



**Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Programa de Ingeniería Civil**

Análisis de estabilidad de taludes Barrio El Arroyo

**Jhenyfer Tatiana Garzón Marentes
Brayan Andrey Suárez Suárez
Laura Quintero Escobar**

Bogotá, D.C. Diciembre de 2021





Análisis de estabilidad de taludes Barrio El Progreso

Para optar el énfasis de Ingeniería Civil en Geotecnia

Msc. Ing. Weimar García Melo

Director

Bogotá, D.C. Diciembre de 2021

Agradecimientos

Principalmente a nuestro director el Ingeniero Weimar García, por guiarnos en todo el proceso, su ayuda, paciencia, constancia y dedicación. Formó parte importante en este desarrollo al compartir sus conocimientos profesionales y permitirnos disponer de su tiempo.

Al Ingeniero José Vicente Amórtegui por motivarnos a realizar este proyecto, su coordinación y gestión del convenio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la Alcaldía de Soacha, gracias por apoyar nuestro espíritu investigativo.

Agradecemos de manera especial a Pedro Gabriel Castelblanco quien hizo posible el levantamiento topográfico de la zona de estudio, lo que nos permitió un avance significativo en el desarrollo de nuestro trabajo dirigido.

A mi madre que me apoyó, se preocupó cuando más lo necesité y me dio consejos con el amor y paciencia que siempre la representa, dándome la fuerza para continuar en el proceso.

~Brayan Andrey Suárez Suárez

A Dios, por llevarme más allá de lo que imaginé y soñé acompañándome siempre durante el proceso. A mi madre, por inspirarme con su ejemplo, a mi padre, mis hermanas y demás familiares por su apoyo incondicional.

~J. Tatiana Garzón Marentes

A mi familia y a Dios, por acompañarme durante el proceso y apoyarme de manera incondicional e impulsarme a seguir adelante.

~Laura Quintero Escobar

Índice general

1.	Introducción	10
2.	Objetivos	11
3.	Localización de zona de estudio.....	12
4.	Características generales de la zona de estudio:.....	13
4.1.	Antecedentes:	13
4.2.	Clima	14
4.4.	Amenaza por remoción de masa	15
4.5.	Geología	17
4.6.	Geomorfología	20
5.	Análisis multitemporal:.....	21
	Análisis multitemporal con herramienta <i>Google Earth</i>	26
6.	Exploración en campo	32
7.	Levantamiento fotogramétrico.	38
8.	Descripción del problema y posibles causas	39
9.	Ensayos de laboratorio	40
9.1.	Ensayos de laboratorios previos	40
9.2.	Ensayos de laboratorio año 2021	40
8.2.3.	Propiedades físicas:.....	40
8.2.4.	Propiedades mecánicas	44
10.	Modelo geológico geotécnico	45
11.	Análisis de estabilidad.....	50
	Condición actual	50
	Planteamiento de obras	52
12.	Conclusiones y recomendaciones.....	56
13.	Referencias Bibliográficas.....	57
	 Anexos.....	 58
	Anexo 1-Resultados ensayos de laboratorio previos.....	58
	Resultados ensayo de corte directo	62
	Anexo 2 – Análisis retrospectivo.....	63
	Anexo 3– Análisis de estabilidad actual.....	66
	Anexo 4 – Obras de estabilización	78

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones de fotografías aéreas. Fuente: IGAC	21
Tabla 2-A Resumen análisis multitemporal. Fuente: Propia.....	24
Tabla 3-B Resumen análisis multitemporal. Fuente: Propia.....	25
Tabla 4-C Resumen análisis multitemporal. Fuente: Propia.....	26
Tabla 5. Propiedades físicas obtenidas en el laboratorio. Fuente propia	41
Tabla 6. Descripción de suelos. Fuente: INVIAS 102	42
Tabla 7. Resultados compresión inconfiada. Fuente: Propia.	44
Tabla 8. Resultados corte directo. Fuente: Propia.....	45
Tabla 9. Parámetros iniciales para el planteamiento del modelo geotécnico. Fuente: Propia.....	46
Tabla 10. Parámetros de los estratos establecidos realizado el análisis retrospectivo. Fuente: Propia.	47
Tabla 11. Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad con las diferentes situaciones planteadas. Fuente: Propia.	50
Tabla 12. FS obtenidos en la modelación de la alternativa 1. Fuente: Propia.....	53
Tabla 13. FS obtenidos en la modelación de la alternativa 2. Fuente: Propia.....	53
Tabla 14. Factores de seguridad obtenidos con la conformación de las terrazas recomendadas. Fuente: Propia.	55
Tabla 15. Factores de seguridad obtenidos con la conformación de las terrazas recomendadas en condiciones pseudo-estáticas. Fuente: Propia.	55
Tabla 16. Resultados para el sondeo 1. Fuente: Propia.....	58
Tabla 17. Resultados para el sondeo 2. Fuente: Propia.....	58
Tabla 18. Resultados para el sondeo 3. Fuente: Propia.....	58
Tabla 19. Resultados para el sondeo 4. Fuente: Propia.....	59
Tabla 20. Resultados para deposito coluvial Fuente: Propia	60
Tabla 21. Resultados para Relleno Antrópico Fuente: Propia	61
Tabla 22. Resultados corte directo. Fuente: Propia.....	62
Tabla 23. Tabla resultante del análisis de estabilidad. Fuente: Propia.....	77
Tabla 24. Factores de seguridad críticos para cada perfil en las alternativas planteadas. Fuente: Propia.	81

Índice de figuras

Ilustración 1. Ubicación general Soacha.....	12
<i>Ilustración 2. Vista perfil talud de estudio. Fuente: Propia.</i>	13
Ilustración 3. Vista planta del talud en estudio. Fuente: levantamiento topográfico	13
Ilustración 4. Temperaturas máximas y mínimas durante el año municipio de Soacha. Fuente: Weather Spark.	14
Ilustración 5. Humedad histórica anual. Fuente: Weather atlas.	14
Ilustración 6. Histograma de Soacha. Fuente: Climate Data-Org.	15
Ilustración 7. Mapa de Amenaza de remoción en masa. Fuente: SIG-OT.	16
Ilustración 8. Amenaza de remoción de masa. Fuente: SIG-OT.....	16
Ilustración 10 . Vuelo: R-1153-0250, Escala: 1:11200, Año: 1990. Fuente: IGAC. Descripción: Actividades de cantera en la zona de estudio con formación de terrazas; caminos provisionales en dirección de la cantera. Drenajes naturales provenientes del norte.....	22
Ilustración 11 . Fotografía: vuelo: R-1183-0020, Escala: 1:14700, Año: 1992. Fuente: IGAC. Descripción: desaparición de las terrazas en la zona de cantera debido al avance en la extracción del material, por esta razón, algunos caminos han desaparecido y se han conformado nuevas rutas provisionales.	22
Ilustración 12 . Fotografía: vuelo: SAV-415-0040, Escala: 1:21000, Año: 1998. . Fuente: IGAC. Descripción: Cese de la actividad de extracción de materiales, como posible resultado de dicha actividad se puede observar un sistema de terrazas con escarpes profundos. También se observa un asentamiento poblacional principalmente en la parte alta (derecha) de las terrazas con algunas viviendas en la parte baja.....	23
Ilustración 13. Fotografía: vuelo: C-2717-0183, Escala: 1:21000, Año: 2004 . Fuente: IGAC. Descripción: Aumento significativo en la construcción de viviendas en la parte alta y baja del talud. El sistema de terrazas sufrió una modificación en donde su pendiente ha sido suavizada, es posible que se haya rellenado la zona de terrazas con este fin. El drenaje natural cercano a la zona de estudio muestra un aumento en su caudal posiblemente debido a los vertimientos de aguas servidas provenientes de las viviendas localizadas en las partes altas.....	23
Ilustración 14. Fotografía: 110010002227112009-1965. Año 2009. Fuente: IGAC. Descripción: en naranja: Flujo de detritos con depósitos en la parte baja del talud. La zona escarpada presenta grietas con profundidades altas.....	24
Ilustración 15, 2001. Fuente: Google Earth. Descripción Se evidencian dos terrazas localizadas entre la parte alta y baja del talud, posiblemente construidas una vez finalizada la extracción de material con el fin de estabilizar la zona de alta pendiente.....	26
Ilustración 16 , 2009. Fuente: Google Earth. Descripción En amarillo: cambio en el escarpe, aumento de su longitud horizontal, presenta mayor definición respecto al año 2001. En Marrón: retrogresión del escarpe en el sentido de la parte alta del talud. Hacia la parte alta al norte del talud, en límite con la vía que delimita las viviendas, se observan nuevos escarpes o avance de los escarpes señalados en el año 2001, con flujo de detritos en dirección de las viviendas de la parte baja. Se observa la construcción de una nueva vivienda en la parte cercana al afloramiento rocoso. Magenta: viviendas 2001, Blanco: escarpes 2001	27
Ilustración 17 , febrero 2012. Fuente: Google Earth. Descripción Color naranja: el escarpe ubicado al norte del talud muestra una retrogresión significativa (señalado en el círculo blanco). Se evidencia la	

desaparición de las terrazas conformadas debido al deslizamiento, generando una pendiente relativamente constante. Color amarillo: las viviendas ubicadas en la parte baja del talud, al noroccidente, fueron cubiertas por el material deslizado y, al sur y norte, probablemente fueron afectadas por la retrogresión del escarpe. 27

Ilustración 18 , octubre 2012. Fuente: Google Earth. Descripción Color púrpura: Hacia la parte noroccidental del talud se presenta un avance en los depósitos de material deslizado, afectando a las viviendas de la siguiente cuadra. Color negro: se observa un avance retrogresivo en el escarpe norte, ocurrido en menos de 8 meses. Asimismo, es posible observar una disminución en el número de viviendas construidas en la parte alta del talud, en el norte. 28

Ilustración 19 ,2015. Fuente: Google Earth. Descripción: Color agua marina: escarpe de avance retrogresivo en la parte alta del talud. 28

Ilustración 20. Enero 2016. Fuente: Google Earth. Descripción Color purpura: reasentamiento de viviendas en la parte baja del talud, los escarpes no presentan cambios considerables 29

Ilustración 21 , noviembre de 2016. Fuente: Google Earth. Sombreado: Construcción de nuevas viviendas en las partes alta y baja del talud, en la parte alta las construcciones señaladas se encuentran cercanas a los escarpes en retrogresión. 29

Ilustración 22 . Noviembre 2016. Fuente: Google Earth. 30

Ilustración 23, 2018. Fuente: Google Earth. Los escarpes delimitados en 2016 no presentan avance, es probable que durante este tiempo los movimientos en masa hayan estado inactivos ya que se observa construcción de viviendas en la parte baja, repoblando la zona de antiguo depósito de detritos y en la parte alta, muy próximo a los escarpes principales 30

Ilustración 24 ,2019. Fuente: Google Earth. Los escarpes de la parte alta han desaparecido y se ha suavizado la pendiente del talud. Es posible que se haya rellenado la zona escarpada con el fin de “evitar” un avance en la zona de escarpe. Sombreado: Continúa la construcción de nuevas viviendas, próximas a las zonas de escarpe..... 31

Ilustración 25, 2020. Fuente: Google Earth. Descripción: Se observa la reaparición de nuevos escarpes en las zona antiguamente escarpada, posiblemente debido al hundimiento del material de relleno puesto en 2019. Sombreado: Hacia la parte alta, en sentido norte, se construyeron nuevas viviendas cercanas a las zonas escarpadas..... 31

Ilustración 26 . Reconocimiento área de estudio 02-09-2021. Fuente: Propia..... 32

Ilustración 27. Grietas de tracción identificadas en terreno 02-07-2021 Fuente: Concepto barrio el Progreso. 33

Ilustración 28. Vista general deslizamiento barrio el Progreso. Fuente: Propia 33

Ilustración 29. Ubicación trincheras Barrio el Progreso. Fuente: Google Earth. 34

Ilustración 30. Exploración de la trinchera 1. Fuente: Propia. 34

Ilustración 31. Puntos de extracción de material trinchera 2. Fuente: Propia. 35

Ilustración 32. Materiales observados trinchera 2. Fuente: Propia 36

Ilustración 33. Descripción de materiales presentes en la trinchera 2. Fuente propia..... 36

Ilustración 34. Ubicación trinchera 3. Fuente: Propia..... 37

Ilustración 35. Ubicación trinchera 4. Fuente: Propia..... 38

Ilustración 36. Materiales observados trinchera 4. Fuente:Propia. 38

Ilustración 37. Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: Propia. 41

Ilustración 38. Humedad vs Profundidad. Fuente: Propia 42

Ilustración 39. Límite líquido VS Profundidad. Fuente: Propia 43

Ilustración 40. Límite plástico vs profundidad. Fuente: Propia. 43

Ilustración 41. Índice plástico vs profundidad. Fuente: Propia..... 44

Ilustración 42.Gráficas ensayo de corte directo. Fuente: Propia..... 45

Ilustración 43 . Ubicación de los perfiles en planta. Fuente: Google Earth. 47

Ilustración 44. Modelo geológico del perfil 1 generado con la topografía del año 2013.....	48
Ilustración 45. Modelo geológico del perfil 2 generado con la topografía del año 2013. Fuente: Propia	48
Ilustración 46. Modelo geológico del perfil 3 generado con la topografía del año 2013. Fuente: Propia	48
Ilustración 47. Modelo geológico del perfil 4 generado con la topografía del año 2013. Fuente: Propia	49
Ilustración 48. Modelo geológico actual del perfil 1. Fuente: Propia	49
Ilustración 49. Modelo geológico actual del perfil 2. Fuente: Propia	49
Ilustración 50. Modelo geológico actual del perfil 3, Fuente: Propia	50
Ilustración 51. Modelo geológico actual del perfil 4. Fuente: Propia.	50
Ilustración 52. Coeficientes Fa establecidos en la NSR-10. Fuente: Capítulo A NSR-10.....	51
Ilustración 53. Valores de KST establecidos en la norma. Fuente: Capítulo H NSR-10.....	52
Ilustración 54. Obras de estabilización en el perfil 2. Fuente: Propia.....	54
Ilustración 55. Obras de estabilización en el perfil 3. Fuente: Propia.....	54
Ilustración 56. Obras de estabilización en el perfil 4. Fuente: Propia.....	55
Ilustración 57. Carta de plasticidad para Areniscas de la formación Guaduas. Fuente: Propia	59
Ilustración 58. Carta de plasticidad para Arcillolitas de la formación Guaduas. Fuente: Propia.....	60
Ilustración 59. Carta de plasticidad para Depósitos coluviales. Fuente: Propia.....	61
Ilustración 60. Carta de plasticidad para Rellenos Antrópicos. Fuente: Propia	62
Ilustración 61. Resultados corte directo. Fuente: Propia.....	62
Ilustración 62. Parámetros geomecánicos iniciales. Fuente: Propia.	63
Ilustración 63. Superficies de falla con FS menores a 1 en el perfil 1. Fuente: Propia.....	63
Ilustración 64. Superficies de falla con FS menores a 1 en el perfil 2. Fuente: Propia.....	64
Ilustración 65. Superficies de falla con FS menores a 1 en el perfil 3. Fuente: Propia.....	64
Ilustración 66. Superficies de falla con FS menores a 1 en el perfil 4. Fuente: Propia.....	65
Ilustración 67. Parámetros obtenidos al realizar el análisis retrospectivo. Fuente: Propia.	65
Ilustración 68. Perfil 1 con nivel freático crítico a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	67
Ilustración 69. Perfil 1 con nivel freático alto a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	68
Ilustración 70. Perfil 1 con nivel freático bajo y grietas secas de hasta 4 m. Fuente: Propia.....	69
Ilustración 71. Perfil 2 con nivel freático bajo y grietas secas de hasta 4 m. Fuente: Propia.....	69
Ilustración 72. Perfil 2 con nivel freático crítico a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	70
Ilustración 73. Perfil 2 con nivel freático alto a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	71
Ilustración 74. Perfil 3 con nivel freático crítico a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con	

grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	72
Ilustración 75. Perfil 3 con nivel freático alto a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	73
Ilustración 76. Perfil 3 con nivel freático bajo y grietas secas de hasta 4 m. Fuente: Propia.....	74
Ilustración 77. Perfil 4 con nivel freático bajo y grietas secas de hasta 4 m. Fuente: Propia.....	74
Ilustración 78. Perfil 4 con nivel freático crítico a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	75
Ilustración 79. Perfil 4 con nivel freático alto a) sin contemplar grietas. b) con grietas saturadas de 1.8 a 2 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. c) con grietas secas de 1.8 a 2 m. d) con grietas saturadas de hasta 4 m y superficies de falla con factores de seguridad menores a 1. e) con grietas secas de hasta 4m. Fuente: Propia.	76
Ilustración 80. Modelación de la alternativa 1 en el perfil 1 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	78
Ilustración 81. Modelación de la alternativa 1 en el perfil 2 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	79
Ilustración 82. Modelación de la alternativa 1 en el perfil 3 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	79
Ilustración 83. Modelación de la alternativa 1 en el perfil 4 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	79
Ilustración 84. Modelación de la alternativa 2 en el perfil 1 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	80
Ilustración 85. Modelación de la alternativa 2 en el perfil 2 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	80
Ilustración 86. Modelación de la alternativa 1 en el perfil 3 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	81
Ilustración 87. Modelación de la alternativa 2 en el perfil 4 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	81
Ilustración 88. Modelación de la alternativa 3 en el perfil 2 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	82
Ilustración 89. Modelación de la alternativa 3 en el perfil 3 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	83
Ilustración 90. Modelación de la alternativa 3 en el perfil 4 con y sin aplicación de cargas y superficies de falla con $FS_{\text{crítico}} < FS < 2$. Fuente: Propia.....	83
Ilustración 91. Modelación de la alternativa 3 en situación pseudo-estática en el perfil 2 con y sin aplicación de cargas. Fuente: Propia.	84
Ilustración 92. Modelación de la alternativa 3 en situación pseudo-estática en el perfil 3 con y sin aplicación de cargas. Fuente: Propia.....	84
Ilustración 93. Modelación de la alternativa 3 en situación pseudo-estática en el perfil 4 con y sin aplicación de cargas. Fuente: Propia.....	85

1. Introducción

En el estudio de estabilidad de taludes se busca integrar diferentes conocimientos como la geología, hidrología y geotecnia de manera que sea posible identificar distintos factores causantes de los procesos de remoción en masa. Lo anterior se logra analizando las condiciones del terreno, los procesos geomorfológicos y los procesos físicos que se desarrollan en el área de estudio; también es importante caracterizar el suelo que conforma el talud o la ladera, y establecer el tratamiento correctivo necesario para mitigar el riesgo.

El presente documento muestra los resultados obtenidos del estudio geotécnico, complementado con modelos geológico-geotécnicos previos, realizado en el talud deslizado en el Barrio el Arroyo del municipio de Soacha, Cundinamarca. En este talud, por medio de información previa, fue posible identificar el proceso de remoción en masa y su evolución en el tiempo, y los distintos factores que llevaron al proceso de inestabilidad actual. Asimismo, mediante actividades de reconocimiento de campo e investigación del subsuelo, a través de su exploración (con ayuda de apiques y trincheras para la extracción de muestras alteradas e inalteradas), ensayos de laboratorio, realizados por el laboratorio de geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería para la identificación de los materiales que conforman el suelo y la cuantificación de sus características físico-mecánicas, fue posible elaborar un modelo geológico-geotécnico y plantear de obras estabilizantes que permitan mitigar el riesgo al cual se ve enfrentada la comunidad que habita la zona de estudio.

2. Objetivos

Objetivo principal:

Plantear y diseñar obras de mitigación de procesos de inestabilidad de laderas en el barrio El Arroyo

Objetivos específicos:

- Efectuar visitas de campo al barrio El Arroyo para analizar la zona y complementar los datos de levantamiento topográfico suministrado por la Alcaldía Municipal de Soacha.
- Ejecutar la caracterización del subsuelo, mediante la extracción de muestras y la realización de ensayos necesarios para el análisis de estabilidad del talud.
- Diseñar alternativas y obras de mitigación o estabilización que elimine el riesgo al que se ve enfrentada la comunidad.

3. Localización de zona de estudio

El municipio de Soacha Cundinamarca limita por el norte con el municipio de San Antonio de Tequendama del departamento de Cundinamarca y las localidades de Bosa, Sumapaz y Ciudad Bolívar del Distrito capital; por el sur con los municipios de Sibaté y Silvania; por el oriente con las localidades de Bosa y Ciudad Bolívar y por el Occidente con el Salto de Tequendama y los municipios de Viotá y Mesitas del Colegio.

El área de estudio se localiza en la zona urbana llamada Barrio El Progreso la cual pertenece a la comuna 4 “Altos de Cazucá” del municipio de Soacha, El talud tiene como coordenadas de inicio 4°34'28”N 74°11'16”O, en la ilustración 1 se observa la ubicación general de Soacha y en la ilustración 2 y 3 se observa la ubicación del sitio.



Ilustración 1. Ubicación general Soacha



Ilustración 2. Vista perfil talud de estudio. Fuente: Propia.



Ilustración 3. Vista planta del talud en estudio. Fuente: levantamiento topográfico

4. Características generales de la zona de estudio:

4.1. Antecedentes:

Tal y como se mencionó anteriormente, la zona de estudio se encuentra ubicada en la Comuna 4, Altos de Cazucá, en lugares de antiguas canteras; como consecuencia de la explotación de agregados pétreos y rellenos poco técnicos y ligado a diversos factores como problemas de drenaje en las vías, las cuales descargan directamente al talud causando infiltraciones, y al manejo de las aguas residuales, se han presentado constantes deslizamientos. Esta condición permite determinar la inhabilitación del terreno,

lo cual se ha traducido en procesos de reubicación de sus habitantes. Sin embargo, en los últimos años la zona ha sido habitada nuevamente de manera ilegal a pesar de los problemas de inestabilidad existentes.

4.2. Clima

El municipio de Soacha se caracteriza por presentar veranos cortos y nublados, y los inviernos son cortos y frescos. Durante el transcurso del año las temperaturas varían entre 7°C a 19°C. En la ilustración 4 se muestra un histórico de las temperaturas de Soacha en un año.

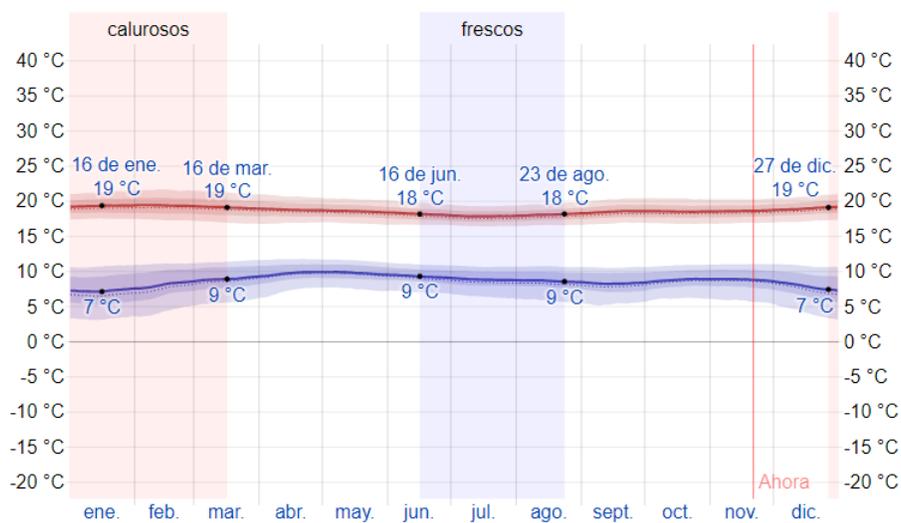


Ilustración 4. Temperaturas máximas y mínimas durante el año municipio de Soacha. Fuente: Weather Spark.

La humedad promedio anual de Soacha es de 81%, en la ilustración 5 se observa las humedades históricas anuales.

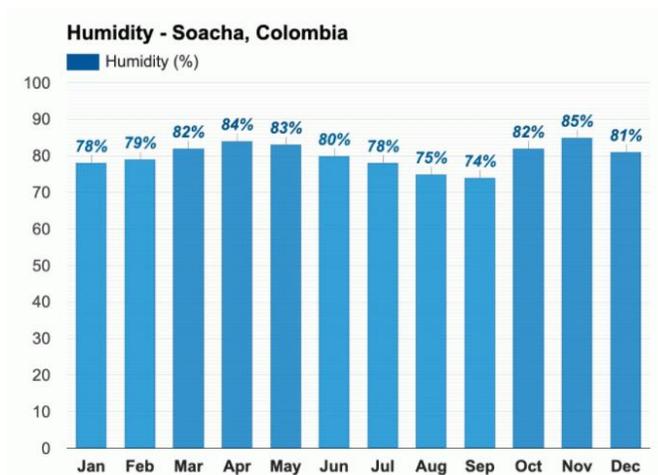


Ilustración 5. Humedad histórica anual. Fuente: Weather atlas.

4.3. Precipitación y días lluviosos.

De acuerdo con el histograma de precipitaciones de Soacha, ver la Ilustración 6, la precipitación tiene un comportamiento bimodal, con periodos un poco más lluviosos entre febrero y mayo, y entre octubre y noviembre. La diferencia en la precipitación mensual entre el mes más seco y el mes más lluvioso es de 250 mm. En agosto se da la precipitación mínima (38 mm) y la máxima (288 mm) se presenta en el mes de noviembre. Los días lluviosos de esos meses son 5 y 19, respectivamente.

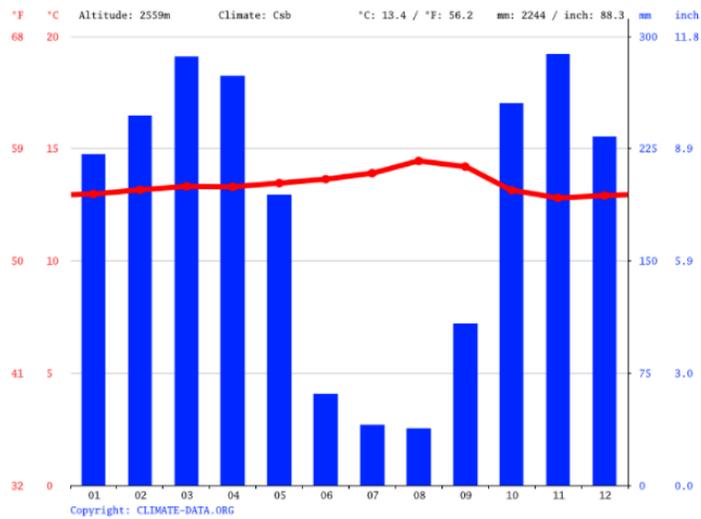


Ilustración 6. Histograma de Soacha. Fuente: Climate Data-Org.

4.4. Amenaza por remoción de masa

Con ayuda del Geoportal de la plataforma SIG-OT Colombia, se ubicó el polígono de estudio para observar en qué zona de amenaza se encuentra el Talud, en las ilustraciones 7 y 8 se muestra la clasificación del sitio en estudio de acuerdo a su grado de amenaza por procesos de remoción en masa.



Ilustración 7. Mapa de Amenaza de remoción en masa. Fuente: SIG-OT.



Ilustración 8. Amenaza de remoción de masa. Fuente: SIG-OT

Como se puede observar en la ilustración, la zona de estudio se encuentra en un lugar de alta probabilidad de remoción en masa, lo que corresponde a áreas montañosas de pendiente alta, con rocas meteorizadas, alta fragmentación por fallas geológicas, alta precipitación y ocurrencia de procesos de reptación, deslizamientos y flujos.

4.5. Geología

4.5.1. Geología regional

El municipio de Soacha se encuentra ubicado en la Cordillera Oriental, en el suroccidente del altiplano denominado Sabana de Bogotá, cuyo origen fue definido como superficie de relleno de un gran lago Andino.

Debido a esta condición de origen, la sabana de Bogotá presenta como sustento geológico una serie de estratos sedimentarios depositados en el tiempo, con espesores que oscilan entre 550 y 600 m. De acuerdo con INGEOMINAS, en el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades que van desde cretácico hasta el terciario, cubiertas por espesos depósitos del cuaternario.

Estas rocas presentan relaciones estructurales complejas, con presencia de fallas regionales de cabalgamiento y plegamientos anticlinales y sinclinales.

