

ESTUDIO DE AMENAZA DE DETALLE POR MOVIMIENTOS EN MASA

ESTUDIO DE SUELOS

PLAN PARCIAL CARABINEROS Z2_R_48

MEDELLÍN-ANTIOQUIA

Versión final

Octubre 2022

EQUIPO TÉCNICO INCIGAM

Marco Fidel Gamboa Ramírez

Ingeniero Geólogo Esp. Sistemas de Información Geográfica
Msc. Ciencias de la Tierra

William G. Suárez

Ingeniero Civil
Especialista en Mecánica de suelos y Cimentaciones

Angie López Duque

Ingeniera Forestal
Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo

Adrián Humberto Escobar Vélez

Biólogo

Milena González Gómez

Geóloga
Esp. Gerencia del Medio Ambiente y Prevención de Desastres

Héctor Camilo Pérez Contreras

Geólogo

José Alejandro Sepúlveda Granda

Ingeniero Sanitario

Johanna Orozco

Arquitecta
Especialista en Diseño Urbano y en Gestión Inmobiliaria
Aspirante a Especialista en Derecho Urbano

Ligia María Cardona Coronado

Arquitecta urbanista
Especialista en derecho urbano
Mg en planificación territorial y gestión ambiental

Mariana Jiménez

Ingeniera Civil
Especialista en Gestión de la Construcción

Diego Cadavid

Ingeniero Civil
Especialista en Vías y Transporte

Juan Guillermo Zuluaga Carmona

Arquitecto Constructor

Abogado

Magister en Estudios del Territorio

Maria Isabel Jaramillo

Antropóloga.

Especialista en Gestión del Riesgo de Desastres.

EQUIPO TÉCNICO EMPRESA DE DESARROLLO URBANO - EDU

Carlos Eduardo Maya Ospina

Subgerente de Operación Urbana e Inmobiliaria

David Rodríguez Martínez

Director Inmobiliario

Marcela Yepes Vélez

Profesional Líder

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	12
1.1	OBJETIVO	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO	13
3	GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTECNIA.....	17
3.1	GEOLOGÍA REGIONAL.....	17
3.2	TECTÓNICA REGIONAL	19
3.3	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	19
3.4	UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE (UMI)	23
3.5	FOTOINTERPRETACIÓN.....	25
3.6	UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA	29
3.7	MORFOMETRÍA	34
3.8	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	39
3.9	MORFODINÁMICA	52
3.10	GEOTECNIA	55
3.10.1	Inspección del entorno:.....	55
3.10.2	Análisis de la información disponible en el estudio previo.....	55
3.10.3	Sondeos	60
3.10.4	Ejecución de ensayos de campo y toma de muestras:	68
3.10.5	Análisis de laboratorio	69
3.10.6	Estratigrafía y propiedades índice de los suelos	70
3.10.7	Condiciones geotécnicas especiales	74
3.10.8	Parámetros geomecánicos	83
3.10.9	Nivel freático.....	90
3.10.10	Análisis de estabilidad	90
3.11	ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	114
3.12	APTITUD GEOLÓGICA.....	117
3.13	RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS.....	120
3.13.1	Análisis de estabilidad en condiciones proyectadas.....	120
3.14	CONCLUSIONES COMPONENTE GEOTÉCNICO.....	142

4	BIBLIOGRAFÍA.....	148
---	-------------------	-----

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Delimitación de la comuna 5, los barrios y el plan parcial Carabineros	14
Ilustración 2. Localización Plan Parcial Carabineros.....	15
Ilustración 3. Levantamiento topográfico Plan Parcial Carabineros.....	16
Ilustración 4. Mapa geológico regional.....	18
Ilustración 5. Mapa geomorfológico regional.....	22
Ilustración 6. Mapa de Unidades Morfodinámicas Independientes.....	24
Ilustración 7. Imagen satelital del año 2005. Tomada de Google Earth.....	26
Ilustración 8. Imagen satelital del año 2012. Tomada de Google Earth.....	27
Ilustración 9. Imagen satelital del año 2014. Tomada de Google Earth.....	27
Ilustración 10. Imagen satelital del año 2019. Tomada de Google Earth.....	28
Ilustración 11. Imagen satelital del año 2022. Tomada de Google Earth.....	29
Ilustración 12. Perfil geológico representativo.....	30
Ilustración 13. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería	31
Ilustración 14. Mapa de pendientes del área de planificación	36
Ilustración 15. Mapa geomorfológico local	41
Ilustración 16. Mapa de procesos morfodinámicos	54
Ilustración 17. Localización de apiques exploratorios	56
Ilustración 18. Ubicación de la perforación con taladro rotatorio. P1	56
Ilustración 19. Descripción de perforación con taladro rotatorio	57
Ilustración 20. Disposición de obras de drenaje superior	58
Ilustración 21. Conformación final de bermas y obras de drenaje complementarias	59
Ilustración 22. Muro de contención. Espaciamiento y profundidad de pilas	60
Ilustración 23. Localización de sondeos.....	62
Ilustración 24. Potencial de expansión a partir del límite líquido	75
Ilustración 25. Potencial de expansión a partir del índice plástico.....	75
Ilustración 26. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P1	78
Ilustración 27. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P2.....	79
Ilustración 28. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P3.....	79
Ilustración 29. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P4.....	79
Ilustración 30. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P5.....	80
Ilustración 31. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P6.....	80
Ilustración 32. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P7.....	80
Ilustración 33. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P8.....	81
Ilustración 34. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P9.....	81
Ilustración 35. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P10.....	81
Ilustración 36. Resultados análisis licuación (LiquefyPro) – Sondeo P6.....	82

Ilustración 37. Variación cohesión del lleno antrópico	85
Ilustración 38. Variación ángulo de fricción del lleno antrópico	85
Ilustración 39. Variación cohesión del depósito de vertiente I	87
Ilustración 40. Variación ángulo de fricción del depósito de vertiente I	87
Ilustración 41. Variación cohesión del depósito de vertiente II	88
Ilustración 42. Variación ángulo de fricción del depósito de vertiente II	89
Ilustración 43. Localización perfiles analizados	93
Ilustración 44. Modelo geotécnico Perfil 1 PP Carabineros	94
Ilustración 45. Modelo geotécnico Perfil 2 PP. Carabineros	95
Ilustración 46. Modelo geotécnico Perfil 3 PP. Carabineros	96
Ilustración 47. Modelo geotécnico Perfil 4 PP. Carabineros	97
Ilustración 48. Modelo geotécnico Perfil 5 PP. Carabineros	98
Ilustración 49. Modelo geotécnico Perfil 6 PP. Carabineros	99
Ilustración 50. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)	100
Ilustración 51. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)	101
Ilustración 52. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)	102
Ilustración 53. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)	103
Ilustración 54. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)	103
Ilustración 55. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)	104
Ilustración 56. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)	105
Ilustración 57. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)	106
Ilustración 58. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)	107
Ilustración 59. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)	108
Ilustración 60. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)	108
Ilustración 61. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)	109
Ilustración 62. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)	110
Ilustración 63. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)	111

Ilustración 64. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)	112
Ilustración 65. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)	113
Ilustración 66. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)	113
Ilustración 67. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)	114
Ilustración 68. Mapa de zonificación de amenazas por movimientos en masa	116
Ilustración 69. Zonificación aptitud geológica de la zona de estudio	119
Ilustración 70. Modelo de ocupación PP. Carabineros	121
Ilustración 71. Proyecto vial PP. Carabineros	122
Ilustración 72. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)	124
Ilustración 73. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)	125
Ilustración 74. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)	126
Ilustración 75. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)	127
Ilustración 76. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)	128
Ilustración 77. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)	129
Ilustración 78. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)	130
Ilustración 79. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)	131
Ilustración 80. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)	132
Ilustración 81. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)	133
Ilustración 82. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)	134
Ilustración 83. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)	135
Ilustración 84. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)	136
Ilustración 85. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)	137
Ilustración 86. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)	138

Ilustración 87. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)	139
Ilustración 88. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático).....	140
Ilustración 89. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático).....	141
Ilustración 90. Obras propuestas según el análisis de condiciones proyectadas.....	145
Ilustración 91. Mapa de amenaza por movimientos en masa en condiciones proyectadas	147

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Distribución de los rangos de pendientes en el área de interés.....	35
Tabla 2. Rangos de longitud de la ladera para la definición de los componentes geomorfológicos	40
Tabla 3. Sondeos exploratorios	61
Tabla 4. Resumen Ensayos de Laboratorio.	69
Tabla 5. Clasificación de suelos expansivos a partir del límite líquido.....	74
Tabla 6. Clasificación de suelos expansivos a partir del índice plástico (Raman 1967)....	74
Tabla 7. Potencial de colapso muestras inalteradas.	76
Tabla 8. Valores de Cu para muestras gruesogranulares.	77
Tabla 9. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos.	84
Tabla 10. Resultados ensayos geomecánicos del lleno antrópico	86
Tabla 11. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico	86
Tabla 12. Resultados ensayos geomecánicos del depósito de vertiente I.....	87
Tabla 13. Parámetros geomecánicos del depósito de vertiente I	88
Tabla 14. Resultados ensayos geomecánicos del depósito de vertiente II.....	89
Tabla 15. Parámetros geomecánicos del depósito de vertiente II	89
Tabla 16. Profundidad del nivel freático	90
Tabla 17. Parámetros Geomecánicos de los materiales	91
Tabla 18. Factores de seguridad mínimos para evaluación y diseño de taludes.	92
Tabla 19. Factores de seguridad para la condición proyectada.	142

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Lleno antrópico	32
Fotografía 2. Depósitos de flujos de lodos y/o escombros.	33
Fotografía 3. Flujo II Depósito de flujo de lodos y/o escombros encontrados en los sondeos exploratorios	34

Fotografía 4. Pendientes muy suaves.....	37
Fotografía 5. Pendientes suaves	37
Fotografía 6. Pendientes inclinadas	38
Fotografía 7. Pendientes muy inclinadas	38
Fotografía 8. Pendientes abruptas	39
Fotografía 9. Pendientes muy abruptas - escarpadas	39
Fotografía 10. Cauce aluvial quebrada La Culebra	42
Fotografía 11. Explanación	42
Fotografía 12. Ladera en lleno cóncava muy corta abrupta.....	43
Fotografía 13. Ladera en lleno irregular moderada abrupta	43
Fotografía 14. Ladera en lleno irregular moderada inclinada	44
Fotografía 15. Ladera en lleno irregular moderada muy abrupta.....	44
Fotografía 16. Ladera en lleno irregular muy corta abrupta.....	45
Fotografía 17. Ladera en lleno irregular muy corta abrupta.....	46
Fotografía 18. Ladera en lleno irregular muy corta muy inclinada	46
Fotografía 19. Ladera en lleno irregular muy larga muy inclinada	47
Fotografía 20. Ladera en lleno recta muy corta muy abrupta	47
Fotografía 21. Ladera en lleno recta muy corta abrupta	48
Fotografía 22. Terraceo	49
Fotografía 23. Ladera en depósito irregular corta abrupta	49
Fotografía 24. Ladera en depósito irregular corta muy abrupta.....	50
Fotografía 25. Ladera en depósito irregular corta muy inclinada.....	50
Fotografía 26. Ladera en depósito irregular muy corta abrupta.....	51
Fotografía 27. Ladera en depósito irregular muy corta muy abrupta	51
Fotografía 28. Ladera en depósito recta muy corta muy abrupta	52
Fotografía 29. Proceso morfodinámico activo en el sector El Patio.....	53
Fotografía 30. Sitio donde se realizó el sondeo P1.	63
Fotografía 31. Sitio donde se realizó el sondeo P2.	63
Fotografía 32. Sitio donde se realizó el sondeo P3.	64
Fotografía 33. Sitio donde se realizó el sondeo P4.	65
Fotografía 34. Sitio donde se realizó el sondeo P5.	65
Fotografía 35. Sitio donde se realizó el sondeo P7.	66
Fotografía 36. Sitio donde se realizó el sondeo P8.	66
Fotografía 37. Sitio donde se realizó el sondeo P9.	67
Fotografía 38. Sitio donde se realizó el sondeo P10.	67
Fotografía 39. Muestreador estándar o cuchara partida (Split Spoon) para el ensayo SPT	68
Fotografía 40. Muestreador de pared delgada	69
Fotografía 41. Llenos antrópicos encontrados en los sondeos exploratorios	71
Fotografía 42. Flujo I Depósito de flujo de lodos y/o escombros encontrados en los sondeos exploratorios	72

Fotografía 43. Flujo II Depósito de flujo de lodos y/o escombros encontrados en los sondeos exploratorios	73
---	----

LISTA DE ANEXOS

1. GDB.
2. MXD.
3. Imágenes.
4. Topografía
5. Anexos de geotecnia.
6. Anexos con las memorias de cálculo.

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene el estudio de amenaza de detalle por movimientos en masa del Plan Parcial Carabineros, adoptado mediante el Decreto Municipal 2077 de 2015.

El Plan de Ordenamiento Territorial del año 2014 del municipio de Medellín (Acuerdo 48 de 2014), indica que en el área de planificación se presenta una zona definida como amenaza alta y media por movimientos en masa, rodeada por una franja angosta de amenaza media, sin embargo, dada la escala de análisis con la que se definen estas zonas para el POT el presente estudio busca definir con mayor precisión las características y propiedades geotécnicas del área de planificación y la zonificación de la amenaza, a partir de un estudio de mayor detalle siguiendo los lineamientos establecidos en el Acuerdo Metropolitano N°009 y en el Decreto 1626 de 2015 cuyo fin es incorporar correcciones y precisiones de la cartografía oficial del Plan de Ordenamiento Territorial – POT y la incorporación cartográfica de los resultados de los estudios de detalle.

1.1 OBJETIVO

Elaborar la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el área de interés, siguiendo los lineamientos establecidos por el Decreto municipal 1626 de 2015 y el documento “Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá, producido y aprobado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la caracterización geológico – geomorfológica del área de interés y la caracterización geotécnica de los materiales identificados en el sitio.
- Evaluar las condiciones de estabilidad del polígono de estudio y elaborar la zonificación por movimientos en masa a escala 1:2000.
- Zonificar el territorio en función de la aptitud para el uso del suelo y presentar las recomendaciones para el aprovechamiento del mismo.

2 LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

El plan parcial Carabineros se ubica dentro de la división política administrativa del Municipio de Medellín en el barrio Las Brisas de la comuna 5, Castilla, la cual, a su vez, pertenece a la zona Noroccidental (zona 2) de la ciudad.

Geográficamente, se encuentra en la cuenca del río Medellín, en la ladera noroccidental de la ciudad, en la baja y media ladera. “Limita por el norte con el municipio de Bello; por el oriente con el río Medellín, por el sur con la comuna No. 7 Robledo, y al occidente, con las comunas 6 Doce de Octubre y 7 Robledo” (Municipio de Medellín, 2014, pág. 31). Posee un área de 609,69 Hectáreas.

La comuna está compuesta por 14 barrios: Toscana, Las Brisas, Florencia, Tejelo, Boyacá, Héctor Abad Gómez, Belalcázar, Girardot, Tricentenario, Castilla, Francisco Antonio Zea, Alfonso López, Caribe y El Progreso (Municipio de Medellín, 2015).

La comuna está transversalizada por varias vías importantes de la ciudad, que la conectan con los municipios circunvecinos en el Valle de Aburrá, con el oriente y norte del departamento: la Avenida Regional (carrera 63), la Autopista Norte (carrera 64) y la carrera 65. Cuenta, además, con equipamientos de ciudad como el Parque Juanes de la Paz, La Terminal de Transporte del Norte, el Hospital La María, entre otros (Alcaldía de Medellín, 2014).

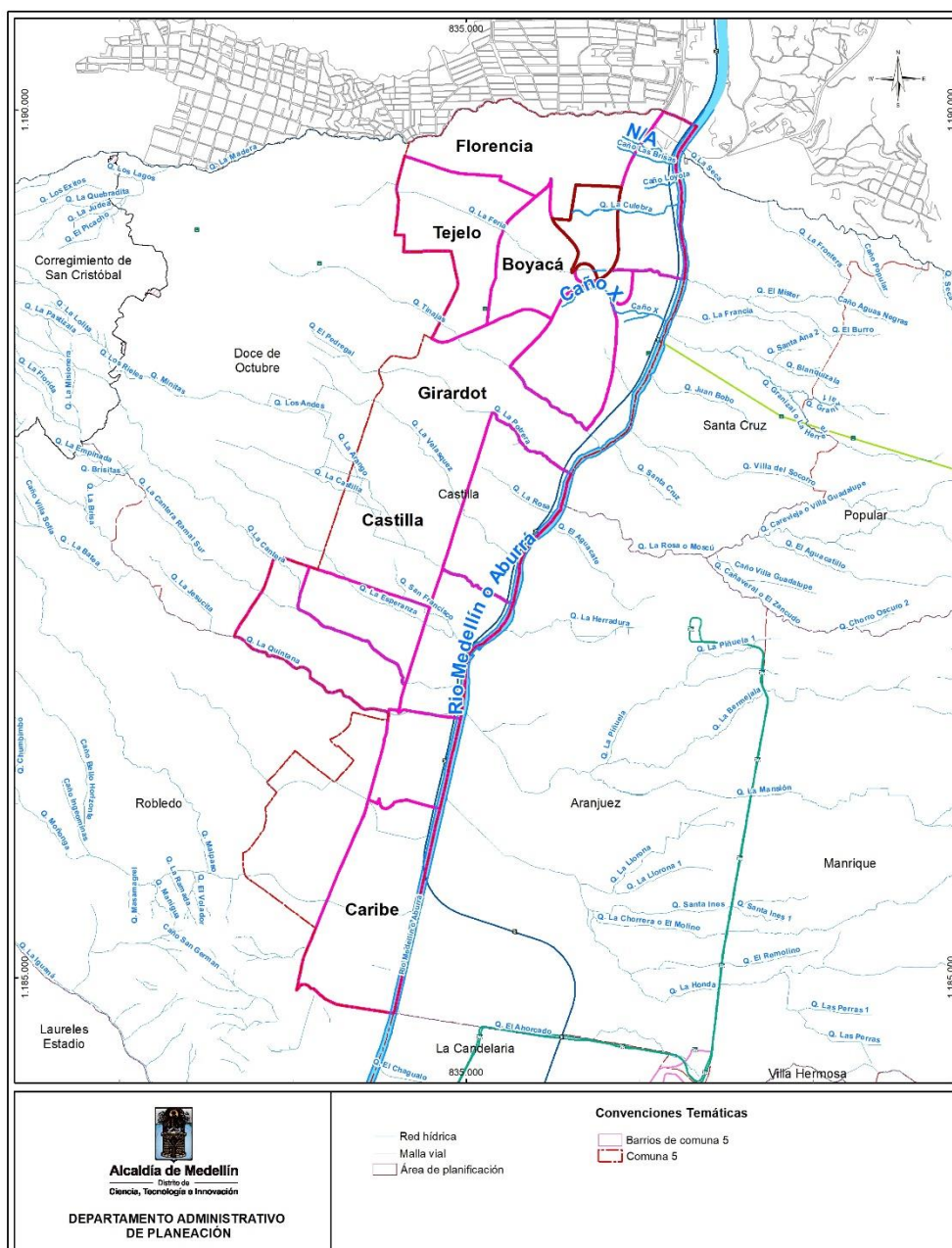


Ilustración 1. Delimitación de la comuna 5, los barrios y el plan parcial Carabineros
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, el área de Plan Parcial se encuentra delimitada al norte, por la calle 113 A; al sur, por la calle 111 B; al occidente, por la carrera 64 D y al oriente, por la Autopista Norte.



Ilustración 2. Localización Plan Parcial Carabineros.
Fuente: Elaboración propia

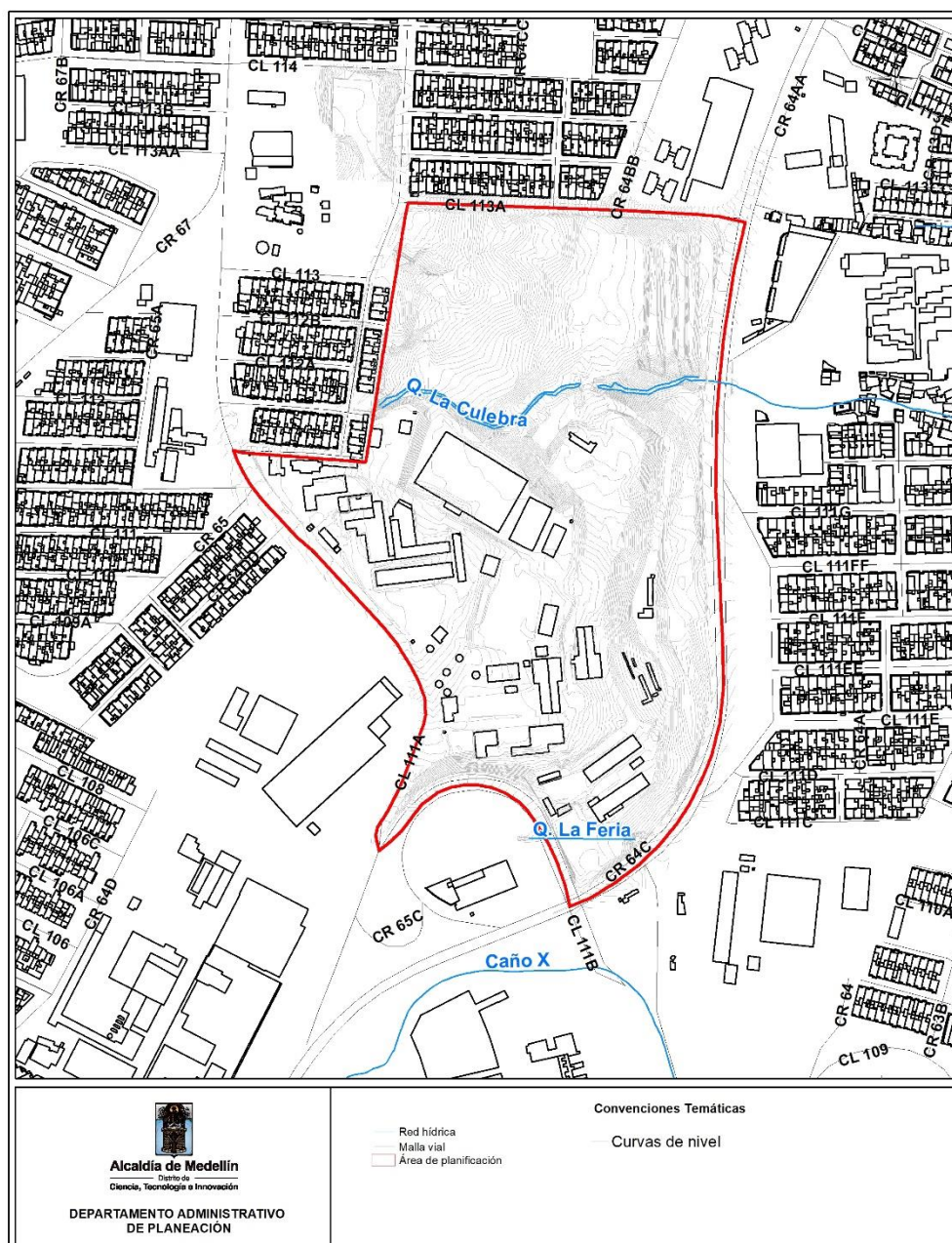


Ilustración 3. Levantamiento topográfico Plan Parcial Carabineros.
Fuente: Elaboración propia

3 GEOLOGÍA, GEOMORFOLOGÍA Y GEOTECNIA

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Regionalmente, el área del proyecto está caracterizada por la presencia de materiales recientes de edad cuaternaria de diferentes características, denominados depósitos de flujos de lodos y escombros, depósitos aluviales, depósitos aluviotorrenciales, depósitos de deslizamiento y llenos Antrópicos (Ilustración 4).

A continuación, se describen las principales características de estas unidades:

Flujos de escombros y/o lodos (NQFII, NFI): Corresponde a depósitos de vertiente de varias generaciones, tipo flujos de lodo y escombros. Aparecen dispersos sobre grandes extensiones en el Valle de Aburrá, reposando concordantemente sobre el basamento ígneo-metamórfico y sobre depósitos más antiguos o intercalados con ellos; su origen está relacionado con la inestabilidad de las partes altas de las vertientes que cubren las laderas del municipio de Medellín, donde ocurrieron grandes deslizamientos, y cuyos materiales se movilizaron hasta las partes bajas.

Estos depósitos están constituidos por una matriz arcillo limosa o limo arcillosa, en colores claros como pardo, gris y amarillo. Presenta bloques heterométricos, con un grado de meteorización de moderado a alto (AMVA, 2007).

Depósitos aluviales (Qal): Corresponden a los depósitos del fondo del valle generados por el río Aburrá y algunos de sus afluentes. Se distribuyen en una franja irregular que sigue el río, aumentando su extensión hacia el flanco occidental del valle, alcanzando longitudes de hasta siete kilómetros.

Estos depósitos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas, gravas gruesas y fragmentos rocosos heterogéneos composicionalmente estratificados con continuidad horizontal variable, formando abanicos, terrazas y llanuras aluviales. Se caracterizan por presentar una ligera imbricación y alto grado de redondez de los bloques (AMVA, 2007).

Depósitos aluvio-torrenciales (Qat): Estas unidades son el producto de eventos erosivos ocurridos en épocas y períodos de alta pluviosidad que han generado avenidas torrenciales de diferente magnitud, depositando materiales con una gran diversidad en litología, tamaño, forma y espesores. Son depósitos formados en los valles de las quebradas con forma

principalmente, de las unidades geológicas que afloran en la parte alta de las vertientes (AMVA, 2007) (Ver Ilustración 4).

Llenos Antrópicos (QII): El desarrollo de la actividad urbanística y constructiva, propia de ciudades en crecimiento, genera gran cantidad de escombros y materiales de rezaga; los cuales, deben ser dispuestos en otros lugares, desarrollándose acumulaciones artificiales que pueden llegar a tener una extensión y espesor considerables. La composición de estas unidades es muy heterogénea, desde materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas hasta basura, materia orgánica y escombros simplemente dispuestos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante (AMVA, 2007) (Ver Ilustración 4).

3.2 TECTÓNICA REGIONAL

Dentro del área de la cuenca del Río Aburrá existen dos sistemas a los cuales, se asocian las principales fallas que tienen influencia sobre las unidades litológicas. El primer sistema es “Sistema del Borde Occidental de la Cordillera Central”; el cual, incluye el Sistema Cauca-Romeral y se compone por las fallas San Jerónimo, Silvia-Pijao, Cauca-Alamguer. El Segundo Sistema comprende las fallas de Borde Oriental de la Cordillera Central, la Zona de Falla de Palestina.

Estos dos sistemas se caracterizan por presentar numerosas fallas que demarcan la Cordillera Central en ambos flancos. (POMCA Río Aburrá, 2018).

Sistema de Fallas

De acuerdo con el POMCA y la plancha 147 (INGEOMINAS, 1983) en el Valle de Aburrá “predominan tres direcciones de cizallamiento, con direcciones N-S, N45°E y N45°W, siendo concordantes con la dirección del sistema de fallas Romeral, donde la dirección predominante es N-S. Al sur del Valle de Aburrá se han reportado un gran número de fallas regionales y lineamientos con dos direcciones predominantes NS a NNW al oeste del río Medellín y una tendencia NW al este del mismo”. Así mismo, al norte del Valle, existe otro sistema de fallas regionales con dirección NW, dentro de las cuales, resaltan las fallas Rodas y Don Matías; finalmente, el sistema de fallas en dirección NE, en donde las principales son: La Chapa y Santa Elena. (POMCA Río Aburrá, 2018).

3.3 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

En el contexto geomorfológico regional, la zona de interés se ubica en la unidad de paisaje “Valle de Aburrá Medio”. Este valle se extiende aproximadamente, desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana; se caracteriza por ser un valle

ancho con un fondo amplio y plano, y está flanqueado por superficies suaves conformadas por depósitos de vertiente de diferentes generaciones, sistemas de colinas y lomos, que terminan en la parte más alta del valle en escarpes lineales que marcan el límite de éste con los altiplanos (AMVA, 2007).

En el valle medio, se identifican las siguientes macrounidades y unidades geomorfológicas, para la zona de estudio (Ilustración 5):

Bloque Robledo Pedregal

Este bloque representa uno de los rasgos de mayor contraste morfológico dentro de la zona de estudio. Corresponde a la vertiente noroccidental de la ciudad de Medellín, limitada al sur y al occidente por el cauce de la quebrada La Iguañá, al oriente por el río Aburrá y al norte, por la quebrada La Loca hasta sus cabeceras y continuando por la divisoria de aguas hasta la serranía de Las Baldías.

Las alturas de la unidad oscilan entre los 2.800 y los 1.550 msnm; el terreno lo conforman casi en su totalidad, depósitos de vertiente, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas meteorizadas (gneis, metagabros y anfibolitas). Define una ladera homogénea, con vertientes largas, continuas, rectas a levemente cóncavas, prácticamente, sin cambios marcados en la continuidad o pendiente desde la divisoria de aguas hasta el fondo del valle. Estas laderas tienen un aspecto claramente correlacionable con grandes eventos de depositación de materiales de vertiente; sin embargo, la distribución de estos materiales hasta la parte más alta de la vertiente complejiza el análisis, puesto que, no es factible identificar una zona fuente que permita generar estos enormes volúmenes de material (AMVA, 2007).

Bloque Comuna Nororiental parte baja

Es una franja de terreno de tendencia también N-S, localizada en la vertiente nororiental del Valle Medio, ocupando terrenos entre los 1.750 y 1.450 msnm. Esta macrounidad está limitada al este por una serie de fallas y lineamientos de tendencia N-S, que coincide con un marcado incremento de la pendiente; al sur, por la zona suave de los depósitos aluviotorrenciales asociados a la quebrada Santa Elena, al oeste y norte por el río Aburrá y/o sus depósitos aluviales asociados. Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte, se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con vergencia hacia al fondo del valle; constituidas principalmente, por espesos suelos residuales de rocas ultrabásicas cizalladas y, localmente, por depósitos de vertiente, en medio de las cuales, las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas, de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas (AMVA, 2007).

Bloque Fondo de Valle

Este bloque se asocia directamente, a los depósitos aluviales del Río Medellín (AMVA, 2007).

Para estos bloques, las unidades geomorfológicas que se asocian al polígono de estudio, las cuales fueron definidas por el AMVA (2007), son:

Superficies suaves en depósitos moderadamente incisadas (SSDMI): Corresponden a geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión moderada (AMVA, 2007).

Superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI): Corresponden a geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión baja a muy baja (AMVA, 2007).

Peldaños (PÑ): Son geoformas relativamente continuas, con una pendiente suave a moderada. Se presentan en los municipios de Envigado, Medellín, Bello y Girardota (AMVA, 2007).

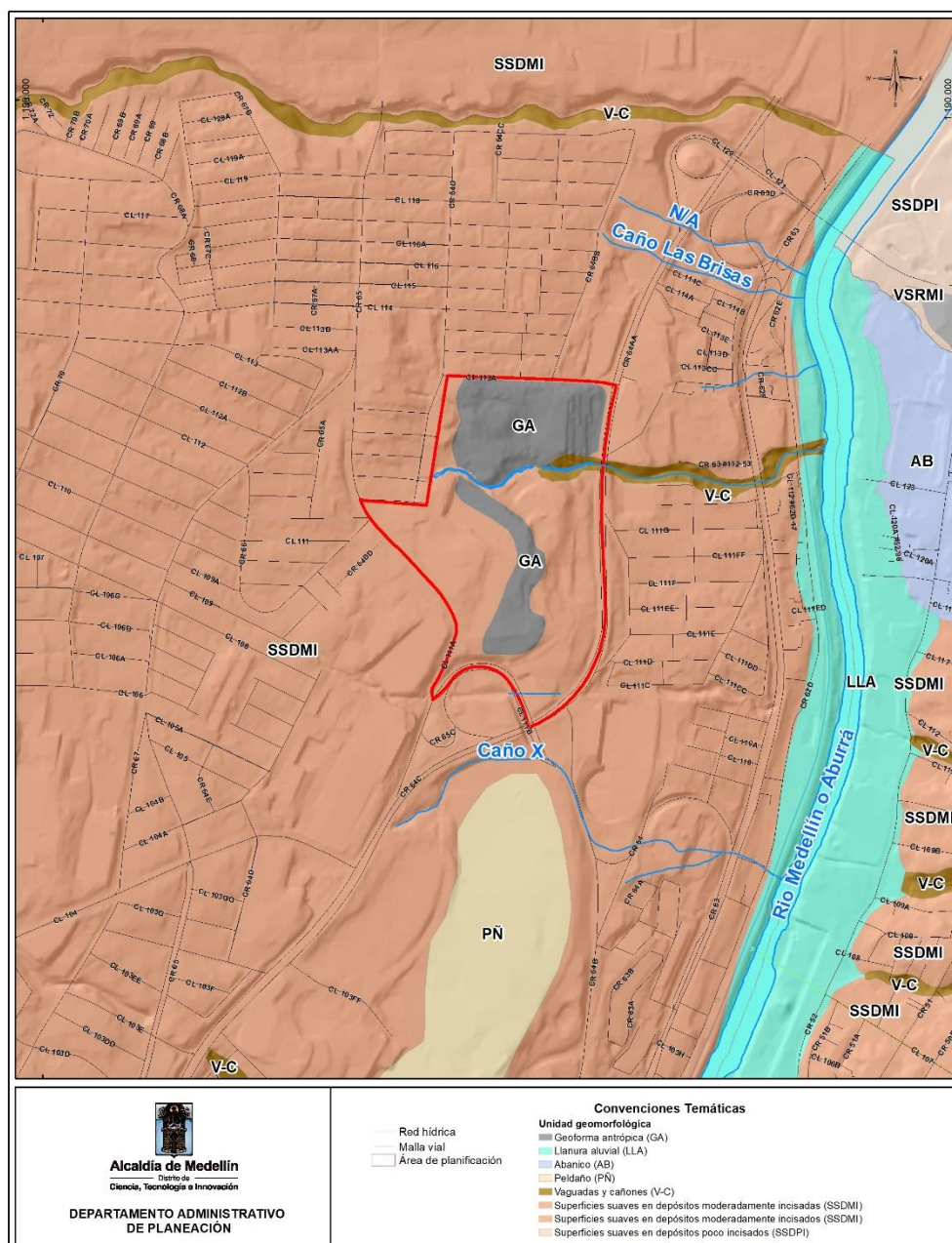


Ilustración 5. Mapa geomorfológico regional

Llanura aluvial (LLA): Unidad que se asocia al cauce principal y las riberas del río Aburrá y algunas quebradas o tributarios principales. Se caracteriza por presentar una forma continua de pendientes suaves y topografía plana; el material es producto de la sedimentación de estos principales cauces aluviales (AMVA, 2007) (Ver Ilustración 5)

Abanico (AB): Superficie en forma de cono, de laderas cóncavas a convexas de morfología plana, aterrazada. Su origen es relacionado a la acumulación torrencial y fluvial en forma radial, donde una corriente desemboca en una zona plana (SGC, 2015) (Ver Ilustración 5).

Geoforma antrópica (GA): Están definidas por ser unas unidades recientes y en su totalidad han sido creadas por el hombre a modo de llenos antrópicos (Ver Ilustración 5).

3.4 UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE (UMI)

Teniendo en cuenta que, la unidad morfodinámica se define como aquella porción de terreno, cuya estabilidad no depende del comportamiento de las zonas vecinas y, complementariamente, el caso inverso, es decir, que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes; la delimitación de estas unidades morfodinámicas se fundamenta en la combinación de aspectos geomorfológicos e hidráulicos (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012) como son las divisorias de aguas, drenajes o expresiones geomorfológicas. La unidad o unidades morfodinámicas pueden, por lo general, ocupar áreas de terreno mayores a las que corresponden al polígono de estudio; por lo cual, será necesario evaluar las condiciones geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de toda la unidad, para determinar las afectaciones por fuera del polígono estudiado, cuya influencia repercute negativamente en la estabilidad de este (Acuerdo Metropolitano 09 de 2012).

Para el área de estudio, se definieron tres unidades morfodinámicas independientes como se presentan en la siguiente ilustración; definidas a partir de criterios geomorfológicos y con base en algunas de las intervenciones antrópicas que actúan como barrera, dado que, geológicamente, es una zona homogénea; cada unidad definida no se va a ver afectada si ocurre un deslizamiento en otra unidad o si ocurre un deslizamiento al interior de éstas, no va a afectar a sus vecinas.

Esta delimitación abarca, en su totalidad, el área de interés y se amplían los límites por los criterios expuestos, entendiendo que, los límites catastrales no siempre coinciden con los rasgos de la superficie.

Unidad Morfodinámica Independiente - UMI 1. Se localiza en el costado norte del área de estudio, limitando al norte, con la calle 113A; al oriente, con la Autopista Norte; al occidente, con el tope de un filo en el límite entre los barrios Las Brisas y Boyacá; y al sur, limita con el cauce de la quebrada La Culebra.

