

Análisis geotécnico y estudio de amenaza para urbanización en depósitos antrópicos de media
ladera

Juan David Machado Arias

Trabajo de grado para optar título de Magister en Geotecnia

Director

Julián Mauricio Contreras C.

Ingeniero Civil. Magister en Ingeniería Civil



Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías Físico - Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Geotecnia

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mi familia que física y espiritualmente me incentivan a la realización de mis proyectos, por sus esfuerzos, su apoyo y su voz de aliento. Mil gracias.

Tabla de Contenido

Introducción	19
1. Objetivos	20
1.1 Objetivo General	20
1.2 Objetivos Específicos	20
2. Localización	21
3. Justificación.....	22
4. Marco Conceptual	23
4.1 Geología Regional.....	23
4.2 Estratigrafía	24
4.2.1 Formación Simití (Kis).....	25
4.2.2 Formación la Luna (Ksl)	25
4.2.3 Formación Umir (Ksu).....	26
4.2.4 Depósitos Cuaternarios (Qal).....	26
4.3 Geología estructural	27
4.3.1 Sinclinal del nuevo mundo.....	27
4.3.2 Anticlinal de Chucurí	28
4.3.3 Falla San Vicente	28
4.3.4 Falla La Plazuela	28
4.4 Estructura de la roca del subsuelo.....	28
4.5 Geomorfología	30
4.5.1 Morfogénesis	31
4.5.2 Morfometría	31

4.5.3 Morfodinámica	32
4.6 Hidrogeología	32
4.7 Cobertura vegetal	32
4.8 Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio	33
4.9 Análisis de flujo	34
4.10 Evaluación de la amenaza	35
4.10.1 Amenaza por inundación.....	36
4.10.2 Amenaza por movimientos en masa.....	38
4.10.3 Amenaza sísmica.....	39
4.2 Metodología para el análisis de estabilidad global.....	40
4.2.1 Métodos de equilibrio limite	41
4.2.2 Factor de seguridad	43
4.2.3 Métodos de análisis	43
4.2.3.1 Métodos de tablas o número de estabilidad.	44
4.2.3.2 Método de talud infinito.....	44
4.2.3.3 Método de bloque deslizante.....	44
4.2.3.4 Método Ordinario o de Fellenius.	44
4.2.3.5 Método de Bishop	45
4.2.3.6 Método de Jambú.	45
4.2.3.7 Método de Spencer.....	45
4.2.3.8 Método de Morgenstern y Price.	46
4.2.4 Métodos numéricos	46
4.2.4.1 Métodos numéricos continuos.....	46
4.2.4.2 Método de elementos finitos.	47

4.2.5 Análisis probabilístico software SLIDE.....	47
4.2.5.1 Método mínimo Global.	47
4.2.5.2 Método talud general.....	47
4.2.5.3 Confiabilidad del talud general.	48
4.2.5.4 Superficie probabilística critica.....	48
4.2.5.5 Superficie determinística crítica.....	49
5. Caracterización geológica y geotecnica	49
5.1 Unidades geológicas de ingeniería (UGI)	49
5.2 Litoestratigrafía local	50
5.2.1 Formación Umir (Sr - R).....	50
5.2.2 Depósitos de coluvión o de ladera (Ql).....	51
5.2.3 Depósito de relleno (Qan)	51
5.2.4 Depósito de relleno (Sa).....	52
5.3 Geomorfología	55
5.3.1 Morfogénesis componente denudacional	55
5.3.1.1 Ladera erosiva muy abrupta (Dlema).....	56
5.3.1.2 Ladera erosiva (Dle).....	56
5.3.1.3 Ondulaciones (Do).	57
5.3.1.4 Superficie de erosión o aplanamiento (Dsa)	58
5.3.1.5 Ladera erosiva abrupta (Dlea).	58
5.3.2 Morfogénesis componente antropogénico	60
5.3.2.1 Ladera terraceda (Alt).....	60
5.3.2.2 Planos y campos de llenos antrópicos (Ar).	61
5.3.2.3 Planicie agrícola (Apa).....	61

5.3.2.4 Terrazas agrícolas (Ata).....	61
5.3.2.5 Ladera explanada (Ale).....	61
5.3.2.6 Canal Artificial (Aca).....	62
5.3.2.7 Ambiente fluvial y lagunar.....	62
5.3.2.8 Laguna (Flg).....	63
5.3.3 Morfometría.....	65
5.3.4 Morfodinámica.....	67
5.4 Hidrogeología.....	71
5.5 Cobertura vegetal.....	72
5.5.1 Territorios artificializados.....	72
5.5.2 Territorios agrícolas.....	72
5.5.3 Bosques y áreas seminaturales.....	73
5.5.4 Áreas húmedas.....	73
5.5.5 Superficies de agua.....	73
5.6 Exploración geotécnica de referencia.....	76
5.6.1 Exploración geotécnica directa.....	76
5.6.2 Exploración geotécnica indirecta.....	83
5.6.2.1 Línea sísmica LS-1 (año 2016).....	86
5.6.2.2 Línea sísmica LS-2 (año 2016).....	88
5.6.2.3 Línea sísmica LS-3 (año 2016).....	90
5.6.2.4 Línea sísmica LS-1 (año 2018).....	91
5.6.2.5 Línea ReMi No. 1.....	94
5.6.2.6 Línea ReMi No. 2.....	95
5.6.2.7 Línea ReMi No. 3.....	96

5.6.2.8 Línea ReMi No.4.....	97
5.7 Resultados ensayos de laboratorio	98
5.7.1 Ensayos de clasificación.....	98
5.7.2 Ensayos de peso unitario	102
5.7.3 Ensayos de corte directo.....	103
5.8 Propiedades de los suelos	104
5.9 Perfil del suelo.....	108
5.10 Análisis de flujo	110
5.10.1 Curvas IDF	110
5.10.2 Permeabilidad de los suelos	114
5.10.3 Secciones de análisis	115
5.10.4 Modelo geológico geotécnico	118
5.10.5 Análisis de flujo	120
5.11 Evaluación de la amenaza	128
5.11.1 Definición de las unidades de análisis y secciones de falla	129
5.11.2 Modelo geológico geotécnico	129
5.11.3 Factores detonantes	129
5.11.3.1 Lluvia.	130
5.11.3.2 Sismo.....	130
5.11.4 Análisis de estabilidad.....	130
5.11.4.1 Escenario 1 – condiciones actuales.	133
5.11.4.2 Escenario 2 – considerando cortes de tierra del proyecto.	143
5.11.4.3 Escenario 3 – Considerando cortes y cargas de edificaciones	154
5.10.5 Nivel de Amenaza	166

6. Conclusiones y recomendaciones.....167

Referencias Bibliográficas169

Apéndices170

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Clasificación pendiente</i>	32
Tabla 2 <i>Métodos de estabilidad de taludes</i>	41
Tabla 3. <i>Total de área cubierta por ambientes morfogenéticos</i>	55
Tabla 4. <i>Clasificación pendiente</i>	65
Tabla 5. <i>Leyendas de cobertura vegetal. Tomado de Metodología Corine Land Cover, IDEAM 2010.</i>	74
Tabla 6. <i>Sondeos realizados a percusión (año 2016)</i>	77
Tabla 7. <i>Sondeos realizados a rotación y percusión (año 2018)</i>	77
Tabla 8. <i>Registros del ensayo SPT a percusión (2016)</i>	79
Tabla 9. <i>Registros del ensayo SPT a rotación (año 2018)</i>	79
Tabla 10. <i>Registro de ensayos SPT a percusión (año 2018)</i>	81
Tabla 11. <i>Registro de profundidad de ensayos y coordenadas de ensayos SPT</i>	83
Tabla 12. <i>Localización y longitud líneas sísmicas ejecutadas (año 2016)</i>	86
Tabla 13. <i>Localización y longitud línea sísmica ejecutada (año 2018)</i>	86
Tabla 14. <i>Localización y longitud líneas sísmicas ejecutadas (año 2021)</i>	93
Tabla 15. <i>Relación de ensayos realizados</i>	98
Tabla 16. <i>Resultados ensayos de laboratorio de clasificación exploración 2016 y 2018</i>	99
Tabla 17. <i>Resultados ensayos de laboratorio de clasificación exploración 2021</i>	99
Tabla 18. <i>Resultados ensayos peso unitario exploración 2016 y 2018</i>	102
Tabla 19. <i>Resultados ensayos peso unitario exploración 2021</i>	102
Tabla 20. <i>Resultados ensayos de corte directo exploración 2016 y 2018</i>	103
Tabla 21. <i>Resultados ensayos de corte directo exploración 2021</i>	103

Tabla 22. <i>Resultados de ensayos de laboratorio para material de relleno</i>	105
Tabla 23 <i>Resultados de ensayos de laboratorio para material coluvial</i>	106
Tabla 24. <i>Resultados de ensayos de laboratorio para material residual</i>	107
Tabla 25. <i>Propiedades finales de los suelos</i>	108
Tabla 26. <i>Clasificación de los Perfiles de Suelo</i>	109
Tabla 27. <i>Media anual multianual de la estación El Pantano</i>	112
Tabla 28 <i>Días con lluvia al año estación El Pantano</i>	112
Tabla 29 <i>Promedio máximo precipitación anual estación El Pantano</i>	113
Tabla 30 <i>Valores de coeficientes para la región andina</i>	113
Tabla 31. <i>Intensidad media estación El Pantano [mm/hr]</i>	114
Tabla 32 <i>Coefficiente de Permeabilidad del Suelo</i>	114
Tabla 33. <i>Características hidráulicas del suelo</i>	115
Tabla 34 <i>Parámetros geotécnicos de análisis</i>	120
Tabla 35. <i>Valores del coeficiente F_a, para la zona de periodos cortos del espectro</i>	132
Tabla 36. <i>Valores del coeficiente F_v, para la zona de períodos intermedios del espectro</i>	132
Tabla 37. <i>Análisis de estabilidad Escenario 1</i>	134
Tabla 38. <i>Análisis de estabilidad Escenario 2 cortes de tierra</i>	144
Tabla 39 <i>Análisis de estabilidad Escenario 3 cortes y cargas de edificaciones</i>	154
Tabla 40. <i>Análisis de estabilidad Escenario 3 cortes sobrecargas y obras de estabilización</i>	164
Tabla 41. <i>Clasificación de amenaza</i>	166
Tabla 42 <i>Nivel de amenaza para cada escenario analizado</i>	167

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Localización área de estudio-</i>	21
Figura 2. <i>Implantación arquitectónica en predio de estudio</i>	22
Figura 3 <i>Geología Regional. Adaptada de la Plancha 120 Bucaramanga.</i>	24
Figura 4 <i>Niveles de roca con buzamiento hacia el NW sobre la vía San Vicente - Bucaramanga aproximadamente a 650 m hacia el NE del área en estudio. Fuente G.T. S.A.S.</i>	29
Figura 5 <i>Niveles rocosos con buzamiento hacia el NW sobre antiguo afloramiento de la antigua vía San Vicente-Bucaramanga hacia el SW del lote en estudio. Fuente G.T. S.A.S.</i>	30
Figura 6. <i>Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Tomado de Suarez 1998.</i>	33
Figura 7. <i>Mapa de amenaza por inundación escenarios 1 y 2. Tomado de EOT Betulia, 2016.</i>	37
Figura 8. <i>Mapa de amenaza por movimientos en masa, escenario 2. Tomado EOT Betulia, 2016.</i>	38
Figura 9. <i>Mapa de amenaza sísmica rural. Tomado de EOT Betulia, 2016.</i>	39
Figura 10. <i>Plano geológico local (UGI), Adaptado de G.T. S.A.S.</i>	53
Figura 11. <i>Perfil geológico local 1. Tomado de G.T. S.A.S.</i>	54
Figura 12. <i>Perfil geológico local 2 Tomado de G.T. S.A.S.</i>	54
Figura 13. <i>Columna estratigráfica general. Tomada de G.T. S.A.S.</i>	54
Figura 14. <i>Ladera erosiva muy abrupta (Dlema) adaptado G.T. S.A.S.</i>	56
Figura 15 <i>Ambientes denudacionales (Ondulaciones (Do), Ladera erosiva (Dle), Ladera erosiva abrupta (Dlea), Ladera terraceda (Alt), Planos y campos de llenos antrópicos (Ar) y Planicie agrícola (Apa)) adaptado de G.T. S.A.S.</i>	60
Figura 16. <i>Ambientes antropogénicos (Apa, Ar, Alt y Aca). Adaptado de G.T. S.A.S.</i>	62
Figura 17. <i>Ambientes denudacionales, antrópicos y fluvial. Adaptado de G.T. S.A.S.</i>	63

Figura 18. <i>Mapa de unidades geomorfológicas en el área de estudio. Adaptado de G.T. S.A.S con modificaciones propias.</i>	64
Figura 19. <i>Mapa de pendientes. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.</i>	66
Figura 20. <i>Perfil general de pendientes con edificaciones.</i>	67
Figura 21. <i>Mapa de procesos morfodinámicos en el área del proyecto. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.</i>	70
Figura 22. <i>Perfil general de procesos morfodinámicos con edificaciones</i>	71
Figura 23. <i>Unidades de cobertura vegetal. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.</i>	75
Figura 24. <i>Profundidad y localización de los sondeos realizados año 2016 y 2018. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.</i>	78
Figura 25. <i>Localización de los sondeos realizados año 2021. Tomado de IAUS 20979</i>	82
Figura 26. <i>Localización de la exploración geotécnica indirecta años 2016 y 2018. Adaptada de G.T. S.A.S. con modificaciones propias.</i>	85
Figura 27. <i>Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS1</i>	87
Figura 28. <i>Refracción sísmica – Modelo tomografía 2D LS2</i>	88
Figura 29. <i>Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS2</i>	89
Figura 30. <i>Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS3</i>	90
Figura 31. <i>Refracción sísmica – Modelo tomografía 2D LS1</i>	91
Figura 32. <i>Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS1</i>	92
Figura 33. <i>Localización de la exploración geotécnica indirecta año 2021. Tomado de IAUS 20979</i>	93
Figura 34. <i>Modelo sismo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.1. Tomado de IAUS 20979</i>	94

Figura 35. <i>Modelo sismo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.2.</i> <i>Tomado de IAUS 20979</i>	95
Figura 36 <i>Modelo sismo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.3.</i> <i>Tomado de IAUS 20979</i>	96
Figura 37. <i>Modelo sismo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No..</i> <i>Tomado de IAUS 20979</i>	97
Figura 38. <i>Grafico Esfuerzo normal efectivo vs esfuerzo cortante estrato relleno</i>	106
Figura 39 <i>Grafico Esfuerzo normal efectivo vs esfuerzo cortante estrato de material coluvial.</i>	107
Figura 40. <i>Grafico Esfuerzo normal efectivo vs esfuerzo cortante estrato residual a roca</i>	108
Figura 41. <i>Estaciones meteorológicas cercanas al sitio del proyecto. Fuente IDEAM</i>	111
Figura 42 <i>Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estación el Pantano</i>	114
Figura 43. <i>Perfiles de análisis</i>	116
Figura 44. <i>Detalle perfil topográfico 1.</i>	117
Figura 45 <i>Detalle perfil topográfico 2.</i>	117
Figura 46 <i>Detalle perfil topográfico 3.</i>	117
Figura 47 <i>Detalle perfil topográfico 4.</i>	118
Figura 48. <i>Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 1.</i>	118
Figura 49. <i>Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 2.</i>	119
Figura 50. <i>Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 3.</i>	119
Figura 51. <i>Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 4.</i>	119
Figura 52 <i>Modelo de precipitación. Perfil 1.</i>	120
Figura 53. <i>Cabeza de presión. Perfil 1</i>	121
Figura 54. <i>Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 1.</i>	122
Figura 55. <i>Cabeza de presión. Perfil 2</i>	123

Figura 56. <i>Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 2.</i>	124
Figura 57. <i>Cabeza de presión. Perfil 3.</i>	125
Figura 58. <i>Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 3.</i>	126
Figura 59. <i>Cabeza de presión. Perfil 4.</i>	127
Figura 60. <i>Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 4</i>	128
Figura 61. <i>Análisis Estático, Perfil 1. Condición Actual</i>	135
Figura 62. <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 1. Condición Actual</i>	135
Figura 63. <i>Análisis Dinámico, Perfil 1. Condición Actual</i>	136
Figura 64. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 1. Condición Actual</i>	136
Figura 65. <i>Análisis Estático, Perfil 2. Condición Actual</i>	137
Figura 66. <i>Análisis Estático+ Lluvias, Perfil 2. Condición Actual</i>	137
Figura 67. <i>Análisis Dinámico, Perfil 2. Condición Actual</i>	138
Figura 68. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Condición Actual</i>	138
Figura 69. <i>Análisis Estático, Perfil 3. Condición Actual</i>	139
Figura 70 <i>Estático+ Lluvias , Perfil 3. Condición Actual</i>	139
Figura 71. <i>Análisis Dinámico, Perfil 3. Condición Actual</i>	140
Figura 72 <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Condición Actual</i>	140
Figura 73. <i>Análisis Estático, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual</i>	141
Figura 75 <i>Análisis Estático, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual</i>	141
Figura 76 <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual</i>	141
Figura 77 <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual</i>	142
Figura 78. <i>Análisis Dinámico, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual</i>	142
Figura 79. <i>Análisis Dinámico, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual</i>	142
Figura 80. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual</i>	143

Figura 81. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual</i>	143
Figura 82. <i>Análisis Estático, Perfil 1. Cortes excavaciones</i>	145
Figura 83. <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones</i>	145
Figura 84. <i>Análisis Dinámico, Perfil 1. Cortes excavaciones</i>	146
Figura 85 <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones</i>	146
Figura 86 <i>Análisis Estático Perfil 2. Cortes excavaciones</i>	147
Figura 87. <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 2. Cortes excavaciones</i>	147
Figura 88. <i>Análisis Dinámico, Perfil 2. Cortes excavaciones</i>	148
Figura 89 <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Cortes excavaciones</i>	148
Figura 90. <i>Análisis Estático, Perfil 3. Cortes excavaciones</i>	149
Figura 91. <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 3. Cortes excavaciones</i>	149
Figura 92. <i>Análisis Dinámico, Perfil 3. Cortes excavaciones</i>	150
Figura 93. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Cortes excavaciones</i>	150
Figura 94. <i>Análisis Estático, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones</i>	151
Figura 95. <i>Análisis Estático, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones</i>	151
Figura 96 <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones</i>	151
Figura 97 <i>Estático + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones</i>	152
Figura 98. <i>Análisis Dinámico, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones</i>	152
Figura 99. <i>Análisis Dinámico, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones</i>	153
Figura 100 <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones</i>	153
Figura 101. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Cortes</i>	154
Figura 102. <i>Análisis Estático, Perfil 1. Cortes y cargas de edificaciones</i>	155
Figura 103. <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	156

Figura 104. <i>Análisis Dinámico, Perfil 1. Cortes y cargas de edificaciones</i>	156
Figura 105. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	157
Figura 106. <i>Análisis Estático, Perfil 2. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	157
Figura 107 <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 2. Cortes y cargas de edificaciones</i>	158
Figura 108. <i>Análisis Dinámico, Perfil 2. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	158
Figura 109. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	159
Figura 110. <i>Análisis Estático, Perfil 3. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	159
Figura 111. <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 3. Cortes y cargas de edificaciones</i>	160
Figura 112. <i>Análisis Dinámico, Perfil 3. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	160
Figura 113 <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	161
Figura 114. <i>Análisis Estático, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	161
Figura 115. <i>Análisis Estático, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	162
Figura 116 <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	162
Figura 117 <i>Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	162
Figura 118 <i>Análisis Dinámico, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	163

Figura 119 <i>Análisis Dinámico, Perfil 4 -Derecho. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones</i>	163
Figura 120. <i>Análisis Dinámico + Lluvias , Perfil 1. Obras en ladera</i>	165
Figura 121. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Obras en ladera</i>	165
Figura 122. <i>Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Obras en ladera</i>	166

Lista de Apéndices

Apéndice A. Mapas Temáticos170

Apéndice B. Registro de ensayos de campo171

Introducción

En el kilómetro 21 de la vía Bucaramanga- San Vicente de Chucuri, se encuentra un predio en el cual se desarrollará un complejo hotelero y recreacional, dicho predio está conformado por un relleno antrópico proveniente de material de excavación retirado de las obras de la vía alternativa, materiales que de acuerdo al orden y talud intervenido en las obras de vía sustitutiva fueron depositados sin un registro, lo cual hace que el material que conforma este relleno sea heterogéneo con compleja caracterización y un depósito en una media ladera, conformado por material coluvial que al tener contacto con el agua genera movimientos en masa, además este se encuentra al borde de la franja de protección del embalse Topocoro.

Para la construcción de este complejo es necesario realizar los estudios y análisis de que permitan garantizar la estabilidad de las obras cumpliendo con los lineamientos de los diferentes códigos de construcción del país. Dentro de estos análisis se encuentran la evaluación de riesgos por movimientos en masa, donde se evalúa el peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana presente causando la pérdida de vidas humanas, así como daños en la infraestructura. Esta evaluación permite cuantificar el nivel de peligro, peligro que es denominado como amenaza.

En este estudio se analizará de manera detallada las características del suelo del lugar a intervenir, usando el retro cálculo de los estudios de la zona, se analizará la interacción de factores antrópicos y fenómenos naturales con la estabilidad del sitio usando software de modelos de elementos finitos y las obras construidas. Se determinarán actividades constructivas que permitirán determinar las obras requeridas para permitir el desarrollo del proyecto salvaguardando las vidas de los usuarios que disfruten del proyecto.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar investigación, caracterización, análisis geotécnico y estudio de amenaza para la urbanización de un complejo hotelero en zonas de depósitos antrópicos de media ladera en áreas de influencia del Embalse Topocoro.

1.2 Objetivos Específicos

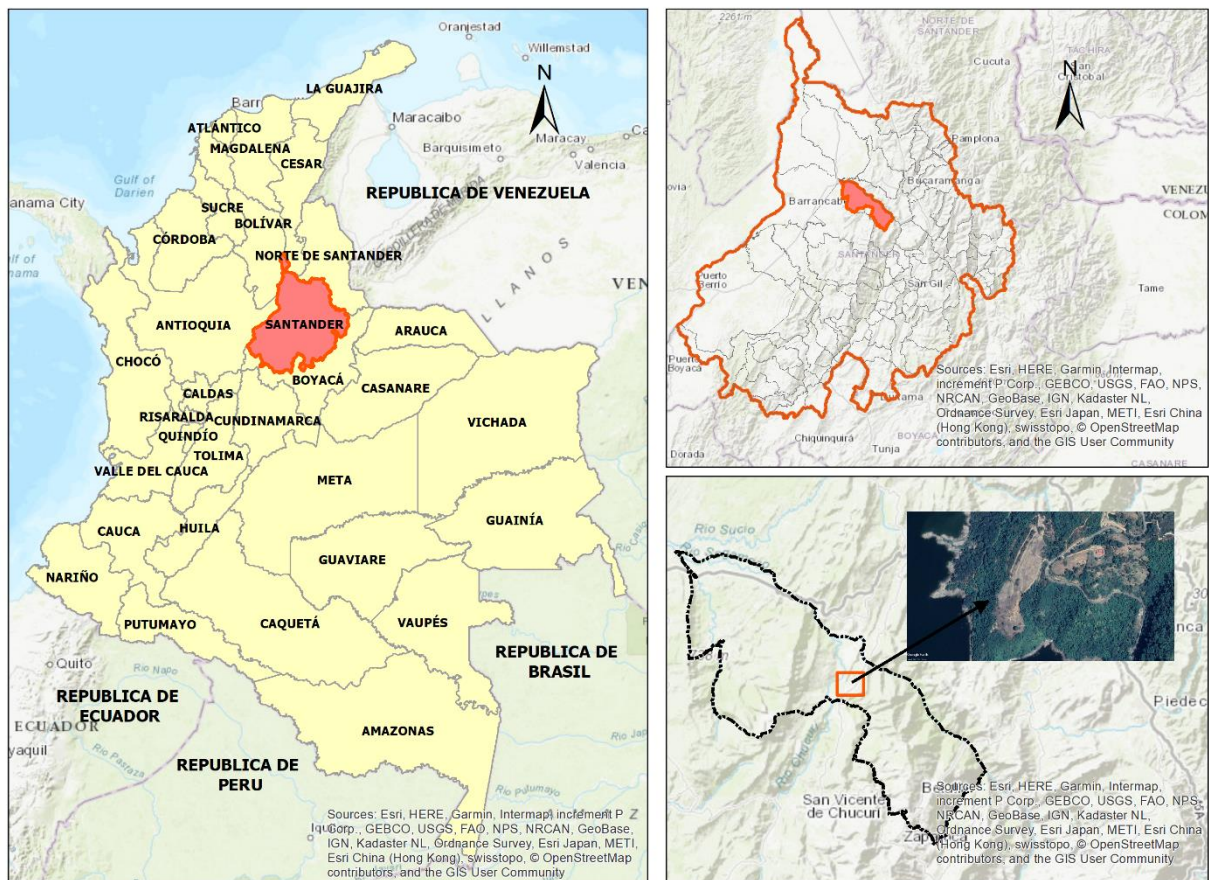
- Realizar una búsqueda de información geotécnica de la zona de estudio y sus alrededores.
- Analizar toda la información recolectada para caracterizar y clasificar adecuadamente el perfil de suelo y determinar las propiedades geotécnicas e hidráulicas respectivas.
- Realizar un análisis de flujo que analizará el caudal de infiltración en la interacción entre los depósitos antrópico, coluviales, residuales y la influencia de la variación de nivel del embalse Topocoro.
- Realizar un análisis de estabilidad detallado, verificando los parámetros obtenidos en la primera etapa del trabajo mediante análisis de retro cálculo que den certeza de las condiciones de diseño.
- Evaluar el nivel de amenaza del proyecto, siguiendo las recomendaciones de la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa del Servicio Geológico Colombiano.

2. Localización

El municipio de Betulia se encuentra localizado en el centro- occidente del departamento de Santander, a unos 90 kilómetros de Bucaramanga su Capital. Limita con los municipios de Zapatoca (Sur), Girón (Oriente) y San Vicente de Chucurí (Occidente). El área de estudio se encuentra localizado en la Hacienda la Fe, en el kilómetro 21 sobre el margen derecho de la vía Portugal – San Vicente de Chucurí.

Figura 1.

Localización área de estudio-



3. Justificación

En el kilómetro 21 de la vía Lisboa- San Vicente de Chucuri, se encuentra un predio en el cual se desarrollará un complejo hotelero y recreacional, dicho predio está conformado por un relleno antrópico proveniente de material de excavación retirado de las obras de la vía alternativa y depósito en una media ladera, zona en la cual hay presencia de coluviones, además este se encuentra al borde de la franja de protección del embalse Topocoro.

Figura 2.

Implantación arquitectónica en predio de estudio



Se tiene estimado que el proyecto tendrá una capacidad de 2500 personas, convirtiéndose en uno de los proyectos más emblemáticos del departamento y a su vez uno de los más concurridos. Por tal razón se presenta la necesidad de hacer un análisis en detalle de los estudios realizados a

este proyecto en el cual se evalúen variables adicionales que puedan determinar las características geotécnicas del terreno.

4. Marco Conceptual

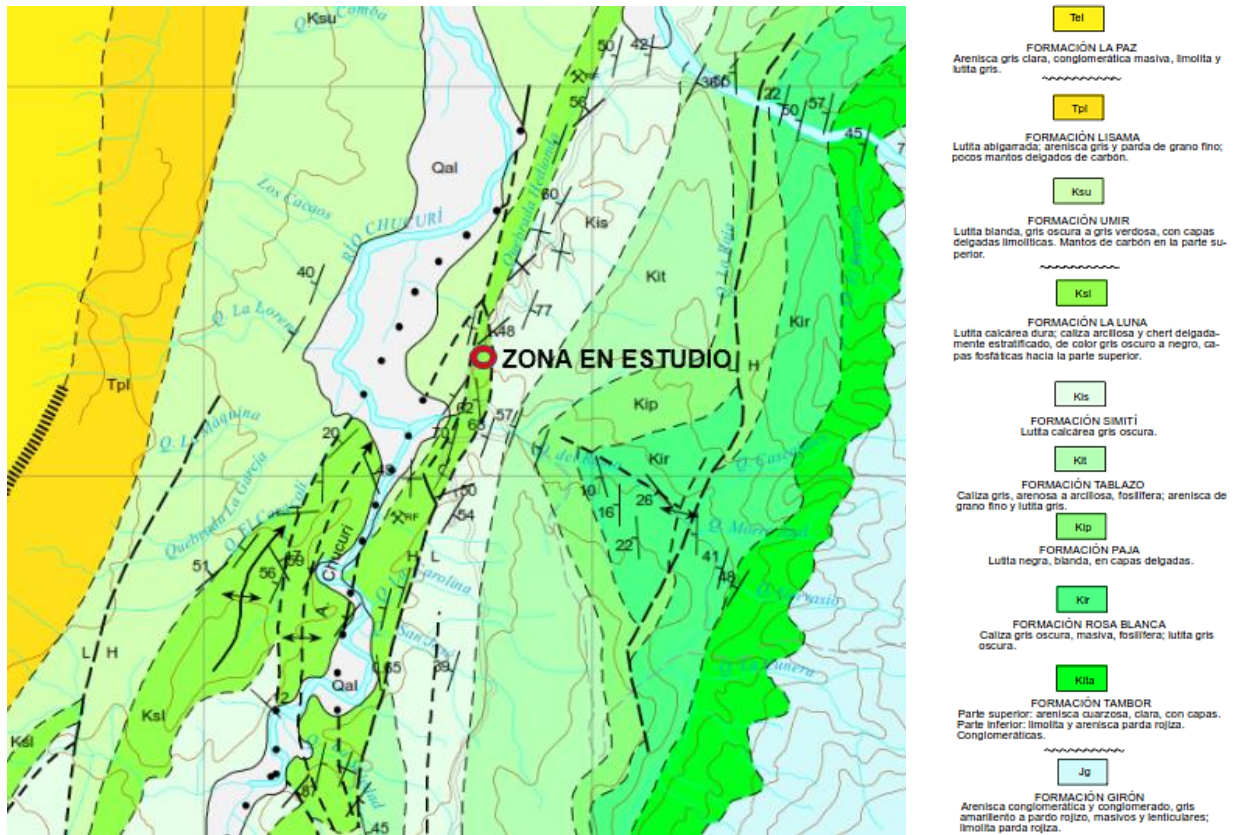
A continuación, se muestran los conceptos que serán utilizados para el desarrollo del presente documento.

4.1 Geología Regional

La zona de estudio se localiza en el entorno geológico del Valle Medio del Magdalena que separa estructural y geográficamente las cordilleras Central y Oriental, y es considerado una fosa de tipo miogeosinclinal, que se extiende desde Honda (Tolima) hasta El Banco (Magdalena), donde se depositaron miles de sedimentos continentales durante el Período Terciario. Durante y después de la formación de las diferentes unidades de roca que componen la secuencia estratigráfica que aflora en el territorio de Betulia, estas se ven sometidas a la acción de fuerzas tectónicas que generan en ellas deformación dúctil o frágil manifestadas como pliegues o fallas respectivamente. Las estructuras regionales más representativas que conforman este territorio son el Sinclinal de Nuevo Mundo y el Anticlinal de Chucurí.

Figura 3

Geología Regional. Adaptada de la Plancha 120 Bucaramanga.



Fuente: Ingeominas Versión Digital 2010 (1977).

4.2 Estratigrafía

En el área de estudio y sus alrededores, en jurisdicción del municipio de Betulia afloran rocas sedimentarias con un amplio rango de edades que van del Jurásico al Cuaternario. El lote de estudio se compone por rocas de edad cretácica representadas por la Formación Simití (Kis), La Luna (Ksl) y Umir (Ksu) y cuaternarios de origen aluvial (Qal) que se encuentran cubiertos por materiales de relleno.

4.2.1 Formación Simití (Kis)

Constituida principalmente por lutitas y areniscas con intercalaciones de areniscas calcáreas y calizas, cuyas edades van del Albiano Superior al Cenomaniano. En la región centro-occidental de Santander la unidad está expuesta principalmente en las áreas de Barichara, Socorro, Suaita, San Vicente, Betulia y Puente Nacional. Fue descrita por geólogos de Intercol (en Morales et al., 1958) y su localidad tipo está en la orilla sur de la Ciénaga de Simití, Bolívar. La unidad consta de shales grises a negros, carbonosos levemente calcáreos, con concreciones calcáreas hasta de 3 metros. y con intercalaciones de areniscas y calizas grises localmente arcillosas y fosilíferas, en capas delgadas. Las condiciones paleoambientales fueron neríticas de aguas intermedias a profundas. Su espesor varía entre 250 y 650 metros. Los contactos de la formación Simití son concordantes con la infrayacente formación Tablazo y la suprayacente formación La Luna. Su edad se ha establecido como Albiano superior – Cenomaniano.

4.2.2 Formación la Luna (Ksl)

Fue descrita por A. Garner (en Julivert et al., 1968) y el nombre procede de la quebrada La Luna, localizada al NW de Perijá, Zulia (Venezuela). En Colombia fue introducido por los geólogos de la Caribbean PetrolCo. La unidad está constituida por caliza gris oscura, arcillosa, lutitas grises a negras, calcáreas, en capas delgadas; lutitas grises oscuras con intercalaciones de calizas arcillosas, concreciones de calizas con fósiles, que alcanzan más de dos metros de diámetro y capas delgadas de chert negro; también capas fosfáticas hacia la parte superior. En el Valle Medio del Magdalena la formación La Luna se subdivide en tres miembros: el inferior Salada, el intermedio Pujamana y el superior Galembó. El ambiente de depositación es marino de aguas relativamente poco profundas con poca ventilación en el fondo. El espesor varía entre 275 y 575m.