4.5.2. Litoestratigráfica

De acuerdo con estudios realizados por INGEOMINAS, la era Cretácica está representada por formaciones como lo son Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Areniscas de Labor y Tierna, estas tres últimas incluidas en el Grupo Guadalupe; al Terciario corresponde la Formación Guaduas, y los sedimentos fluvio-lacustres, conos de derrubio y aluviales, representan los depósitos cuaternarios o recientes, que se ven complementados por la presencia de depósitos de tipo antrópico, importantes en la incidencia de movimientos en masa. A continuación, se describirán las formaciones presentes en el municipio:

4.5.2.1. Formación Chipaque

Esta unidad aflora en el sector sur de los cerros adyacentes al municipio de Soacha, conforma el núcleo anticlinal de Soacha, esta unidad está cubierta prácticamente por depósitos cuaternarios de origen coluvial y por vegetación.

La unidad está constituida por estratos lodolíticos de color gris oscuro a pardo por meteorización, relativamente duros, los cuales alternan con limolita gris y arenita cuarzosa, en bancos con espesores delgados a gruesos. El espesor total para la zona ha sido estimado en unos 400 metros.

4.5.2.2. Grupo Guadalupe

Este grupo conforma la parte alta de los cerros orientales y se refiere a las areniscas cretáceas presentes en ese sector, posteriormente otros autores han hecho referencia a la sucesión que ha sido considerada de edad *Coniacino-Maastrichtiano*.

4.5.2.3. Formación Arenisca Dura

Esta unidad constituye la base del Grupo Guadalupe y se caracteriza por originar crestas y escarpes abruptos con pendientes fuertes. Es reconocida principalmente sobre los cerros prominentes que constituyen la parte montañosa al Sur y Sureste de la cabecera municipal de Soacha, donde conforma parte de los núcleos de los Anticlinales de Cheba y Soacha.

4.5.2.4. Formación Plaeners

La unidad está constituida por lodolitas silíceas y liditas, de color gris pardo, en general duras, estratificadas en capas muy delgadas y por movimientos geotécnicos han generado múltiples plegamientos a escala pequeña.

4.5.2.5. Formación arenisca de Labor

Está constituida de arenita de grano medio a fino cuarzosa, color amarillento hasta pardo y blanco. Hacia la base consta de alternancia de lodolita parda a gris, con limolita y arenita amarillenta de grano fino, dura, en bancos gruesos; hacia la parte superior se encuentra el dominio de arenita de grano medio a fino, con intercalaciones de lodolita silícea y arcillolitas, hacia el techo se tienen arenitas de cuarzo de grano grueso a medio subanguloso a subredondeado, localmente fino, color blanco amarillento, friable, selección moderada a baja, escasa matriz.

4.5.2.6. Formación de Guaduas

Esta unidad está meteorizada y básicamente constituida por arcillolitas varicoloreadas, distinguiéndose los tonos rojizos, pardo marrón, verde y ocasionalmente gris blancuzco, esta es característica a la presencia ocasional de carbón y capas bituminosas.

4.5.2.7. Formación Tilatá

Estos depósitos no se encuentran consolidados, conformados por arenas, limos arcillosos y cenizas, estas son susceptibles a la acción de agentes de meteorización, evidenciado en la gran cantidad de surcos y cárcavas sobre esta unidad.

4.5.2.8. Depósitos cuaternarios

Corresponden prácticamente a depósitos de coluvión, fluvio-lacustres, aluviales recientes y conos de deyección.

4.5.2.9. Depósitos de Coluvión

Se han desarrollado especialmente con bordes de laderas, originados por desprendimientos de

masas rocosas que sufren transporte corto por gravedad. El espesor de los depósitos es variable con oscilaciones entre pocos centímetros hasta mayores de 10 metros, aunque a veces pueden llegar hasta 30 metros.

4.5.2.10. *Conos de Deyección*

Depósitos formados por acumulación de material proveniente de las partes altas montañosas y transportados por las corrientes y que se distribuyen en el piedemonte, asociados a pendientes suaves. Se componen de gravas y bloques, en matriz areno-arcillosa.

4.5.2.11. *Depósitos fluvio-lacustres*

Estos depósitos por estudios geoelectrónicos se consideran con un espesor variable entre 50 y 150 metros, y se encuentra principalmente en el sector de Terreros-Soacha.

4.5.2.12. *Depósitos Aluviales Recientes*

Son depósitos de composición heterogénea, que se han formado en cauces de los actuales ríos y quebradas. Según la dinámica de depósitos, se acumulan desde arenas y limos, hasta grandes bloques.

4.5.3. *Geología estructural*

En la comuna IV y en sectores cercanos se identifican dos fases deformativas, las cuales se asocian con las zonas de mayor inestabilidad geológica de la zona estudiada. Estas dos fases se describirán a continuación:

4.6.3.1. *Primera fase deformativa*

De tipo compresiva, caracterizada por fallas de cabalgamiento aflorantes en superficie, con materiales brechados de las unidades de lilitas pertenecientes a la Formación Plaeners del Grupo Guadalupe. Dos estructuras mayores de plegamiento relacionados con las fallas de cabalgamiento aflorantes en la comuna IV, la primera estructura, identificada al suroeste, se clasifica como pliegue por propagación y la segunda al sureste como pliegue de flexión de falla.

4.6.3.2. *Segunda fase deformativa*

De tipo transcurrente - transpresiva es caracterizada por estructuras NE que varían entre 70° a 80°, con cinemática dextral y arreglos riedel antitéticos de cinemática sinextral, destacan zonas de tipo extensional con dominio de fallas normales (estructuras de media flor y pull-apart), zonas de tipo compresivo con dominio de fallas inversas (estructuras de media flor) y arreglos de pliegues en

Echelón. Parte del alto grado de diaclasamiento y fracturamiento evaluado en la zona, es de tipo genético a los procesos geológicos, como una respuesta mecánica de los materiales involucrados.

4.6. Geomorfología

El municipio de Soacha hace parte de la geomorfología de la cordillera oriental, es caracterizada por la presencia de eventos compresivos y distensivo, originando pliegues y fallas que se han modelado al relieve existente.

A nivel regional, las geoformas de origen estructural generaron un relieve montañoso dominado principalmente por pendientes estructurales y fallas, cuya expresión está claramente definida por escarpes, facetas, quiebres de pendiente y silletas. En la era Cuaternaria, la resistencia de las capas de roca, principalmente de arenisca, se vio afectada por cambios climáticos acentuados, que modificaron el paisaje, dando lugar al desgaste de las crestas montañosas, suavizándolas y redondeándolas, generando a su vez procesos erosivos y movimientos en masa, los cuales contribuyeron al modelado de la superficie terrestre. En la parte plana, los procesos de erosión pluvial y depositación fluvioacustre, dieron origen a geoformas que ocupan extensas zonas planas.

4.6.1. Geomorfología local

En la zona de estudio la geomorfología está relacionada con procesos morfogenético de tipo estructural/denudativo, fluvial y antropogénico, estas son producto de la compleja evolución tectónica ocurrida durante la era terciaria. Los procesos de erosión y pluvial, con la ocurrencia de movimientos en masa recientes, influenciada por la deforestación, actividad minera, actividad agrícola y urbanización informal. Se destacan tres tipos de morfología:

- 4.6.1.1. Sectores montañosos donde predomina pendientes altas, donde afloran rocas del cretáceo y terciario, estas pertenecen al grupo Guadalupe y a la formación Guaduas, respectivamente, localizadas hacia el Oriente de la zona y algunos cerros aislados al Occidente.
- 4.6.1.2. Zonas suavemente inclinadas a planas, donde se tienen depósitos cuaternarios de distinto origen, pero sobresalen las de origen fluvioacustre, asociadas con la actividad de ríos Bogotá, Soacha y Tunjuelito.
- 4.6.1.3. Zonas asociadas a actividad antrópica sobre el terreno se han generado geoformas recientes, especialmente relacionadas a la actividad minera, sobre la zona montañosas al oriente. También se presentan explanaciones, cuerpos artificiales de agua, canales y rellenos al occidente sobre la zona plana, asociadas con la actividad ganadera y procesos de urbanización.

Los elementos geomorfológicos identificados en la zona de estudio hacen parte de:

- Sierra Homoclinal: Estas tiene origen estructural, con inclinación general de la estratificación hacia el noreste, en dirección a la zona plana de Soacha.

- Ladera de contrapendiente denudada de cuesta denudada: Se localiza en el sector norte de la comuna IV.
- Ladera de contrapendiente de Sierra homoclinal denudada: Sobre la cual se localiza el barrio El Divino Niño y Altos De Florida

5. Análisis multitemporal:

Con el objetivo de analizar las posibles causas y el avance del deslizamiento, se analizaron diferentes fotografías aéreas en el tiempo mediante el uso del software *Qgis*. La tabla que se muestra a continuación resume las características temporales y de vuelo de las fotografías analizadas. Además, como herramienta complementaria se analizaron imágenes satelitales de *Google Earth*.

AÑO	VUELO	ESCALA	SOBRE
2009	110010002227112009-1965	--	--
2004	C-2717-0183	1:21000	S-8786
1998	SAV-415-0040	1:21000	--
1992	R-1183-0020	1:14700	--
1990	R-1153-0250	1:11200	--

Tabla 1. Especificaciones de fotografías aéreas. Fuente: IGAC



Ilustración 9. 2021. Descripción proceso de inestabilidad actual. Fuente: levantamiento topográfico.

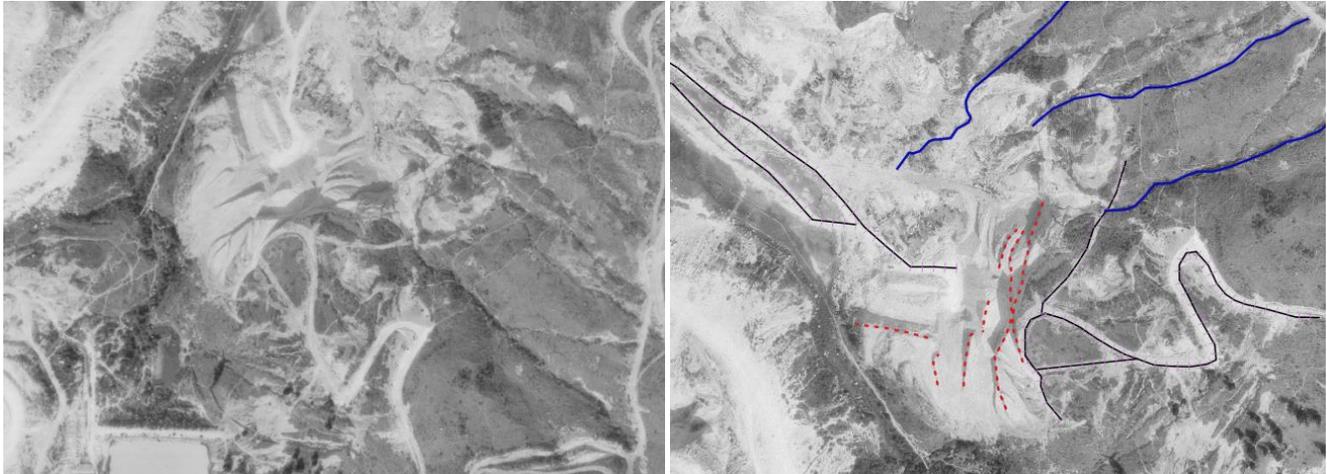


Ilustración 10 9. Vuelo: R-1153-0250, Escala: 1:11200, Año: 1990. Fuente: IGAC. Descripción: Actividades de cantera en la zona de estudio con formación de terrazas; caminos provisionales en dirección de la cantera. Drenajes naturales provenientes del norte.

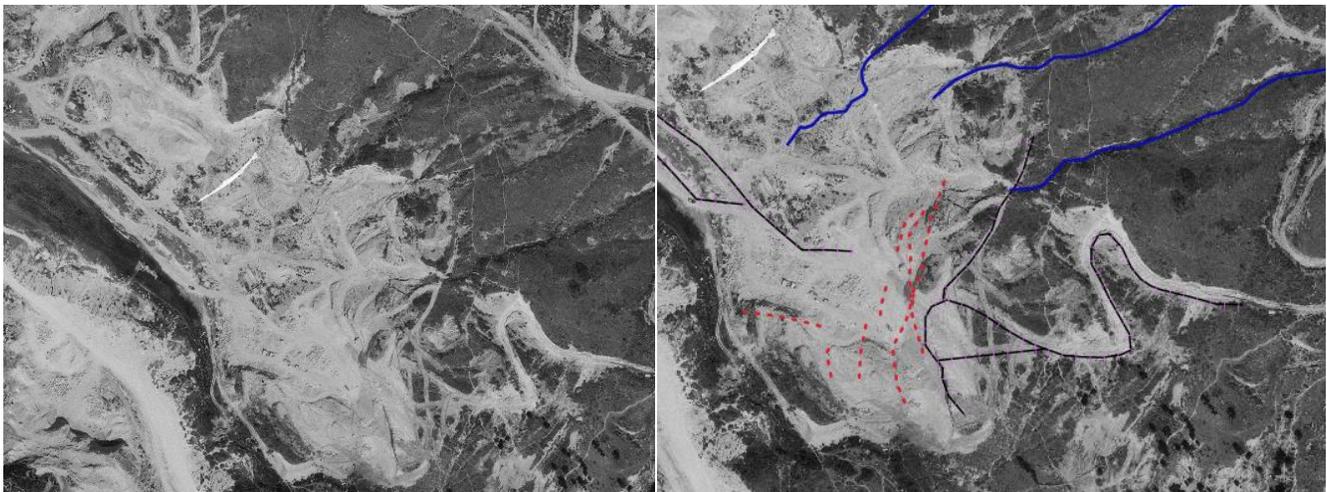


Ilustración 11 10. Fotografía: vuelo: R-1183-0020, Escala: 1:14700, Año: 1992. . Fuente: IGAC. Descripción: desaparición de las terrazas en la zona de cantera debido al avance en la extracción del material, por esta razón, algunos caminos han desaparecido y se han conformado nuevas rutas provisionales.



Ilustración 12 11. Fotografía: vuelo: SAV-415-0040, Escala: 1:21000, Año: 1998. . Fuente: IGAC. Descripción: Cese de la actividad de extracción de materiales, como posible resultado de dicha actividad se puede observar un sistema de terrazas con escarpes profundos. También se observa un asentamiento poblacional principalmente en la parte alta (derecha) de las terrazas con algunas viviendas en la parte baja



Ilustración 1312. Fotografía: vuelo: C-2717-0183, Escala: 1:21000, Año: 2004 . Fuente: IGAC. Descripción: Aumento significativo en la construcción de viviendas en la parte alta y baja del talud. El sistema de terrazas sufrió una modificación en donde su pendiente ha sido suavizada, es posible que se haya rellenado la zona de terrazas con este fin. El drenaje natural cercano a la zona de estudio muestra un aumento en su caudal posiblemente debido a los vertimientos de aguas servidas provenientes de las viviendas localizadas en las partes altas.