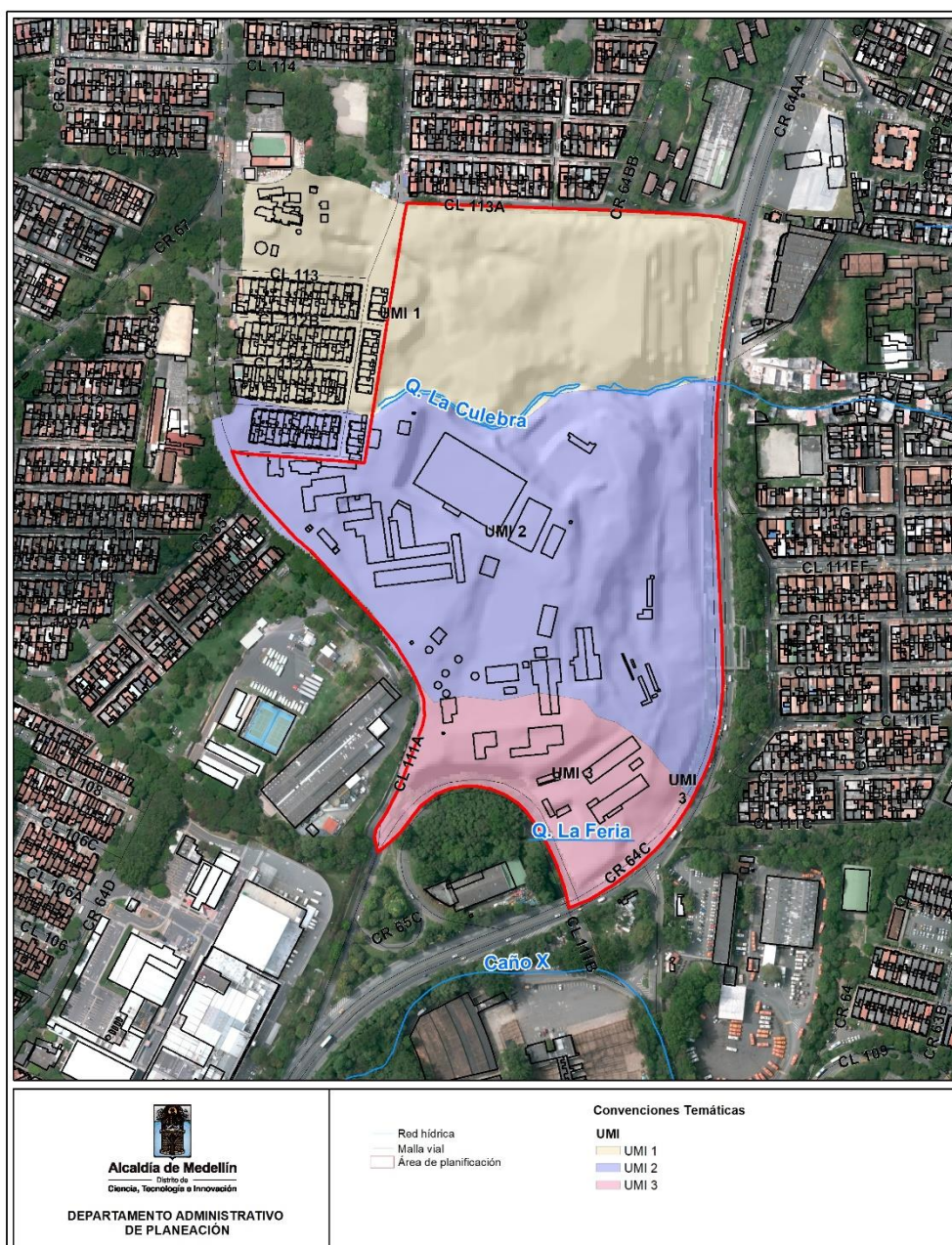


Ilustración 6. Mapa de Unidades Morfodinámicas Independientes.

Unidad Morfodinámica Independiente - UMI 2. Se localiza en el sector central del predio de estudio. Al norte, limita con el cauce de la quebrada La Culebra; al oriente, al igual que la UMI 1, limita con la Autopista Norte; al sur, por el cambio en la dirección de las laderas en el sector de la escuela de carabineros y, al occidente, por la Carrera 65.

Unidad Morfodinámica Independiente - UMI 3. Se encuentra en el sur del área de estudio; linda al norte, con la UMI 2, en el cambio de dirección de laderas; al oriente, limita por la Autopista Norte; al occidente, con la Carrera 65 y, al sur, con vía que conduce a la feria de ganado.

3.5 FOTOINTERPRETACIÓN

Se realiza la interpretación de sensores remotos a partir de un análisis multitemporal con las imágenes de Google Earth que se cuentan para los años 2005, 2012, 2019 y 2022. Este análisis tiene como objetivo identificar las condiciones morfológicas, los procesos morfodinámicos y su evolución en el tiempo, al igual que las intervenciones de tipo antrópico.

El plan parcial Carabineros se presenta un conjunto de superficies en depósito y superficies antrópicas, entre las que se destacan laderas y explanaciones, producto de la intervención que ha tenido el área de planificación y debido a las actividades que actualmente se desarrollan en esta.

Para el año 2005 se observa una ocupación similar a la actual, se identifica la zona norte del plan parcial sin intervenciones, con presencia de pastos limpios, donde es más fácil identificar las condiciones morfológicas naturales; se identifican además algunas irregularidades en el terreno probablemente por la acumulación de depósitos antrópicos y concavidades que sugieren la presencia de movimientos en masa y para el sector central y sur se encuentran las explanaciones y construcciones, sin evidencias de inestabilidad (Ilustración 7).



Ilustración 7. Imagen satelital del año 2005. Tomada de Google Earth

Para el año 2012 se observa una mayor intervención en el sector norte del plan parcial Carabineros. Se cuenta con la presencia de un camino que tiene continuidad desde el sur y centro hasta la zona noroeste. De igual manera, se observa la misma forma irregular y cóncava, así como la acumulación de material producto del proceso morfodinámico que se presentó para el año 2008 en dicha zona. Es importante destacar la falta de cobertura vegetal en este sector y en la quebrada La Culebra. En el caso de la zona central y sur del polígono de interés se presenta la misma configuración que fue vista para el año 2005 (Ilustración 8).



Ilustración 8. Imagen satelital del año 2012. Tomada de Google Earth

Para el año 2014 en la zona norte del plan parcial Carabineros, se observa de nuevo la cobertura con pastos limpios y mayor presencia de árboles en el sector noreste. Así mismo, en este sector se encuentran alrededor de tres construcciones alejadas unas de otras y la presencia de la cicatriz del movimiento en masa ocurrido (Ilustración 9).



Ilustración 9. Imagen satelital del año 2014. Tomada de Google Earth

En el año 2019 en el sector norte (que es el de mayor interés en el plan parcial Carabineros, puesto que la zona central y sur tiene la misma configuración y no se observan procesos de inestabilidad), se conserva la cicatriz del movimiento en masa y las irregularidades en el terreno por la zona de acumulación de material en el sector noreste. En este mismo límite, se consolida la cobertura de los árboles; sin embargo, hay algunos puntos sin cobertura relacionados con el cauce de la quebrada La Culebra. Ya solo se encuentra una de las tres casas anteriormente vistas (Ilustración 10).



Ilustración 10. Imagen satelital del año 2019. Tomada de Google Earth

Para el año 2022 se observa un aumento importante en la cobertura hacia el norte del plan parcial Carabineros, lo que indica la falta de intervención antrópica; sin embargo, se presenta más marcado el paso del camino que va hasta el sector noroeste. Se observa en menor medida la cicatriz del proceso probablemente por el aumento en la cobertura (Ilustración 11).



Ilustración 11. Imagen satelital del año 2022. Tomada de Google Earth

3.6 UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA

Las unidades superficiales que afloran en la zona del proyecto corresponden, de manera sectorizada, a grandes espesores de material antrópico localizados principalmente en las áreas de menor pendiente y, hacia algunas laderas y partes altas, se observan depósitos de flujos de lodos y/o escombros presentes en dos eventos diferentes.

En la Ilustración 12 se presenta el perfil geológico representativo para la zona que comprende el plan parcial Carabineros, donde se pueden observar las unidades de lleno antrópico (QII), el evento 1 del depósito de vertiente (Qf1) (flujo de lodos y/o escombros) y el evento 2 del depósito de vertiente (Qf2) ((flujo de lodos y/o escombros).

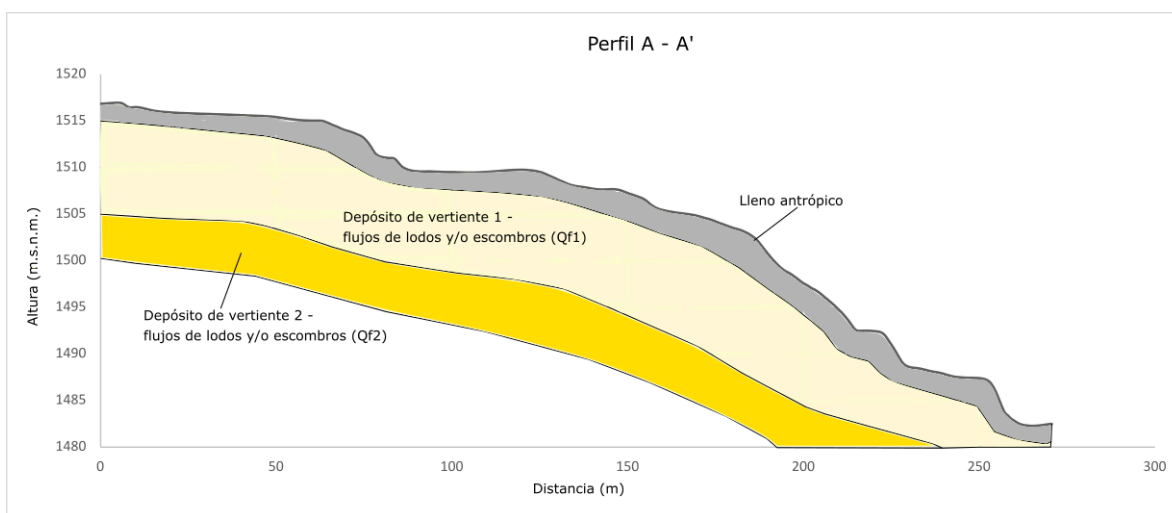


Ilustración 12. Perfil geológico representativo

A continuación, se describen las unidades geológicas y las formaciones superficiales identificadas para la zona de estudio, teniendo en cuenta para su caracterización, los diferentes afloramientos encontrados en los recorridos de campo, las disposiciones estructurales y los sondeos exploratorios ejecutados para el análisis geotécnico (Ilustración 13).



Ilustración 13. Mapa de Unidades Geológicas para Ingeniería

- **Lleno antrópico (QII)**

Esta es la unidad geológica predominante en el área de planificación; se identificó en todos los sondeos exploratorios, presentando espesores que varían entre 1 m y 9 m, registrando el mayor espesor en el sondeo P6 desde la superficie y el menor espesor evidenciado en los sondeos P3, P8 y P9. Los materiales que componen este depósito antrópico se caracterizan por suelos muy heterogéneos, de coloración café oscuro a gris negruzco y tonalidades rojizas y cremas; con textura que varía entre limoarcillosa, arenolimosa y limoarcillosa en los diferentes sondeos, presentando ocasionalmente, raíces y restos vegetales, bloques de diferentes tamaños, algunos restos de ladrillos y presencia de vidrios y plástico, posiblemente, asociados a la depositación de escombros realizados anteriormente en la zona. Particularmente, en el sondeo P2, se presenta mayor humedad y plasticidad que en las demás perforaciones; en la perforación 9 se presenta una transición con la materia orgánica, con presencia de raíces y material vegetal. En general, el material es muy heterogéneo, de humedad media, plasticidad baja a media y consistencia blanda (Fotografía 1).



Fotografía 1. Lleno antrópico

- **Depósitos Depósito de flujos de lodos y/o escombros:**

Esta unidad geológica se identificó en todos los sondeos exploratorios, a partir de la relación matriz/bloques identificados en campo y de las variaciones en color y textura de la matriz observadas en los sondeos exploratorios, se definen 2 tipos de flujos, de los cuales, 1 se cartografió como unidad superficial y el otro flujo, está restringido a su identificación en los sondeos exploratorios. Se precisa que, las características que permitieron diferenciar estos flujos no necesariamente corresponden con diferentes eventos de depositación, es decir, no es posible establecer una temporalidad, pero si pueden dar evidencias de cambios en las propiedades físicas de los flujos que permitieron la mayor o menor acumulación de bloques sobre la superficie y que marcan un contraste representativo en el área de estudio;

se considera importante su diferenciación para dar un manejo adecuado durante la intervención urbanística.

El *Flujo I* se caracteriza por una matriz de textura arcillosa con color pardo amarillento con pintas negras, blancas y naranjas por oxidación; la proporción de bloques es menor que la matriz, y esta relación es aproximadamente de 40% de bloques/ 60% de matriz. Los bloques están distribuidos sobre toda la superficie y pueden alcanzar hasta 2 m de diámetro, cuya composición es de anfibolita y cuarzo, con diferentes grados de meteorización, y forma subangular (Fotografía 2) y se identifica de forma sectorizada en el costado oriental y norte del área de planificación. Su espesor varía entre 3 m y 12 m, identificado en todos los sondeos exploratorios.



Fotografía 2. Depósitos de flujos de lodos y/o escombros.

El *Flujo II* no se identifica sobre la superficie; sin embargo, subyace el Flujo I y, a partir de los sondeos exploratorios P1, P2, P3, P4, P5, P8, P9 y P10, se estima un espesor entre 3 m y 10 m aproximadamente. Su matriz es de color gris verdoso con pintas blancas, presenta oxidación y es de textura arcillosa y arcillolimosa; los clastos están compuestos por fragmentos de anfibolita y cuarzo con alta meteorización y presenta una relación matriz/bloques de 70/30.



Fotografía 3. Flujo II Depósito de flujo de lodos y/o escombros encontrados en los sondeos exploratorios

3.7 MORFOMETRÍA

El mapa de pendientes representa la distribución del grado de inclinación del terreno, definido entre la superficie del terreno y la horizontal. La pendiente, como componente del relieve, se expresa en porcentaje o grados y, para su análisis, se utilizan los rangos preestablecidos para la planificación.

Es importante resaltar que, cada material superficial tiene un comportamiento geomecánico característico, que está fuertemente relacionado con la pendiente donde se localiza; esto, permite evaluar de manera integral, la susceptibilidad a movimientos en masa. Adicionalmente, el desarrollo urbanístico y el uso del suelo están restringidos por esta variable.

Para el área de interés, el mapa de pendientes (Ilustración 14) se obtuvo a partir del levantamiento topográfico realizado en diciembre de 2021. En la Tabla 1 se presenta la distribución, extensión en Hectáreas y porcentajes de área que involucra cada rango de pendientes definido. De acuerdo con lo anterior, en el área de planificación predominan las pendientes inclinadas (33.63%), seguido de las pendientes suaves (27.77%). El porcentaje restante corresponde a pendientes muy suaves con 9.69%; muy inclinadas con el 15.01%, abruptas con el 10.16%, y muy abruptas a escarpadas con 3.69%.

Tabla 1. Distribución de los rangos de pendientes en el área de interés

Rango de Pendientes	Área (ha)	Área (%)
0 - 3 %: Muy Suave	1,36	10,32
3 - 10 %: Suave	4,01	30,34
10 - 25 %: Inclínada	4,14	31,32
25 - 40 %: Muy inclinada	1,71	12,97
40 - 60 %: Abrupta	1,26	9,50
60 - 100 %: Muy abrupta	0,68	5,14
> 100 %: Escarpada	0,05	0,41



Ilustración 14. Mapa de pendientes del área de planificación

Rango de pendientes de 0 al 3% (Muy suave): este conjunto de pendientes representa el 10,32% del área de interés y está distribuido a lo largo de todo el polígono, asociándose principalmente, a las explanaciones realizadas dentro del predio (Fotografía 4).



Fotografía 4. Pendientes muy suaves

Rango de pendientes de 4 al 10% (Suave): Este rango de pendientes ocupa el 30,34% del total del área y se encuentra distribuido a lo largo de toda el área de estudio, principalmente, en los sectores occidental y central. Presenta relación con el rango de pendientes descrito anteriormente (Fotografía 5).



Fotografía 5. Pendientes suaves

Rango de pendientes del 11 al 25% (Inclinada): Este rango de pendientes predomina en la zona de interés; ocupa el 31,32% del total del área y se distribuye hacia los costados noroccidental y suroriental. Presenta relación con el rango de pendientes descrito anteriormente (Fotografía 6).



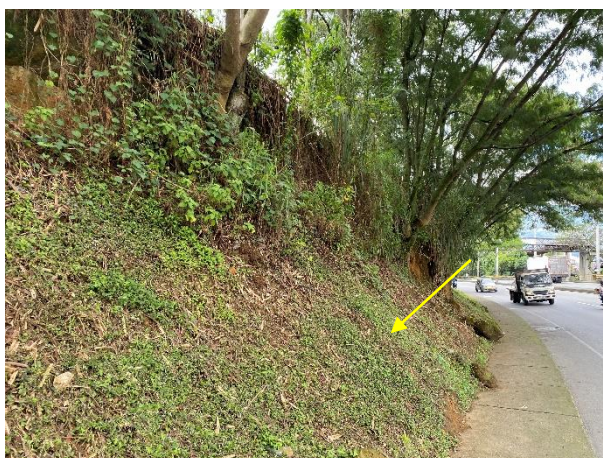
Fotografía 6. Pendientes inclinadas

Rango de pendientes del 26 al 40% (Muy Inclinada): Este conjunto se distribuye en la parte central, oriental y norte del área de interés, representando el 12,97% de la misma; este rango de pendientes se identifica también, en los cortes de las laderas y en las intervenciones antrópicas (Fotografía 7).



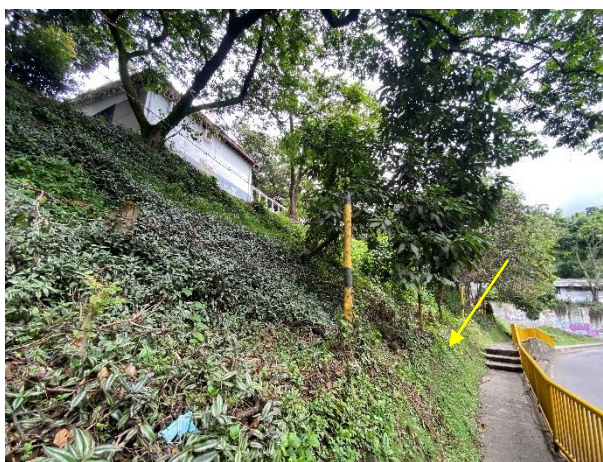
Fotografía 7. Pendientes muy inclinadas

Rango de pendientes del 41 al 60% (Abrupta): Este rango de pendientes se distribuye en el 9,50% del total del área de estudio. Se presenta en pequeñas acumulaciones dispersas hacia el centro y oriente, asociadas a cortes de laderas y a los costados de la quebrada La Culebra (Fotografía 8).



Fotografía 8. Pendientes abruptas

Rango de pendientes > 60% (Muy Abrupta - Escarpada): Corresponde a solo el 5,54% del total del área de interés, asociada principalmente, a los cortes de las laderas ubicados en el sector central y oriental (Fotografía 9).



Fotografía 9. Pendientes muy abruptas - escarpadas

3.8 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Teniendo en cuenta la escala del trabajo, y a partir de las unidades geomorfológicas definidas por AMVA (2007), se han diferenciado los componentes geomorfológicos de acuerdo con las características particulares que exhibe cada uno, entre las que se destacan

el material en el que se encuentran desarrollados, la forma y longitud de la ladera y la inclinación del terreno.

Para la definición de las pendientes, se siguieron los parámetros establecidos en la Tabla 1. Para la definición de la longitud de la ladera, se siguieron los parámetros que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Rangos de longitud de la ladera para la definición de los componentes geomorfológicos

Descripción	Rango (m)
Muy corta	0 – 20
Corta	21 – 40
Moderada	41 – 70
Larga	71 – 100
Muy larga	>100

El rasgo geomorfológico principal, en el área de interés, es un conjunto de superficies en depósito y superficies antrópicas, entre las que se destacan laderas y explanaciones, producto de la intervención que ha tenido el área de planificación, debido a las actividades que actualmente se desarrollan en esta.



Ilustración 15. Mapa geomorfológico local

Cauce aluvial (ca): esta subunidad está asociada con la quebrada La Culebra que drena por el área de planificación (Fotografía 10).



Fotografía 10. Cauce aluvial quebrada La Culebra

Explanación (e): esta subunidad está asociada a las intervenciones antrópicas para el desarrollo de las instalaciones de la escuela de carabineros Carlos Holguín y la estación de policía de Castilla, localizadas en el costado occidental y sur y del área de intervención. En general, son superficies de pendientes muy suaves a inclinadas, sin una forma característica y desarrollada sobre llenos antrópicos y/o los primeros metros del depósito de flujos de lodos y/o escombros 1 (Fotografía 11).



Fotografía 11. Explanación

Ladera en lleno cóncava muy corta abrupta (IIIcvmca): esta subunidad se encuentra localizada hacia el centro-sur del área de interés, asociada a las intervenciones antrópicas de la zona. Se caracteriza por tener una longitud aproximada de 7 m y pendientes muy inclinadas a muy abruptas, de forma característica cóncava. Está desarrollada sobre el lleno antrópico ubicado en este sector (ver Fotografía 12).



Fotografía 12. Ladera en lleno cóncava muy corta abrupta

Ladera en lleno irregular moderada abrupta (Illima): Se localiza hacia el sur de la zona de estudio, a un costado de las instalaciones principales de la escuela de carabineros. Se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 30 m, por ser de forma irregular y por presentar rangos de pendientes que varían de inclinadas a abruptas. Esta subunidad está desarrollada sobre los materiales del lleno antrópico identificado (Fotografía 13).



Fotografía 13. Ladera en lleno irregular moderada abrupta

Ladera en lleno irregular moderada inclinada (Illimi): Esta subunidad se encuentra localizada hacia la zona centro-oriental del área de interés, entre la perrera de la escuela de carabineros y uno de los parqueaderos. Se caracteriza por tener una longitud

aproximada de 33 m y pendientes suaves a muy inclinadas y de forma característica irregular. Está desarrollada sobre materiales antrópicos (Fotografía 14)



Fotografía 14. Ladera en lleno irregular moderada inclinada

Ladera en lleno irregular moderada muy abrupta (Illimma): Se localiza hacia el noroccidente del área de interés, en la margen izquierda de la quebrada La Culebra. Se distingue por tener una longitud aproximada de 30 m, con forma irregular y pendientes que varían de muy inclinadas a muy abruptas. Esta unidad se desarrolla sobre el lleno antrópico identificado en esta zona (Fotografía 15).



Fotografía 15. Ladera en lleno irregular moderada muy abrupta

Ladera en lleno irregular muy corta abrupta (Illimca): Esta subunidad se encuentra localizada en cuatro sectores del área de interés, hacia el suroriente de esta, rodeando la explanación donde se localiza la perrera de la escuela de carabineros y a lo largo de la vía

de acceso hacia la zona norte del área de estudio; hacia el suroccidente, a un costado de la piscina del club Círculo; y hacia el sector norte, en la margen izquierda de la quebrada La Culebra. Se caracteriza por ser una ladera de longitud aproximada de 10 m, de forma irregular u ondulada y con pendientes muy inclinadas a muy abruptas. Esta unidad, igual que las descritas anteriormente, se desarrolla sobre los materiales del lleno antrópico identificado en este sector (Fotografía 16).



Fotografía 16. Ladera en lleno irregular muy corta abrupta

Ladera en lleno irregular muy corta muy abrupta (Illimcma): Esta subunidad se encuentra localizada en tres polígonos hacia el sector central del área de interés, en dos costados de la cancha de la escuela de carabineros y a un costado del campo de tiro. Se caracteriza por tener una longitud entre 9 y 12 m y pendientes muy inclinadas a muy abruptas. Corresponden a laderas conformadas por materiales antrópicos depositados en las intervenciones realizadas para la adecuación de las instalaciones (Fotografía 17).



Fotografía 17. Ladera en lleno irregular muy corta abrupta

Ladera en lleno irregular muy corta muy inclinada (Illimcmi): Se encuentra localizada en el sector central de la zona de estudio, en la margen derecha de la quebrada La Culebra y a un costado del campo de tiro. Se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 12 m, por ser de forma irregular u ondulada y por presentar pendientes que varían de suaves a muy inclinadas. Este componente geomorfológico corresponde al lleno antrópico identificado en este sector (Fotografía 18).



Fotografía 18. Ladera en lleno irregular muy corta muy inclinada

Ladera en lleno irregular muy larga muy inclinada (Illimlmi): Esta subunidad se encuentra en el sector noroccidental del área de estudio, hacia la margen izquierda de la quebrada La Culebra. Se caracteriza por presentar una longitud mayor a 100 m (aproximadamente 118 m), por ser de forma irregular u ondulada y por presentar rangos de pendientes que varían de muy suaves a muy inclinadas. Sobre este componente, se tiene

evidencia de un proceso morfodinámico antiguo que ya fue intervenido y en el que se realizaron obras para estabilizarlo. Este componente geomorfológico se desarrolla sobre los mismos materiales antrópicos identificados a lo largo de este sector (Fotografía 19)



Fotografía 19. Ladera en lleno irregular muy larga muy inclinada

Ladera en lleno recta muy corta muy abrupta (lllrmcma): Se encuentra ubicado en el costado occidental del área de interés, al costado noroccidental de la cancha principal, donde se localiza uno de los parqueaderos de la escuela de carabineros. Se caracteriza por presentar longitudes de aproximadamente 10 m, por ser de forma recta y por presentar rangos de pendientes que varían de abruptas a muy abruptas. Se encuentra desarrollada sobre el lleno antrópico identificado (Fotografía 20)



Fotografía 20. Ladera en lleno recta muy corta muy abrupta

Ladera en lleno recta muy corta abrupta (llrmcmi): Esta subunidad se encuentra localizada en el occidente del área de estudio, en cercanías a la entrada de la escuela de carabineros. Se caracteriza por presentar una longitud de 6 m aproximadamente, por ser de forma recta y por presentar rangos de pendientes que varían de muy inclinadas a abruptas. Este componente se encuentra sobre materiales antrópicos (Fotografía 21)



Fotografía 21. Ladera en lleno recta muy corta abrupta

Terraceo (t): Se encuentra localizado hacia el costado nororiental del área de estudio, asociándose a las obras de intervención para la estabilización del antiguo movimiento en masa ubicado en esta zona. Se caracterizan por presentar una longitud aproximada de 55 m (Fotografía 22).



Fotografía 22. Terraceo

Ladera en lleno irregular corta abrupta (Idica): Corresponde a una ladera localizada en el norte del área de estudio, a un costado de las obras de estabilización del antiguo movimiento en masa; se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 21 m, por su forma ondulada, con pendientes que varían de muy inclinadas a abruptas. Este componente geomorfológico se encuentra desarrollado sobre los materiales antrópicos identificados en el área de interés (Fotografía 23).



Fotografía 23. Ladera en depósito irregular corta abrupta

Ladera en depósito irregular corta muy abrupta (Idicma): estas laderas se encuentran localizadas hacia el centro-occidente y oriente del área de interés, en la margen derecha de la quebrada La Culebra y al costado norte de la perrera de la escuela de Carabineros. Se caracteriza por tener una longitud aproximada de 28 m y pendientes muy inclinadas a

abruptas, de forma característica irregular. Está desarrollada sobre el depósito de flujo de lodos y/o escombros 1, identificado en este sector (Fotografía 24).



Fotografía 24. Ladera en depósito irregular corta muy abrupta

Ladera en depósito irregular corta muy inclinada (Idicmi): Se localiza en dos laderas hacia el costado oriental de la zona de estudio, una de las laderas se encuentra hacia la margen derecha de la quebrada La Culebra y la otra limita a lo largo del polígono de planificación con la Autopista Norte. Se caracteriza por presentar una longitud aproximada de 21 m, por ser de forma irregular y por presentar rangos de pendientes que varían de suaves a muy inclinadas. Esta subunidad está desarrollada sobre el primer evento del depósito de flujo de lodos y/o escombros identificados en el área (Fotografía 25).



Fotografía 25. Ladera en depósito irregular corta muy inclinada

Ladera en depósito irregular muy corta abrupta (Idimca): Este componente se encuentra localizado a lo largo de la zona oriental del área de interés, en la margen derecha de la quebrada La Culebra. Se caracteriza por tener una longitud aproximada de 19 m y pendientes muy inclinadas a abruptas y de forma característica irregular. Está desarrollada sobre depósitos de flujos de lodos y/o escombros 1 (Fotografía 26).



Fotografía 26. Ladera en depósito irregular muy corta abrupta

Ladera en depósito irregular muy corta muy abrupta (Idimcma): Se localiza en dos laderas hacia el nororiente del área de planificación, en ambas márgenes de la quebrada La Culebra. Se distingue por tener una longitud aproximada de 19 m, con forma irregular y pendientes que varían de muy inclinadas a muy abruptas. Esta unidad se desarrolla sobre el primer evento de depósito de flujo de lodos y/o escombros identificados en la zona (Fotografía 27).



Fotografía 27. Ladera en depósito irregular muy corta muy abrupta

Ladera en depósito recta muy corta muy abrupta (ldrmcma): Esta subunidad se encuentra localizada en varias laderas del área de interés, hacia el costado sur y oriente de esta, limitando a lo largo del predio con la Autopista Norte y las explanaciones donde se localizan las instalaciones de la escuela de carabineros. Se caracteriza por ser una ladera de longitud aproximada de 13 m, de forma recta y con pendientes muy inclinadas a muy abruptas. Esta unidad, igual que las descritas anteriormente, se desarrolla sobre el primer evento de depósitos de flujo de lodos y/o escombros identificados (Fotografía 28).



Fotografía 28. Ladera en depósito recta muy corta muy abrupta

3.9 MORFODINÁMICA

El análisis de las fotografías aéreas, sensores remotos y recorridos de campo, permiten identificar las características relacionadas con los movimientos en masa y procesos erosivos que constituyen los procesos morfodinámicos. En general, solo se identifica una zona afectada por un movimiento en masa activo en el área de interés, sector de El Patio (Fotografía 29). Así mismo, se identifica una cicatriz de un movimiento en masa, al noreste de la zona de estudio, asociado con un evento que se presentó con anterioridad y afectó hasta la autopista norte; sin embargo, se clasifica como inactivo, a partir de las evidencias como la vegetación alta y la obra de mitigación desarrollada para la contención.

Este movimiento ocurrió en el año 2008; se trató de un deslizamiento de tipo rotacional con un fuerte levantamiento en la base del talud que afectó la estructura de pavimento de la Autopista Norte en una longitud aproximada de 100m. El origen de este movimiento tuvo dos factores fundamentales: el primero, relacionado con las cargas colocadas como consecuencia de la conformación del lleno de escombros; en segundo lugar, la ausencia de un sistema de drenaje al interior del lleno que evitara la saturación causada por la baja permeabilidad de este material, el caudal proveniente de aguas sub-superficiales y las altas

tasas de precipitación ocurridas durante todo el año. Este conjunto de circunstancias produjo una carga que superó la resistencia del suelo de la fundación, ocasionando este proceso. Este movimiento en masa produjo daños severos sobre aproximadamente 100 m de vía, así mismo, sufrieron daños tuberías de acueducto y alcantarillado de propiedad de EEPPM que atravesaban la base del talud en cuestión.



Fotografía 29. Proceso morfodinámico activo en el sector El Patio.



3.10 GEOTECNIA

3.10.1 Inspección del entorno:

Con el fin de caracterizar de manera integral la zona de estudio, se programaron de manera inicial, visitas a campo por parte del equipo técnico, conformado por Ingenieros civiles, geólogos y geotecnistas, quienes, a partir de los recorridos de campo, definen las condiciones físicas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas principales de los terrenos a evaluar, permitiendo una mejor planificación de las actividades mismas de diagnóstico del presente plan.

3.10.2 Análisis de la información disponible en el estudio previo

En el mes de diciembre del año 2008, la firma INTEINSA S.A. llevó a cabo en este mismo lote, un estudio geotécnico titulado ““DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008”, donde se contemplaban los análisis geológicos, geomorfológicos, hidráulicos y geotécnicos que permitieran definir las obras de estabilización y/o mitigación a implementar para controlar un deslizamiento de tipo rotacional con un fuerte levantamiento en la base del talud que afectó la estructura de pavimento de la Autopista Norte en una longitud aproximada de 100 m.

Como indica el informe, “...El sitio afectado se encuentra localizado en el sector Toscana, en inmediaciones de la Escuela de Policía Carlos Holguín, entre las calles 111A y 113A, 500 m antes del límite con el Municipio de Bello.”

Para la elaboración del estudio geotécnico, se realizaron diferentes sondeos como apiques y perforaciones, donde se definió de forma generalizada, el perfil estratigráfico del talud afectado:

“Lleno. Apique AP1 de 1m de profundidad. Se encontró material de lleno compuesto por una matriz arcillosa color amarillo, de alta plasticidad y completamente saturada con bloques angulares de tamaño variable. A 90cm se presentó un flujo de agua al interior de la masa de suelo.

Depósito Maduro. Apique AP2 y AP3 de 1.10 m de profundidad. Se identificó un suelo residual de un depósito de escombros maduro. Está compuesto por una matriz arcillosa de color amarillo de humedad y plasticidad media con bloques angulares de tamaño variable. Estudios geológicos en este sector describen esta formación como un depósito de gran espesor fuertemente consolidado (MZAM, 2008).”

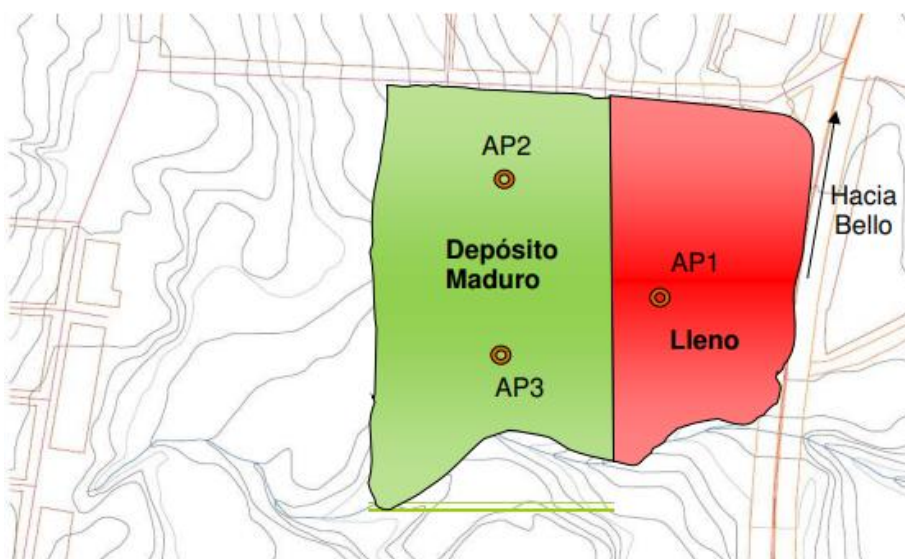


Ilustración 17. Localización de apiques exploratorios 1.

En términos de exploración profunda, “se ejecutó una perforación hasta 18.50m de profundidad con el propósito de identificar los materiales del sitio y determinar alguna característica de resistencia, que permita definir con algún grado de certeza la profundidad de la obra que debe ser diseñada para la estabilidad del sitio a largo plazo.”

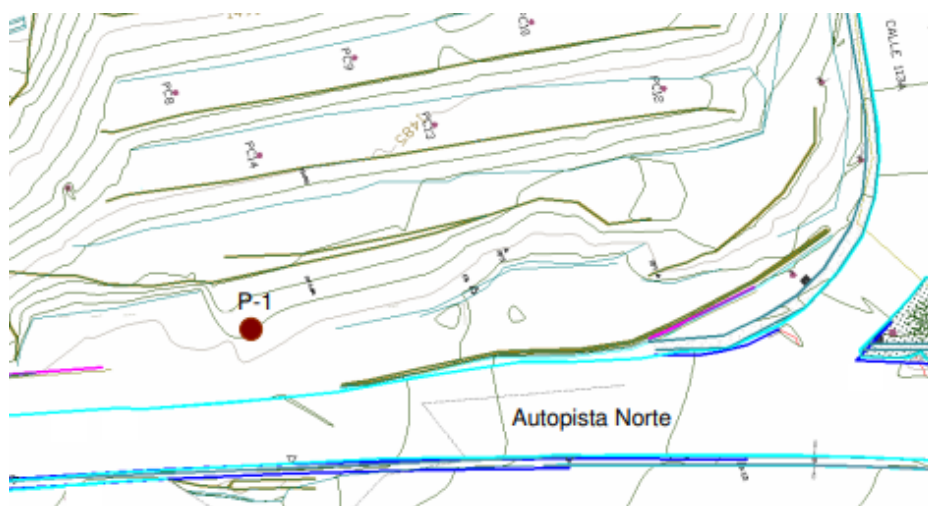


Ilustración 18. Ubicación de la perforación con taladro rotatorio. P1 2.