Sobre esta unidad litoestratigráfica en la zona de estudio se encuentran infrayaciendo suelos de un depósito coluvial.

4.2.3 Formación Umir (Ksu)

Descrita por L Huntley (1968). La localidad tipo se encuentra en la quebrada Umir al oriente del cerro del mismo nombre en Santander. Consta de Shales grises negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas, lutitas grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos; intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas y micáceas. También es común la presencia de capas explotables de carbón de 0.60 a 5.00 metros de espesor. El ambiente de su depositación es nerítico, su espesor se ha calculado entre 1000 y 1400 metros.

Esta formación se encuentra presente en el lugar de desarrollo del proyecto y se encuentra descrita detalla en **Formación Umir (Sr - R)**.

4.2.4 Depósitos Cuaternarios (Qal)

En la región del municipio de Betulia, los depósitos cuaternarios son muy variados en su origen y se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de los valles de los ríos Sogamoso y Chucurí y las quebradas la Putana y Zapatoca. La unidad Qal está conformada por depósitos no consolidados de aluvión, coluviones, derrubios, glaciares y fluvioglaciares, que son considerados del Holoceno. Estos depósitos están conformados por material detrítico de origen ígneo y metamórfico, de formaciones que no afloran en el municipio, pero si en sectores vecinos, y sedimentarios que han sido transportados por ríos y quebradas. Los mismos se encuentran ubicados en la ribera del río Sogamoso.

4.3 Geología estructural

El territorio Santandereano es geológicamente complejo y tectónicamente dinámico, relacionado con las placas tectónicas de Nazca, Caribe y suramericana. Se caracteriza por presentar tres estilos estructurales: Uno de fallamiento en bloques en la región oriental, otro de fallamiento inverso y plegamiento en la región central, y un tercero representado por el Graben del Magdalena en la región occidental.

La Cordillera Oriental presenta un estilo tectónico caracterizado por pliegues anticlinales y sinclinales amplios, limitados por fallas inversas y de cabalgamiento, de direcciones NE y NW, con inclinación predominante hacia el oriente. En el Departamento de Santander, existen provincias restringidas a dos bloques, el principal localizado en la región central estructural y el menor ubicado en la región oriental.

Las estructuras regionales más relevantes se describen a continuación y adicionalmente se incluyen las estructuras que afectan la zona en estudio y sus alrededores.

4.3.1 Sinclinal del nuevo mundo

Es el principal pliegue que atraviesa este sector del municipio de Betulia en su parte occidental de sur a norte. Es una estructura amplia, ligeramente asimétrica cuyo eje está recargado hacia su parte occidental, probablemente como resultado del fuerte levantamiento a lo largo del lado oriental de la falla La Salina, la cual marca su límite occidental, el eje de este sinclinal al sur del río Sogamoso está desplazado 4 a 5 Km. al occidente de su posición normal, desplazamiento que sugiere una falla de dirección oriente-occidente a lo largo del río Sogamoso, bajo los depósitos aluviales.

4.3.2 Anticlinal de Chucurí

Es una estructura simétrica amplia cuyo eje tiene una dirección aproximada N 20 E, en una longitud de unos 40 Km, prolongándose hacia el occidente del departamento. En general este anticlinal está conformado por sedimentos cretácicos de la formación Paja. Es una estructura abierta simétrica, cuyo eje norte está desplazado por una falla de rumbo NE-SW.

4.3.3 Falla San Vicente

Corresponde a una falla inversa que pasa por el límite noreste del municipio de San Vicente de Chucurí, presenta un rumbo N16°E y buza 51°SE. Se extiende en una distancia de 19 kilómetros, desde el sector sureste de dicho municipio hasta la parte norte en jurisdicción del municipio de Betulia, donde queda oculta por el embalse de la represa de Hidrosogamoso. Levanta las rocas de la Formación Paja y las pone en contacto con las rocas de la Formación Simití, marca el límite entre estas dos formaciones en una longitud de 8 kilómetros. Su traza continúa al norte a partir de la vereda La Plazuela del municipio de Zapatoca cortando las rocas de las formaciones Simití y La Luna, respectivamente.

4.3.4 Falla La Plazuela

Como su nombre lo indica esta falla de rumbo se localiza en la Vereda La Plazuela del municipio de Zapatoca. Se orienta en dirección Sureste – noroeste. Trunca las rocas de la Formación Paja y desplaza al oeste las rocas de la Formación Tablazo. Su traza llega hasta la falla San Vicente.

4.4 Estructura de la roca del subsuelo

Teniendo en cuenta información consultada mediante fotografías de Google Earth de los alrededores de la zona en estudio, se puede evidenciar el buzamiento de los niveles rocosos en dos

sectores tanto al Oeste como al Este del sitio estudiado. Se observa que en ambos sectores el buzamiento de los estratos presenta una dirección hacia el noroeste (NW), donde el grado de inclinación disminuye levemente de oriente a occidente. Esta dirección corresponde con el sentido de la pendiente del terreno en la zona de menor grado de buzamiento sobre suelos residuales duros y muy densos y presencia de las intercalaciones de los niveles de areniscas presentes en la secuencia explorada.

Figura 4

Niveles de roca con buzamiento hacia el NW sobre la vía San Vicente - Bucaramanga aproximadamente a 650 m hacia el NE del área en estudio. Fuente G.T. S.A.S.



Figura 5

Niveles rocosos con buzamiento hacia el NW sobre antiguo afloramiento de la antigua vía San Vicente-Bucaramanga hacia el SW del lote en estudio. Fuente G.T. S.A.S.



Para la zona del proyecto se tiene una condición estructural reportada por el SGC donde se describe la actividad de dos fallas inferidas de tipo normal, dispuestas en dirección NE-SW aproximadamente $N25^{\circ}E$. Este tipo de fallamiento se caracteriza por generar un efecto de esfuerzos distensivos, ya que hay un aumento de la superficie. Los datos presentes para la región muestran un comportamiento estructural de planos con rumbo y buzamiento estratigráfico con dirección $N35^{\circ}E/62^{\circ}SW$.

4.5 Geomorfología

La geomorfología se encarga del estudio, origen, evolución, composición y clasificación de las formas del terreno y constituye una de las temáticas básicas para la evaluación y proyección del

comportamiento de la tierra en el estudio de amenazas naturales, la proyección de obras de infraestructura, planes de ordenamiento territorial entre otros (Ingeominas, 2001).

De acuerdo a lo anterior se realizó el respectivo análisis geomorfológico de la zona en estudio teniendo en cuenta las imágenes satelitales existentes y realizando visitas a campo, lo cual permitió realizar la clasificación de unidades geomorfológicas, teniendo en cuenta los procesos que han actuado sobre el terreno, las diferentes características litológicas y el posible desarrollo de fenómenos de remoción en masa que pueden afectar la zona de estudio.

4.5.1 Morfogénesis

Indica el origen endógeno u exógeno y el desarrollo de las formas del relieve, esta información se representa en unidades geomorfológicas si los fenómenos concernientes son de tamaño cartografiable a la escala de mapeo dada. En total se tiene que las unidades morfológicas son agrupadas en doce clases, para la zona de estudio se presentan dos: Formas de origen denudacional y formas de origen antropogénico/biológico.

4.5.2 Morfometría

Se encarga de la descripción geométrica cuantitativa del relieve y es de gran importancia para el análisis geomorfológico de los terrenos. Dentro de sus atributos se considera la pendiente como parte del análisis, generando como resultado el valor del ángulo entre la superficie del terreno y un eje horizontal imaginario. La clasificación para esta variable corresponde a la relación entre la pendiente y el grado de estabilidad de los materiales, teniendo que la zona más inestable es aquella cuya pendiente oscila entre 19 a 40°, las zonas con pendientes mayores a 40° en estado natural se intuye que poseen una mayor estabilidad.

Tabla 1.*Clasificación pendiente*

Pendiente (°)	Clasificación
0 – 7	Muy baja
7 – 11	Baja
11 – 19	Moderada
19 – 40	Muy alta
> 40	Moderada

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

4.5.3 Morfodinámica

Se encarga de evaluar los procesos geodinámicos externos principalmente denudativos, antiguos y recientes, responsables del estado de las geoformas o unidades de terreno actuales.

4.6 Hidrogeología

La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, sus formas de yacimiento, difusión, movimiento, régimen y reservas, interacción con los suelos y rocas, los factores que conducen al deterioro de la calidad del agua y su propagación a través del medio geológico subterráneo y los mecanismos de mejora de la misma.

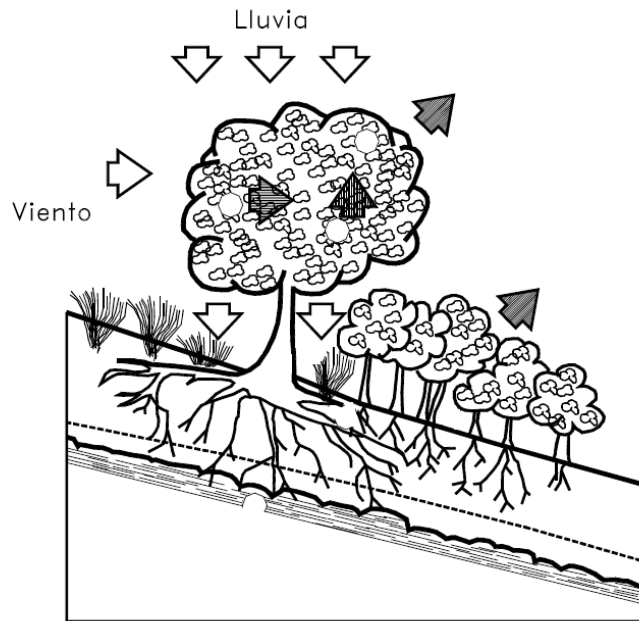
4.7 Cobertura vegetal

La cobertura vegetal corresponde a la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, incluyendo las zonas antrópicas generadas por los procesos agrícolas (cultivos y pastizales). En los efectos de remoción en masa, la vegetación puede convertirse en un factor importante para la estabilidad, ya que cumple dos funciones principales, inicialmente dar una estimación del contenido de agua en el terreno (humedad) y establecer la resistencia dado por el entramado mecánico de sus raíces (Suarez, 1998). La pérdida de vegetación (deforestación) o el cambio de

una unidad existente por cultivos, aumentan la probabilidad de ocurrencia a eventos de remoción en masa.

Figura 6.

Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Tomado de Suarez 1998.



4.8 Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio

La exploración del subsuelo permite que, a partir de ensayos de laboratorio, se definan los parámetros mecánicos del modelo geológico – geotécnico, el cual permitirá realizar los respectivos análisis detallados de estabilidad requeridos para la zonificación de la amenaza a escala detallada.

Como lo menciona la guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (SGC, 2015) la exploración del subsuelo es de suma importancia y se debe realizar una exploración básica que permita caracterizar las unidades geológicas y geomorfológicas encontradas y una segunda exploración detalla, con mayor densidad de ensayos y concentradas en los sectores de amenaza alta identificados en los estudios básicos.

Se debe hacer muestreo continuo y por lo menos se debe recuperar muestra por cada metro de perforación. En las perforaciones se debe determinar el nivel de agua y su variación durante el periodo de exploración. En casos específicos se recomienda instalar piezómetros para monitorear los niveles de agua y sus variaciones.

4.9 Análisis de flujo

De acuerdo a la Guía Metodológica (SGC, 2015), para poder analizar de manera confiable la ocurrencia de deslizamientos en función de las condiciones de precipitación en la región, es necesario comprender adecuadamente el sistema hidrológico como factor desencadenante a partir de estudios de las características geomecánicas e hidrológicas de los suelos susceptibles a deslizamientos.

Una vez identificados los elementos y partes del peligro del análisis detallado, es necesario contar con información de campo para evaluar la inestabilidad provocada por la acción del agua asociada a la caída del frente húmedo, por un lado, y, por otro lado, la profundidad del nivel freático.

Para determinar la probabilidad de posibles deslizamientos actuales o potenciales provocados por la precipitación, se utilizan análisis e intensidad-duración-frecuencia (curvas IDF) para la precipitación más fuerte en el registro, y los registros de precipitación deben estar disponibles. Solo en ausencia de registros de lluvia, se recomienda estimar la relación LDF (tabla de duración-frecuencia del agua sedimentaria) a partir de los registros de lluvia, que son más fáciles de calcular.

En este sentido, se recomienda utilizar el método desarrollado específicamente para Colombia por Díaz-Granados. Este es el resultado de un proceso estadístico que regionaliza las curvas de duración-intensidad-frecuencia para obtener curvas LDF a partir de datos pluviométricos (Vargas y Díaz-Granados, 1998; Díaz-Granados y Puente, 2008).

4.10 Evaluación de la amenaza

Comprende tres fases principales: definir un modelo geológico – geotécnico, plantear escenarios de amenaza y zonificar la amenaza. Como resultado de estas tres fases y de la etapa de análisis, se obtienen los mapas de amenaza (SGC, 2015).

En la definición del modelo geológico – geotécnico se incluyen todas las consideraciones que puedan definir procesos de inestabilidad en el área de estudio (geología, geomorfología y geotécnicas) y factores antrópicos, para obtener como resultado el mapa de zonas homogéneas que represente las condiciones esperadas.

En el análisis de la amenaza se deben tener en cuenta los factores detonantes como la lluvia y el sismo, estos deben ser evaluados por medio de métodos probabilísticos que permitan la definición de escenarios de amenaza actual y potencial los cuales servirán para realizar los análisis de vulnerabilidad.

La Guía Metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa (SGC, 2015), propone realizar la evaluación de la amenaza a partir de métodos de equilibrio limite en términos de probabilidad de falla.

Como resultado del cálculo de la amenaza, se tendrá un mapa de zonificación del área de estudio, el cual permitirá dar viabilidad al proyecto.

Por otro lado, el municipio de Betulia en el año 2016 se desarrolló el esquema de ordenamiento territorial en el cual se realiza un análisis de amenaza a gran escala para sectorizar de manera urbana y rural los lineamientos para el desarrollo de construcciones de acuerdo a la identificación de amenaza del municipio. En el capítulo II Gestión del Riesgo del EOT de Betulia se definen tres tipos de amenaza de análisis (Inundación, Movimientos en Masa y Sísmica), generadas en función de las características geológicas, climáticas y morfológicas.

Para aquellas zonas definidas dentro de amenaza alta y/o media y que se encuentren dentro del área de estudio, se deberán realizar estudios de amenaza detallados donde se muestren las medidas de intervención mínimas necesarias para la funcionabilidad del proyecto a construir. Debido a que el análisis realizado por el municipio de Betulia se encuentra a una escala 1:60.000, es necesario realizar un análisis detallado del predio en construcción con el fin de realizar la evaluación de amenaza de manera detallada.

A continuación, se muestra las zonas de amenaza determinadas en el EOT de Betulia que se encuentran dentro del área del proyecto. Se utilizarán los mapas rurales debido a la ubicación del proyecto.

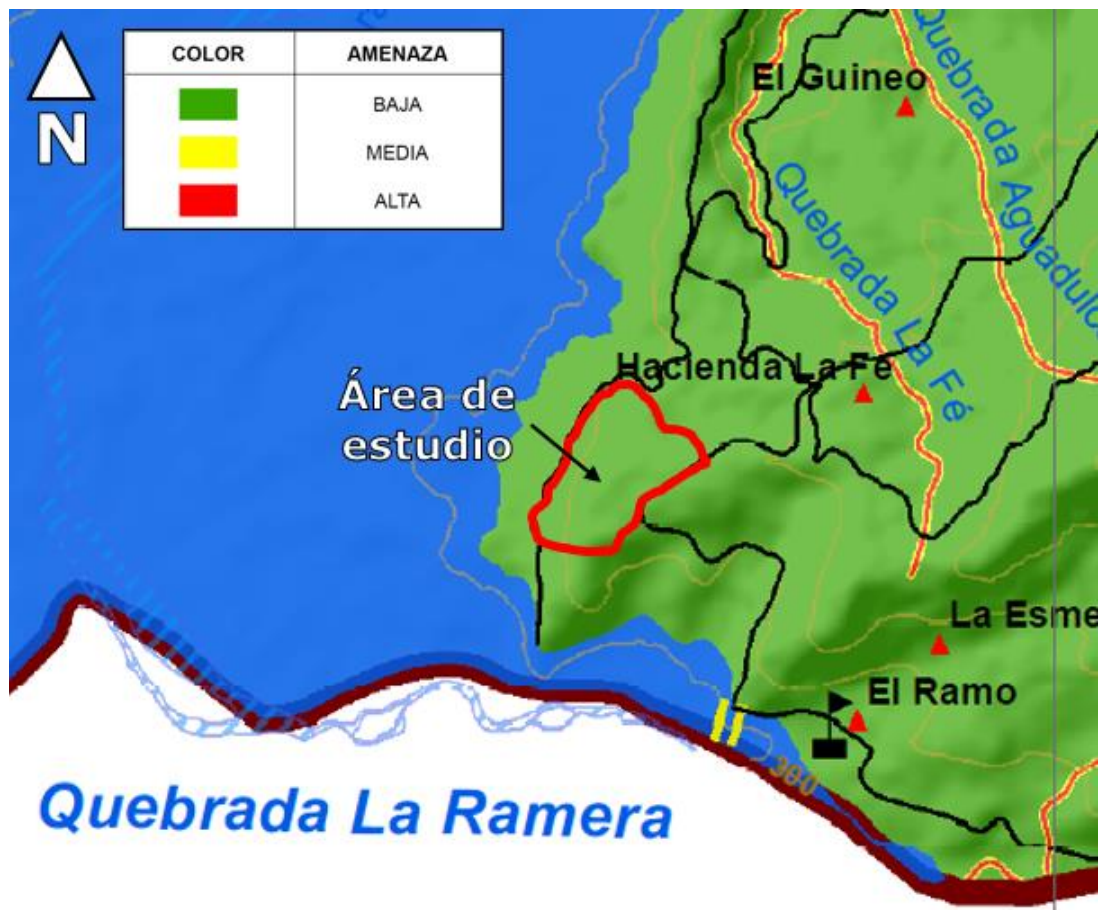
4.10.1 Amenaza por inundación

Corresponde a las áreas con posibles afectaciones generadas por incrementos del caudal de cauces y que posean características hidrogeológicas y/o de coberturas de suelo susceptibles a generar riesgos de inundación. Estas áreas se encuentran identificadas en los mapas de amenaza por inundación escenario 1 y 2 (DR_008_1 y DR_008_2 respectivamente).

En la revisión de información que se encuentre en el EOT de Betulia se nombran dos escenarios para el análisis de amenaza por inundación, más en las fuentes de información del municipio no se encuentran descritas cuales fueron estos dos escenarios para el análisis.

Figura 7.

Mapa de amenaza por inundación escenarios 1 y 2. Tomado de EOT Betulia, 2016.



En la

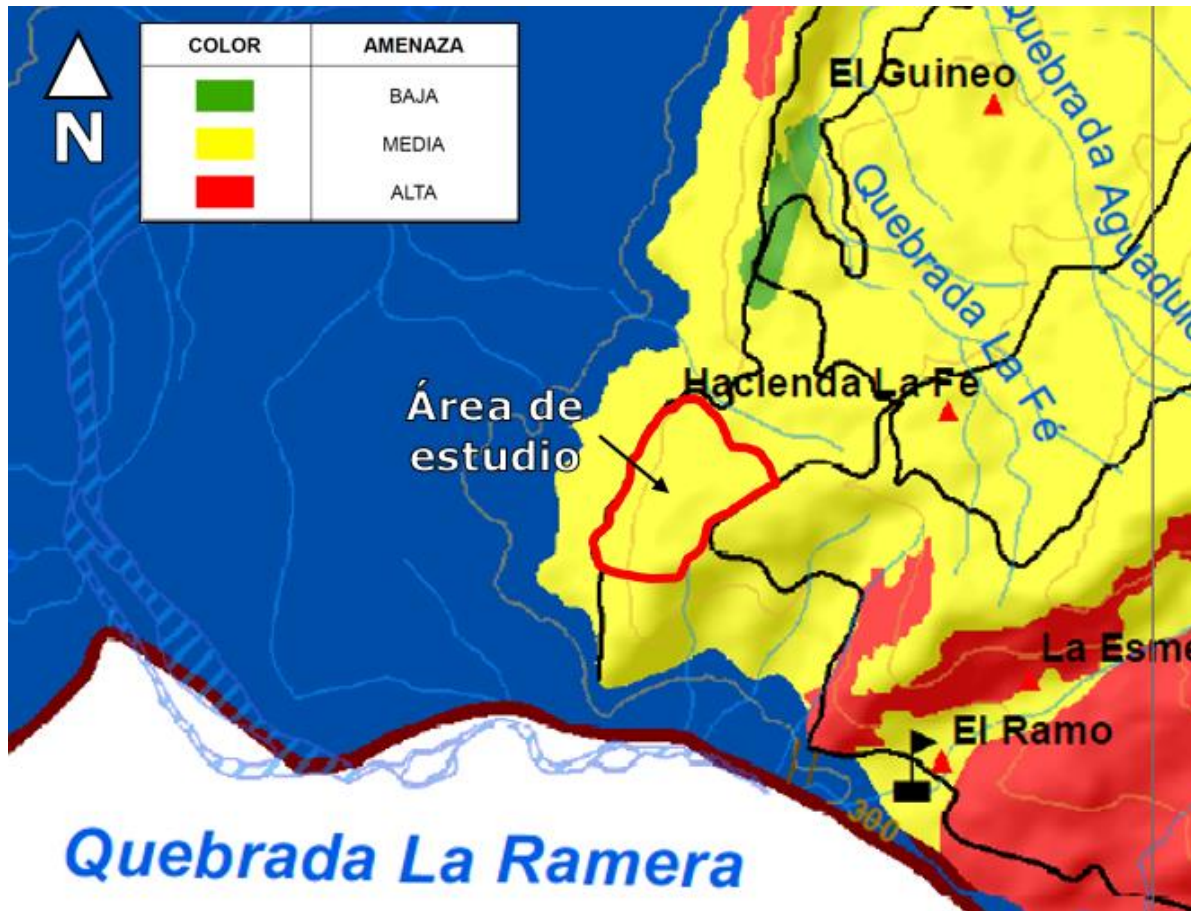
Figura 7 se evidencia que el sitio de estudio se encuentra por fuera de las áreas de amenaza con posibles afectaciones por las corrientes de agua, por lo tanto, no se considera necesario realizar estudios detallados para este tipo de escenario. Por su ubicación y condiciones topográficas no existe una corriente de agua que pudiese generar inundación en el lote estudiado.

4.10.2 Amenaza por movimientos en masa

La zonificación de amenaza permite definir las áreas afectadas por procesos geológicos y geotécnicos que puedan desencadenar movimientos en masa (deslizamientos, procesos de erosión o caídas de bloques de roca) detonados ante eventos lluviosos o por acción sísmica. Las áreas de amenaza correspondientes a la zona rural se pueden identificar en el mapa DR_007_3 Amenaza Movimientos en Masa escenario 2.

Figura 8.

Mapa de amenaza por movimientos en masa, escenario 2. Tomado EOT Betulia, 2016.

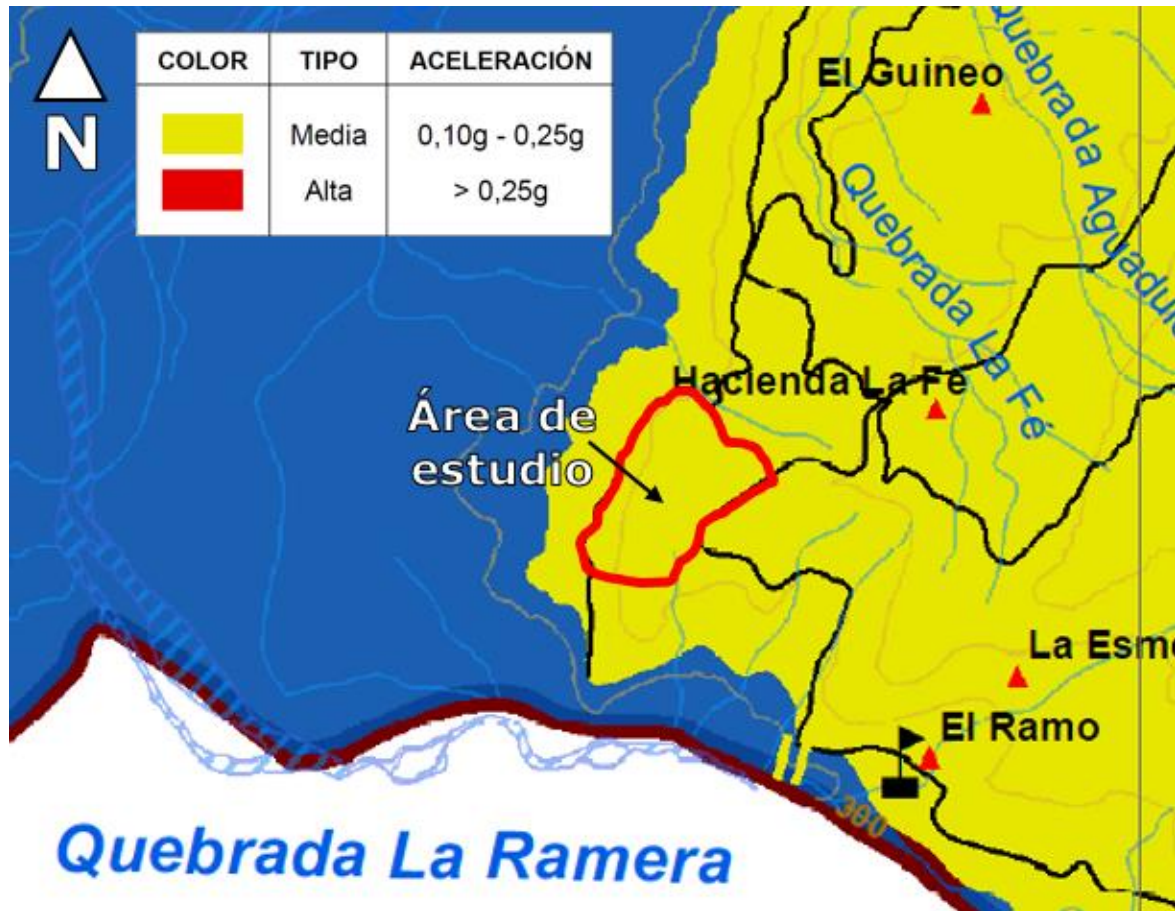


4.10.3 Amenaza sísmica

De acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Ley 400 de 1997) en el Título A se establecen las zonas de amenaza sísmica. El municipio de Betulia se encuentra ubicado dentro de la zona de amenaza alta (Apéndice A-4). Sin embargo, este valor se relaciona al área urbana y de expansión del municipio. Para el área rural se tiene en cuenta los resultados dados en el mapa DR_007_1 Mapa de Amenaza Sísmica Rural.

Figura 9.

Mapa de amenaza sísmica rural. Tomado de EOT Betulia, 2016.



A partir de las zonificaciones desarrolladas dentro del EOT se puede evidenciar que el área de estudio se encuentra sobre condiciones de amenaza media ante movimientos en masa y efectos sísmicos, por tal razón se deberán realizar estudios detallados con el fin de definir las intervenciones necesarias para disminuir el grado de afectación para la construcción del proyecto propuesto definiendo el grado de amenaza en condiciones actuales, amenaza con proyecto y obras de estabilización, tanto para el área de afectación directa como para su entorno.

4.2 Metodología para el análisis de estabilidad global

La estabilidad global hace referencia a la condición en la cual un talud o ladera se encuentra al ser afectados por factores naturales o antrópicos. El análisis de esta estabilidad permite determinar el nivel de seguridad que se tiene ante los diferentes escenarios que se pueden presentar durante y una vez finalizada la obra, de esta manera es posible plantear soluciones que permitan garantizar la seguridad ante cualquier situación.

Para la obtención de estos niveles de seguridad, que se traducen en factores de seguridad se han desarrollado varios métodos que permiten incorporar escenarios de factores climáticos, tectónicos, antropológicos y los componentes físicos que conforman cada ladera o talud, sin embargo, en el caso de este documento no todos los métodos que son descritos en este documento son aplicados son la base para el desarrollo de los usados.

4.2.1 Métodos de equilibrio límite

El movimiento de taludes o laderas se analiza desde hace muchos años utilizando técnicas de balanceo límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia del suelo, pero no sobre las relaciones tensión-deformación.

El sistema de equilibrio límite asume que, en caso de falla, la fuerza y la resistencia es igual a lo largo de la superficie de falla, equivalente a un factor 1.0 Seguro.

El análisis se puede realizar estudiando directamente toda la longitud.

Destruir la cara o partir la superficie en pedazos o dovelas. El sistema de dovelas desarrollado a principios del siglo XX está mejorando cada día y tiene un software muy fácil de usar. Por lo general, estos métodos son iterativos y cada método tiene cierta precisión.

Tabla 2

Métodos de estabilidad de taludes

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Ordinario o de Fellenius (Fellenius 1927)	Circulares	De fuerzas	Este método no tiene en cuenta las fuerzas entre las dovelas y no satisface equilibrio de fuerzas, tanto para la masa deslizada como para dovelas individuales. Sin embargo, este método es muy utilizado por su procedimiento simple. Muy impreciso para taludes planos con alta presión de poros. Factores de seguridad bajos.
Bishop simplificado (Bishop 1955)	Circulares	De momentos	Asume que todas las fuerzas de cortante entre dovelas son cero. Reduciendo el número de incógnitas. La solución es sobredeterminada debido a que no se establecen condiciones de equilibrio para una dovela.
Janbú Simplificado (Janbú 1968)	Cualquier forma de superficie de falla.	De fuerzas	Al igual que Bishop asume que no hay fuerza de cortante entre dovelas. La solución es sobredeterminada que no satisface completamente las condiciones de equilibrio de momentos. Sin embargo, Janbú utiliza un factor de corrección F_0 para tener en cuenta este posible error. Los factores de seguridad son bajos.
Sueco Modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Supone que las fuerzas tienen la misma dirección que la superficie del terreno. Los factores de seguridad son generalmente altos.
Lowe y Karafiath (1960)	Cualquier forma de la superficie de falla.	De fuerzas	Asume que las fuerzas entre partículas están inclinados a un ángulo igual al promedio de la superficie del terreno y las bases de las dovelas. Esta simplificación deja una serie de incógnitas y no satisface el equilibrio de momentos. Se considera el más preciso de los métodos de equilibrio de fuerzas.
Spencer (1967)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que la inclinación de las fuerzas laterales son las mismas para cada tajada. Rigurosamente satisface el equilibrio estático asumiendo que la fuerza resultante entre tajadas tiene una inclinación constante pero desconocida.
Morgenstern y Price (1965)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las fuerzas laterales siguen un sistema predeterminado. El método es muy similar al método Spencer con la diferencia que la inclinación de la resultante de las fuerzas entre dovelas se asume que varía de acuerdo a una función arbitraria.

Método	Superficies de falla	Equilibrio	Características
Sarma (1973)	Cualquier forma de la superficie de falla.	Momentos y fuerzas	Asume que las magnitudes de las fuerzas verticales siguen un sistema predeterminado. Utiliza el método de las dovelas para calcular la magnitud de un coeficiente sísmico requerido para producir la falla. Esto permite desarrollar una relación entre el coeficiente sísmico y el factor de seguridad. El factor de seguridad estático corresponde al caso de cero coeficientes sísmicos. Satisface todas las condiciones de equilibrio; sin embargo, la superficie de falla correspondiente es muy diferente a la determinada utilizando otros procedimientos más convencionales.
Elementos finitos	Cualquier forma de la superficie de falla.	Analiza esfuerzos y deformaciones.	Satisface todas las condiciones de esfuerzo. Se obtienen esfuerzos y deformaciones en los nodos de los elementos, pero no se obtiene un factor de seguridad.
Espiral logarítmica	Espiral logarítmica	Momentos y fuerzas.	Existen diferentes métodos con diversas condiciones de equilibrio.

Fuente: Suárez Díaz Jaime, (1998.) Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos

4.2.2 Factor de seguridad

El factor de seguridad (F.S) es un índice que representa el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento. Es la relación de la resistencia real del suelo con respecto a los esfuerzos y/o momentos críticos que generarán la falla.

Existen diversos métodos de análisis del factor de seguridad utilizando esfuerzos, momentos, alturas, dovelas y probabilidad.

4.2.3 Métodos de análisis

En este capítulo se presentan los métodos más usados para el cálculo de factor de seguridad

4.2.3.1 Métodos de tablas o número de estabilidad. Para masas de suelo homogéneas simples, se han desarrollado tablas para permitir los cálculos de factor de seguridad rápido. Hay muchas tablas desarrolladas por diferentes autores. El primero de ellos fue desarrollado por Taylor en 1937 y 1948, solo disponible para el análisis de esfuerzo total porque no se considera la presión de los poros. Varias tablas se han propuesto desde entonces por Bishop y Morgenstern (1960), Hunter y Schuster (1968), Janbú (1968).

4.2.3.2 Método de talud infinito. En caso de falla paralela a la superficie inclinada, la profundidad es poco profunda y la longitud de la falla es más larga que su espesor, lo que se puede aproximar con precisión mediante un análisis de pendiente infinita. Este es un sistema muy rápido y simple para determinar el factor de seguridad de una ladera o talud, asumiendo una pendiente larga con una capa delgada de suelo, donde cualquier tamaño de columna de suelo representa la pendiente completa. Se suponen 3 condiciones, suelos isotrópico y homogéneo, talud infinitamente largo y superficie de falla paralela al talud.

4.2.3.3 Método de bloque deslizante. El análisis de bloques se puede utilizar cuando existe una superficie de punto débil relativamente recta y delgada a una profundidad determinada. La masa en movimiento se puede dividir en dos o más bloques, y el equilibrio de cada bloque se considera de forma independiente utilizando la fuerza entre los bloques. No tiene en cuenta la deformación del bloque y es útil cuando el manto es débil o hay un manto muy duro donde se pueden producir deslizamientos.