Ilustración 1413. Fotografía: 110010002227112009-1965. Año 2009. Fuente: IGAC. Descripción: en naranja: Flujo de detritos con depósitos en la parte baja del talud. La zona escarpada presenta grietas con profundidades altas.

A partir del análisis realizado en las anteriores fotografías se tiene el resumen del proceso de inestabilidad, el comportamiento de los cuerpos de agua, depósitos, vías y población de manera multitemporal, el cual se muestra en la tabla 2.

Año	Escarpes	Cuerpos de agua	Depósitos	Vías	Población
1990	Al año de la fotografía no se observan fenómenos de inestabilidad. La zona de estudio cuenta con cobertura vegetal principalmente compuesta por pastos y algunos árboles pequeños. Hacia el occidente se observan algunas zonas libres de cobertura vegetal	Hacia el sur occidente se observa un embalse de tamaño considerable represado. En la parte norte, es posible observar tres drenajes naturales cuyo afluente proviene de la parte nororiental. Es posible que estos drenajes hayan sido encausados una vez hayan desembocado en la zona de cantera.		Se observa una vía en el suroeste que se dirige a la cantera existente en la época de manera diagonal (ver contorno amarillo). Esta vía a su vez cuenta un desvío el cual rodea el límite de la zona de extracción de materiales (ver contorno verde).	La zona de estudio y su alrededor se observa totalmente inhabitada. Posiblemente debido a la actividad de extracción de materiales

Tabla 2-A Resumen análisis multitemporal. Fuente: Propia

<i>Año</i>	<i>Escarpes</i>	<i>Cuerpos de agua</i>	<i>Depósitos</i>	<i>Vías</i>	<i>Población</i>
1992	La zona de estudio continúa sin fenómenos de inestabilidad. Sin embargo, es posible observar un avance significativo de la extracción de la cantera en sentido occidental. También es posible observar la desaparición de las terrazas que conformaban la cantera, dejando a la vista un afloramiento rocoso.			Se observan nuevas vías hacia el occidente construidas posiblemente de manera provisional para la extracción de los materiales de cantera. Debido al avance en la extracción en el sentido de la zona de estudio, la vía principal disminuyó su trayectoria y la vía curva que rodeaba inicialmente la cantera ha desaparecido.	
1998	Es posible observar pequeños escarpes en la parte noroccidental y en la parte centro occidental. También se observa inactividad en la extracción de material en la cantera ya que el lugar ha sido poblado. En la parte baja del talud se observa mayor afloramiento rocoso en el sentido de avance de la extracción, en comparación con la fotografía analizada en 1992. La cobertura vegetal en la zona es casi nula.	Se puede observar una disminución en el nivel del embalse En sentido sur-norte, es posible que el primer drenaje natural haya sufrido modificaciones en su cauce, puesto que se observa una disminución en su curso debido a la construcción de nuevas viviendas o una disminución en su caudal.		Las vías provisionales direccionadas a la cantera han desaparecido, se han adaptado nuevas vías debido a la población presente	Se observa un asentamiento poblacional considerable en la zona de estudio, así como en sus limitantes, incluida la zona de antigua cantera.
2004	Los posibles escarpes o roca presentes en la parte noroccidental han desaparecido, esto pudo haber ocurrido por el asentamiento poblacional en dicha zona, haciéndose necesaria la nivelación del lugar para la adecuación del terreno y perfilación de la zona de alta pendiente que conformaba el afloramiento rocoso.	Se reencausa el primer drenaje natural hacia su dirección original, con un aumento significativo en su caudal.		Debido a la conformación de cuadras, se construyeron nuevas vías, incluyendo un camino que rodea la corona del talud.	En la corona del talud se observa una distribución homogénea de viviendas que conforman diferentes cuadras

Tabla 3-B Resumen análisis multitemporal. Fuente: Propia

<i>Año</i>	<i>Escarpes</i>	<i>Cuerpos de agua</i>	<i>Depósitos</i>	<i>Vías</i>	<i>Población</i>
2009	En la corona del talud es posible observar un número considerable de escarpes, seguido de un cambio del nivel en la zona ocasionada por hundimiento del terreno. El afloramiento rocoso presenta grietas con profundidades altas.		En la parte norte de la zona se observa el inicio de un deslizamiento de tipo traslacional con depósitos en la parte baja.		

Tabla 4-C Resumen análisis multitemporal. Fuente: Propia

Análisis multitemporal con herramienta *Google Earth*



Ilustración 1514, 2001. Fuente: Google Earth. Descripción Se evidencian dos terrazas localizadas entre la parte alta y baja del talud, posiblemente construidas una vez finalizada la extracción de material con el fin de estabilizar la zona de alta pendiente.



Ilustración 16 15, 2009. Fuente: Google Earth. Descripción En amarillo: cambio en el escarpe, aumento de su longitud horizontal, presenta mayor definición respecto al año 2001. En Marrón: retrogresión del escarpe en el sentido de la parte alta del talud. Hacia la parte alta al norte del talud, en límite con la vía que delimita las viviendas, se observan nuevos escarpes o avance de los escarpes señalados en el año 2001, con flujo de detritos en dirección de las viviendas de la parte baja. Se observa la construcción de una nueva vivienda en la parte cercana al afloramiento rocoso. Magenta: viviendas 2001, Blanco: escarpes 2001



*Ilustración 17 16, febrero 2012. Fuente: Google Earth. Descripción **Color naranja**: el escarpe ubicado al norte del talud muestra una retrogresión significativa (señalado en el círculo blanco). Se evidencia la desaparición de las terrazas conformadas debido al deslizamiento, generando una pendiente relativamente constante. **Color amarillo**: las viviendas ubicadas en la parte baja del talud, al noroccidente, fueron cubiertas por el material deslizado y, al sur y norte, probablemente fueron afectadas por la retrogresión del escarpe.*



Ilustración 18 17, octubre 2012. Fuente: Google Earth. Descripción **Color púrpura**: Hacia la parte noroccidental del talud se presenta un avance en los depósitos de material deslizado, afectando a las viviendas de la siguiente cuadra. **Color negro**: se observa un avance retrogresivo en el escarpe norte, ocurrido en menos de 8 meses. Asimismo, es posible observar una disminución en el número de viviendas construidas en la parte alta del talud, en el norte.



Ilustración 19 18,2015. Fuente: Google Earth. Descripción: **Color agua marina**: escarpe de avance retrogresivo en la parte alta del talud.



Ilustración 2019. Enero 2016. Fuente: Google Earth. Descripción Color purpura: reasentamiento de viviendas en la parte baja del talud, los escarpes no presentan cambios considerables



Ilustración 21 20, noviembre de 2016. Fuente: Google Earth. Sombreado: Construcción de nuevas viviendas en las partes alta y baja del talud, en la parte alta las construcciones señaladas se encuentran cercanas a los escarpes en retrogresión.



Ilustración 22 21. Noviembre 2016. Fuente: Google Earth.



Ilustración 23, 22 2018. Fuente: Google Earth. Los escarpes delimitados en 2016 no presentan avance, es probable que durante este tiempo los movimientos en masa hayan estado inactivos ya que se observa construcción de viviendas en la parte baja, repoblando la zona de antiguo depósito de detritos y en la parte alta, muy próximo a los escarpes principales



Ilustración 24 23,2019. Fuente: Google Earth. Los escarpes de la parte alta han desaparecido y se ha suavizado la pendiente del talud. Es posible que se haya rellenado la zona escarpada con el fin de “evitar” un avance en la zona de escarpe. Sombreado: Continúa la construcción de nuevas viviendas, próximas a las zonas de escarpe.



Ilustración 2524, 2020. Fuente: Google Earth. Descripción: Se observa la reaparición de nuevos escarpes en las zona antiguamente escarpada, posiblemente debido al hundimiento del material de relleno puesto en 2019. Sombreado: Hacia la parte alta, en sentido norte, se construyeron nuevas viviendas cercanas a las zonas escarpadas.

A partir del anterior análisis se puede determinar que el deslizamiento tiene un comportamiento retrogresivo, el cual se ha desarrollado principalmente en los escarpes cercanos al flanco derecho. En las zonas cercanas al flanco izquierdo no se ha presentado mayor actividad debido al afloramiento rocoso que se encuentra en la parte baja del talud.

6. Exploración en campo

El reconocimiento del área en estudio (ilustración 26) se llevó a cabo el día 2 de septiembre. Durante esta actividad se tuvo conocimiento pleno de la situación resultante tras los diferentes procesos de inestabilidad en la zona y se evidenció un desprendimiento reciente en el flanco izquierdo, así como información descriptiva comentada por los residentes de la zona, lo cual permitió realizar un plan de exploración y obtener muestras necesarias para la clasificación geomecánica en el laboratorio.



Ilustración 26 25. Reconocimiento área de estudio 02-09-2021. Fuente: Propia

En la ilustración 27 se observa cómo el deslizamiento de los bloques avanza, las flechas negras señalan la dirección del movimiento en masa. los habitantes de la zona y el equipo de la unidad de gestión del riesgo de Soacha resaltaron el avance del deslizamiento desde inicios del mes de junio del año 2021. Se adjunta la siguiente fotografía como evidencia.



Ilustración 2726. Grietas de tracción identificadas en terreno 02-07-2021 Fuente: Concepto barrio el Progreso.

El 17 de septiembre, se realizó la exploración de campo en la cual se realizaron 4 trincheras manuales escalonadas de un metro de profundidad en puntos estratégicos de la zona en estudio, con el fin de obtener muestras que permitieran realizar una caracterización físico-mecánica del suelo, así como un análisis de estabilidad, esto mediante la recolección de 2 muestras inalteradas y 3 a 4 muestras alteradas por cada excavación.



Ilustración 2827. Vista general deslizamiento barrio el Progreso. Fuente: Propia

Tal y como se muestra en la ilustración 29, se determinó como puntos principales de exploración el escarpe, el flanco derecho y el cuerpo de la masa deslizada, en los cuales se realizaron las trincheras 1, 2, 3 y 4; con base en esta exploración y la inspección de campo fue posible definir la estratigrafía en el escarpe y la masa en movimiento.



Ilustración 2928. Ubicación trincheras Barrio el Progreso. Fuente: Google Earth.

A continuación, se muestra la caracterización de los materiales por trincheras.

Trinchera 1

Ubicada en las coordenadas $4^{\circ}34'28.65''$ N - $74^{\circ}11'15.35''$ O, identifica el material del deslizamiento que presenciaba en los últimos meses en el bloque de suelo que se puede observar en la ilustración 30, debido al alto grado de fracturación del suelo se dificultó la obtención de la muestra y la construcción de una trinchera escalonada, por lo que se decidió generar un único escalón que permitiera obtener una muestra en bloque inalterada. En este punto se evidenció, además, un gran contenido de material orgánico y residuos sólidos.



Ilustración 3029. Exploración de la trinchera 1. Fuente: Propia.

Trinchera 2

Esta trinchera, ubicada en el flanco derecho del escarpe, en las coordenadas 4°34'29.57" N-74°11'14.91"O es la más representativa de todas y por tanto de las condiciones en el talud, debido a que la exposición del material se da en una pendiente cercana a los bordes facilitando su acceso y la toma de muestras. Se evidenció un suelo superficial (expuesto al aire) bastante seco y de fácil rotura, lo que dificultó las labores de excavación de las trincheras, obligando así a realizar una trinchera escalonada a 3 pasos y 2 sectores, se recogió una muestra inalterada del segundo y tercer escalón.

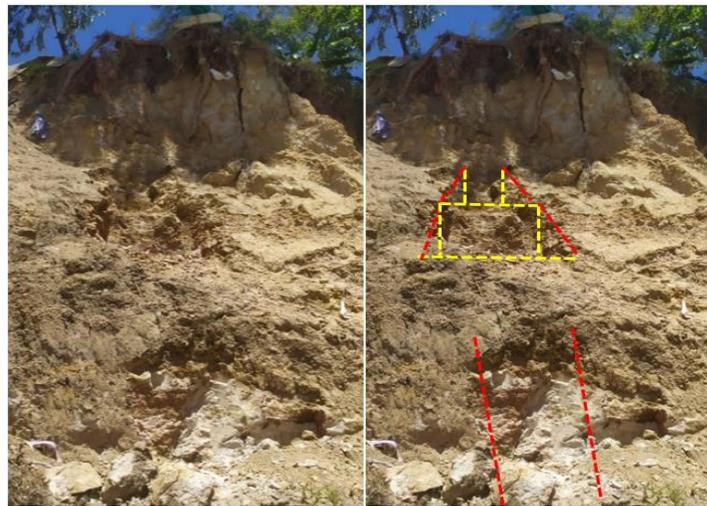


Ilustración 3130. Puntos de extracción de material trinchera 2. Fuente: Propia.

Los dos primeros escalones estaban compuestos por arenas arcillosas de color amarillo y amarillo oscuro (ilustración 32), aunque se estaba a 1.5 m de profundidad respecto al estrato de material orgánico, se evidencia presencia de raíces y desechos antrópicos. Para el tercer escalón se evidenció un suelo de color claro o grisáceo, pero con variaciones similares a los 2 primeros metros, por lo que este escalón compete a un estrato de fluctuación entre una capa de arena y arcilla. También es visible el nivel de fisuración en esta zona, con fisuras verticales de hasta 1.3 m que se producen desde la superficie del talud.



Ilustración 3231. Materiales observados trinchera 2. Fuente: Propia



Ilustración 3332. Descripción de materiales presentes en la trinchera 2. Fuente propia.

En la trinchera 2 es posible observar una variación en los materiales conformada por relleno antrópico (Q_{ra}), el cual abarca restos de roca, desechos de construcción y plásticos, esta primera capa también está conformada por cobertura vegetal y raíces, seguido de esto se observa una capa de arcillolitas con tonalidad gris. Adicional a esto, se puede observar depósito coluvial en la parte central de la formación. Si bien es posible observar una diferencia en los materiales, es importante señalar que el perfil está conformado por intercalaciones de materiales entre arcillolitas y areniscas, los cuales tienen a su vez variaciones de colores entre claros marrones y grises.