1 INTEINSA (2008). “DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008. Medellín.

2 INTEINSA (2008). “DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008. Medellín.

A partir de este sondeo, se definió el perfil estratigráfico como:

Profundidad (m)	Descripción
0.0 – 0.5	Lleno antrópico compuesto por un suelo de color pardo amarilloso a café, con tintes grisáceos, textura arcillosa con gravas intercaladas, de plasticidad y humedad alta. Se encuentran fragmentos de roca meteorizada y suelo orgánico en menor cantidad (restos de plantas).
2 – 4.50	Material compuesto por un suelo de color café amarilloso de tintes grises, con fragmentos de roca angulosos de hasta 2 cm en un 30%. Posee textura limosa, humedad alta y plasticidad media.
5.80 – 18.2	Material tipo flujo de escombros. Su matriz está compuesta por un suelo de color café amarilloso a gris verdoso. Textura limosa, humedad alta y plasticidad media. Se encuentran fragmentos de roca de hasta 30 cm en un 60%

Ilustración 19. Descripción de perforación con taladro rotatorio 3.

El diseñador procedió a ejecutar el respectivo análisis de estabilidad del sector afectado, considerando tres escenarios:

- Caso 1, condición inicial del terreno antes del deslizamiento.
- Caso 2, condición actual del terreno.
- Caso 3, condición proyectada con soluciones recomendadas.

A partir de dichos análisis, se dieron las siguientes recomendaciones para “garantizar las condiciones de estabilidad a largo plazo en el sitio”:

- “Cambio de la geometría del talud a través de la conformación de bermas de la siguiente manera: Una berma inferior de 6m de altura y 6m de ancho con talud 1.5H:1V. La berma superior con una altura entre 4m y 5m y un ancho de 5m, manteniendo la pendiente 1.5H:1V.”
- “Abatimiento del nivel freático y captación de las posibles aguas que se estén infiltrando en toda la masa de escombros, por medio de la construcción de filtros y cunetas en la parte superior del talud.”
- “Construcción de una estructura de contención acompañada con un sistema de filtro en su parte posterior con dos propósitos: a) detener el movimiento de la masa deslizada al tiempo que se evita la ocurrencia de nuevos deslizamientos al que es

3 INTEINSA (2008). “DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008. Medellín.

susceptible este material (material de lleno) y b) disminuir la carga de agua a través del abatimiento de las aguas que se infiltran en la masa de suelo.”

En detalle, las obras de estabilización comprenden:

SISTEMA DE DRENAJE SUPERIOR

“Este sistema está compuesto por un sistema de filtro y cuneta conectados a un canal escalonado para el vertimiento hacia la quebrada cercana, de modo que no se genere problemas de estabilidad en los taludes de esta quebrada. El alineamiento de este sistema tiene el propósito de interceptar las aguas de infiltración y escorrentía proveniente de la parte superior del terreno.”

“Este paquete de obras incluye la construcción de un canal escalonado que recoja y descargue las aguas hacia la quebrada. Debido a las malas condiciones del material de fundación y al caudal interceptado por el filtro y las cunetas, requiere de una estructura robusta desde el punto de vista estructural y de fundación del mismo.”

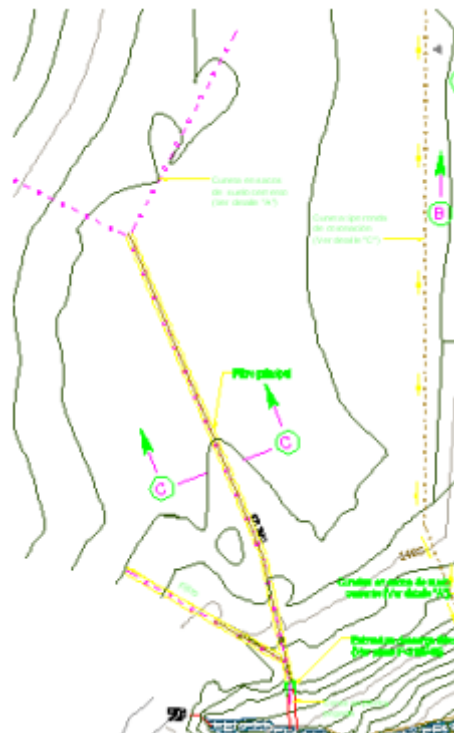


Ilustración 20. Disposición de obras de drenaje superior 4.

4 INTEINSA (2008). “DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008. Medellín.

CONFORMACIÓN DE BERMAS

“Esta obra constituye la actividad más importante para la solución de estabilidad del sitio. Las condiciones en que fue dispuesto el material de lleno en el sitio no cumple los requerimientos técnicos para este tipo de obras; así que con el propósito de detener el movimiento ocasionado por el peso de este material y con ello el levantamiento paulatino de la vía y con ello disminuir la amenaza de deslizamientos posteriores. Se propone la construcción de 5 bermas que mantengan una pendiente 1.5H:1V con una berma inferior de 6m de altura y 6m de ancho y las bermas siguientes con una altura entre 4 y 5m de altura. El volumen aproximado de material que debe ser retirado, para cumplir los requerimientos de estabilidad propuestos en este numeral, es de 21000 m³.”

“Para el proceso de conformación de estas bermas se recomienda la descarga de material a través de dos etapas: Etapa 1: remoción de material sobre el lado derecho de la zona afectada de manera ascendente hasta alcanzar la cota de la cicatriz principal del deslizamiento. Etapa 2: remoción de material desde la parte superior de la zona afectada hasta el paramento de la vía.”

“Las bermas deben conformarse manteniendo una pendiente de 1% hacia el talud y la misma pendiente hacia la quebrada. Sobre la base de estos taludes se dispondrá una cuneta en medio tubo de 40 cm (MT-40) para descargar las aguas de escorrentía y evitar infiltraciones al interior del talud. Para descargar estas aguas se propone una serie de canales en piedra pegada para evitar procesos de socavación en el cauce de la quebrada que origine movimientos posteriores.”

“En la parte superior del talud se propone la construcción de una cuneta tipo ronda de coronación en sacos de suelo cemento (sistema de 3 sacos) combinada con un sistema de agromanto (Landlok 435) para la protección de las paredes. La pendiente de esta cuneta es de 1% hacia la quebrada.”



Ilustración 21. Conformación final de bermas y obras de drenaje complementarias 5.

5 INTEINSA (2008). “DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008. Medellín.

ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

“Para detener el movimiento generado para la disposición del lleno cuando se hagan las excavaciones para la rehabilitación de la vía y para confinar el lleno, se propone como medida de estabilidad la construcción de un muro de contención de 2.50m de altura apoyado en 18 pilas de 1.30m de diámetro espaciadas 3.25m entre ejes. Esta estructura va acompañada por un sistema de filtro que consiste en un lleno en material granular y un colector ubicado en la parte posterior del muro compuesto por dos (2) tuberías con un diámetro de 0,254 m (10”). Debido a las condiciones topográficas del sector y a la imposibilidad de emplear sistemas de drenaje existentes a causa de las normativas de EPM, fue necesario buscar un sistema que permitiera drenar las aguas interceptadas en la parte posterior del muro hacia la quebrada existente. Como parte del sistema de vertimiento de este colector se propone la construcción de un canal escalonado con una altura aproximada de 3.1m que permite dicho vertimiento sin generar problemas de estabilidad en la quebrada.”

“Según las condiciones del suelo encontradas durante el proceso de exploración, la profundidad aproximada de la superficie de falla esta a los 4m a partir del nivel actual del terreno. Teniendo en mente esta profundidad se recomienda un empotramiento mínimo de pilas de 6m por debajo del nivel definitivo de la vía. Esta profundidad deberá ser inspeccionada y aprobada por la interventoría y la consultoría, puesto que se debe garantizar un empotramiento mínimo de 4m en el flujo de escombros maduro.”

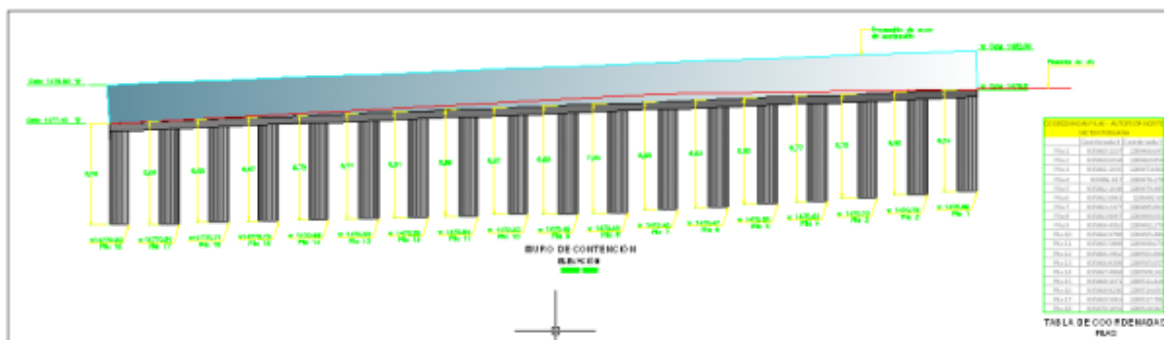


Ilustración 22. Muro de contención. Espaciamiento y profundidad de pilas 6.

3.10.3 Sondeos

Para conocer los materiales que componen el subsuelo, se realizó un programa de exploración compuesto por 10 sondeos ejecutados a rotopercusión denominadas en este trabajo, desde P1 hasta P10, alcanzando profundidades de entre 15.0 m y 15.5 m.

6 INTEINSA (2008). “DIAGNOSTICO Y DISEÑO DE OBRAS GEOTÉCNICAS PARA LA INESTABILIDAD OCURRIDA EN EL SECTOR TOSCANA – AUTOPISTA NORTE. MUNICIPIO DE MEDELLÍN.” CON BASE EN LA URGENCIA MANIFIESTA DECLARADA EL 10 DE JULIO DE 2008. Medellín.

El programa de investigación de subsuelo se desarrolla con la ejecución de perforaciones en el terreno; caracterizadas por tener pequeños diámetros entre 65 y 100 mm, de los cuales, es posible la recuperación de testigos de los diferentes substratos del terreno que, posteriormente, son descritos y analizados en el laboratorio, construyendo a partir de estos, un perfil estratigráfico de la zona.

En cada uno de los sondeos exploratorios se lleva a cabo el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m en los materiales de suelo, donde esto fue posible. Esta prueba permite determinar características físicas y mecánicas de los suelos a través de la obtención de muestras remoldeadas. El ensayo de penetración estándar evalúa de manera indirecta la compacidad o consistencia de los suelos en profundidad y consiste, según la norma ASTM D – 1586, en dejar caer un martillo de 63,5 Kg. de peso sobre una barra de perforación desde una altura de 76,2 cm. En este ensayo se obtiene el número de golpes necesarios para introducir el muestreador estándar “Split Spoon” 30 cm en el suelo, dato que es definido como N (Número de golpes). A partir del número de golpes, del tipo de suelo y mediante el uso de correlaciones internacionalmente conocidas, es posible estimar las propiedades y parámetros geo-mecánicos de los diferentes estratos identificados.

Las perforaciones se localizan estratégicamente en diferentes sitios con el fin de obtener la mayor información posible del subsuelo (Ilustración 23). En la siguiente tabla, se presenta el estado de las perforaciones y la profundidad alcanzada en cada sitio:

Tabla 3. Sondeos exploratorios

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)
P1	15,0
P2	15,5
P3	15,5
P4	15,0
P5	15,0
P6	15,5
P7	15,0
P8	15,5
P9	15.15
P10	15.5



Ilustración 23. Localización de sondeos

En las siguientes fotografías, se muestra la ejecución de cada uno de los sondeos:



Fotografía 30. Sitio donde se realizó el sondeo P1.



Fotografía 31. Sitio donde se realizó el sondeo P2.



Fotografía 32. Sitio donde se realizó el sondeo P3.



Fotografía 33. Sitio donde se realizó el sondeo P4.



Fotografía 34. Sitio donde se realizó el sondeo P5.



Fotografía 35. Sitio donde se realizó el sondeo P7.



Fotografía 36. Sitio donde se realizó el sondeo P8.



Fotografía 37. Sitio donde se realizó el sondeo P9.



Fotografía 38. Sitio donde se realizó el sondeo P10.

3.10.4 Ejecución de ensayos de campo y toma de muestras:

Como se mencionó anteriormente, en los sondeos exploratorios se recuperaron muestras remoldeadas tomadas con muestreador estándar “Split Spoon” y, adicionalmente, se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada “Shelby”. Los materiales encontrados fueron debidamente caracterizados para elaborar las columnas estratigráficas.

De cada ensayo de SPT realizado, se recupera una muestra de 45 cm de longitud, que permite, además de medir la resistencia a la penetración de la cuchara normal de muestreo (Split Spoon), deducir conceptos relativos a las propiedades cualitativas del material, su génesis y clasificación estratigráfica. Las muestras representativas de cada paquete estratigráfico son enviadas al laboratorio de suelo.



Fotografía 39. Muestreador estándar o cuchara partida (Split Spoon) para el ensayo SPT

Las muestras recuperadas con la cuchara normal de muestreo (Split Spoon), se denominan muestras alteradas, y son almacenadas en bolsas plásticas; cuando durante la ejecución de la perforación, el muestreador estándar es cambiado por un muestreador tipo tubo de pared delgada (Shelby), es posible recuperar muestras inalteradas usadas en ensayos que permiten la determinación directa de parámetros de resistencia de los materiales. En la Fotografía 40 se presenta un ejemplo del muestreador de pared delgada (shelby) utilizado para la toma de muestras inalteradas.



Fotografía 40. Muestreador de pared delgada

3.10.5 Análisis de laboratorio

Las muestras recuperadas en campo fueron clasificadas visualmente en el momento de ejecución de los sondeos para, posteriormente, ser enviadas al laboratorio, donde el personal especialista del proyecto, las revisó, evaluó, caracterizó y correlacionó con respecto a la información recuperada en campo, con la finalidad de definir las muestras representativas de cada unidad estratigráfica, a las cuales, se les practicaron los ensayos de identificación de sus propiedades de estado (humedad natural, granulometría, límites de consistencia, índice de plasticidad) y parámetros de resistencia (corte directo CD).

El análisis de laboratorio está encaminado a determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, y a partir de estos, obtener un diagnóstico del posible comportamiento del suelo.

Una vez finalizada la etapa de exploración, junto con la posterior revisión de las muestras, estas se envían al laboratorio para la realización de diversos ensayos que permitan determinar las características físicas, hidráulicas y mecánicas de los materiales encontrados en la zona; entre los ensayos realizados se encuentran: humedad natural, límites de Atterberg, granulometría por lavado sobre malla 200 y granulometría por hidrómetro, permeabilidad, corte directo y consolidación. En la Tabla 4 se presenta el tipo y cantidad de ensayos de laboratorio ejecutados.

Tabla 4. Resumen Ensayos de Laboratorio.

TIPO DE ENSAYO	CANTIDAD
Humedad natural	29
Granulometría	29
Límites de Atterberg	29
Corte directo CD	10

En el Anexo 1-Registro de sondeos exploratorios, se presenta la estratigrafía y los resultados de laboratorio de cada uno de los sondeos.

A partir de los resultados obtenidos, se realiza un análisis detallado de los resultados de cada ensayo, tratando de determinar los rangos en los que se encuentran los parámetros físicos y mecánicos de cada formación encontrada y como representan estos valores el comportamiento esperado de estos materiales.

3.10.6 Estratigrafía y propiedades índice de los suelos

Una vez culminado el programa de exploración e investigación del subsuelo, las muestras recolectadas en cada sondeo son analizadas, describiendo sus características físicas, construyendo así, un perfil estratigráfico del terreno, complementándose con los resultados de los análisis de laboratorio.

Para el polígono en estudio, se encontró que, de manera superficial, se encuentran llenos antrópicos, subyacidos por depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y escombros en lo que logran diferenciarse dos (2) variaciones, nombrados en este informe como depósito de vertiente 1 y 2.

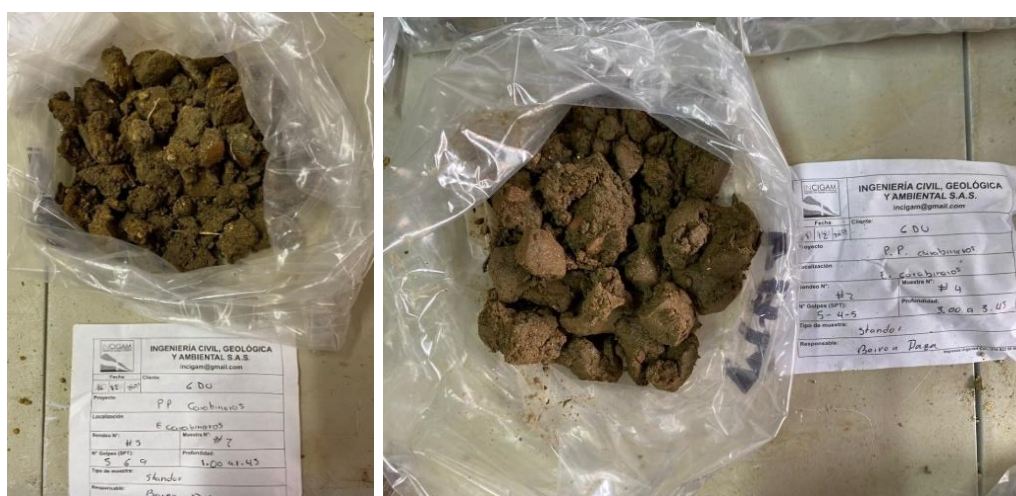
Los materiales antrópicos identificados pueden alcanzar espesores entre 4m y 9 m, encontrando de manera sectorizada, espesores de hasta 1.0 m, que se identifican en los sondeos P3, P8 y P9, caracterizado por suelos de colores late oscuro a café oscuro con algunos sectores verdes y con textura arcilloarenosa muy plástica, con presencia de raíces y materia orgánica, clastos heterogéneos en composición y tamaño (fragmentos de vidrio, ladrillo, entre otros). Seguido, se halla el depósito de vertiente 1, alcanzando espesores entre 5 m y 12 m aproximadamente, conformándose por materiales de color pardo amarillento principalmente matriz-soportado (60-40%), algo plásticos, de humedad variable, haciéndose más húmedo con la profundidad; ocasionalmente, presencia de materia orgánica. Finalmente, subyaciendo el estrato antes descrito, se presenta una variación del depósito, nombrándose como depósito de vertiente 2, que se identifica a partir de profundidades entre 5 m y 13 m y se extienden hasta el final de los sondeos, compuesto por matriz-soportado (80-20%) de coloración gris verdoso con pintas blancas, con un poco de oxidación y textura arcillo-limosa muy plástica. Se encuentran clastos hasta de tamaños centimétricos con formas subangulares.

A continuación, se hace una descripción más detallada de cada estrato.

Llenos Antrópicos (QII)

Se identifica en cada uno de los sondeos ejecutados desde la superficie y hasta profundidades de 9.0 m, que corresponden a depósitos artificiales (conformados por el

hombre) producto de la depositación sobre la superficie de materiales heterogéneos sin ninguna conformación geotécnica, que pueden llegar a tener una extensión y espesor importantes. En las perforaciones analizadas se encuentra el lleno antrópico con un espesores entre 1.0 m y 9 m, registrando el mayor espesor en la perforación P6 ubicada en el costado oriental del lote, conformado por suelos de textura arenolimososa a arcilloarenosa, de color café oscuro a rojizo, ocasionalmente tonos grisáceos, con presencia de raíces y materia orgánica, clastos subangulares de composición y tamaños heterogéneos, se encuentran fragmentos de ladrillo, cuarzo, vidrio, basura, entre otros, materiales húmedos (Fotografía 41).



Fotografía 41. Llenos antrópicos encontrados en los sondeos exploratorios

De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio para las muestras analizadas, se presentan las siguientes variaciones para las diferentes propiedades índice:

Clasificación USCS: Limos de alta plasticidad (MH) con variaciones a arcillas de baja plasticidad (CL) y arenas arcillosas (SC)

Humedad natural: 16.4%- 43.0%

Límite Líquido: 37.4% - 66.4%

Índice Plástico: 13.9% - 30.1%

Flujos de lodos y/o escombros (NQFI, QFIII):

A partir de la relación matriz/bloques y de las variaciones en color y textura de la matriz observadas en los sondeos exploratorios, se definen 2 tipos de flujo. Se precisa que, las características que permitieron diferenciar estos flujos no necesariamente corresponden con diferentes eventos de depositación, es decir, no es posible establecer una temporalidad, pero si pueden dar evidencias de cambios en las propiedades físicas de los

flujos que permitieron la mayor o menor acumulación de bloques y que marcan un contraste en el área de estudio.

El *flujo I*, identificado en cada uno de los sondeos, a partir de profundidades entre 1.0 m y 9.0 m, subyaciendo el estrato antrópico descrito en párrafos anteriores, puede alcanzar espesores desde 4.0 m a 12 m aproximadamente, sin tener totalmente definido este espesor máximo, pues en algunos sondeos como P6 y P7, ubicado en la zona centrooriental y occidental del polígono, el estrato se extiende hasta las profundidades máximas exploradas. Los materiales que componen este estrato se caracterizan por ser matriz soportado con una relación 60%-40%, la matriz es de textura arcillosa muy plástica, color pardo amarillenta con sectores negros y blancos, presenta oxidaciones y meteorización, los clastos son subangulares, de distintos tamaños que alcanzan hasta 20 cm a mayor profundidad, no se encuentra materia orgánica en la mayoría de los sondeos, exceptuando sondeos P3 y P4 en donde logró identificarse parcialmente. La matriz es más homogénea que los clastos (Fotografía 42).



Fotografía 42. Flujo I Depósito de flujo de lodos y/o escombros encontrados en los sondeos exploratorios

De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio para las muestras analizadas, se presentan las siguientes variaciones para las diferentes propiedades índice:

Clasificación USCS: Limo de alta plasticidad (MH) con variaciones a arcillas de alta plasticidad (CH) y arcillas de baja plasticidad (CL)

Humedad natural: 25.9%- 46.9%

Límite Líquido: 48.6% - 70.6%

Índice Plástico: 23.8% - 40.1%

El *flujo II* se caracteriza por ser matriz soportado con una relación entre 70%-30% y 60% - 40%, con una matriz de textura arcillolimoso muy plástica a arcilloarenosa en algunos sectores, de coloración gris verdosa con sectores blancos y café amarillentos, presenta oxidaciones. En general, es un material muy homogéneo en todas las muestras; los clastos son más heterogéneos, de forma subangulares, diferentes tamaños (hasta centimétricos) y composición, se conservan algunos fragmentos de plagioclasas, hay presencia de bloques frescos de gran tamaño, de composición tipo Anfibolita, con materia orgánica ocasionalmente. Se halla en cada uno de los sondeos ejecutados, a excepción de las perforaciones P6 y P7, a partir de profundidades entre 5 m y 13.0 m, y se extiende hasta las profundidades máximas exploradas (Fotografía 43)



Fotografía 43. Flujo II Depósito de flujo de lodos y/o escombros encontrados en los sondeos exploratorios

De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio para las muestras analizadas, se presentan las siguientes variaciones para las diferentes propiedades índice:

Clasificación USCS: Limo de alta plasticidad (MH) con variaciones a arcillas de alta plasticidad (CH), arenas arcillosas (SC) y gravas arcillosas (GC)

Humedad natural: 21.4%- 52.6%

Límite Líquido: 38.6% - 74.0%

Índice Plástico: 16.0% - 38.6%

3.10.7 Condiciones geotécnicas especiales

En algunos materiales, se presentan ciertos fenómenos o condiciones que pueden generar inconvenientes a corto y largo plazo, a las diferentes obras y estructuras que se encuentren sobre estos; debido a esto, se debe evaluar la susceptibilidad del suelo a presentar estas condiciones y la magnitud de sus efectos.

○ **Potencial de expansión**

Algunos materiales poseen la característica especial de contraerse al perder humedad y expandirse cuando la ganan de nuevo. Se puede estimar de manera aproximada, el potencial de expansión del material, a partir de sus límites de consistencia, como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 5. Clasificación de suelos expansivos a partir del límite líquido.⁷

Potencial de expansión	Límite líquido LL, en (%)
Muy alto	> 63
Alto	50 – 63
Medio	39 – 50
Bajo	< 39

Tabla 6. Clasificación de suelos expansivos a partir del índice plástico (Raman 1967).

Índice plástico (%)	Clasificación
<12	Bajo
12-23	Medio
23-32	Alto
>32	Muy Alto

Como se puede observar en las siguientes ilustraciones, los valores de límite líquido e índice plástico de los materiales encontrados, los clasifican con un potencial de expansión bajo a muy alto.

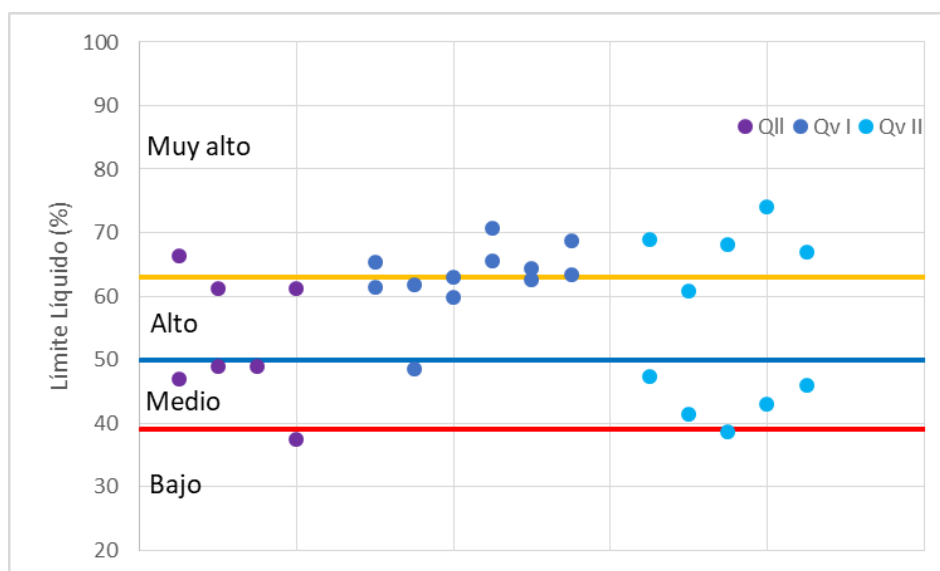


Ilustración 24. Potencial de expansión a partir del límite líquido

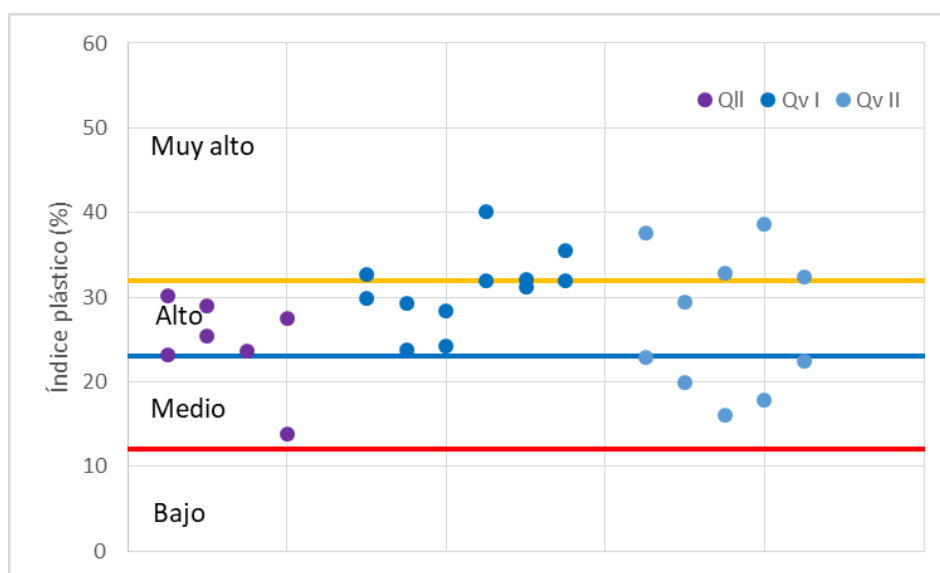


Ilustración 25. Potencial de expansión a partir del índice plástico

Como el potencial de expansión de los materiales encontrados puede ser muy alto, eventos constantes de recarga y descarga de agua podrían generar cambios cíclicos del volumen que pueden llegar a ser perjudiciales para las estructuras que se encuentren sobre el suelo, ya que se pueden presentar grietas y fisuras en ella, además de otros daños que, eventualmente, pueden comprometer la seguridad, por lo que, se debe realizar un estricto

manejo de aguas en la zona a intervenir con el fin de evitar la entrada o salida excesiva de agua en el suelo, en las zonas donde se proyecten estructuras apoyadas en estos materiales.

○ **Potencial de colapso**

Se definen como suelos colapsables aquellos depósitos formados por arenas o limos, en algunos casos cementados por arcillas y sales (carbonato de calcio), que, si bien resisten cargas considerables en su estado seco, sufren pérdidas de su conformación estructural, acompañadas de severas reducciones en el volumen exterior cuando se aumenta su humedad o se saturan⁸. Debido a la naturaleza y composición del suelo, se debe verificar la susceptibilidad al colapso que este posee, así:

Para que el material sea colapsable, se debe cumplir la siguiente relación

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_{dcrit}} \leq 1$$

Donde: $\gamma_{dcrit} = \frac{\gamma_w}{\left(\frac{1}{G_s}\right) + w_L}$

γ_d : Peso unitario seco del suelo

γ_{dcrit} : Peso unitario seco crítico del suelo.

γ_w : Peso unitario del agua

G_s : Gravedad específica.

w_L : Humedad del límite líquido

Así, tomando los datos de gravedad específica, límite líquido y peso unitario seco de las muestras inalteradas, se calculó el potencial de colapso.

Tabla 7. Potencial de colapso muestras inalteradas.

MUESTRA	P1-M2	P2-M6	P6-M11	P7-M4	P8-M6	P9-M3	P9-M6	P9-M9	P10-M5	P10-M11
ESTRATO	QII	Qv I	Qv I	QII	Qv I	Qv I	Qv II	Qv II	QII	Qv II
γ_w (g/cm ³)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
G_s	2.59	2.57	2.53	2.56	2.61	2.56	2.5	2.64	2.55	2.57
WL (%)	47.0	61.8	63.4	61.1	48.6	70.6	69.0	41.5	37.4	43.0
γ_{dc} (g/cm ³)	1.17	0.99	0.97	1.00	1.15	0.91	0.92	1.26	1.30	1.22
γ_d (g/cm ³)	1.45	1.33	1.09	1.44	1.44	1.19	1.04	1.62	1.30	1.30
γ_d/γ_{dc}	1.24	1.34	1.13	1.44	1.25	1.30	1.13	1.28	0.99	1.06

Las relaciones de pesos unitarios obtenidas indican una condición estable para la mayor parte de las muestras, solo con un resultado en valor “límite” (P10-M5); por tanto, se considera que, en términos generales, el material no posee potencial considerable al colapso.

○ **Potencial de licuación**

Inicialmente, se usa el método analítico propuesto por Kishida (1969), ajustado por Ohsaki (1970), el cual considera, se deben cumplir las siguientes condiciones para que se presente el fenómeno de licuación:

1. El nivel freático está cerca de la superficie
2. Las características granulométricas satisfacen las siguientes relaciones:
 $2 \text{ mm} > D_{50} > 0,074 \text{ mm}$
 $C_u < 10$
3. El espesor del estrato de suelo no licuable, arriba del licuable, es menor que 8 m
4. La relación entre el espesor del estrato no licuable y el licuable, es menor que 1
5. La presión efectiva de confinamiento ($\sigma'c$) es menor que 2 Kg/cm^2
6. La compacidad relativa (C_r) es menor que el 75 %.
7. El número de golpes en la prueba de penetración estándar (NSPT) es menor que dos veces la profundidad expresada en metros.

La ausencia generalizada del nivel freático a bajas profundidades en los sondeos ejecutados hace que no se cumpla con la condición 1.

En términos generales, los materiales encontrados en la zona son de carácter mixto, por lo que, se identificaron algunas muestras gruesogranulares que cumplen con el valor de D_{50} de la condición 2. Debido a que, en estos materiales, se encontraron contenidos considerables de suelo finogranular, no fue posible determinar de forma precisa el valor de D_{10} ; sin embargo, se conoce que este es inferior al tamaño de abertura de la malla N°200 (0.075 mm).

Tabla 8. Valores de C_u para muestras gruesogranulares.

Muestra	D60 (mm)	D10 (mm)	C_u
P2-M12	1.268	<0.075	≥ 17
P6-M8	0.315	<0.075	≥ 4
P8-M16	4.552	<0.075	≥ 61
P9-M9	0.381	<0.075	≥ 5
P9-M14	1.006	<0.075	≥ 13
P10-M5	0.303	<0.075	≥ 4

Muestra	D60 (mm)	D10 (mm)	Cu
P10-M11	0.954	<0.075	≥13

Así, se determina que, para tres de las siete muestras gruesogranulares analizadas, existe la posibilidad de que sean lo suficientemente uniformes para licuarse, según la condición 2.

El número de golpes obtenido en la prueba de penetración estándar mencionado en el numeral 7, se cumple en algunos de los tramos analizados de los sondeos P2, P4, P5, P6, P8 y P10.