4.2.3.4 Método Ordinario o de Fellenius. También conocido como método sueco, método de dovelas o método U.S.B.R. El método asume una superficie de falla circular, divide el área de falla

en rebanadas verticales, obtiene la fuerza aplicada y la fuerza resultante para cada rebanada y obtiene el factor de seguridad por la suma de estas fuerzas. La fuerza que actúa sobre la dovela es:

a. Peso o gravedad, se puede descomponer en la tangente y normal de la superficie fallada.

b. Cohesión y fricción tangente a la superficie de falla.

C. Fellenius no considera la presión de la tierra y las fuerzas de corte en los muros entre las dovelas, pero se consideran en otros métodos de análisis más detallados.

4.2.3.5 Método de Bishop. El método utiliza dovelas y teniendo en cuenta el efecto de las fuerzas entre las dovelas. Se asume que las fuerzas entre dovelas son horizontales, es decir, que no tiene en cuenta las fuerzas de cortante.

La solución es muy compleja y por esta razón, se utiliza una versión sintética de su método. Aunque el método sólo satisface el equilibrio de momentos, se considera que los resultados son muy precisos en comparación con el método ordinario. La principal restricción del método de Bishop simplificado, es que solamente considera las superficies circulares.

4.2.3.6 Método de Jambú. El método de Jambú parte de la misma suposición que el método de Bishop en la cual la fuerza entre dovelas es horizontal y no se toma en cuenta la fuerzas de cortante, la diferencia es que jambú considera que las superficies de falla no necesariamente son circulares y a cambio indica un factor de corrección que depende de la curvatura de la falla.

4.2.3.7 Método de Spencer. En el método de Spencer supone que las fuerzas entre dovelas son paralelas y tiene el mismo ángulo de inclinación, por lo que satisface el equilibrio de momentos y esfuerzo. El método tiene en cuenta dos fórmulas las cuales contienen dos incógnitas, una es el factor de seguridad y la otra es el ángulo de inclinación de las fuerzas entre dovelas.

4.2.3.8 Método de Morgenstern y Price. En este método se asume que hay existe una relación de fuerzas cortantes y fuerzas normales entre de velas dadas por una función. Al igual que en el método de Spencer esta función puede considerarse como una constante, aunque la posibilidad de suponer una determinada función para calcular los valores de las fuerzas entre dovelas, lo hace más riguroso que el método de Spencer.

4.2.4 Métodos numéricos

Con frecuencia, los mecanismos de falla de los deslizamientos de tierra son muy complejos e involucran factores que son difíciles de examinar con análisis de límites de equilibrio convencionales. Los análisis se limitan a datos relativos simples que contienen muy poca información sobre el mecanismo de falla (en su mayor parte) progresivas y no comienzan simultáneamente como se supone en los métodos de límite de equilibrio.

La mayoría de los problemas de estabilidad de taludes incluyen complejidades relacionadas con geometría, anisotropía, comportamiento no lineal, esfuerzos “in situ” y existencia de procesos efectos secundarios como presión de los poros y cargas sísmicas.

4.2.4.1 Métodos numéricos continuos. Los modelos continuos son más adecuados para analizar pendientes de suelo, roca maciza intacta, roca blanda o materiales fracturados que se comportan como suelo. El análisis de masa continúa utilizado en la estabilidad de taludes incluye métodos de elementos finitos y de diferencias finitas. Ambos dividen o discretizan el dominio del problema en un conjunto de subdominios o elementos. La solución al problema se basa en aproximaciones numéricas a las ecuaciones de equilibrio, tensión-deformación y desplazamiento-deformación. Alternativamente, el método puede involucrar aproximaciones de la conectividad de los elementos, la continuidad de los desplazamientos y las fuerzas entre los elementos.

4.2.4.2 Método de elementos finitos. El método esencialmente divide la masa del suelo en unidades discretas llamadas elementos finitos. Estos elementos están conectados entre sí en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es la formulación de desplazamiento, que presenta los resultados en términos de tensiones y desplazamientos en los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en el que no todos los elementos fallan simultáneamente. La herramienta es muy poderosa, su uso es relativamente complejo y su uso para resolver problemas prácticos está ganando popularidad. En la mayoría de los casos prácticos del mundo real, es difícil definir la relación tensión-deformación porque es difícil describir los depósitos naturales del suelo en términos de tensión-deformación. Otra limitación es el escaso conocimiento de las tensiones reales "in situ" que deben incluirse en el modelo.

4.2.5 Análisis probabilístico software SLIDE

En el Slide, se pueden llevar a cabo dos tipos de análisis probabilísticos

1. Análisis probabilístico mediante mínima global
2. Análisis probabilístico mediante talud general

4.2.5.1 Método mínimo Global. Con el método de la Mínima Global, se lleva a cabo el análisis probabilístico solo en la superficie de falla que tenga el mínimo factor de seguridad. Se asume que la probabilidad de falla de la superficie de falla determinística de la Mínima Global representa la probabilidad de falla para el talud.

4.2.5.2 Método talud general. El tipo Análisis probabilístico general de taludes representa un enfoque diferente al análisis probabilístico de estabilidad de taludes.

1. Usando el método de talud general en Slide, la búsqueda completa para una superficie de error mínima global se repite N veces (donde N = número de muestras). Para cada iteración de búsqueda, primero se carga un nuevo conjunto de muestras de variables aleatorias y se realiza la búsqueda.

2. A continuación, se determina una superficie de error mínima global para CADA iteración de BÚSQUEDA. Por lo general, esto generará la ubicación de VARIAS áreas de falla mínima global diferentes (por ejemplo, normalmente se podrían ubicar entre 10 y 50 áreas) correspondientes a los diferentes valores de la variable de muestreo aleatorio de los datos de entrada. Hay dos resultados importantes que se derivan del análisis probabilístico del talud general.

- La Confiabilidad de Talud General
- La Superficie Probabilística Crítica

4.2.5.3 Confiabilidad del talud general. La confiabilidad general del talud se basa en la distribución del factor de seguridad obtenida de todas las superficies de falla mínima global ubicadas por el análisis. Dado que las áreas de falla mínimas globales están localizadas, la confiabilidad general del talud no está asociada con un área de falla específica, sino que puede considerarse una verdadera representación del general. De ahí el nombre del método general de análisis de taludes. La definición de la probabilidad de falla para el método de la pendiente general es la misma que para el método del mínimo global. Es decir, la probabilidad de falla es el número de pruebas que resultan en un factor de seguridad de menos de 1 dividido por el número total de muestras. El índice de confiabilidad se calcula de la misma manera.

4.2.5.4 Superficie probabilística crítica. La superficie de probabilidad crítica es el otro resultado que proviene del análisis de talud probabilístico general. La superficie de probabilidad crítica es la

superficie de falla única que tiene el índice de confiabilidad mínimo y también la probabilidad de falla máxima. Es importante señalar que la superficie probabilística crítica no es necesariamente la misma que la superficie de error determinista crítica. En general, la superficie crítica probabilística y la superficie crítica determinista pueden ser superficies diferentes.

4.2.5.5 Superficie determinística crítica. Durante el análisis probabilístico de talud general, el programa también mantiene un registro de probabilidad de falla e índice de confiabilidad para la superficie determinística crítica, esto es, la superficie de falla determinística mínima global, la superficie de falla con el factor de seguridad mínimo, cuando todos los parámetros de entrada son iguales a sus valores medios. Para esta superficie se calcula la probabilidad de falla e índice de confiabilidad, estos también serían calculados si se ejecutase el método de análisis probabilístico mínimo global.

5. Caracterización geológica y geotécnica

5.1 Unidades geológicas de ingeniería (UGI)

El mapa de geología para ingeniería se elaboró a partir de la interpretación de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) homogéneas. Las UGS se definen como un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta una profundidad específica, relacionada con la escala de trabajo; estas unidades se clasifican teniendo en cuenta su génesis en cuatro grandes grupos: Rocas, Suelos residuales y Saprolitos, Suelos transportados y Suelos antrópicos (Hermelín 1987 en INGEOMINAS 2005).

El mapa de UGS se elaboró a partir de una recopilación de información secundaria teniendo en cuenta principalmente las planchas geológicas a escala 1:100.000 del SGC, el mapa DR_002

Unidades Litoestratigráficas Rural EOT Betulia, fotointerpretación de fotografías aéreas y las descripciones y análisis de sondeos de perforación, ensayos de laboratorio (límite líquido, límite plástico y granulometría).

Con la información de las zonas UGS homogéneas, posteriormente se desarrolló el mapa de Unidades Geológicas de Ingeniería (UGI) teniendo en cuenta el análisis y la correlación de los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción y peso unitario húmedo, obtenidos en los ensayos de laboratorio de corte directo y peso unitario, respectivamente.

5.2 Litoestratigrafía local

De acuerdo a los análisis geológicos realizados en el área, muestras de suelo recuperadas y características morfogenéticas, en la zona de estudio se encuentran principalmente materiales propios de la formación Umir (Ksu), los cuales infrayacen suelos de depósito coluvial y antrópico.

5.2.1 Formación Umir (Sr - R)

Localmente esta unidad se encuentra como suelos residuales de areniscas limosas y finas y fragmentos de roca de areniscas y shale.

La unidad Suelo residual de arenisca limosa (**Sral**) está compuesta por arcilla arenosa limosa, con gravas gruesas de arenisca, de consistencia dura, de color amarillo marrón, de alta plasticidad, poco permeable, algo húmeda, de color gris rosáceo, violeta claro, amarillo marrón claro, amarillo muy pálido, gris claro (abigarrado), en algunos sectores se presenta limo arenoso con escasas gravas meteorizadas; posee un espesor aproximado entre 2.0 a 8.5 m. La unidad Suelo residual de arenisca fina (**Sraf**) posee un espesor de 2.0 a 7.5 metros y está compuesta por arena de grano fino a medio, de consistencia muy densa, de color gris amarillento pálido con presencia de micas, permeable, de consistencia densa, algo húmedo, en algunos sectores presenta gravas gruesas. Para

las unidades de roca se describe las Rocas de areniscas (**Ra**) de hasta 3.0 metros de espesor, de grano fino resistente, de color marrón rojizo con tonalidades amarillentas y rosáceas; los Shale (**Rsh**) poseen un espesor aproximado de 1.5 metros, se presentan de color negro, muy resistente, calcáreo con delgadas vetas laminares de calcita.

5.2.2 Depósitos de coluvión o de ladera (Ql)

Este tipo de depósitos se encuentran presentes de manera irregular en diferentes localidades de la región y están asociados a desprendimientos y deslizamientos de rocas altamente fracturadas por efecto de la tectónica y eventos asociados sobre laderas de pendientes inclinadas.

Los suelos presentes en el lote estudiado están compuestos por limos duros con presencia de algunas gravas, de color marrón oscuro con presencia de pedazos de troncos, arcillas areno-gravosas firmes a muy firmes de color marrón grisáceo, marrón amarillento, amarillo naranja y amarillo, con nivel arenoso y presencia de guijarros meteorizados, arcillas gravo-arenosas y areno-gravosas firmes a duras de color marrón amarillento, marrón verdoso, amarillo verdoso con gravas negras, grises oscuras y grises de material calcáreo, limos areno-gravosos calcáreos duros de color gris oscuro.

5.2.3 Depósito de relleno (Qan)

En algunos sectores de la vía a San Vicente estos materiales están conformados por limos arenosos, lutitas grises, fragmentos de rocas calcáreas y calizas arcillosas, materiales carbonosos y fosfáticos provenientes de la incisión de las laderas para la conformación de la vía principal del sector.

Los suelos presentes en el área estudiado están compuestos por un Suelo transportado coluvial limoso (Stcol) entre 2.5 a 8.0 metros de espesor, con presencia de una arcilla arenosa con algunas

gravas angulares, de consistencia firme, algo húmedo, de color amarillo marrón, también limo arenoso, algo permeable, de consistencia firme, algo húmedo, de color gris marrón oscuro, localmente calcáreo de color amarillo marrón pálido, de gravas heterométricas. En algunos sectores se encuentra un Suelo transportado coluvial calcáreo (Stcoc) con espesores entre 4.0 a 4.5 metros, compuesto por arcilla arenosa con gravas, algo permeable, de consistencia firme, algo húmeda, de color marrón grisáceo, con tonos naranja, crema, gravas angulares de tamaño fino a medio.

5.2.4 Depósito de relleno (Sa)

En algunos sectores de la vía a San Vicente estos materiales están conformados por limos arenosos, lutitas grises, fragmentos de rocas calcáreas y calizas arcillosas, materiales carbonosos y fosfáticos provenientes de la incisión de las laderas para la conformación de la vía principal del sector. Para el sector del proyecto se encuentra un Suelo antrópico (**Sa**) de tipo de relleno, compuesto por limo con gravas completamente meteorizada y alterada, poco permeable de consistencia muy firme, de color amarillo, amarillo marrón con tonos naranja y rosáceo. También, limo areno-gravosos, algo permeables, de consistencia muy firme, localmente calcáreos, algo húmedos de color gris, marrón amarillento, marrón oscuro, gravas finas a gruesas heterométricas de variada composición, algo calcáreo. El espesor de este material se encuentra entre 2.5 a 3.5 metros.

La proveniencia de estos suelos de rellenos presentes superficialmente en la zona estudiada no se puede determinar con facilidad por la variabilidad en su composición y densidad de fragmentos rocosos, guijarros y gravas; puede ser una mezcla de aportes de diferentes unidades geológicas aflorantes en los alrededores del área en estudio.

Figura 10.

Plano geológico local (UGI), Adaptado de G.T. S.A.S.

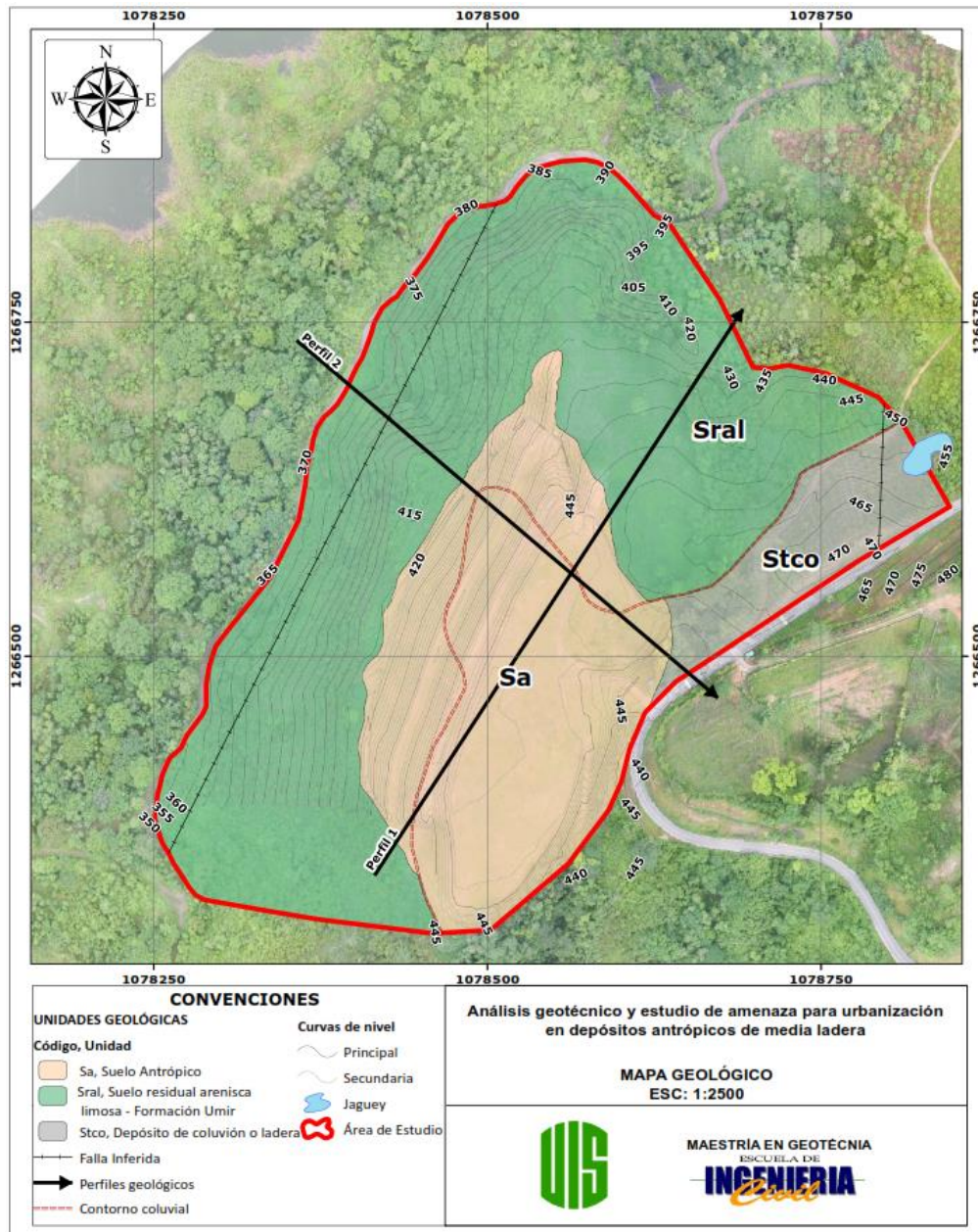


Figura 11.

Perfil geológico local 1. Tomado de G.T. S.A.S.

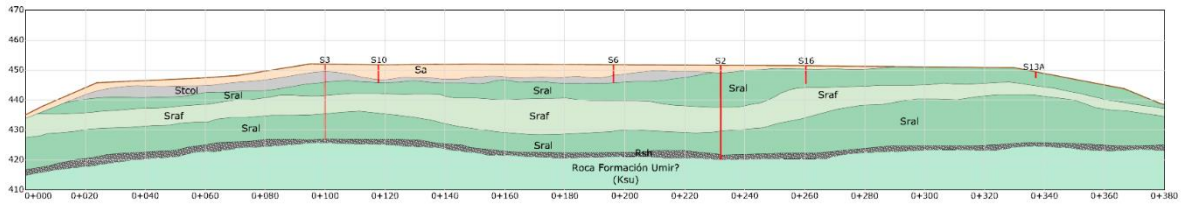


Figura 12.

Perfil geológico local 2 Tomado de G.T. S.A.S.

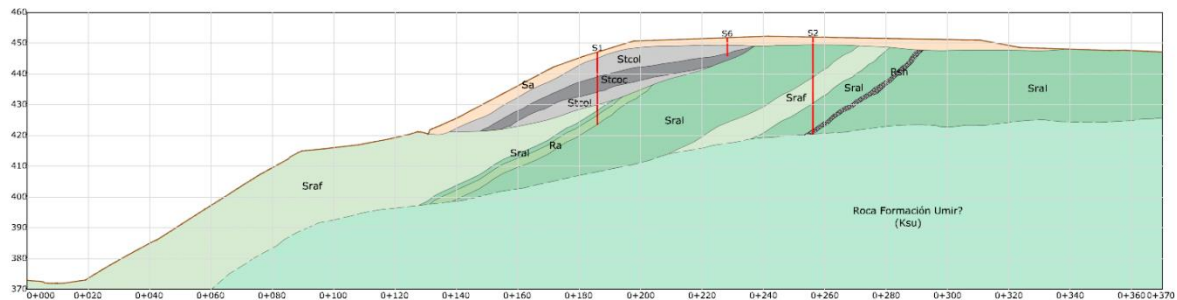


Figura 13.

Columna estratigráfica general. Tomada de G.T. S.A.S.

UNIDAD GEOLÓGICA	UGI	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
Llenos Antrópicos (Qan)	Sa	2 a 5 m		Suelo de relleno compuesto por limo con gravas completamente meteorizada y alterada, poco permeable de consistencia muy firme, de color amarillo, amarillo marrón con tonos naranja y rosáceo.
Depósito Coluvial (Ql)	Stcol	2.5 a 15 m		Depósito Coluvial compuesto por limo arenoso con gravas y fragmentos de shales, algo permeables, de consistencia dura, algo húmedo, de color marrón grisáceo claro.
	Stcoc			Se encuentra un suelo coluvial calcáreo compuesto por arcilla arenosa con gravas, algo permeable, de consistencia firme, algo húmeda, de color marrón grisáceo, con tonos naranja, crema, gravas angulares de tamaño fino a medio.
Suelo Residual	Sral	Hasta 27.5 m según perforación		Se presentan intercalaciones de un suelo residual compuesto por arcilla arenosa, con gravas gruesas de arenisca, poco permeable, de consistencia dura, de color amarillo marrón.
	Sraf			Suelo residual compuesto por arena de grano fino a medio, permeable, de consistencia muy densa, de color gris amarillento pálido.
Formación Umir (Ksu)	Ra	< 3 m (Ind)		Arenisca de grano fino resistente, de color marrón rojizo con tonalidades amarillentas y rosáceas.
	Rsh	< 1.5 m (Ind)		Shale negro muy resistente calcáreo con delgadas vetas laminares de calcita.

5.3 Geomorfología

En la región del proyecto “Topocoro” en un análisis morfogenético a escala local se presentan componentes especialmente de tipo denudacional por la meteorización y posterior erosión de las unidades geológicas presentes (Formación Umir y la Luna), en segundo lugar, se presentan los componentes morfogenéticos de un ambiente antrópico presentes por la adecuación de las vías producto de la estabilización de los taludes y explanación de nuevas áreas. Por último, se encuentra un pequeño segmento asociado al ambiente fluvial y/o lagunar. En la Tabla 3 se muestra la distribución aproximada de los ambientes morfogenéticos que predominan en el área de estudio.

Tabla 3.

Total de área cubierta por ambientes morfogenéticos

Ambiente	Área (Ha)
Antrópico	8.01
Denudacional	10.60
Fluvial	0.03
Total	18.64

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

5.3.1 Morfogénesis componente denudacional

Incluye las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas por la acumulación de sedimentos. Para el proyecto “Topocoro” se describieron los siguientes componentes:

5.3.1.1 Ladera erosiva muy abrupta (Dlema). Con un área de 7.33 Ha esta geoforma se presenta como una superficie de erosión con una pendiente entre 30° y 50° sobre rocas de la Formación Umir, de longitudes moderadas (110 – 130 m), de forma planas a levemente cóncava, con relieve relativo de 60 m. Se presenta con cobertura vegetal tipo arbustos y rastrojos bajos (Figura 14).

Figura 14.

Ladera erosiva muy abrupta (Dlema) adaptado G.T. S.A.S.



5.3.1.2 Ladera erosiva (Dle). Este componente morfológico presenta un área de 1.11 Ha y se describe como una superficie del terreno de pendiente muy inclinada (5° a 15°), de longitud corta (<60 m), de forma plana a levemente cóncava. Presenta procesos erosivos suaves como surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo residual (Formación La Luna) (

Figura 15).

5.3.1.3 Ondulaciones (Do). Con un área de 1.04 Ha esta geoforma se presenta como elevaciones del terreno con una altura menor de 25 metros sobre su nivel base local, con una morfología ondulada y cóncava, plana a suavemente inclinada ($<20^\circ$). Presenta con cobertura vegetal tipo arbustos y rastrojos bajos (

Figura 15).

5.3.1.4 Superficie de erosión o aplanamiento (Dsa). Con un área de 0.82 Ha esta geoforma se presenta como un área extensa y plana, elevada. La topografía plana horizontal recorta las capas de la formación La Luna. Su origen es relacionado a intensos procesos denudacionales y degradacionales (meteorización) de esta formación que están sometidas a condiciones climáticas y tectónicas.

5.3.1.5 Ladera erosiva abrupta (Dlea). Este componente morfológico presenta un área de 0.28 Ha. Superficie de erosión con una pendiente entre 20° a 30°, de longitudes moderadas (< 20 m), de forma plana. Presenta procesos erosivos suaves como surcos y soliflucción, sobre materiales de suelo residual (Formación Umir) (

Figura 15).

Figura 15

Ambientes denudacionales (Ondulaciones (Do), Ladera erosiva (Dle), Ladera erosiva abrupta (Dlea), Ladera terrazada (Alt), Planos y campos de llenos antrópicos (Ar) y Planicie agrícola (Apa)) adaptado de G.T. S.A.S.

**5.3.2 Morfogénesis componente antropogénico**

Incluye las geoformas originadas como resultado de la intervención del hombre sobre el terreno, en la mayoría de los casos con el objetivo de realizar construcción de vivienda, obras de ingeniería, disposición de desechos o escombros y adecuación de nuevas vías, que modifica la morfología natural del terreno. Para el proyecto “Topocoro” se describieron los siguientes componentes:

5.3.2.1 Ladera terrazada (Alt). Este componente morfológico presenta un área de 2.46 Ha. Se presenta como una ladera inclinada ($< 45^\circ$) que han sido intervenida mediante excavaciones para

formar escalones (3 escalones) que reduzcan la pendiente, estos presentan longitudes < 30 m y relieve relativo de 30 m, se realizan con fines urbanísticos.

5.3.2.2 Planos y campos de llenos antrópicos (Ar). Con un área de 2.34 Ha esta geoforma se presenta como planos hechos artificialmente con material de relleno para acondicionar terrenos anegadizos que se realizan con fines urbanísticos. Se presenta como un suelo de relleno compuesto por limo con gravas completamente meteorizada y alterada, poco permeable de consistencia muy firme, de color amarillo, amarillo marrón con tonos naranja y rosáceo.

5.3.2.3 Planicie agrícola (Apa). Este componente morfológico presenta un área de 1.99 Ha. Se presenta como áreas de morfología plana a levemente ondulada adecuadas por el hombre usando la misma tierra del lugar para realizar actividades agrícolas.

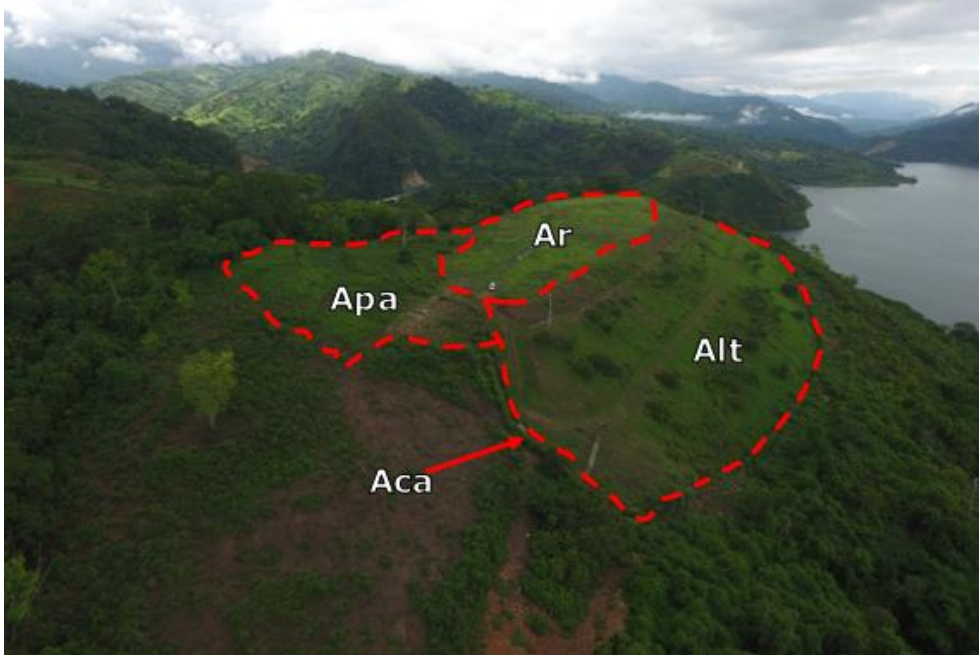
5.3.2.4 Terrazas agrícolas (Ata). Con un área de 0.93 Ha esta geoforma se presenta como escalones muy anchos, construidos por el hombre usando la misma tierra del lugar, para actividades agrícolas. Las terrazas son hechas con el objeto de que suelos inclinados puedan usarse con cultivos agrícolas, sin que la tierra sea arrastrada por el agua.

5.3.2.5 Ladera explanada (Ale). Este componente morfológico presenta un área de 0.16 Ha. Se describe como un corte en ladera (<13 m de longitud) con altura de 10 m aprox. que es realizado con el fin de estabilizar el talud (presenta una pendiente <40°) en el margen de la vía principal (Vía Bucaramanga - Barrancabermeja). Presenta leves procesos erosivos como surcos y erosión superficial (Figura 16).

5.3.2.6 Canal Artificial (Aca). Con un área de 0.10 Ha esta geoforma se presenta como canales construidos para dragado o control de humedad de las zonas intervenidas (Figura 16).

Figura 16.

Ambientes antropogénicos (Apa, Ar, Alt y Aca). Adaptado de G.T. S.A.S.



5.3.2.7 Ambiente fluvial y lagunar. Incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre. Para el proyecto “Topocoro” se describieron los siguientes componentes:

5.3.2.8 Laguna (Flg). Con un área de 0.02 Ha esta geoforma se presenta como un depósito natural de agua de dimensiones inferiores, esta laguna de origen fluvial se relaciona con la inundación de antiguas depresiones durante la época de alta pluviosidad, esta puede permanecer incluso en épocas secas ya que son pobremente drenadas (Figura 17).

Figura 17.

Ambientes denudacionales, antrópicos y fluvial. Adaptado de G.T. S.A.S.

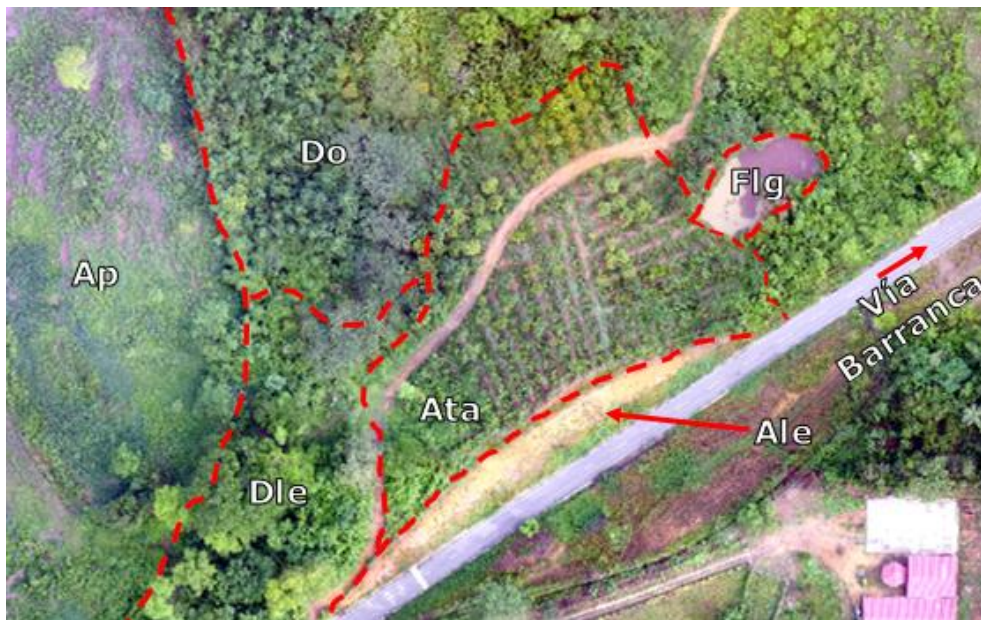
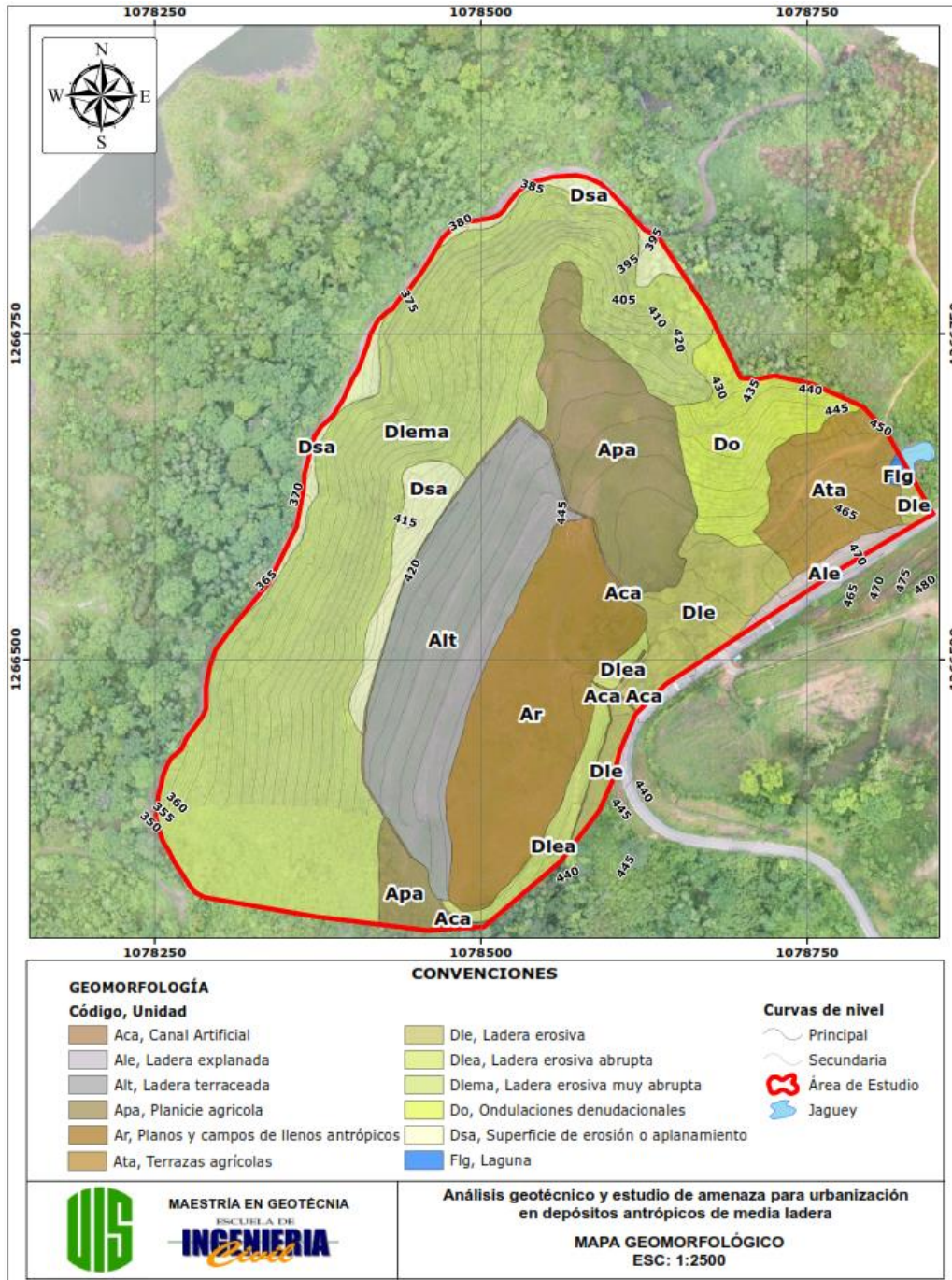


Figura 18.