Trinchera 3

Aunque se había planteado inicialmente la realización de una trinchera, debido a las condiciones del terreno, se decidió por realizar un apique ubicado en las coordenadas $4^{\circ}34'29.5''N$ ($74^{\circ}11'15.94''O$), en

el cual se encontró arenisca y turba en los primeros centímetros de profundidad, seguido de un estrato de limo arcilloso con un gran contenido de desechos plásticos y material metálico producto de los desechos arrojados en la zona, superados los 40-50 cm de profundidad se evidenció una capa de arcillo-arenosa con un nivel de humedad considerable, comparado a las diferentes muestras recogidos en otros puntos de análisis, lo que dificultó la obtención de una muestra inalterada, esta capa de material arcilloso predominante se extendía en los primeros 70 cm de profundidad.



Ilustración 3433. Ubicación trinchera 3. Fuente: Propia.

Trinchera 4

La disposición del terreno no fue propicia para la construcción de una trinchera ya que en este punto era posible generar un desprendimiento de materiales que podía afectar a la comunidad cercana a la “pata” del deslizamiento, por tal razón se analizó el material próximo por medio de un apique localizado en las coordenadas $4^{\circ}34'29.51''\text{N}$ ($74^{\circ}11'16.46''\text{O}$). La zona elegida está comprendida por pequeños escarpes con grietas verticales y bloques próximos a desprenderse, una capa de material orgánico de alrededor de 20 cm, seguido de material color amarillo y gris claro, evidenciando nuevamente la presencia de areniscas y posiblemente arcillolitas. Nuevamente se evidencia la presencia de desechos plásticos y materiales varios.



Ilustración 3534. Ubicación trinchera 4. Fuente: Propia.

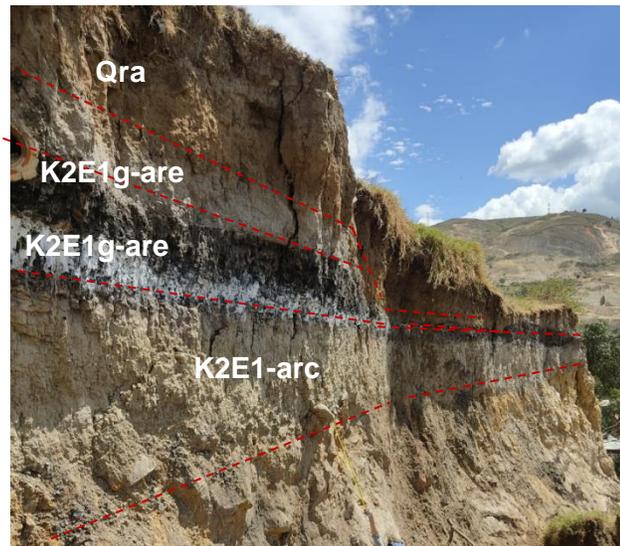


Ilustración 3635. Materiales observados trinchera 4. Fuente: Propia.

En la anterior figura es posible observar la variación en los materiales que conforman el talud en el flanco derecho, en la parte superior se observa un estrato conformado por rellenos antrópicos, seguido de esto se observa una capa de materia orgánica oscura y depósitos antrópicos homogéneos de la antigua cantera.

7. Levantamiento fotogramétrico.

El día 8 de noviembre se llevó a cabo el levantamiento topográfico de la zona de estudio, actividad efectuada por el topógrafo Pedro Gabriel Castelblanco. En esta actividad inicialmente se realizó el trazado del polígono de la zona de estudio por medio del programa Google Earth en formato KMZ. Una vez determinado el polígono, fue necesario establecer un lugar suficientemente alto y alejado de antenas que generaran interferencia, de manera que permitiera lograr una distancia vertical óptima entre el dron y el nivel del terreno. Posteriormente, se estableció el plan de vuelo, en el cual fue determinada la altura de vuelo, puntos de control, la dirección y orden de barrido, el traslape de fotografías entre líneas de vuelo

de manera longitudinal y transversal, cuyo porcentaje variación fluctúa entre el 60 y 90%; asimismo, se estableció el tiempo de vuelo, el cual osciló entre los 20 y 25 minutos.

Durante el vuelo, el dron realizó la captura fotográfica de las líneas de vuelo anteriormente definidas y, mediante el principio de reflexión de ondas, las cuales fueron emitidas por el dron, fue posible establecer la diferencia de alturas entre diferentes puntos, lo que permitió, luego de exportar dicha información, la generación de las curvas de nivel mediante el uso de software especializados. La ilustración 9 y el anexo 5 muestran la ortofoto y la topografía obtenidas, respectivamente.

8. Descripción del problema y posibles causas

Se establecen como posibles causas del proceso de inestabilidad las siguientes:

- Debido al mal encauce de las aguas lluvias y de los vertimientos provenientes de las casas que ocupan la parte alta del talud por las obras de drenaje inconclusas; es posible que se haya generado flujos subterráneos, ocasionando un cambio en la humedad y debilitando los materiales generando colapso de bloques.
- Factores como el clima, representado en las altas temperaturas, ocasionan un cambio acelerado en la humedad, formando grietas en el suelo, el tamaño de dichas grietas aumenta a medida que se acercan a los escarpes, ya que al desconfinarse el suelo puede generar relajación de esfuerzos disminuyendo su resistencia al corte.
- En la parte baja del deslizamiento, agentes externos como la extracción de material en el pie del talud generaron incrementos en los esfuerzos de corte debido a que, como se observa en las fotografías, la pendiente de inclinación de la zona es muy alta.

A partir de las causas descritas se puede determinar el proceso de inestabilidad actual, el cual corresponde a un deslizamiento complejo. En el año 2012, en los documentos suministrados por la Alcaldía de Soacha se evidenció el predominio de un deslizamiento de tipo traslacional. Sin embargo, es posible determinar, a partir de la observación en campo y del análisis multitemporal, un proceso actual en el flanco izquierdo de tipo rotacional, en donde los escarpes han tenido en el tiempo un proceso retrogresivo debido al desprendimiento de bloques generado por el empuje del agua infiltrada en las grietas de desecación y tracción. Hacia la parte baja del talud se tiene un flujo de detritos en dirección de las viviendas ubicadas en dicha zona. De esta forma se define como un deslizamiento complejo (rotacional retrogresivo-flujo de detritos/tierra)

9. Ensayos de laboratorio

9.1. Ensayos de laboratorios previos

Durante el año 2010 Geocing LTDA., llevó a cabo un programa de ensayos de campo y de laboratorio, para esto se efectuaron 4 sondeos, identificados como sondeos S-1 a S-4, con profundidades entre 10.00 y 14.00 m, medidos desde el nivel de terreno en cada punto de sondeo y diez apiques con profundidades entre 1.5 m a 2.0. Es necesario aclarar que la profundidad de los sondeos se limitó por la profundidad de la roca sana

Adicionalmente, se realizaron seis (6) barrenos manuales a percusión identificados como BM-1 a BM6, con profundidades de 3.3 m a 4.3 m respectivamente.

La tabla resumen de los registros de perforación y los resultados de los ensayos de laboratorio se encuentra en el anexo 1, adicionalmente, se encuentra las cartas de plasticidad para cada una de las unidades geológicas presentes en el municipio.

9.2. Ensayos de laboratorio año 2021

Se realizaron ensayos en el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito a las muestras obtenidas en campo (en las cuatro trincheras y los tres puntos de estudio), esto se hizo con el fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo encontrado en la zona para definir el modelo y los parámetros de resistencia para el análisis geotécnico. El informe entregado por el laboratorio de la Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito se encuentra en el Anexo 1.

9.3. Propiedades físicas:

En la siguiente tabla se observa un resumen de resultados de los ensayos de propiedades físicas obtenidos para estos suelos, para obtener la clasificación del suelo se utilizó la carta de plasticidad de Casagrande. Los suelos encontrados en la zona de estudio presentan humedades naturales inferiores al límite plástico, lo cual se traduce en suelos que se comportan como un semisólidos, por lo cual son fáciles de fracturar.

Trinchera	Muestra	Profundidad (m)	Humedad (%)	Peso unitario (kN/m ³)	LL	LP	IP	Granulometría			Clasificación USC
								Gravas (%)	Arenas [%]	Finos [%]	
1	1A	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1B	4.0	19.3	-	42.3	21.7	20.6	1.0	22.0	77.0	CL
2	2A	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2B	3.5	24.2	16.91	63.80	27.90	36.00	0.0	12.0	88.0	CH
2	3B	5.5	12.1	16.93	37.60	18.00	19.70	-	-	-	CL
2	3A	5.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1	0.4	16.0	-	36.70	16.70	20.00	0.0	27.0	73.0	CL
3	2B	0.7	5.7	-	44.80	18.40	26.40	1.0	21.0	78.0	CL
4	1B	0.7	5.1	-	35.3	17.4	18.0	0.0	27.0	73.0	CL
4	2A	0.2	11.0	16.83	34.10	14.80	19.30	0.0	28.0	72.0	CL
POG Escarpe	1	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
POG1 Escarpe	1	5.0	6.0	15.85	34.80	15.70	19.10	0.0	35.00	65.0	CL
POG1 Escarpe	2	0.5	18.1	17.57	55.50	28.50	27.00	0.0	9.00	91.0	CH

Tabla 5. Propiedades físicas obtenidas en el laboratorio. Fuente propia

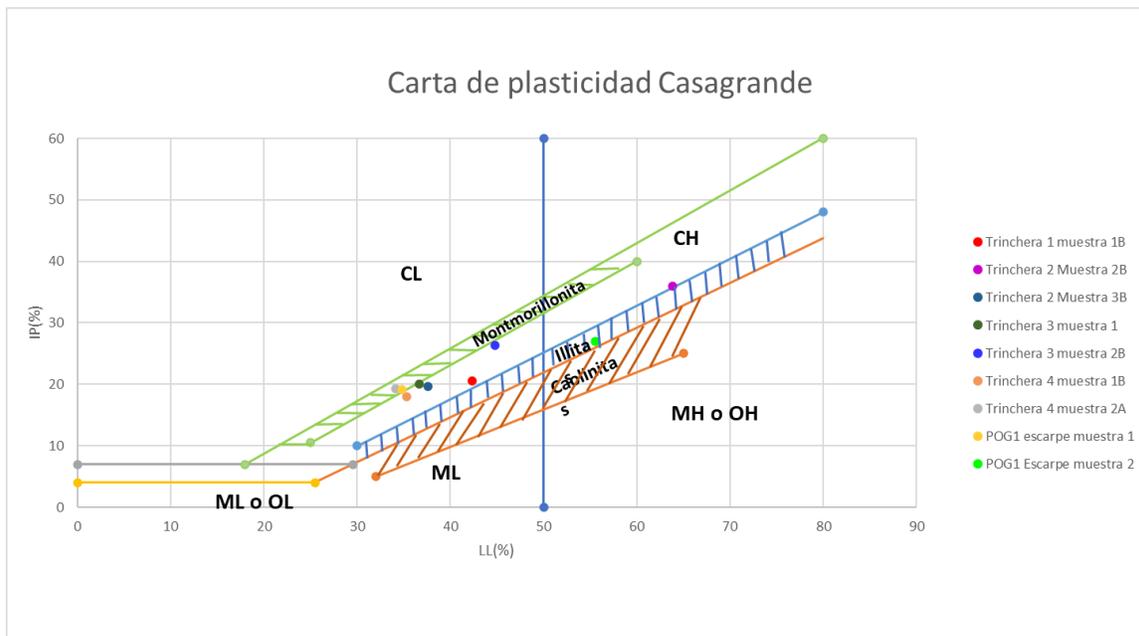


Ilustración 3736. Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: Propia.

Como se puede observar en la ilustración 37, la mayoría de los suelos ensayados son arcillas de baja plasticidad lo que quiere decir que, según el INVIAS (tabla 6), la resistencia es Media a alta

SÍMBOLO DEL SUELO	RESISTENCIA SECA	DILATANCIA	TENACIDAD
ML:	Nula a baja	Lenta a rápida	Baja, no se pueden formar rollitos
CL:	Media a alta	Nula a lenta	Media
MH:	Baja a media	Nula a lenta	Baja a media
CH:	Alta a muy alta	Nula	Alta

Tabla 6. Descripción de suelos. Fuente: INVIAS 102

En la ilustración 38 se puede observar cómo varía la humedad con respecto a la profundidad, y se observa que la humedad mínima está en una profundidad superficial, mientras que la máxima está a 3.5 m.

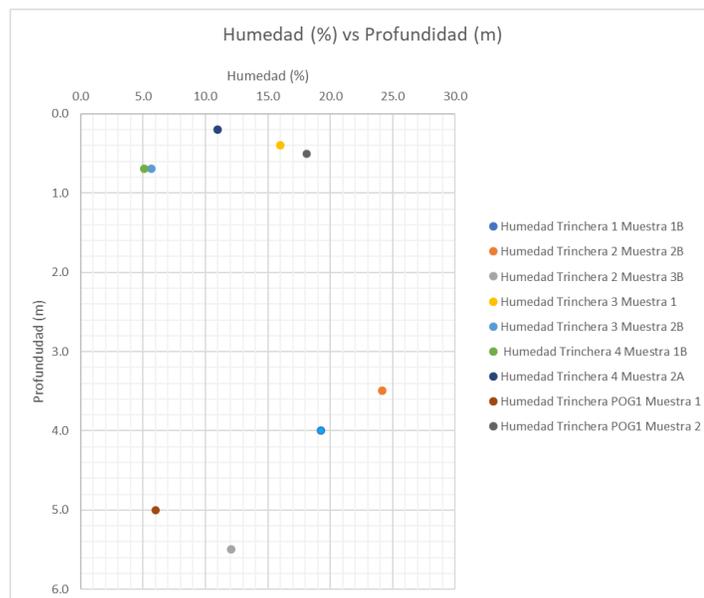


Ilustración 3837. Humedad vs Profundidad. Fuente: Propia

Se observa en la ilustración 38 que tanto el límite líquido, plástico y el índice de plasticidad no tienen un comportamiento lineal con respecto a la profundidad.

