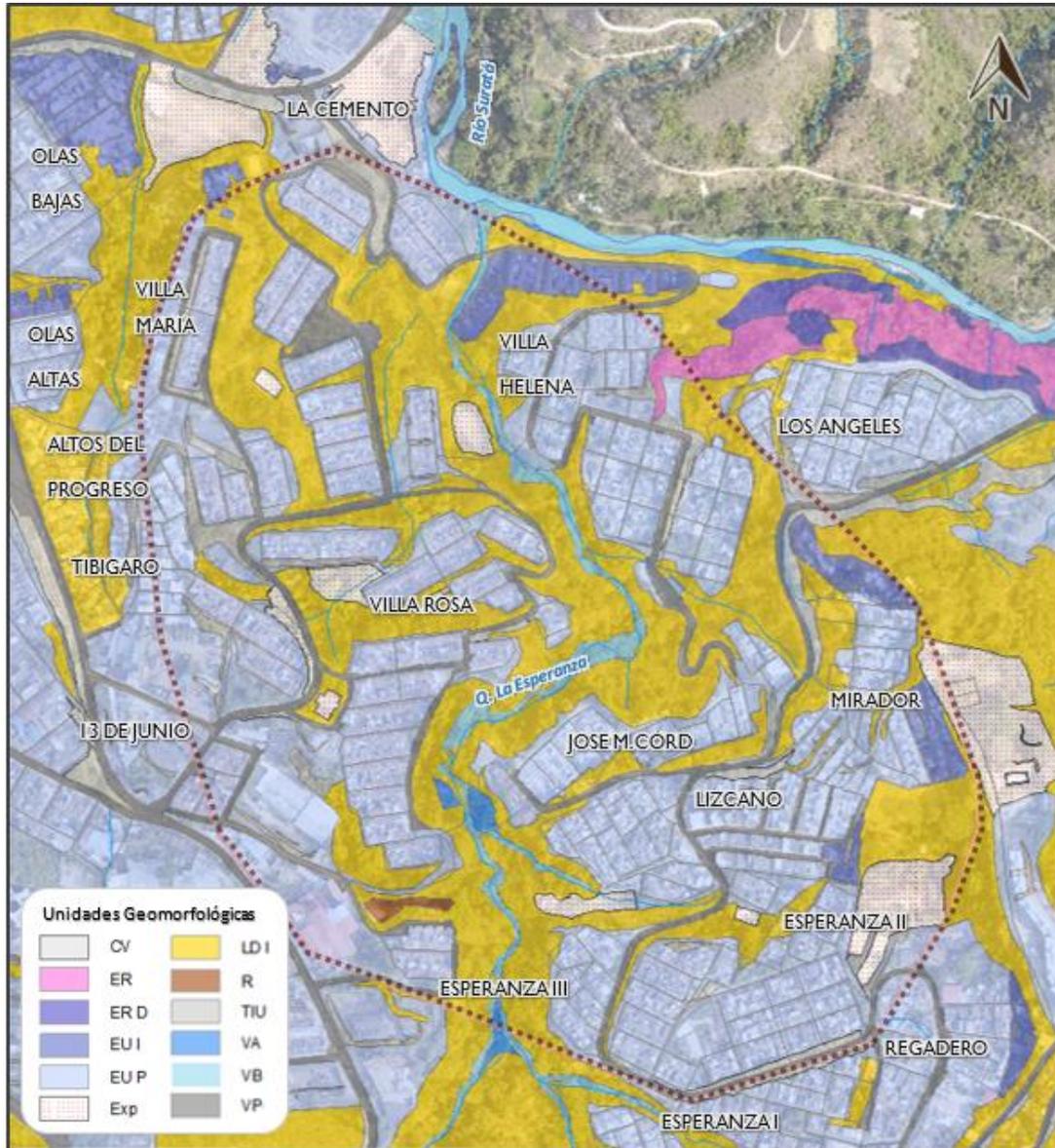


Figura 5. Mapa geomorfológico de la zona de estudio. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

3. Marco Geológico

3.1 Litología general

En el contexto regional, el área de estudio se encuentra en el límite norte de la depresión tectónica de Bucaramanga, entre el sistema de Fallas del Suárez al occidente y Bucaramanga – Santa Marta al oriente. En las perforaciones realizadas se encontraron rocas de la Formación Diamante, Bocas y Tiburón; en zonas aledañas aflora también la Formación Girón. Suprayaciendo a las rocas mencionadas se presentan depósitos cuaternarios pertenecientes a la formación Bucaramanga: los miembros Órganos Inferior y Superior, constituidos por intercalaciones de gravas y arenas gravosas. Suprayaciendo a éstos se encuentran depósitos de ladera o coluviones (Órganos Removido), de distribución y extensión variable sobre los cuales se han desarrollado las urbanizaciones del sector norte.

La Figura 6 muestra el mapa geológico del área de estudio, en este se aprecia que en la mayor parte del área de estudio los materiales aflorantes corresponden al Segmento Órganos Removido.

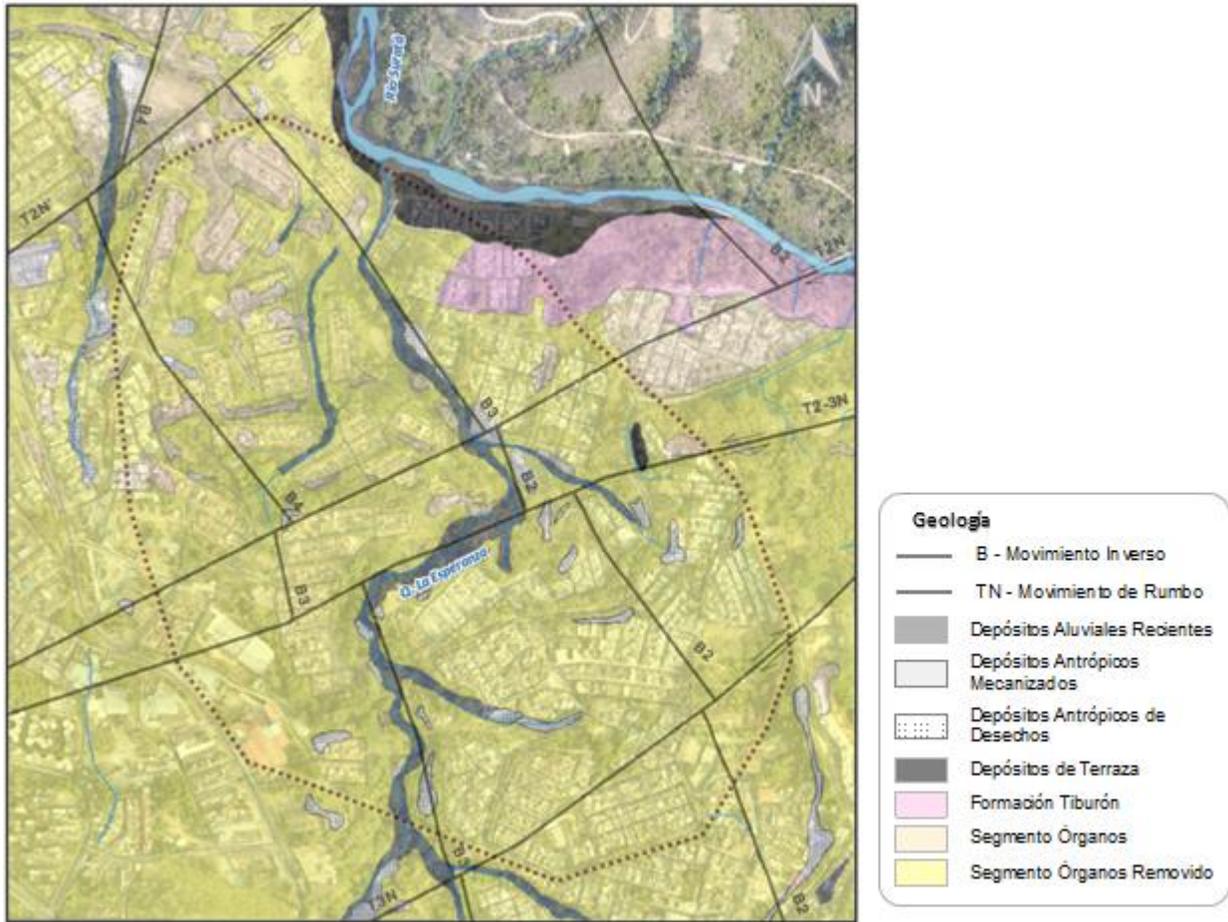


Figura 6. Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

A continuación, se hace una breve descripción de las unidades geológicas presentes en el área de estudio en orden cronológico de las más antiguas a la más reciente.

3.1.1 Formación Diamante (PCd). Roca de origen sedimentario, en las perforaciones realizadas se encuentra constituida por caliza gris oscura, ligeramente arcillosa con delgadas intercalaciones de arcillolitas y areniscas grises a rojo grisáceas. Esta formación infrayace discordantemente a la Formación Tiburón. Las edades de los fósiles de esta unidad van desde el Pensilvaniano medio al Pérmico medio (Clavijo y Vargas 2017).

3.1.2 Formación Tiburón (TRpt). Está constituida por conglomerados calcáreos, granosoportados, con fragmentos subredondeados de 2-10 cm de calizas predominantemente, y en menor proporción, de areniscas, cherts y rocas volcánicas, dentro de una matriz arenoso-calcárea, de grano fino y color gris. Se data como del Triásico y se considera producto de la erosión de la Formación Diamante debido a movimientos epirogénicos ocurridos al final del Paleozoico. (Clavijo y Vargas 2017).

3.1.3 Formación Bocas (TRb). Está constituida por una alternancia de limolitas, areniscas y arcillolitas calcáreas gris verdosas y gris oscuras, limolitas gris verdosas con nódulos calcáreos, conglomerados gris verdosos y arcillolitas gris oscuras, limolitas gris verdosas a rojo grisáceas, levemente calcáreas. Data del Jurásico; suprayace la formación Tiburón e infrayace concordantemente a la Formación Jordán. (Clavijo y Vargas 2017).

3.1.4 Formación Bucaramanga (Qb). Corresponde a un depósito sedimentario aluvial de edad Cuaternario, definido como un abanico aluvial, asociado a control tectónico en su desarrollo y depositación. Su espesor aumenta de oriente a occidente y se estima en unos 250 a 300 m. En las perforaciones realizadas el sector norte, se encuentran espesores de hasta 100 m.

3.1.4.1 Miembro Órganos Inferior (QbO1). Está constituido predominantemente por gravas clastosoportadas a matrizsoportadas con intercalaciones de arenas ligeramente gravosas. La composición de los clastos indica procedencia metamórfica e ígnea. En general se observa en sentido occidente-oriente una relación entre las facies gravosas y arenosas (ligeramente gravosas). (Clavijo y Vargas 2017).

3.1.4.2 Miembro Órganos Superior (QbO2). Con una proporción semejante entre las gravas arenosas y las arenas gravosas, se observa en sentido oeste a este. La principal diferencia con el Miembro Inferior es el cambio en la composición de los clastos, en su mayoría de origen sedimentario; sus tamaños varían de guijos a gujarros, mientras en el QbO1 llegan hasta tamaño bloque. El contacto entre el miembro Superior e Inferior se considera discordante, representa una etapa de quietud tectónica, y puede ser usado para establecer posteriores movimientos relativos de las fallas, (Clavijo y Vargas 2017).

3.2 Geología estructural

De acuerdo con las investigaciones geológicas adelantadas Clavijo y Vargas (2017) en el marco del estudio de amenaza bajo el cual se desarrolla este trabajo de grado, en el área de estudio se presentan dos sistemas de fallas, asociados a las fallas Bucaramanga – Santa Marta y Suárez. Éstos se describen a continuación.

3.2.1 Sistema de Fallas de Bucaramanga (B2, B3 y B4). De dirección general N-NW, resultan necesarias para explicar los desplazamientos relativos del contacto entre los segmentos Órganos Inferior y Superior entre los sondeos realizados en el área de estudio (Clavijo y Vargas 2017). Dichos desplazamientos se muestran en la Tabla 2.

3.2.2 Sistema de Fallas Transversales (TN2”, TN2, TN2-3 y TN3). Estructuras de dirección general W-NE, identificadas con fotogeología y estarían asociadas a un antiguo sistema de fallas Transversales al sistema de Bucaramanga, de tipo normal y con un importante componente de

rumbo dextral. Éstas estructuras serían el producto de la distensión en dirección sur dentro de la depresión tectónica y explicarían el levantamiento de las unidades Paleozoicas al norte de la depresión y la presencia de las Mesas de Ruitoque y de los Santos en el límite sur de la misma. (Clavijo y Vargas 2017), ver Tabla 2.

Tabla 2.

Salto Relativo del Contacto Segmentos Órganos Inferior (QbO1) Superior (QbO2)

Sondeo	Cota del Sondeo	Cota de Contacto (QbO2) / (QbO1)	Salto S1	Salto S2	Salto S3	Salto S4	Salto S5	Salto S6	Salto S7B
S1	750,502	685,502	0	14,3	5,7	2	-26,8	-24,2	-43,8
S2	738,001	671,201	-14,3	0	-8,6	-12,3	-41,1	-38,5	-58,1
S3	705,265	679,815	-5,7	8,6	0	-3,6	-32,5	-29,9	-49,5
S4	711,303	683,453	-2	12,3	3,6	0	-28,9	-26,2	-45,8
S5	742,815	712,315	26,8	41,1	32,5	28,9	0	2,6	-17
S6	765,742	709,692	24,2	38,5	29,9	26,2	-2,6	0	-19,6
S7	799,021	729,271	43,8	58,1	49,5	45,8	17	19,6	0



Fuente: (Clavijo y Vargas 2017)

En la Figura 7 se observa el mapa del área de estudio que muestra la distribución de las formaciones que infrayacen la Formación Bucaramanga y las fallas que las afectan (B2, B3, B4 corresponden a fallas inversas del Sistema de fallas de Bucaramanga y TN2, TN2-3 y TN3

que corresponden a fallas de rumbo con componente vertical asociadas al sistema de fallas del Río Suarez).

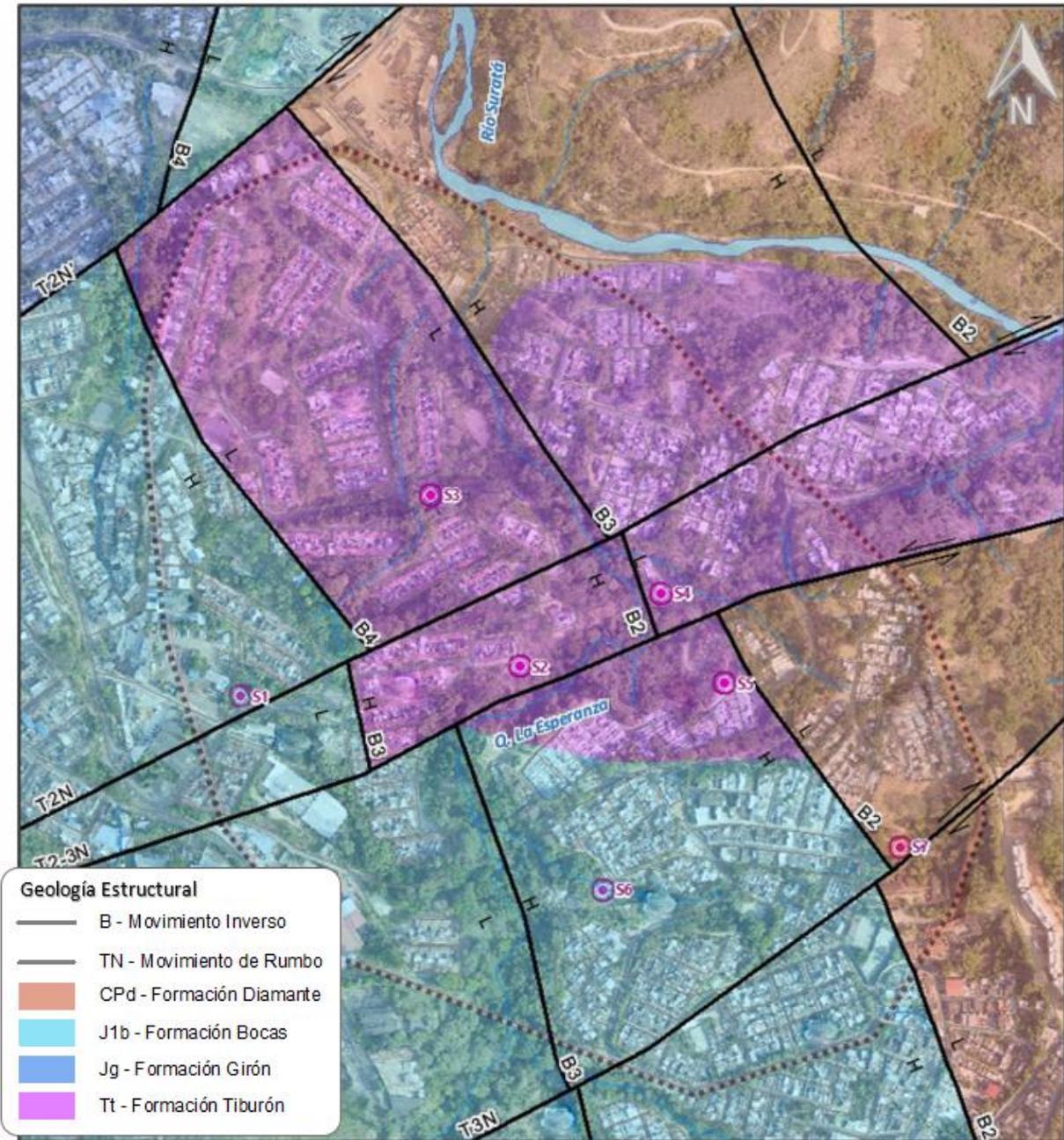


Figura 7. Mapa estructural de la zona de estudio. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

3.3 Unidades geológicas superficiales

En la Figura 8, se observa la distribución espacial en la zona de estudio de las unidades geológicas superficiales identificadas por Clavijo y Vargas (2017), gran parte de la zona está dominada por depósitos coluviales antiguos; la Tabla 3 resume la descripción de estas unidades.