Mapa de unidades geomorfológicas en el área de estudio. Adaptado de G.T. S.A.S con modificaciones propias.



5.3.3 Morfometría

Permite conocer la medida de la forma o geometría de cualquier cuerpo natural (Strahler, 1974). Dentro de sus atributos se considera la pendiente como parte del análisis, generando como resultado el valor del ángulo entre la superficie del terreno y un eje horizontal imaginario. La clasificación para esta variable corresponde a la relación entre la pendiente y el grado de estabilidad de los materiales, teniendo que la zona más inestable es aquella cuya pendiente oscila entre 19 a 40°, las zonas con pendientes mayores a 40° en estado natural se intuye que poseen una mayor estabilidad.

Tabla 4.

Clasificación pendiente

Pendiente (°)		Clasificación
0 – 7	Muy baja	1
7 – 11	Baja	2
11 – 19	Moderada	3
19 – 40	Muy alta	5
> 40	Moderada	3

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

De acuerdo a lo anterior se evidencia que la zona de estudio posee pendientes muy bajas en la parte superior en cercanías a la vía existente. Luego se presenta una ladera de pendientes fuertes. Se observa que las construcciones del proyecto estarán ubicadas principalmente en la parte superior.

Figura 19.

Mapa de pendientes. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.

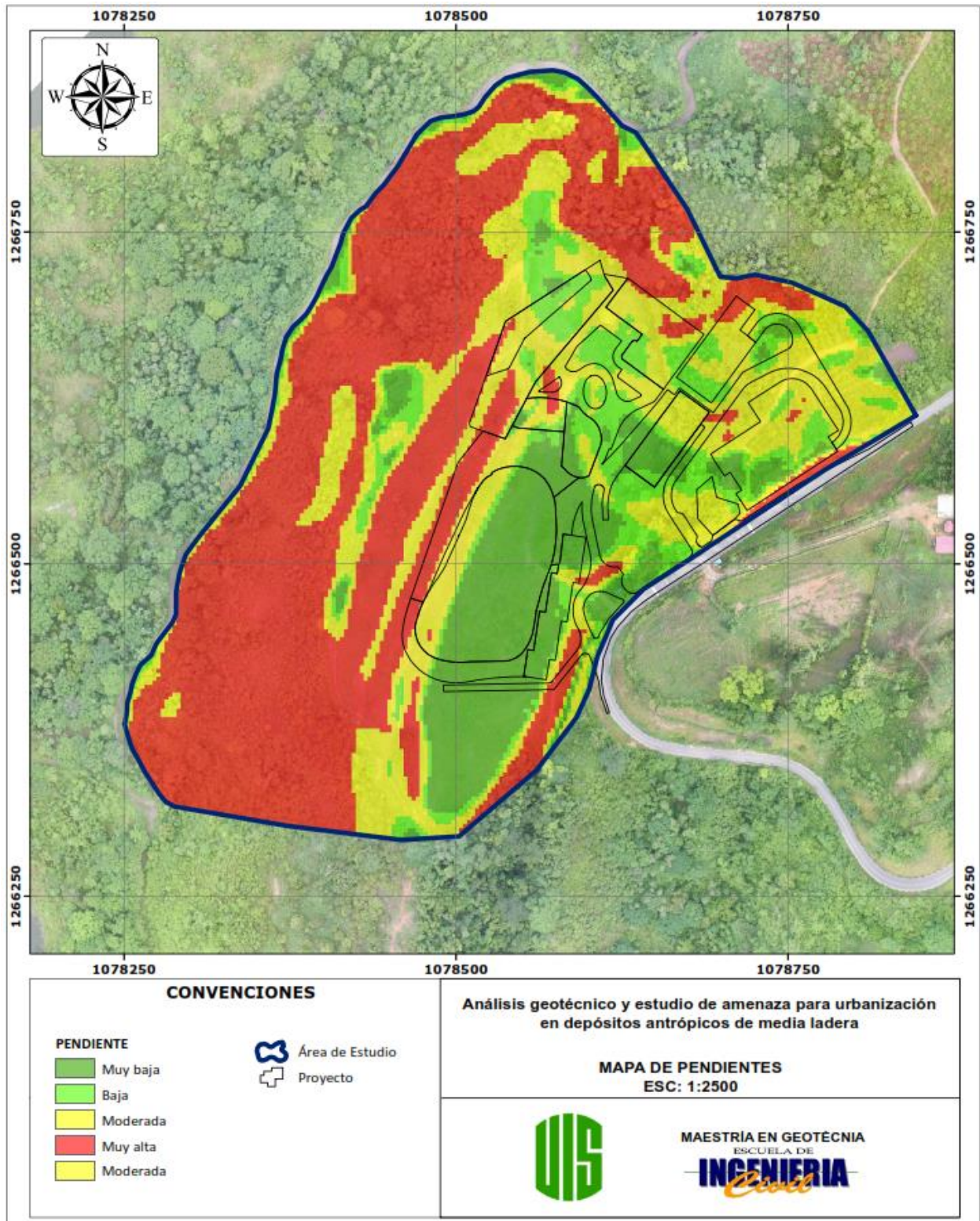
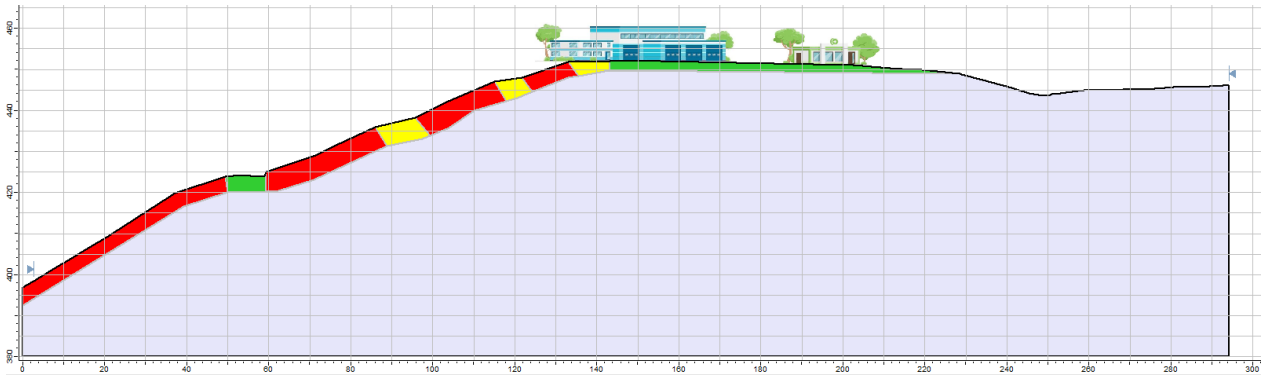


Figura 20.

Perfil general de pendientes con edificaciones.



Como se observa en el perfil general de las pendientes del proyecto, algunas edificaciones se encuentran en zonas donde las pendientes varían entre moderadas y altas lo que implica que se deban realizar análisis de estabilidad y evaluación de amenaza ante posibles movimientos en masa del talud.

5.3.4 Morfodinámica

Los procesos morfodinámicos corresponden a una serie de acciones sucesivas y/o simultáneas y sinérgicas a través de las cuales los agentes morfogenéticos, principalmente los externos, son capaces de alterar la estabilidad de las formas de la superficie terrestre. Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la meteorización y erosión de un macizo rocoso, el desplazamiento y/o movimiento que se traduce en transporte de los materiales removidos y su posterior depositación.

En consecuencia, los procesos morfodinámicos dependen de una serie de factores externos relacionados con la energía del agente morfogenético y la posición geomorfológica como son es la denudación, la cual se define como un proceso morfodinámico externo, es el modelador de la superficie terrestre y el generador de las geoformas. El proceso comienza con la meteorización o

erosión in situ de las rocas a través de la intemperización o influencia de los elementos del clima tales como los cambios de temperatura y las precipitaciones. Esta meteorización prepara las rocas para ser erosionadas.

Por otro lado, la erosión a la cual se le atribuye la remoción de las partículas de la roca a través de procesos como la abrasión hidráulica o la deflación eólica, o simplemente la erosión de la energía cinética de ambos elementos, agua y viento. Simplemente se le da una connotación al proceso erosivo como el principal responsable del rebajamiento del relieve transformándolo en relieve destructivo, además, sumado a estos procesos se debe tener en cuenta factores internos tales como la composición mineralógica de los materiales involucrados, así como sus propiedades geomecánicas. Para la región del proyecto se presentan procesos morfodinámicos superficiales de tipo erosión laminar, surcos, cárcavas y antrópica.

La erosión laminar es generada por la pérdida de suelo debido a la circulación superficial difusa del agua de escorrentía. Esta pérdida se da en la capa delgada más o menos uniforme del suelo (partículas liberadas por salpicadura) en el terreno inclinado, tiene lugar cuando la intensidad de la precipitación excede la infiltración o bien cuando el suelo se satura de agua, lo que da lugar a un exceso de agua en la superficie. La escorrentía superficial transporta las partículas más finas y provoca una disminución de la productividad del suelo (pérdida de arcilla, materia orgánica y nutriente).

Los surcos se presentan por el arrastre del flujo del agua que se canaliza y jerarquiza, esta escorrentía se da por la concentración del flujo en pequeños canales o rugosidades que hace que se profundicen formando una serie de surcos semiparalelos. La erosión por cárcavas se da por la constante acción del agua sobre regiones delatadas por la acción de los surcos, estos se profundizan tanto en la vertical y en la horizontal, una vez se inicia la formación de la cárcava, ésta evoluciona según la consistencia relativa que presenten los diferentes horizontes del suelo; cuando la

consistencia del material es relativamente uniforme, las paredes de la cárcava son más o menos verticales, en tanto que cuando se presenta un aumento en la resistencia de las capas inferiores, se desarrollan en forma de " V".

Por último, se encuentra la región con procesos antrópicos (Erosión Mecánica) que se da por la acción de pérdida de suelo causada por las labores agrícolas, principalmente se debe a la mano del hombre y sus actividades. Las áreas que no generan procesos erosivos presentan una cobertura vegetal de tipo arbolado bajo y rastrojos.

Figura 21.

Mapa de procesos morfodinámicos en el área del proyecto. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.

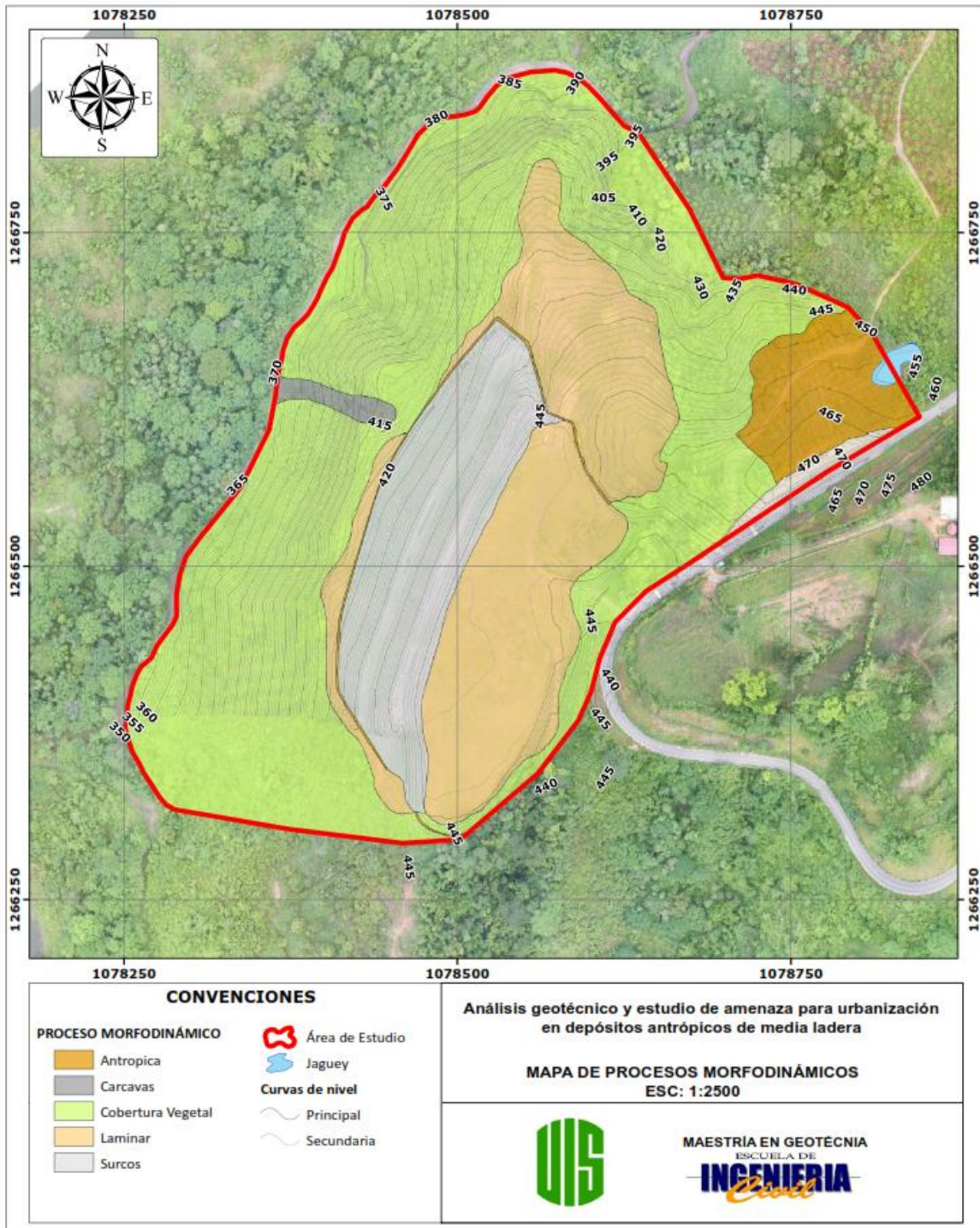
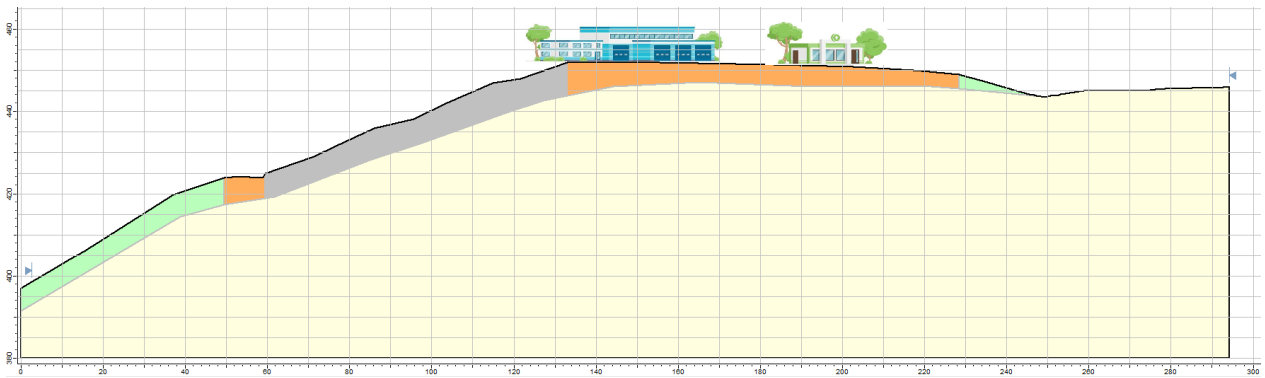


Figura 22.

Perfil general de procesos morfodinámicos con edificaciones



Como se observa en el perfil general de procesos morfodinámicos las edificaciones que se construirán se encuentran en zonas donde se evidencian procesos erosivos como cárcavas y laminaridad, lo que implica que se deban analizar la conducción de aguas de escorrentía en el parque y protección de taludes.

5.4 Hidrogeología

Para la región del proyecto se tiene valores estimados de precipitación media anual total entre los 2000 a 2500 mm, datos reportados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos valores muestran una tendencia de pluviosidad moderada para la región. Sumada a esta condición, se describen las unidades de suelo y roca presentes, donde en la parte superficial se encuentra un depósito antropogénico de tipo de relleno, compuesto por limo con gravas a limos areno-gravosos completamente meteorizados y alterados.

Por debajo del suelo de relleno se encuentra un suelo coluvial compuesto por arcilla arenosa con algunas gravas angulares, algo permeable, siendo este sector muy factible a presentar una alta infiltración. Por último, se encuentra una secuencia perteneciente a la Formación Umir y que esta

descrita como un suelo residual compuesto por arcilla arenosa limosa, con gravas gruesas de arenisca, poco permeable y en algunos sectores presenta arena de grano fino a medio, permeable. Esta unidad presenta condiciones de permeabilidad moderada y se le atribuye un alto factor de infiltración debido a la condición estratigráfica que generan superficies por el cambio de litología.

En las exploraciones realizadas no se evidenciaron niveles freáticos a profundidad, lo cual muestra que no existe una fuente de agua subterránea.

5.5 Cobertura vegetal

La identificación de las unidades presentes en el área de estudio se realizó mediante un proceso de fotointerpretación y siguiendo la metodología adaptada Corine Land Cover (IDEAM, 2010), usando como insumo el fotomosaico generado a partir de la toma de fotografías aéreas con dron.

En esta metodología se identifican y clasifican las coberturas en los siguientes cinco (5) grandes grupos, a su vez se pueden subdividir según el nivel de detalle esperado:

5.5.1 Territorios artificializados

Comprende las zonas urbanas, y/o de expansión, aquellas áreas que están encaminadas hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.

5.5.2 Territorios agrícolas

Corresponde todos aquellos terrenos destinados para uso y producción agrícola (cultivos, pastos y mosaicos asociados), los cultivos generados pueden ser transitorios o permanentes y además se incluyen todos los usos pecuarios que se puedan generar.

5.5.3 Bosques y áreas seminaturales

Agrupar todas las unidades caracterizadas por bosques, arbustos y herbáceos de especies nativas o exóticas. Las áreas seminaturales están constituidas principalmente por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, generados por procesos naturales, también por los manejos antrópicos de la vegetación.

5.5.4 Áreas húmedas

Incluye todas aquellas coberturas que pueden estar temporalmente inundados y cubiertos por vegetación acuática, igualmente los bordes marinos y de fuentes hídricas.

5.5.5 Superficies de agua

Son aquellos cuerpos de agua existentes de manera permanente, intermitente y estacional.

Tabla 5.

Leyendas de cobertura vegetal. Tomado de Metodología Corine Land Cover, IDEAM 2010.

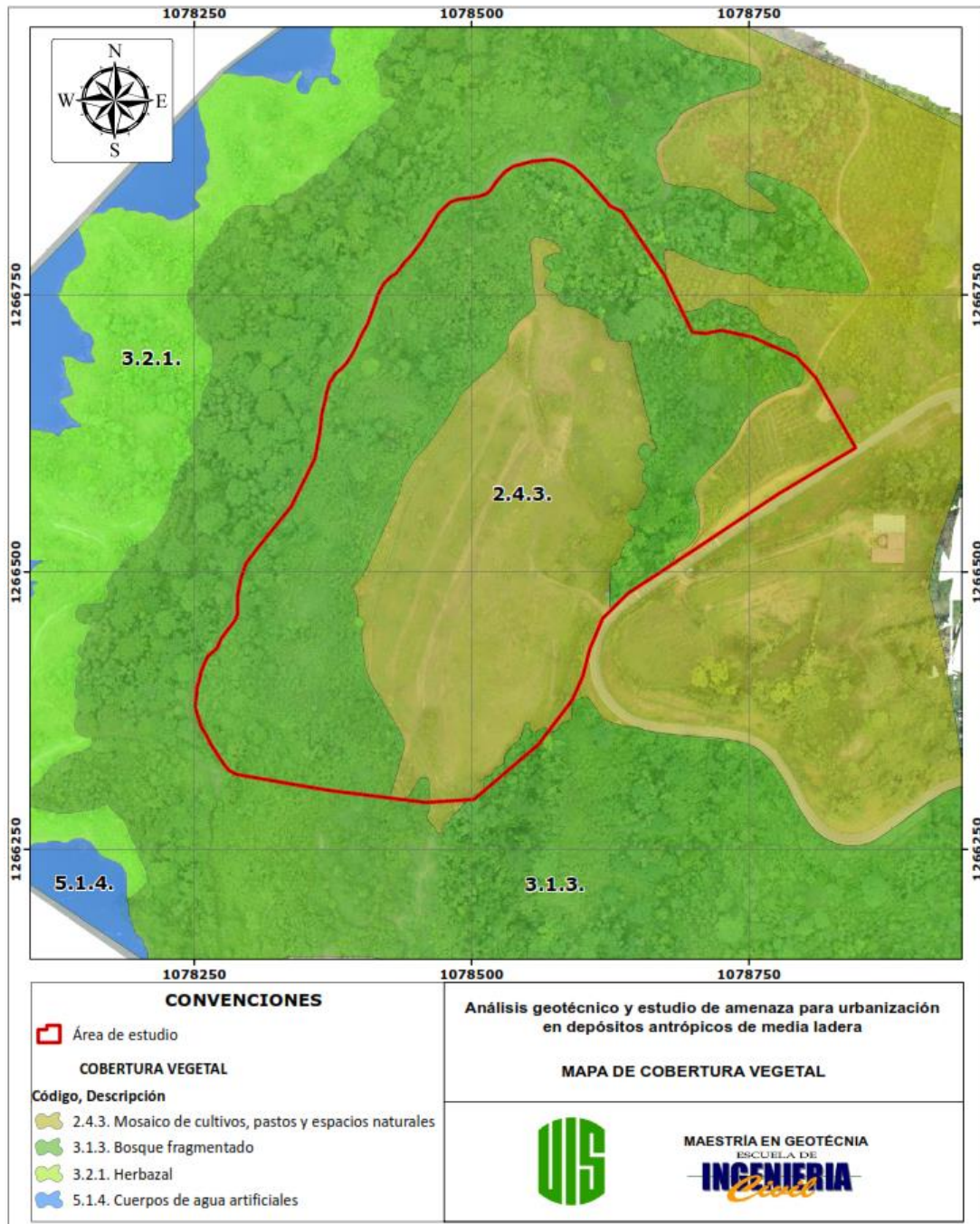
LEYENDA NACIONAL DE COBERTURAS DE LA TIERRA - COLOMBIA	
1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES
1.1. Zonas urbanizadas	3.1. Bosques
1.1.1. Tejido urbano continuo	3.1.1. Bosque denso
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	3.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
1.2.3. Zonas portuarias	3.1.2. Bosque abierto
1.2.4. Aeropuertos	3.1.2.1. Bosque abierto alto de tierra firme
1.2.5. Obras hidráulicas	3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
1.3. Zonas de extracción minera y escombreras	3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme
1.3.1. Zonas de extracción minera	3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	3.1.3. Bosque fragmentado
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	3.1.4. Bosque de galería y ripario
1.4.1. Zonas verdes urbanas	3.1.5. Plantación forestal
1.4.2. Instalaciones recreativa	3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS	3.2.1.1. Herbazal denso
2.1. Cultivos transitorios	3.2.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3.2.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
2.1.2. Cereales	3.2.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
2.1.4. Hortalizas	3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
2.1.5. Tubérculos	3.2.1.1.2.3. Arracachal
2.2. Cultivos permanentes	3.2.1.1.2.4. Helechal
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2. Herbazal abierto
2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos	3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
2.2.1.2. Caña	3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
2.2.1.3. Plátano y banano	3.2.2.1. Arbustal denso
2.2.1.4. Tabaco	3.2.2.2. Arbustal abierto
2.2.1.5. Papaya	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
2.2.1.6. Amapola	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	3.3.1. Zonas arenosas naturales
2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos	3.3.2. Afloramientos rocosos
2.2.2.2. Café	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
2.2.2.3. Cacao	3.3.4. Zonas quemadas
2.2.2.4. Viñedos	3.3.5. Zonas glaciares y nivales
2.2.2.5. Coca	4. AREAS HÚMEDAS
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4.1. Áreas húmedas continentales
2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos	4.1.1. Zonas Pantanosas
2.2.3.2. Palma de aceite	4.1.2. Turberas
2.2.3.3. Citricos	4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua
2.2.3.4. Mango	4.2. Áreas húmedas costeras
2.2.4. Cultivos agroforestales	4.2.1. Pantanos costeros
2.2.5. Cultivos confinados	4.2.2. Salitral
2.3. Pastos	4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar
2.3.1. Pastos limpios	5. SUPERFICIES DE AGUA
2.3.2. Pastos arbolados	5.1. Aguas continentales
2.3.3. Pastos enmalezados	5.1.1. Ríos (50 m)
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales
2.4.1. Mosaico de cultivos	5.1.3. Canales
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	5.2. Aguas marítimas
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	5.2.1. Lagunas costeras
2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales	5.2.2. Mares y océanos
	5.2.3. Estanques para acuicultura marina

Nota: Tomada de IDEAM (2010)

Para el análisis del presente estudio se llegó a un tercer nivel de cobertura, encontrando las unidades que se muestran en la Figura 23.

Figura 23.

Unidades de cobertura vegetal. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.



Como se puede observar en la Figura 23, el área de estudio se encuentra principalmente en una zona de bosque fragmentado y mosaico de pastos y espacios naturales. Esta vegetación ayuda a disminuir la cantidad de agua que puede llegar a infiltrarse dentro del terreno, adicionalmente la pendiente del terreno ayuda a drenar las aguas de escorrentía hacía los cuerpos de agua del embalse, al igual que los canales artificiales de recolección existentes.

5.6 Exploración geotécnica de referencia

En el área de estudio se realizaron dos campañas de exploración geotécnica con el fin de precisar las características geotécnicas que predominan en el terreno. La primera llamada caracterización preliminar se realizó en el año 2016 y la segunda denominada estudio geotécnico definitivo se realizó en el año 2018. Posterior a estas se realizó otra exploración en el año 2021 con el fin de complementar los análisis ya realizados. En estas se realizaron ensayos geotécnicos directos e indirectos, utilizando equipos de perforación, equipos geofísicos y a las muestras recuperadas se le practicaron ensayos de laboratorio, con el fin de definir las propiedades geomecánicas de los estratos de suelo que componen el área de estudio.

Las exploraciones geotécnicas fueron realizadas por dos compañías independientes la primera realizó la caracterización de los años 2016 y 2018. La segunda compañía con base en la caracterización y exploración realizada anteriormente, realiza una exploración complementaria en el año 2021 en las zonas exploradas.

5.6.1 Exploración geotécnica directa

La primera compañía que realizó la exploración geotécnica hizo en total 24 sondeos. Veinte sondeos a percusión, con ensayos de penetración estándar cada 0.5 metros, los sondeos alcanzaron profundidades variables entre 1.00 y 7.00 metros.

Cuatro sondeos a rotación a profundidades variables entre 15.50 y 31.50 metros con punta de diamante y con ensayos de penetración estándar cada 1.0 metro o donde la dureza del material lo permitió para los sondeos ejecutados.

Tabla 6.

Sondeos realizados a percusión (año 2016)

Perforación No.	Coordenadas Magna Bogotá		Localización respecto al lote	Prof. (m)
	Norte	Este		
Sondeo 1	1078510.38	1266496.11	Occidente	6.00
Sondeo 2	1078467.60	1266515.48	Occidente	2.00
Sondeo 2A	1075476.87	1266535.38	Occidente	5.00
Sondeo 3	1078438.39	1266531.15	Occidente	5.00
Sondeo 4	1078489.74	1266506.03	Occidente	7.00
Sondeo 5	1078546.10	1266478.25	Occidente	5.00

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Tabla 7.

Sondeos realizados a rotación y percusión (año 2018)

Perforación No.	Coord. Magna Bogotá		Localización respecto al lote	Prof. (m)
	Norte	Este		
Sondeo 1	1078525.30	1266583.36	Noroccidente	23.50
Sondeo 2	1078585.06	1266547.80	Noroccidente	31.50
Sondeo 3	1078511.89	1266439.66	Suroccidente	25.00
Sondeo 4	1078569.60	1266683.60	Nororiente	15.50
Sondeo 5	1078500.71	1266554.19	Noroccidente	6.00
Sondeo 6	1078539.36	1266537.20	Centro	6.00
Sondeo 7	1078559.24	1266613.89	Noroccidente	6.00
Sondeo 8	1078585.52	1266500.06	Suroriente	6.00
Sondeo 9	1078567.65	1266444.14	Suroriente	1.00
Sondeo 9A	1078569.14	1266464.37	Suroriente	6.00
Sondeo 10	1078501.19	1266468.49	Suroccidente	6.00
Sondeo 11	1078541.35	1266650.75	Noroccidente	3.00
Sondeo 12	1078471.80	1266482.72	Suroccidente	5.00
Sondeo 13	1078641.99	1266641.88	Nororiente	3.00
Sondeo 13A	1078617.04	1266654.76	Nororiente	2.00
Sondeo 14	1078673.64	1266574.18	Nororiente	4.00
Sondeo 15	1078711.05	1266619.30	Nororiente	6.00
Sondeo 16	1078585.51	1266591.56	Noroccidente	6.00

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Figura 24.

Profundidad y localización de los sondeos realizados año 2016 y 2018. Adaptado G.T. S.A.S con modificaciones propias.