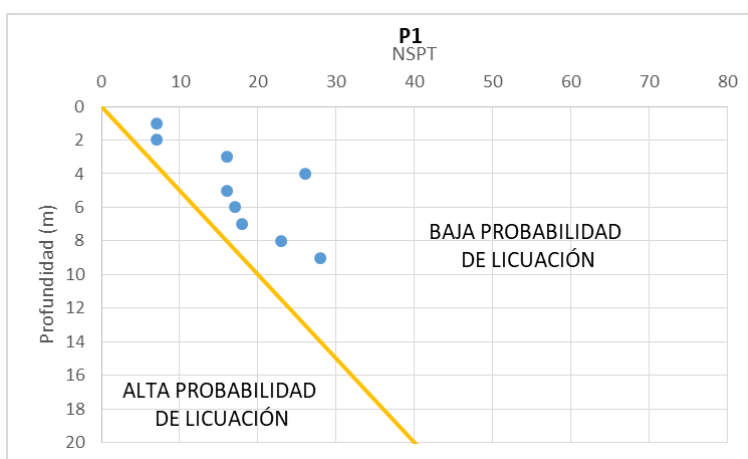


Ilustración 26. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P1

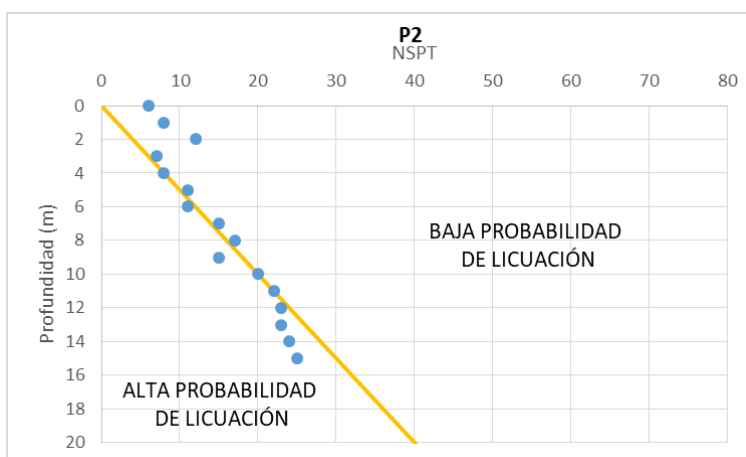


Ilustración 27. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P2

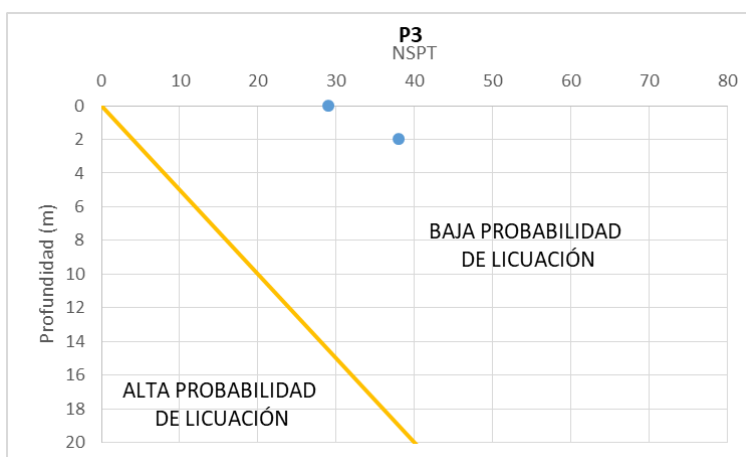


Ilustración 28. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P3

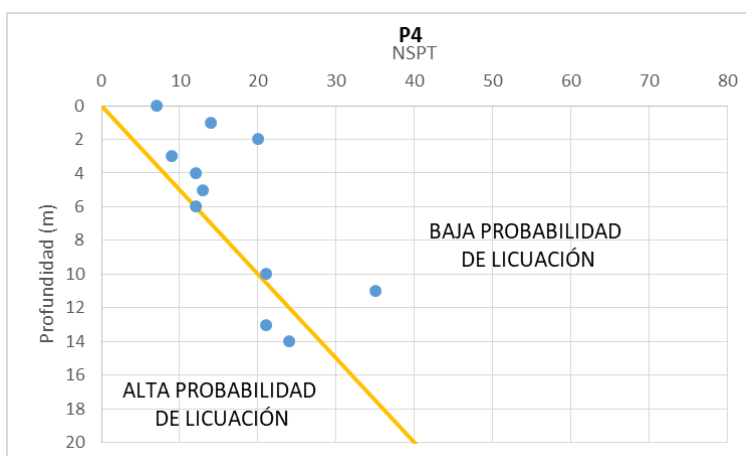


Ilustración 29. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P4

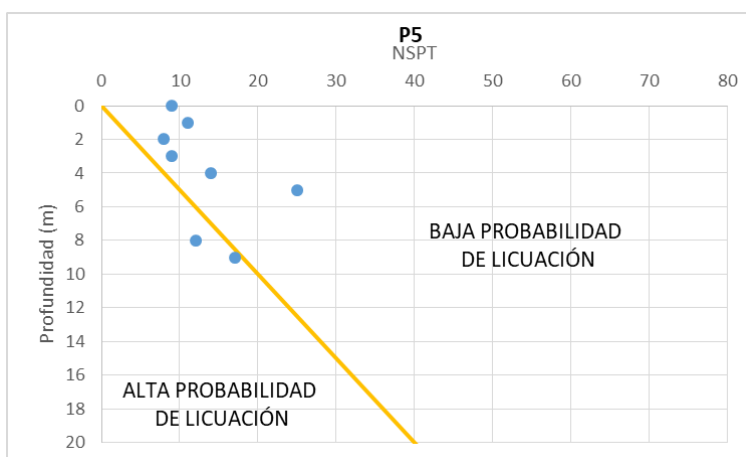


Ilustración 30. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P5

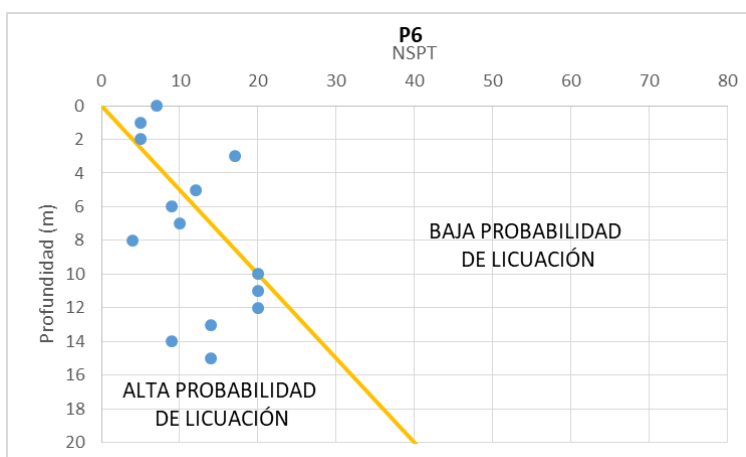


Ilustración 31. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P6

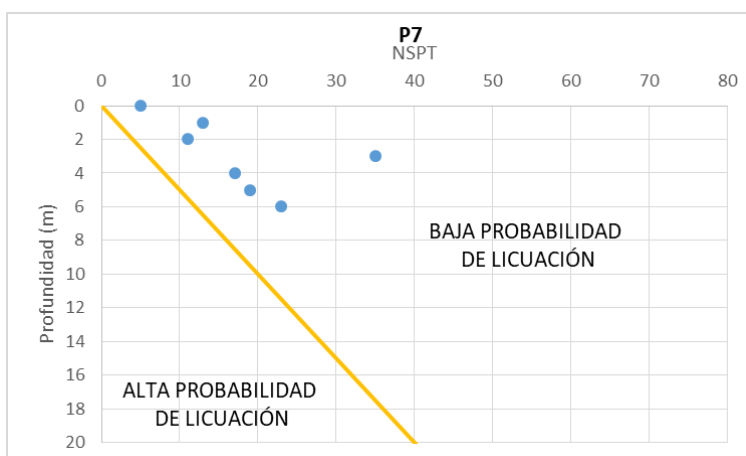


Ilustración 32. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P7

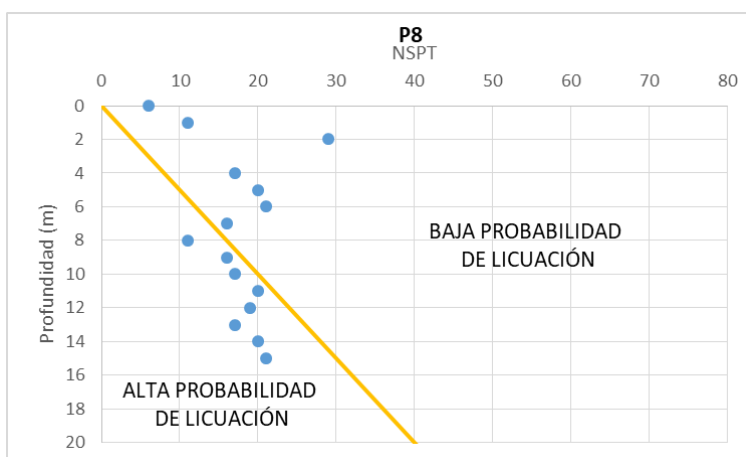


Ilustración 33. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P8

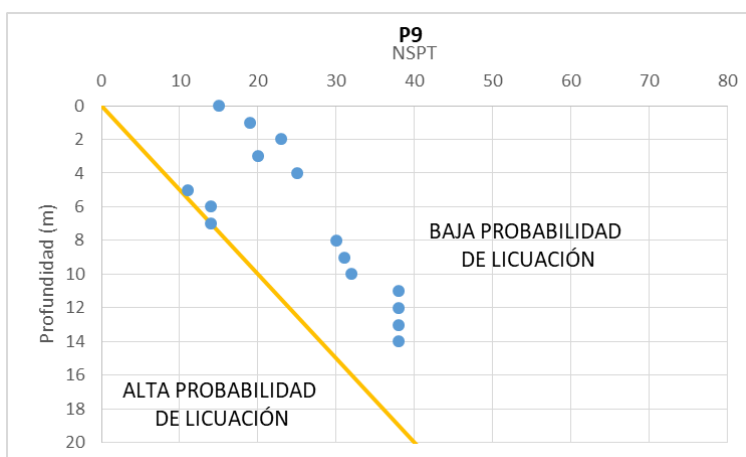


Ilustración 34. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P9

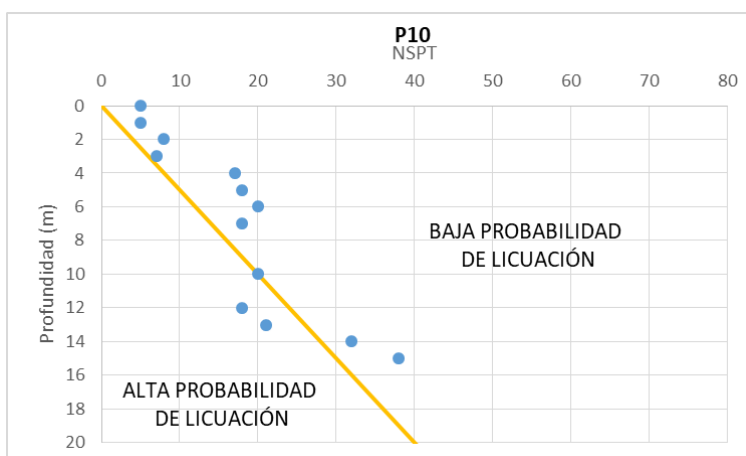


Ilustración 35. Probabilidad de licuación a partir del ensayo SPT P10

Con el fin de evaluar de una manera cuantitativa los efectos que tendría la licuación sobre el material, se modela la acción de un sismo usando el software LiquefyPro, considerando un sismo de magnitud 6.5 en la escala de Richter, seleccionado a partir del Modelo de fuentes sismogénicas del Sistema de Consulta de la Amenaza Sísmica de Colombia, proporcionado por el Servicio Geológico Colombiano.

Se consideró el perfil estratigráfico del sondeo P6, en el cual, además de identificar el nivel freático, se encontraron los más bajos valores de N en el ensayo SPT con relación a la probabilidad de licuación.

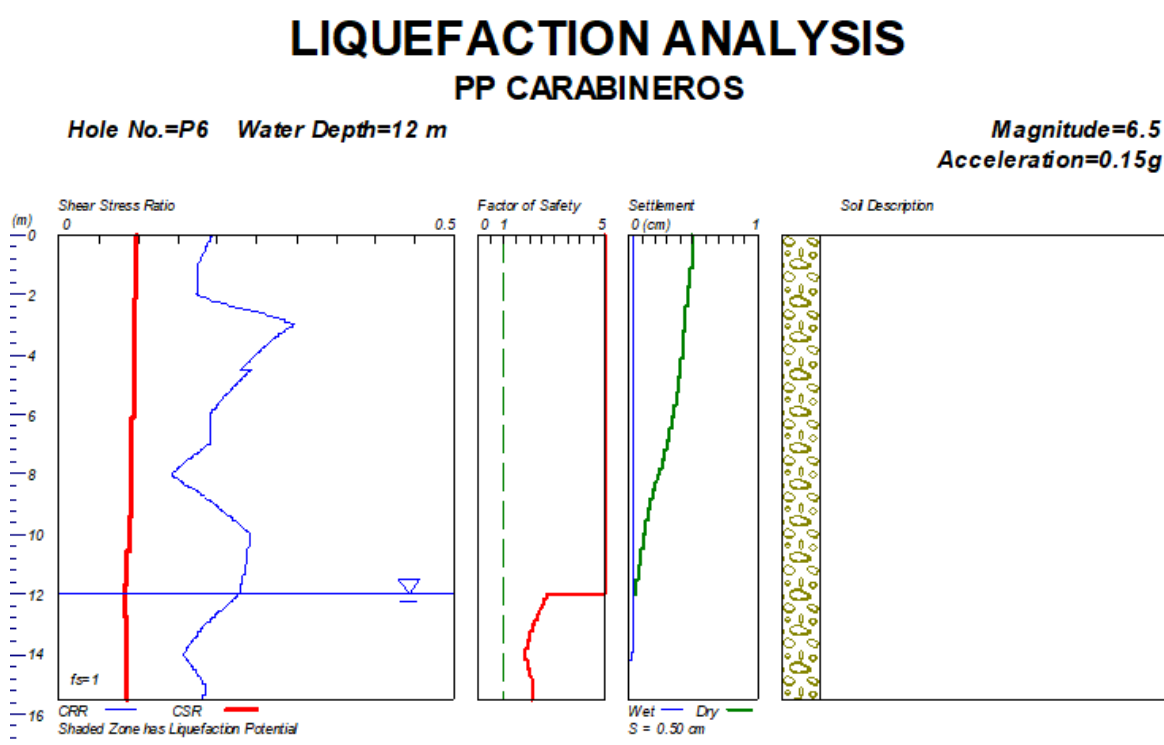


Ilustración 36. Resultados análisis licuación (LiquefyPro) – Sondeo P6

Se obtiene, en este caso, que el factor de seguridad a la licuación es superior a 1 a lo largo del sondeo, donde se obtienen asentamientos por efecto de la licuación de 0.5 cm, magnitud considerada baja para el evento extremo.

3.10.8 Parámetros geomecánicos

Los parámetros geomecánicos se obtienen a partir de la información recolectada de los sondeos exploratorios y del análisis de las muestras extraídas en cada uno de ellos, teniendo en cuenta también, el comportamiento del suelo a partir del ensayo SPT realizado en campo. Al analizar esta información en conjunto, es posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

En la literatura especializada existen diversas correlaciones entre el valor de N, obtenido del ensayo SPT, y los parámetros de cohesión y ángulo de fricción en éste, a partir de ecuaciones se estiman estos valores, los cuales, son usados para el cálculo de la capacidad portante del terreno. Los valores obtenidos a través de las correlaciones son analizados por el personal técnico, de acuerdo con su experiencia y conocimientos sobre la zona objeto de estudio.

Para utilizar las correlaciones disponibles para la obtención de parámetros como cohesión y ángulo de fricción que se encuentran en la literatura, es necesario realizar la corrección del número de golpes N tomado en campo, para lo cual, se utilizará la ecuación propuesta por Bowles, que permite obtener un valor de N corregido que, posteriormente, permite una mejor aproximación a los valores de resistencia. Dicha ecuación, tiene en cuenta correcciones por confinamiento, energía del martillo, longitud de las barras de perforación, por el tomamuestras y, finalmente, por el diámetro de la perforación.

La ecuación propuesta por Bowles (1988) para el valor de N corregido, se define de la siguiente manera:

$$N_s = N * C_n * \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 * \eta_4$$

Donde:

N: N de Campo

C_n: Corrección por confinamiento.

η₁: Corrección por energía del martillo.

η₂: Corrección por longitud de barras de perforación

η₃: Corrección por tomamuestras.

η₄: Corrección por diámetro de la perforación

Con el valor de N corregido a partir de lo anterior y los resultados de laboratorio obtenidos para cada estrato, se ajusta el parámetro de cohesión y fricción que se definirá para cada material, siendo congruente con las observaciones realizadas en campo.

Para cada estrato se hizo un análisis de los parámetros obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura, despreciando aquellos valores que no resultaban representativos con base en la experiencia del equipo técnico que adelanta el presente estudio. Las correlaciones usadas se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos.

CORRELACIONES USADAS PARA DETERMINAR PARÁMETROS DE RESISTENCIA A PARTIR DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)	
Kulhaw y Mayne (1990)	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma'_0}{Pa} \right)^{0.34}} \right)$
Wolff (1989)	$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot N_{corr} - 0.00054 N_{corr}^2$
Hatanaka y Uchida (1996)	$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 20} \quad \phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 17}$
Parra y Ramos (2006)	$\phi = 5.35 \ln(N) + 14.44$ $Cu = 0.22 \cdot \ln(N) - 0.4$
Müller (1970)	$\phi = 24 + 5.77 \ln(0.1667 N_{SPT})$
Peck	$\phi = 28.5 + 0.25 N_{145}$
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi = 26.25 * \left(2 - e^{\left(\frac{-N_{145}}{62} \right)} \right)$
Kishida	$\phi = 15 + \sqrt{(20 * N_{145})^{0.34}}$
Schmertmann	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{43.3} \right)^{0.34}$
Japan National Railway	$\phi = 27 + 0.1875 * N_{145}$
Japan Road Bureau	$\phi = 15 + (9.375 * N_{145})^{0.5}$
Stroud (1974)	$C_u = K \cdot N [kN/m^2] \quad K \begin{cases} 3.5 \text{ kN/m}^2 \\ 6.5 \text{ kN/m}^2 \end{cases}$
Hara y otros (1971)	$C_u = 29 \cdot N^{0.72} [kN/m^2]$
Mesri (1989)	$Cu = 0.22 * \sigma'_0$

Para cada uno de los sondeos ejecutados se corrigió el valor de N de campo a partir de la ecuación propuesta por Bowles y hallando los parámetros de cohesión y fricción según los golpes, delimitando dentro de cada sondeo los estratos litológicos que se identificaron en el mismo. Posteriormente, se hizo un análisis para cada estrato, agrupando los parámetros de cohesión y fricción obtenidos de cada sondeo para el estrato correspondiente, los resultados se presentan en el anexo 1.

Con la información anterior, se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose, además, con los resultados de la modelación de la problemática que se presenta en campo y que se evidenció durante los recorridos del equipo técnico. En cada uno de los casos se obtuvo un valor promedio, mínimo y máximo de cohesión y fricción para cada correlación utilizada, obteniendo a partir de su análisis, los parámetros geomecánicos característicos para cada material, así:

○ **Lleno antrópico (qII)**

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 21° y 43° (ignorando las propuestas de Kulhaway, Hatanaka y Schmertmann) y entre 0.9 kPa y 60.9 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara y Stroud).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al lleno antrópico.

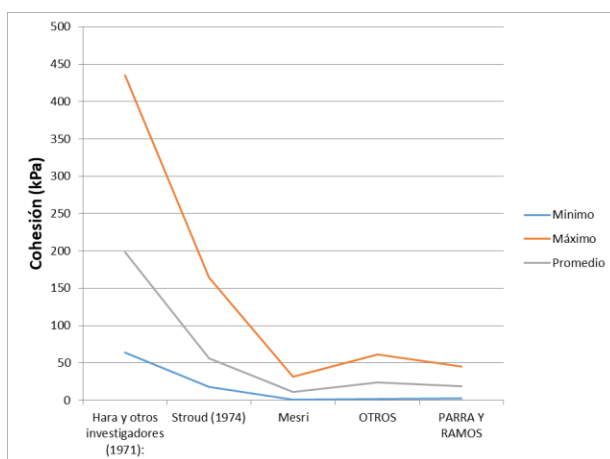


Ilustración 37. Variación cohesión del lleno antrópico

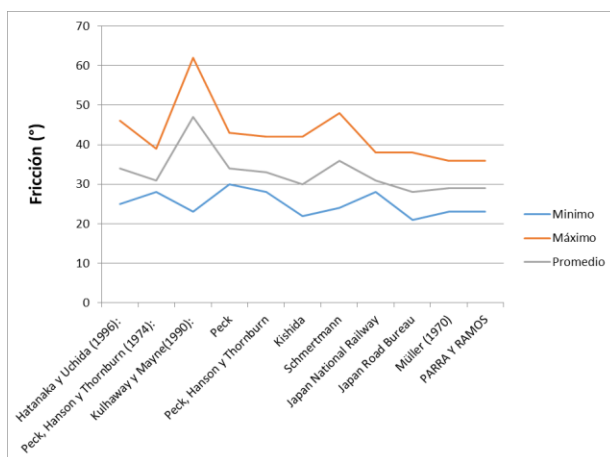


Ilustración 38. Variación ángulo de fricción del lleno antrópico

Los ensayos geomecánicos realizados sobre muestras recuperadas en este material arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 10. Resultados ensayos geomecánicos del lleno antrópico

Ensayo	Peso unitario (kN/m ³)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	18.4	27.6	53.5
Corte CD	17.6	30.4	56.6
Corte CD	16.7	24.2	97.9

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores mínimos obtenidos con cada correlación, descartando la propuesta de Peck. En el caso de la cohesión, se tomó el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara y Stroud. Se descartaron el valor de ángulo de fricción de 30.4° y los valores de cohesión obtenidos con el ensayo de corte, al no considerarse representativos de la condición del material.

Tabla 11. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico

	Peso unitario (kN/m ³)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	17.5	25	15.0
Desviación	0.7	2	4.0
Mínimo	16.7	21	11.0
Máximo	18.4	28	19.0

○ ***Depósito de vertiente I (Qv I)***

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 24° y 45° (ignorando las propuestas de Kulhaway, Hatanaka y Schmertmann) y entre 4.7 kPa y 50.8 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara, Stroud y Otros).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al depósito de vertiente I.

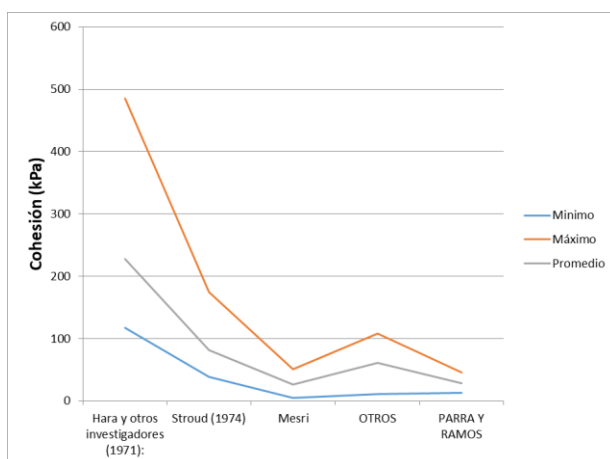


Ilustración 39. Variación cohesión del depósito de vertiente I

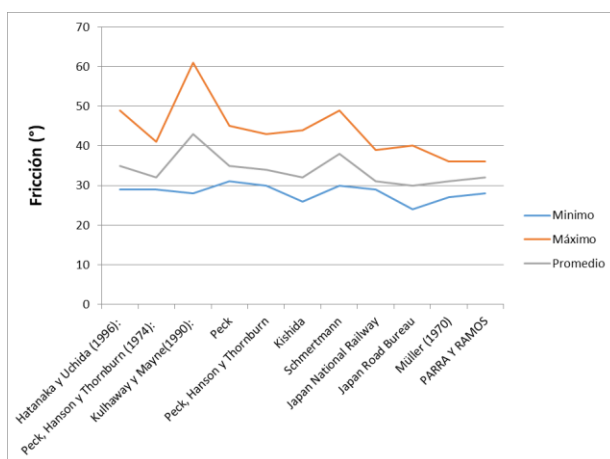


Ilustración 40. Variación ángulo de fricción del depósito de vertiente I

Los ensayos geomecánicos realizados sobre muestras recuperadas en este material arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 12. Resultados ensayos geomecánicos del depósito de vertiente I

Ensayo	Peso unitario (kN/m ³)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	17.2	20.0	51.7
Corte CD	16.1	16.6	58.4
Corte CD	18.1	33.5	63.1
Corte CD	16.8	24.3	81.9

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción, el promedio de los valores mínimos obtenidos con cada correlación. En el caso de la cohesión, se tomó el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara y Stroud. Se descartaron los valores de cohesión de 81.9 kPa y ángulo de fricción de 16.6° obtenidos con el ensayo de corte, al no considerarse representativos de la condición del material.

Tabla 13. Parámetros geomecánicos del depósito de vertiente I

	Peso unitario (kN/m ³)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	17.0	28	48.0
Desviación	0.7	3	15.3
Mínimo	16.1	20	26.0
Máximo	18.1	33	63.0

○ ***Depósito de vertiente ii (Qv li)***

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 27° y 39° (ignorando las propuestas de Kulhaway, Hatanaka y Schmertmann) y entre 19.6 kPa y 58.8 kPa para la cohesión (ignorando las propuestas de Hara, Stroud y Otros).

Las siguientes imágenes ilustran las variaciones de los parámetros de cohesión y fricción obtenidos por cada una de las correlaciones disponibles en la literatura para los materiales pertenecientes al depósito de vertiente II.

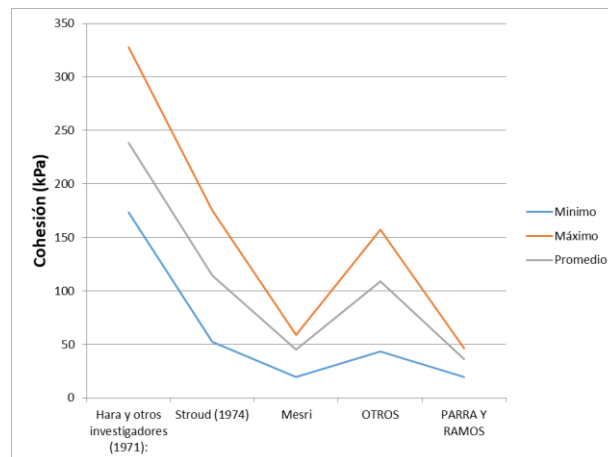


Ilustración 41. Variación cohesión del depósito de vertiente II

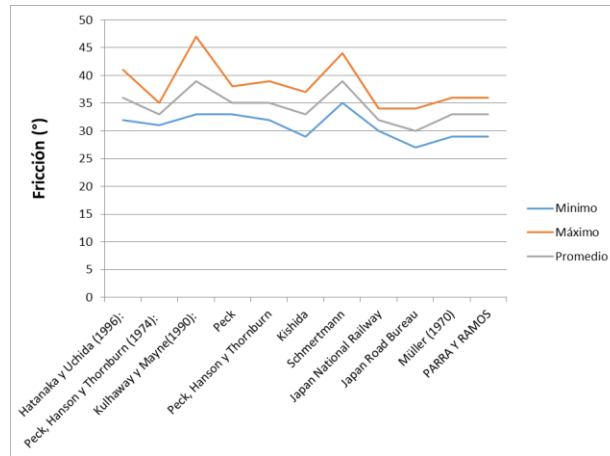


Ilustración 42. Variación ángulo de fricción del depósito de vertiente II

Los ensayos geomecánicos realizados sobre muestras recuperadas en este material arrojaron los siguientes resultados.

Tabla 14. Resultados ensayos geomecánicos del depósito de vertiente II

Ensayo	Peso unitario (kN/m³)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Corte CD	16.1	28.0	41.5
Corte CD	19.7	36.9	29.6
Corte CD	17.7	26.3	72.6

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores mínimos obtenidos con cada correlación, descartando la propuesta de Schmertmann. En el caso de la cohesión, se tomó el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Hara, Stroud y Otros. Se descartó el valor de ángulo de fricción de 36.9° obtenido con el ensayo de corte al no considerarse representativo de la condición del material.

Tabla 15. Parámetros geomecánicos del depósito de vertiente II

	Peso unitario (kN/m³)	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	17.8	30	44.9
Desviación	1.5	2	14.8
Mínimo	16.1	26	29.6
Máximo	19.7	33	72.6

3.10.9 Nivel freático

A continuación, se muestran los registros de nivel freático encontrados en cada uno de los diferentes sondeos realizados entre los meses de diciembre de 2021 y enero de 2022, considerando que su presencia está asociada directamente a cambios en las condiciones climáticas.

Tabla 16. Profundidad del nivel freático

SONDEO	PROFUNDIDAD (m)
P1	No se encontró
P2	No se encontró
P3	No se encontró
P4	No se encontró
P5	No se encontró
P6	6.0
P7	9.0
P8	No se encontró
P9	No se encontró
P10	No se encontró

3.10.10 Análisis de estabilidad


Realizada la evaluación interdisciplinaria del territorio, con miras a identificar y delimitar la amenaza por movimientos en masa y las zonas homogéneas de aptitud de uso del suelo, se plantea la necesidad de involucrar análisis cuantitativos; en este caso, relacionados con los factores de seguridad de la ladera, puesto que, las caracterizaciones geológicas y geomorfológicas incluyen evaluaciones cualitativas que pueden llevar a imprecisiones.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual, calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud. Para este caso, se consideró de acuerdo con observaciones de campo, tipo de material y condiciones topográficas, que la falla más probable corresponde a fallas circulares.

Para efectos de determinar las características topográficas de los taludes a evaluar, se levantaron secciones topográficas, sobre las cuales, se plasmaron las condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los sectores. La estratigrafía se obtuvo a partir de los sondeos, los afloramientos y los resultados de laboratorio, y los parámetros utilizados para el análisis de estabilidad se determinaron de acuerdo con las consideraciones expuestas en el numeral de parámetros geomecánicos. En la siguiente tabla, se presentan los parámetros resumen usados en la evaluación de estabilidad del terreno, con base en los análisis presentados en el capítulo de Parámetros geomecánicos. Para el material sin sondear se tomaron en cuenta los

parámetros obtenidos para el material depósito de vertiente 2.

Tabla 17. Parámetros Geomecánicos de los materiales

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Ru
QII		17.5	15	25	0.29
Qv I		17	48	28	0.29
Qv II		17.8	44.9	30	
SS		17.8	44.9	30	

Para el análisis de estabilidad, se levantaron secciones en cada una; para cada sección a evaluar, se consideran dos situaciones; inicialmente, se analiza el modelo para el caso estático y posterior a esto, se evalúa el comportamiento del terreno bajo solicitaciones sísmicas, obteniendo para ambos casos, los factores de seguridad de cada superficie de falla, verificando el cumplimiento de los valores mínimos recomendados cuando se tienen riesgos altos de vidas humanas y económicas. Adicionalmente, y a pesar de que no se identificaron altos niveles freáticos, se evidencia un grado de saturación medio en el suelo, por lo que se optó en modelar en los materiales de lleno y depósito de vertiente I una condición de saturación parcial a través del coeficiente *ru*, que simula la saturación por efecto de agua superficial y de escorrentía.

El coeficiente *ru* representa el nivel de saturación del suelo a través de una relación entre la presión de poros y el esfuerzo total en la masa de suelo.

Para el análisis en condiciones actuales, se modela un escenario parcialmente saturado en el lleno antrópico y el depósito de vertiente I, que considera la mitad del valor máximo del coeficiente *ru* para estos suelos.

Escenario de saturación

En el caso de la saturación del suelo, esta se puede dar, ya sea por un aumento del nivel freático regional y/o por la entrada de agua superficial y de escorrentía al suelo. Para la modelación de este escenario, se recurre a un escenario totalmente saturado, representando por el uso de valores máximos del coeficiente *ru* en todos los estratos identificados.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático y pseudoestático fue seleccionado a partir de las recomendaciones de la Norma Sismo Resistente Colombiana NSR-10, Título H., las cuales, se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 18. Factores de seguridad mínimos para evaluación y diseño de taludes.

Factores de seguridad Básicos Mínimos Directos				
Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga viva Normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Carga Muerta + Carga viva Máxima	1,25	1,10	1,40	1,15
Carga Muerta + Carga viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1,10	1,00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes - Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1,50	1,25	1,80	1,40
Taludes - Condición Seudo-Estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1,05	1,00 (*)	No se permite	No se permite

(*) Nota: Los parámetros sísmicos seudo estáticos de construcción serán el 50% de los de diseño

Se aceptaron factores de seguridad en el caso estático mayores a 1.5, de acuerdo con lo exigido en la norma. Para el caso seudoestático se consideró que, factores por encima de 1.1, garantizaban la estabilidad de la ladera, siendo este criterio utilizado en la práctica general. Esta condición sísmica se simuló en cada perfil, considerando la actuación de fuerzas sísmicas que dependen del coeficiente de aceleración pico efectiva (A_a) dado para cada municipio por la NSR-10, que, para el caso del municipio de Medellín, es de 0.15, tomando para la componente horizontal el 80% del producto de este valor con el factor de importancia de las estructuras que se proyectan y el factor de amplificación obtenido a partir del tipo desuelo definido. Para la componente vertical se toma el 10% del aplicado en la horizontal.

Con base en las características y propiedades geotécnicas y topográficas del terreno, se construyeron los modelos geotécnicos para cada perfil analizado. La ubicación de los perfiles se presenta en la siguiente ilustración:



Ilustración 43. Localización perfiles analizados

Para cada sección trazada, se construyó el modelo geotécnico con base en los sondeos que se ubican más próximos, plasmando en cada una los estratos definidos en cada perforación, dado que, a lo largo de la sección es necesario extrapolar el desarrollo del estrato, por lo que, es posible que, durante la construcción, se hallen espesores un poco diferentes a los modelados en este estudio.

PERFIL 1

Localizado en el extremo norte del polígono de estudio; se construye a partir de la información proporcionada por los sondeos P1, P5 y P2, en la que se identifican materiales de lleno antrópico de manera superficial, seguidos por depósitos de vertiente 1 y, finalmente, el depósito de vertiente 2. El modelo, además, considera las estructuras existentes como el muro de contención ubicado en la parte baja y las cargas aportadas por el tránsito vial.

La siguiente ilustración muestra la disposición aproximada de los estratos y lo antes descrito.

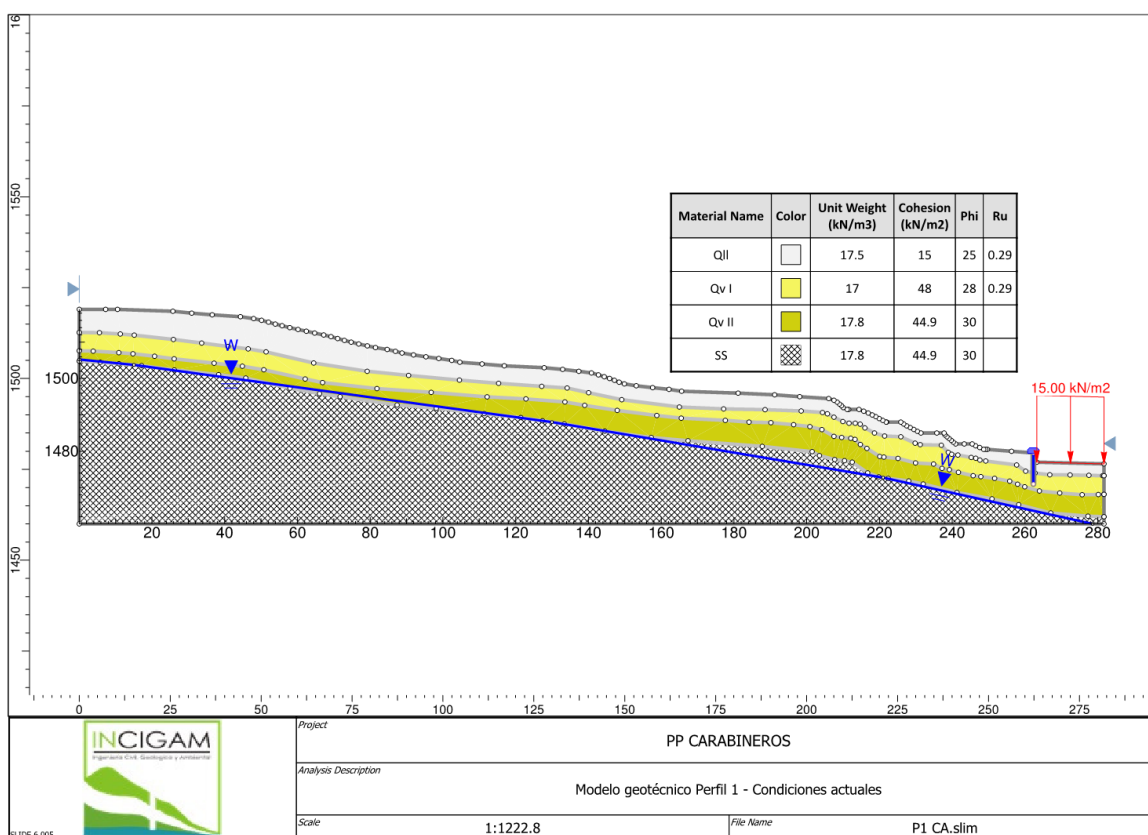


Ilustración 44. Modelo geotécnico Perfil 1 PP Carabineros

PERFIL 2

Similar al perfil anterior, éste se ubica en el sector norte del polígono; es construido con la información proporcionada por los sondeos P3 y P4, en el que se identifica en superficie, un material antrópico con espesores que podrían variar entre 1.0 m y 5.0 m, subyacentes por

dos variaciones de un depósito de vertiente que se extienden hasta las profundidades máximas exploradas. Los espesores identificados para cada estrato obedecen a la información puntual ofrecida por los sondeos, a partir de la cual, se proyecta la disposición de los mismos en el resto del perfil, por lo que, es posible que, en campo, los espesores varíen a los dibujados aquí.