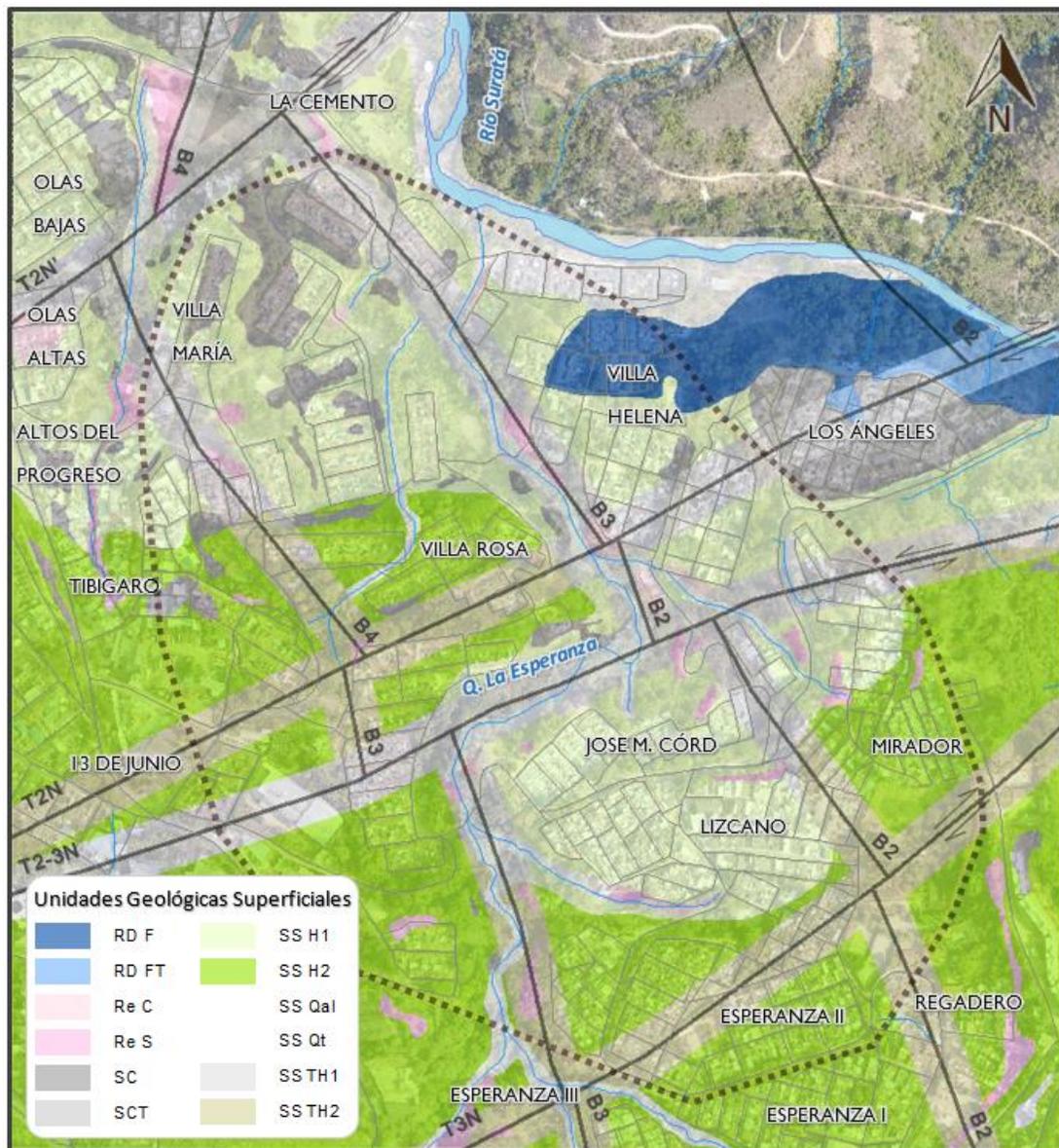


Figura 8. Mapa Unidades Geológicas Superficiales, UGI. Fuente: Grupo Geomática

Tabla 3.

Unidades Geológicas Superficiales

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO
Rellenos Suelos	Depósitos de desechos orgánicos e inorgánicos superficiales (> 3 m de Espesor)	Re S
Rellenos Compactos	Terraplenes y Rellenos compactados mecánicamente (De hasta 15 m de Espesor)	Re C
	Depósitos Aluviales Actuales Rio Surata y quebrada La Esperanza	SS Qal
	Terrazas de Depósitos Aluviales Antiguos	SS Q t
	Depósitos de Glacis Coluvial y de desprendimientos de suelos.	SS Q d
	Depósitos Coluviales Antiguos, Segmento Órganos Removido, Flujos de Escombros. (de hasta 5 m de Espesor) Húmedos.	SS H1
Suelos Suelos	Depósitos Coluviales Antiguos, Segmento Órganos Removido, Flujos de Escombros. (de hasta 15 m de Espesor) Húmedos.	SS H2
	Depósitos Coluviales Antiguos, Segmento Órganos Removido, Flujos de Escombros. Tectonizados y Húmedos	SS TH1
	Depósitos Coluviales Antiguos, Segmento Órganos Removido, Flujos de Escombros. Tectonizados y Húmedos	SS TH2
Suelos Compactos	Segmento Órganos Tectonizado	SCT
	Segmento Órganos	SC
Rocas Duras Figuradas	Calizas Conglomeráticas o Conglomerados Calcáreos Formación Tiburón Tectonizados	RD FT
	Calizas Conglomeráticas o Conglomerados Calcáreos Formación Tiburón	RD F

Fuente: (Clavijo y Vargas 2017)

4. Caracterización de los materiales

4.1 Exploración directa

En el marco del convenio en que se desarrolla este trabajo de grado, se realizaron siete (7) perforaciones de hasta 150 m de profundidad en diámetro HQ con recuperación de núcleos estratigráficos, de los cuales se extrajeron muestras para la ejecución de ensayos destinados a la caracterización de las diferentes litologías presentes en el área de estudio. En la Tabla 4 se presentan las coordenadas y profundidad de las perforaciones.

Tabla 4.

Ubicación de las perforaciones realizadas en el área de estudio

Pozo	Profundidad (m)	Ubicación (Barrio)	Coordenadas	
			Norte	Este
S1	130	Villa Rosa	1.282.546	1.104.571
S2	112,25	José María Córdoba	1.282.566	1.104.872
S3	81	Villa Rosa	1.282.770	1.104.776
S4	80,25	Villa Helena	1.282.666	1.105.045
S5	77	José María Córdoba	1.282.584	1.105.115
S6	146	La Esperanza	1.282.333	1.104.979
S7	150,6	Lizcano	1.282.410	1.105.312

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Como complemento, se ejecutaron seis (6) trincheras con dimensiones de 10 m de largo por 3 m de ancho y 6 m de profundidad. La Figura 9 muestra la Trinchera 1 en el barrio Villa Rosa.



Figura 9. Equipo de perforación y vista de la Trinchera 1

Las trincheras junto con veinte (20) apiques de un metro cuadrado de sección y con profundidad de hasta tres metros, facilitaron la verificación del modelo geológico y permitieron hacer seguimiento a las zonas inestables. Para la caracterización del Miembro Órganos Removido en el resto del área de estudio se utilizó información secundaria contenida en estudios previos de la zona, los cuales analizan el material en profundidades que oscilan entre 4 m y 10 m. En la Figura 10, se observa la localización de los sondeos, trincheras y apiques realizados.

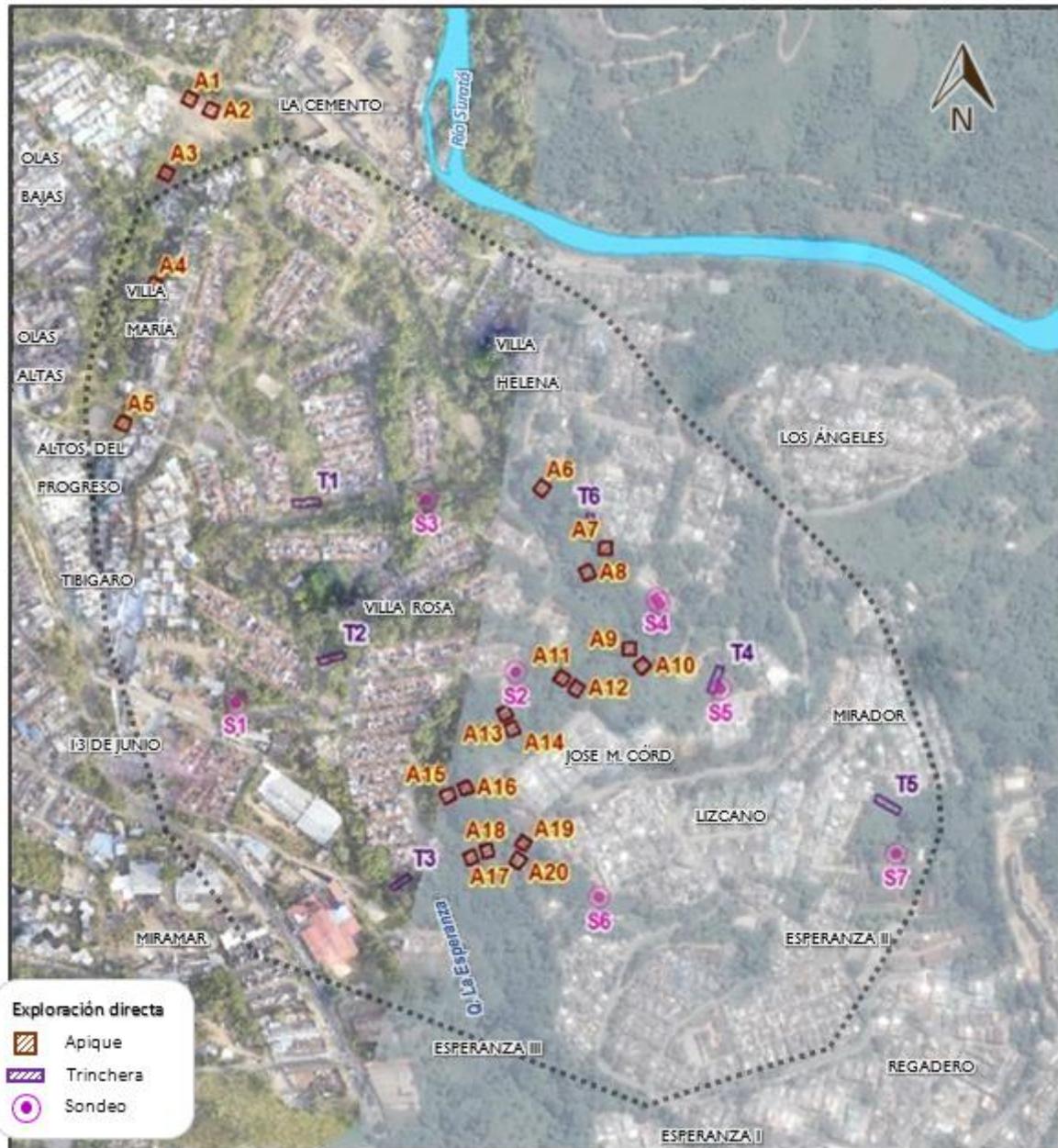


Figura 10. Localización de sondeos, apiques y trincheras para la zona Norte de Bucaramanga.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

4.2 Exploración indirecta

Como complemento a la información puntual de la exploración directa se realizó la prospección con métodos geofísicos, ésta permitió levantar perfiles para caracterizar la disposición de los depósitos de ladera correspondientes al Miembro Órganos Removido e identificar niveles freáticos y posibles concentraciones de humedad en la zona de estudio.

Considerando la utilidad de los métodos eléctricos para identificar concentraciones de humedad en el subsuelo, se levantaron un total de 6207 m de tomografía de resistividad eléctrica distribuidos en 23 líneas ejecutadas en dos campañas de campo. Para la primera campaña se usó un equipo *AGI, SuperSting R8* de 56 electrodos, dejando como resultado 12 levantamientos del costado oriental del área de estudio; en la segunda campaña, que dejó 8 tomografías del sector occidental, se usó un equipo *Terrameter LS de ABEM* con 81 electrodos. La tomografía de resistividad eléctrica consiste en registrar la variación tanto en la vertical como en la horizontal de la resistividad eléctrica del medio geológico y a partir de ésta estimar otras propiedades como el tipo de material y su distribución o el contenido de agua. El alcance vertical depende de la disposición lineal de los electrodos en superficie y su separación.

Adicionalmente, en las perforaciones realizadas se llevaron a cabo mediciones con sísmica Downhole con un equipo Geostuff, de Geometrics Inc. El ensayo permite medir la velocidad de onda compresional (V_p) y cortante (V_s) a lo largo de un sondeo; a partir de una fuente en superficie se genera un tren de ondas que atraviesa el subsuelo, un receptor posicionado a profundidades seleccionadas dentro del sondeo mide el tiempo que tarda en llegar la onda desde el momento en

que el gatillo marca el disparo desde el emisor, con el tiempo de viaje y la distancia se determina la velocidad de ondas P y S. Con el dato de la velocidad, se pueden estimar otras propiedades físicas de los materiales del medio geológico como el módulo de elasticidad (E) y el módulo cortante (G) a muy pequeñas deformaciones. La siguiente figura muestra la ubicación de los levantamientos realizados con métodos geofísicos:

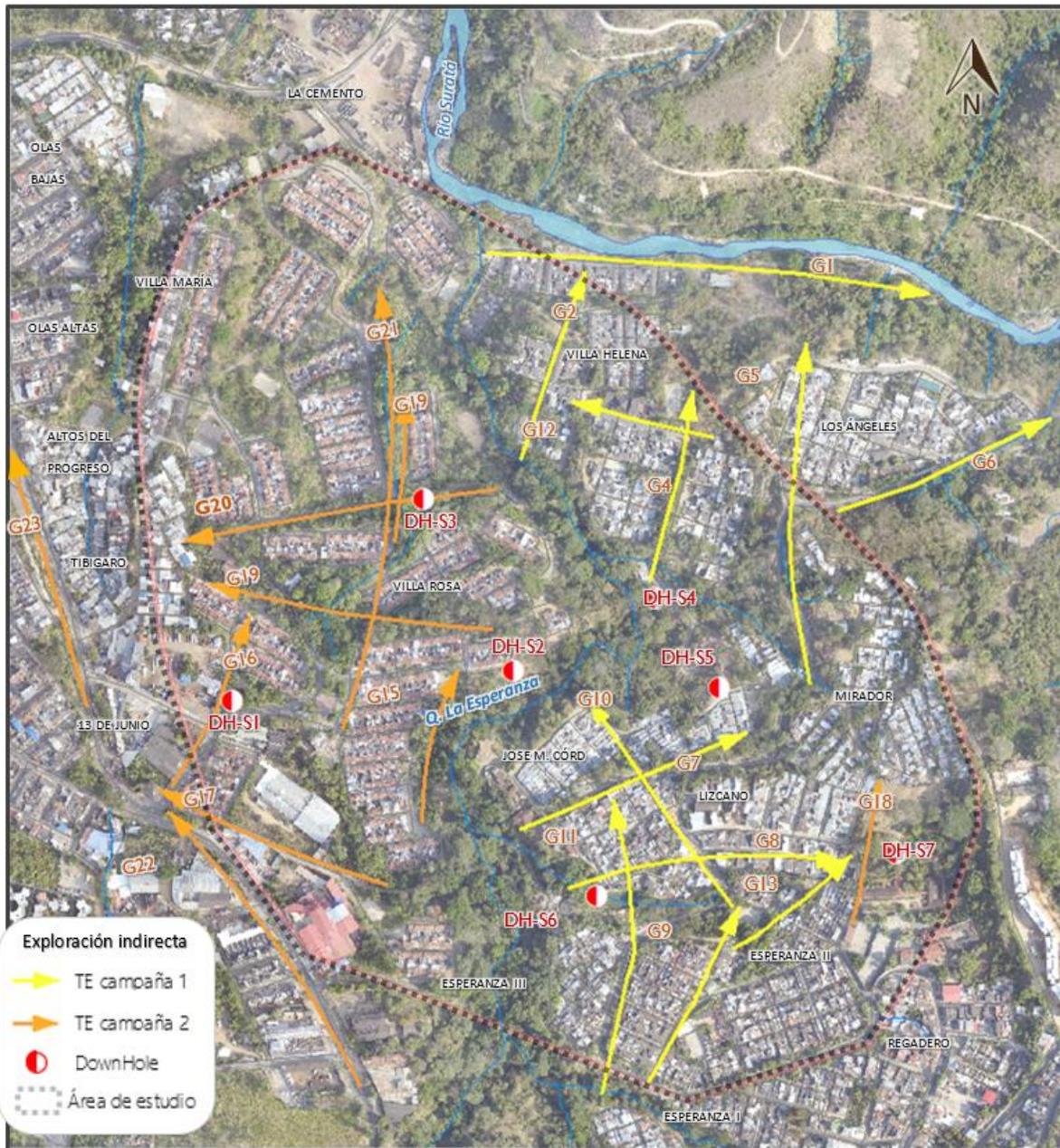


Figura 11. Ubicación de la exploración indirecta. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

4.3 Resultados tomografía de resistividad eléctrica

Los datos de resistividad aparente adquiridos en campo fueron procesados en el software Earthimager 2D de la compañía AGI, con el método de inversión ROBUST INVERSION, el cual trabaja con elementos finitos.