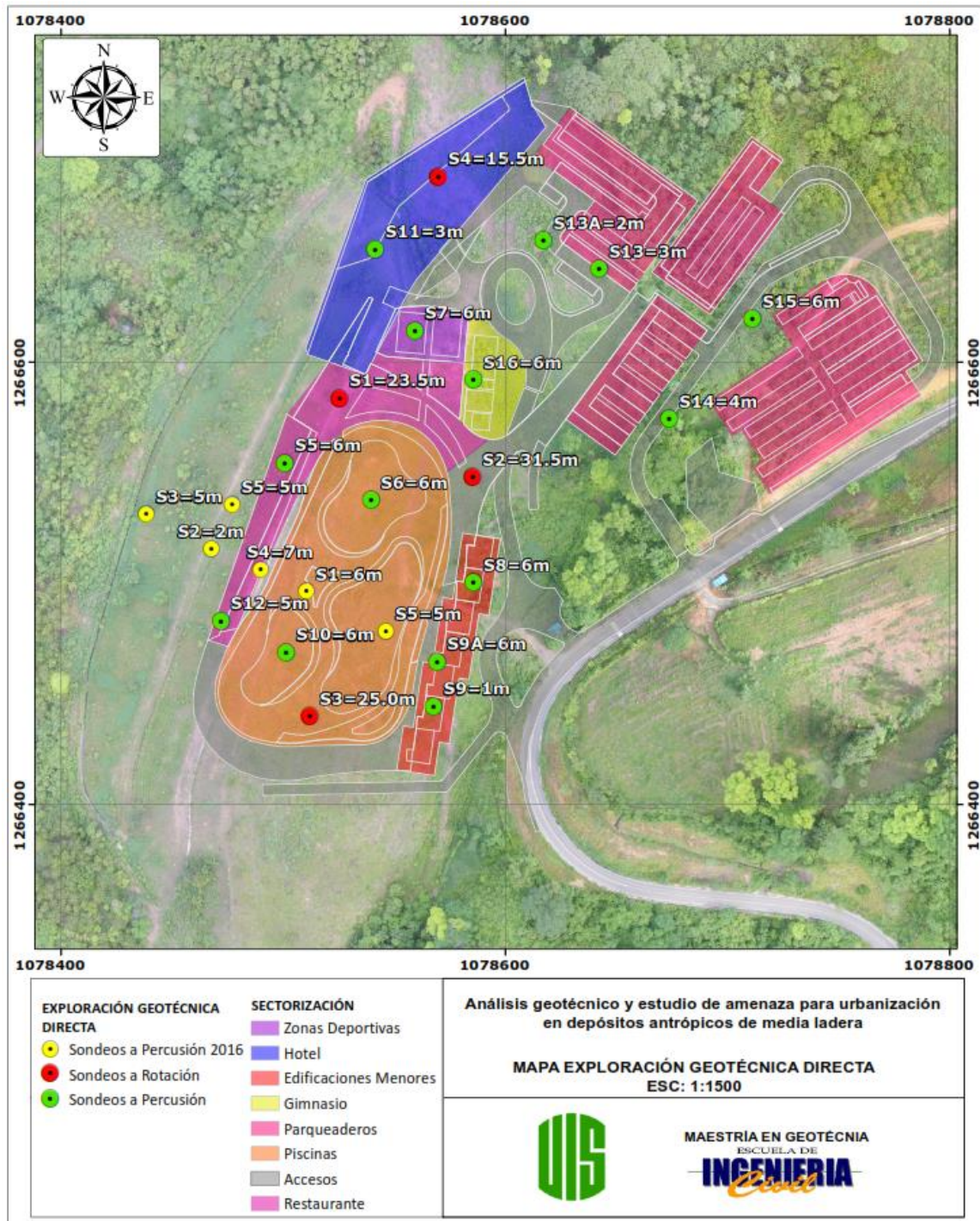


Tabla 8.*Registros del ensayo SPT a percusión (2016)*

Prof. (m)	S1	S2	N (Golpes/pie)			
			S2A	S3	S4	S5
0.5	24	24	31	3	22	18
1.0	25	62	63	8	30	20
1.5	48	55	31	13	20	15
2.0	20	92R	37	13	16	24
2.5	20		43	21	17	31
3.0	29		51	41	29	48
3.5	21		19	57	16	54
4.0	17		32	83	27	55
4.5	33		61	78	23	62
5.0	31		47R	101R	29	86R
5.5	53				32	
6.0	74R				49	
6.5					31	
7.0					33R	

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Tabla 9.*Registros del ensayo SPT a rotación (año 2018)*

Prof. (m)	S1	S2	N (Golpes/pie)	
			S3	S4
0.50	8	23	16	11
1.00	26	29	60	24
1.50	36	23	42	23
2.00	31	12	31	34
2.50	23	27	30	38
3.00	12	43	30	50
3.50	28	26	16	32
4.00	28	30	14	34
4.50	19	25	10	18
5.00	22	39	14	42
5.50	38	44	13	34
6.00	28	62	23	68
6.50	33	55	20	20
7.00	26	87R	20	48
7.50	15	RT	32	28
8.00	32	RT	54	15
8.50	27	30	54	27
9.00	34	51	63	32
9.50	6	25	26	28
10.00	30	27	53	87R
10.50	10	30	RT	RT

Prof. (m)	S1	S2	S3	S4
	N (Golpes/pie)			
11.00	23	47	RT	RT
11.50	19	31	RT	RT
12.00	26	49	32	32
12.50	20	28	RT	56
13.00	61R	52	RT	RT
13.50	RT	49	RT	RT
14.00	RT	61R	RT	26
14.50	11	RT	RT	25
15.00	8	RT	RT	20
15.50	13	RT	RT	40
16.00	17	RT	RT	
16.50	17	RT	RT	
17.00	64	RT	RT	
17.50	46	RT	31	
18.00	89R	RT	28	
18.50	RT	RT	26	
19.00	RT	RT	43	
19.50	54	33	70	
20.00	63	62	41	
20.50	72R	105R	36	
21.00	RT	RT	30	
21.50	RT	RT	47	
22.00	RT	RT	31	
22.50	RT	31	34	
23.00	RT	50	104R	
23.50	RT	43	RT	
24.00		73	RT	
24.50		30	62	
25.00		62	73	
25.50		153R		
26.00		RT		
26.50		RT		
27.00		RT		
27.50		56		
28.00		106		
28.50		46		
29.00		64		
29.50		85R		
30.00		RT		
30.50		RT		
31.00		RT		
31.50		RT		

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Tabla 10.*Registro de ensayos SPT a percusión (año 2018)*

Prof. (m)	S5	S6	S7	S8	S9	S9A	S10	S11	S12	S13	S13A	S14	S15	S16
N (Golpes/pie)														
0.5	24	7	18	4	18	43	8	9	12	7	20	23	5	10
1.0	39	8	8	11	R	50	16	8	24	64	69	44	8	14
1.5	26	12	9	17		20	22	5	30	72	90	45	19	12
2.0	32	17	14	15		15	60	4	27	80	103R	115R	36	12
2.5	62	13	40	29		18	33	28	36	83		51	32	32
3.0	71	19	30	66		17	43	85R	30	115R		103	58	42
3.5	51	18	30	49		10	32		32			120	122	46
4.0	43	27	37	35		21	44		33			135R	119	73
4.5	57	18	26	31		21	41		38				75	86
5.0	55	47	20	41		39	64		100R				64	94
5.5	44	41	20	34		30	32						70	82
6.0	50	38	16	44		21	48						124R	120R

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Figura 25.

Localización de los sondeos realizados año 2021. Tomado de IAUS 20979

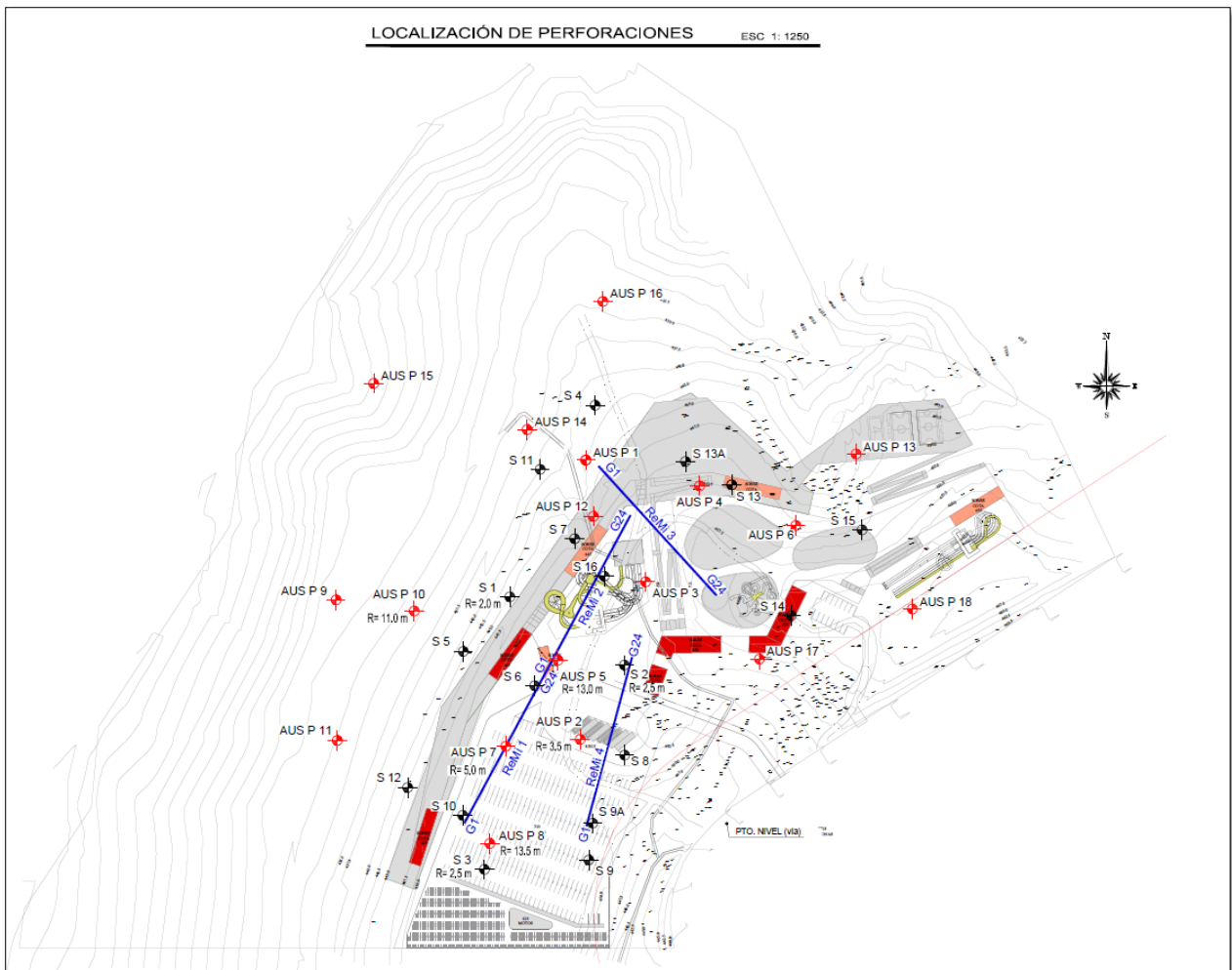


Tabla 11.*Registro de profundidad de ensayos y coordenadas de ensayos SPT*

No. Perforación	Coordenadas (m)		Profundidad (m)
	Este	Norte	
AUS P1	1078591.292	1266665.532	21.5
AUS P2	1078588.365	1266518.659	15.5
AUS P3	1078622.777	1266601.492	22.0
AUS P4	1078651.154	1266651.928	16.0
AUS P5	1078576.706	1266560.267	23.5
AUS P6	1078701.729	1266631.113	17.0
AUS P7	1078549.241	1266515.009	25.0
AUS P8	1078540.866	1266463.923	20.0
AUS P9	1078460.029	1266592.013	14.5
AUS P10	1078501.081	1266586.129	20.5
AUS P11	1078460.662	1266518.114	12.0

Nota: Tomada de IAUS 20979.

5.6.2 Exploración geotécnica indirecta

Como se mencionó anteriormente se realizó exploración geotécnica indirecta mediante la ejecución de líneas sísmicas en total ocho:

En el año 2016 se realizaron tres líneas sísmicas hacia el costado suroccidental del proyecto.

En el año 2018 para el estudio definitivo se realizó una línea sísmica hacia el costado nororiental.

En el año 2021 se realizaron cuatro líneas complementarias dentro del desarrollo del proyecto.

En la

Figura 264 se observa la distribución de las líneas sísmicas sobre el área del proyecto en las campañas exploratorias del año 2016 y 2018.

Figura 26.

Localización de la exploración geotécnica indirecta años 2016 y 2018. Adaptada de G.T. S.A.S. con modificaciones propias.

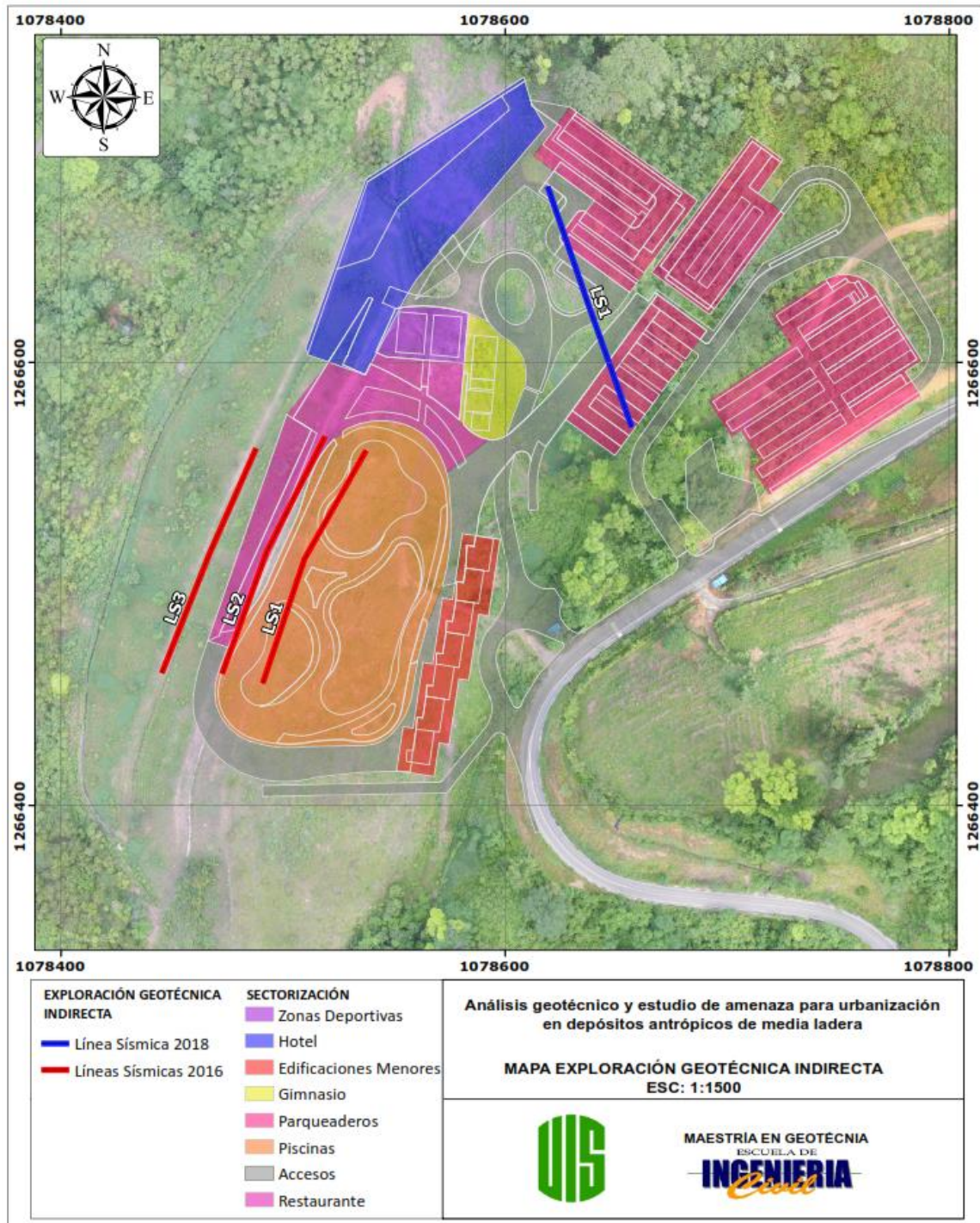


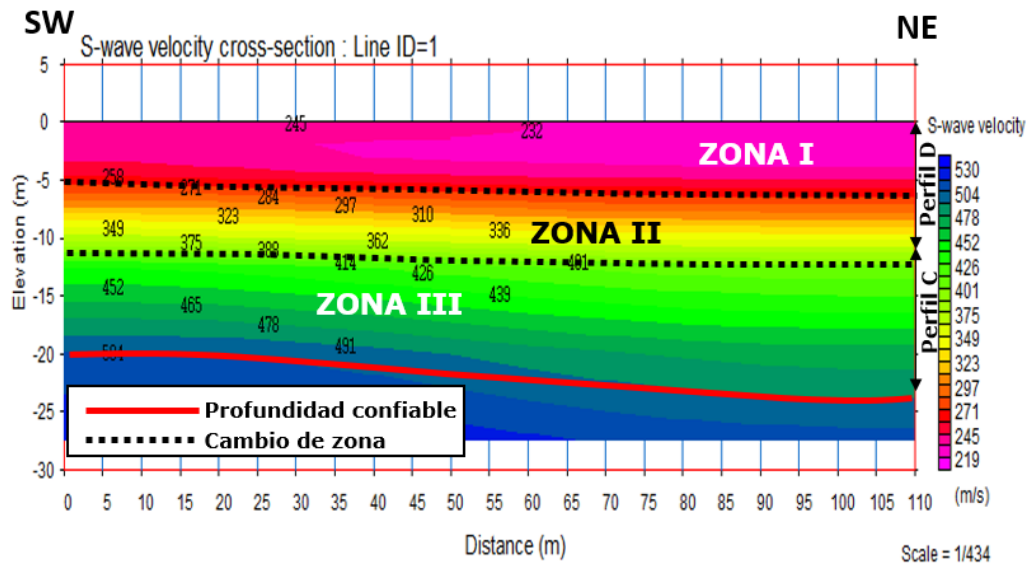
Tabla 12.*Localización y longitud líneas sísmicas ejecutadas (año 2016)*

Línea sísmica No.	Coord. Inicio sísmica		Coord. Fin sísmica		Longitud (m)
	X	Y	X	Y	
1	1078537.3	1266560.3	1078490.8	1266455.1	115.0
2	1078518.9	1266566.6	1078472.5	1266459.4	115.0
3	1078487.9	1266561.3	1078445.3	1266459.7	115.0

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.**Tabla 13.***Localización y longitud línea sísmica ejecutada (año 2018)*

Línea sísmica No.	Coord. Inicio sísmica		Coord. Fin sísmica		Longitud (m)
	X	Y	X	Y	
1	1078619.1	1266679.5	1078657.0	1266570.7	115.0

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.**5.6.2.1 Línea sísmica LS-1 (año 2016)****Espaciamiento entre geófonos:** 5.0 m**Profundidad investigada:** Aproximadamente hasta los 15.0 m.**Terreno:** Zona plana del relleno.**Interpretación tomografía MASW/2D**

Figura 27.*Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS1*

De acuerdo a los resultados de la tomografía MASW/2D de la línea sísmica LS1, se identifican tres zonas de interés que corresponden a dos tipos de perfiles de suelos, estos fueron clasificados según los parámetros establecidos por la NSR-10 Tabla A.2.4-1. La Zona I asociada a suelos de relleno sueltos (5.0 a 6.0 m), compuestos por limos areno arcillosos con presencia de gravas, correspondiente a un Perfil de suelo Tipo D, con velocidades de onda V_s entre 219.0 a 271.0 m/s. La Zona II (Perfil Tipo D), corresponde a suelos coluviales que aumenta su consistencia con la profundidad (suelos a muy firmes), con un espesor de 6.0 m aproximadamente y velocidades de onda V_s de 271.0 a 388.0 m/s. Por último, la Zona III muestra un perfil de suelo Tipo C (Suelos residuales) que aumenta su consistencia con la profundidad, con velocidades de onda V_s superiores a los 388 m/s.

5.6.2.2 Línea sísmica LS-2 (año 2016)

Espaciamiento entre geófonos: 5.0 m

Profundidad investigada: Aproximadamente hasta los 15.0 m.

Terreno: Primera zona plana a lo largo de la ladera.

Interpretación refracción sísmica y tomografía MASW/2D

Figura 28.

Refracción sísmica – Modelo tomografía 2D LS2

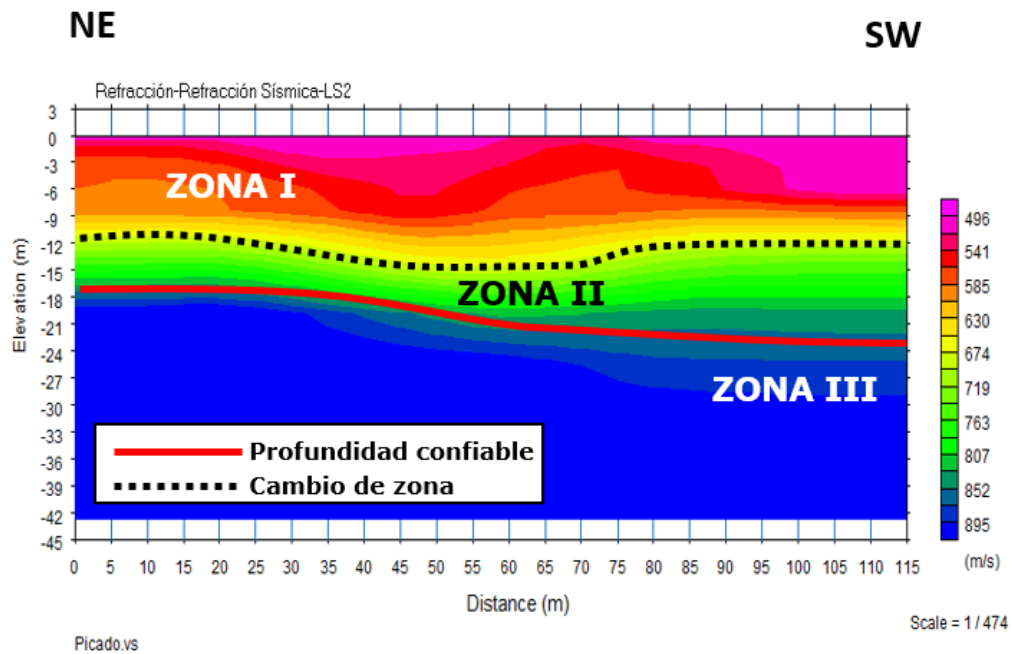
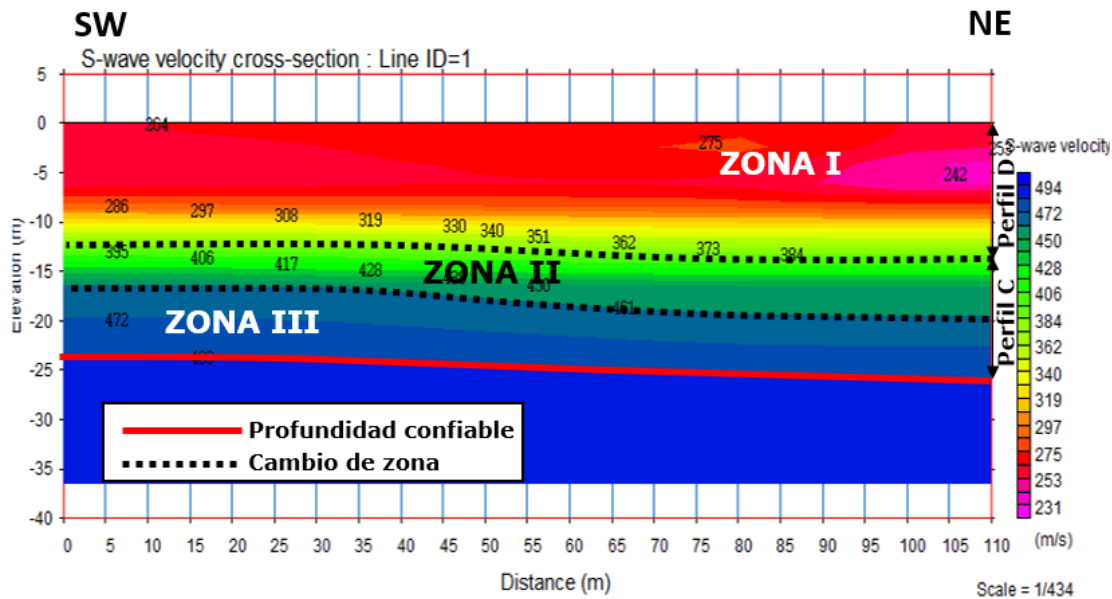


Figura 29.*Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS2*

De acuerdo a los resultados de la tomografía MASW/2D de la línea sísmica LS2, se identifican tres zonas de interés que corresponden a dos tipos de perfiles de suelos, estos fueron clasificados según los parámetros establecidos por la NSR-10. La Zona I está compuesta por materiales de relleno sueltos (espesor 2.0m) y suelos coluviales de consistencia igual o mayor (espesor aproximado 10.0m), los suelos están compuestos por intercalaciones de limos arcilloso arenosos y arcillas limo arenosas con presencia de gravas. Esta zona se correlaciona con un Perfil de suelo Tipo D, con velocidades de onda V_s entre 231.0 a 384.0 m/s y velocidad de onda V_p de 496.0 a 719.0 m/s. La Zona II (Perfil Tipo C), se asocia a suelo coluviales duros, compuestos por limos arcillosos con un espesor de 4.0 a 5.0 m aproximadamente y velocidades de onda V_s de 384.0 a 461.0 m/s y V_p de 719.0 a 852.0 m/s. Por último, la Zona III muestra un perfil de suelo Tipo C (Suelos residuales) que aumenta su consistencia con la profundidad, con velocidades de onda V_s superiores a los 461.0 m/s onda V_p superiores a los 852.0 m/s.

5.6.2.3 Línea sísmica LS-3 (año 2016)

Espaciamiento entre geófonos: 5.0 m

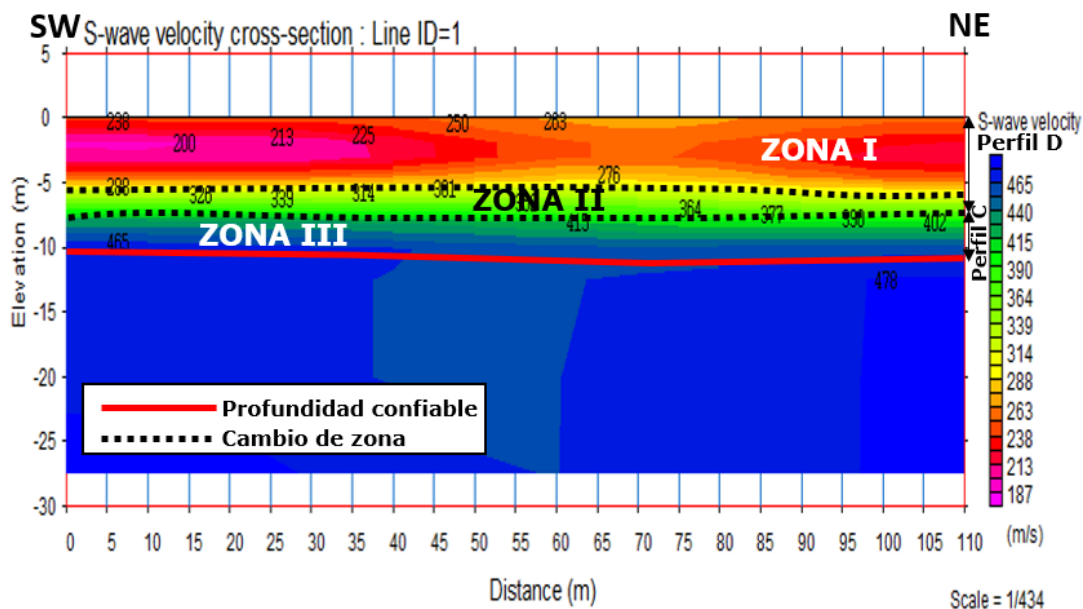
Profundidad investigada: Aproximadamente hasta los 15.0 m.

Terreno: Segunda zona plana a lo largo de la ladera.

Interpretación tomografía MASW/2D

Figura 30.

Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS3



De acuerdo a los resultados de la tomografía MASW/2D de la línea sísmica LS2, se identifican tres zonas de interés que corresponden a dos tipos de perfiles de suelos, estos fueron clasificados según los parámetros establecidos por la NSR-10 y su comportamiento es similar al perfil analizado en la LS2. La Zona I se asocia a una capa inicial de suelos de relleno sueltos (espesor entre 2.0 a 3.0 m) y posteriormente suelos coluviales de igual consistencia (espesor 2.0 a 3.0 m), esta zona se correlaciona a un Perfil de suelo Tipo D, con velocidades de onda V_s entre 187.0 a 300.0 m/s. La

Zona II (Perfil Tipo D), corresponde a suelos coluviales sueltos a muy firmes, con un espesor de 3.0 m aproximadamente y velocidades de onda Vs de 300.0 a 373.0 m/s. Por último, la Zona III muestra un perfil de suelo Tipo C (Suelos coluviales) que aumenta su consistencia con la profundidad, con velocidades de onda Vs superiores a los 373 m/s.

5.6.2.4 Línea sísmica LS-1 (año 2018)

Espaciamiento entre geófonos: 5.0 m

Profundidad investigada: Aproximadamente hasta los 21.0 m.

Terreno: Zona plana costado nororiental.

Interpretación refracción sísmica y tomografía MASW/2D

Figura 31.

Refracción sísmica – Modelo tomografía 2D LS1

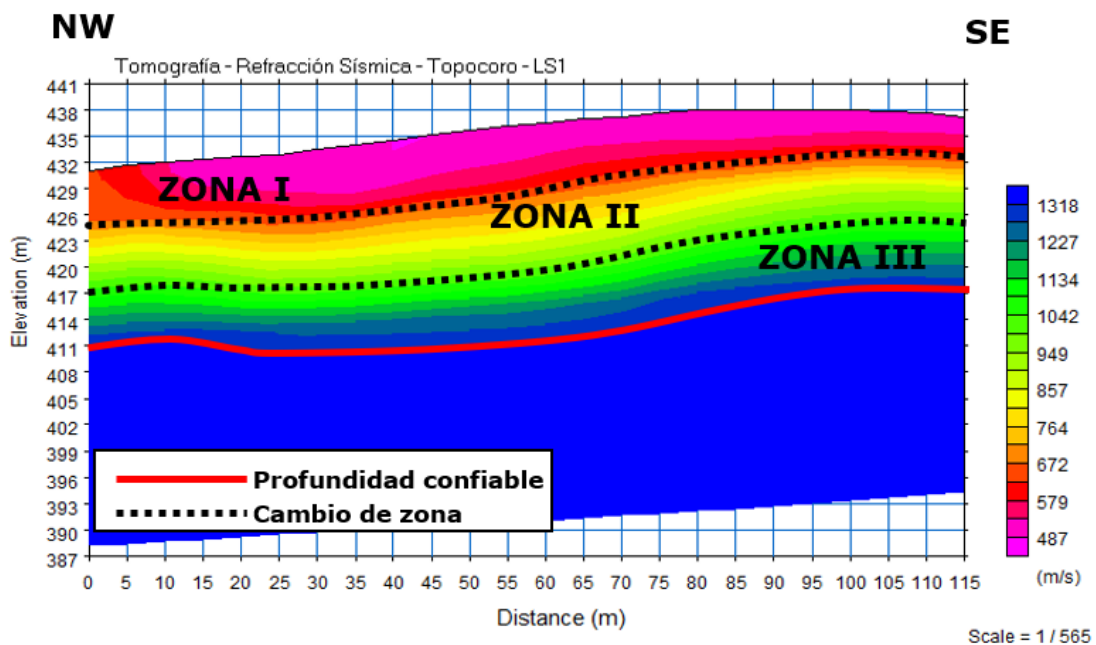
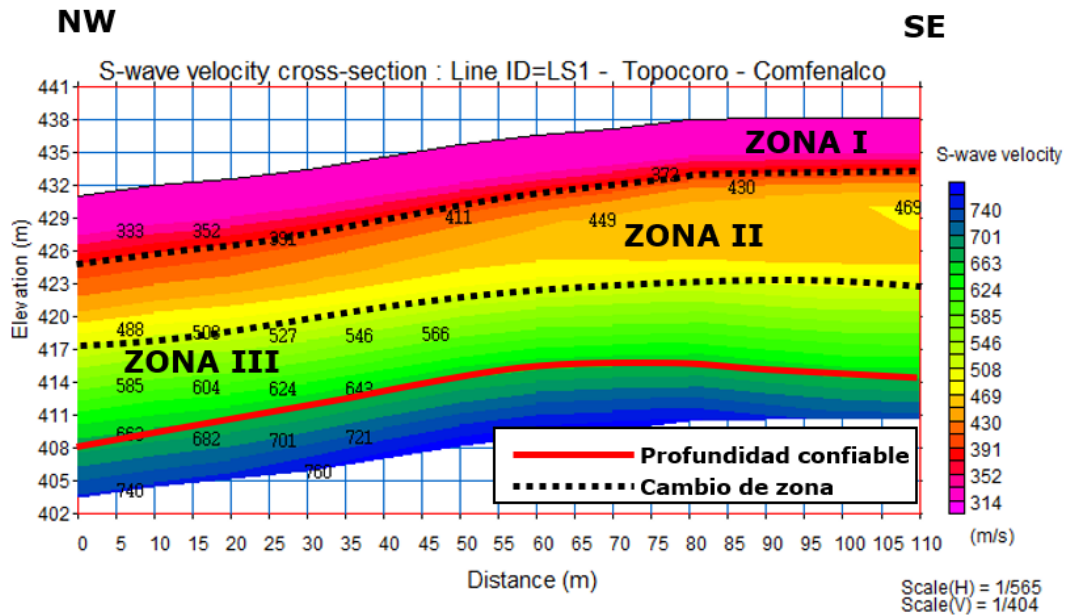


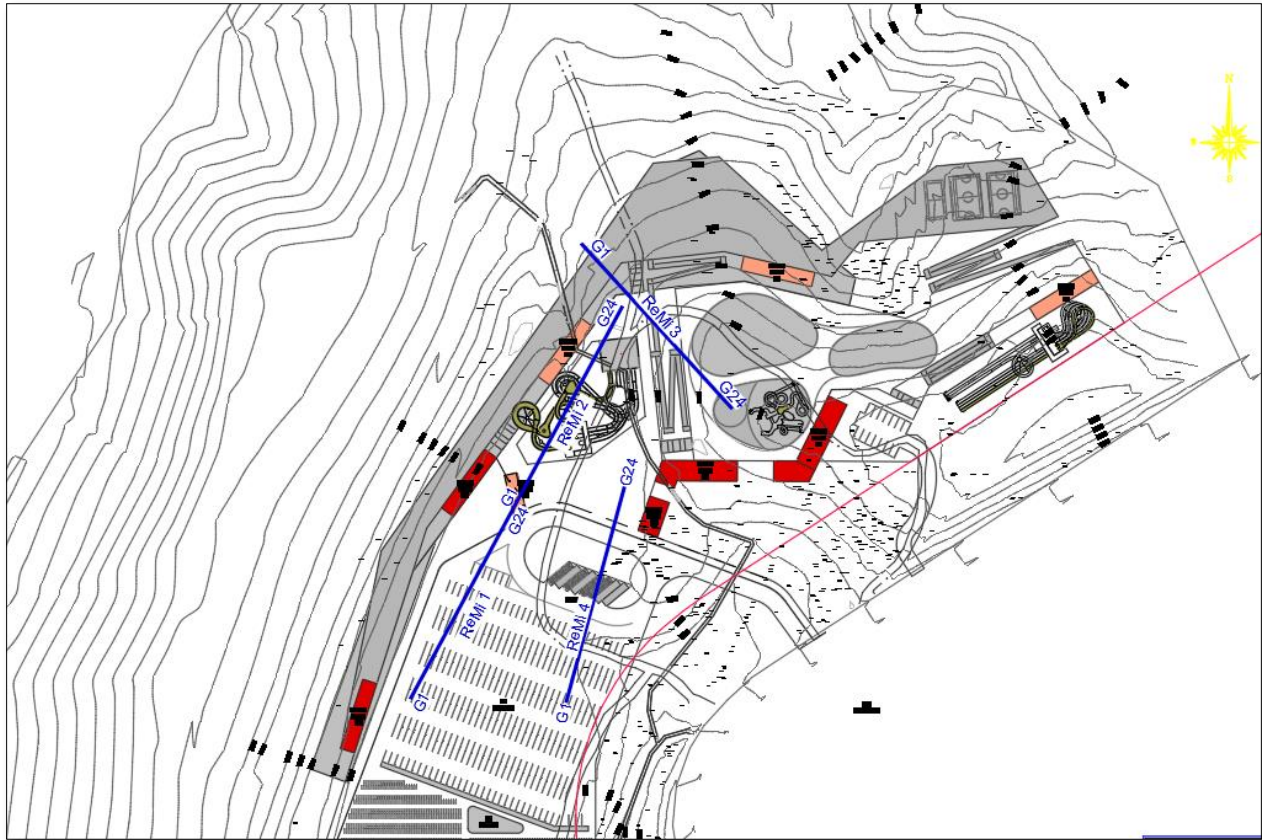
Figura 32.*Ensayo de ondas superficiales MASW/2D LS1*

La Zona I (Perfil de suelo Tipo D), está asociada a suelos residuales de consistencia densa, compuestos superficialmente por limos arenosos y posterior a este manto se encuentran arenas con algo de finos, de color marrón, naranja, con velocidades de onda S (314 a 391 m/s) y onda P (487 a 620 m/s), de espesor variable (4.0 a 6.0 metros), correlacionables con lo encontrado en los sondeos 13, 13A y 14. La Zona II (perfil de suelo Tipo C), compuesta por materiales de disminuyen la granulometría con la profundidad de arenas a limos de color café, con fragmentos o niveles de arenisca, de espesor aproximado de 8.0 a 10.0 metros, de acuerdo a lo observado en el sondeo 4. Por último, la Zona III que subyace a la Zona II, muestra un perfil de suelo Tipo C (MASW2D), asociada a suelos residuales compuestos limos arenosos y de fragmentos de arenisca, de consistencia dura muy dura, con velocidades de onda S superiores a los 509 m/s y velocidades de onda P superiores a los 1134 m/s, de espesor indeterminado.