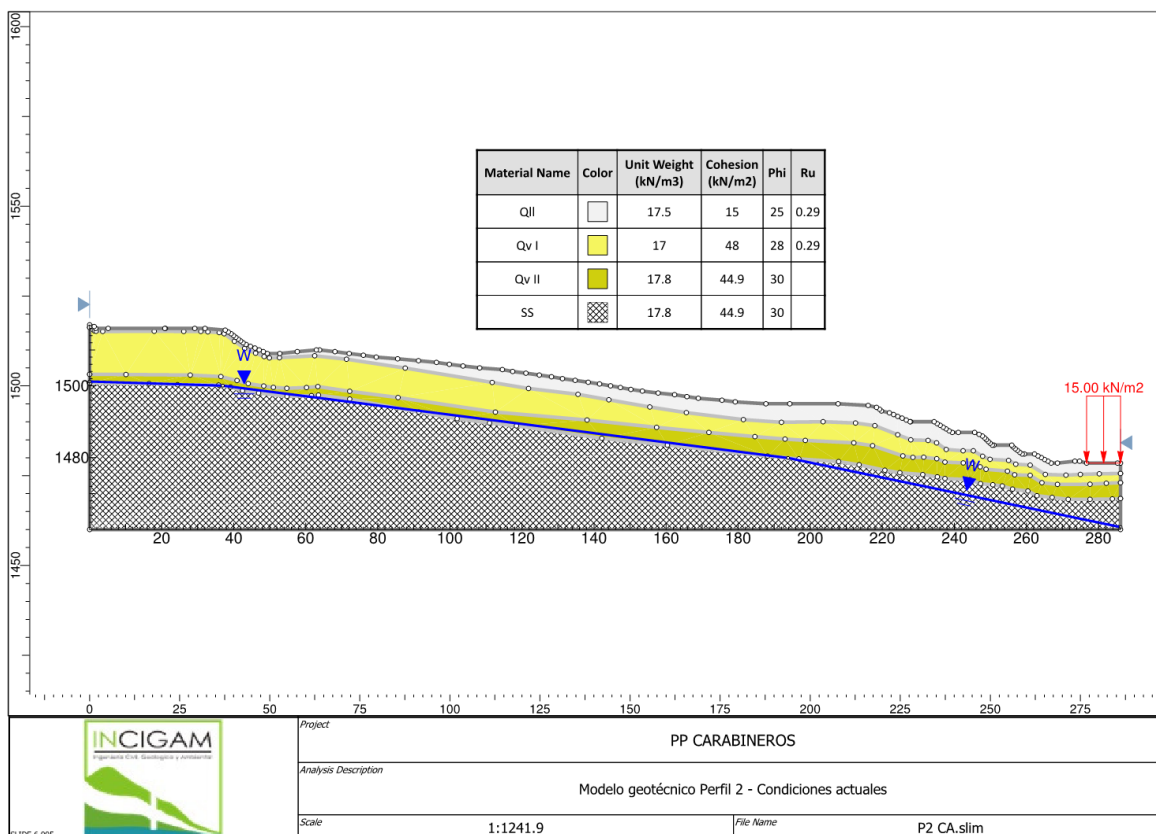


Ilustración 45. Modelo geotécnico Perfil 2 PP. Carabineros

PERFIL 3

Ubicado en la zona central del polígono en estudio, construido con la información aportada por las perforaciones que se ubican más próximos en esta zona y que corresponden a los sondeos P6 y P7, en donde superficialmente se hallan los materiales antrópicos de mayor espesor, alcanzando profundidades entre 7.0 m y 9.0 m, subyacentes por el depósito de vertiente 1, en donde logra detectarse la presencia del nivel freático. La disposición estimada de los estratos se presenta en la siguiente ilustración.

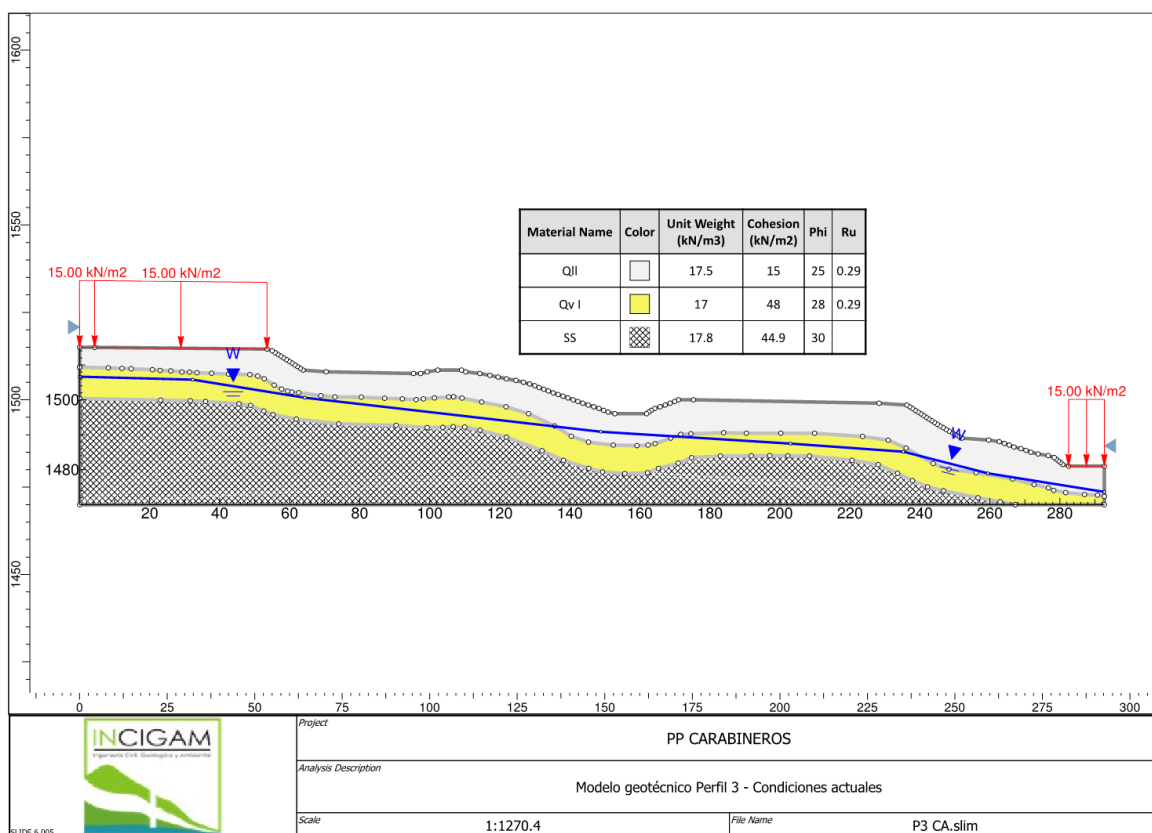


Ilustración 46. Modelo geotécnico Perfil 3 PP. Carabineros

PERFIL 4

Su modelo geotécnico se construye a partir de la información proporcionada por los sondeos P8 y P10 y las observaciones realizadas en campo. Estratigráficamente, se conforma en superficie por un lleno antrópico que se extiende a lo largo de todo el perfil con espesores entre 1.0 m y 5.0 m, seguidos en profundidad por un depósito de vertiente del tipo flujo de lodos y escombros en el que logran diferenciarse dos variaciones, los cuales, se disponen como se muestra en la siguiente ilustración.

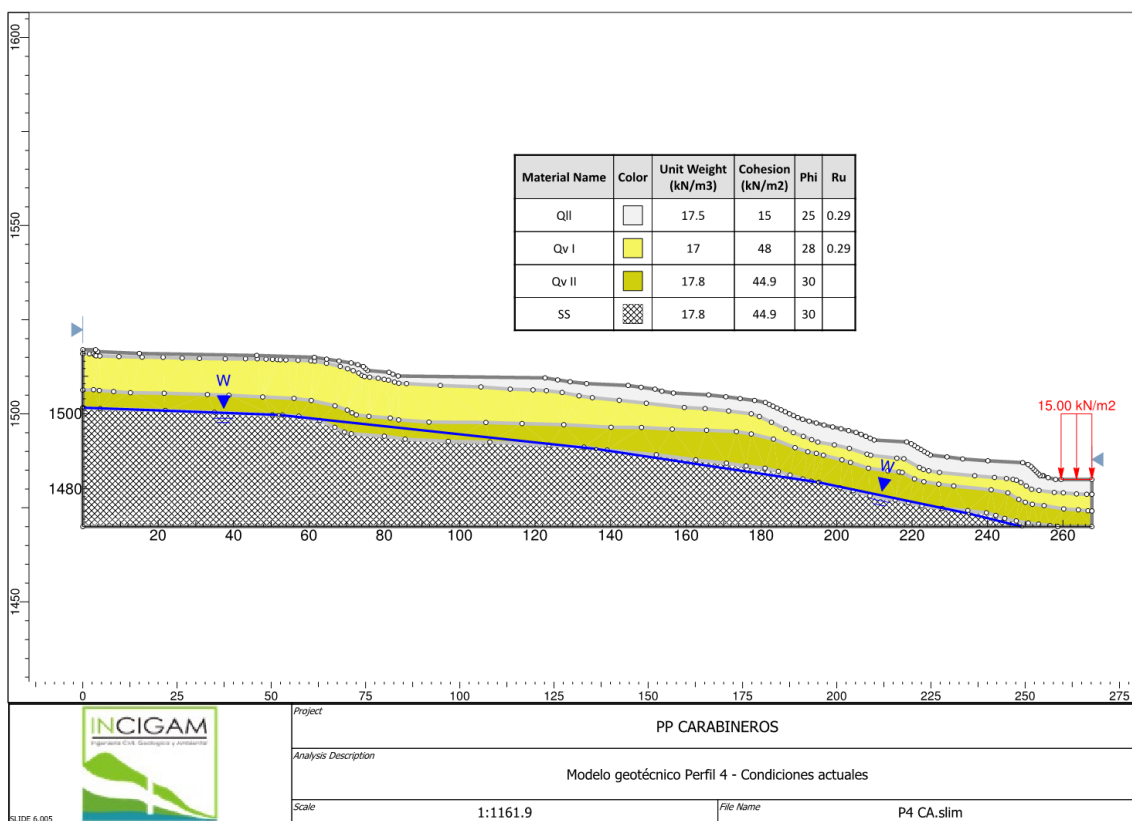


Ilustración 47. Modelo geotécnico Perfil 4 PP. Carabineros

PERFIL 5

Estratigráficamente, se compone de tres estratos; el primero, identificado hacia la superficie, corresponde a un lleno antrópico con espesores de 1.0 m, seguido por el depósito de vertiente 1 que, a su vez, es subyacido por el depósito de vertiente 2 que se extiende hasta las profundidades máximas exploradas. La siguiente ilustración muestra la disposición de los estratos, según la información proporcionada por los sondeos (P8 y P9)

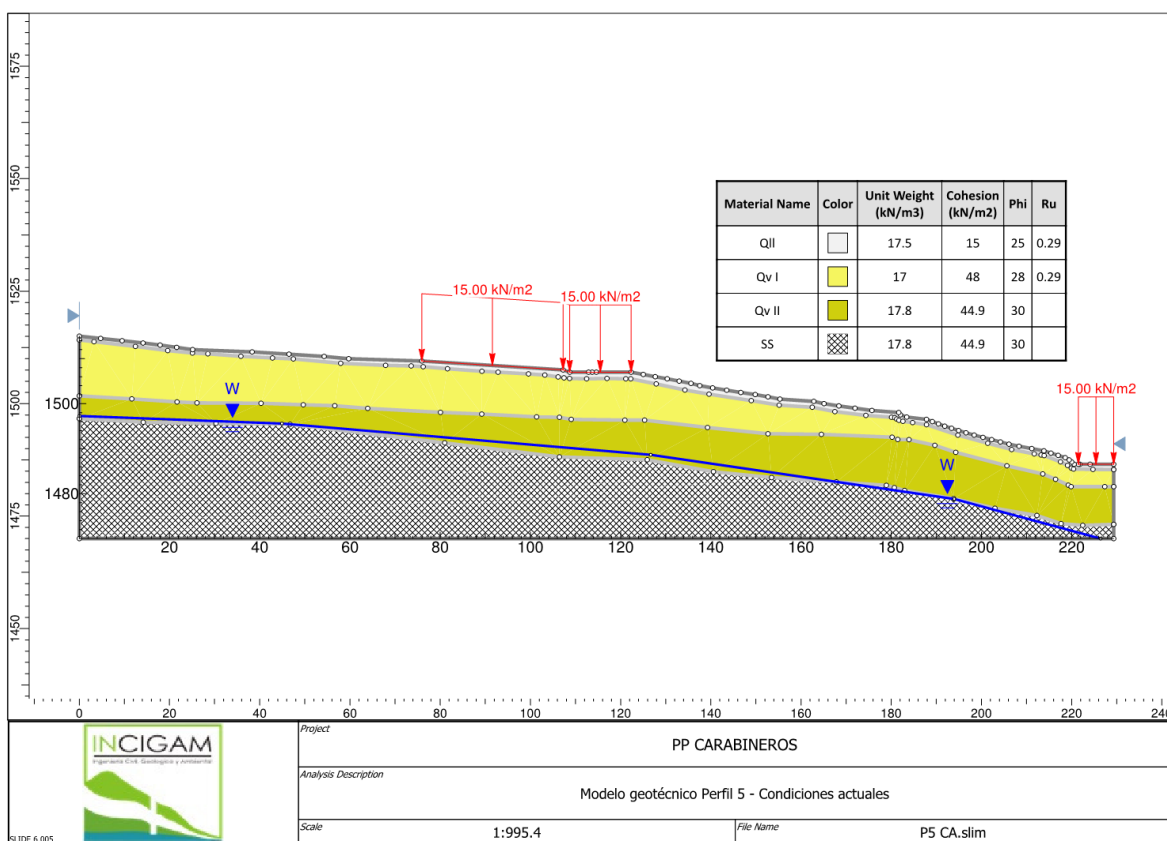


Ilustración 48. Modelo geotécnico Perfil 5 PP. Carabineros

PERFIL 6

Modelado con el fin de evaluar la estabilidad en una de las zonas donde se presenta un proceso activo identificado durante los recorridos de campo en el área central del lote. Estratigráficamente, se compone de dos estratos; el primero, identificado en toda la superficie, corresponde a un lleno antrópico con espesores de 9.0 m, los máximos reportados en todo el lote, seguido por el depósito de vertiente 1 que se extiende hasta la profundidad máxima explorada. La siguiente ilustración muestra la disposición de los estratos, según los espesores hallados y las condiciones topográficas y freáticas del sitio.

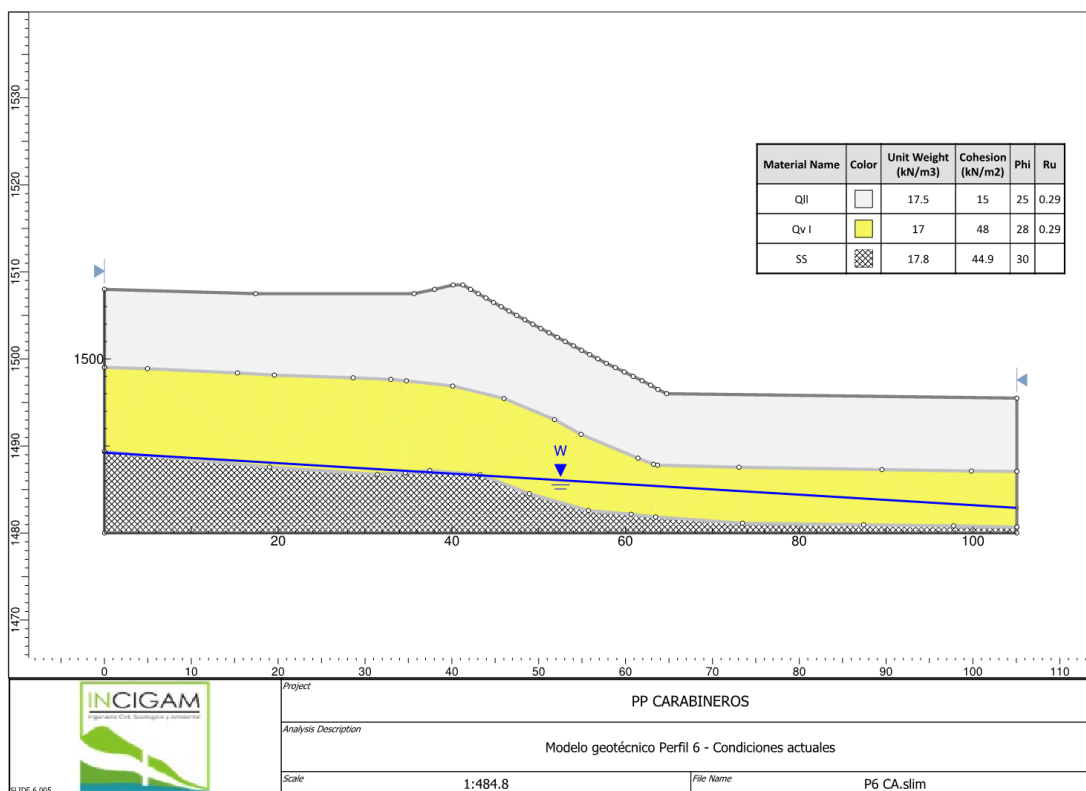


Ilustración 49. Modelo geotécnico Perfil 6 PP. Carabineros

Para cada modelo se consideraron, además de los casos estáticos y seudoestáticos, dos condiciones; una actual y una donde se supuso un aumento del nivel freático, para evaluar una condición más desfavorable de estabilidad. A continuación, se presentan los resultados.

3.10.10.1 Análisis de estabilidad en condiciones actuales

PERFIL 1

Al analizar la estabilidad del perfil 1, se detectan superficies de falla con factores de seguridad superiores al mínimo recomendado, con un mínimo correspondiente a una superficie que atraviesa el depósito antrópico en la parte media-baja de la ladera. El factor de seguridad determinístico resultante para esta superficie es de 2.442 en el caso estático. La siguiente ilustración muestra los resultados para el caso estático.

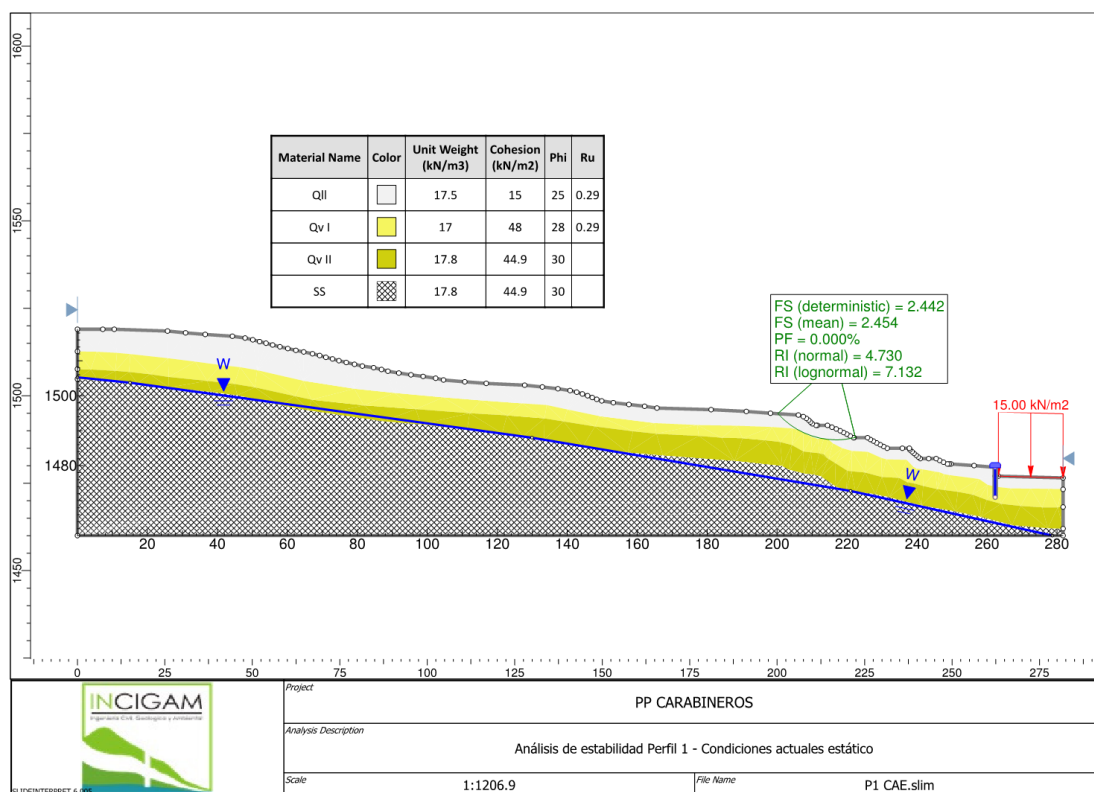


Ilustración 50. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)

Posteriormente, el modelo es analizado simulando en él, la ocurrencia de un evento sísmico, sometiéndolo a la aplicación de cargas sísmicas condicionadas a la definición de amenaza sísmica dada en la NSR -10 para el municipio de Medellín, en donde la carga horizontal representará el 80% del producto del coeficiente de aceleración sísmica A_a , el factor de importancia y el factor de amplificación y la vertical el 10% de la carga sísmica horizontal. Bajo este supuesto, se encontró como en el caso estático, que el terreno satisface la condición de estabilidad mínima, con un factor de seguridad determinístico mínimo de 1.412, superior al límite recomendado de 1.05. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla obtenida para este caso.

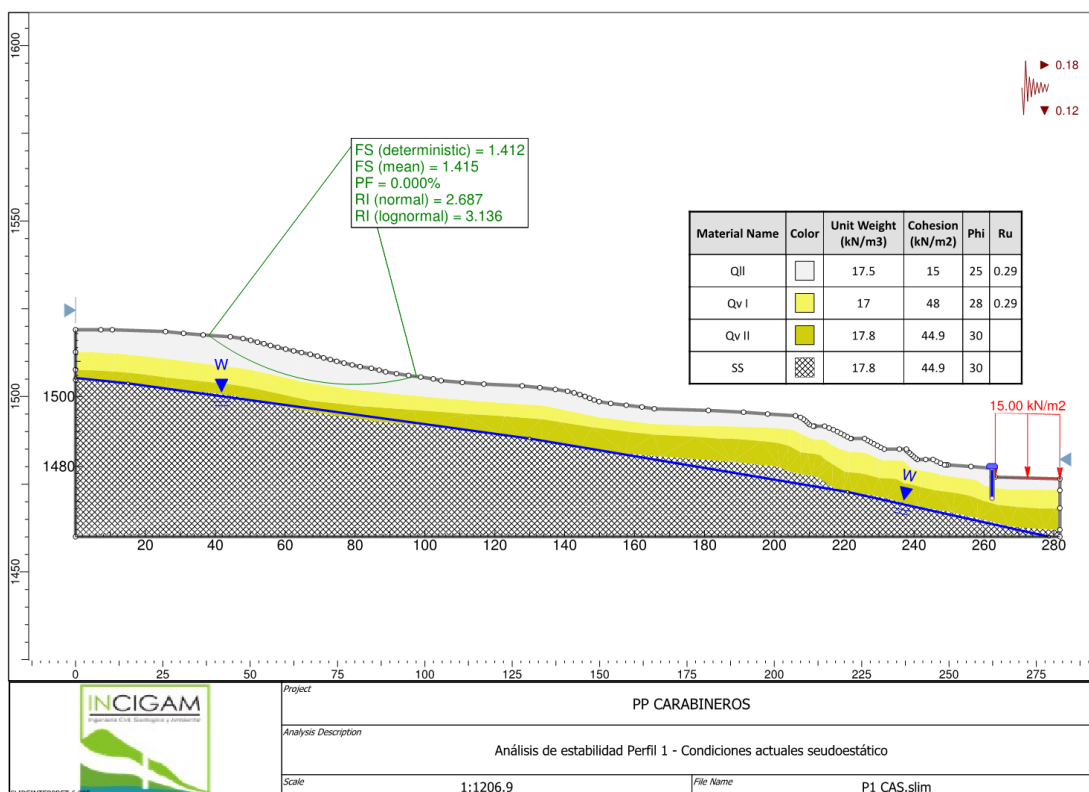


Ilustración 51. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)

Adicionalmente, al análisis en condiciones actuales, se consideró una situación donde el material se satura por aumento del nivel freático; para estas condiciones, el análisis de estabilidad del perfil 1 arrojó factores de seguridad mínimos de 1.858 para el caso estático; aunque se mantiene por encima del mínimo recomendado, se observa una disminución significativa del factor en este caso, por lo que será importante en todo el lote, durante la construcción y posterior a esta, la implementación de medidas adecuadas del manejo del agua de escorrentía y por infiltración. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla.

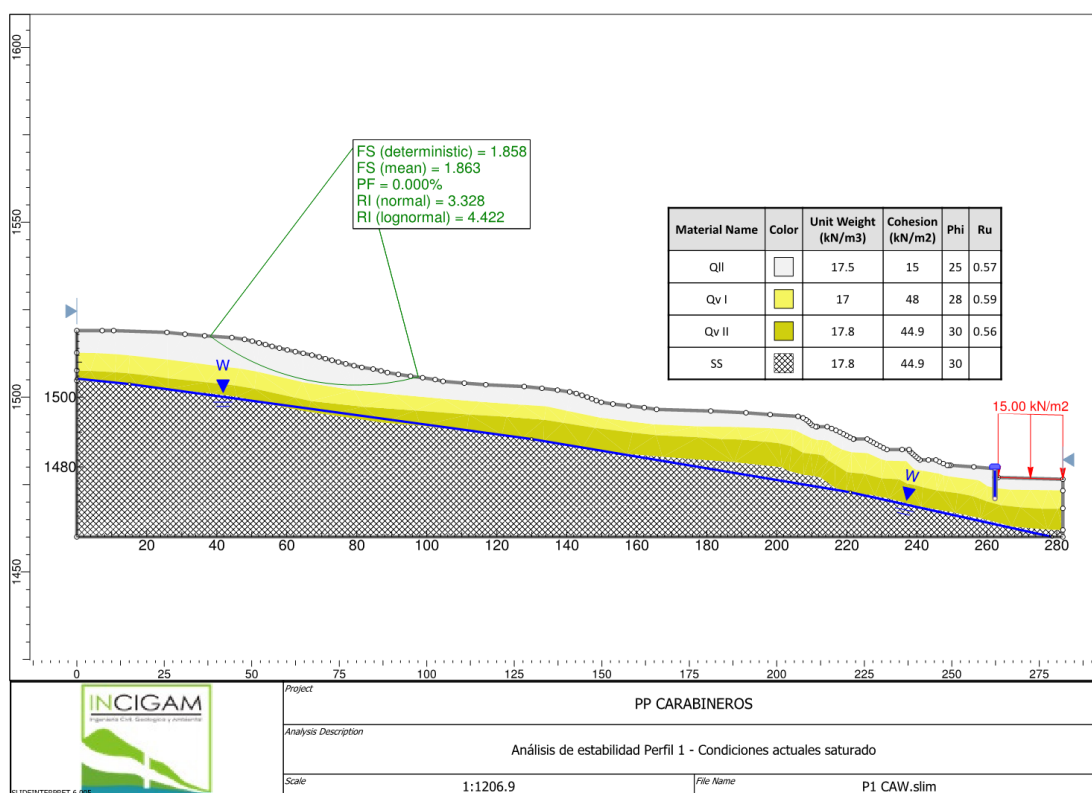


Ilustración 52. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)

PERFIL 2

Del análisis se obtiene que, el menor factor de seguridad determinístico para el caso estático es de 2.334 y medio de 2.341, superior al valor mínimo recomendado, correspondiente a una falla circular ubicada en la parte baja del perfil. Similar ocurre al evaluar la condición seudoestática, para la que se obtiene que, el menor factor de seguridad es de 1.451, superior al mínimo recomendado, indicando que, bajo las hipótesis planteadas, el terreno presenta un comportamiento estable. Las siguientes ilustraciones muestran los resultados obtenidos para ambos casos.

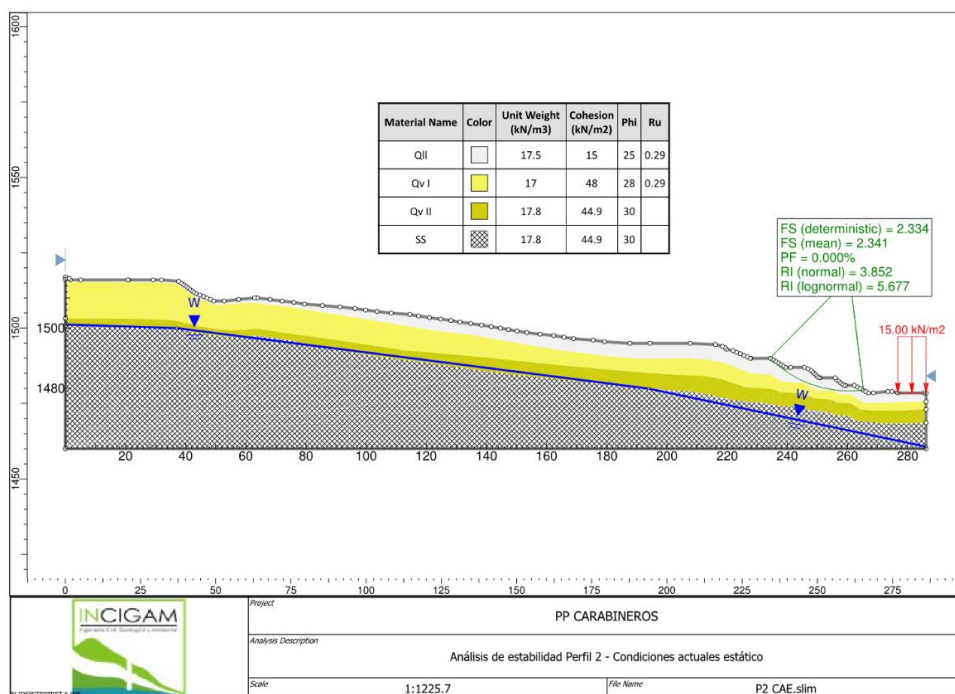


Ilustración 53. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)

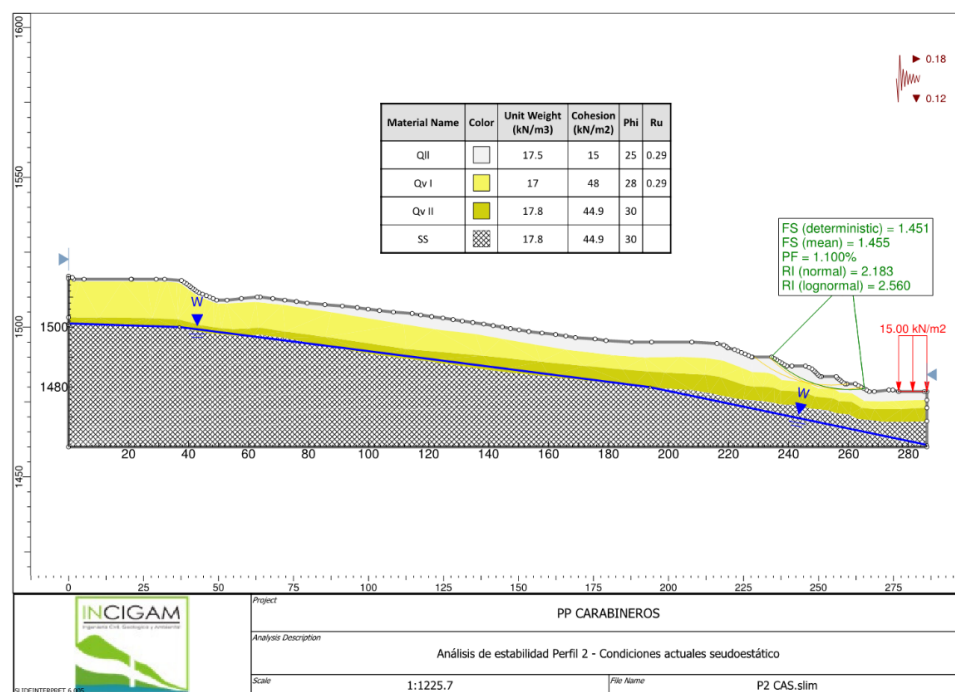


Ilustración 54. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)

En el análisis realizado, considerando un aumento del nivel freático, se encontró, para el caso estático, que el menor factor de seguridad resultante es de 1,846, superior al mínimo recomendado. Aunque el resultado se mantiene por encima de los rangos para considerarse estable, su reducción muestra la importancia de un adecuado control de las aguas lluvias o lluvias de escorrentía dentro del predio, pues las propiedades del material si logran verse afectadas de manera negativa con la saturación del suelo. La siguiente ilustración muestra lo obtenido.

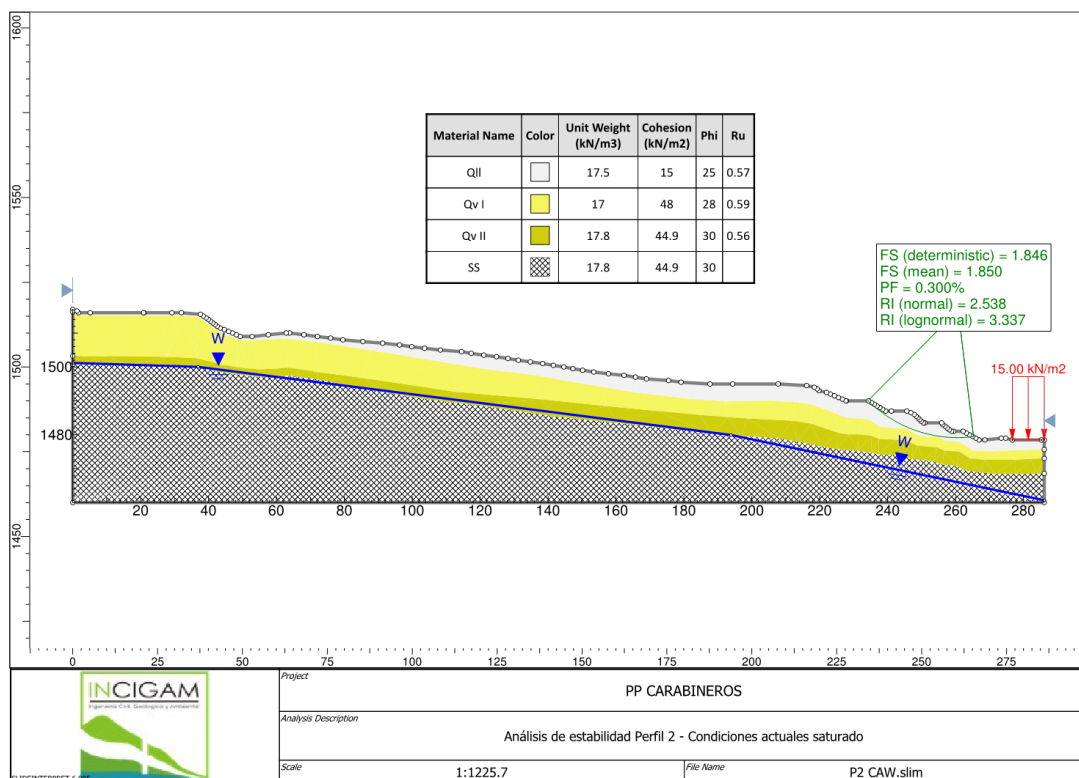


Ilustración 55. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)

PERFIL 3

Al evaluar la estabilidad, se encontró una condición aceptable para esta; aunque su factor se encuentra un poco por debajo del mínimo recomendado, no se considera en un estado de falla y los alrededores actualmente, no presentan condiciones ni indicios de que comprometan la estabilidad del terreno; sin embargo, será importante un adecuado control de las aguas de escorrentía o de cualquier agente externo que pueda modificar el estado de esfuerzos actual y en caso de que se proyecten intervenciones particulares en esta zona, se deberán adelantar estudios particulares que garanticen factores de seguridad superiores al mínimo recomendado en la normativa vigente a la fecha. Para el caso estático, el menor

factor de seguridad es de 1.407 y, para el caso en el que se considera la acción de un sismo, este es de 1.028. Las siguientes ilustraciones muestran los resultados obtenidos.