A continuación, se presentan a manera de ejemplo algunas de las tomografías resultantes, en éstas se infiere la disposición de los materiales y algunas concentraciones de humedad.

- Alineamiento G7

Ejecutado en el barrio José María Córdoba, en sentido W-E, paralelo al quiebre de la quebrada con electrodos cada 5m para una longitud total del alineamiento de 275m; arreglo: Wenner-Schlumberger. La tomografía permitió identificar la distribución aproximada de los materiales e identificar zonas con concentración de humedad, ver Figura 12.

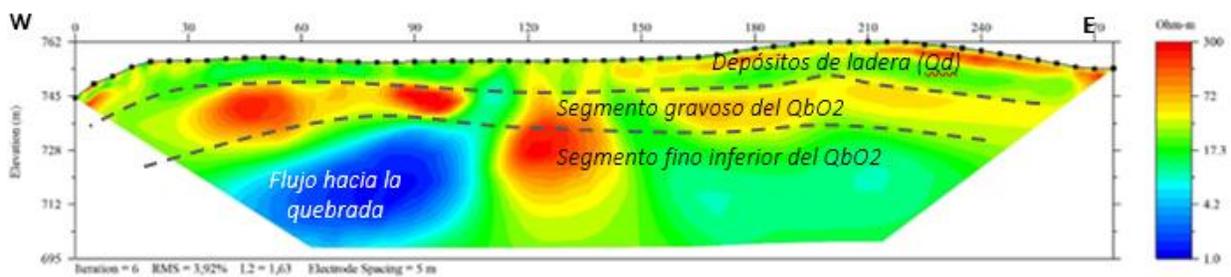


Figura 12. TRE G7. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

- Alineamiento G11

Emplazado en el barrio Esperanza II en sentido S-N en cercanías a la quebrada; electrodos cada 6m para una longitud total de 330m; arreglo usado: Wenner-Schlumberger. La tomografía muestra los depósitos de ladera sobre el relieve escalonado formado por los segmentos del Miembro Órganos Superior, tal como se aprecia en la Figura 13; también permitió identificar fugas en la red de alcantarillado las cuales saturan los materiales menos profundos.

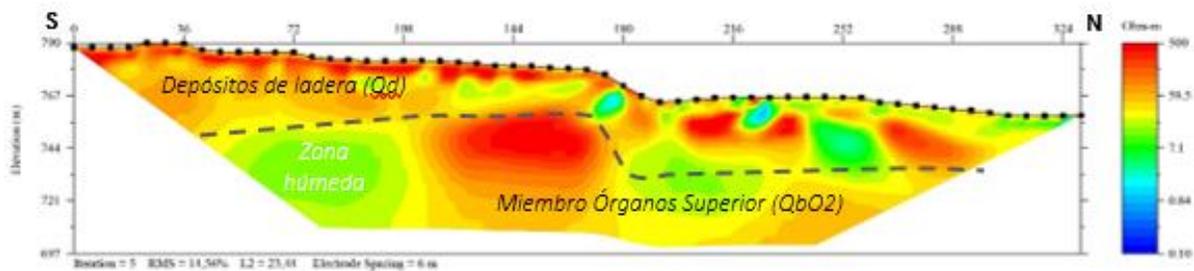


Figura 13. TRE G11. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

4.4 Resultados sísmica downhole

A continuación, se presentan a modo de ejemplo, los resultados del downhole del pozo S1, en estos se muestran las velocidades de onda P y S para cada metro de los materiales atravesados por la perforación, para el caso del S1: Miembros Inferior y Superior de la Formación Bucaramanga y los materiales del Órganos Removido; se evidencian algunas zonas débiles asociadas a antiguos deslizamientos.

Los datos se procesaron con el software SeisImager/DH de Geometrics. Los resultados del downhole fueron usados para determinar otras propiedades geomecánicas de los materiales (módulos E y G).

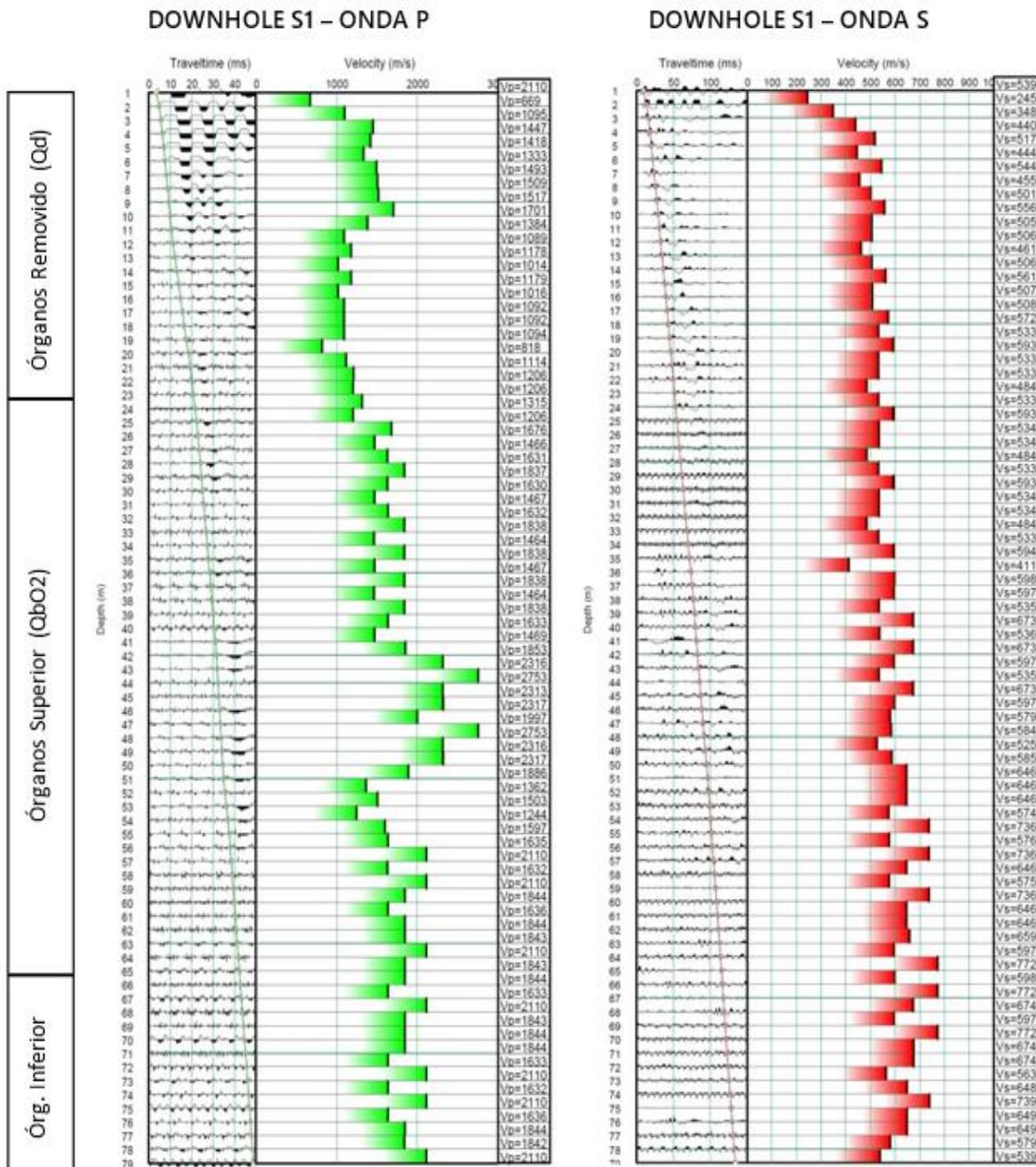


Figura 14. Resultados Downhole S1. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

4.5 Ensayos de laboratorio

Los materiales extraídos de los sondeos, trincheras y apiques fueron sometidos a ensayos de laboratorio para determinar sus propiedades índices y geomecánicas. La Tabla 5 muestra los tipos de ensayo realizados y la cantidad de muestras analizadas por cada tipo de ensayo. Las Tablas 6 y 7 resumen las propiedades promedio de los materiales ensayados.

Tabla 5.

Normatividad para ensayos geotécnicos.

ENSAYO	CANTIDAD REALIZADA
Granulometría (INV E 123-13)	304
Límites de atterberg (INV E 125-13, INV E 126-13)	175
Compresión simple (INV E 152-13)	12
Peso unitario (ASTM D2937)	21
Permeabilidad (INV E 130-13)	10
Corte directo (INV E 154-13)	30
Difracción de rayos X (ASTM F2024 – 10(2016))	6
Ensayos químicos (ASTM D4972, ASTM D7503)	20

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Tabla 6.

Propiedades índice promedio

Segmento	γ [g/cm ³]	% W	% Gravas	% Arenas	% Finos	% LL	% LP	% IP
Qd	2,31	4,99	27,19	35,55	37,25	32,34	19,08	13,27
QbO2-F3	2,02	9,63	11,77	45,36	42,88	35,83	22,15	13,65
QbO2-G2	2,03	7,60	40,19	33,41	26,40	30,64	19,87	10,77
QbO2-F1	2,00	7,91	14,91	44,82	40,27	35,64	20,72	14,91
QbO1	2,161	7,29	15,76	51,88	32,36	34,71	21,44	13,26

Fuente: El autor con base en Geomática, 2017

Tabla 7.

Parámetros geomecánicos promedio

Segmento	Cohesión c [KPa]	Fricción φ [°]	Gmax [MPa]	E50 REF [MPa]	Dilatancia ψ [°]	Permeab. k [m/día]	RCI [KPa]
Qd	20,7	28,75	403,01	63,51	0	-	-
QbO2-F3	30,37	21,5	479,93	72,38	1,5	0,0007	545,55
QbO2-G2	16,38	30,34	556,97	73,35	0		
QbO2-F1	27,91	25,61	809,94	91,93	1,23		
QbO1	27,56	30,59	1215,64	85,71	0,75	0,00112	203,94

Fuente: El autor con base en Geomática, 2017

La Tabla 6 permite comparar las propiedades de los materiales ensayados, correspondientes a la matriz de los diferentes miembros de la Formación Bucaramanga, se aprecia que, aunque la mayoría de las matrices son principalmente arenosas, la matriz del Miembro Órganos Inferior (QbO1) presenta un menor porcentaje de gravas y finos que la del Miembro Órganos Superior (QbO2). La matriz del Órganos Removido (Qd), se caracteriza por tener un mayor contenido de finos, lo que se refleja en bajos valores de permeabilidad (valores inferiores a 0,00033 m/día), ver Tabla 7. Casi la totalidad de las muestras analizadas en los miembros Superior e Inferior corresponde a suelos de baja plasticidad. Los ensayos de difracción de rayos X realizados a los materiales más finos mostraron bajos contenidos de minerales de arcilla, particularmente, se encontró presencia de caolinita en mayor porcentaje que la montmorillonita, siendo las primeras menos plásticas que las últimas. En promedio, los valores de fricción y cohesión son mayores en el Miembro Órganos Inferior (QbO1) que en el Órganos Superior (QbO2). En contraste, la resistencia a la compresión inconfiada es mayor para los materiales ensayados del Miembro Órganos Superior (QbO2) que del Inferior ((QbO1).

5. Modelo Geológico-Geotécnico

5.1 Geometría

Como punto de partida para la definición de la geometría del modelo geológico-geotécnico se analizaron las formas del relieve de la Escarpa Norte de Bucaramanga. De la información consignada en estudios previos, visitas técnicas y el análisis de información multitemporal, se identificó que la actual zona en movimiento se ubica sobre un gran coluvión producto de uno o varios movimientos en masa antiguos los cuales se depositaron sobre una pendiente escalonada.

La Figura 15 muestra el relieve del sector norte en el año 1967, antes de que se urbanizara; se aprecia, al sur, la cicatriz de despegue del material movido y, el cuerpo deslizado hacia el norte, este último con un componente oriental de apariencia fluida y otro occidental algo más alto y estable (Villamizar, 2017). Se aprecia en el costado occidental, fuera del gran deslizamiento, evidencia del relieve escalonado, y dentro de la gran masa deslizada, algunos remanentes del antiguo relieve escalonado ahora cubierto por depósitos de ladera (coluviones).

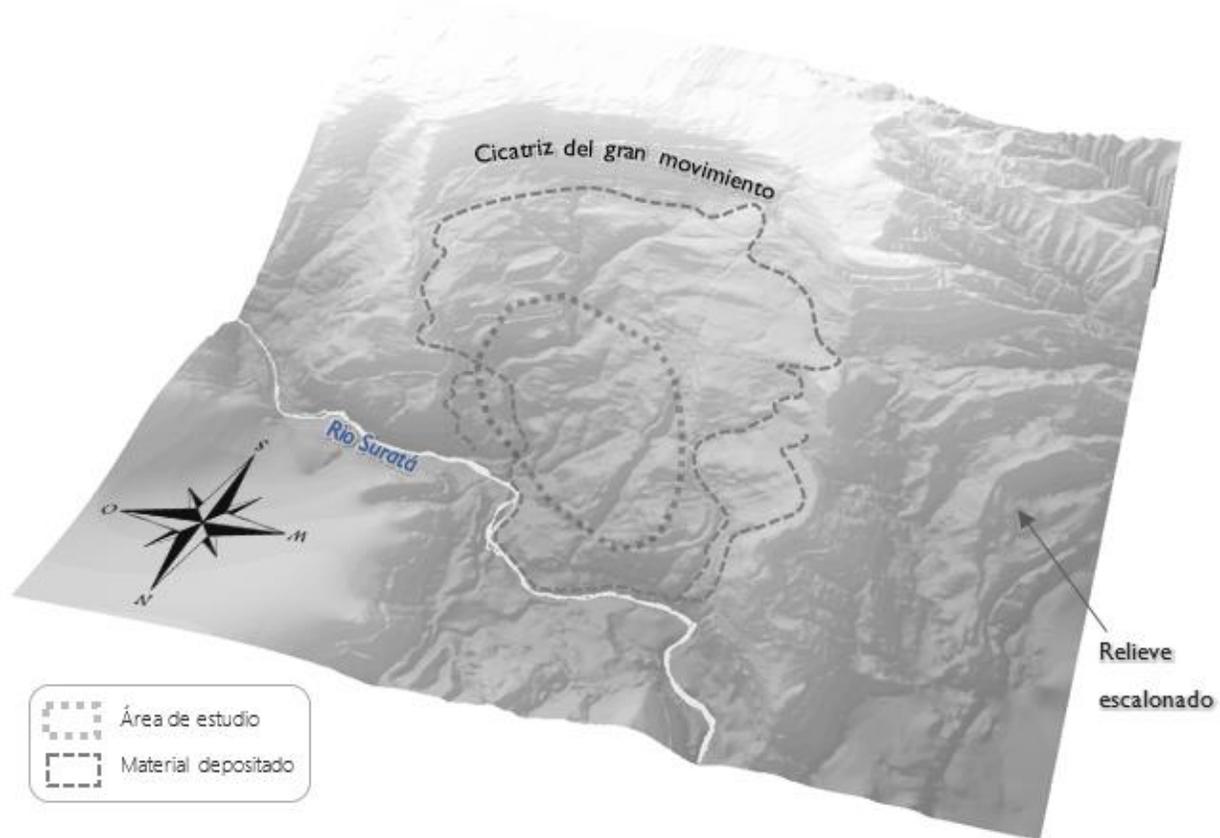


Figura 15. Gran coluvión del Sector Norte, topografía del año 1967.

La concepción del sector norte como un gran coluvión depositado sobre una pendiente escalonada fue fundamental para la definición de la geometría del modelo, principalmente por la diferencia de alturas entre los contactos de los diferentes miembros y formaciones identificados en perforaciones realizadas en el área de estudio.

Una vez identificada la disposición general del relieve local, se usó la información de las columnas estratigráficas, trincheras, apiques y geofísica para definir la geometría y espesores de los materiales, en particular del componente coluvial sobre el que se realizaron cortes y rellenos para construir las viviendas existentes en el sector. Como resultado se generaron los perfiles para

el modelamiento geotécnico, como el que se muestra en la Figura 16, éstos agrupan los materiales en zonas homogéneas desde el punto de vista de características y comportamiento esperado.