En la 31 se observa la distribución de las líneas sísmicas sobre el área del proyecto en las campañas exploratorias del año 2021

Figura 33.

Localización de la exploración geotécnica indirecta año 2021. Tomado de IAUS 20979

**Tabla 14.**

Localización y longitud líneas sísmicas ejecutadas (año 2021)

Línea sísmica No.	Coordenadas		Longitud en planta [m]	Profundidad [m]
	Latitud	Longitud		
1	7° 0.348' N	3° 22.026' W	92	30
2	7° 0.380' N	73° 22.010' W	92	30
3	7° 0.413' N	73° 21.964' W	92	30
4	7° 0.361' N	73° 21.975' W	92	30

Se realizaron las Líneas Sísmicas N° 1 y N° 2 en el predio en dirección longitudinal, a una altura de 450,4 m sobre el nivel del mar. El geófono n.º 1 en cada línea, se ubicó al Suroeste y el Geófono No. 24 se ubicó al Noreste del tendido, en las coordenadas ya descritas, con separación entre geófonos de 4 m en cada ReMi y distancia de disparo de 4 m respecto al geófono No.1 y No. 24.

Se superpusieron las dos Líneas ReMi, con el fin de generar un tendido continuo y explorar una longitud aproximada de 184.0 metros lineales, en el área con presencia de rellenos gruesos.

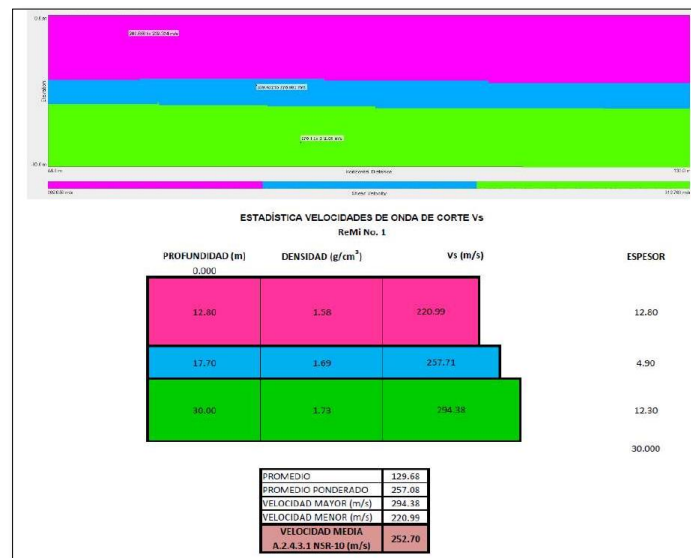
La Línea Sísmica No. 3 se realizó en el predio en sentido transversal, a una altura de 447,4 m sobre el nivel del mar. El geófono No. 1 estaba ubicado en Noroeste y el Geófono No. 24 se ubicó al sureste del tendido, en las coordenadas ya descritas, con una separación entre geófonos de 4 m y distancia de tiros de 4 m con respecto al geófono N° 1 y N° 24. La longitud de La línea ReMi tiene 92 m.

La línea sísmica No.4 se registró longitudinalmente en la propiedad a una altura de 453.7 m sobre el nivel del mar. El geófono #1 estaba ubicado en el noreste y el geófono #24 se ubicaron al suroeste del tendido, en las coordenadas ya descritas, con una distancia entre geófonos de 4 m y una distancia de tiro de 4 m con respecto al geófono #1 y #24. es de 92 metros.

5.6.2.5 Línea ReMi No. 1

Figura 34.

Modelo sismo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.1. Tomado de IAUS 20979

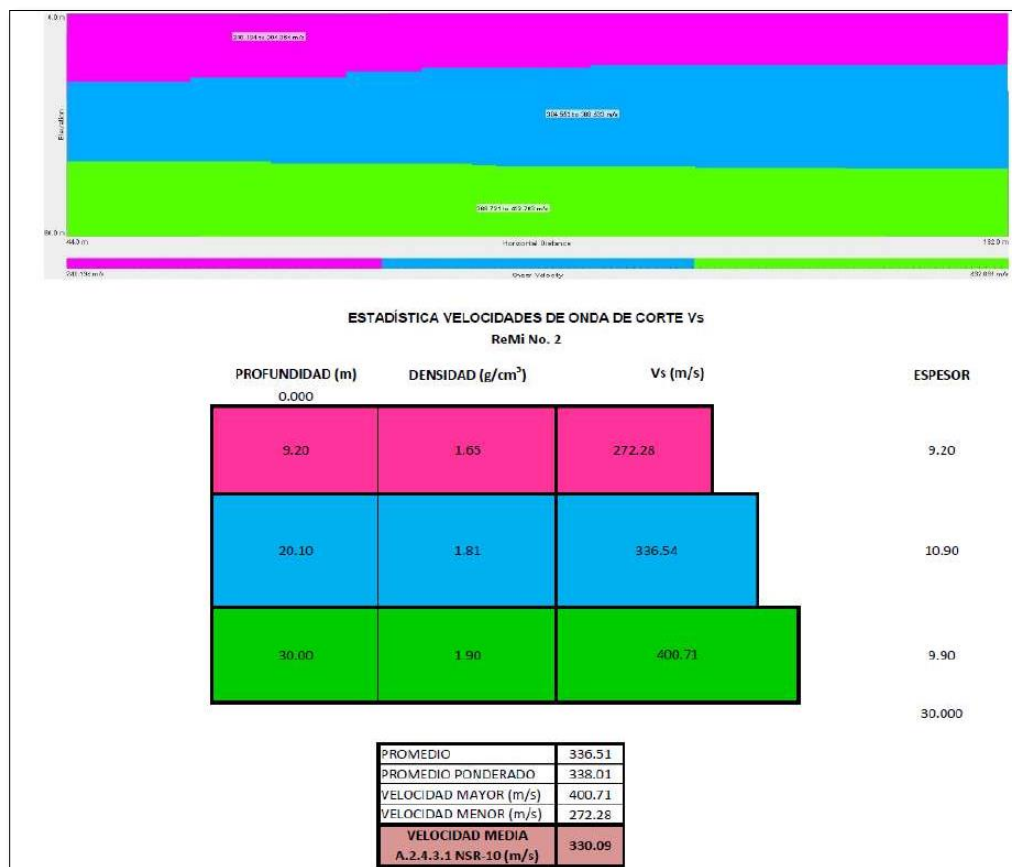


Para la línea sísmica Remi No.1 se captan velocidades de onda Vs de corte con una velocidad promedio de 220.9 m/s variando en profundidades de 12.8 m a 13.4 m. Lugo se encuentran registros de velocidades que varían en un rango de 239.4 m/s a 275 m/s en profundidades que alcanzan los 17.7 m a 18.4 m. Finalmente se toman registros de velocidades de onda de corte con un promedio de 294.4 m/s hasta la profundidad permitida por la configuración de la exploración que es 30 m.

5.6.2.6 Línea ReMi No. 2

Figura 35.

Modelo sismo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.2. Tomado de IAUS 20979

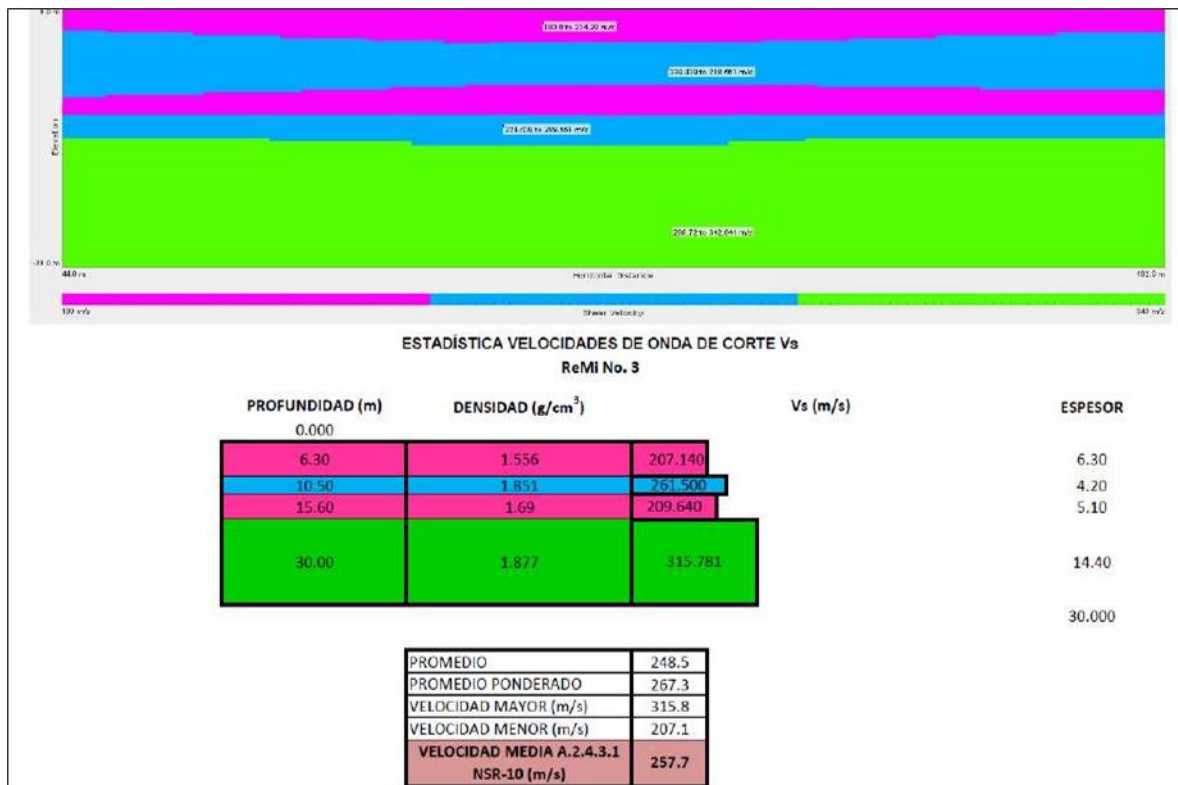


Para la línea sísmica Remi No.2 se captan velocidades de onda Vs de corte con una velocidad promedio de 272.3 m/s variando en profundidades de 7.6 m a 9.2 m. Lugo se encuentran registros de velocidades que varían en un rango de 304.5 m/s a 368.5 m/s en profundidades que alcanzan los 20.1 m a 21.7 m. Finalmente se toman registros de velocidades de onda de corte con un promedio de 400.7 m/s hasta la profundidad permitida por la configuración de la exploración que es 30 m.

5.6.2.7 Línea ReMi No. 3

Figura 36

Modelo sísmo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.3. Tomado de IAUS 20979

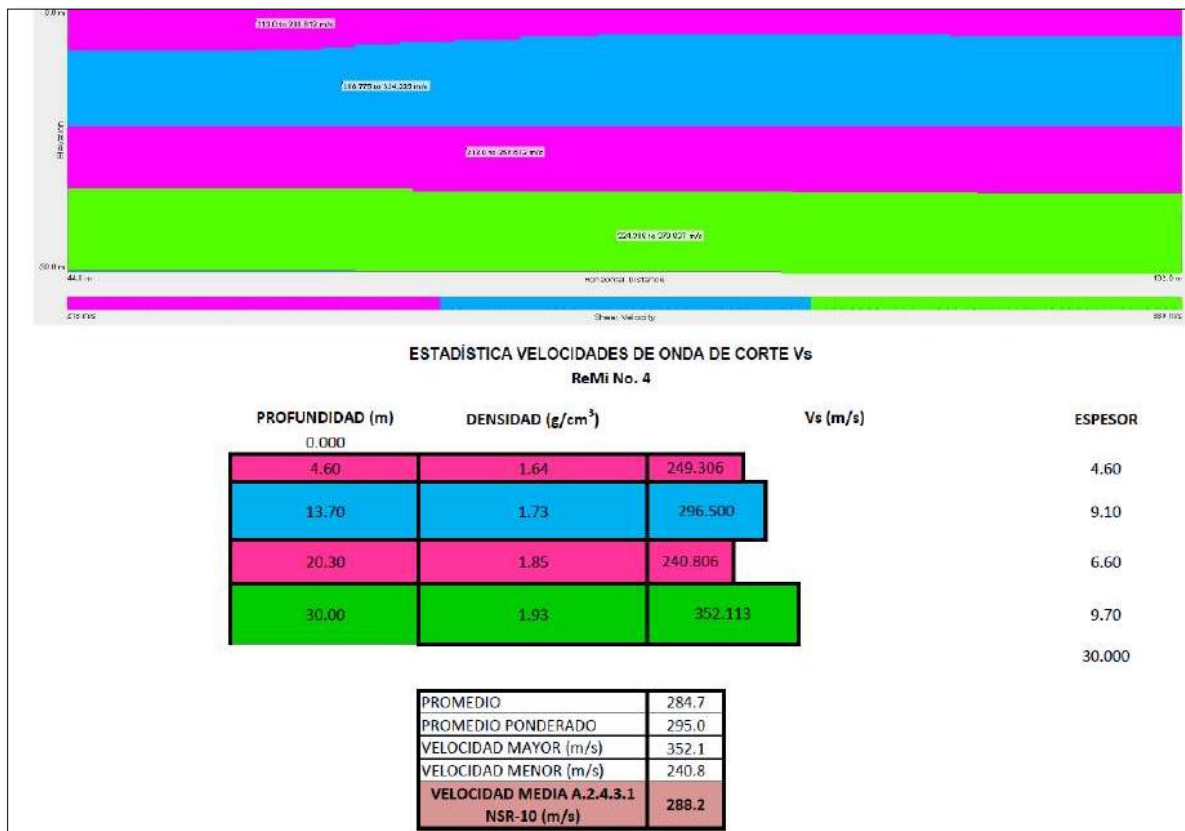


Para la línea sísmica Remi No.3 se captan velocidades de onda Vs de corte con una velocidad promedio de 207.1 m/s variando en profundidades de 2.7 m a 6.3 m. Lugo se encuentran registros de velocidades que varían en un rango de 234.4 m/s a 288.6 m/s en profundidades que alcanzan los 9.8 m a 10.5 m. Luego se toman registros de velocidades de onda de corte con un promedio de 209.6 m/s que oscila entre los 12.3 m y 15.6 m. Finalmente se obtienen velocidades entre los 288.7 m/s y 342.8 m/s con una profundidad de 30.0 m

5.6.2.8 Línea ReMi No.4

Figura 37.

Modelo sísmo – estratigráfico con valores de velocidad Vs, Trazo virtual ReMi No.. Tomado de IAUS 20979



Para la línea sísmica Remi No.4 se captan velocidades de onda Vs de corte con una velocidad promedio de 213.0 m/s variando en profundidades de 2.6 m a 4.6 m. Luego se encuentran registros de velocidades que varían en un rango de 268.8 m/s a 324.2 m/s en profundidades que alcanzan los 13.4 m a 13.7 m. Luego se toman registros de velocidades de onda de corte con un promedio de 240.8 m/s que oscila entre los 20.3 m y 21.2 m. Finalmente se obtienen velocidades entre los 324.4 m/s y 379.8 m/s con una profundidad de 30.0 m

5.7 Resultados ensayos de laboratorio

A las muestras obtenidas se les realizaron ensayos de caracterización y resistencia para definir las propiedades geomecánicas de los diferentes estratos identificados en la exploración directa.

En la

Tabla 15, se relacionan el número de ensayos ejecutados y los resultados obtenidos:

Tabla 15.

Relación de ensayos realizados

Ensayo	Norma
Análisis granulométrico por tamizado	I.N.V.E. 123
Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) en suelo, roca y mezcla de suelo-agregado	I.N.V.E. 122
Determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	I.N.V.E. 125 - 126
Peso Unitario parafinado	Método ISRM-07
Resistencia al corte directo	I.N.V.E. 154 - 13

5.7.1 Ensayos de clasificación

Se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo por medio de tamizado, y al contenido de agua (humedad) por masa del suelo y mezclas presente en dicho material. Igualmente se refiere a la determinación de los límites líquido y

plásticos presentes y del índice de plasticidad de los suelos definidos por Atterberg. El límite líquido muestra el contenido de humedad del suelo, en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados líquido y plástico. El límite plástico determina el contenido de agua del suelo, en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido. Los resultados obtenidos de los ensayos de clasificación se muestran en la

Tabla 16.

Tabla 16.

Resultados ensayos de laboratorio de clasificación exploración 2016 y 2018

Sondeo	Prof. (m)	% W	% Gravas	% Arenas	% Finos	% L.L.	% L.P.	% I.P.	Clasif. S.U.C.S.
S1	3.00 – 4.00	19.12	0.00	3.77	96.23	-	-	-	CL
S1	6.00 – 7.00	15.92	15.23	24.97	59.80	45	25	21	CL
S1	12.00 – 13.00	21.41	14.76	16.12	69.12	47	24	24	CL
S1	17.00-18.00	-	23.56	47.29	29.15	-	-	-	SC
S2	3.00 – 4.00	18.97	0.00	6.17	93.83	44	21	23	CL
S2	6.00 – 7.00	24.08	0.00	3.78	96.22	42	24	18	CL
S2	19.00 – 20.00	-	0.00	84.86	15.14	-	-	-	SC
S2	23.00 – 24.00	27.53	0.00	7.34	92.66	43	23	19	CL
S2	27.00-28.00	-	6.17	41.83	52.00	-	-	-	CL
S3	3.00 – 4.00	15.44	12.39	23.03	64.58	44	23	22	CL
S3	7.00 – 8.00	11.09	2.84	70.78	26.38	-	-	-	SM
S3	11.20 – 12.20	8.47	37.49	42.35	20.16	-	-	-	SM
S3	16.70 – 17.70	14.00	0.00	13.26	86.74	48	27	21	CL
S3	20.70 – 21.70	20.56	17.40	27.35	55.25	49	24	25	CL
S4	3.00 – 4.00	8.09	10.65	62.22	27.13	-	-	-	SM
S4	6.00 – 7.00	10.26	19.52	60.68	19.80	-	-	-	SM
S4	9.00 - 9.80	7.68	46.26	38.81	14.94	-	-	-	GM
S8	4.00 – 5.00	11.55	-	-	-	30.58	17.20	13.38	CL
S10	5.00 – 6.00	-	-	-	-	34.55	18.54	16.01	CL
S12	3.00 – 4.00	-	-	-	-	35.21	18.17	17.04	CL
S14	2.00 – 3.00	-	-	-	-	36.34	19.62	16.72	CL
S16	4.00 – 5.00	-	-	-	-	35.73	22.82	12.91	CL

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Tabla 17.

Resultados ensayos de laboratorio de clasificación exploración 2021

Per. No.	M. No.	PROF (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IL (%)	IC(%)	No. 4	No.200	S.U.C.S
----------	--------	----------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	-------	--------	---------

2	1	0,00 - 0,50	51	21	30	20,3	0	1	79,5	42,3	SC
2	2	0,50 - 1,00	67	24	43	33,4	0,2	0,8	81,3	72,2	CH
2	3	1,00 - 1,50	43	20	23	16,6	-0,1	1,1	97,4	93	CL
2	4	1,50 - 2,00	32	19	13	15,9	-0,2	1,2	80,9	76,2	CL
2	5	2,00 - 2,50	46	16	30	17,9	0,1	0,9	100	24,6	CL
2	6	2,50 - 3,00	47	15	32	20	0,2	0,8	99,8	80,5	CL
2	7	3,00 - 3,50	42	15	27	21,2	0,2	0,8	91,5	80,3	CL
2	8	3,50 - 5,50	-	-	-	-	-	-	-	-	--
2	9	5,50 - 6,00	47	15	32	15,5	0	1	100	84,5	CL
2	11	7,00 - 7,50	44	15	29	16,1	0	1	100	83,2	CL
2	13	11,00 - 11,50	45	16	29	17,2	0	1	99,5	82,8	CL
2	14	13,00 - 13,50	53	19	34	26,9	0,2	0,8	100	90,6	CH
2	15	15,00 - 15,50	43	15	28	16	0	1	100	78,7	CL
3	1	0,00 - 0,50	29	13	16	8,8	-0,3	1,3	100	68,8	CL
3	2	0,50 - 1,00	27	12	15	10,8	-0,1	1,1	100	67,9	CL
3	3	1,00 - 3,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
3	4	3,00 - 3,50	48	15	33	19,7	0,1	0,9	100	85,4	CL
3	7	7,00 - 7,50	58	21	37	26,4	0,1	0,9	-	-	CH

**PROPIEDADES % PASA TAMIZ
ÍNDICE**

Per. No.	M. No.	PROF (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IL (%)	IC(%)	No. 4	No.200	S.U.C.S
3	8	9,00 - 9,50	44	17	27	18,3	0	1	100	93,9	CL
3	9	11,00 - 11,50	49	15	34	18,2	0,1	0,9	100	91,4	CL
3	10	13,00 - 15,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
3	11	15,00 - 15,50	32	13	28	18,8	0,2	0,8	93,7	73,5	CL
3	12	17,00 - 17,50	46	15	31	18,6	0,1	0,9	92,9	78,4	CL
3	13	18,00 - 20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
3	14	20,00 - 22,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
8	1	0,00 - 0,50	41	14	27	7,3	-0,2	1,2	81,3	69,7	CL
8	2	0,50 - 1,00	39	15	24	8,3	-0,3	1,3	92,5	58,9	CL
8	3	1,00 - 1,50	-	-	-	15,7	-	-	62,5	36,7	GC
8	4	1,50 - 2,00	43	13	30	17,1	0,1	0,9	98,9	77	CL
8	5	2,00 - 2,50	41	14	27	17,8	0,1	0,9	96,3	73,3	CL
8	6	2,50 - 3,00	39	13	26	17	0,2	0,8	78,1	57,6	CL
8	8	3,50 - 4,00	40	16	24	23,5	0,3	0,7	99,3	70,5	CL
8	9	4,00 - 4,50	45	16	29	23,9	0,3	0,7	100	76,9	CL
8	10	4,50 - 5,00	46	17	29	28	0,4	0,6	100	86,6	CL
8	11	5,00 - 5,50	-	-	-	26,9	-	-	68,9	48,7	GC
8	12	5,50 - 6,00	37	15	22	22,6	0,3	0,7	100	76,4	CL

**PROPIEDADES % PASA TAMIZ
ÍNDICE**

Per. No.	M. No.	PROF (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IL (%)	IC(%)	No. 4	No.200	S.U.C.S
8	13	6,00 - 6,50	-	-	-	23,7	-	-	82	54,2	--
8	14	6,50 - 7,00	46	16	30	21	0,2	0,8	98,9	77,8	CL
8	15	7,00 - 7,50	45	17	28	18,7	0,1	0,9	100	87,3	CL
8	16	7,50 - 8,00	44	17	27	24,4	0,3	0,7	-	-	CL
8	17	8,00 - 8,50	-	-	-	19,5	-	-	100	85,6	--
8	18	8,50 - 9,00	-	-	-	19,4	-	-	76,7	65,2	--
8	20	9,50 - 10,00	40	15	25	20,8	0,2	0,8	100	78,2	CL
8	21	10,00 - 10,50	-	-	-	22,2	-	-	100	88,8	--
8	22	10,50 - 11,00	49	17	32	26,9	0,3	0,7	100	90,5	CL
8	23	11,00 - 11,50	37	14	23	19,7	0,2	0,8	100	82,9	CL
8	24	11,50 - 12,00	44	15	29	24,8	0,3	0,7	100	91,1	CL
8	25	12,00 - 12,50	47	16	31	19,8	0,1	0,9	100	83,8	CL

8	26	12,50 - 13,00	49	15	34	19,1	0,1	0,9	100	84,8	CL
8	27	13,00 - 13,50	46	17	29	19	0,1	0,9	100	72,6	CL
8	28	15,00 - 15,50	41	14	27	16,9	0,1	0,9	100	74,5	CL
8	29	16,00 - 18,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
8	30	18,00 - 20,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
9	1	0,00 - 0,50	35	14	21	10,9	-0,1	1,1	97,5	57,8	CL

**PROPIEDADES % PASA TAMIZ
ÍNDICE**

Per. No.	M. No.	PROF (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IL (%)	IC(%)	No. 4	No.200	S.U.C.S
9	2	0,50 - 1,00	32	14	18	9,7	-0,2	1,2	100	53,4	CL
9	3	1,00 - 1,50	-	-	-	10,1	-	-	73,7	19,1	SC
9	4	2,00 - 4,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
9	5	4,00 - 6,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
9	6	6,50 - 7,00	38	19	19	22,3	0,2	0,8	84,8	54,3	CL
9	7	9,00 - 9,70	-	-	-	18,9	-	-	56,4	18,8	GC
9	8	10,50 - 12,50	-	-	-	-	-	-	-	-	--
9	9	12,50 - 14,50	-	-	-	-	-	-	-	-	--
10	1	0,00 - 0,50	49	18	31	17,9	0	1	-	-	CL
10	2	0,50 - 1,00	47	16	31	20,3	0,1	0,9	-	-	CL
10	4	1,50 - 2,00	55	20	35	23,2	0,1	0,9	-	-	CH
10	5	2,00 - 2,50	40	14	26	23,1	0,4	0,6	85,9	72,3	CL
10	6	2,50 - 3,00	40	13	27	21,4	0,3	0,7	92	74,3	CL
10	7	3,00 - 3,50	-	-	-	24,1	-	-	100	87,8	--
10	8	3,50 - 4,00	43	14	29	20,9	0,2	0,8	96,7	78,4	CL
10	9	4,00 - 4,50	50	19	31	22	0,1	0,9	99,6	86,5	CL
10	10	4,50 - 5,00	-	-	-	18,1	-	-	95,6	75,2	--
10	12	5,50 - 6,00	43	13	30	19,8	0,2	0,8	94,4	78,2	CL
10	13	6,00 - 6,50	-	-	-	15,4	-	-	100	50,7	--
10	14	6,50 - 7,00	36	13	23	18,1	0,2	0,8	99,2	60,9	CL
10	15	7,00 - 7,50	41	14	27	23,6	0,4	0,6	100	81,6	CL
10	16	7,50 - 8,00	41	14	27	19,7	0,2	0,8	99,5	73,9	CL
10	17	8,00 - 8,50	41	14	27	20,2	0,2	0,8	100	75	CL
10	18	8,50 - 9,00	50	19	31	24,3	0,2	0,8	100	86,9	CH
10	20	9,50 - 10,00	24	10	14	15,3	0,4	0,6	100	70,4	CL
10	21	10,00 - 10,50	23	9	14	15	0,4	0,6	100	71,2	CL

**PROPIEDADES % PASA TAMIZ
ÍNDICE**

Per. No.	M. No.	PROF (m)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Wn (%)	IL (%)	IC(%)	No. 4	No.200	S.U.C.S
10	22	10,50 - 11,00	23	9	14	14,3	0,4	0,6	100	72,8	CL
10	23	11,00 - 11,50	26	11	15	15,5	0,3	0,7	100	76,5	CL
10	24	13,00 - 13,50	32	13	19	18,6	0,3	0,7	97,8	42	SC
10	25	15,00 - 15,50	39	14	25	20,5	0,3	0,7	92,3	48,6	SC
10	26	17,00 - 17,50	-	-	-	18,4	-	-	71,1	36	SC
10	27	18,50 - 20,50	-	-	-	-	-	-	-	-	--
11	1	0,00 - 0,50	46	16	30	18,2	0,1	0,9	-	-	CL
11	2	0,50 - 1,00	57	21	36	24,9	0,1	0,9	-	-	CH
11	3	1,00 - 1,50	45	15	30	18,6	0,1	0,9	82,6	55,5	CL
11	4	1,60 - 3,50	-	-	-	-	-	-	-	-	--
11	5	3,50 - 4,00	-	-	-	16,5	-	-	82,3	29,8	SC
11	6	5,00 - 5,50	41	16	25	27,2	0,4	0,5	96,6	57,3	CL
11	7	6,00 - 8,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
11	8	8,00 - 10,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--
11	9	10,00 - 12,00	-	-	-	-	-	-	-	-	--

Nota: Tomada de IAUS-20979

5.7.2 Ensayos de peso unitario

Hace referencia a la relación entre el peso por unidad de volumen de la muestra, se puede tomar el peso para suelo en condiciones de humedad natural o condiciones secas mediante horno (ASTM D 2937-71) o por método parafinado (ISRM-07). En la

Tabla 18 se observan los resultados de peso unitario obtenidos.

Tabla 18.

Resultados ensayos peso unitario exploración 2016 y 2018

Sondeo	Profundidad (m)	Peso Unitario Seco (g/cm³)	Peso Unitario Húmedo (g/cm³)
S1	7.00 – 8.00	1.75	2.01
S1	8.00 - 9.00	1.35	1.66
S1	19.00 – 20.00	1.34	1.72
S2	7.00 – 8.00	1.54	1.77
S2	8.00 – 9.00	1.65	1.79
S3	3.00 – 4.00	1.48	1.71
S3	9.00 – 10.00	1.54	1.68
S4	4.00 – 5.00	1.65	1.77
S8	4.00 – 5.00	1.55	1.73
S10	5.00 – 6.00	1.80	2.08

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Tabla 19.

Resultados ensayos peso unitario exploración 2021

Perforación	Profundidad	SUCS	Peso Unitario [gr/cm³]
S1	0 - 0,5	CL	1,931
S2	3 - 3,5	CL	2,142
S5	3 - 3,5	CL	1,254
S5	4,5 - 6,5	CL	2,14
S5	10 - 11,5	CL	2,13

S7	0 - 2	CL	2,306
S7	5,5 - 6	CL	2,11
S7	15 - 15,5	CL	1,59

Fuente propia

5.7.3 Ensayos de corte directo

Permite determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo para ciertas condiciones de consolidación y agua; la prueba se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de corte determinado por la configuración del aparato de ensayo. Los resultados se pueden ver afectados por la presencia de partículas de suelo grueso o fragmentos de roca, o ambos. Los resultados de los cortes directos realizados se pueden observar en la Tabla 20. Los ensayos se realizaron en condiciones consolidadas no drenadas (CU) de acuerdo a las características de composición de los materiales.

Tabla 20.

Resultados ensayos de corte directo exploración 2016 y 2018

Sondeo	Tipo de Suelo	Profundidad (m)	Ángulo de Fricción (°)	Cohesión (Kg/cm ²)
S1	Coluvial	8.00 – 9.00	17.441	0.727
S1	Residual	19.00 – 20.00	33.109	0.329
S2	Residual	7.00 – 8.00	22.525	0.624
S3	Coluvial	4.00 – 5.00	19.954	0.908
S3	Residual	9.00 – 10.00	26.779	0.412
S4	Residual	4.00 – 5.00	24.531	0.390

Nota: Tomada de G.T. S.A.S.

Tabla 21.

Resultados ensayos de corte directo exploración 2021

Perforación	Profundidad	SUCS	Cohesión [kPa]	Fricción [°]
S1	0 - 0,5	CL	26	12,84
S2	3 - 3,5	CL	42	19,23
S5	3 - 3,5	CL	14	22,19

S5	4,5 - 6,5	CL	52	17,17
S5	10 - 11,5	CL	61	16,76
S7	0 - 2	CL	52	62,35
S7	5,5 - 6	CL	144	10,28
S7	15 - 15,5	CL	8	17,12

Estos resultados de gran variabilidad se dan debido a que los ensayos de corte fueron realizados con muestras remoldeadas de los diferentes tipos de suelo que conforman el relleno antrópico.

5.8 Propiedades de los suelos

El comportamiento de los suelos en la zona de estudio está definido por cuatro zonas que poseen comportamiento geotécnico similar, relacionadas en función a las características geológicas y geomorfológicas.

En el área de estudio se identificaron cuatro tipos de suelo, descritos así:

Tipo 1 - Suelo de relleno, de consistencia medio firme a firme, formada por limos arenosos y con algo de gravas. Con espesor variable entre 0.5 a 13 metros. Se identifica un adecuado proceso durante la construcción y sin evidencias de deterioro por humedad o presencia de grietas, asentamientos o fisuras.

Tipo 2 - Suelo coluvial o residual, de consistencia variable firme a muy firme, formada por arcillas arenosas y algo de limos principalmente. Con espesor variable entre 3.5 y 14.0 metros. Estos depósitos son atípicos a los de la zona, ya que presentan una buena composición, moderada humedad y buena consistencia.