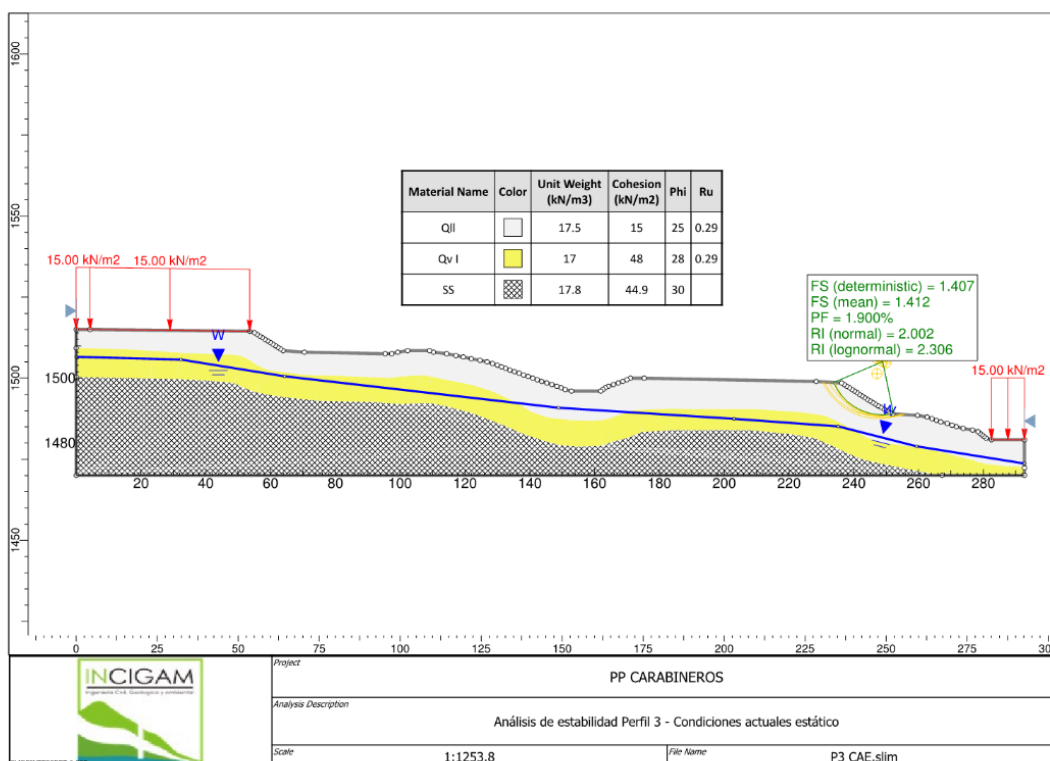


Ilustración 56. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)

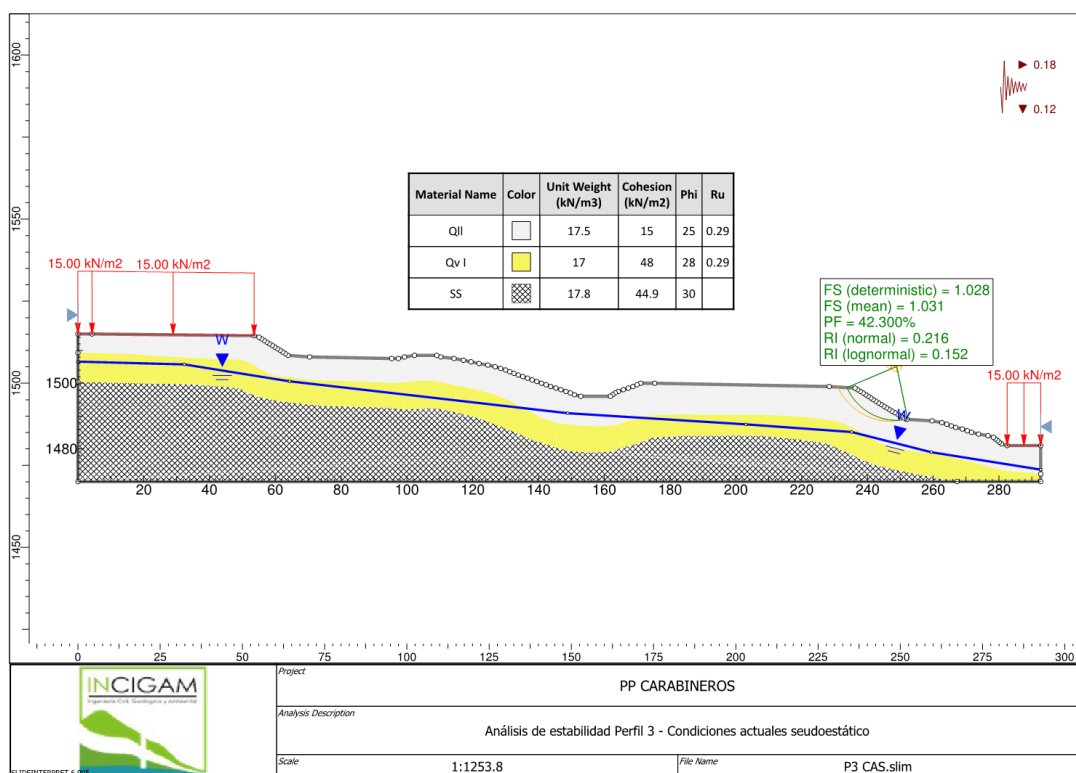


Ilustración 57. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)

Para el análisis con nivel freático elevado se encontró que, dada la configuración del terreno y la disposición de los estratos, los factores de seguridad disminuyen notablemente, hasta un mínimo de 1.035, dejándolo en un estado metaestable, que lo hace muy susceptible a modificaciones en su estado de esfuerzos por efecto de fuerzas externas, desencadenando posibles eventos de inestabilidad. La siguiente ilustración presenta el resultado obtenido.

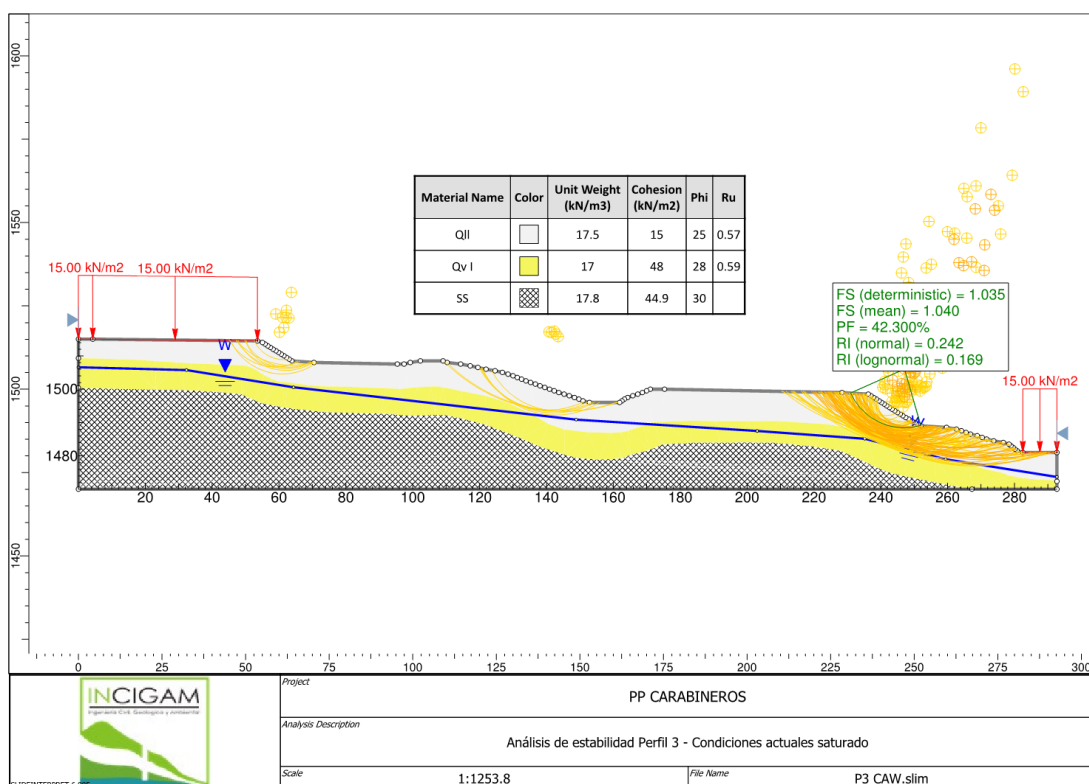


Ilustración 58. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)

PERFIL 4

El análisis de estabilidad para esta sección del terreno indica que, bajo las hipótesis planteadas en condiciones actuales, el perfil presenta un comportamiento estable con un factor de seguridad determinístico de 2.173, por encima del límite del mínimo recomendado, con una probabilidad de falla del 0% para el caso estático. Para el caso en el que se simula en el terreno un evento sísmico con la aplicación de una carga de este tipo en la componente vertical y horizontal, el factor de seguridad disminuye hasta 1.369, situándose de forma similar al caso estático, por encima del mínimo recomendado, indicando que, aún bajo un evento de este tipo, el terreno permanecerá en una condición estable. Las siguientes ilustraciones muestran las superficies obtenidas para cada caso.

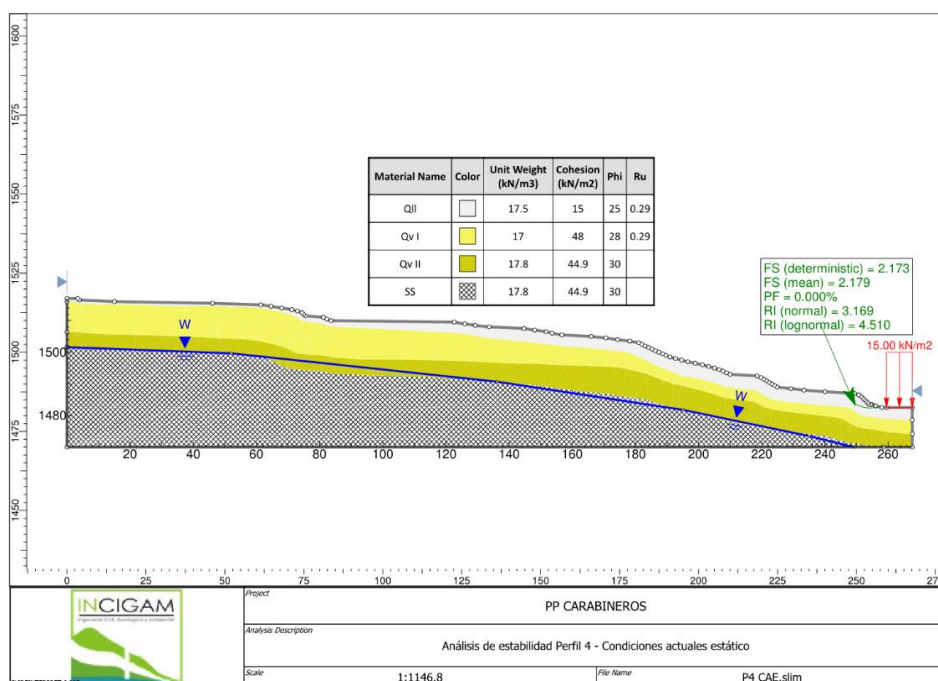


Ilustración 59. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)

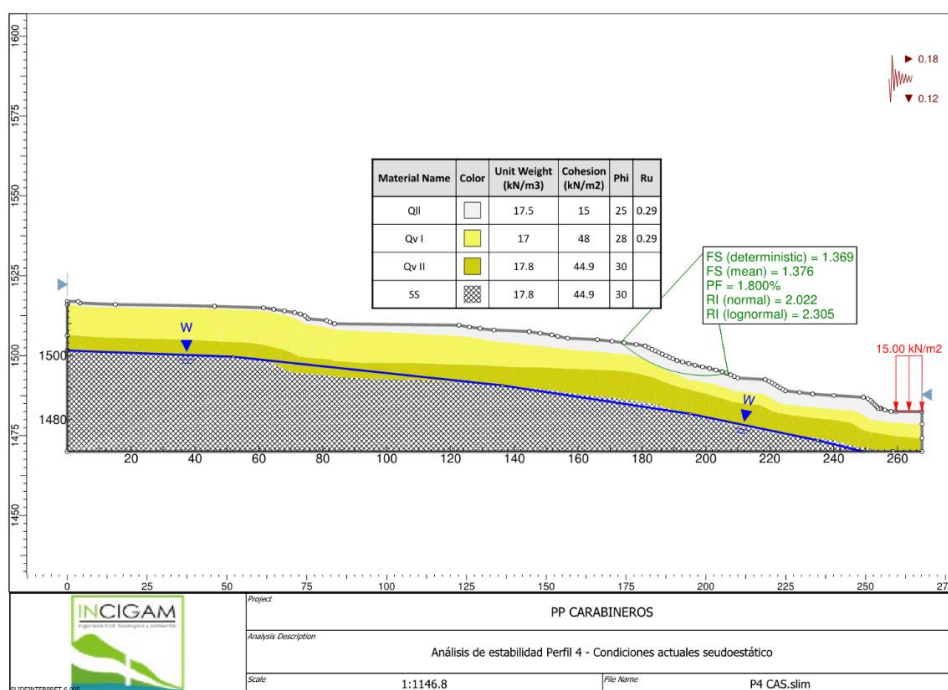


Ilustración 60. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)

Posteriormente, se evaluó el efecto que produce en el terreno un aumento del nivel freático, que puede darse por situaciones antrópicas, como descargas no controladas de agua de predios vecinos o por fuertes eventos de precipitación. Para esto, se analizó el mismo modelo geotécnico, considerando una elevación en la napa freática. Bajo este supuesto, se obtiene que, el menor factor de seguridad en el caso estático es de 1.346, encontrándose por debajo del mínimo recomendado, lo que resalta la importancia de un adecuado sistema de manejo y control del agua. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla asociada al factor de seguridad obtenido.

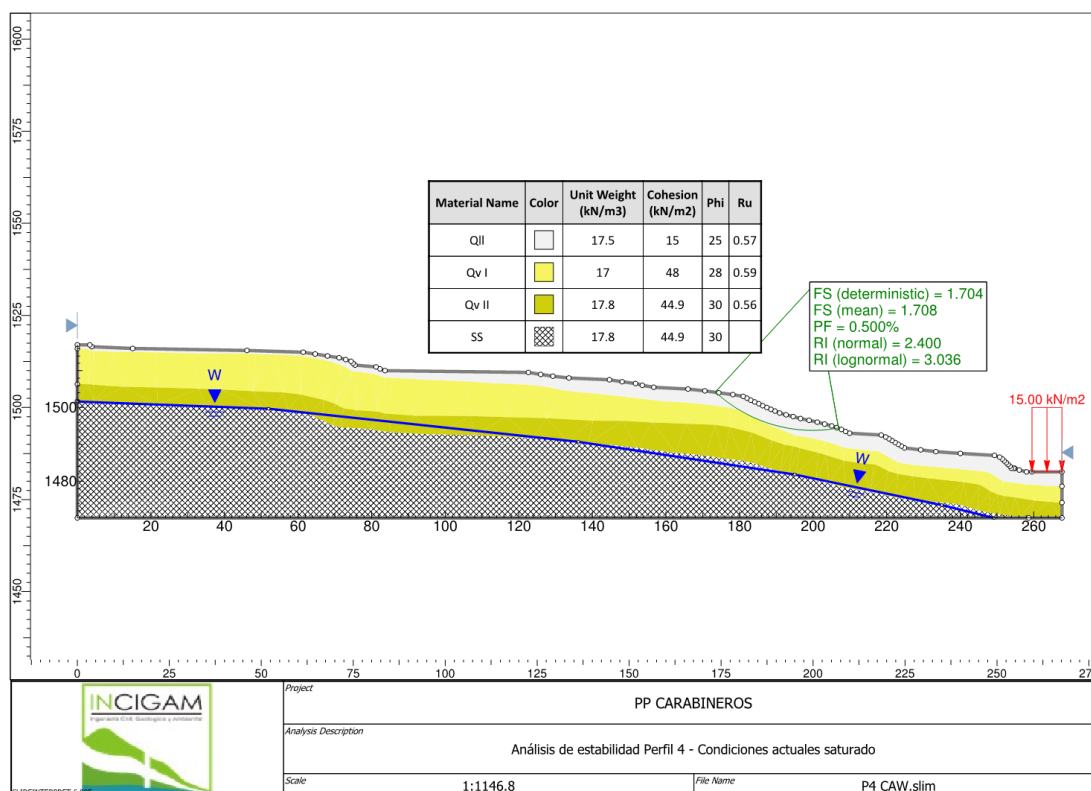


Ilustración 61. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)

PERFIL 5

Al evaluar la estabilidad, se encontró en el caso estático, un factor de seguridad determinístico mínimo de 4.484, superior al mínimo, indicando una condición estable del terreno bajo las solicitaciones y condiciones actuales del terreno. Para el caso seudoestático, se obtiene un factor de seguridad mínimo de 2.261; en ambos casos, la falla corresponde a una superficie circular que atraviesa todos los estratos identificados. Las siguientes ilustraciones muestran los resultados obtenidos.

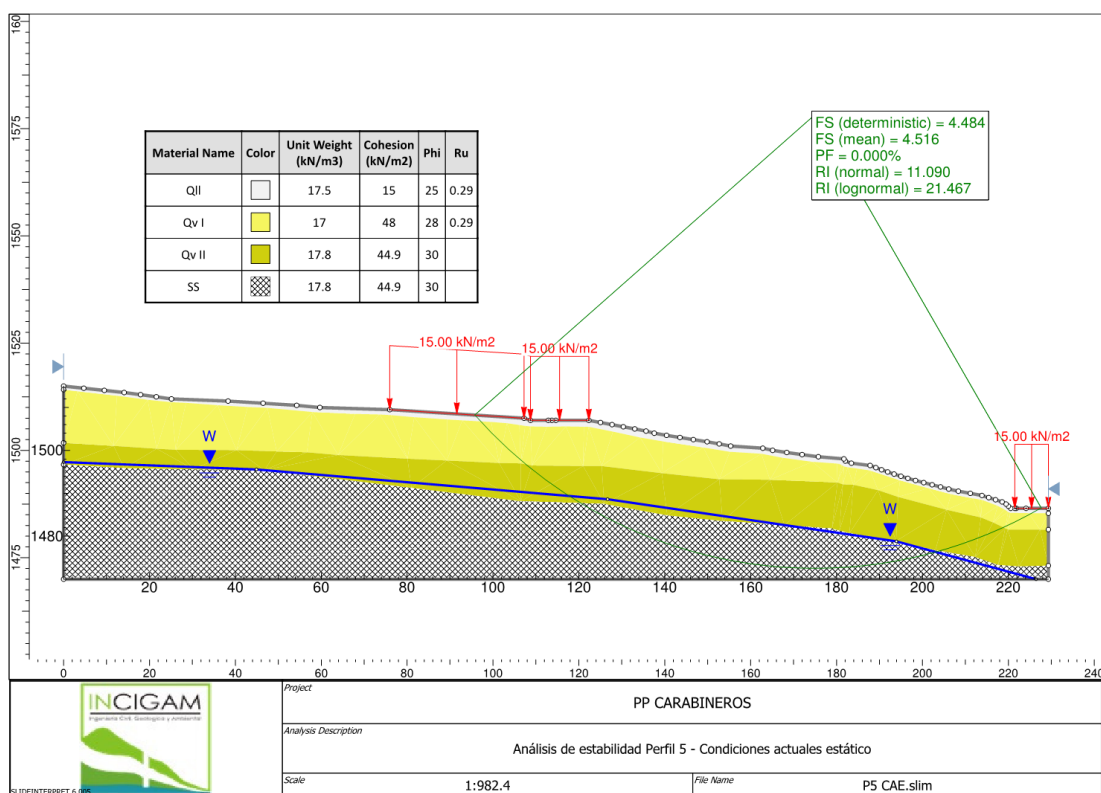


Ilustración 62. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)

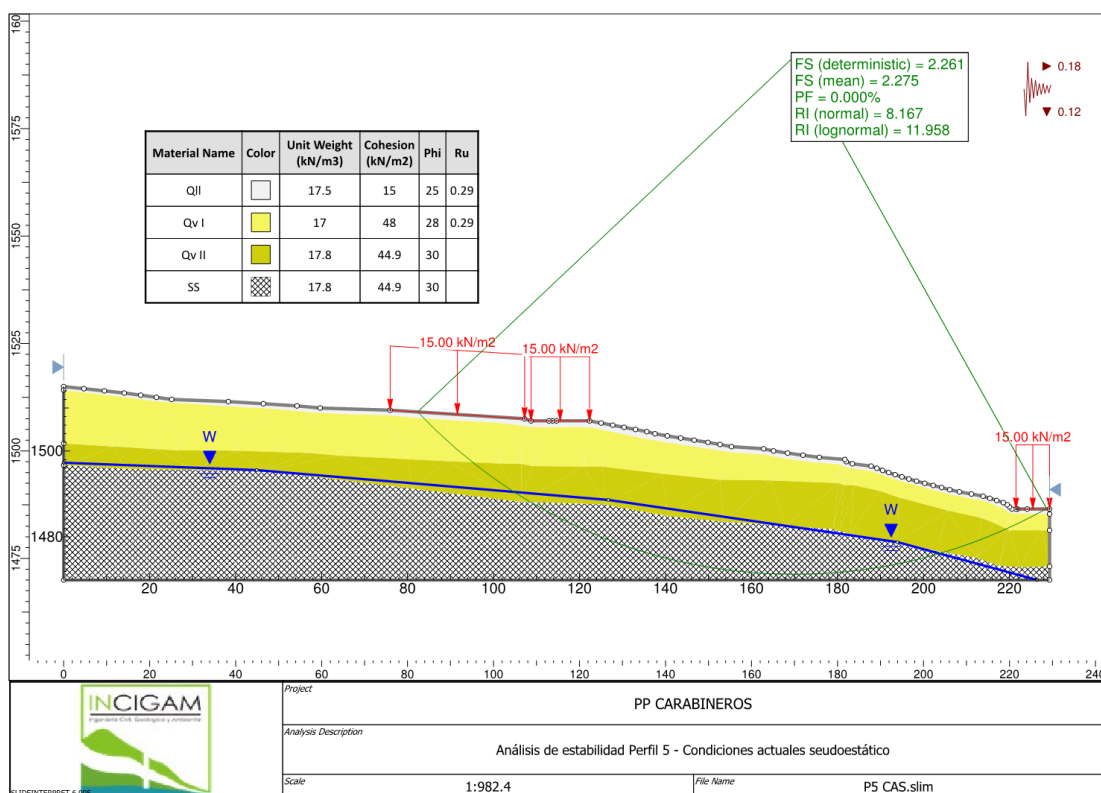


Ilustración 63. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones actuales (seudoestático)

Al evaluar la estabilidad, y como es de esperarse, bajo el supuesto de que se produce un aumento del nivel freático, el factor de seguridad disminuye; para este caso, se obtiene un FS determinístico de 2.865 en el caso estático. La siguiente ilustración muestra el resultado obtenido.

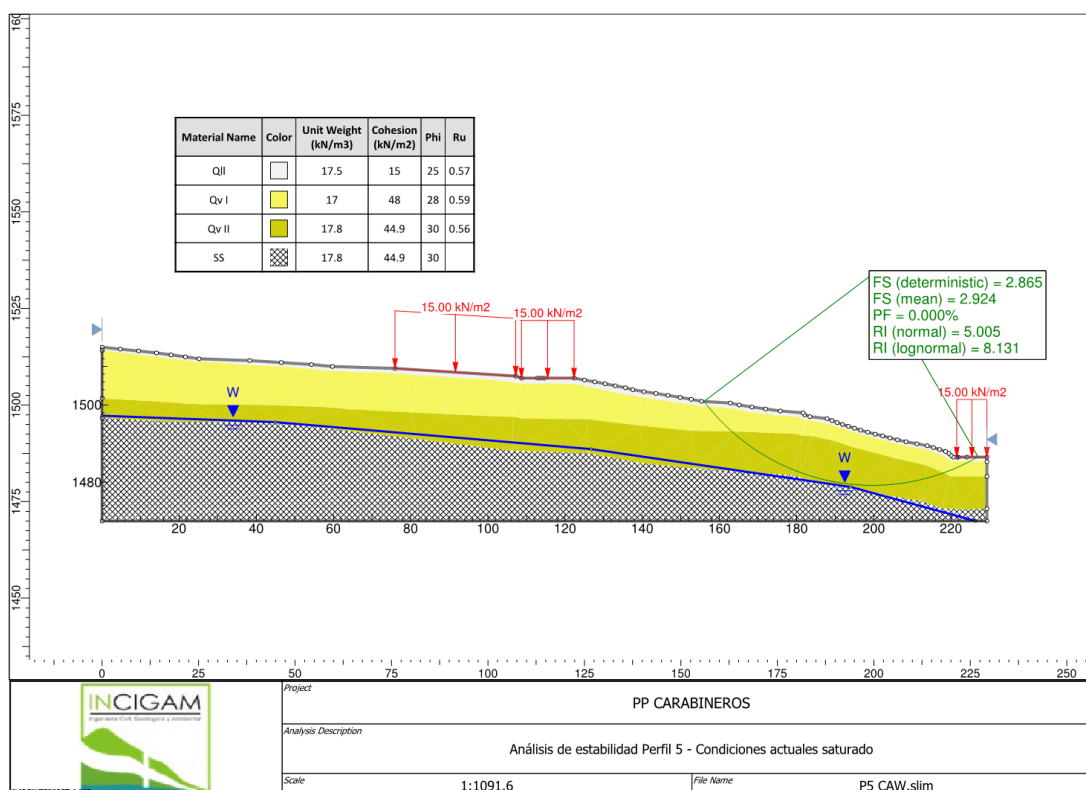


Ilustración 64. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)

PERFIL 6

Finalmente, para este perfil, el análisis de estabilidad en el caso estático, arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.355, por debajo del mínimo recomendado; lo que lo hace susceptible a la acción de agentes externos que puedan alterar su condición actual y generar eventos de falla e inestabilidad. Para el caso pseudoestático, en el que se obtiene un factor de seguridad de 0.963, por debajo del mínimo recomendado, el análisis y los resultados indican que, ante un evento de este tipo, con magnitudes de sismo similares, el terreno tendría un comportamiento inestable, con una probabilidad de falla del 62.4%. Las siguientes ilustraciones muestran los resultados obtenidos.

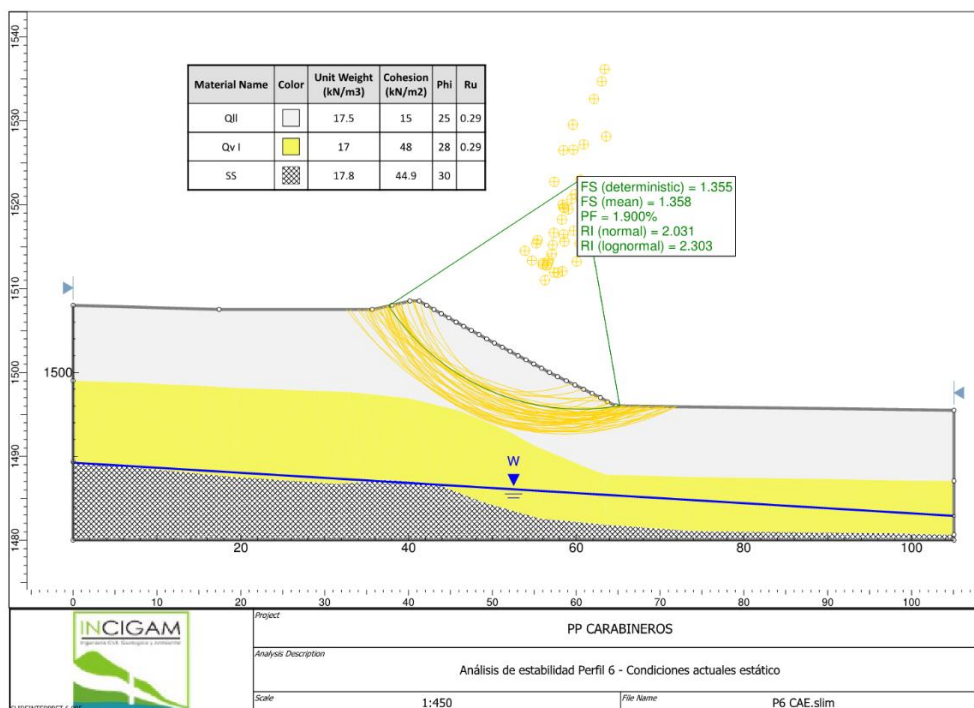


Ilustración 65. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones actuales (estático)

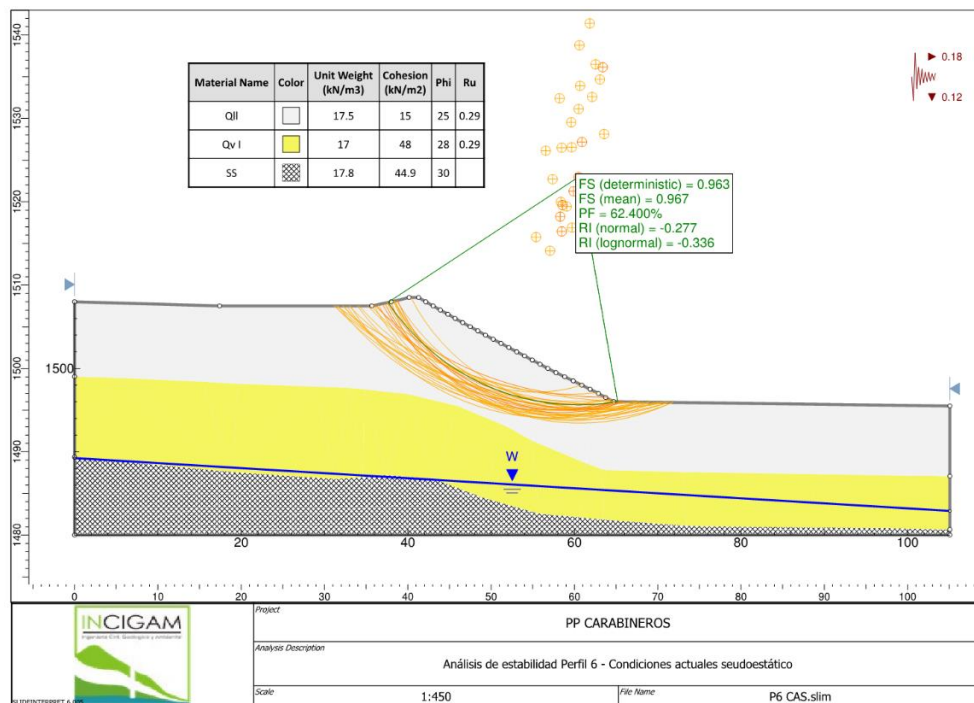


Ilustración 66. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones actuales (pseudoestático)

Finalmente, bajo el supuesto de que se presente un aumento del nivel freático, se obtiene un factor de seguridad de 0.978, evidenciando la susceptibilidad del perfil a agentes externos, como el agua en este caso, y el comportamiento no favorable, que podrían producir el aumento de estos niveles, ocasionando la falla de este sector. La siguiente ilustración muestra el resultado obtenido.

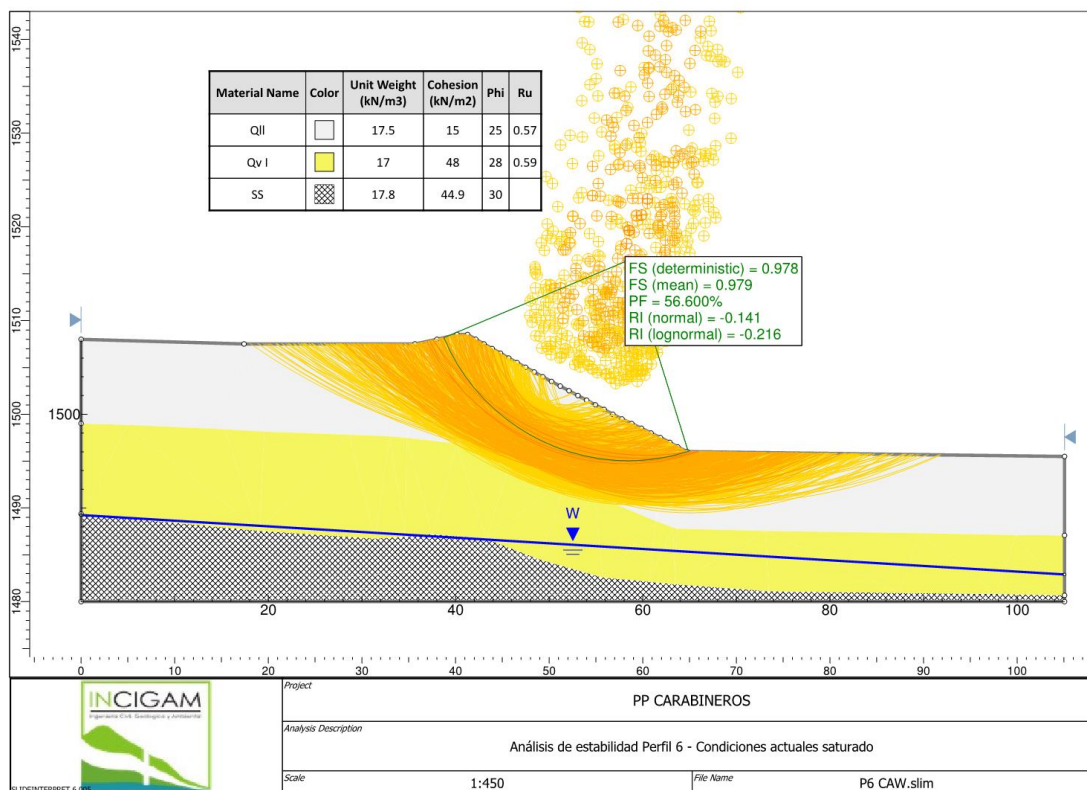


Ilustración 67. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, nivel freático alto (estático)

3.11 ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA

La amenaza por movimientos en masa es la probabilidad de que se presente este tipo de eventos, con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (DAP, DAGRD, EAFIT, 2019).

Para el análisis de la estabilidad, se requiere la elaboración de modelos para evaluar las condiciones de los taludes con base en la información de detalle obtenida a partir de los datos de campo y la información de la exploración del subsuelo; con estos datos, se calcula

el factor de seguridad en condiciones actuales, para obtener la susceptibilidad; el análisis de estos perfiles de estabilidad, para el caso pseudostático, y con aumento del nivel freático, permiten obtener la amenaza, cuyo resultado es la suma de los valores obtenidos en cada caso, en términos de la probabilidad de falla. Estos modelos requieren información relacionada con la estratigrafía del sector, estructura, propiedades de la resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno y modelos de simulación de niveles freáticos.

En el área de interés para el Plan Parcial Carabineros, se tienen dos categorías de amenaza por movimientos en masa que se describen a continuación:

Amenaza Baja: Corresponden a áreas con aceptables condiciones de estabilidad, sin evidencias físicas o históricas de procesos morfodinámicos, o si existen, su densidad es baja, con baja probabilidad de que se presenten movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada y las pendientes. El factor de seguridad de las laderas naturales dentro de esta categoría es $FS > 1.5$.

Corresponde a la mayor parte del área de estudio, representando el 95,9% del área total; se localiza de manera general, en toda el área de intervención; predominan las pendientes suaves a inclinadas, desarrolladas generalmente, sobre depósitos de vertiente cubiertos localmente por llenos antrópicos y donde se han configurado laderas, especialmente irregulares, cortas a moderadas e inclinadas.

Se encuentra en el sector norte asociado con los perfiles 1 y 2, en la zona donde se presentó el proceso morfodinámico y que ya cuenta con condiciones estables por las obras realizadas, para el perfil 1 se tienen valores de factores de seguridad en condiciones estáticas mayores a 2,44, en condiciones pseudoestáticas de 1,41 y con aumento de nivel freático de 1,85 y para el perfil 2, se tienen factores de seguridad de 2,33 para condiciones estáticas, 1,41 en condiciones pseudoestáticas y 1,84 con aumento de nivel freático.

En el sector centro y sur, se tienen los perfiles de estabilidad 4 y 5, los cuales, presentan valores de factores de seguridad en condiciones estáticas de 2,17 y 4,48; en condiciones pseudoestáticas de 1,36 y 2,26 y, finalmente, con aumento de nivel freático, se tienen valores de 1,70 y 2,86, respectivamente.

Amenaza Media: Son áreas con un nivel medio de probabilidad de que se presenten movimientos en masa, debido a la acción en conjunto de la lluvia, la pendiente y en alguna medida, a factores antrópicos. El factor de seguridad de las laderas naturales en esta categoría puede estar entre 1.25 y 1.5.

Esta categoría de amenaza corresponde al 4,01% del área total de estudio; se relaciona con la zona de los perfiles 3 y 6, donde se localiza el proceso activo en el sector El Patio. Estos perfiles presentan valores de factores de seguridad en condiciones estáticas de 1,35 y 1.407; condiciones pseudoestáticas de 0,96 y 1.028 y con aumento de nivel freático de 0,97 y 1.035.

La implementación o el desarrollo de estas zonas, deberá cumplir con la norma urbanística establecidas en la Norma NRS-10.



Ilustración 68. Mapa de zonificación de amenazas por movimientos en masa

3.12 APTITUD GEOLÓGICA

La zonificación de la aptitud del suelo o aptitud geológica parte de los aspectos topográficos, geológicos, geomorfológicos y de procesos morfodinámicos identificados durante el trabajo de campo y los cuales condicionan en forma directa el grado de estabilidad de las laderas.

A estos aspectos se agregó la evaluación de la estabilidad de las laderas considerando las obras necesarias para alcanzar factores de seguridad ajustados a los requerimientos existentes en este aspecto. La zonificación referente a la aptitud geológica para el uso y ocupación del suelo se presenta de acuerdo con la clasificación utilizada por las “Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá” (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

En el área de interés se identifican tres tipos de zonas de acuerdo con las características geológicas, geomorfológicas y a la complejidad de los procesos morfodinámicos identificados, las cuales se describen a continuación y se presenta en la Ilustración 69.

- Zonas aptas: corresponden a zonas que presentan alto grado de estabilidad, no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés y de la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas está condicionada al tipo de intervención que se proyecte y al uso y manejo que se dé a estas y a la UMI asociada (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

Esta categoría incluye las zonas que corresponden a amenaza baja por movimientos en masa y corresponde al 88,2% del área de estudio. Se localiza de manera generalizada al norte y sur del área de interés. Se recomienda donde las pendientes son inferiores a 60% se pueden desarrollar intervenciones urbanísticas sin mayores restricciones, además de completar con intervenciones no estructurales para el manejo de las aguas de escorrentía, especialmente en la parte alta de los taludes con pendientes más fuertes.

- Zonas aptas con restricciones moderadas: corresponden a zonas estables, y cuya estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como movimientos en masa identificados en la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte. Se considera que las obras de estabilización proyectadas son técnica y económicamente viables (Acuerdo Metropolitano 09/2012).