En este sentido, para los perfiles generales, se modeló el coluvión (Qd) como una unidad altamente heterogénea; el Miembro Órganos Superior (QbO2) se dividió en 3 segmentos diferenciados así: una fracción fina, acá denominada QbO2-F3, ésta suprayace a un segmento intermedio grueso (QbO2-G2) y, bajo éste, otra porción fina, el QbO2-F1; el Miembro Órganos Inferior (QbO1), se consideró como un solo segmento depositado sobre las rocas de las formaciones Tiburón, Bocas, Jordán y Diamante, dependiendo del sector. En los perfiles locales, se consideraron además los rellenos y suelos orgánicos identificados en sectores específicos.

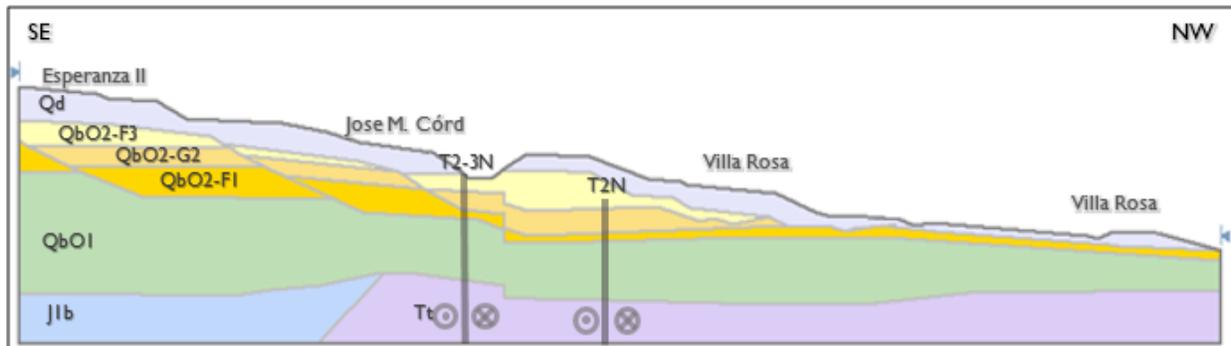


Figura 16. Perfil general 4. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

5.2 Niveles freáticos

Para la definición del nivel freático se usó la información de las secciones de geofísica realizadas para el presente estudio, los datos de los piezómetros instalados bajo el convenio y de los ya existentes en el sector, el inventario de puntos de agua y una revisión exhaustiva de información

secundaria para estimar la ubicación la tabla de agua en los puntos con mayor incertidumbre. De la recopilación realizada se obtuvieron las profundidades aproximadas de la napa freática empleadas para modelar la condición normal de estabilidad de los taludes en el área de estudio, las cuales varían entre los 1 y 9m de profundidad en la mayoría de los sitios, siendo menor a 1 m en los sitios más críticos y mayor a 5m en zonas con subdrenes.

5.3 Propiedades geomecánicas

Como se mostraba en el capítulo 4.3, los materiales recuperados de los sondeos, trincheras y apiques fueron sometidos a ensayos para la obtención de los parámetros geomecánicos necesarios para los análisis computacionales de estabilidad, tales parámetros pueden encontrarse en las Tablas 6 y 7.

Teniendo en cuenta la variabilidad de las propiedades de los materiales geológicos de un sitio a otro, éstos se modelaron con métodos probabilísticos asignando cada propiedad como un promedio y permitiendo a los programas de estabilidad variar dicho valor de acuerdo con la desviación estándar encontrada para cada uno de ellos (Tabla 8).

Tabla 8.

Parámetros para el análisis estadístico

#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	Qd	Cohesion	Normal	20.7	7	15	15
2	Qd	Phi	Normal	28.75	7	15	15
3	Qd	Unit Weight	Normal	23.31	7	5	5
4	Qbo2-M3-F	Cohesion	Normal	30.37	17	15	15
5	Qbo2-M3-F	Phi	Normal	21.5	7	16	16
6	Qbo2-M3-F	Unit Weight	Normal	20.32	7	5	5
7	Qbo2-M2-G	Cohesion	Normal	16.38	7	10	10
8	Qbo2-M2-G	Phi	Normal	30.34	7	16	16
9	Qbo2-M2-G	Unit Weight	Normal	19.98	7	5	5
10	Qbo2-M1-F	Cohesion	Normal	27.91	19	15	15
11	Qbo2-M1-F	Phi	Normal	25.61	8	16	16
12	Qbo2-M1-F	Unit Weight	Normal	21.61	8	5	5
13	Qbo1	Cohesion	Normal	27.56	12	15	15
14	Qbo1	Phi	Normal	30.59	7	16	16
15	Qbo1	Unit Weight	Normal	19.23	7	5	5

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

6. Factores Detonantes

6.1 Lluvia

Los eventos prolongados de lluvia originan el paso de frentes de infiltración en el subsuelo y el ascenso de los niveles freáticos propios de cada zona, estos factores a su vez inducen un aumento de las presiones de poros y una disminución de la resistencia al corte de los materiales ahora saturados dando origen a deslizamientos. En el caso del sector norte, las lluvias representan el

principal detonante de movimientos en masa, con reportes de agrietamientos en cada temporada lluviosa; para considerar su efecto como factor detonante, se consideró su influencia en la oscilación del nivel freático en las laderas y taludes del área de estudio.

De acuerdo con los registros climáticos, el régimen de lluvias en el área de estudio está distribuido en dos periodos secos y dos periodos lluviosos, los periodos lluviosos corresponden a los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre.

Las lluvias alimentan las cuatro cuencas que tienen influencia en el área de estudio, (ver Figura 17), en éstas, el porcentaje de áreas que permiten infiltración asciende al 40% y en el área de estudio al 60%.

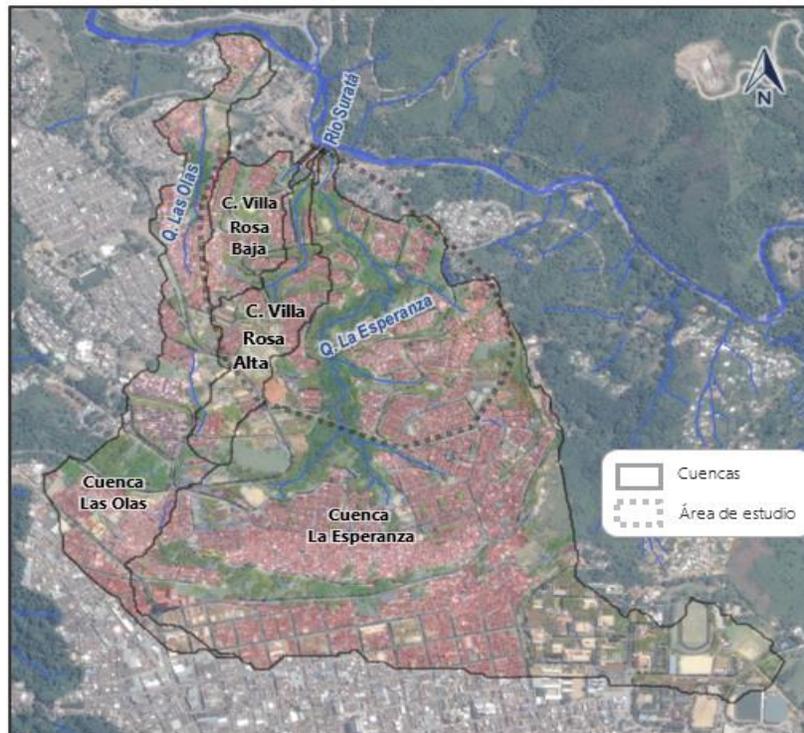


Figura 17. Cuencas con influencia en el área de estudio. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Adicional a la lluvia infiltrada, otro aporte importante al sistema hidrogeológico del norte es el proveniente de las tuberías de alcantarillado que se han roto a causa de las grandes deformaciones que ha sufrido el suelo por los movimientos en masa.

Si bien los piezómetros instalados en las perforaciones realizadas indican la presencia de varios niveles piezométricos en el sector de interés (ver Figura 18), el corto periodo de registro de los datos y la ausencia de información o ensayos que permitan definir su procedencia, distribución espacial e interacción hace que no sea posible conocer la variabilidad temporal de los diferentes niveles piezométricos a partir de datos de campo, por lo que para el análisis de estabilidad se consideró un solo nivel y se asoció éste únicamente a la variabilidad temporal de la precipitación.

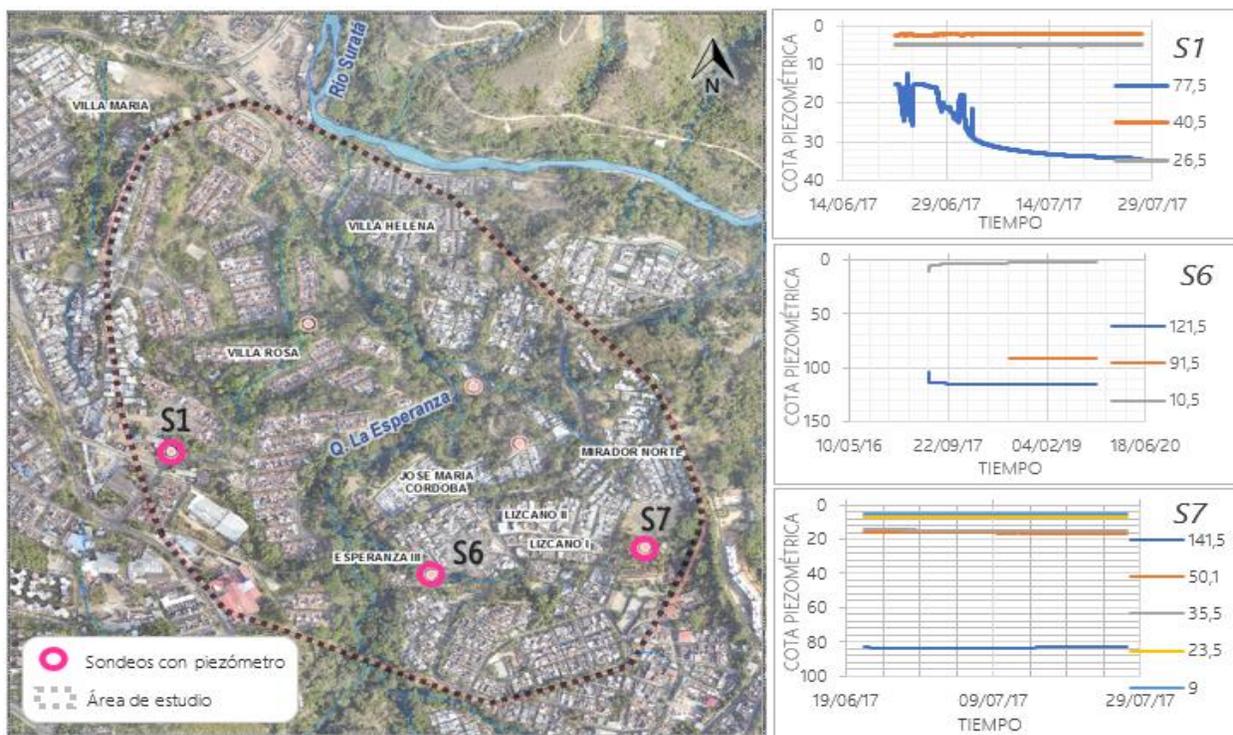


Figura 18. Ubicación los sondeos con piezómetros y registro del periodo Junio-Agosto, 2017.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Debido a la baja densidad de sondeos realizada para el estudio, la definición del nivel freático habitual se complementó con información de estudios previos y se cotejó con los resultados de la exploración geofísica, finalmente el nivel estimado fue representado en los modelos como una condición de frontera con cabeza de energía constante.

Para simular los períodos de lluvia, se tuvo en cuenta el análisis hidrológico realizado para el convenio en el que se desarrolla el presente trabajo de aplicación, según el cual, para una larga lluvia en una temporada lluviosa extrema con periodo de retorno de 20 años, el ascenso del nivel freático debido a la precipitación y al aporte estimado de las tuberías rotas es tal que la tabla de agua alcanza niveles cercanos a la superficie, por tal razón, se modeló el escenario lluvioso con la napa freática justo bajo la superficie del terreno.

6.2 Sismo

Durante los eventos sísmicos se libera energía en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de los materiales del medio geológico, éstas actúan como cargas cíclicas que inducen deformaciones plásticas a su paso. Tales deformaciones producen un aumento en la presión de poros, reduciendo la resistencia de los materiales; adicionalmente, la acumulación de deformaciones plásticas tras cada ciclo de carga lleva los materiales a la rotura, desencadenando deslizamientos. Para caracterizar los posibles eventos sísmicos que tengan afectación en el área de estudio se analizan las fuentes donde éstos se puedan originar.

La fuente sismogénica con influencia más frecuente en el área de estudio está relacionada con sismos intraplaca provenientes del nido sísmico de Bucaramanga caracterizados por su profundidad mayor a 50km. Los sismos corticales, asociados a sistemas de fallas geológicas, son mucho menos comunes en la región, se estima que corresponden al 6 u 8 % de los sismos con magnitud mayor a 3 Mw que llegan a ser percibidos en Bucaramanga (Calle, 2017).

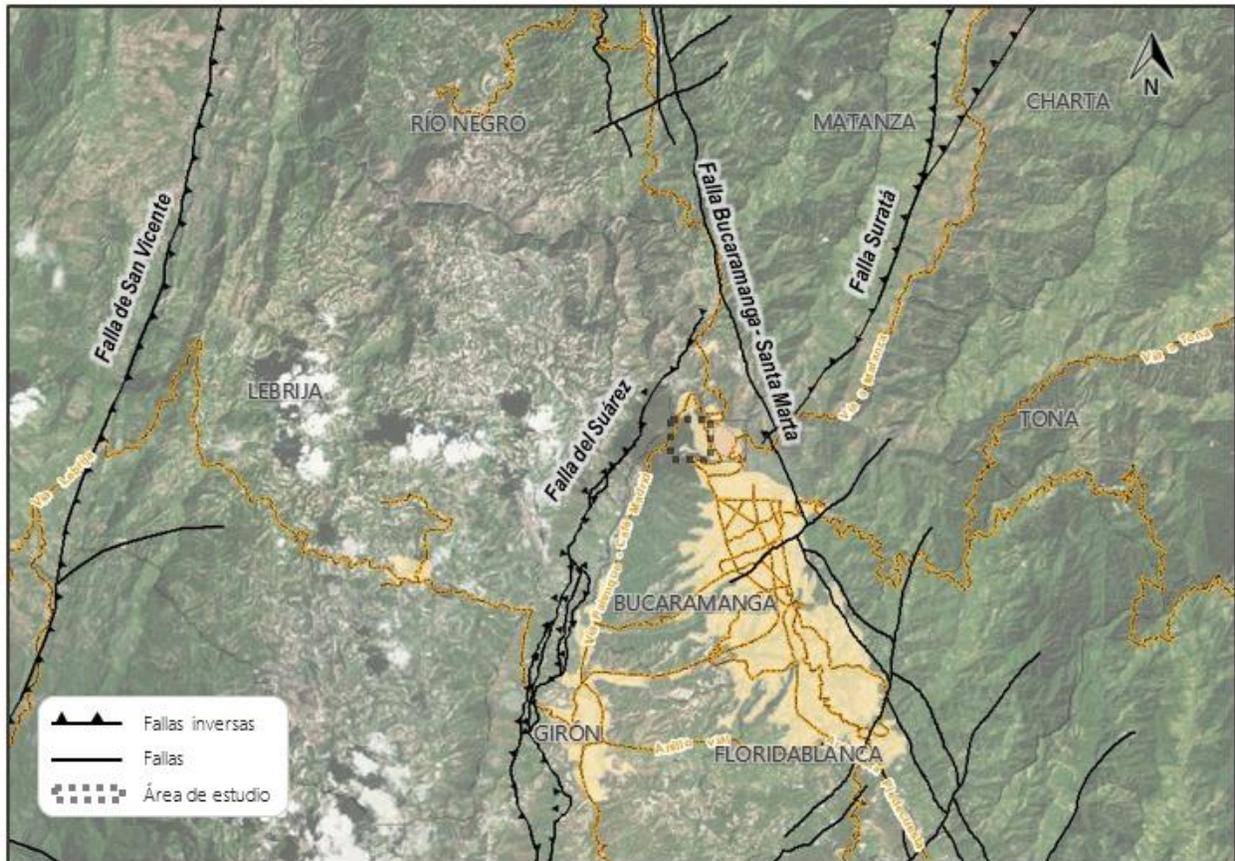


Figura 19. Sistemas de fallas cercanos al área de estudio. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

El llamado nido sísmico ubicado a 50 km al sur de Bucaramanga entre las poblaciones de Umpalá y Cepitá, tiene su epicentro a unos 150km de profundidad, ha llegado a registrar sismos

de magnitud 6.8Mw (Julio 29 de 1967). Su actividad comúnmente se asocia al choque de las placas tectónicas Nazca, Caribe y suramericana.

Segmentos de sistemas de fallas San Vicente, Bucaramanga - Santa Marta, Suárez y Suratá se encuentran a menos de 50 km de la ciudad, los tres últimos en particular confluyen en el norte de la ciudad y han ayudado a modelar el actual paisaje del área de estudio.

Otros sistemas de fallas como las del Piedemonte Llanero, Boconó, La Palestina, La Salina y Servitá tiene segmentos dentro del radio de 200 km alrededor del sector norte y los eventuales sismos procedentes de su actividad podría llegar a percibirse en la ciudad.