Tipo 3 - Intercalaciones de Areniscas de grano fino y Shales calcáreo con suelo residual formado por arenas arcillosas y limosas, pertenecientes a la Formación Umir de profundidad variable, entre 10.0 y 17.0 metros. La roca presenta una alta influencia del tectonismo de la zona con alto grado de meteorización y fracturamiento.

A continuación, se relacionan las propiedades seleccionadas de cada uno de los tipos de suelos para la realización de modelaciones de acuerdo a los resultados de las exploraciones, resultados de ensayos de laboratorio y estadística aplicada a estos resultados:

Se determina que no es fiable analizar los resultados obtenidos de los ensayos de SPT, pues en el predio se identificó que este tendría variaciones significativas debido a la conformación del relleno, ya que no cuenta con un registro de cómo fue realizado y la proveniencia de los materiales, lo que muestra una gran variación de N en los mismos estratos de materiales.

Tabla 22.

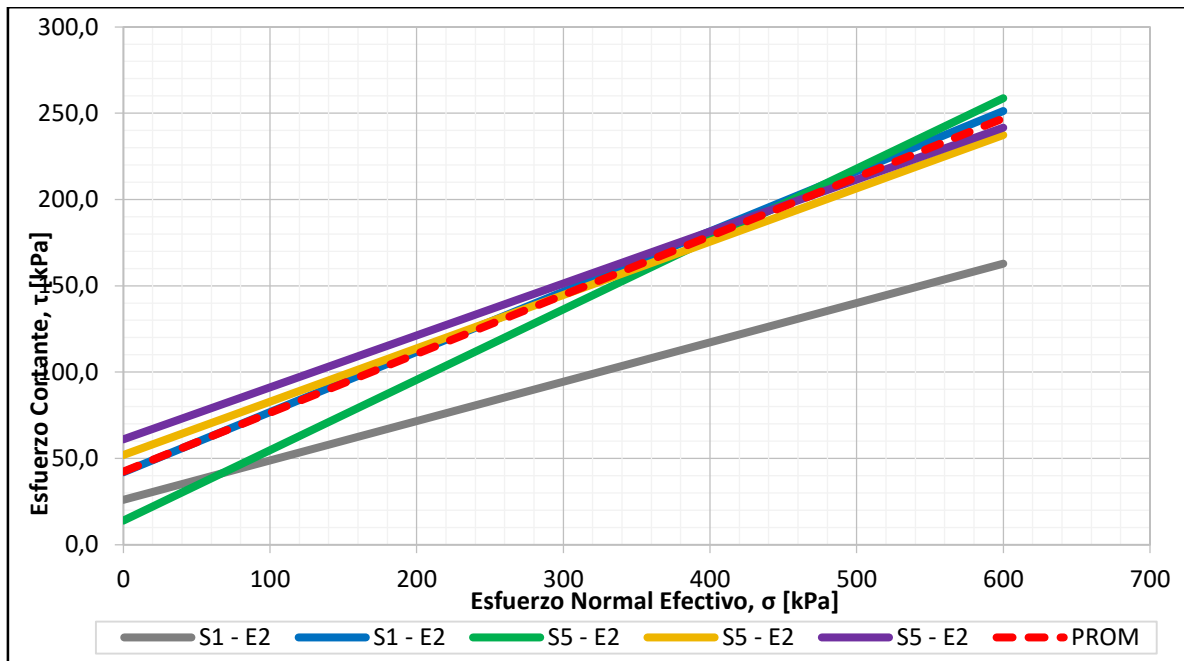
Resultados de ensayos de laboratorio para material de relleno

<i>Perforación</i>	<i>Profundidad</i>	<i>SUCS</i>	<i>Peso Unitario [gr/cm³]</i>	<i>Cohesión [kPa]</i>	<i>Fricción [°]</i>	<i>Formación</i>
S1 - E2	0 - 0,5	CL	1,931	26	12,84	Relleno
S1 - E2	3 - 3,5	CL	2,142	42	19,23	Relleno
S5 - E2	3 - 3,5	CL	1,254	14	22,19	Relleno
S5 - E2	4,5 - 6,5	CL	2,14	52	17,17	Relleno
S5 - E2	10 - 11,5	CL	2,13	61	16,76	Relleno
S7 - E2	0 - 2	CL	2,306	52	62,35	Relleno
<i>Promedio</i>			1,98	42,25	18,84	
<i>Desviación estándar</i>			0,38	20,37	2,48	
<i>Variación</i>			19%	48%	13%	

Se analizan los resultados obtenidos en los laboratorios referentes al estrato denominado relleno donde se realiza el análisis gráfico de los resultados obtenidos y se determina eliminar el primer y último registro de la tabla, luego de esto se busca una línea de tendencia de los resultados en un gráfico de esfuerzo efectivo vs esfuerzo cortante y se usan los valores promedio para determinar las propiedades del material.

Figura 38.

Grafico Esfuerzo normal efectivo vs esfuerzo cortante estrato relleno

**Tabla 23**

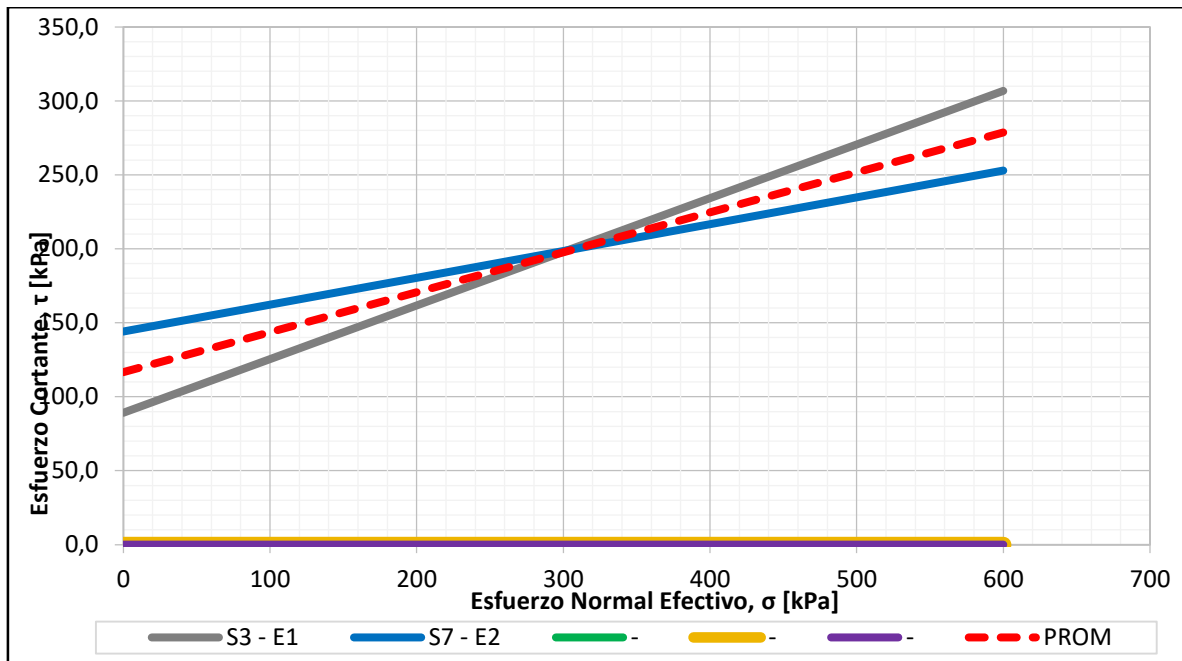
Resultados de ensayos de laboratorio para material coluvial

<i>Perforación</i>	<i>Profundidad</i>	<i>SUCS</i>	<i>Peso Unitario [gr/cm³]</i>	<i>Cohesión [kPa]</i>	<i>Fricción [°]</i>	<i>Formación</i>
S3 - E1	4 -5	CL*	1,71	89,04	19,95	Coluvial
S7 - E2	5,5 - 6	CL	2,11	144	10,28	Coluvial
<i>Promedio</i>			1,91	116,52	15,12	
<i>Desviación estándar</i>			0,28	38,86	6,84	
<i>Variación</i>			15%	33%	45%	

En los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorios se obtuvo un promedio para el material de origen coluvial, de igual manera se realiza el análisis gráfico de los resultados para la determinación de los parámetros a usar en los análisis de estabilidad.

Figura 39

Grafico Esfuerzo normal efectivo vs esfuerzo cortante estrato de material coluvial

**Tabla 24.**

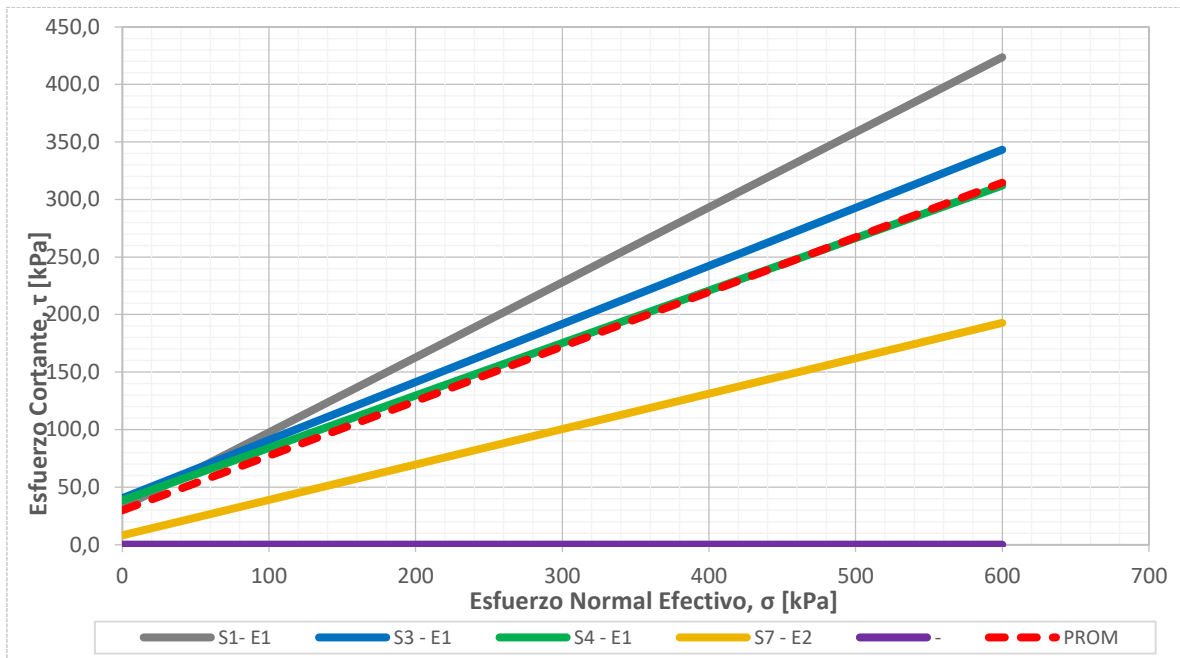
Resultados de ensayos de laboratorio para material residual

<i>Perforación</i>	<i>Profundidad</i>	<i>SUCS</i>	<i>Peso Unitario [gr/cm³]</i>	<i>Cohesión [kPa]</i>	<i>Fricción [°]</i>	<i>Formación</i>
S1 - E1	19 - 20	SC*	1,72	32,26	33,11	Residual
S3 - E1	9 - 10	SM*	1,68	40,4	26,78	Residual
S4 - E1	4 - 5	SM*	1,77	38,28	24,53	Residual
S7 - E2	15 - 15,5	CL	1,59	8	17,12	Residual
Promedio			1,69	29,74	25,39	
Desviación estándar			0,08	14,89	6,60	
Variación			5%	50%	26%	

En los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorios se obtuvo un promedio para el material residual, de igual manera se realiza el análisis gráfico de los resultados para la determinación de los parámetros a usar en los análisis de estabilidad.

Figura 40.

Grafico Esfuerzo normal efectivo vs esfuerzo cortante estrato residual a roca

**Tabla 25.**

Propiedades finales de los suelos

Tipo de suelo	Peso unitario (KN/m ³)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (KN/m ²)
Tipo 1 (Relleno)	19.8	18.84	42.25
Tipo 2 (Coluvial)	19.1	15.12	116.52
Tipo 3 (Intercalaciones de suelo residual y roca fracturada)	16.9	25.39	29.74

5.9 Perfil del suelo

De acuerdo a la NSR-10 (Tabla A.2.4-1) el tipo y perfil de suelo típico del proyecto a partir de la profundidad de suelo competente es D, en el área de estudio se identificó perfil de suelo tipo D y C, sin embargo, debido al cambio de rigidez en el suelo trabajará un perfil de suelo tipo D y teniendo en cuenta que gran parte del proyecto los niveles de cimentación se encontraran a nivel

del depósito coluvial. No es necesario llevar las cargas del proyecto a nivel de roca debido a que estas no son altas (se requerirían cimientos mucho más profundos en varios casos).

En conclusión, se recomienda trabajar con suelo Tipo D cumpliendo con el criterio de $50 \geq \bar{N} \geq 15$ o $360 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$.

Donde \bar{N} = número medio de golpes del ensayo de penetración estándar realizado de acuerdo a la norma ASTM D1586 haciendo corrección por energía N60.

Tabla 26.

Clasificación de los Perfiles de Suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{V}_s \geq 1500 \text{ m/s}$
B	Perfil de roca de rigidez media	$1500 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 760 \text{ m/s}$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$760 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 360 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$360 \text{ m/s} > \bar{V}_s \geq 180 \text{ m/s}$
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o $100 \text{ kPa} (\approx 1 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u \geq 50 \text{ kPa} (\approx 0.5 \text{ kgf/cm}^2)$
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	$180 \text{ m/s} > \bar{V}_s$
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ $50 \text{ kPa} (\approx 0.50 \text{ kgf/cm}^2) > \bar{s}_u$
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F_1 — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F_2 — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas ($H > 3 \text{ m}$ para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F_3 — Arcillas de muy alta plasticidad ($H > 7.5 \text{ m}$ con Índice de Plasticidad $IP > 75$) F_4 — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda ($H > 36 \text{ m}$)	

Nota: Tomada de NSR-10 TABLA A.2.4-1.

5.10 Análisis de flujo

5.10.1 Curvas IDF

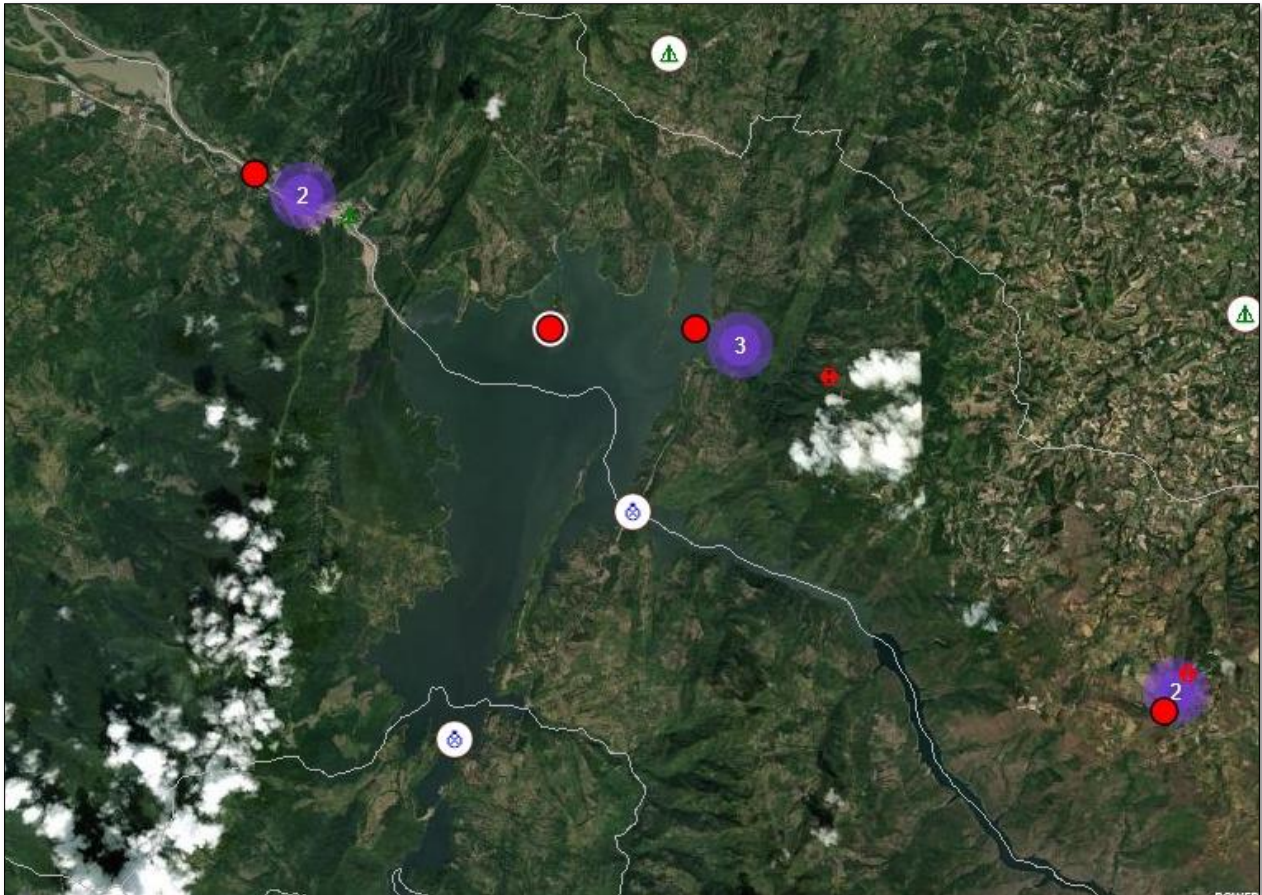
A la hora de planificar sistemas de drenaje y estructuras hidráulicas, es importante conocer el comportamiento hidrológico de la zona. En áreas donde no se dispone de registros de escorrentía, estos deben determinarse utilizando modelos hidrológicos lluvia-escorrentía.

En estos modelos es necesario especificar la profundidad de precipitación máxima que se puede esperar con un período de iteración dado. Al analizar esta información, es posible determinar la cantidad máxima de agua que se necesita evacuar en un período de tiempo determinado. A partir de ahí, se obtiene el borrador del flujo de trabajo. En general, las áreas para las que no se dispone de información histórica de escorrentía son pequeñas cuencas o subcuencas donde el tiempo de concentración es relativamente corto. Por lo general, estos eventos duran menos de 24 horas, siendo las primeras 3 horas las más importantes. Las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) sintetizan el comportamiento de la precipitación de un área. Con estas curvas se puede conocer la intensidad máxima de precipitación que se espera tener durante determinada duración de lluvia, en un evento que en promedio ocurriría cada cierto número de años.

En este caso se utiliza el método de curvas IDF dado que no se cuenta con registros pluviográficos que permitan determinar una duración típica de las tormentas más intensas registradas en las estaciones cercanas al lugar del proyecto. Los métodos utilizados para realizar el cálculo de curvas IDF fueron planteados especialmente para Colombia por Diaz-Granados con base a datos pluviométricos, resultado de un proceso estadístico de regionalización de curvas de duración-intensidad-frecuencia (Vargas y Granados,1998).

Figura 41.

Estaciones meteorológicas cercanas al sitio del proyecto. Fuente IDEAM



Se realizó la búsqueda de las estaciones cercanas al lugar del proyecto y una vez identificadas se descargaron los registros pluviométricos de precipitación diaria dada en mm/día. Una vez descargados se realizó la revisión del rango de tiempo de los registros buscando que estos se encontraran en un rango mayor a 15 años. Una vez filtrada la información se obtuvo la información principal de la base el pantano con un registro de 20 años.

Para generar las curvas idf es necesario procesar los datos pluviométricos de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$I = a * \frac{T^b}{t^c} * M^d * N^e * PT^f$$

Donde I es la intensidad media en mm/h, T es el tiempo de retorno en años, t la duración en horas. M el valor máximo promedio de precipitación diaria, N el numero promedio de días con lluvia al año, PT la precipitación media anual y a,b,c,d,e,f son coeficientes dependiendo de la región donde se ubica el proyecto.

Tabla 27.

Media anual multianual de la estación El Pantano

AÑO	MEDIA ANUAL
2001	2,46
2002	2,21
2003	3,15
2004	2,73
2005	3,75
2006	1,58
2007	0,74
2008	1,20
2009	0,38
2010	0,72
2011	1,73
2012	0,46
2013	1,01
2014	2,38
2015	2,07
2016	2,89
2017	2,52
2018	2,01
2019	2,68
2020	2,14
2021	1,89
PT	1,94

Tabla 28

Días con lluvia al año estación El Pantano

AÑO	NUMERO DE DIAS
2001	365
2002	365
2003	343
2004	356
2005	365
2006	319
2007	291
2008	332

AÑO	NUMERO DE DIAS
2009	309
2010	232
2011	283
2012	174
2013	186
2014	365
2015	365
2016	366
2017	365
2018	365
2019	364
2020	362
2021	169
N	316

Tabla 29

Promedio máximo precipitación anual estación El Pantano

AÑO	MAXIMA PRECIPITACION
2001	65
2002	70
2003	78
2004	67
2005	132
2006	48
2007	60
2008	35
2009	60
2010	43
2011	90
2012	27
2013	39
2014	71
2015	58
2016	100
2017	64
2018	60
2019	81
2020	40
2021	35
M	63

Tabla 30

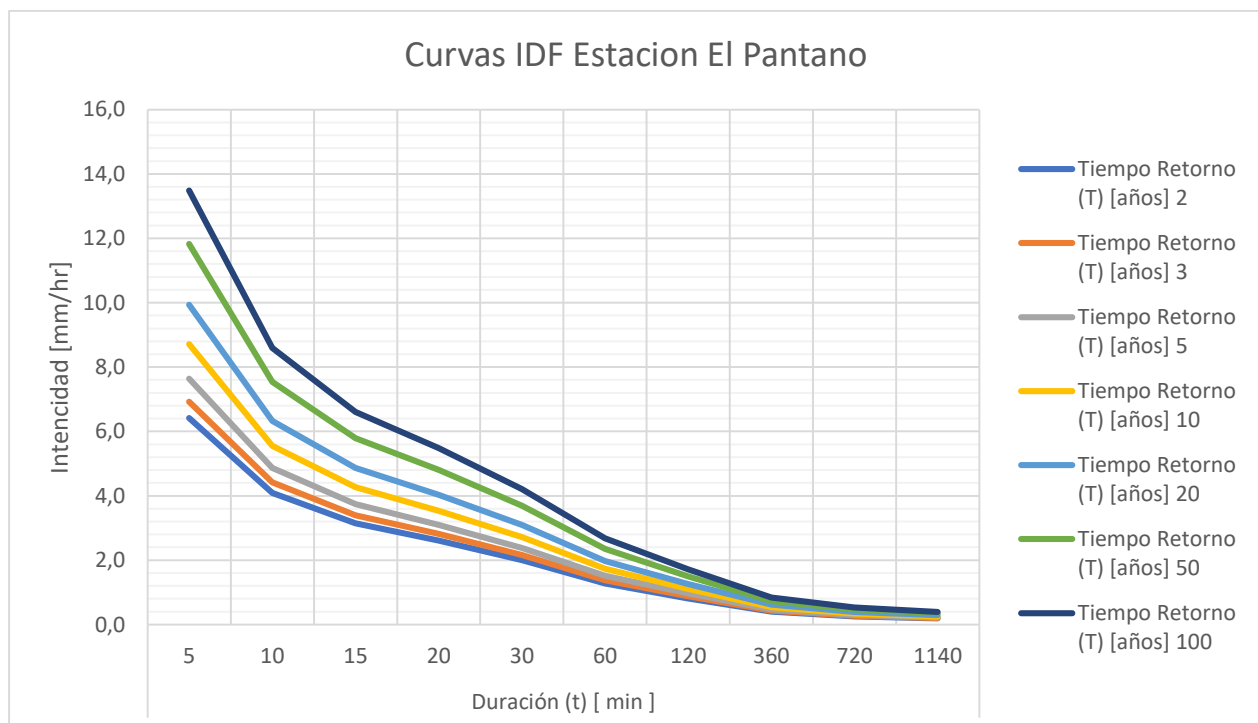
Valores de coeficientes para la región andina

Valores de coeficientes					
a	b	c	d	e	f
1,61	0,19	0,65	0,75	-0,15	0,08

Fuente de datos Vargas – Granados 1998

Tabla 31.*Intensidad media estación El Pantano [mm/hr]*

(Tiempo Retorno T) [años]	Duración (t) [min]									
	5	10	15	20	30	60	120	360	720	1140
2	6,4	4,1	3,1	2,6	2,0	1,3	0,8	0,4	0,3	0,2
3	6,9	4,4	3,4	2,8	2,2	1,4	0,9	0,4	0,3	0,2
5	7,6	4,9	3,7	3,1	2,4	1,5	1,0	0,5	0,3	0,2
10	8,7	5,6	4,3	3,5	2,7	1,7	1,1	0,5	0,3	0,3
20	9,9	6,3	4,9	4,0	3,1	2,0	1,3	0,6	0,4	0,3
50	11,8	7,5	5,8	4,8	3,7	2,4	1,5	0,7	0,5	0,3
100	13,5	8,6	6,6	5,5	4,2	2,7	1,7	0,8	0,5	0,4

Figura 42 *Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia estación el Pantano*

5.10.2 Permeabilidad de los suelos

Tabla 32*Coefficiente de Permeabilidad del Suelo*

Coeficiente de Permeabilidad del Suelo (K)				
<i>K</i> (m/s)	Tipo de Suelo	Permeabilidad	<i>K</i> (m/s)	<i>K</i> (m/día)
1	Grava Limpia	Rápida	1	86400

Coeficiente de Permeabilidad del Suelo (K)				
K (m/s)	Tipo de Suelo	Permeabilidad	K (m/s)	K (m/día)
1,E-01			1,E-01	8640
1,E-02			1,E-02	864
1,E-03			1,E-03	86,4
1,E-04	Arenas Limpias, Arena limpia y mezclas de grava		1,E-04	8,64
1,E-05			1,E-05	0,864
1,E-06	Arenas muy finas, Limos orgánicos e inorgánicos,		1,E-06	0,086
1,E-07		Moderada	1,E-07	9,E-03
1,E-08	Mezclas de arena, limo y arcilla, Depósitos		1,E-08	9,E-04
1,E-09	estratificados de arcilla		1,E-09	9,E-05
1,E-10	Suelos impermeables, arcillas homogéneas por debajo de la zona de meteorización	Lenta	1,E-10	9,E-06
1,E-11			1,E-11	9,E-07
1,E-12			1,E-12	9,E-08

Para realizar el análisis de flujo es necesario conocer el coeficiente de permeabilidad de los suelos para el modelo de elementos finitos a usar, de acuerdo a la caracterización de los suelos y con base a la tabla anterior (Tabla 32 Coeficiente de Permeabilidad del Suelo) se establecieron los siguientes valores.

Tabla 33.

Características hidráulicas del suelo

Tipo de suelo	Coeficiente Permeabilidad (m/s)
Tipo 1 (Relleno)	1,E-03
Tipo 2 (Coluvial)	1,E-05
Tipo 3 (Intercalaciones de suelo residual y roca fracturada)	1,E-08

5.10.3 Secciones de análisis

Sobre el área del proyecto se realizó un levantamiento topográfico detallado con curvas cada metro, se evidencia en la parte superior una zona plana con algunas ondulaciones en el costado norte, luego hacia el costado occidental se genera una ladera de pendiente fuerte que termina en la cota de inundación del embalse. Se definieron cuatro secciones de análisis (perfiles) ubicados de acuerdo a la localización de exploración geotécnica directa y a las estructuras del proyecto; como

se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** En esta se presenta la ubicación de los perfiles topográficos a analizar:

Figura 43.

Perfiles de análisis



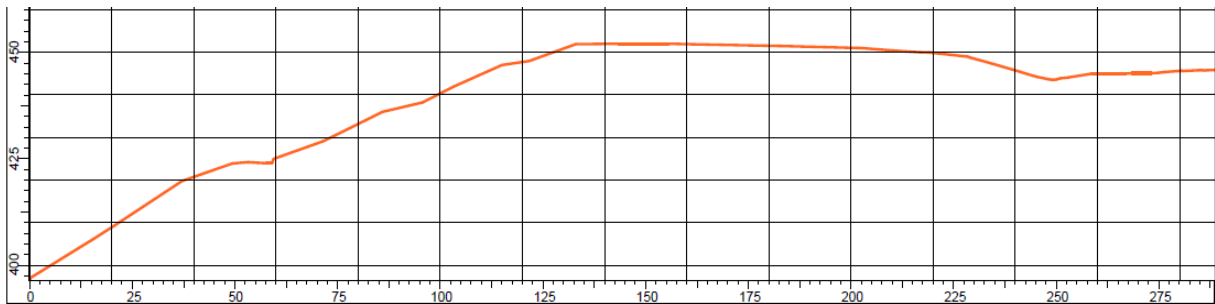
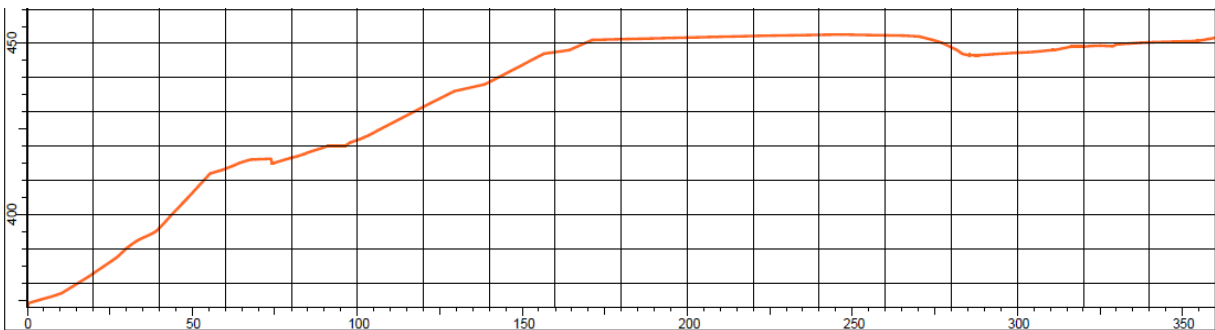
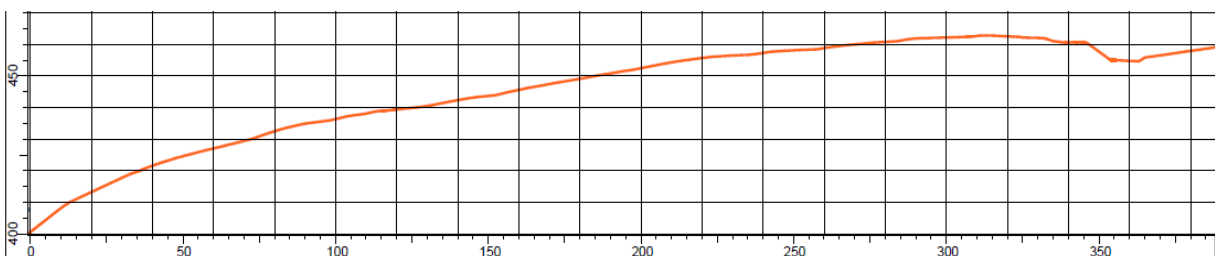
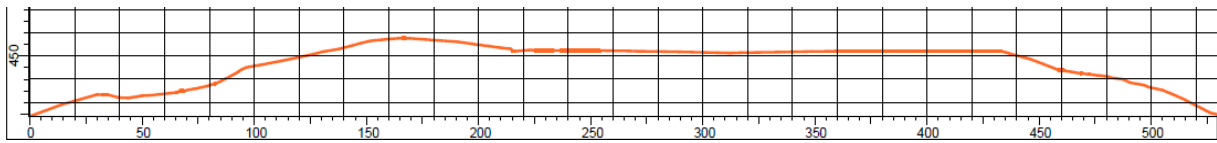
Figura 44.*Detalle perfil topográfico 1.***Figura 45***Detalle perfil topográfico 2.***Figura 46***Detalle perfil topográfico 3.*

Figura 47*Detalle perfil topográfico 4.*

5.10.4 Modelo geológico geotécnico

Para cada uno de los perfiles de análisis definidos anteriormente, se genera el modelo geológico-geotécnico con base a la topografía, la litología, secuencia estratigráfica, localización del nivel freático (en caso de encontrarse) y los parámetros geotécnicos definidos para los tipos de suelos típicos encontrados.