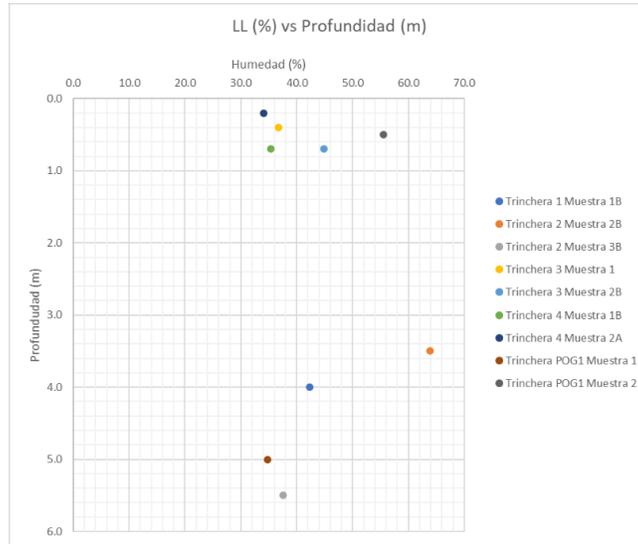


Ilustración 3938. Límite líquido VS Profundidad. Fuente: Propia

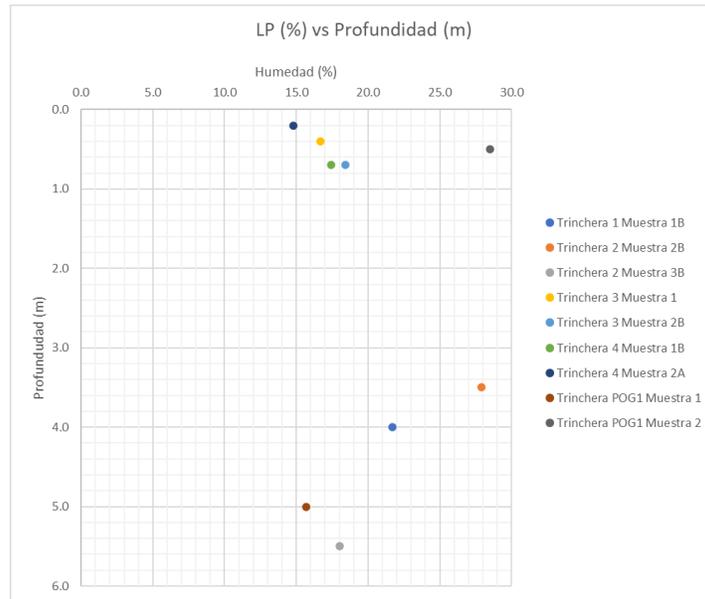


Ilustración 4039. Límite plástico vs profundidad. Fuente: Propia.

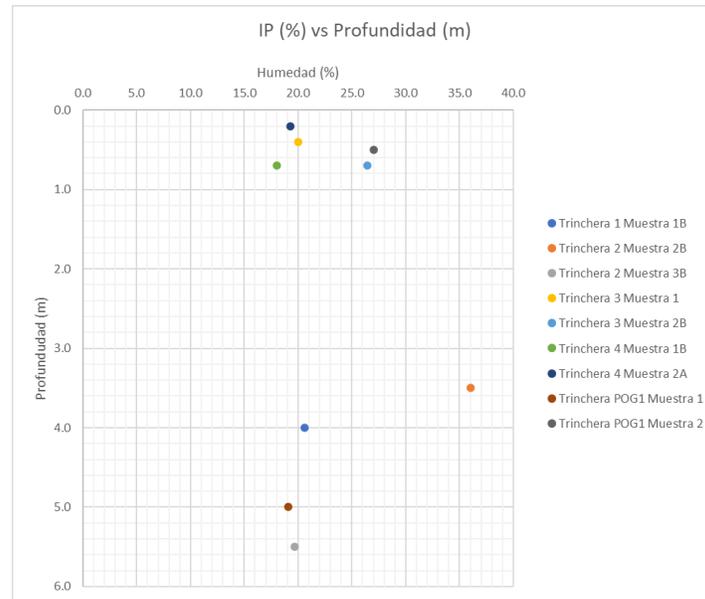


Ilustración 4140. Índice plástico vs profundidad. Fuente: Propia.

9.4. Propiedades mecánicas

9.4.1. Ensayos de compresión inconfínada

Este ensayo se realizó en cinco muestras diferentes, como resumen se obtienen los siguientes resultados:

Trinchera	Muestra	Compresión inconfínada	
1	1A	q_u (kN/m ²)	605.2
2	3B	q_u (kN/m ²)	389.4
4	2A	q_u (kN/m ²)	411.4
POG1	1	q_u (kN/m ²)	371.3
POG1	3	q_u (kN/m ²)	236.5

Tabla 7. Resultados compresión inconfínada. Fuente: Propia.

Como se pueden observar en el informe entregado por el laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito el tipo de falla obtenido es una falla dúctil debido a que la fuerza vertical alcanzo un valor máximo para un determinado nivel de deformación y dicha fuerza se mantuvo constante en tres lecturas consecutivas de la deformación.

9.4.1. Ensayos corte directo

Para encontrar los parámetros de resistencia, el laboratorio realizó tres ensayos de corte directo; el resumen de los resultados obtenidos son los siguientes:

Trinchera	Muestra	ϕ	C (kN/m ²)
1	1	2.7	4.69
4	2A	4.52	3.51
POEG	1	2.9	5.35

Tabla 8. Resultados corte directo. Fuente: Propia.

Las gráficas Esfuerzo normal (σ) vs. Esfuerzo cortante (τ) se resumen a continuación.

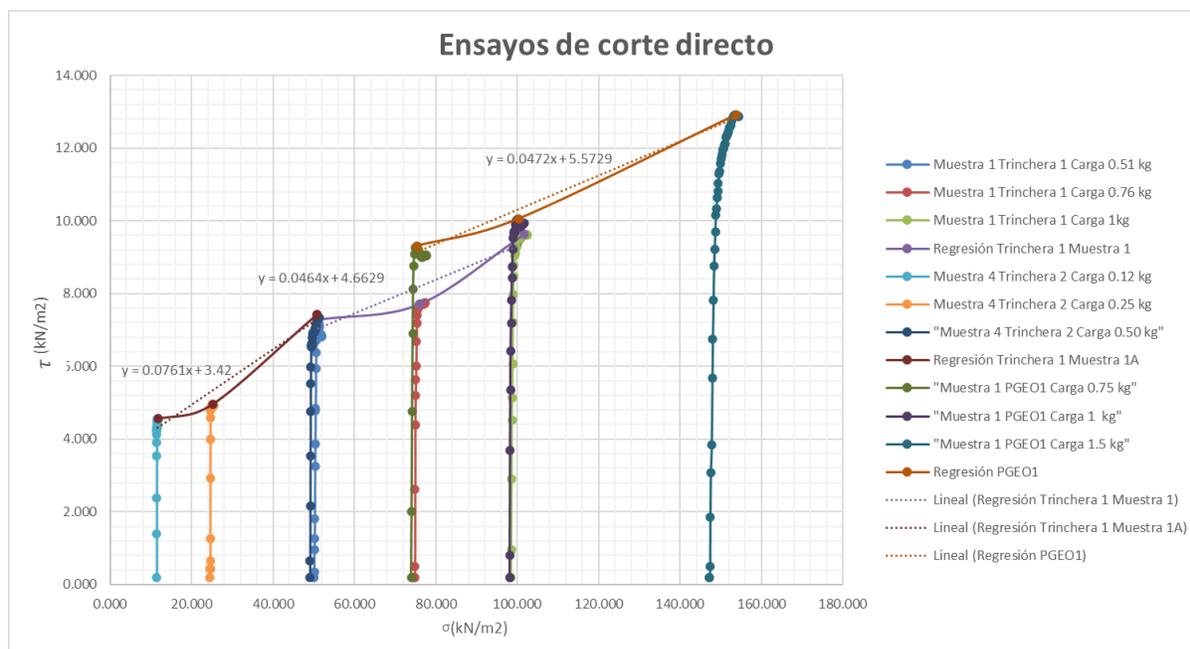


Ilustración 4241. Gráficas ensayo de corte directo. Fuente: Propia.

Se destaca que los valores obtenidos en el laboratorio son muy bajos y no representan las condiciones observadas en campo. Por este motivo, los resultados de ensayos de resistencia no se utilizaron para la modelación de la estabilidad del talud. En el siguiente capítulo se describirán los valores adoptados para generar el modelo de análisis, los cuales se basan en análisis retrospectivos.

10. Modelo geológico geotécnico

Para el modelo geológico geotécnico se tuvieron en consideración varios factores y documentos de interés, teniendo como punto de partida el plano “Mapa geológico” que hace parte de la información suministrada por la Unidad de Gestión del riesgos de Soacha, en el documento titulado *Estudios geotécnicos y definición de obras de estabilidad de las zonas donde se está presentando deslizamiento de los barrios Luis Carlos Galán III sector, El Arroyo - Villa Sandra - Villa Esperanza, El Barreno de la comuna cuatro (4) del municipio de Soacha-Cundinamarca.*

Con las visitas de campo expuestas anteriormente, se redefinió el mapa geológico superficial del sector, categorizando como coluvión al cuerpo del talud que ha presentado o presenta actualmente inestabilidad y delimitando el alcance de este. Además, como se ha mencionado anteriormente, el material de la parte alta está conformado por rellenos, producto de la adaptación para la construcción de viviendas, y depósitos generados por la extracción de material en las antiguas canteras, de tal forma se denota todo este material como un suelo antrópico o de relleno. En el Anexo 5 se presenta el mapa geológico superficial actualizado.

Establecida la geología, se planteó un modelo geotécnico en el que se analizaron los buzamientos de los estratos según lo visto en campo y los buzamientos de las unidades cercanas planteados en el mapa geológico. Tomando 4 perfiles topográficos como referentes para los posteriores análisis y la disposición de los estratos, se hizo la asignación de los parámetros mecánicos necesarios, partiendo de la caracterización realizada en el estudio de estabilidad suministrado y complementando su caracterización con los resultados de laboratorio también incluidos como anexos en dicho documento, de tal forma que se llegó a la asignación de las respectivas propiedades para los siguientes estratos establecidos:

- Relleno 1: Conformar la capa superficial en la parte alta del talud, con un alto contenido de materia orgánica de gran tamaño, como raíces, pasto, etc. material de grano mayormente fino y con alto nivel de fracturación.
- Relleno 2: Con propiedades similares a las del relleno 1, en general la mayoría de su espesor conlleva una menor cantidad de material orgánico, pero puede presentar lineamientos color negro, representantes de arcillolitas con un alto grado de materia orgánica producto de suelos residuales.
- Relleno 3: Conformar el estrato del talud hasta donde es visible el escarpe y su composición es más variada a los rellenos anteriores, ya que puede presentar rocas de arenisca producto de la adecuación del terreno y depósito de canteras anteriores en su matriz de grano fino.
- Coluvión: Material que conforma el área del movimiento en masa, correspondiente al suelo desplazado en eventos anteriores y actualmente.
- Relleno antrópico: Suelo con intervención mecánica adaptado/adecuado por la comunidad para la construcción de viviendas, carreteras, etc.
- Arenisca: Roca perteneciente a la formación Guaduas, como se expresa en el capítulo de geología local.
- Arcillolita: Se presenta en el capítulo de geología local.

Los parámetros obtenidos del análisis anterior son:

Tabla 9. Parámetros iniciales para el planteamiento del modelo geotécnico. Fuente: Propia

Material	Peso unitario (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
Relleno 1	16,91	1	30,4
Relleno 2	16,91	1	30,4
Relleno 3	16,93	1	30,4
Coluvión	16,83	1	30,4
Relleno Antrópico	19,68	4	27
Arenisca	21	20	30
Arcillolita	20	40	25

Se generaron los 4 perfiles distribuidos en planta de la siguiente forma:



Ilustración 43 42. Ubicación de los perfiles en planta. Fuente: Google Earth.

Para el ajuste de los parámetros geotécnicos de los diferentes materiales que conforman la ladera, se realizó un análisis retrospectivo a partir de la topografía levantada en el año 2013, el cual permitió determinar unos parámetros del suelo más coherentes con la zona (Anexo 2). Este análisis también tuvo en consideración los resultados de laboratorio realizados en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, realizando así un proceso iterativo de estabilidad teniendo como resultado la diferenciación entre los 2 estratos de arenisca presente en el modelo. Dichos estratos presentan finalmente los siguientes parámetros:

Tabla 10. Parámetros de los estratos establecidos realizado el análisis retrospectivo. Fuente: Propia

Material	Peso unitario (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)
Relleno 1	16,91	20	30,4
Relleno 2	16,91	20	30,4
Relleno 3	16,93	20	30,4
Coluvión	16,83	13	30,4
Relleno Antrópico	19,68	4	27
Arenisca	21	50	32
Arcillolita	20	140	28
Arenisca 2	21	100	32

Teniendo así los siguientes perfiles geotécnicos para el año 2013:

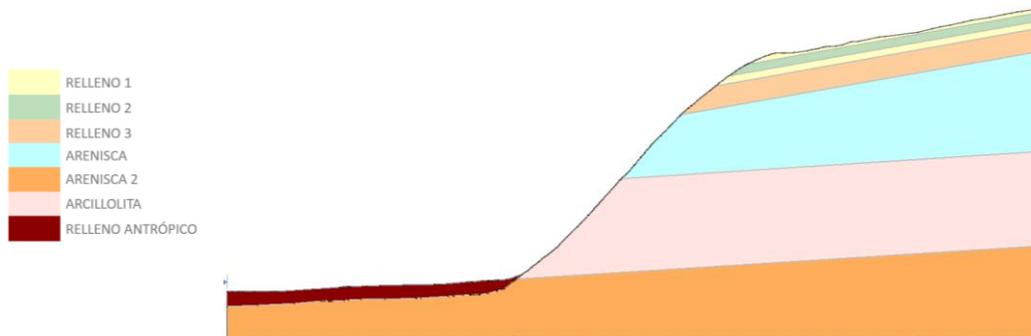


Ilustración 4443. Modelo geológico del perfil 1 generado con la topografía del año 2013.