De acuerdo con los planteamientos del capítulo A.2 de la NSR-10, las fuentes sismogénicas mencionadas sitúan a Bucaramanga en una zona de amenaza sísmica alta con coeficiente de aceleración pico efectiva en roca (A_a) de 0,25.

El efecto de los sismos como factor detonante de deslizamientos se evalúa en los modelos mediante un análisis pseudoestático, que consiste en la aplicación de una carga inercial sísmica horizontal (KST) que se incluye en el cálculo de los factores de seguridad como una fuerza desestabilizante. El valor de dicha carga se determinó siguiendo las recomendaciones del capítulo H.5 de la NSR-10, según el cual, para el tipo de materiales involucrados en los movimientos en masa del sector norte, se debe cumplir que $KST/A_a=0.8$, por tanto, el coeficiente sísmico de diseño para el análisis pseudoestático de taludes KST correspondería a $A_a \times 0.8 = 0.2$.

6.3 Escenarios

Con el ánimo de comparar la situación actual con los posibles deslizamientos causados por un eventual fenómeno detonante, se consideraron cuatro escenarios para el análisis de estabilidad:

Escenario 1, condición habitual: nivel freático usual sin sismo ni lluvia

Escenario 2, nivel freático usual + evento sísmico de diseño (KST = 0,2)

Escenario 3, evento lluvioso extremo sin sismo

Escenario 4, evento lluvioso extremo + evento sísmico (KST = 0,2)

7. Análisis de Estabilidad

7.1 Hipótesis de movimientos

El análisis inicial partió de la idea de la existencia de dos tipos de movimiento en el sector, uno profundo que tomaría lugar en la interfaz entre los Miembros Órganos Superior e Inferior, y otro somero correspondiente a movimientos localizados que involucran principalmente al material coluvial, siendo éstos últimos condicionados por la topografía y el grado de saturación principalmente. Se hicieron 6 perfiles generales, para analizar la posibilidad del movimiento profundo y 21 perfiles locales para evaluar los posibles movimientos someros. Su ubicación se muestra en la Figura 20.

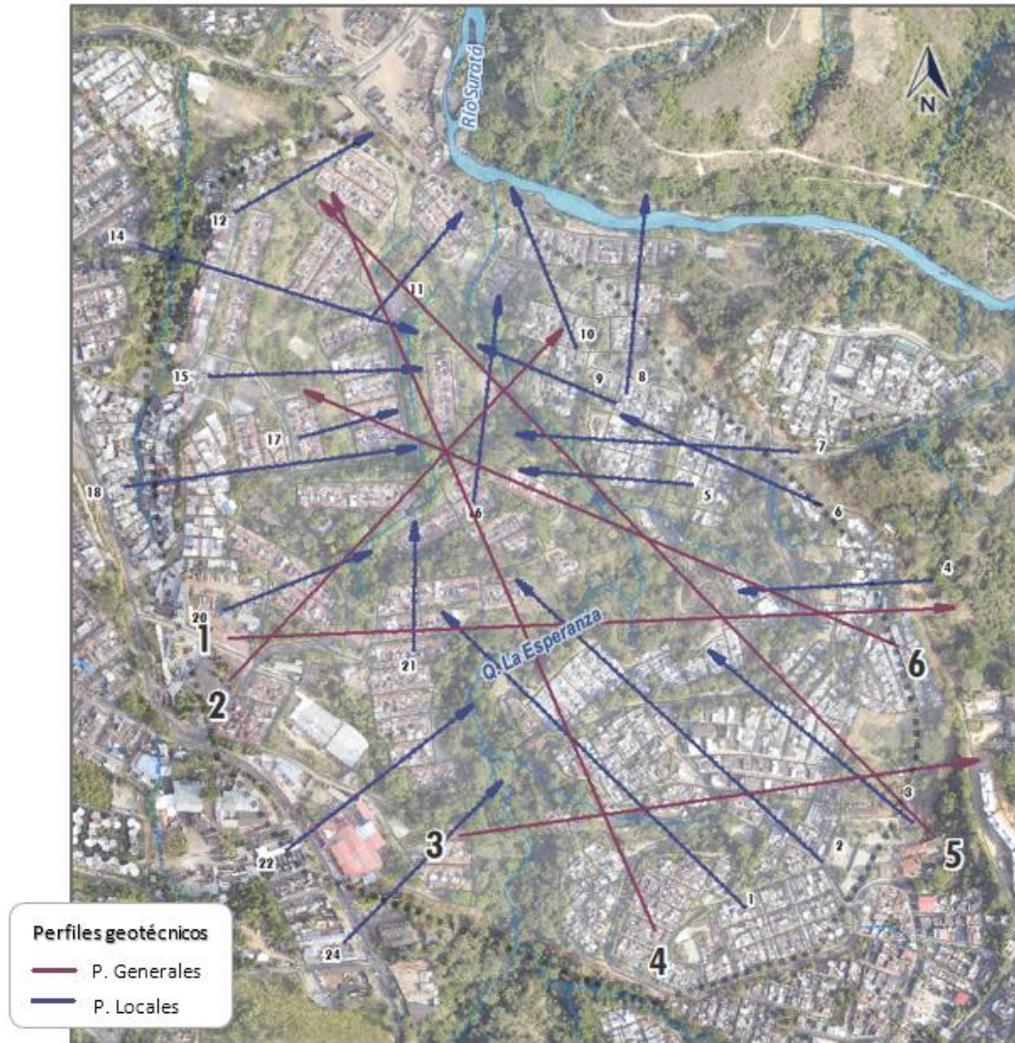


Figura 20. Ubicación en planta de los perfiles para el modelamiento. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Los perfiles generales, enfocados en los movimientos profundos, fueron planteados con el ánimo de abarcar toda la extensión del posible gran deslizamiento, éstos se distribuyen así: los perfiles 1, 2 y 3 con tendencia principal W-E, representan cortes transversales de la posible masa en movimiento, y los perfiles 4, 5 y 6, orientados en sentido S-N principalmente, muestran cortes longitudinales. Las Figuras 21 y 22 muestran a manera de ejemplo los perfiles generales 1 y 4, cortes transversales y longitudinales respectivamente.

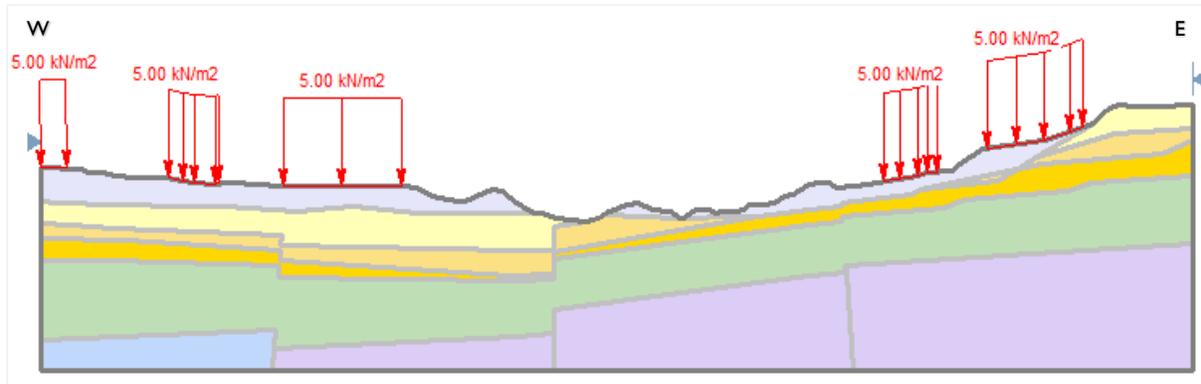


Figura 21. Ejemplo de corte transversal al posible gran movimiento (Perfil general 1). Fuente: Grupo de Investigación Geomática

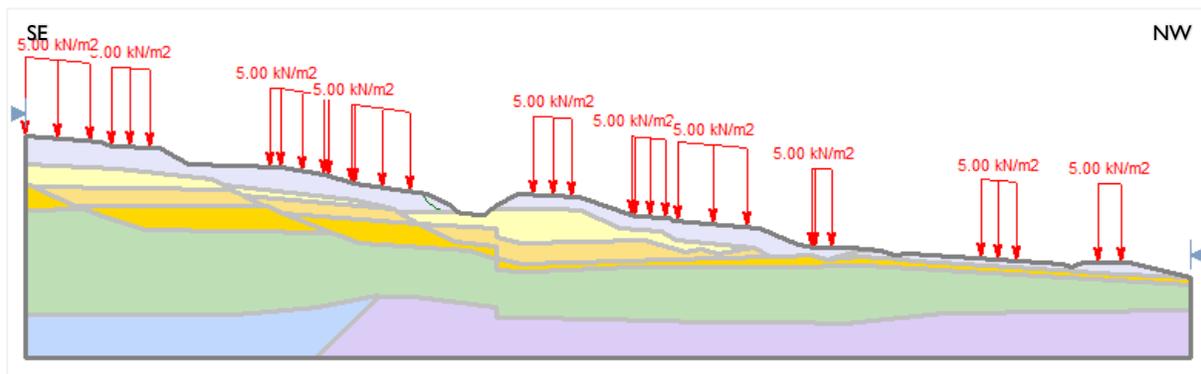


Figura 22. Ejemplo de corte longitudinal al posible gran movimiento (Perfil general 4). Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Los 21 perfiles locales, se distribuyeron en toda el área de estudio atravesando los principales taludes y laderas del sector buscando analizar la estabilidad de los materiales menos profundos: el coluvión, los suelos, cortes y rellenos antrópicos.

7.2 Método de equilibrio límite

El método de equilibrio límite evalúa el estado equilibrio de una masa potencialmente inestable a lo largo de una superficie de falla, para esto, compara las fuerzas tendientes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo, como resultado se obtiene un valor de Factor de Seguridad o FS, el cual cuantifica la estabilidad de la masa, o en términos prácticos, la posibilidad de que el talud falle.

En el momento de producirse la falla la masa se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático, esto es *Fuerzas Estabilizantes / Fuerzas Desestabilizantes = 1*. Valores de factor de seguridad inferiores a 1, indican que el movimiento a lo largo de la superficie de deslizamiento es posible. Si para varias superficies el valor del factor de seguridad es menor que 1, el movimiento es posible a lo largo de todas ellas.

Para la aplicación del método se requiere determinar un mecanismo de falla cinemáticamente admisible: rectas, circunferencias o espirales logarítmicas; asumir una posible superficie de falla, establecer relaciones entre las fuerzas resistentes y las fuerzas que inducen al desequilibrio, analizar la estabilidad del conjunto calculando el factor de seguridad de la superficie asumida y, finalmente, repetir el proceso hasta encontrar la superficie de deslizamiento más desfavorable. Este proceso se realiza en paquetes de software que permiten analizar miles de superficies de falla en corto tiempo.

7.3 Software de modelamiento

Se usó el paquete de software Slide 7.0 de Rocscience, el cual permite estudiar el índice de fiabilidad de taludes y laderas en términos de factores de seguridad y probabilidad de falla mediante el método de equilibrio límite y hacer análisis de aguas subterráneas con elementos finitos.

7.4 Mecanismo de falla

Para definir el criterio de búsqueda a emplear por el programa, se analizaron los mecanismos de falla de los materiales involucrados en los procesos activos identificados en las visitas de campo, en éstos predominan los deslizamientos de tipo rotacional en las zonas de alta pendiente y movimientos lentos con grietas compuestas rotacional-traslacional en las zonas de baja pendiente.

7.5 Modelo constitutivo y Métodos de análisis

El modelo constitutivo empleado para representar la resistencia de los depósitos inconsolidados o suelos de la Formación Bucaramanga fue el de Mohr-Coulomb, cuyos parámetros básicos son la fricción y la cohesión del material; las formaciones rocosas infrayacentes, por su profundidad, constituyen el límite del dominio del modelo. Para evaluar la estabilidad se usaron los métodos clásicos que parten al talud en dovelas: Ordinario o de Fellenius, Bishop simplificado, Janbú simplificado y Spencer.

7.6 Resultados

Los resultados del perfil general 4 son un buen ejemplo de la tendencia general de los resultados del análisis de estabilidad para los diferentes escenarios planteados. Los modelos de la Figura 23, correspondientes a escenarios con nivel freático habitual, muestran que aún en la condición usual sin ningún evento detonante, los terrenos cercanos a la quebrada, en este perfil correspondientes al barrio José María Córdoba, son susceptibles a los movimientos en masa exhibiendo factores de seguridad mayores pero cercanos a uno. Ante la acción del evento sísmico, la estabilidad de la zona débil en cercanías a la quebrada se hace más crítica, extendiéndose las superficies de falla más allá de José María Córdoba y Lizcano llegando hasta las Esperanzas.

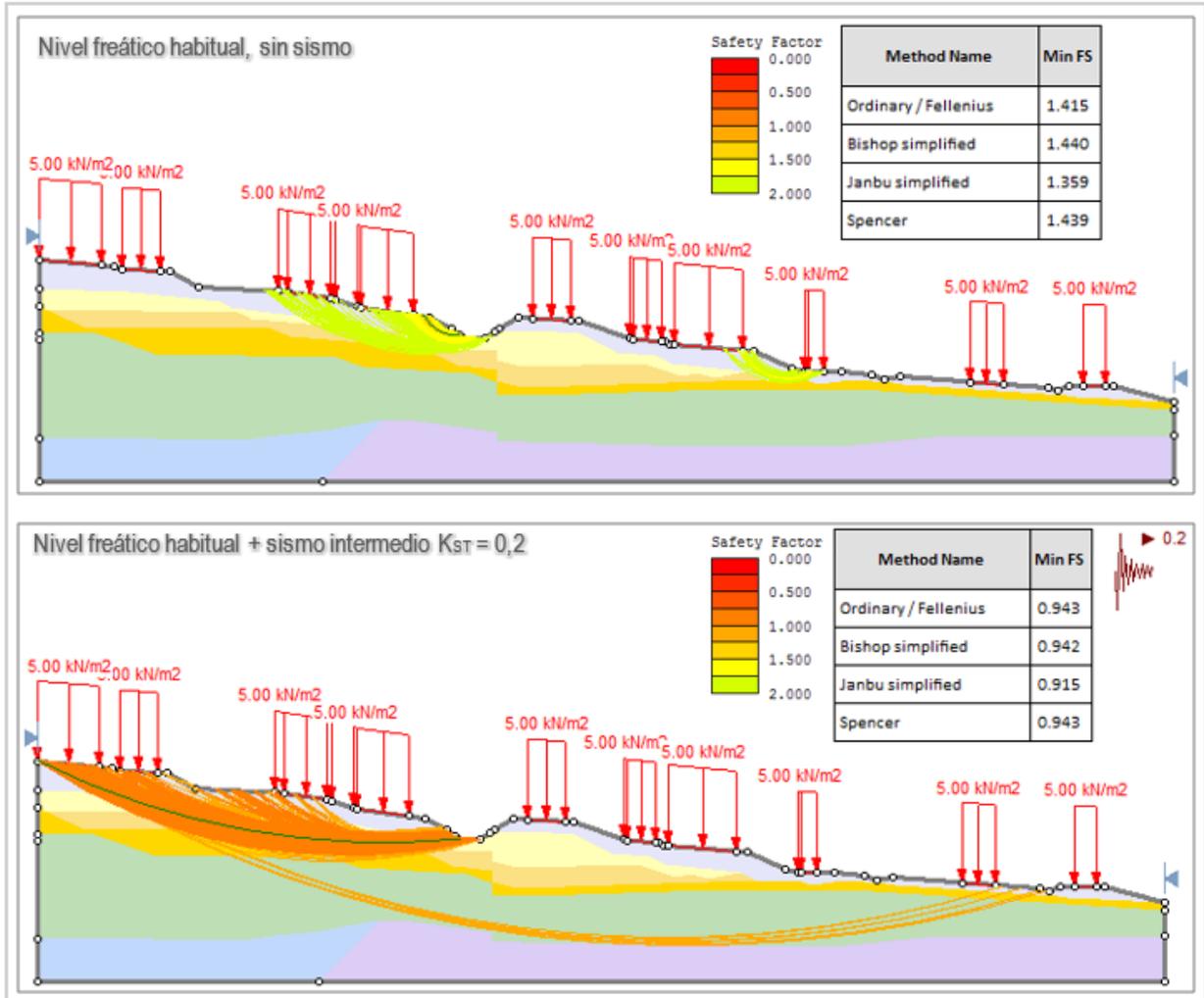


Figura 23. Análisis de estabilidad Perfil general 4, escenarios con nivel freático habitual. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Los perfiles mostrados en la Figura 24, representan el comportamiento de los materiales en una época lluviosa, en este caso, sólo con la lluvia extrema y sin sismo, el ascenso en los niveles freáticos se traduce en factores de seguridad menores a uno en diferentes sectores del perfil, indicando que el principal detonante es el agua. Con lluvia y sismo, se obtienen numerosas superficies de falla con factor de seguridad bastante menor a uno abarcando toda el área de estudio

por lo que se recalca que un evento sísmico de tal magnitud podría tener serias afectaciones en el sector; el sector más crítico, en este perfil, sigue siendo el de José María Córdoba y Lizcano.