Estas zonas representan el 2,3% del área de interés y se identifican en el centro de esta, e involucra las porciones del terreno donde se identifica una amenaza por movimientos

en masa media y donde los procesos morfodinámicos son latentes. En estas zonas se pueden adoptar medidas correctivas y preventivas, como manejo adecuado de aguas de escorrentía, además de evitar la conformación de taludes y el desconfinamiento del terreno, siempre tratando de no modificar la configuración actual del terreno. Se recomienda que en estas zonas se ejecuten las obras propuestas y el área que está ubicada en espacio público sea reforestada con especies nativas.

- Zonas no aptas: estas áreas están asociadas a los retiros a las corrientes hídricas, definidos en el Acuerdo 048 de 2014 para la quebrada La Culebra que corresponde a 15 m y para la quebrada La Feria cuyo retiro corresponde a 10 m y representan el 9,5% del área total.

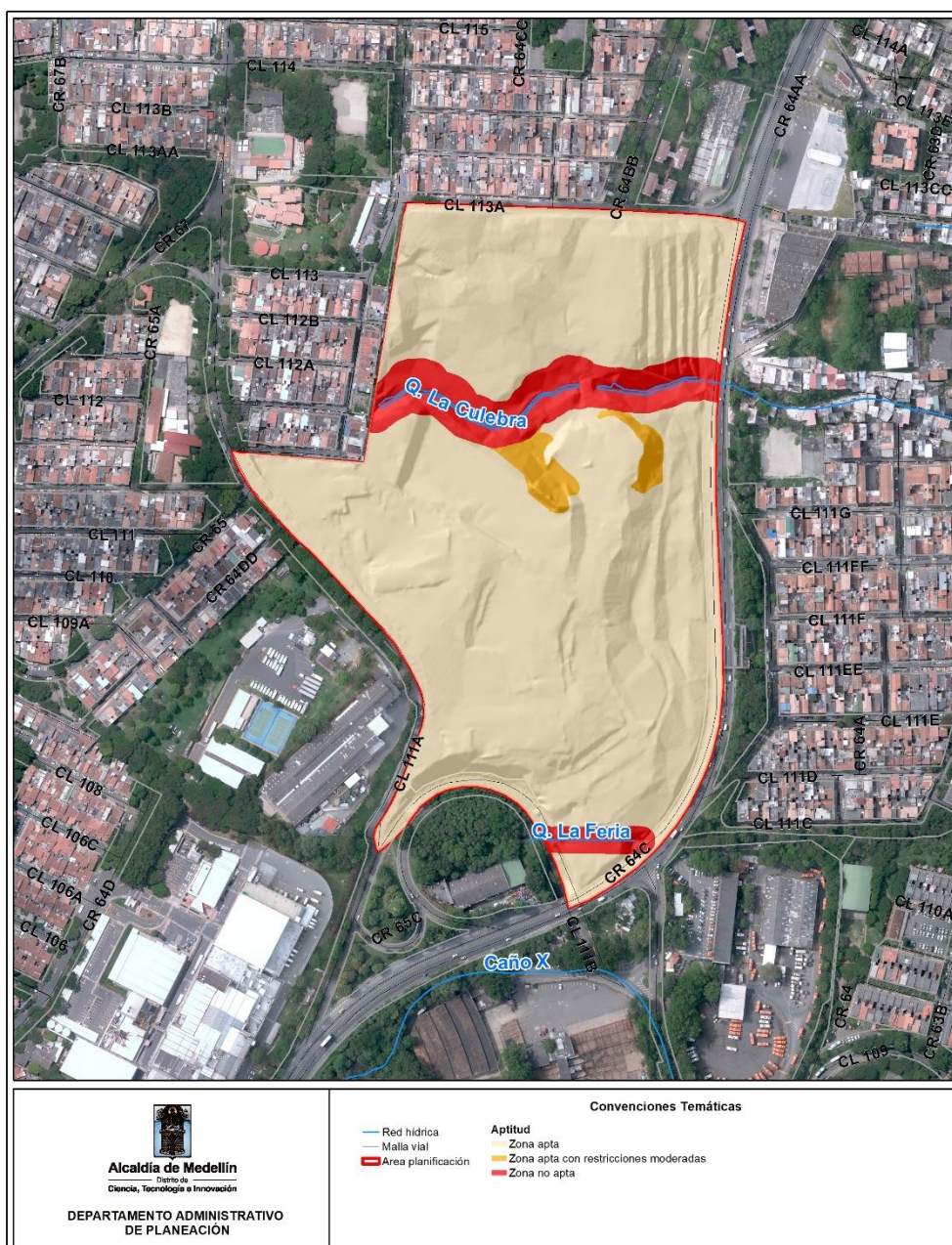


Ilustración 69. Zonificación aptitud geológica de la zona de estudio

3.13 RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS

Las recomendaciones que se presentan a continuación tienen como objetivo disminuir los niveles de amenaza identificados en el área de estudio, las cuales corresponden a medidas principalmente de tipo estructural que incluyen obras de ingeniería que buscan la estabilización de las laderas comprometidas, así como obras complementarias que se deben adelantar en toda el área de interés.

3.13.1 Análisis de estabilidad en condiciones proyectadas

El análisis de estabilidad en condiciones proyectadas se realiza para todos los perfiles considerando las intervenciones proyectadas en el polígono, determinadas a través de las unidades de actuación urbanística (UAU) y los corredores viales contemplados para conectar dichas unidades con la red de transporte del sector.

Para el Plan Parcial Carabineros se plantea desde el componente urbanístico la división del polígono en siete unidades de actuación urbanística, cada una con una tipología establecida en cuanto al tipo de edificaciones a implantar.

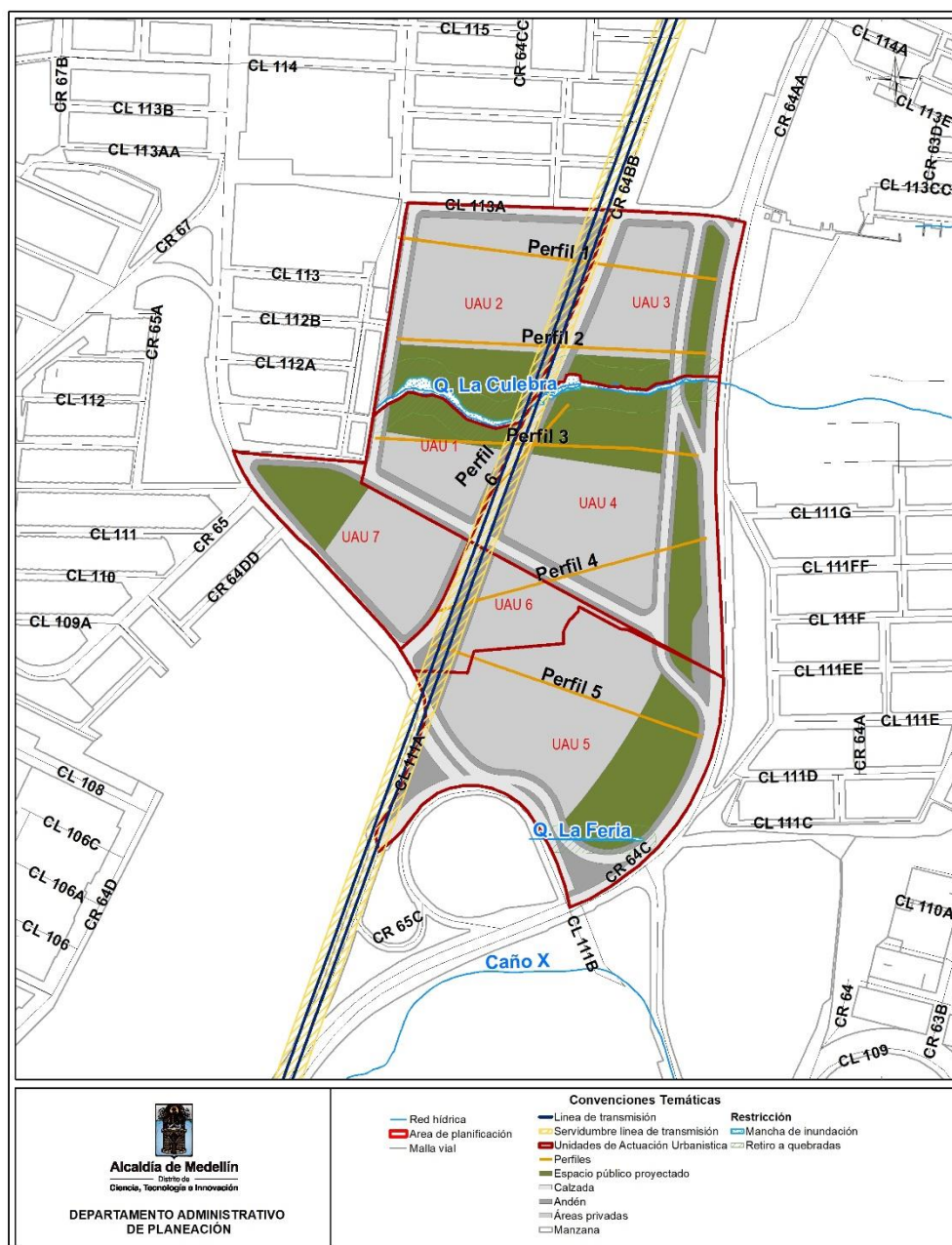


Ilustración 70. Modelo de ocupación PP. Carabineros

Se proyectan edificaciones de 15 niveles para las UAU 1 y 2, 25 niveles para las UAU 3 y 4, 13 niveles para la UAU 6 y 12 niveles para la UAU 7. En cuanto a la UAU 5, esta comprende la zona donde opera la escuela de Carabineros Carlos Holguín Mallarino, por lo que no se plantean intervenciones en dicho sector.

Adicionalmente se proyecta el desarrollo vial del polígono, encaminado a conectar las UAU con la red de transporte del sector. Para el desarrollo del presente plan parcial se cuenta con un proyecto vial conformado por siete (7) ejes viales.

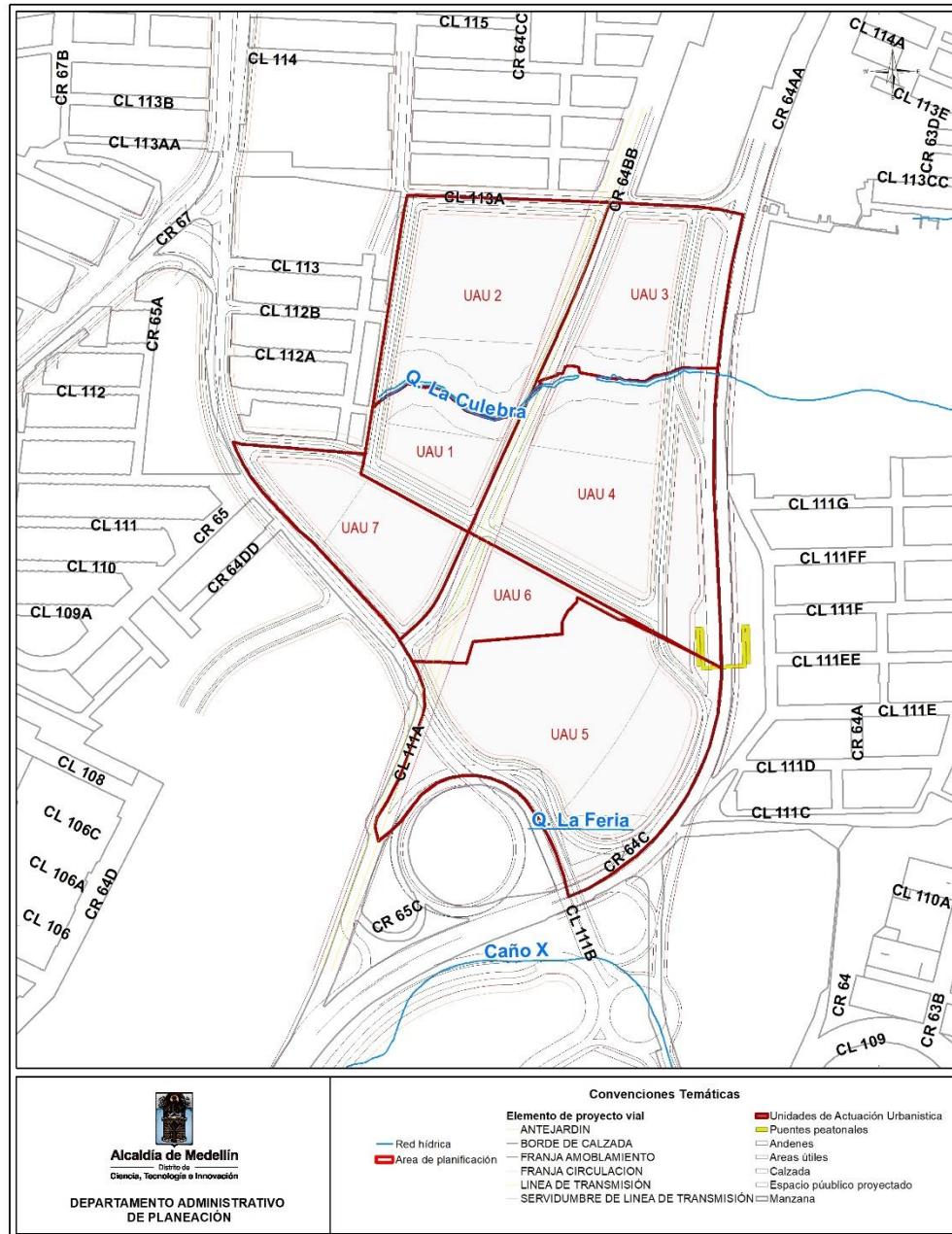


Ilustración 71. Proyecto vial PP. Carabineros

Debido a que no se poseen especificaciones de las edificaciones y estructuras proyectadas, diferentes a la cantidad de niveles proyectados por UAU, se infirieron algunos aspectos de estas como lo son nivel de desplante, huella de implantación, profundidad de la cimentación

y cargas estructurales. Cabe anotarse que, al poseerse altos espesores de lleno, se considera que el tipo de fundación pertinente debe corresponder a pilas, sin embargo, dicha hipótesis debe ser evaluada en los diseños puntuales de cada estructura que se proyecte en el sector, definiendo entre otros aspectos la profundidad, distribuciones y solicitaciones definitivas sobre cada elemento de cimentación.

En cuanto a los ejes viales, se cuenta con el diseño vial horizontal y vertical de los mismos, por lo que se pueden inferir en los modelos en condiciones proyectadas aspectos como nivel de desplante de las vías, ancho total, inclinación de taludes en corte y lleno, entre otros.

Los ejes viales se simulan a través de cargas superficiales sobre el ancho de la vía considerado en cada caso.

Al igual que en el análisis en condiciones actuales, se evalúa la estabilidad para las condiciones proyectadas, tanto en el caso estático como en el seudoestático, es decir, considerando la acción de un sismo.

A continuación, se presentan los análisis realizados:

PERFIL 1

Este perfil comprende, desde su tope hasta su base, la vía existente correspondiente a la carrera 64D, simulada a través de cargas superficiales; el eje vial 6, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+190, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m y cortes de hasta 0.7 m en una relación 1H:1V; la UAU 2, donde se simulan edificaciones de 15 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 1, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+340, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 22 m y cortes de hasta 1.9 m en una relación 1H:1V; la UAU 3, correspondiente a edificaciones de 25 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 5, tomando la sección transversal 0+630, que corresponde en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m, un corte de 3.9 m y un lleno de 0.6 m, ambos en una relación 1H:1V; y finalmente la calzada de la autopista norte, simulada a través de cargas superficiales.

Para este perfil se debe tener en cuenta la presencia del muro de contención existente aferente a la autopista norte, el cual no debe ser retirado del sector, ya que es necesario para garantizar las condiciones de estabilidad de este sector de la ladera. Igualmente, todas las obras planteadas en la UAU 3 y el eje vial 5, correspondientes al sector aferente a la corona de dicho muro, deben estar apoyadas en cimentaciones profundas, las cuales transmitan las cargas al suelo a un nivel por debajo de la profundidad de desplante del muro de contención, evitando así la sobrecarga del mismo.

Bajo las consideraciones anteriormente descritas, al analizar la estabilidad del perfil 1 para el escenario estático en las condiciones proyectadas un factor de seguridad mínimo de 2.563, con una probabilidad de falla de 0.0% y asociado a una superficie sobre un talud en lleno antrópico comprendido entre la UAU 3 y el eje vial 5. La siguiente ilustración muestra los resultados para el caso estático.

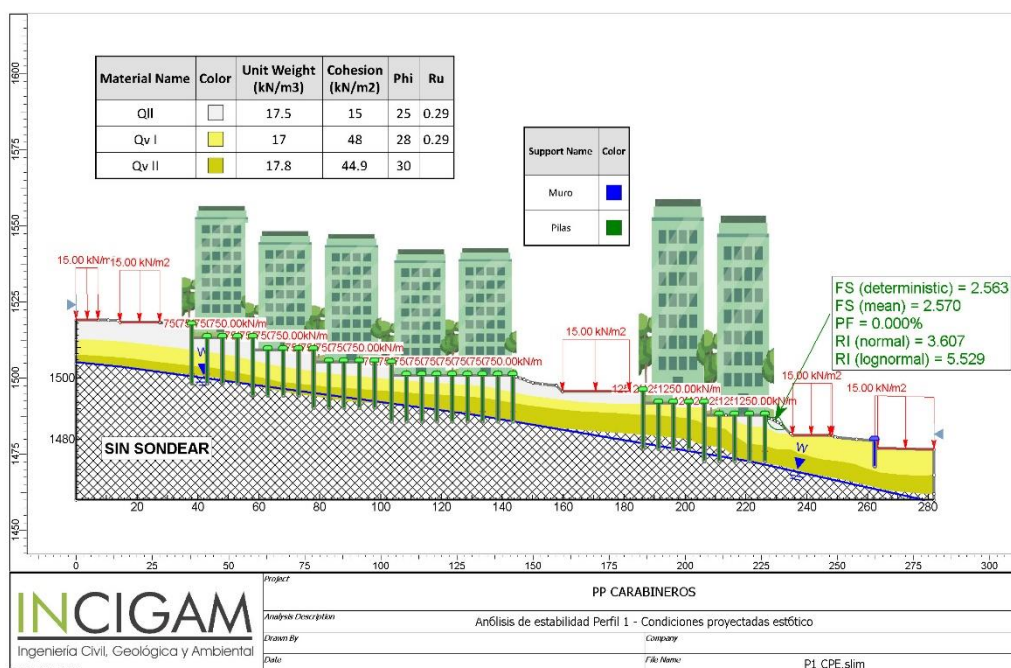
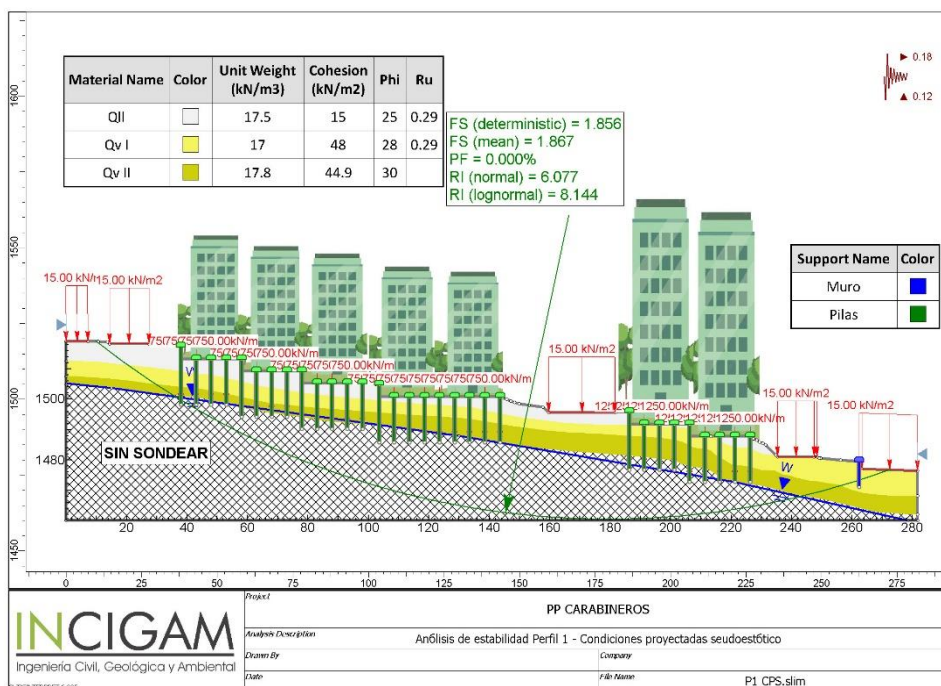


Ilustración 72. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)

Para el escenario seudoestático se encontró como en el caso estático, que el terreno satisface la condición de estabilidad mínima, con un factor de seguridad determinístico mínimo de 1.856, con una probabilidad de falla de 0.0% y asociado a una superficie profunda sobre el perfil. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla obtenida para este caso.



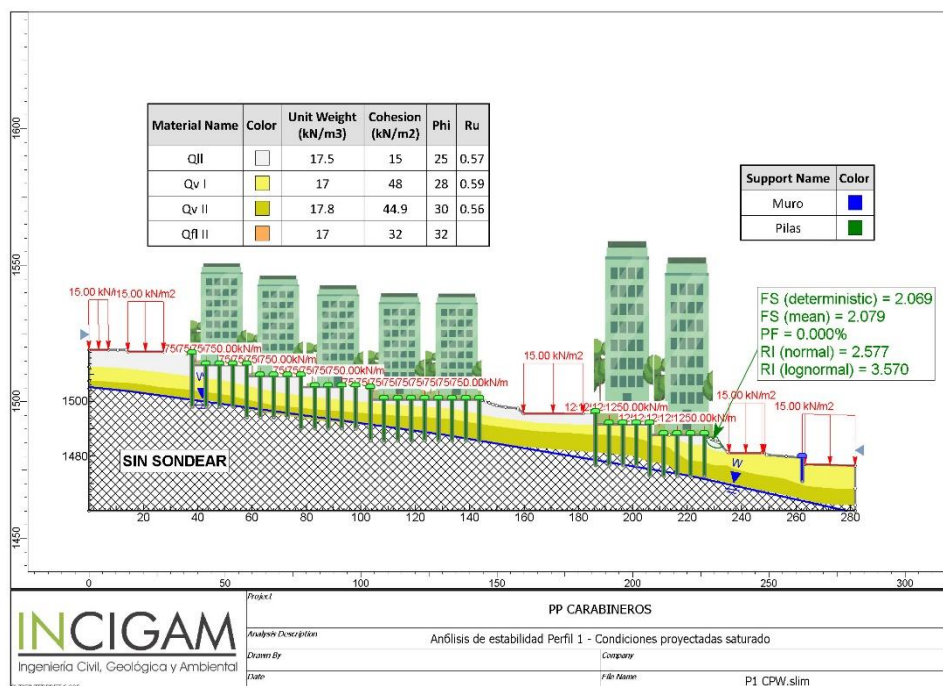


Ilustración 74. Análisis de estabilidad Perfil 1 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)

PERFIL 2

Este perfil comprende, desde su tope hasta su base, la vía existente correspondiente a la carrera 64D, simulada a través de cargas superficiales; el eje vial 6, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+110, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m y cortes de hasta 2.4 m en una relación 1H:1V; la UAU 2, donde se simulan edificaciones de 15 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 1, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+270, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 22 m, un corte de 2.5 m y un lleno de 0.6 m, ambos en una relación 1H:1V; la UAU 3, correspondiente a edificaciones de 25 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 5, tomando la sección transversal 0+565, que corresponde en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m, un lleno de 1.5 m en una relación 1H:1V, y un corte que inicialmente se había planteado en una relación de 1H:1V, resultando en una altura de 4.5 m desarrollada en el lleno antrópico, bajo la cual no se logró obtener un escenario de estabilidad satisfactorio, por lo que se optó por cortar este talud a una relación 2H:1V, resultando en un corte de 3.3 m, colindante con la cimentación propuesta para la UAU 3; finalmente se presenta la calzada de la autopista norte, simulada a través de cargas superficiales.

En las condiciones proyectadas del perfil 2 se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 2.604 con una probabilidad de falla de 0.0% en el caso estático y un factor de seguridad mínimo de 1.828 con una probabilidad de falla de 0.0% en el caso pseudoestático, ambas situaciones asociadas a una superficie sobre un talud en lleno antrópico comprendido entre el eje vial 5 y la autopista norte. Las siguientes ilustraciones muestran los resultados para los casos estático y pseudoestático.

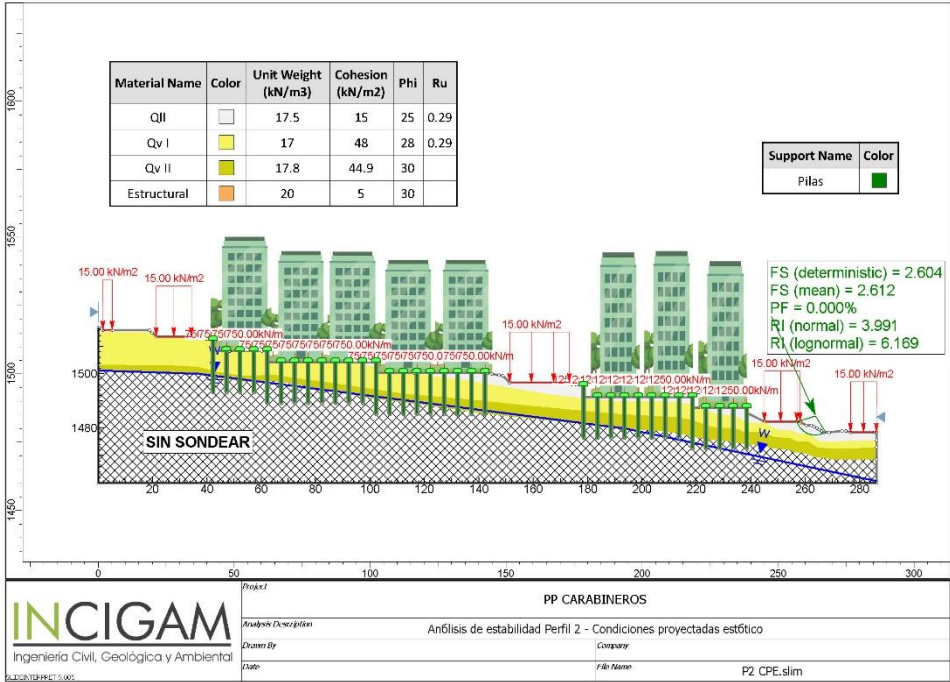


Ilustración 75. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)

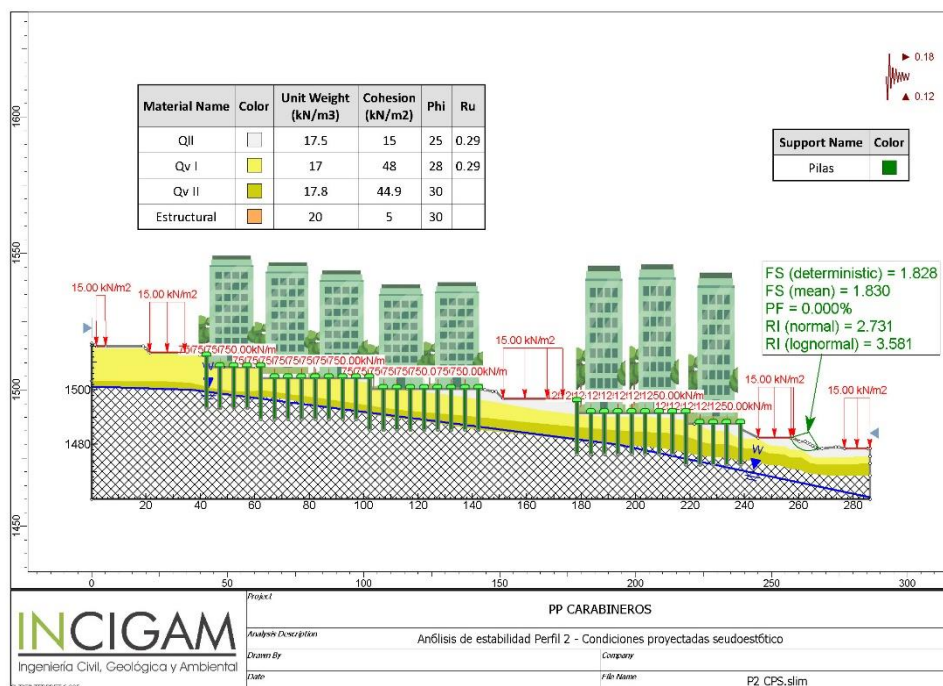


Ilustración 76. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (pseudoestático)

En el caso del escenario saturado, el perfil 2 arrojó un factor de seguridad mínimo de 2.307 y una probabilidad de falla de 0.0%, asociado al mismo talud en lleno donde se presentó la superficie de falla para los escenarios estático y pseudoestático, aunque con una superficie de falla de mayor envergadura. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla.

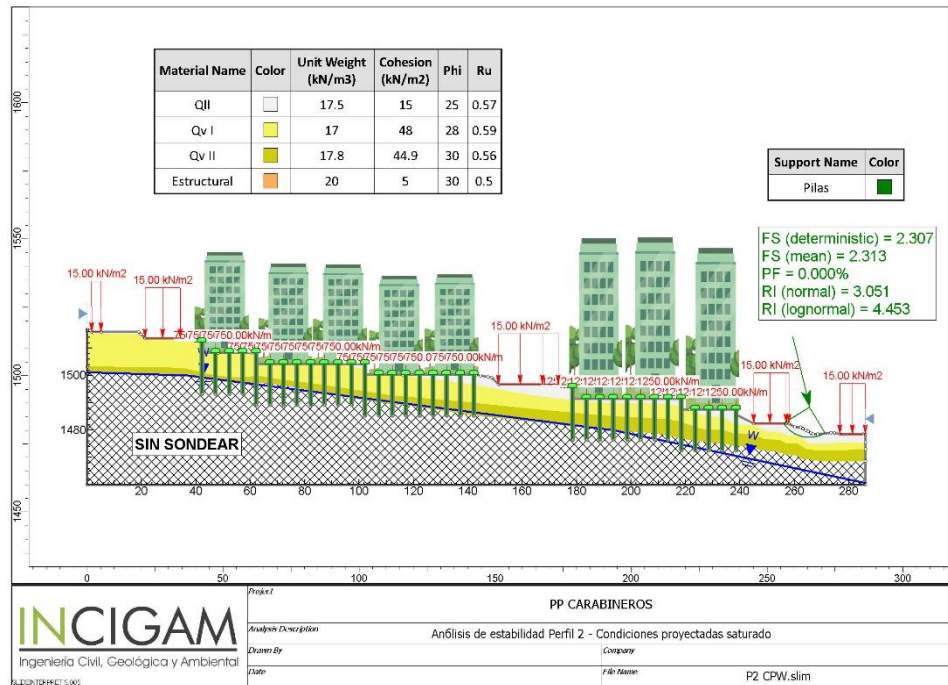


Ilustración 77. Análisis de estabilidad Perfil 2 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)

PERFIL 3

Este perfil comprende, desde su tope hasta su base, la vía existente correspondiente a la carrera 64D, simulada a través de cargas superficiales; el eje vial 6, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+030, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m, desplantada aproximadamente al nivel actual del terreno; la UAU 1, donde se simulan edificaciones de 15 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 1, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+190, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 22 m, un lleno de 2.6 m en una relación 1H:1V, y un corte que inicialmente se había planteado en una relación de 1H:1V, resultando en una altura de 7.7 m desarrollada en el lleno antrópico, bajo la cual no se logró obtener un escenario de estabilidad satisfactorio, por lo que se optó por implantar un muro de contención en este talud, con una altura de vástago de 2.8 m y unas pilas de 5.0 m de profundidad efectiva, complementado con un terraseo y perfilado del material de lleno desde la corona de la contención, a través de terrazas de máximo 4.0 m de altura en una relación 2H:1V, con bermas intermedias de 3.0 m de ancho; el eje vial 5, tomando la sección transversal 0+490, que corresponde en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m, y cortes de 1.2 m y 12.3 m en una relación de 1H:1V y desarrollados en lleno antrópico, donde se encontró que para el corte de mayor magnitud no se logra obtener un escenario de estabilidad satisfactorio, por lo que se optó por

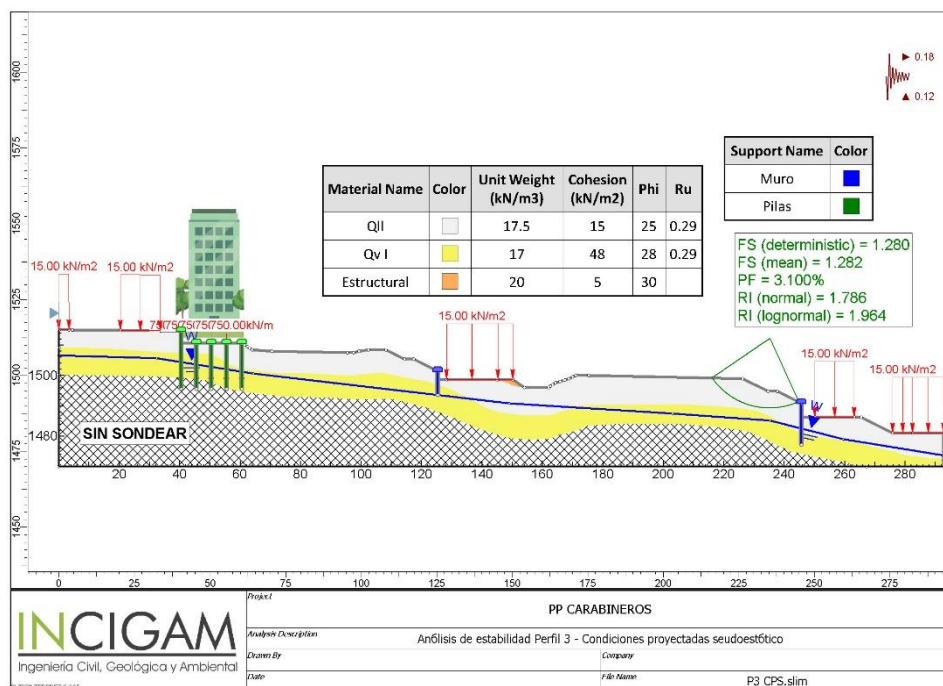


Ilustración 79. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)

En el caso del escenario saturado, el perfil 3 arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.529 y una probabilidad de falla de 0.3%, asociado al mismo talud en lleno donde se presentó la superficie de falla para los escenarios estático y seudoestático. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla.

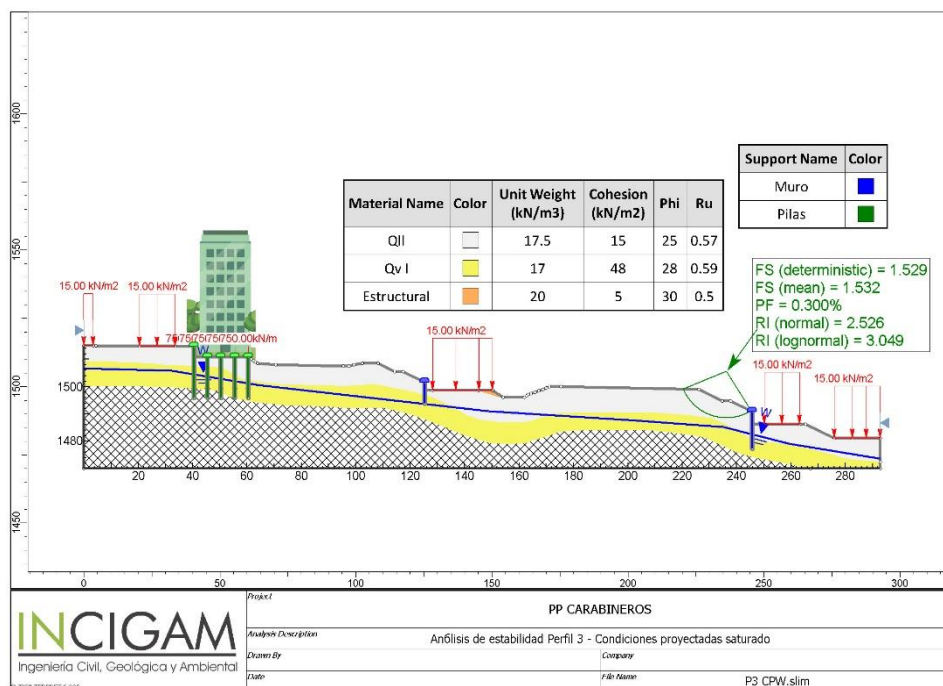


Ilustración 80. Análisis de estabilidad Perfil 3 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)

PERFIL 4

Este perfil comprende, desde su tope hasta su base, la influencia del eje vial 2, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+280, simulado a través de cargas superficiales; la UAU 7, donde se simulan edificaciones de 12 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 1, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+050, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 22 m, con cortes de hasta 1.0 m, conformados en una relación 1H:1V; la UAU 6, donde se simulan edificaciones de 13 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 4, tomando la sección transversal 0+280, que corresponde en una vía con ancho total de aproximadamente 17 m, con un corte de 6.9 m de altura desarrollado en una relación 1H:1V, conformado por 3.6 m de altura en depósito de vertiente I y los 3.3 m de altura restante por el lleno antrópico; la UAU 4, donde se simulan edificaciones de 25 niveles apoyadas en pilas, con corte verticales para su implantación de máximo 4 m; el eje vial 5, para el cual se tomó para la implantación la sección transversal 0+410, resultando en una vía con ancho total de aproximadamente 13 m, y cortes de 0.5 m y 5.0 m en una relación de 1H:1V, desarrollados en el lleno antrópico, donde se encontró que para el corte de mayor magnitud no se logra obtener un escenario de estabilidad satisfactorio, por lo que se optó por implantar un muro de contención en este talud, con una altura de vástago de 2.8 m y unas pilas de 5.0 m de profundidad efectiva,

complementado con un perfilado del material de lleno desde la corona de la contención en una relación 2H:1V; finalmente se presenta la calzada de la autopista norte, simulada a través de cargas superficiales.