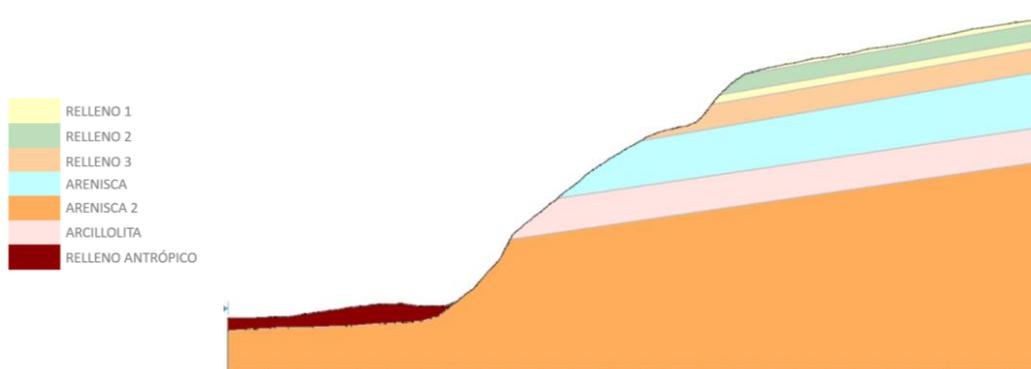


Ilustración 4544. Modelo geológico del perfil 2 generado con la topografía del año 2013. Fuente: Propia

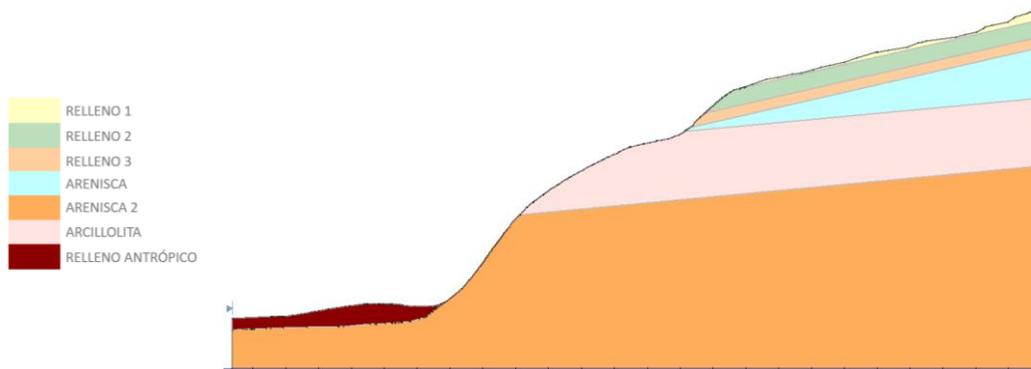


Ilustración 4645. Modelo geológico del perfil 3 generado con la topografía del año 2013. Fuente: Propia

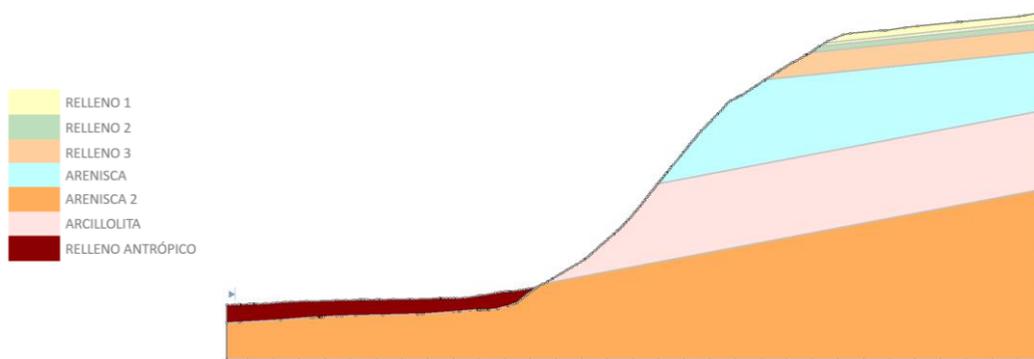


Ilustración 4746. Modelo geológico del perfil 4 generado con la topografía del año 2013. Fuente: Propia

Definidos los modelos para la topografía de 2013, se plantearon los modelos actuales teniendo en cuenta los límites generados por la diferencia de las topografías (año 2013 y actual), que permiten comprender cuál es el material deslizado y cómo este movimiento genera la disposición actual en el talud. El material denominado como coluvión corresponde a esta diferencia entre topografías y la superficie de falla planteada. Se asume entonces una superficie de falla circular que permite obtener un desplazamiento de suelo coherente con lo visto en campo y de la superposición de las topografías. Se obtiene los siguientes perfiles geológicos:

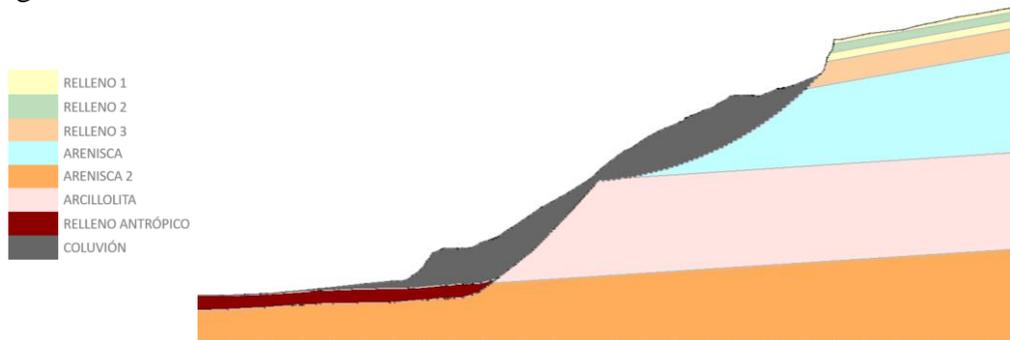


Ilustración 4847. Modelo geológico actual del perfil 1. Fuente: Propia

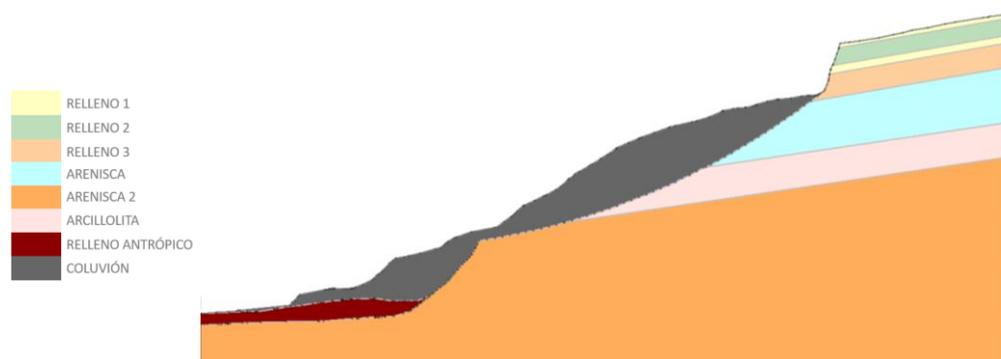


Ilustración 4948. Modelo geológico actual del perfil 2. Fuente: Propia

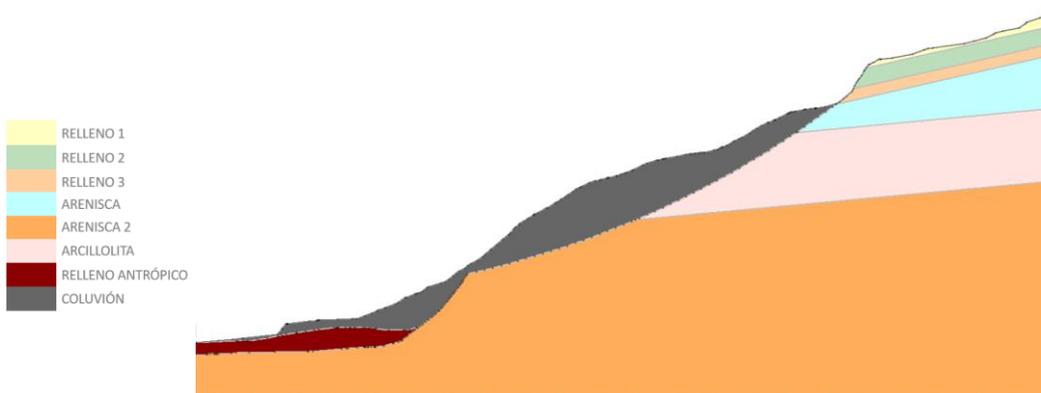


Ilustración 5049. Modelo geológico actual del perfil 3, Fuente: Propia

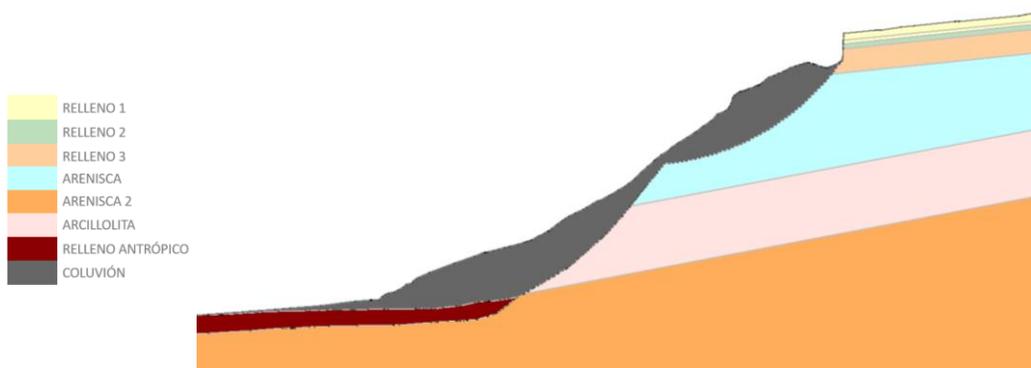


Ilustración 5150. Modelo geológico actual del perfil 4. Fuente: Propia.

11. Análisis de estabilidad

Condición actual

Para los modelos geotécnicos de cada perfil y su respectivo análisis de estabilidad, es necesario abarcar las diferentes situaciones clave en el proceso de inestabilidad, por lo cual se generaron modelos teniendo en cuenta el impacto que podrían representar situaciones como: nivel freático crítico, grietas de 1.83 a 2 m como las medidas en campo, grietas de hasta 4 m que representan los bloques desprendidos, y las variaciones de saturación en las grietas (secas y saturadas). De esta forma se pudo encontrar la situación perjudicial que produce el desprendimiento de material, los posibles planos de falla y el área afectada que es de interés en el análisis. En el anexo 3 se profundiza este capítulo con cada modelado, permitiendo obtener con estas variaciones la siguiente tabla resumen:

Tabla 11. Factores de seguridad obtenidos del análisis de estabilidad con las diferentes situaciones planteadas. Fuente: Propia.

Perfil	NF crítico					NF alto					NF bajo
	Sin grietas	Grietas entre 1.8 m y 2m		Grietas de hasta 4 m		Sin grietas	Grietas entre 1.8 m y 2m		Grietas de hasta 4 m		Grietas secas de hasta 4 m
		saturadas	Secas	saturadas	Secas		saturadas	Secas	saturadas	Secas	
1	1.118	0.574	1.118	0.679	1.118	1.187	0.630	1.187	0.679	1.187	1.525
2	0.994	0.817	0.994	0.513	0.994	1.116	0.814	1.116	0.519	1.116	1.181
3	0.906	0.906	0.906	0.906	0.906	1.073	1.073	1.073	1.073	1.073	1.073
4	1.012	0,061	1.012	0,08	1.012	1.019	0,061	1.019	0.007	1.019	1.326

De los análisis anteriores se puede concluir que la ladera presenta una condición de estabilidad marginal, la cual es estable si el suelo no presenta grietas, o si las grietas están secas. En esta ladera se producen nuevas zonas inestables cuando en temporada seca se forman grietas y el agua de escorrentía o de infiltración llena las grietas; también existen procesos inestables cuando la saturación de la ladera alcanza el nivel freático crítico.

Los modelos planteados permitieron generar un análisis representativo de lo observado en la actualidad, en el cual el flanco derecho del deslizamiento está gobernado por un deslizamiento rotacional que genera un flujo de detritos a la parte baja del talud y afecta las unidades residenciales; el flanco derecho se presenta un desprendimiento de bloques del escarpe principal debido a las grietas de desecación presentes y cuyo flujo a la parte baja es detenido por la unidad de arcillolita que presenta día a día un mayor grado de erosión y meteorización.

Aspectos Sísmicos del Análisis

Para realizar el análisis pseudo-estático de las estructuras, se analizó la aceleración máxima del terreno (a_{max}) definida como la máxima aceleración del espectro de diseño para periodo cero ($T=0$), calculado como:

$$a_{max} = Aa * Fa * I$$

Donde Aa es el coeficiente de aceleración horizontal máxima pico, Fa es el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos, debida a los efectos de sitio; e I es el coeficiente de importancia de la estructura.

Según lo estipulado en la NSR – 10, el municipio de Soacha se encuentra en una amenaza intermedia con límites en amenaza alta, pero la zona en estudio no recae en esta última categoría de a forma que el coeficiente de aceleración horizontal máxima pico es de 0.15. En el estudio de estabilidad de taludes realizado en la comuna 4 se definieron estos suelos como tipo D, por lo que es valor de Fa puede calcularse con una interpolación lineal entre los valores de 1.6 y 1.4 dados por la norma para aceleraciones entre 0.1 y 0.2, obteniendo como resultado un valor de $Fa=1.5$.

Tabla A.2.4-3
Valores del coeficiente F_a , para la zona de periodos cortos del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Ilustración 5251. Coeficientes F_a establecidos en la NSR-10. Fuente: Capítulo A NSR-10

Dado el uso social que se le piensa dar a la solución, la estructura se considera en un grupo de uso I según la NSR-10 con un coeficiente de importancia $I = 1.0$. Determinando el valor de a_{max} :

$$a_{max} = 0.15 * 1.5 * 1.0 = 0.225$$

El coeficiente sísmico de diseño K_{ST} se determinó a partir de la recomendación dada en la Tabla H.5.2-1 de la NSR10, para suelos, enrocados y macizos rocosos fracturados sin ningún análisis de amplificación.