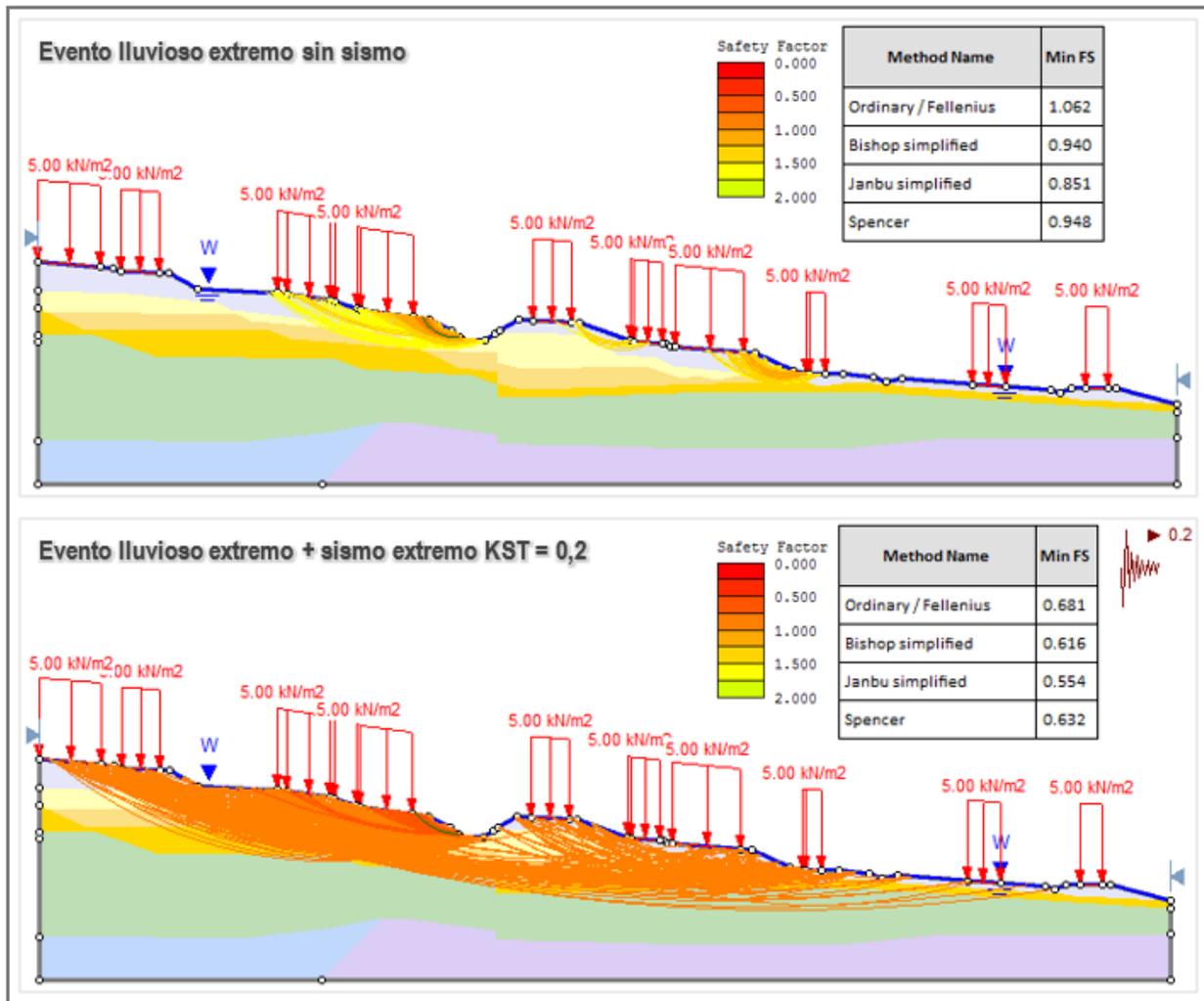


Figura 24. Análisis de estabilidad Perfil general 4, escenarios para evento lluvioso extremo.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Sólo en los escenarios con evento sísmico fuerte aparecen superficies de falla con factor de seguridad menor a 1 lo suficientemente grandes como para corresponder a un único gran deslizamiento, este resultado se repite en todos los modelos de los perfiles generales, por lo que la

idea de que la problemática actual de agrietamientos en el norte obedece a un movimiento único general de todo el sector pierde fuerza. Los resultados de los demás perfiles se pueden encontrar en los reportes de modelamiento anexos, ellos ponen en evidencia que la mayoría de las laderas del sector por ser predominantemente coluviales son altamente susceptibles a los cambios de humedad, siendo los barrios más afectados José María Córdoba, Lizcano, Mirador y Villa Helena.

7.7 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos permite resolver un problema complejo al subdividirlo en problemas más simples al sustituir un número infinito de variables desconocidas por un número limitado (finito) de elementos de comportamiento bien definido. Para esto, la geometría del modelo sometido a cargas y restricciones se fracciona en pequeños elementos unidos por nodos componiendo una malla que representa el dominio del problema y a la cual se aplican las ecuaciones de equilibrio que relacionan esfuerzos y deformaciones. Sin embargo, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico de los materiales no son resueltas de manera exacta sino aproximada, y su precisión depende de la cantidad de nodos y elementos y del tamaño y los tipos de elementos de la malla; cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados de los análisis.

En ingeniería geotécnica, el método facilita el análisis de un amplio rango de proyectos desde el diseño de excavaciones, estabilidad de taludes, flujo de aguas subterráneas y cálculo de asentamientos hasta análisis dinámicos.

Para el análisis de estabilidad de taludes con elementos finitos, se aplica la técnica de reducción de la resistencia al cortante (SSR por sus siglas en inglés), la cual permite calcular el factor de reducción de resistencia crítico (SRF) para el modelo, el cual es equivalente al factor de seguridad del talud, en ese sentido, un SRF de 1 significa que el talud está en un estado de equilibrio límite y que cualquier reducción en la resistencia al corte resultará en la falla del talud. La técnica funciona al reducir los parámetros de resistencia de los materiales (c , $\tan(\phi)$) al dividirlos por determinado factor (SRF) antes de hacer el análisis de esfuerzos; el proceso se repite de manera iterativa para varios valores de SRF hasta que el modelo se vuelve inestable, como resultado se obtiene el SRF crítico o factor de seguridad del talud.

7.8 Software de modelamiento

Se utilizó el programa RS² (Rock and Soil 2-dimensional analysis program) de Rocscience, diseñado para el modelamiento de suelos y rocas mediante elementos finitos, éste permite realizar análisis de estabilidad con el método de reducción de la resistencia al cortante al usar los modelos constitutivos de Mohr-Coulomb y Hoek-Brown.

7.9 Modelo constitutivo

El modelo constitutivo empleado para representar la resistencia de los materiales de la Formación Bucaramanga fue el de Mohr-Coulomb, puesto que es este modelo el que permite obtener un valor de factor de seguridad para comparar con los resultados del software de equilibrio límite, además para que la comparación pudiera ser consistente, debía usarse el mismo modelo empleado para el

análisis de estabilidad con dicho método. Este modelo usa como parámetros básicos el módulo de Young (E), la relación de Poisson (ν), el ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c) del material.

7.10 Resultados

Continuando el análisis con el mismo perfil representativo (perfil general 4), se presentan las Figuras 25 y 26 con los contornos de deformación producto del análisis con elementos finitos (se presentan las áreas deformadas, pero no su valor de deformación ya que al haber fallado el talud el valor de deformación obtenido del análisis de estabilidad es irreal).

La Figura 25 correspondiente a los modelos con nivel freático habitual, muestra que en el escenario sin eventos detonantes la zona con más bajos factores de seguridad es la aledaña a la quebrada, sin llegar a ser ésta una condición de estabilidad crítica.

El escenario con nivel freático habitual y sismo muestra marcadas áreas de deformación en todo el perfil, siendo ésta mayor en los barrios José María Córdoba, Lizcano y Las Esperanzas, bajo esta condición, el factor de reducción de la resistencia al corte crítico es de 0,41.

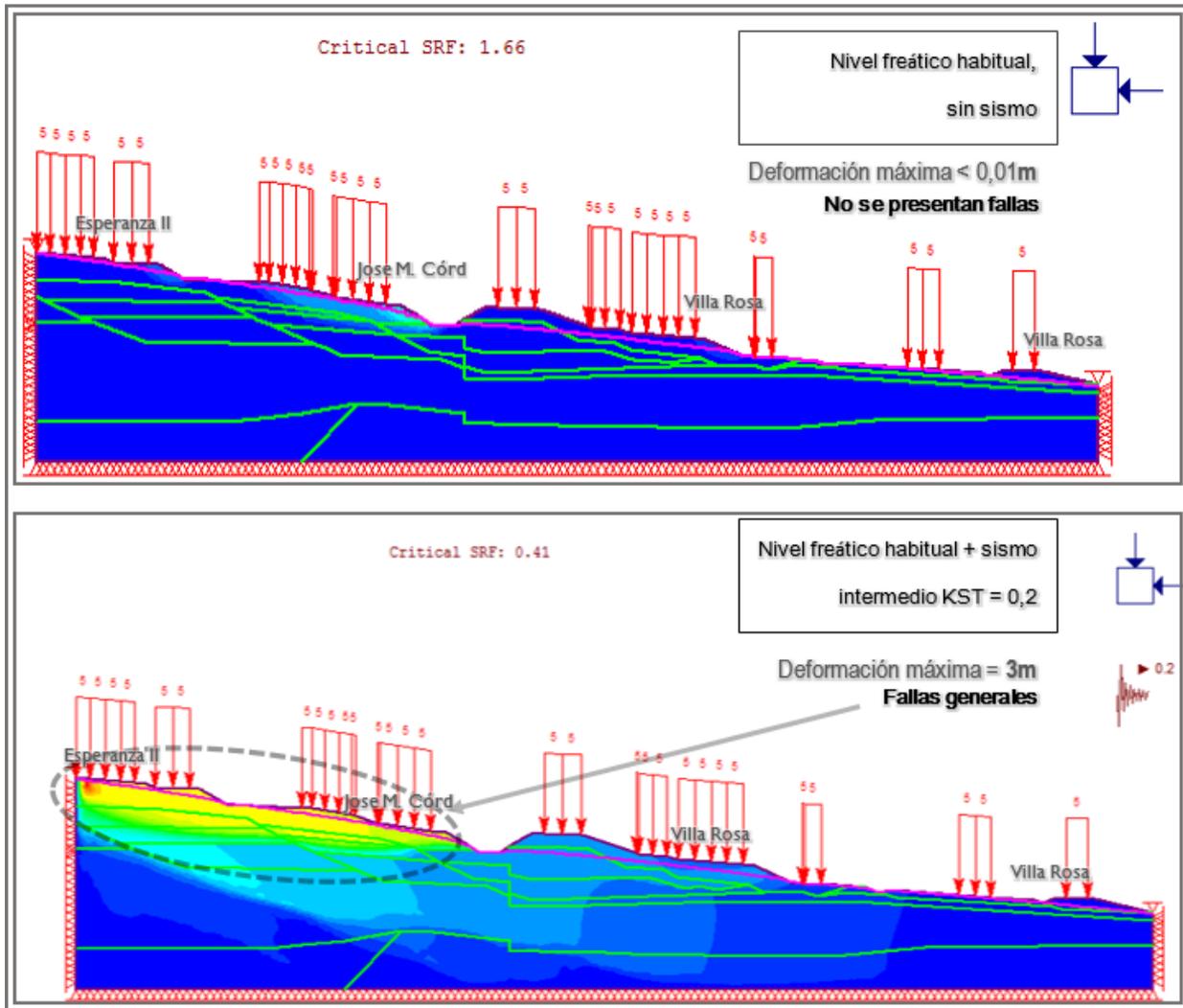


Figura 25. Contornos de deformación, Perfil general 4, escenarios con nivel freático habitual.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

La Figura 26, muestra que bajo evento lluvioso extremo y sin sismo varias zonas a lo largo del perfil se hacen críticas exhibiendo deformaciones altas, todas ellas involucrando principalmente al material coluvial y los rellenos sobre este. El sector más crítico sigue siendo el aledaño a la quebrada con un SRF de 0,9.

Con la acción del sismo las zonas con mayor deformación son las mismas que en el análisis sin lluvia, sin embargo, se obtiene un factor de seguridad extremadamente bajo con deformaciones considerablemente más marcadas.

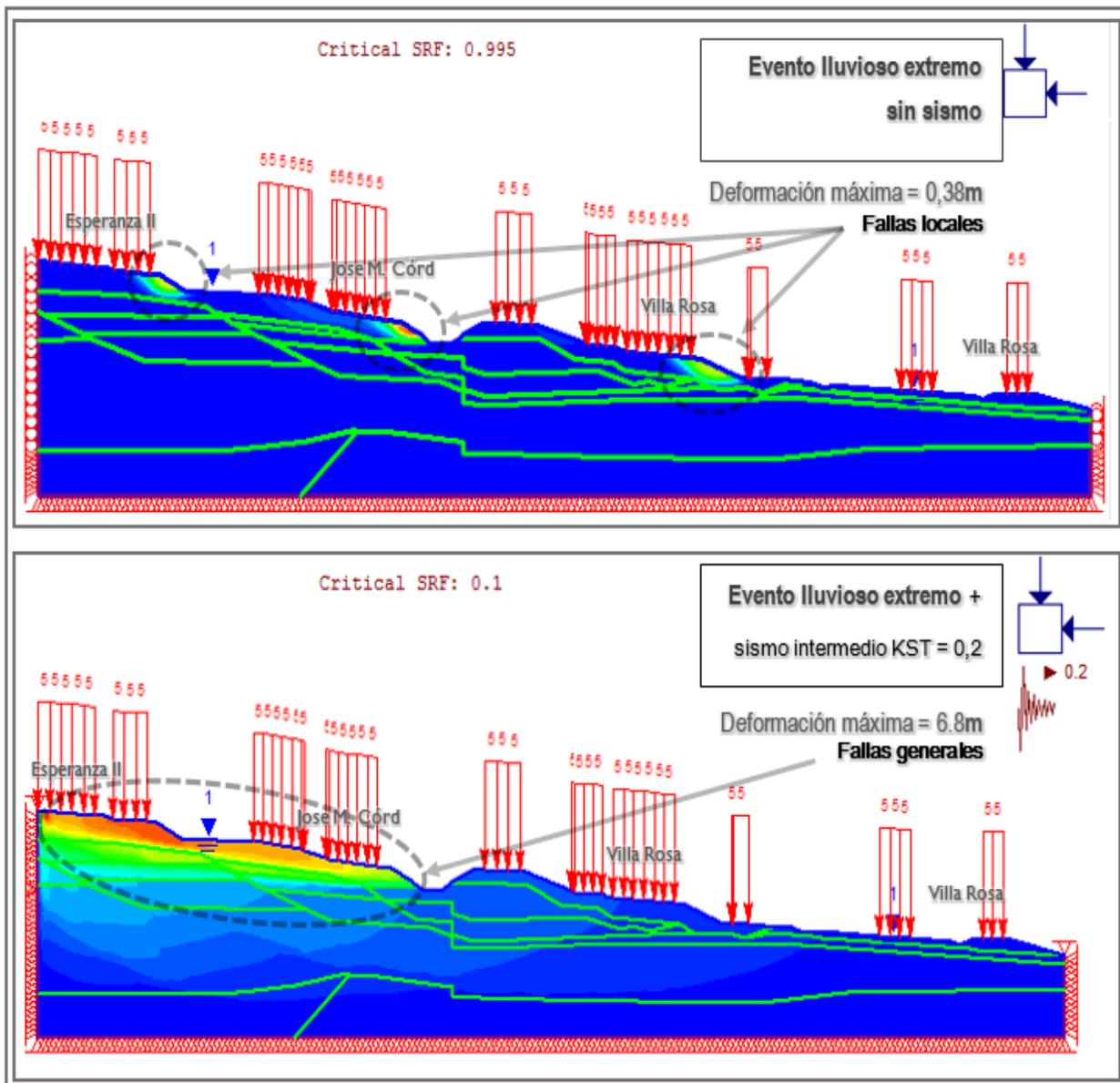


Figura 26. Contornos de deformación, Perfil general 4, escenarios con evento lluvioso extremo.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Al igual que en el análisis con equilibrio límite, los perfiles generales muestran que sólo en los escenarios con evento sísmico fuerte aparecen superficies de falla con factor de seguridad menor a 1 lo suficientemente grandes como para corresponder a un único gran deslizamiento.

7.11 Comparación de los dos métodos

A continuación, se presenta la comparación entre las superficies críticas resultantes de la aplicación de los dos métodos.

7.12 Escenarios sin sismo

En la Figura 27 se comparan las superficies de falla del escenario habitual sin factores detonantes, si bien los dos modelos guardan gran similitud en cuanto a la ubicación de las zonas de más bajo factor de seguridad, las superficies de falla en elementos finitos se muestran ligeramente más largas que en el modelo evaluado con equilibrio límite. Los factores de seguridad arrojados por Slide son más conservadores que los de RS2.