En las condiciones proyectadas del perfil 4 se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 2.328 con una probabilidad de falla de 0.0% en el caso estático y un factor de seguridad mínimo de 1.564 con una probabilidad de falla de 0.3% en el caso seudoestático, ambas situaciones asociadas a una superficie sobre un talud en lleno antrópico comprendido entre el eje vial 5 y la autopista norte. Las siguientes ilustraciones muestran los resultados para los casos estático y seudoestático.

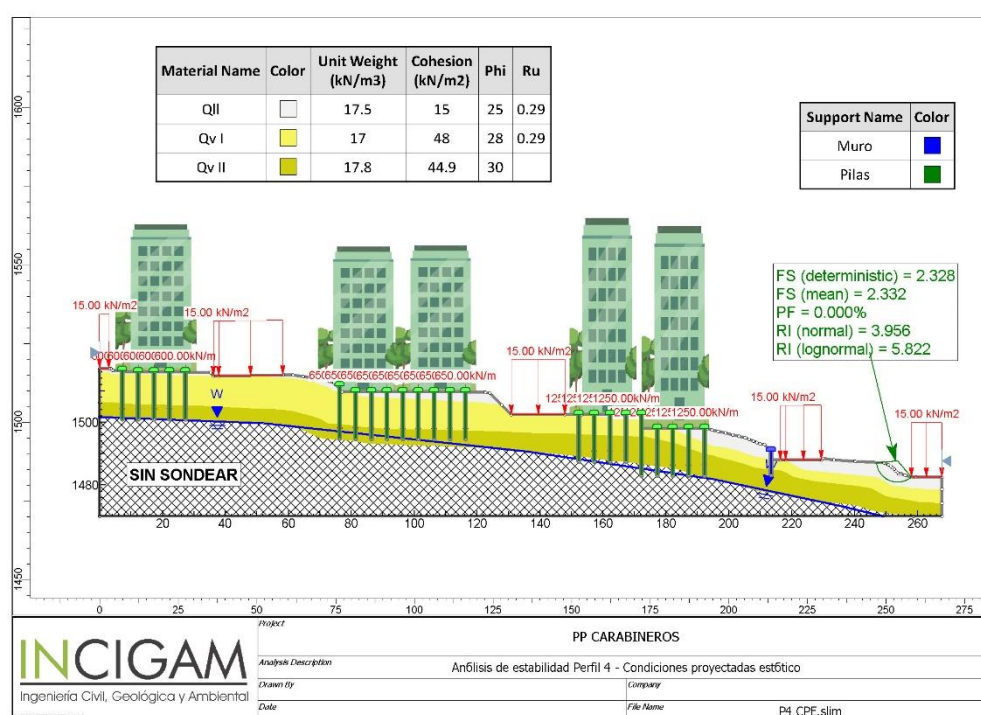


Ilustración 81. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)

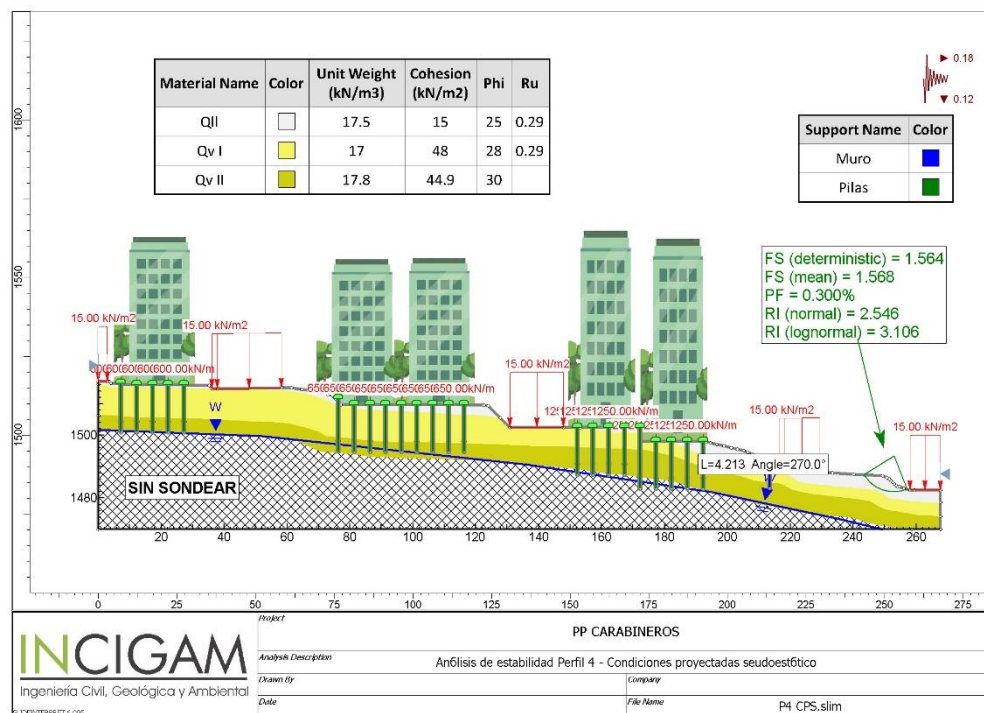


Ilustración 82. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (seudoestático)

En el caso del escenario saturado, el perfil 4 arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.814 y una probabilidad de falla de 0.0%, asociado al mismo talud en lleno donde se presentó la superficie de falla para los escenarios estático y seudoestático. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla.

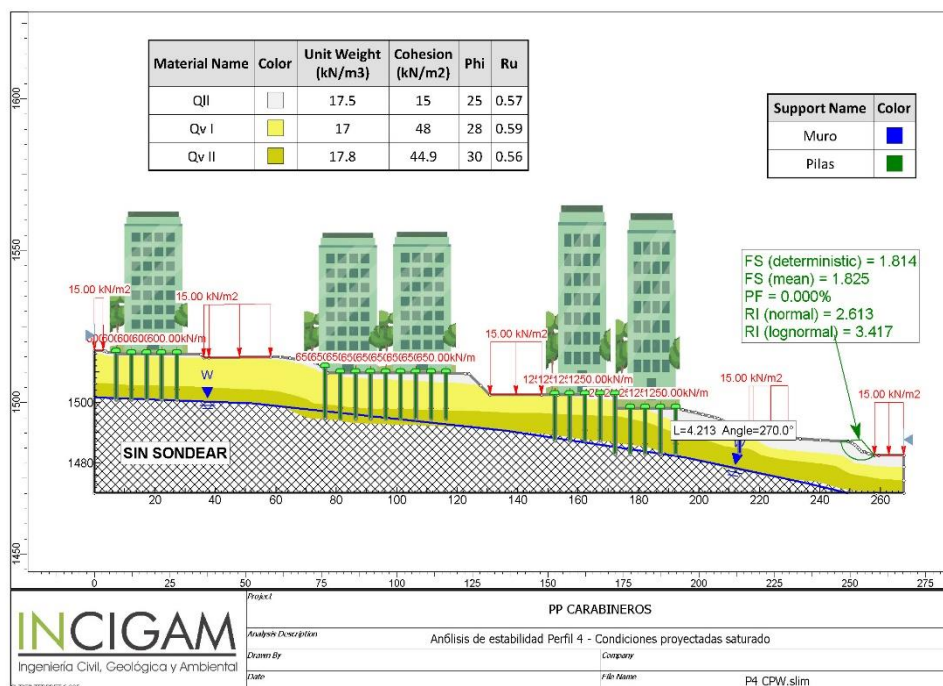


Ilustración 83. Análisis de estabilidad Perfil 4 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)

PERFIL 5

Este perfil comprende en su mayor extensión la UAU 5, correspondiente a la escuela de Carabineros y la cual no será intervenida en el presente proyecto urbanístico, por lo que se conserva la condición de cargas superficiales con las que se modelaron las estructuras existentes en condiciones actuales; finalmente se presenta la calzada de la autopista norte, donde se contempla su sobreancho para la conexión de la misma con el eje vial 5, generando un corte de 3.1 m de altura con una relación de inclinación de 1H:1V, desarrollado en su mayor parte sobre el depósito de vertiente I.

Para el escenario estático en las condiciones proyectadas del perfil 5 se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 4.396 con una probabilidad de falla de 0.0%, situación correspondiente a una superficie sobre un talud de corte asociado al acople el eje vial 5 y la autopista norte. La siguiente ilustración muestra los resultados para el caso estático.

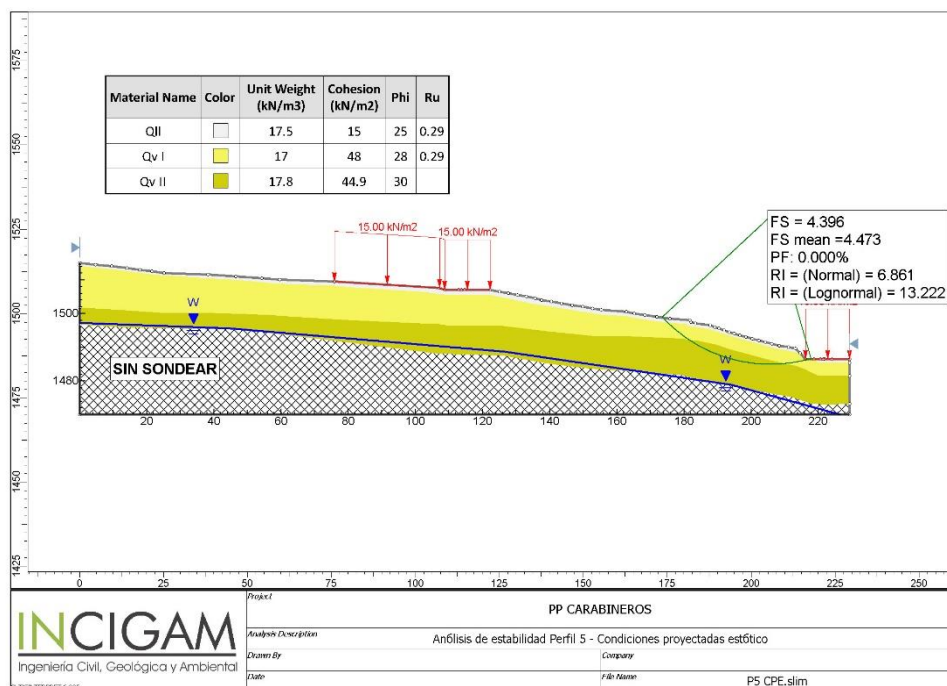


Ilustración 84. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)

Para el escenario pseudoestático se encontró un factor de seguridad determinístico mínimo de 1.954 y una probabilidad de falla de 0.0%, para los cuales se satisface la condición de estabilidad. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla obtenida para este caso.

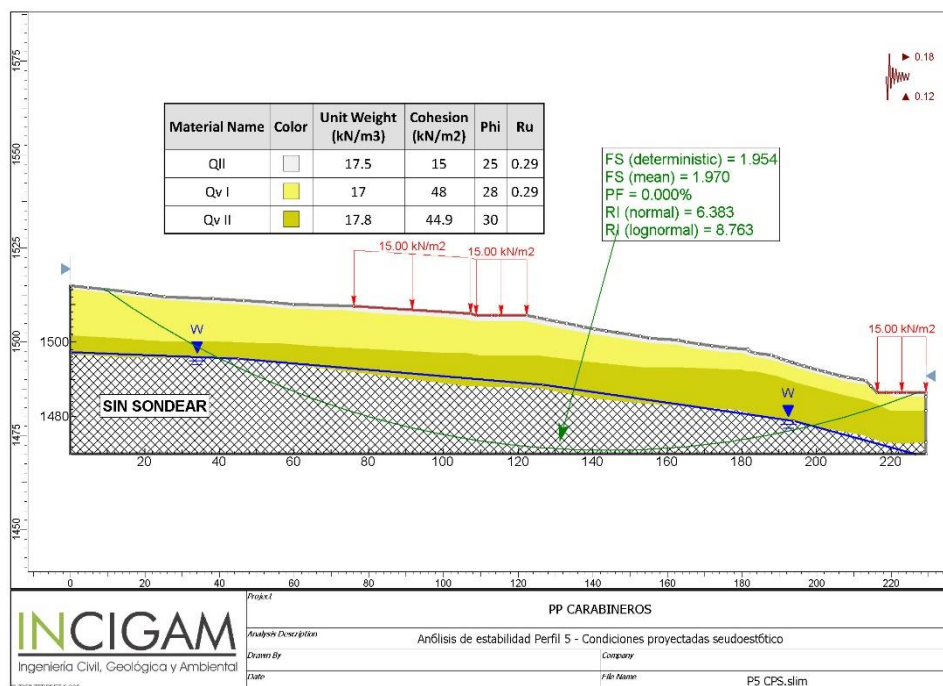


Ilustración 85. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (pseudoestático)

En el caso del escenario saturado, el perfil 5 arrojó un factor de seguridad mínimo de 2.824 y una probabilidad de falla de 0.0%, asociado al talud de corte del eje vial 5. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla.

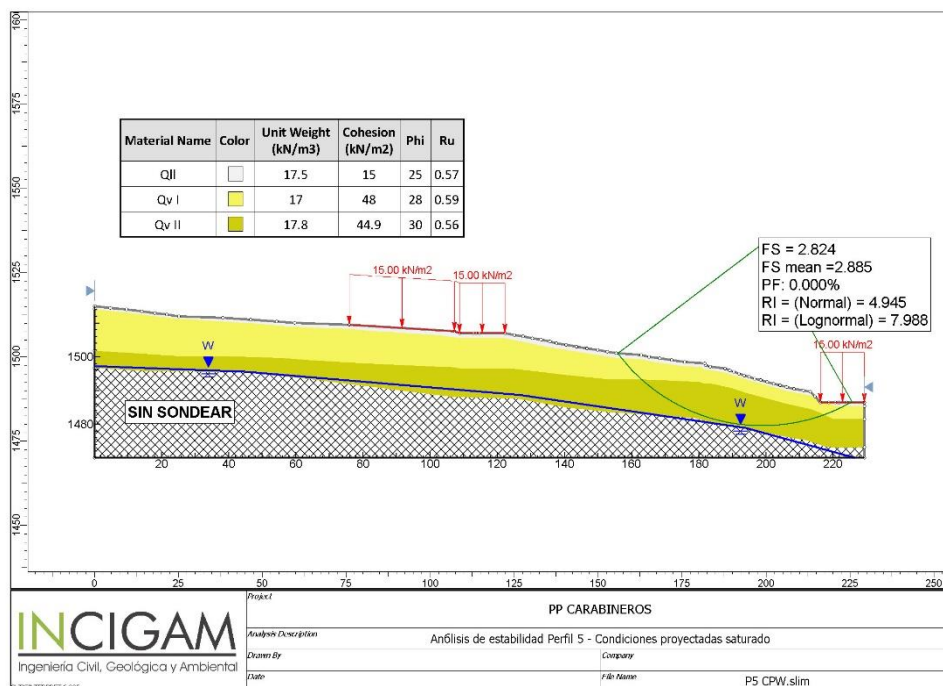


Ilustración 86. Análisis de estabilidad Perfil 5 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)

PERFIL 6

Finalmente, para el perfil 6, se presenta un desarrollo seudoparalelo al eje vial 1, por lo que se contemplan un escenario de corte y llenado sobre la ladera para la implantación de la vía, la cual se representa a través de cargas superficiales.

Para el escenario estático en las condiciones proyectadas del perfil 6 se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 2.250 con una probabilidad de falla de 0.0%, situación correspondiente a una superficie sobre el lleno proyectado para la vía. La siguiente ilustración muestra los resultados para el caso estático.

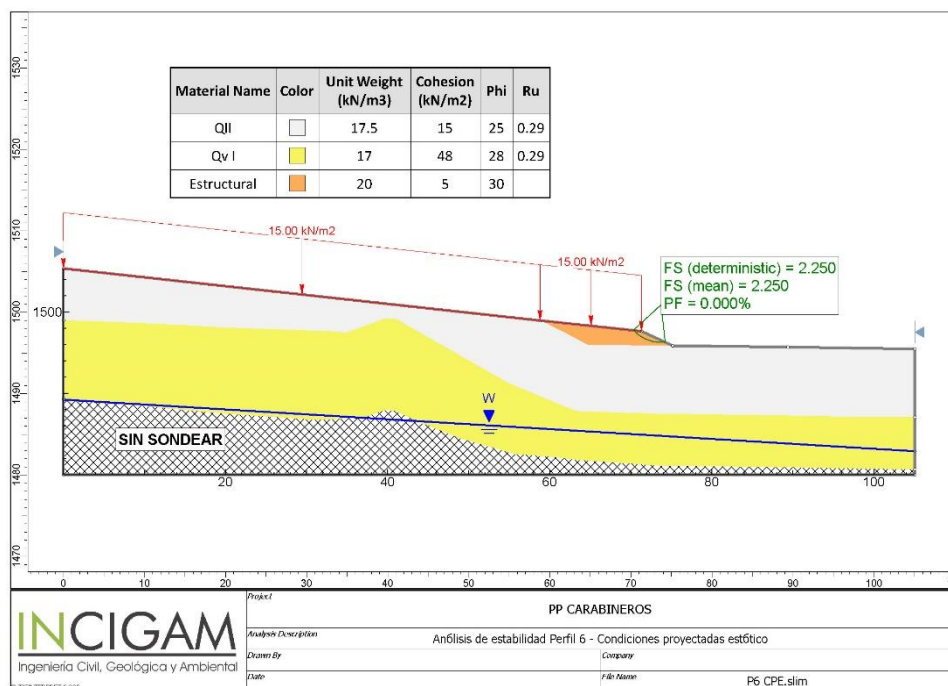


Ilustración 87. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (estático)

Para el escenario pseudoestático se encontró un factor de seguridad determinístico mínimo de 1.724 y una probabilidad de falla de 0.0%, para los cuales se satisface la condición de estabilidad. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla obtenida para este caso.

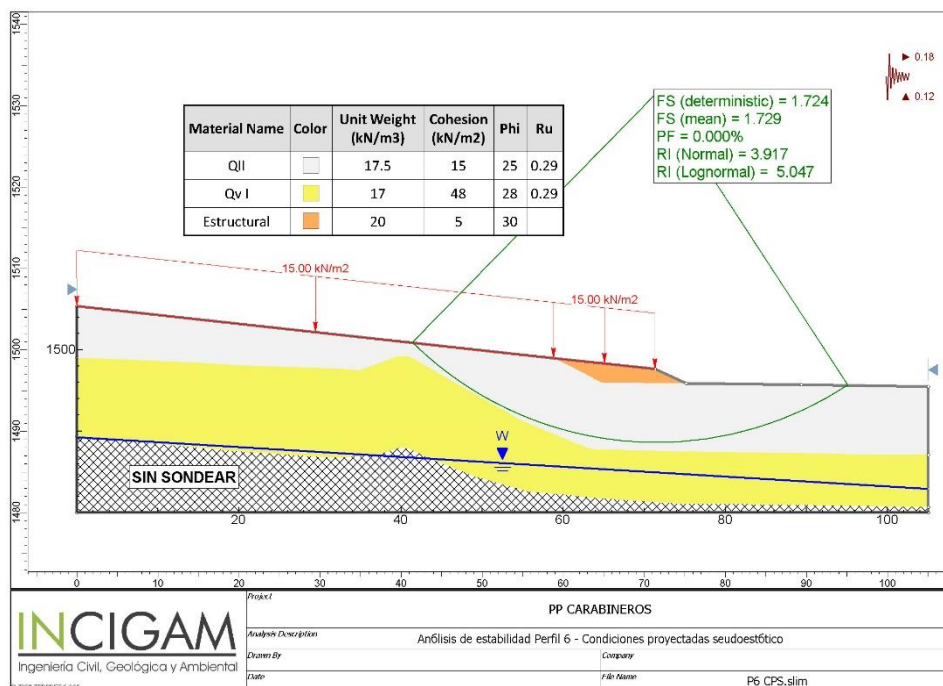


Ilustración 88. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condiciones proyectadas (pseudoestático)

Por último, el escenario saturado arrojó un factor de seguridad mínimo de 1.706 y una probabilidad de falla de 0.0%, asociado igualmente a una superficie de falla sobre el lleno de la vía. La siguiente ilustración muestra la superficie de falla.

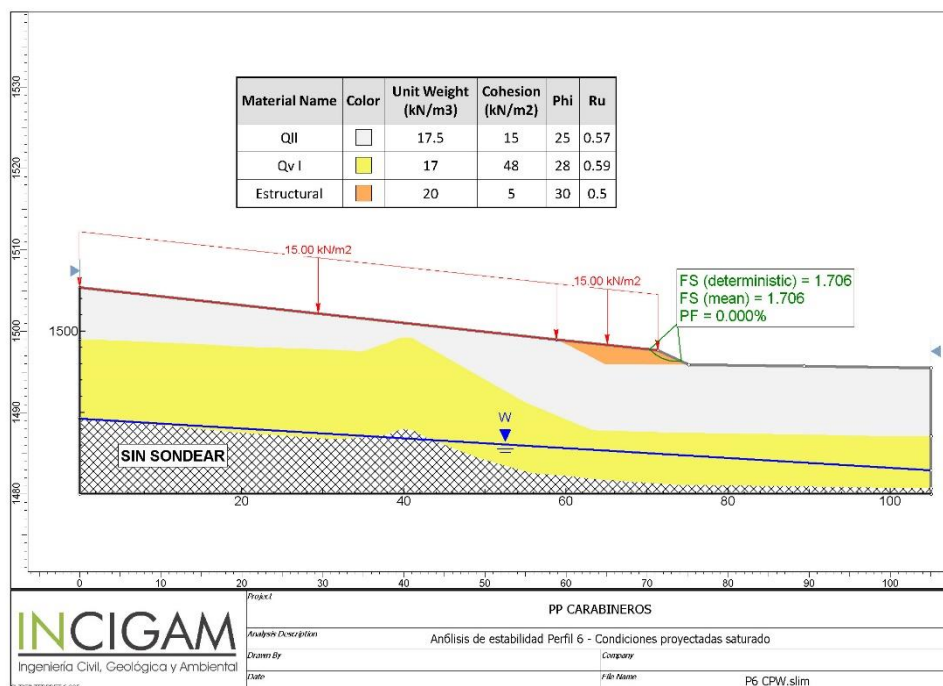


Ilustración 89. Análisis de estabilidad Perfil 6 PP. Carabineros, condición proyectada saturada (estático)

1.1.1.1. Conclusiones componente geotécnico

- En cuanto al análisis en condiciones proyectadas se encuentran grandes limitantes al no conocerse la implantación definitiva de las estructuras a implantar en el plan parcial, por lo que a pesar de que se obtuvieron valores de factor de seguridad satisfactorios para los análisis adelantados en el presente informe, se debe validar dicha condición de estabilidad para cada intervención urbanística que se plantee de forma definitiva, abarcando un mayor detalle en la caracterización de los materiales que componen el subsuelo y en las obras de estabilización y contención a implementar, en caso de ser necesarias.
- Bajo la misma idea, los análisis de estabilidad en condiciones proyectadas desarrollados en el presente informe constituyen una aproximación a las condiciones de urbanización previstas en el plan parcial, y deben interpretarse como una guía en cuanto a las posibles obras que se requerirían en el sector para garantizar la estabilidad, por lo que estos no deben tomarse como definitivos.
- Los muros u otras estructuras de conformación que se sean necesarias para la conformación de los ejes viales deben ser analizados a detalle, verificando que cada uno cumpla con las condiciones de estabilidad mínimas.

- Para los taludes en lleno que se requieran cortar en el desarrollo vial, se encontró que para las relaciones de corte de 1H:1V, los taludes podrían presentar problemas de inestabilidad, por lo que en los casos donde se deba cortar sobre este material, se recomienda implementar, además de otras medidas de contención, un terraceo y perfilado del material de lleno con terrazas de máximo 4.0 m de altura en una relación 2H:1V, con bermas intermedias de 3.0 m de ancho.
- El siguiente cuadro muestra, en resumen, los factores de seguridad determinísticos resultantes para cada caso producto del análisis de estabilidad en condiciones proyectadas, donde los factores obtenidos son superiores a los recomendados para los escenarios estático (1.50), pseudoestático (1.05) y estático saturado (1.50).

Tabla 19. Factores de seguridad para la condición proyectada.

Condiciones proyectadas			
SECCIÓN	Estático	Seudoestático	E. Saturado
Perfil 1	2.563	1.856	2.069
Perfil 2	2.604	1.828	2.307
Perfil 3	2.103	1.280	1.529
Perfil 4	2.328	1.564	1.814
Perfil 5	4.396	1.954	2.824
Perfil 6	2.250	1.724	1.706

3.14 CONCLUSIONES COMPONENTE GEOTÉCNICO

- Estratigráficamente, el terreno se conforma superficialmente por materiales de lleno antrópicos con muy pobres características geomecánicas que alcanzan espesores variables entre 1.0 m y 9.0 m, encontrando el máximo en el sondeo P6 ubicado hacia el centro del polígono. Subyaciendo estos materiales, se identifican dos variaciones de depósitos de vertiente, nombrados como Depósito de vertiente 1 y depósito de vertiente 2, ubicados uno encima de otro, y que se extienden hasta las máximas profundidades exploradas.
- En cuanto al colapso, las relaciones de pesos unitarios obtenidas indican una condición estable para el material, por lo que, se considera que, en términos generales, el material no posee un alto potencial al colapso.
- Debido a que, el potencial de expansión de los materiales de lleno antrópico es de alto a muy alto, se recomienda se tenga un especial manejo en la entrada y salida de agua

del suelo, con el fin de evitar cambios bruscos de volumen en este.

- En cuanto al fenómeno de licuación, los análisis cuantitativos muestran un factor de seguridad a la licuación superior a 1 para la ocurrencia del evento extremo; sin embargo, a la hora de adelantar estudios y diseños para el desarrollo de obras en el sector, se deben realizar análisis referentes a este fenómeno para cada caso en específico.
- Al finalizar el análisis de estabilidad para los perfiles trazados en el polígono, se encuentra que, en condiciones actuales, en general, se presentan condiciones de estabilidad favorables. Algunos de los perfiles presentan factores de seguridad inferiores a los mínimos recomendados que, aunque no indican una falla inminente del terreno, su estado metaestable lo hace fácilmente susceptible a alteraciones en la estabilidad ocasionados por agentes externos, como el agua o el viento
- Es importante resaltar del análisis de estabilidad realizado para el supuesto en el que se produce un aumento del nivel freático, que los factores de seguridad resultantes se ven afectados, reduciendo su valor, en comparación con los obtenidos de las modelaciones realizadas para las características freáticas actuales; esto, producto de una alteración del estado de esfuerzos de la masa de suelo, cuyas propiedades geomecánicas varían al encontrarse en condiciones saturadas, por lo que, resultará importante, la implementación de obras de control y manejo de agua que minimicen el aumento de estos niveles por efecto de infiltración y escurrimiento asociado a eventos de fuerte precipitación.
- Para el perfil 6, se presenta la condición más desfavorable cuando se modela la ocurrencia de un evento sísmico con un factor de seguridad de 0,963, indicando que, bajo este supuesto, el terreno fallaría.
- El siguiente cuadro muestra, en resumen, los factores de seguridad determinísticos resultantes para cada caso producto del análisis de estabilidad, observando la diferencia entre los modelos cuando se somete al terreno a aumentos del nivel freático.

Condiciones actuales						
SECCIÓN	Estático		Seudoestático		Aumento N. F.	
	F.S.	-	F.S.	PF/año	F.S.	PF/año
Perfil 1	2,442	-	1,412	0,00000	1,858	0,00000
Perfil 2	2,334	-	1,451	0,00002	1,846	0,00001
Perfil 3	1,407	-	1,028	0,00089	1,035	0,00089

Condiciones actuales						
SECCIÓN	Estático		Seudoestático		Aumento N. F.	
	F.S.	-	F.S.	PF/año	F.S.	PF/año
Perfil 4	2,173	-	1,369	0,00004	1,704	0,00001
Perfil 5	4,484	-	2,261	0,00000	2,865	0,00000
Perfil 6	1,355	-	0,963	0,00131	0,978	0,00119

- En cuanto al análisis en condiciones proyectadas se encuentran grandes limitantes al no conocerse la implantación definitiva de las estructuras a desarrollar en el plan parcial, por lo que a pesar de que se obtuvieron valores de factor de seguridad satisfactorios para los análisis adelantados en el presente informe, se debe validar dicha condición de estabilidad para cada intervención urbanística que se plantee de forma definitiva, abarcando un mayor detalle en la caracterización de los materiales que componen el subsuelo y en las obras de estabilización y contención a implementar, en caso de ser necesarias. Por lo tanto, una vez se vaya a desarrollar cada UAU, se deberán presentar los diseños definitivos y se deberá verificar si las condiciones iniciales evaluadas en el estudio se mantienen.
- Bajo la misma idea, los análisis de estabilidad en condiciones proyectadas desarrollados en el presente informe constituyen una aproximación a las condiciones de urbanización previstas en el plan parcial, y deben interpretarse como una guía en cuanto a las posibles obras que se requerirían en el sector para garantizar la estabilidad, por lo que estos no deben tomarse como definitivos.
- Los muros u otras estructuras de conformación que se sean necesarias para la conformación de los ejes viales deben ser analizados a detalle, verificando que cada uno cumpla con las condiciones de estabilidad mínimas (Ilustración 90).
- Para los taludes en lleno que se requieran cortar en el desarrollo vial, se encontró que para las relaciones de corte de 1H:1V, los taludes podrían presentar problemas de inestabilidad, por lo que en los casos donde se deba cortar sobre este material, se recomienda implementar, además de otras medidas de contención, un terraceo y perfilado del material de lleno con terrazas de máximo 4.0 m de altura en una relación 2H:1V, con bermas intermedias de 3.0 m de ancho.

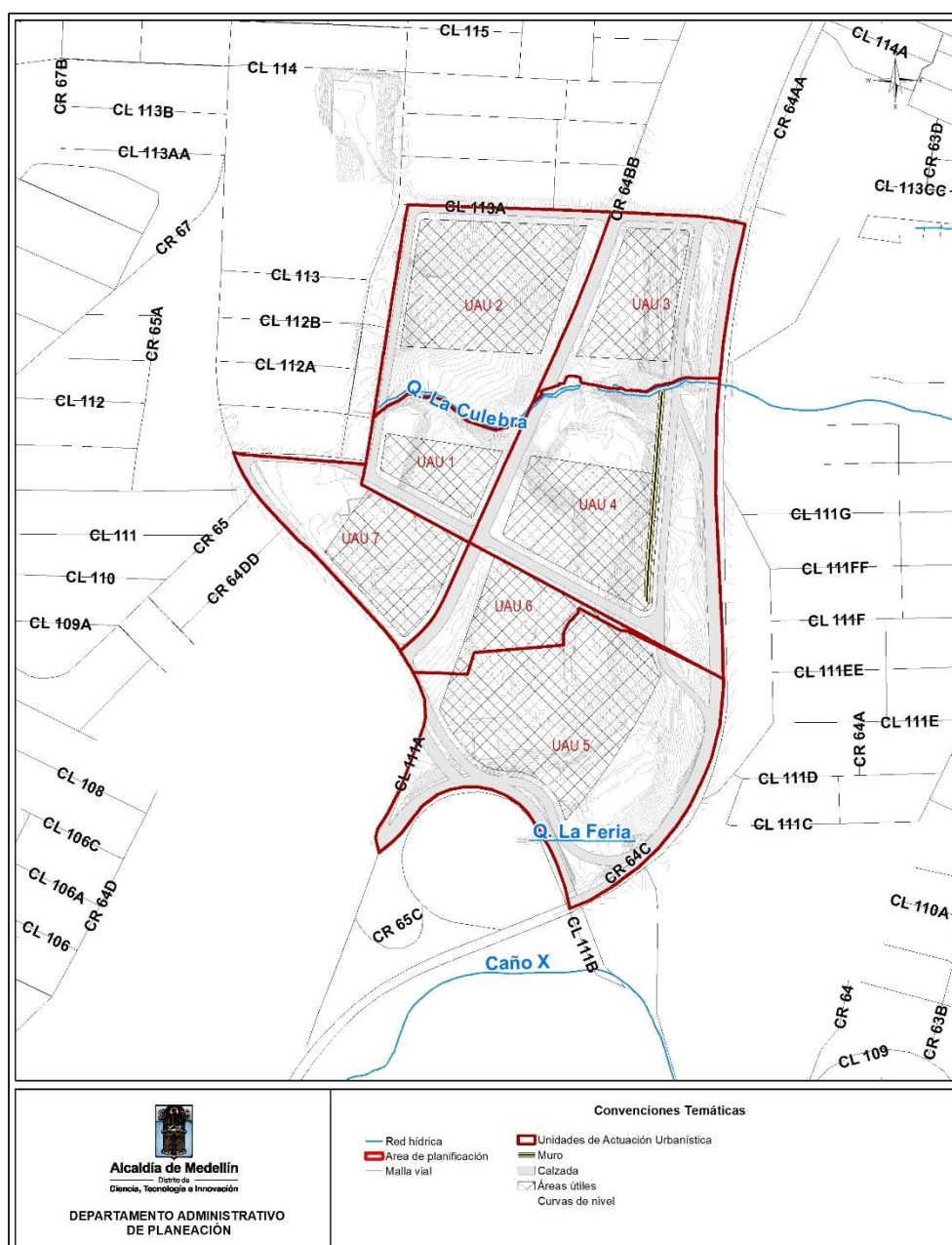


Ilustración 90. Obras propuestas según el análisis de condiciones proyectadas

- El siguiente cuadro muestra, en resumen, los factores de seguridad determinísticos resultantes para cada caso producto del análisis de estabilidad en condiciones proyectadas, donde los factores obtenidos son superiores a los recomendados para los escenarios estático (1.50), pseudoestático (1.05) y estático saturado (1.50).

Condiciones proyectadas			
SECCIÓN	Estático	Seudoestático	E. Saturado
Perfil 1	2.563	1.856	2.069
Perfil 2	2.604	1.828	2.307
Perfil 3	2.103	1.280	1.529
Perfil 4	2.328	1.564	1.814
Perfil 5	4.396	1.954	2.824
Perfil 6	2.250	1.724	1.706

- Como se menciona anteriormente, los análisis de estabilidad en condiciones proyectadas son una aproximación a las condiciones de urbanización previstas en el plan parcial; sin embargo, no se cuenta con los diseños específicos y cabidas finales. Por lo tanto, se deben interpretar las obras como una guía en cuanto a la necesidad de garantizar la estabilidad del terreno, más no como los diseños definitivos. Siendo así, la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en condiciones proyectadas sería baja como se muestra en la Ilustración 91.



4 BIBLIOGRAFÍA

- ACUERDO METROPOLITANO 09/2012. Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.
- Alcaldía de Medellín, 2014. Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín, Acuerdo 48 de 2014. Medellín: Alcaldía de Medellín.
- Alcaldía de Medellín, 2015. Decreto Municipal 1626 de 2015. Gaceta oficial No. 4347
- Alcaldía de Medellín, 2015. Decreto Municipal 2077 del 21 de diciembre de 2015. Medellín – Antioquia, 186 p.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2007. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- Alcaldía de Medellín, 2015b. Documento técnico de soporte Macroproyecto Río Norte, diciembre de 2015. Medellín – Antioquia
- Bowles, J. E. 1998. Foundation Analysis and Design. 4ta. Ed., McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- NSR-10, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. 2010. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2012. Propuestas sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000. Bogotá D.C. 88 p.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2015. Guía metodológica para la elaboración de estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa. Bogotá D.C. 189 p.

Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2017. Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000. Bogotá D.C., 218 p.