Tabla H.5.2-1
Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

Material	K_{ST}/a_{max} Mínimo	Análisis de Amplificación Mínimo
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%)	0.80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1.00	Ninguno
Todos los materiales térreos	0.67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos	0.50	Amplificación de onda bidimensional

Ilustración 5352. Valores de K_{ST} establecidos en la norma. Fuente: Capítulo H NSR-10

De esta forma se obtuvo un coeficiente sísmico de diseño:

$$K_{ST} = 0.8 * 0.225 = 0.18$$

Planteamiento de obras

Las condiciones que se presentan actualmente en el talud y sus posibles soluciones, están limitadas, en lo concerniente al tipo y alcance de la intervención, a factores económicos y sociales, en cuanto a que necesita plantear una solución que disminuya el riesgo latente en el sitio, con obras cuyo costo permita su viabilidad, esto teniendo en cuenta el proyecto “Estudios geotécnicos y definición de obras de estabilidad de las zonas donde se está presentando deslizamiento de los barrios Luis Carlos Galán III sector, El Arroyo - Villa Sandra - Villa Esperanza, El Barreno de la comuna cuatro (4) del municipio de Soacha-Cundinamarca”, en el cual se planteaba la mitigación del riesgo mediante obras estructurales y no estructurales, pero su ejecución, al día de hoy, no ha comenzado debido a problemas presupuestales y algunos sectores en análisis como el planteado en este estudio, muestran un notorio avance en los procesos de inestabilidad.

Las alternativas se centran en la reconfiguración del terreno mediante una estructura de terrazas, que permita estabilizar el talud mediante el perfilado del terreno, un sistema de drenaje que permite la canalización de aguas lluvias y residuales, siendo este un factor fundamental de la inestabilidad actual. Además, con el propósito de limitar el avance del movimiento de tierra se considera un muro de contención en voladizo en concreto reforzado. Este último elemento surge de la necesidad de proveer una protección a las viviendas próximas y mitigar el impacto social, que no se logra solamente con el perfilado del terreno. En el anexo 4 se profundiza la metodología.

Las alternativas planteadas a continuación, tienen en consideración un muro en voladizo en concreto, cuyo diseño no se profundiza en este proyecto y se establece que su dimensionamiento debe tener en cuenta las condiciones del terreno y la ladera al momento de ejecutarse los planes de mitigación.

- **Alternativa 1**

Conformada por una disposición de 5 terrazas y bermas de 4 m de ancho, donde la primera terraza mantiene una relación 1H: 0.47V (25°) con un dren de 35 m una inclinación de 10° respecto a la horizontal, las terrazas 2,3,4 y 5 mantienen una relación 1H: 0.57V (30°) con drenes de 20 m ubicados en las terrazas 3 y 5 inclinados 10° y 5° respectivamente (La conformación detallada se presenta en el anexo 4). Obteniendo así los siguientes factores de seguridad en la modelación de la alternativa, con un nivel freático controlado por los drenajes y grietas de hasta 2 m en la parte superior del escarpe para una situación estática:

Tabla 12. FS obtenidos en la modelación de la alternativa 1. Fuente: Propia.

Perfil	Alternativa 1	
	Sin cargas	Con cargas
1	1.860	1.842
2	1.823	1.825
3	1.806	1.810
4	1.569	1.598

- **Alternativa 2**

Tiene una disposición de 6 terrazas y bermas de 2,5 m de ancho, donde las primeras dos terrazas tienen una relación 1H: 0.42V (23°) con un dren de 35 m a una inclinación de 5° respecto a la horizontal en la primera terraza, las terrazas 3,4 y 5 tienen una relación 1H: 0.57V (30°) y la última una relación de 1H: 1.17V (50°), drenes de 20 m ubicados en las terrazas 4 y 6 inclinados 10° y 5° respectivamente (La conformación detallada se presenta en el anexo 4). Obteniendo así los siguientes factores de seguridad en la modelación de la alternativa, con un nivel freático controlado por los drenajes y grietas de hasta 2 m en la parte superior del escarpe para una situación estática:

Tabla 13. FS obtenidos en la modelación de la alternativa 2. Fuente: Propia.

Perfil	Alternativa 2	
	Sin cargas	Con cargas
1	1.578	1.578
2	1.555	1.555
3	1.791	1.790
4	1.749	1.743

- **Alternativa 3**

Esta alternativa resulta del análisis de estabilidad en las alternativas anteriores y presenta una estabilización basada en las dificultades constructivas que se pueden presentar debido a los escarpes del flanco derecho en la parte baja. El diseño recomendado está conformado por 5 terrazas con bermas de 4 m de ancho, donde la primera terraza tiene un dren de 35 m de longitud y una inclinación de 5° respecto a la horizontal, las terrazas 2,3 y 4 mantienen una relación 1V : 1.78H (30°) con drenes de 20 m ubicados en las terrazas 3 y 5 inclinados 10° y 5°, respectivamente. La terraza superior presenta una inclinación 1V:1.5H (34°). La variabilidad constructiva se presenta en la terraza 1, que puede tener inclinaciones de 1V:3.65H, 1V:3.28H y

1V:2.14H en los perfiles 2, 3 y 4, respectivamente. Siendo así la alternativa que se presenta como la mejor opción, puesto que considera variaciones en el terreno y las dificultades constructivas que pueden presentarse. La conformación del talud se muestra a continuación:

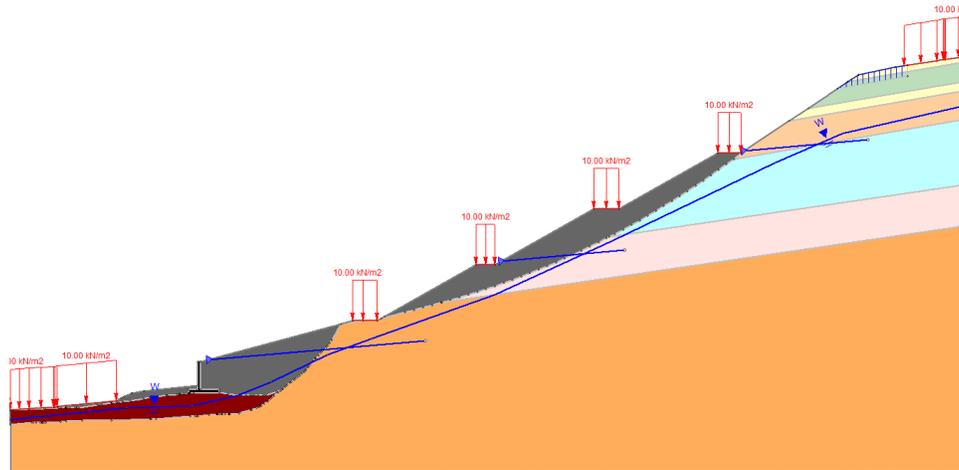


Ilustración 5453. Obras de estabilización en el perfil 2. Fuente: Propia.

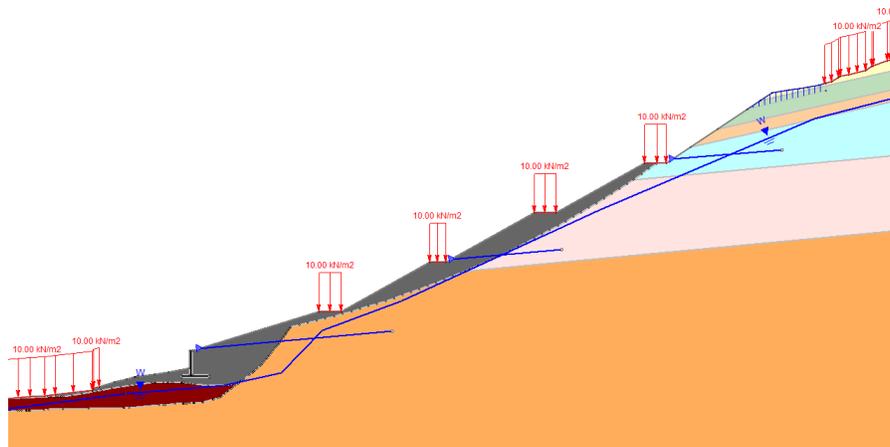


Ilustración 5554. Obras de estabilización en el perfil 3. Fuente: Propia.

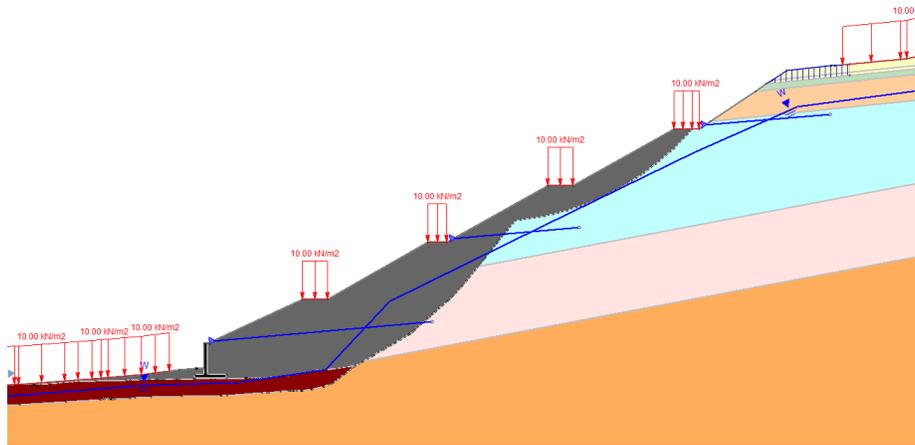


Ilustración 5655. Obras de estabilización en el perfil 4. Fuente: Propia.

Los resultados obtenidos se presentan a detalle en el anexo 4, del cual se obtiene como resumen la siguiente tabla:

Tabla 14. Factores de seguridad obtenidos con la conformación de las terrazas recomendadas. Fuente: Propia.

Perfil	Alternativa 3	
	Sin cargas	Con cargas
2	1.882	1.857
3	1.828	1.823
4	1.450	1.469

Además, se realizó el respectivo análisis pseudo - estático también profundizado en el anexo 4 obteniendo:

Tabla 15. Factores de seguridad obtenidos con la conformación de las terrazas recomendadas en condiciones pseudo-estáticas. Fuente: Propia.

Perfil	Alternativa 3	
	Sin cargas	Con cargas
2	1.262	1.248
3	1.227	1.226
4	1,004	0.972

Este diseño necesita en su mayoría corte de material, pero a medida que se acerca al flanco izquierdo del talud, se presentan volúmenes importantes de relleno, debido a la irregularidad en dicha zona. Es por esto que el perfil 4 se modela con su situación más crítica, en la que la reconformación del terreno se realiza mayormente con relleno en la parte baja.

Para lo drenes horizontales insertados en el terreno se recomienda tubería de 2 pulgadas espaciadas en planta cada 10 metros. El sistema de drenaje se complementa cunetas al interior de las bermas y un canal en el flanco izquierdo del talud, el cual recolectará el agua proveniente de las terrazas, este flujo se genera por gravedad debido a la pendiente a lo largo de las explanaciones, se recomienda que este canal tenga un ancho de al menos 1.0 m y 0.40 m de profundidad.

Por otra parte, se considera necesario dejar una faja de terreno libre de construcciones de al menos 10 m de ancho, medidos entre la corona de la terraza superior y el inicio de las viviendas; esta faja de terreno se podrá utilizar como zona verde o parque. También se deberá revegetalizar todos los taludes y bermas construidas con especies nativas.

12. Conclusiones y recomendaciones

- Las construcciones en la corona del talud presentan un riesgo latente debido a que el material en el que se cimentan actualmente está propenso a generar un deslizamiento. Por otro lado, un flujo continuo del material deslizado genera una amenaza continua para las viviendas al pie del escarpe.
- Las viviendas localizadas en la parte alta del talud han sido un factor humano inestabilizante debido a la inadecuada disposición de las aguas servidas, las cuales se han depositado en las grietas cercanas a las zonas escarpadas generando caída de bloques.
- A partir del análisis multitemporal fue posible identificar el proceso de remoción en masa, conformado por un deslizamiento complejo (rotacional retrogresivo-flujo de detritos).
- La solución planteada es factible y funcional para la comunidad; esta solución se ajusta a los recursos económicos limitados de los cuales dispone.
- Se plantea como propuesta principal la alternativa 3, ya que su diseño considera factores constructivos y sociales, en el que se genera una menor afectación en cuanto al número de viviendas que deben ser retiradas y permite obtener factores de seguridad que reducen al riesgo en la zona a una amenaza media según lo establece la norma en la mayor parte del talud, claro está con las recomendaciones e indicaciones que se establecen para su ejecución.
- Para la solución de la problemática actual, es inevitable una intervención que resulte en el desalojo de algunas viviendas en la corona y pata del talud, debido a su proximidad. Además, se debe plantear un plan social que evite la construcción invasiva en estos sectores y que pueda generar nuevas amenazas.
- El tratamiento de las aguas lluvias y domésticas es un factor fundamental en la estabilización del talud, por lo que se deben establecer planes de adecuación de sistemas de alcantarillado o otros sistemas que permitan y mejoren el manejo de las aguas residuales.
- Si se realiza la construcción de la alternativa, se sugiere un análisis más detallado del flanco inferior izquierdo del talud, de tal forma que la construcción sea coherente con los materiales y pendiente que se presentan en esta zona y no hacen parte del deslizamiento en general.
- Para el desarrollo de estos trabajos dirigidos es necesario contar con más apoyo, coordinación y recursos de la Alcaldía Municipal de Soacha y la ECI.

13. Referencias Bibliográficas

- [1] Ibáñez A, et al. (2012) "*Geología y Geomorfología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Soacha, Cundinamarca, Colombia*". IV Simposio Panamericano de Deslizamientos. Geólogos, Servicio Geológico Colombiano. ISBN 9789589877043
- [2] SGC. (2006). "Zonificación de amenaza por movimientos en masa de tres sectores del municipio de Soacha Fase 1". Informe final definitivo. En convenio con Alcaldía Municipal de Soacha, Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial.
- [3] Servicio Geológico Colombiano. (2013). "Zonificación geomecánica y amenaza por movimientos en masa en el municipio de Soacha – Cundinamarca. Escala 1:25000"
- [4] INVIAS, (1998) "Manual de Estabilidad de Taludes: Geotecnia vial", Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [5] Fotografías aéreas del IGAC, números 239 y 250, del Vuelo R-1153; año 1990
- [6] Fotografías aéreas del IGAC, números 19 y 20, del Vuelo R-1183; año 1992
- [7] Fotografías aéreas del IGAC, números 39 y 40, del Vuelo SAV-415; año 1998
- [8] Fotografías aéreas del IGAC, números 183 y 184, del Vuelo c-2717; año 2004
- [9] Fotografías aéreas del IGAC, números 1964 y 1965, del Vuelo 1100100022; año 2009
- [10] Soacha, C. and Soacha, D., 2021. Clima Soacha: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Soacha - Climate-Data.org. [online] Es.climate-data.org. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/cundinamarca/soacha-31233/> [año 2021].
- [11] Geoportal SIGOT, <http://sigotvg.igac.gov.co:8080/>, Amenaza de remoción de masa