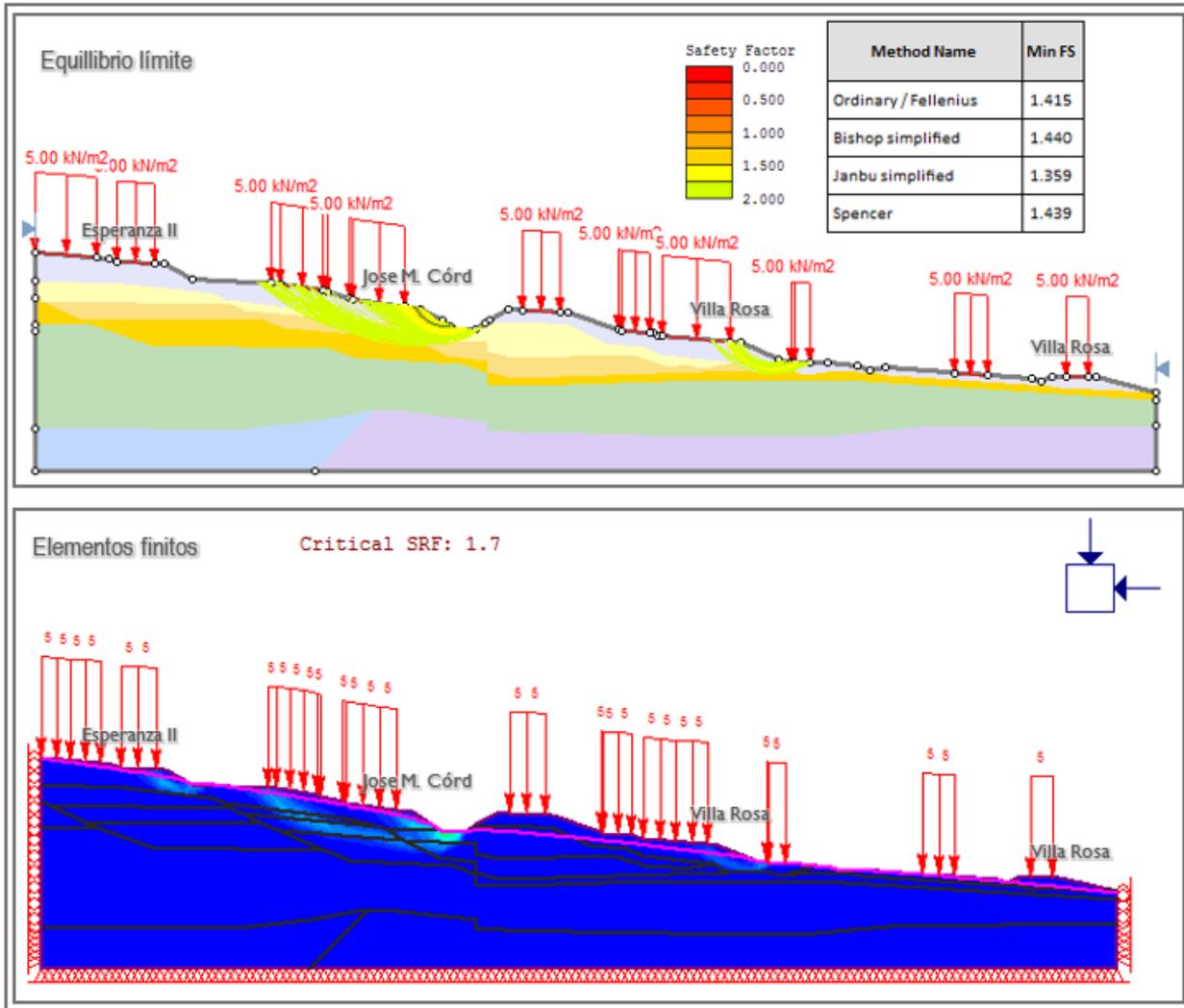


Figura 27. Superficies de falla, Perfil general 4, escenario con nivel freático habitual sin sismo.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

En el escenario con evento lluvioso extremo sin sismo mostrado en la Figura 28 las dos zonas más críticas ubicadas en José María Córdoba y Villa Rosa coinciden en ambos modelos, un sitio crítico adicional aparece en el modelo de elementos finitos a la altura del barrio La Esperanza. Todos los sectores críticos involucran únicamente al Coluvión y los rellenos sobre éste.

Los factores de seguridad obtenidos por los dos métodos son similares, ambos programas arrojan valores por el orden de 0,9.

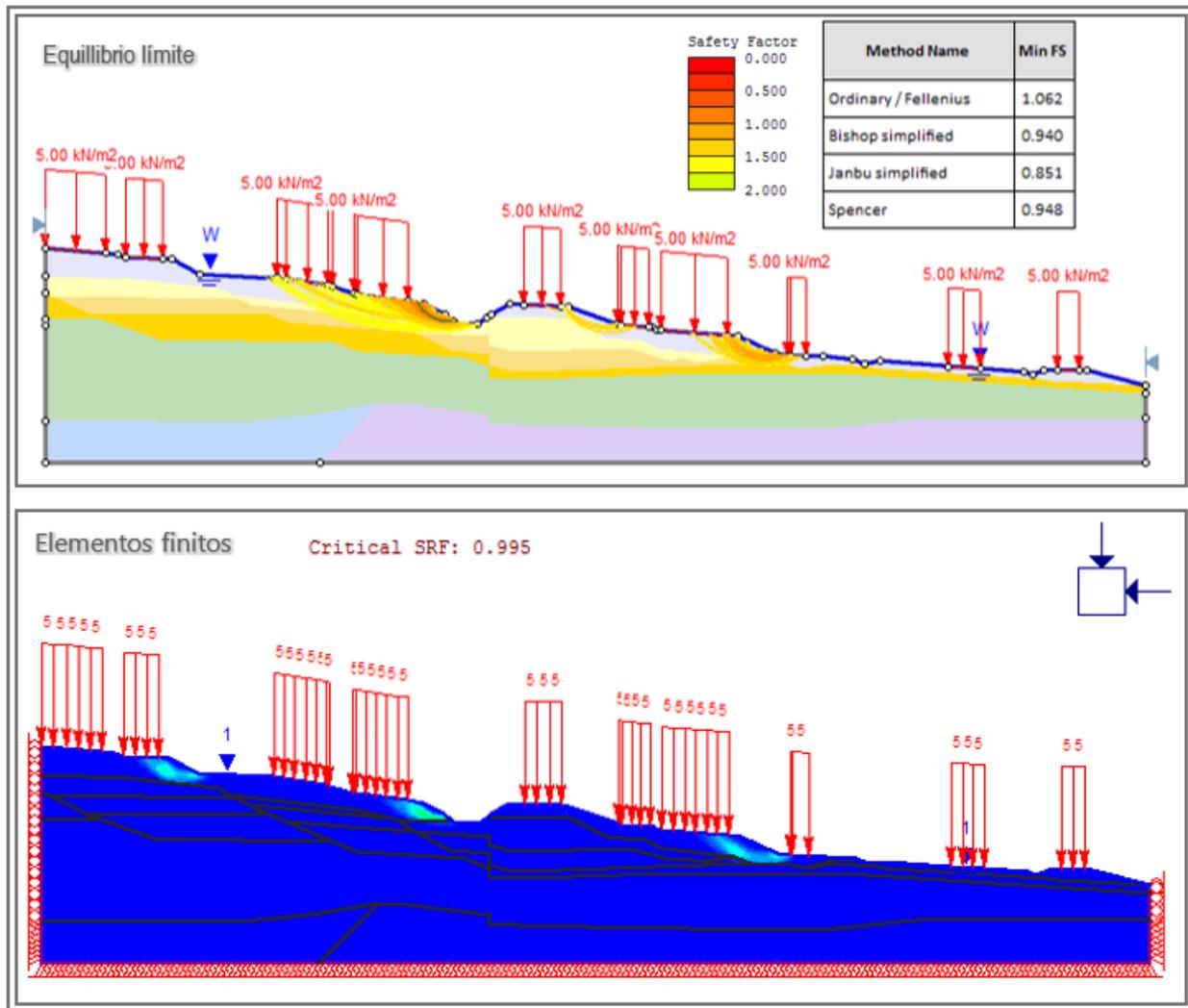


Figura 28. Superficies de falla, Perfil general 4, escenario con evento lluvioso extremo sin sismo. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Los escenarios sin sismo permiten notar el impacto de la variación del nivel freático en la estabilidad del sector norte, las subidas en el nivel de la tabla de agua implican que múltiples taludes presenten condiciones de equilibrio críticas. La identificación de la susceptibilidad

mencionada es importante al ser las épocas lluviosas fuertes eventos con periodos de retorno cortos.

7.13 Escenarios con sismo

La Figura 29, muestra el escenario con nivel freático habitual y sismos, los dos métodos muestran una zona crítica poco profunda que involucra el coluvión y el Miembro Órganos Superior, y una posible zona de falla muy profunda que llega hasta la roca.

Los factores de seguridad para la superficie más crítica obtenidos con Slide son mayores al encontrado con RS2. Las condiciones de frontera en el modelo de elementos finitos restringen el movimiento horizontal y vertical produciendo concentraciones de esfuerzos en los contornos del modelo según la dirección de aplicación del sismo.

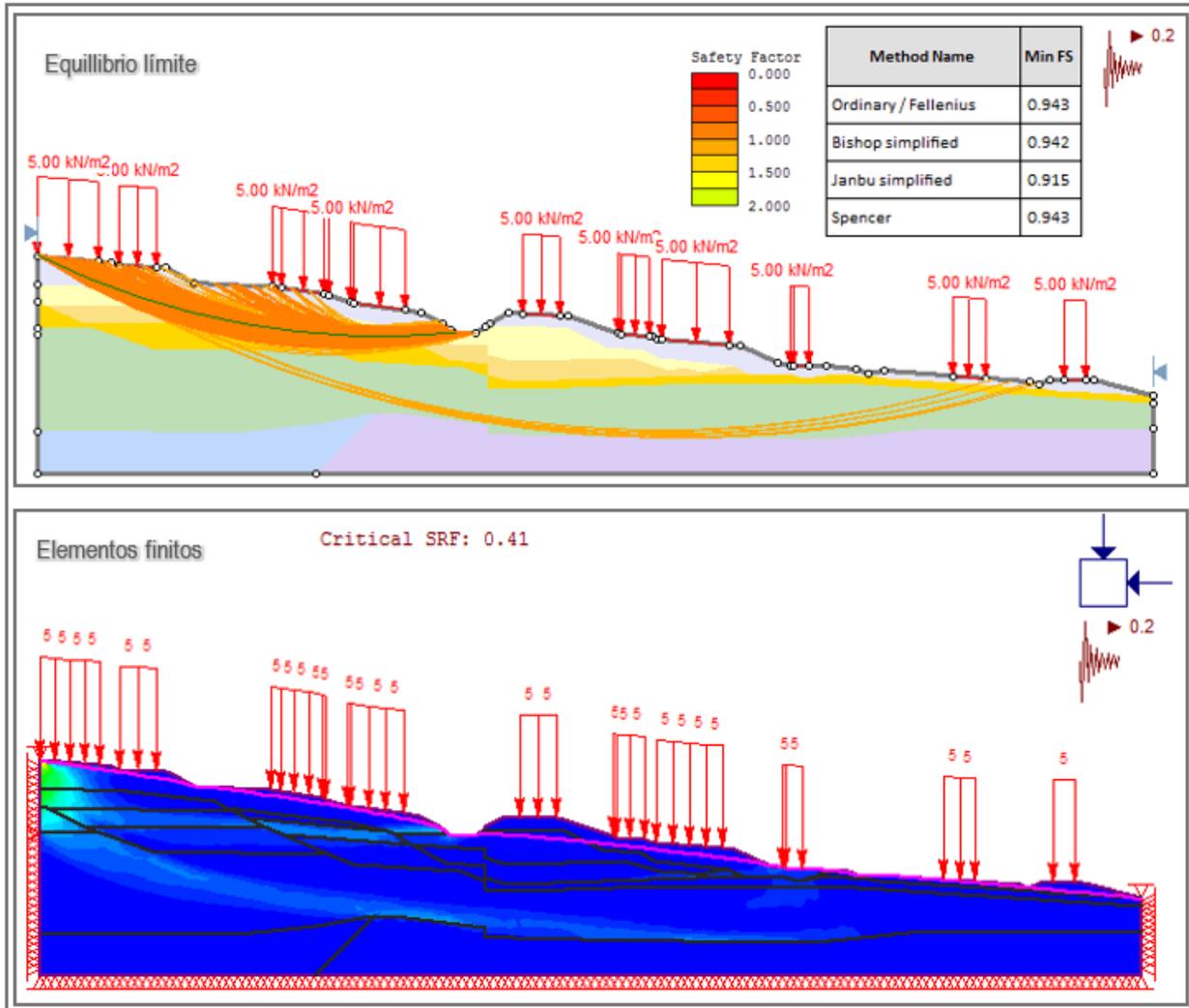


Figura 29. Superficies de falla, PG 4, escenario con nivel freático habitual + sismo, KST=0.2.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Las superficies de falla obtenidas para evento lluvioso extremo con sismo coinciden con ambos métodos, se muestran dos zonas críticas someras, una en José María Córdoba-Lizcano y otra en Villa Rosa alta, y otra zona crítica en profundidad. Nuevamente, los factores de seguridad para la superficie más crítica calculados por Slide son mayores a los arrojados por RS2.

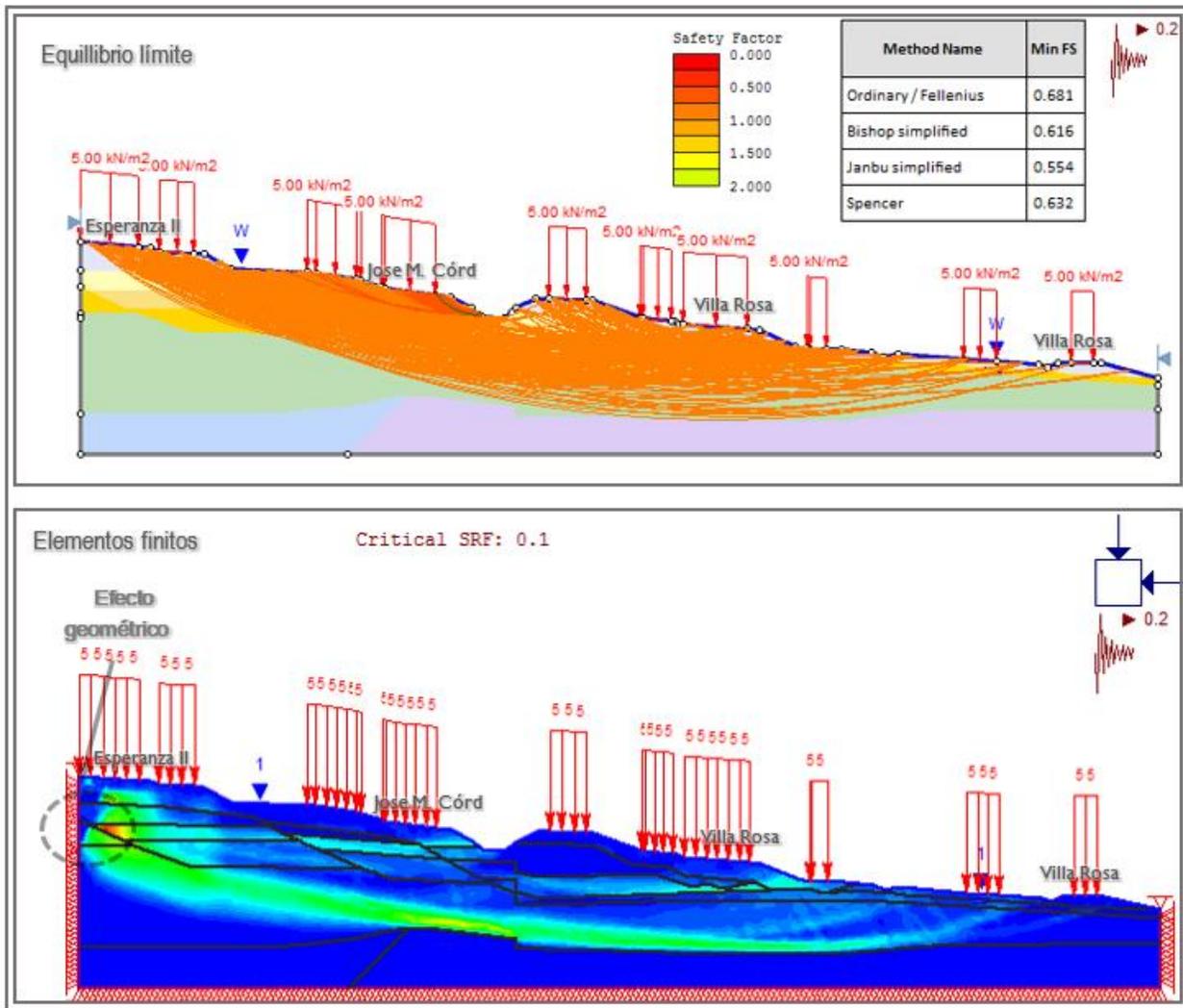


Figura 30. Superficies de falla, PG4, escenario con evento lluvioso extremo + sismo, KST=0.2.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

Los escenarios evaluados con la acción de la carga seudoestática muestran que la ocurrencia de un sismo como el de diseño contemplado en la norma NSR-10 resultaría catastrófico para el área de estudio con colapsos de laderas y taludes en todo el sector y posiblemente movimientos de tipo profundo.

La mayor diferencia entre los factores de seguridad obtenidos con ambos métodos se encuentra en los análisis seudoestáticos, situación que debe considerarse para futuros análisis. Los menores valores obtenidos con RS2 obedecen a las acumulaciones de esfuerzos que se producen en algunos de los materiales tras la acción de la carga sísmica ocasionando su falla y arrojando los valores de SRF críticos para el modelo sin que estos correspondan al SRF necesario para que el talud colapse sobre la superficie de falla identificada.

8. Mapas de factor de seguridad

Con los resultados de los análisis de estabilidad llevados a cabo en el modelamiento geotécnico se elaboraron los ráster de factor de seguridad, éstos deben entenderse como indicativos, sólo dan un indicio del comportamiento de los diferentes taludes y laderas del sector ya que al haber sido generados a partir de perfiles separados y por ser el relieve tan irregular, están sujetos a inexactitudes en las zonas interpoladas. La Figura 31 compara los ráster de factor de seguridad obtenidos para cada escenario analizado.

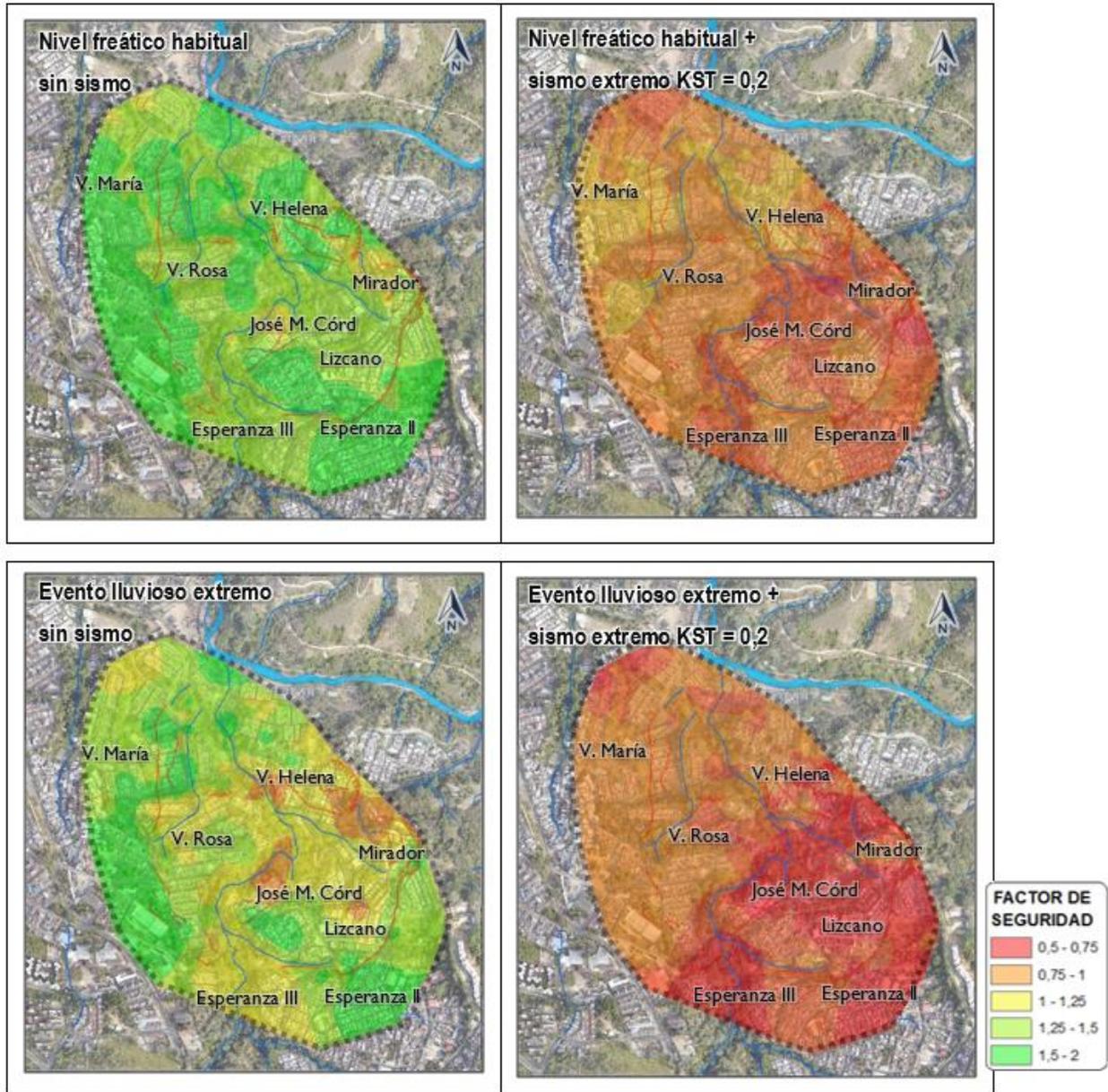


Figura 31. Comparativa de los factores de seguridad para los diferentes escenarios analizados.

Fuente: Grupo de Investigación Geomática

9. Recomendaciones para la Estabilización

Considerando el manejo histórico que han tenido las zonas más inestables, es notorio que las obras de contención construidas en sitios críticos como el barrio José María Córdoba no han tenido buenos resultados, los movimientos continuaron y los elementos de contención colapsaron debido a que fueron cimentados o anclados sobre el coluvión altamente susceptible a los cambios de humedad. En contraste, la experiencia ha mostrado que en sitios como el barrio Mirador, donde se han instalado drenes de penetración, las condiciones de estabilidad han mejorado al punto que los movimientos se han detenido.

Por estas razones, se evaluó el impacto de la instalación de drenes de penetración en la estabilidad del modelo en el escenario de lluvia extrema. Éstos se colocaron en los taludes con menor factor de seguridad y se introdujeron al modelo como elementos lineales con una condición de presión cero.

A continuación, se presentan a manera de ejemplo los resultados del modelamiento con subdrenes en el perfil representativo (perfil general 4), ver Figura 32.

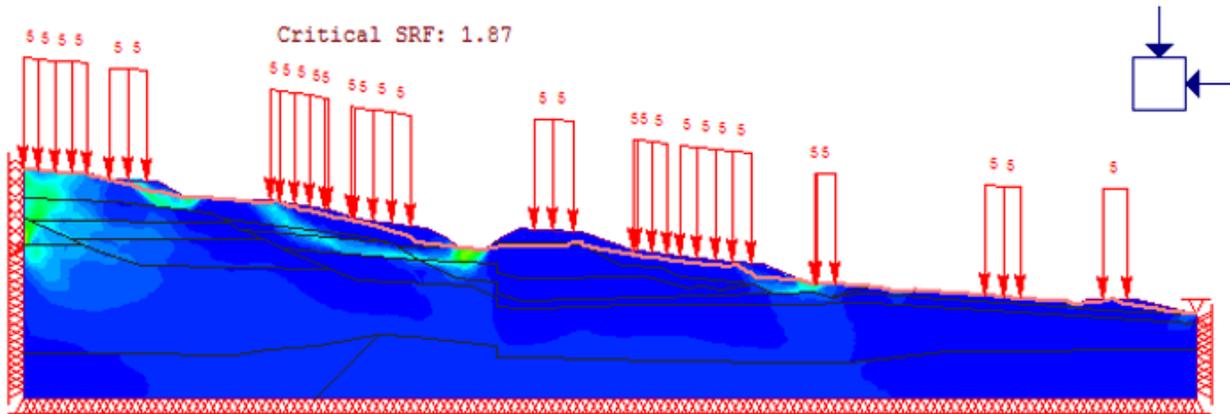


Figura 32. Impacto en el modelo: escenario de lluvia extrema con subdrenes. Fuente: Grupo de Investigación Geomática

El modelo representa la condición ideal donde los drenes trabajan adecuadamente sin problemas de taponamiento y su eficiencia es total, en tal caso, el impacto en la estabilidad es tal que aún bajo evento de lluvia extrema, el abatimiento del nivel freático permite obtener en los taludes antes críticos factores de seguridad mucho mayores a 1, en algunos casos mayores que en el escenario con nivel freático habitual, al menos en el modelo.

Al abatir el agua subterránea, la superficie de falla retrocede y se profundiza generando factores de seguridad mínimos de 1,87 (para este perfil), considerablemente mayores a los resultantes sin drenes (0,9 para el mismo escenario lluvioso).

Con tales valores de factor de seguridad, los taludes pueden ser considerados estables, los valores de deformación arrojados por el modelo para el sitio más crítico en el barrio José María Córdoba son menores a 0,01m.

De acuerdo con los resultados del modelamiento, se propone la instalación de subdrenes distribuidos en toda la extensión del área de estudio con el ánimo de abatir los niveles freáticos y evitar su ascenso en épocas de lluvia; esta recomendación se sustenta también en que el costo de obras de contención con pilotes para contener barrios enteros haría poco viable su materialización, los subdrenes representarían una alternativa más viable en términos económicos. Evaluando el impacto de los drenes en la estabilidad de los demás perfiles se generó el siguiente ráster de factor de seguridad bajo escenario de lluvia extrema con subdrenes.

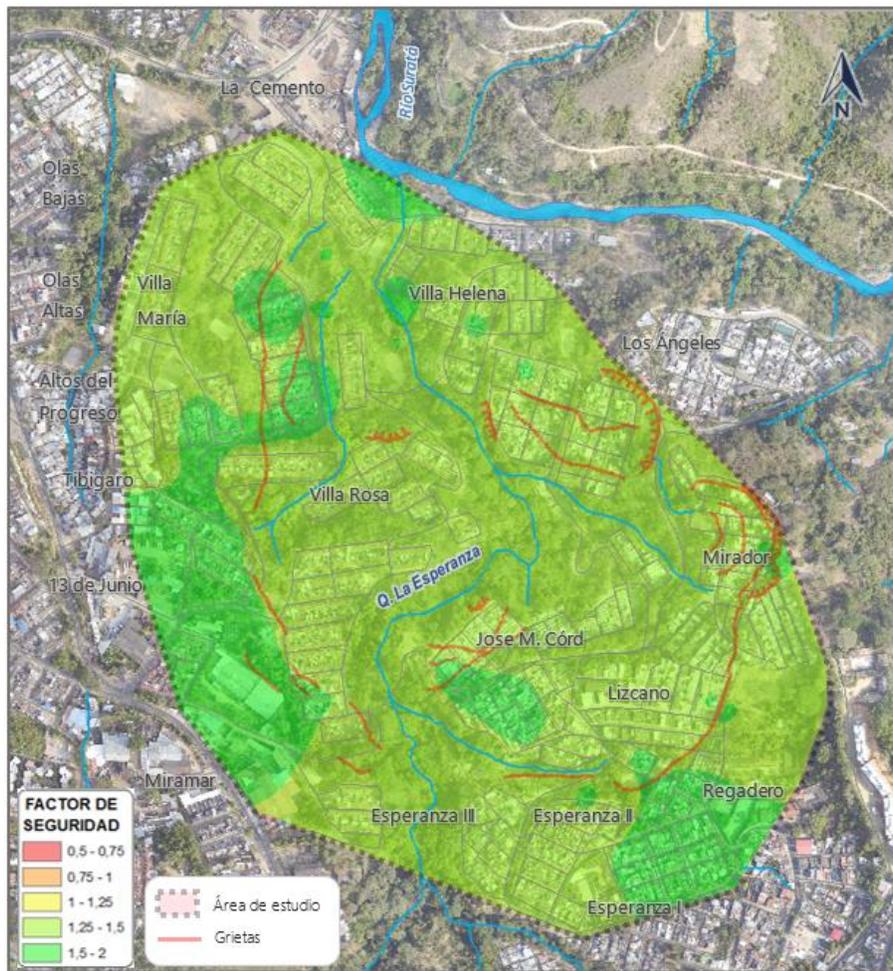


Figura 33. Ráster de factor de seguridad: escenario con evento lluvioso y subdrenes. Fuente:

Grupo de Investigación Geomática

10. Conclusiones

El área de estudio hace parte del gran coluvión de ciudad norte, un gran depósito de ladera proveniente de la meseta de Bucaramanga acumulado sobre un relieve escalonado. Las condiciones de mayor y menor humedad en la extensión del coluvión han generado movimientos internos dentro de la masa deslizada formando nuevos coluviones y, en las zonas más bajas con niveles freáticos más someros, procesos lentos asociados a un comportamiento más fluido de los materiales. Si bien buena parte de las edificaciones en el área de estudio fueron cimentadas sobre los depósitos de ladera, algunas urbanizaciones se sitúan sobre rellenos antrópicos hechos sobre el coluvión.

Estratigráficamente, los depósitos de ladera suprayacen a los materiales de los miembros Órganos Superior e Inferior de la Formación Bucaramanga, correspondientes a intercalaciones de gravas arenosas y arenas gravosas con componente fino variable. Bajo este depósito, se encuentran rocas de diferentes edades y formaciones: Bocas, Tiburón y Diamante, todas altamente afectadas por los sistemas de fallas Bucaramanga-Santa Marta y Suárez y por fallas transversales producto del movimiento relativo entre los dos anteriores.

Los materiales involucrados en los movimientos en masa del área de estudio son en su mayoría arenosos con gran cantidad de finos en la parte somera y mayor contenido gravoso en profundidad, en su mayoría de buenas características geomecánicas pero altamente sensibles a los cambios de humedad.

Los coluviones en el área de estudio, de composición mayoritariamente fina, presentan distribución y espesor variable (entre 1 y 20m). El miembro Órganos Superior (QbO2) puede agruparse, al menos en el sector norte, en tres diferentes segmentos, uno de materiales predominantemente finos en el techo seguido de otro esencialmente gravoso y en la base un segmento principalmente fino. El miembro Órganos Inferior (QbO1) mayoritariamente arenoso, no necesitó ser subdividido en segmentos para el modelamiento. Considerando la heterogeneidad de todos los materiales, sus propiedades de resistencia se asignaron en los modelos como promedios que pueden variar según rangos de desviación estándar.

La lluvia como factor detonante de los movimientos en masa tiene acción sobre el área de estudio en dos temporadas al año, la primera entre abril y mayo y la otra entre septiembre y noviembre; en épocas de lluvia muy fuerte, se produce el ascenso del nivel freático y el paso de frentes de infiltración que llevan los materiales menos profundos casi a la saturación facilitando el desarrollo de deslizamientos; este comportamiento fue introducido en los modelos a través de condiciones de frontera. Si bien existen diferentes niveles piezométricos en el sector, el nivel más somero es poco profundo y se ve influenciado por la alta infiltración local.

Los sismos como factor detonante tienen origen en fuentes sismogénicas cercanas y lejanas al sector norte, éstas sitúan al área de estudio en una zona de amenaza sísmica alta con valores de aceleración efectiva para diseño de 0.25, que para estabilidad de taludes equivale a un coeficiente de aceleración seudoestática (KST) de 0.2. Este valor se consideró en el modelo como una carga inercial sísmica horizontal.

Hay concordancia en las zonas inestables encontradas con equilibrio límite y con elementos finitos, las diferencias entre los valores de factor de seguridad encontrados con los dos métodos están dentro de lo esperado excepto en los escenarios con sismo donde la diferencia entre los factores de seguridad mínimos encontrados por cada método difieren considerablemente, esta variación obedece a la geometría del modelo, que en elementos finitos y bajo el escenario con sismo, facilita la falla de materiales en puntos específicos del modelo antes de que se produzca una superficie de falla para el talud, arrojando valores de SRF considerablemente bajos.

Los análisis de estabilidad realizados mediante los dos métodos muestran que las grietas en el sector norte obedecen a movimientos individuales con direcciones y desplazamientos que varían en cada zona, siendo las más críticas las cercanas a la quebrada. Sólo en los escenarios con evento sísmico extremo se presentan superficies de falla lo suficientemente grandes como para considerar la condición del sector norte como producto de un único movimiento.

El abatimiento de los niveles freáticos con subdrenes tendría un impacto positivo en la estabilidad de los taludes y laderas del sector, según lo evaluado en los modelos con elementos finitos para el escenario lluvioso, los factores de seguridad de sitios críticos como el barrio José María Córdoba aumentarían de 0.9 a 1.8, reduciendo los desplazamientos y por tanto los agrietamientos en las viviendas del sector.

Referencias Bibliográficas

- Asociación colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). Reglamento colombiano de construcción sísmo resistente NSR-10. Bogotá: AIS.
- Calle, C. (2017). Consultoría para elaborar el análisis de amenaza sísmica para el EAVR por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga desarrollado por la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Clavijo, J., & Vargas, G. (2017). Consultoría para elaborar la caracterización geológica y geomorfológica para el EAVR por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga desarrollado por la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia: Departamento del Interior de los EE.UU., Servicio Geológico de los EE.UU.
- Rocscience. (Agosto de 2017). Documentación teórica sobre RS2. Obtenido de https://www.roscience.com/help/phase2/webhelp9/theory/Theory_Overview.htm
- Rocscience. (Agosto de 2017). RS2 Tutorials. Obtenido de https://www.roscience.com/help/phase2/webhelp9/tutorials/Phase2_Tutorials.htm

- Rocscience. (Agosto de 2017). Slide Tutorials. Obtenido de https://www.roscience.com/help/slide/webhelp7/tutorials/Slide_Tutorials.htm
- Sánchez, O. (2017). Consultoría para elaborar la caracterización hidrológica e hidrogeológica para el EAVR por remoción en masa del sector norte de Bucaramanga desarrollado por la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá.
- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga: Publicaciones UIS.
- Villamizar, D. (2017). Consultoría para elaborar la caracterización geomorfológica desde el punto de vista geográfico de la escarpa norte de Bucaramanga, para el EAVR por movimientos en masa del sector norte de Bucaramanga desarrollado por la Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.