Partiendo de lo anterior, se establecen las siguientes zonas homogéneas para el modelo geológico-geotécnico correlacionado según los análisis litoestratigráficos definidos en la Unidades Geológicas de Ingeniería (ver capítulo 0 Unidades geológicas de ingeniería (UGI)) y los parámetros geotécnicos recomendados (ver capítulo 0 8 Propiedades de los **suelos**). Debido a la incertidumbre de la profundidad donde aparece las intercalaciones de roca, se generó un modelo más conservador dejando solamente hasta el suelo Tipo 3:

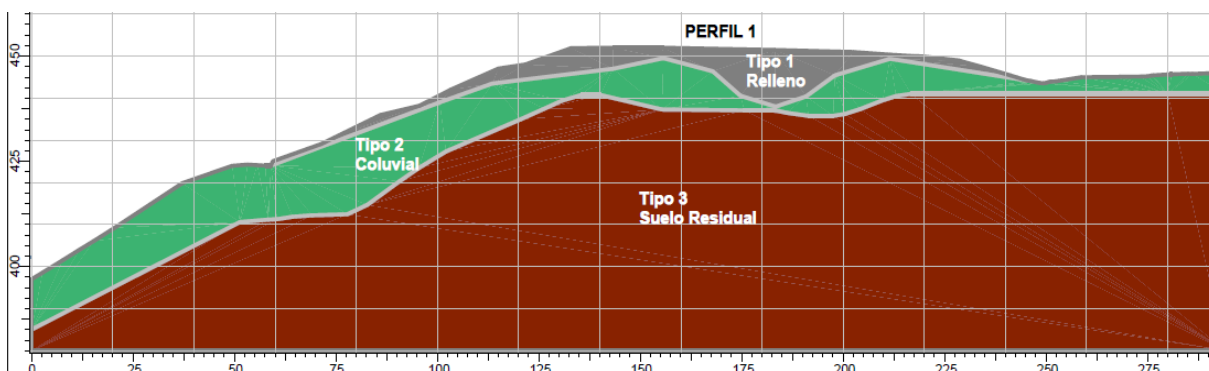
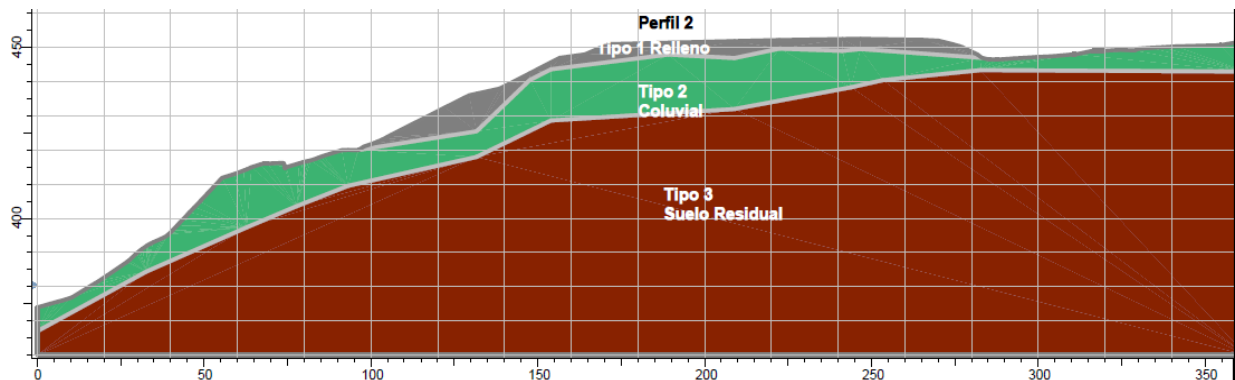
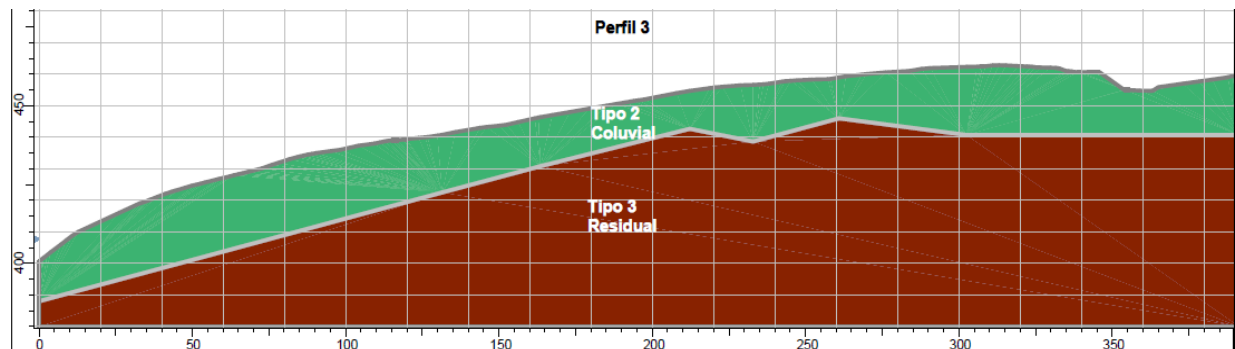
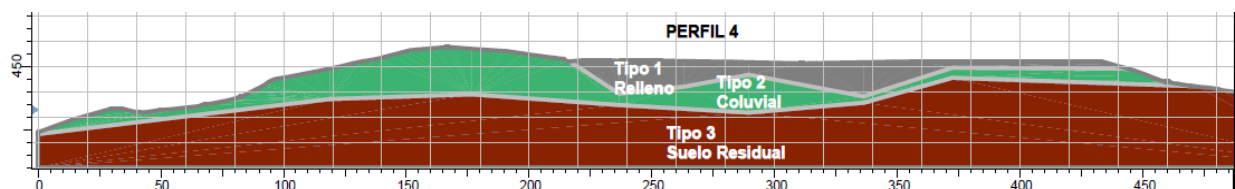
Figura 48.*Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 1.*

Figura 49.*Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 2.***Figura 50.***Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 3.***Figura 51.***Modelo Geológico- Geotécnico Perfil 4.*

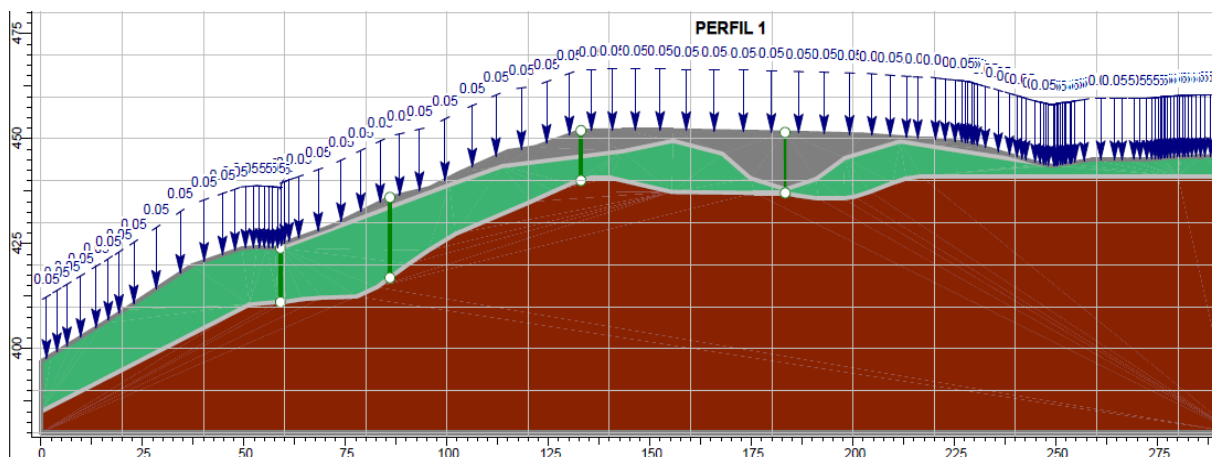
Para cada una de las zonas homogéneas del modelo (Tipo 1 a Tipo 3) se definen los parámetros geotécnicos como se muestra en el capítulo 08 Propiedades de los **suelos** y 5.10.2 Permeabilidad del Suelo , necesarios para los análisis de modelos geotécnicos a realizar:

Tabla 34*Parámetros geotécnicos de análisis*

Tipo de suelo	Peso unitario (KN/m ³)	Angulo de fricción (°)	Cohesión (KN/m ²)	Coefficiente Permeabilidad (m/s)
Tipo 1 (Relleno)	19.8	18.84	42.25	1,E-03
Tipo 2 (Coluvial)	19.1	15.12	116.52	1,E-05
Tipo 3 (Intercalaciones de suelo residual y roca fracturada)	16.9	25.39	29.74	1,E-08

5.10.5 Análisis de flujo

Una vez determinados todos los parámetros geotécnicos del suelo y realizado el análisis hidrológico del sector se realiza el análisis de flujo en cada una de los modelos geotécnicos-geológicos. Para esto a partir de las curvas IDF se determina que se modelara con una precipitación con tiempo de retorno de 20 años y duración de una hora.

Figura 52*Modelo de precipitación. Perfil 1.*

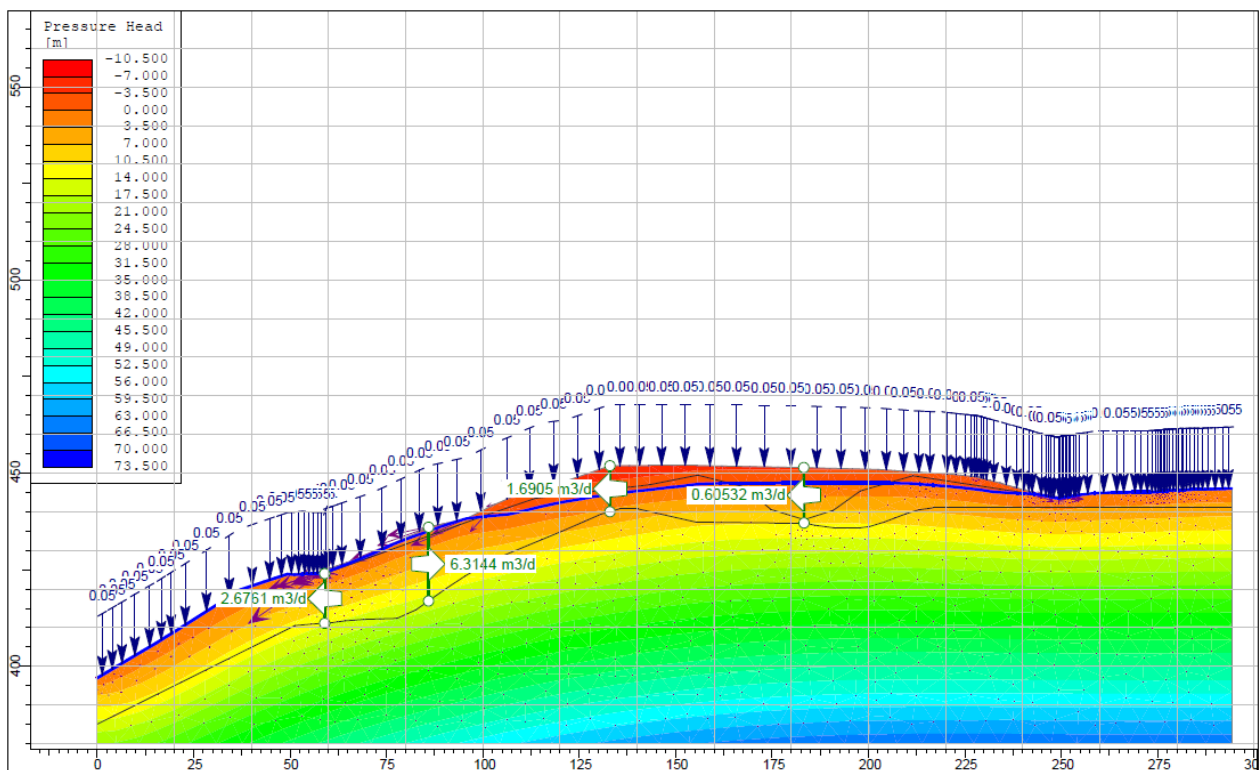
Como se muestra en la imagen anterior se realiza un modelo donde se encuentran los diferentes estratos de suelo identificados en la caracterización geotécnica. En este caso, en los ensayos no se encontró nivel freático en la exploración de campo por lo que se realizará el análisis mediante la

infiltración de agua procedente de la precipitación. Para este análisis se establecieron unas secciones verticales (de color verde en la imagen del modelo) que se usarán como punto de control para determinar el sentido y magnitud del flujo de agua a través de los suelos.

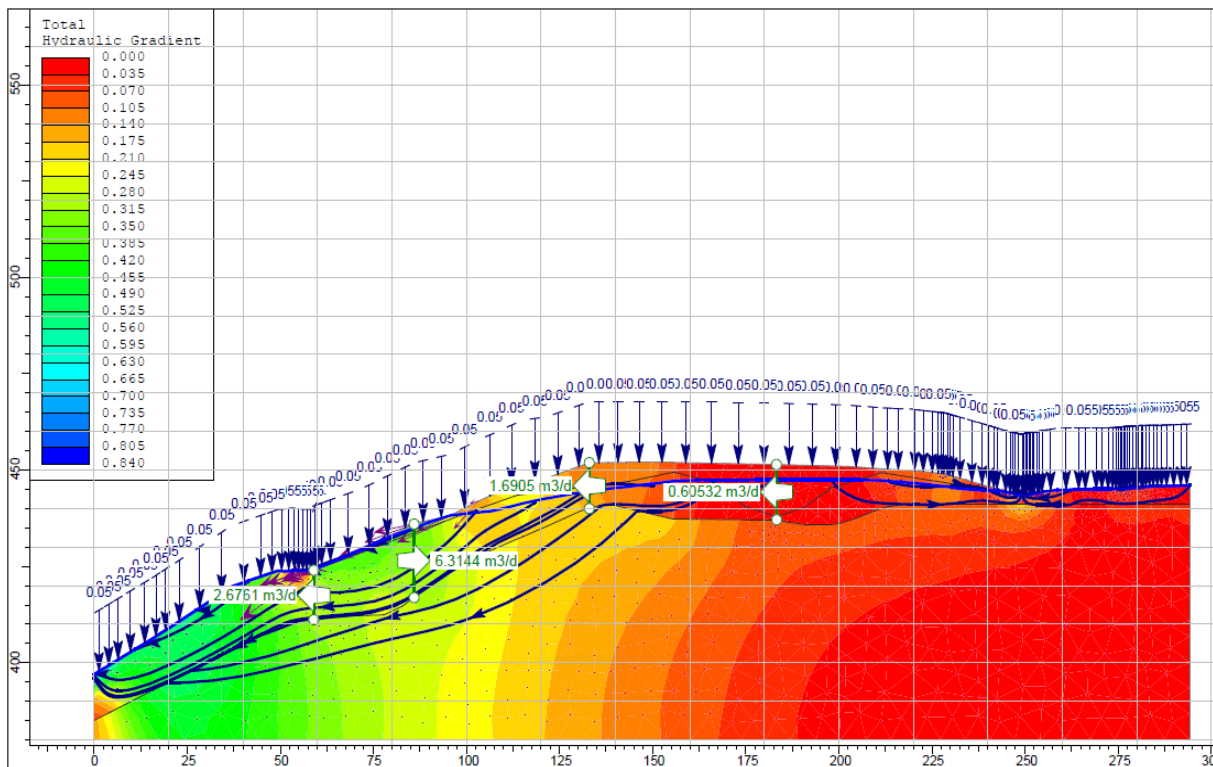
Este procedimiento de modelo se realiza para cada uno de los modelos geológicos geotécnicos descritos en el subcapítulo 5.10.4 y a continuación se muestran los resultados.

Figura 53.

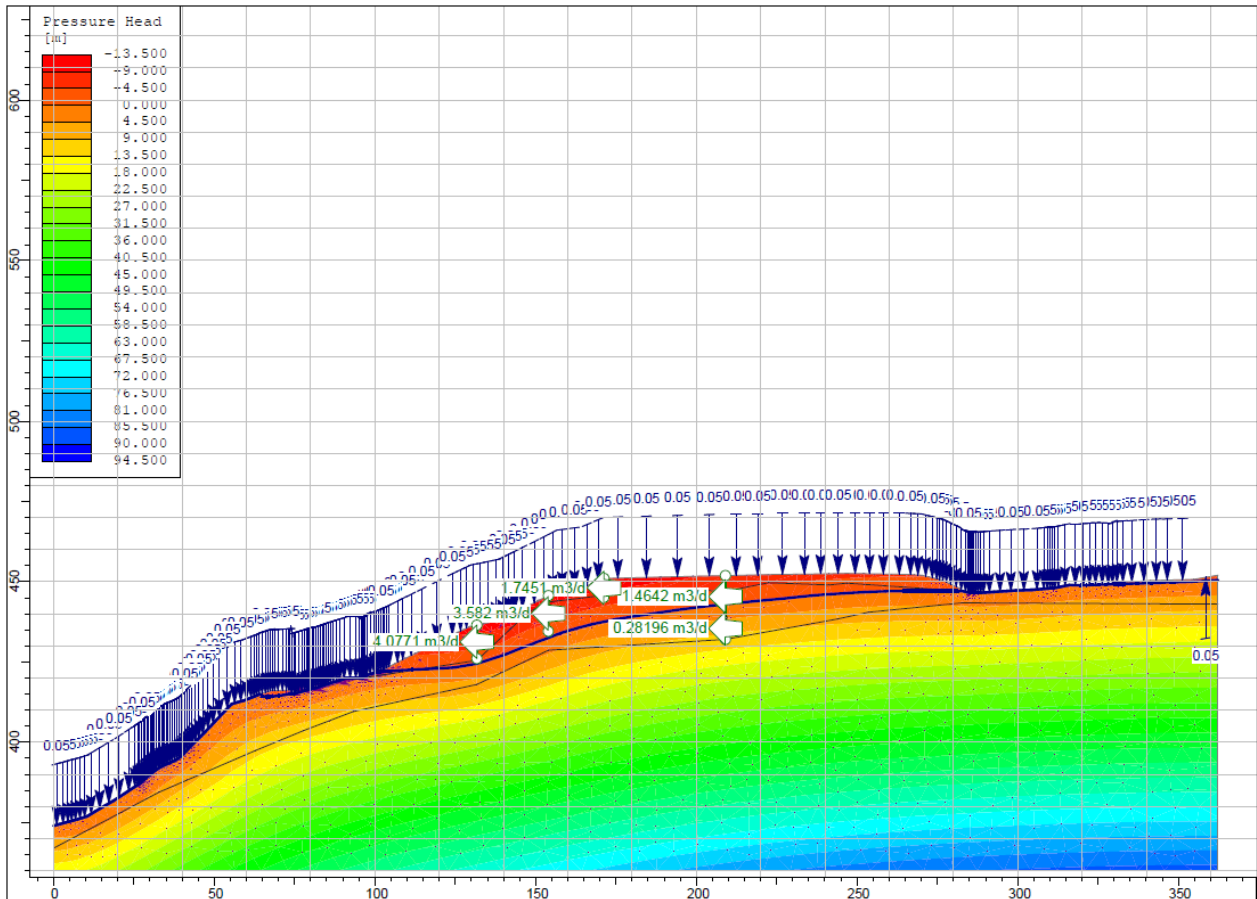
Cabeza de presión. Perfil 1



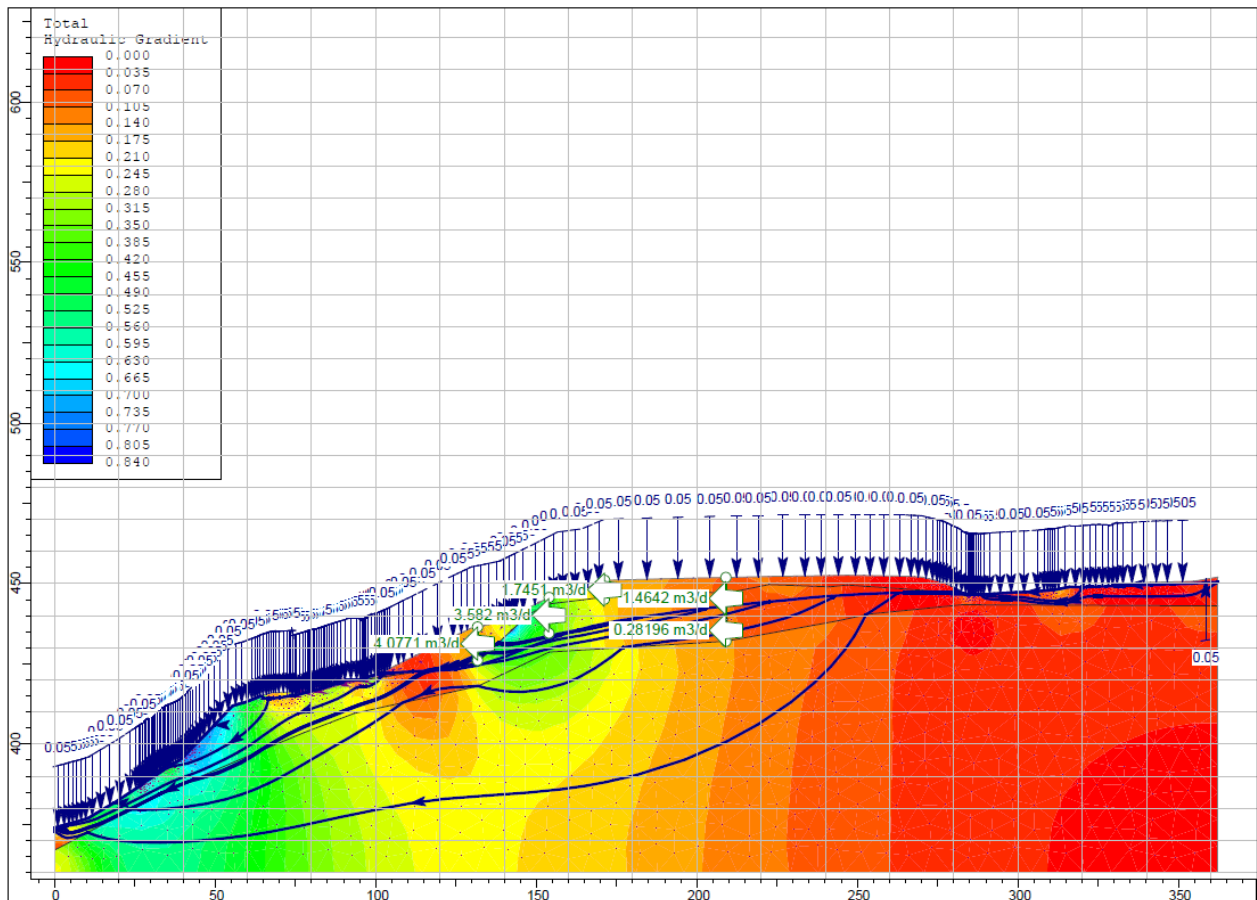
Como se observa en la imagen el nivel freático se encuentra a una profundidad con respecto a la superficie entre los 3 y 7 metros de profundidad. Además, se observa en los puntos de control que el caudal es mayor en los dos estratos superiores debido a la permeabilidad. Asimismo, debido a que la única fuente que alimenta el nivel freático es la lluvia determina que este nivel freático es transitorio y se encuentra colgado.

Figura 54.*Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 1.*

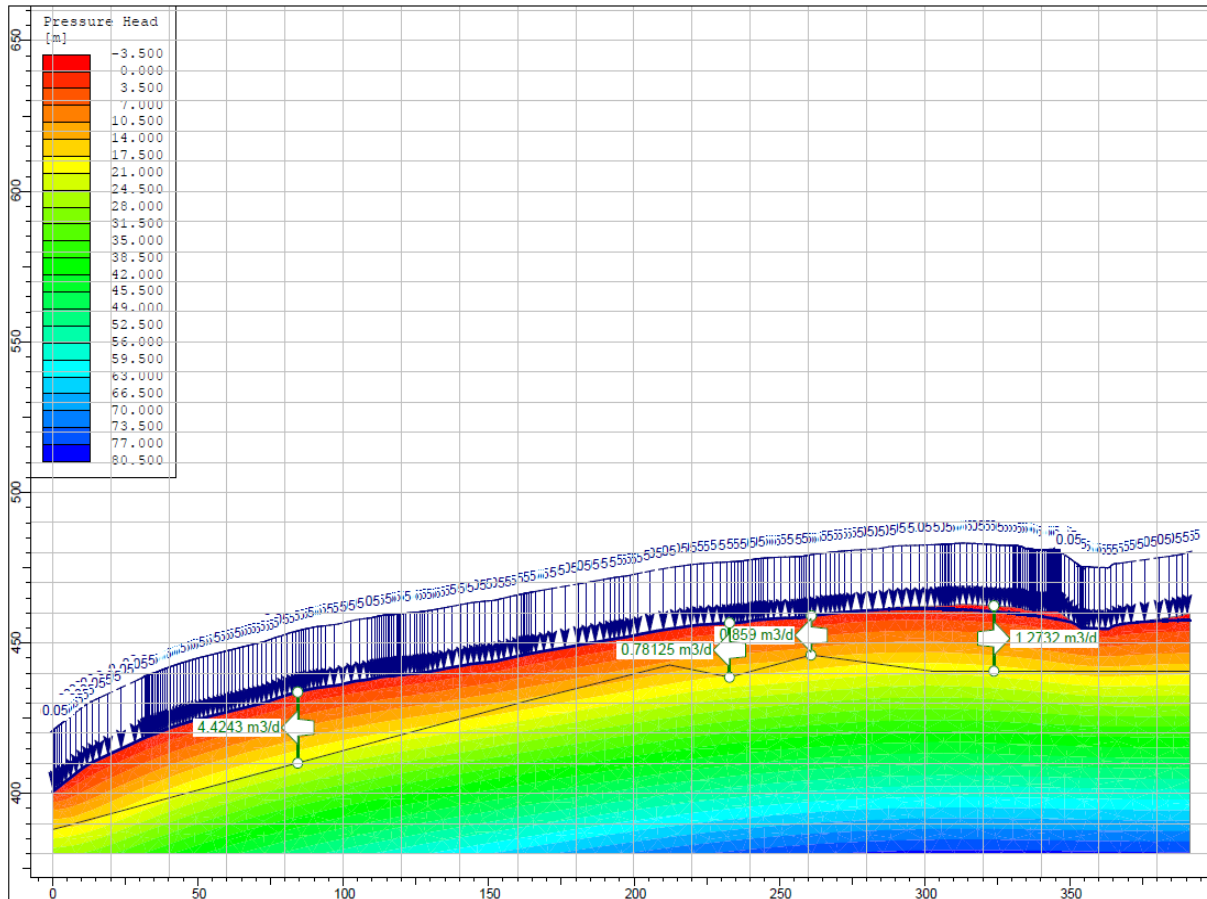
En la imagen anterior se observa que una vez hay lluvias y se materializa el nivel freático, el flujo de agua se da en la mayoría en el estrato denominado relleno dada su baja alta permeabilidad y en los estratos de mayor permeabilidad, aunque es lenta su carga y descarga, se orienta hacia la pendiente de la ladera.

Figura 55.*Cabeza de presión. Perfil 2*

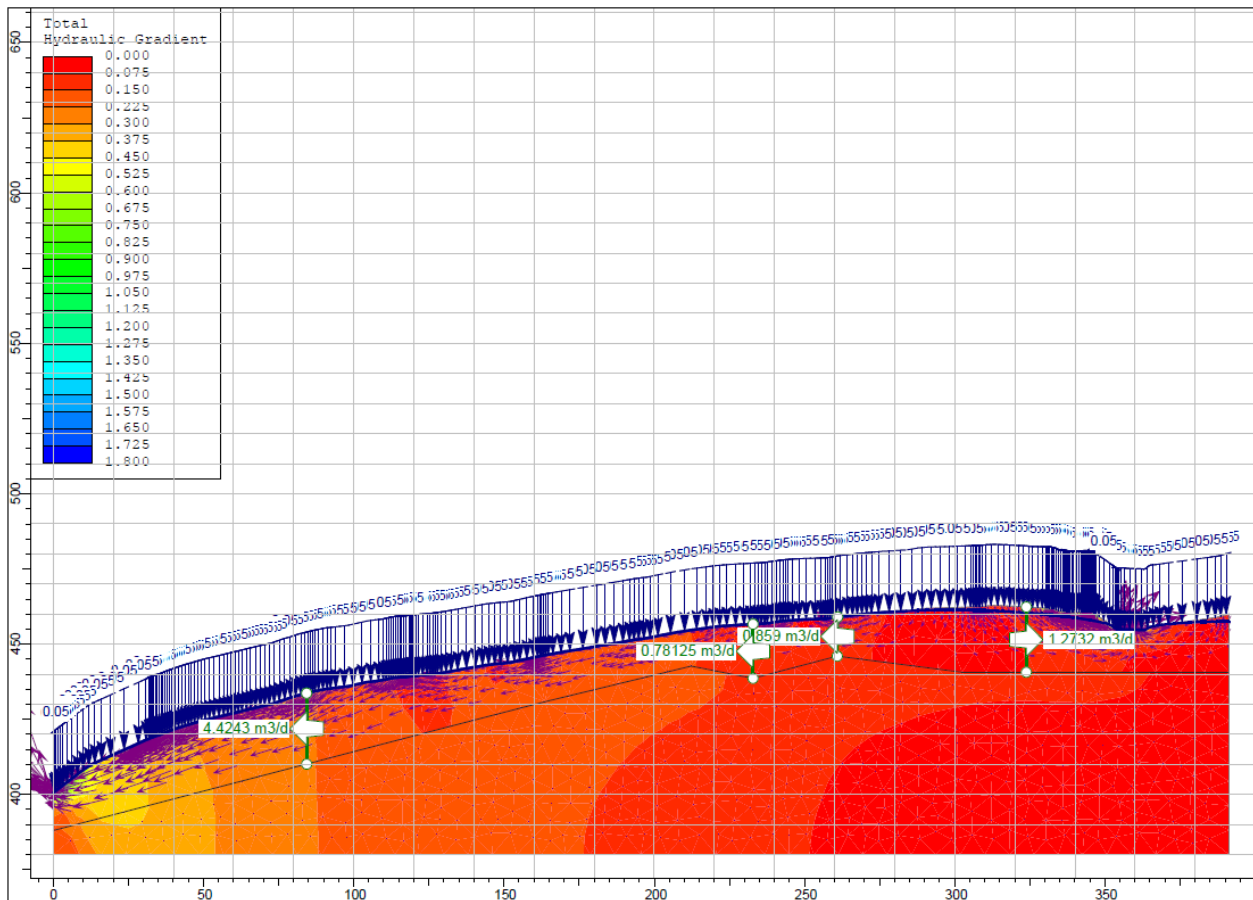
Como se observa en la imagen el nivel freático se encuentra a una profundidad con respecto a la superficie entre los 5 y 12 metros de profundidad. Además, se observa en los puntos de control que el caudal es mayor en los dos estratos superiores debido a la permeabilidad. Asimismo, debido a que la única fuente que alimenta el nivel freático es la lluvia determina que este nivel freático es transitorio y se encuentra colgado.

Figura 56.*Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 2.*

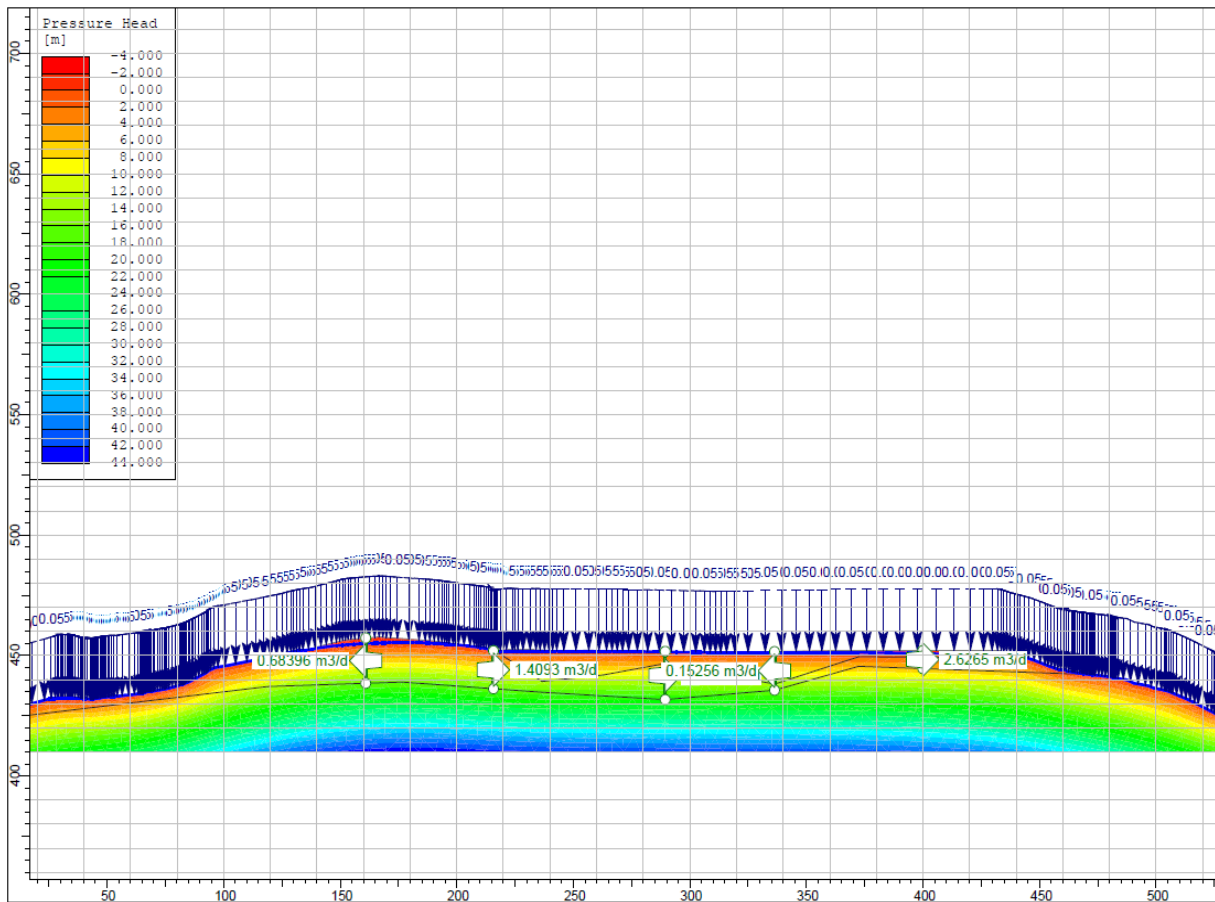
En la imagen anterior se observa que una vez hay lluvias y se materializa el nivel freático, el flujo de agua se da en la mayoría en el estrato denominado relleno dada su baja alta permeabilidad y en los estratos de mayor permeabilidad, aunque es lenta su carga y descarga, se orienta hacia la pendiente de la ladera. El mayor flujo de agua en este perfil se da en el estrato dos dada su mayor pendiente entre el contacto de estratos.

Figura 57.*Cabeza de presión. Perfil 3*

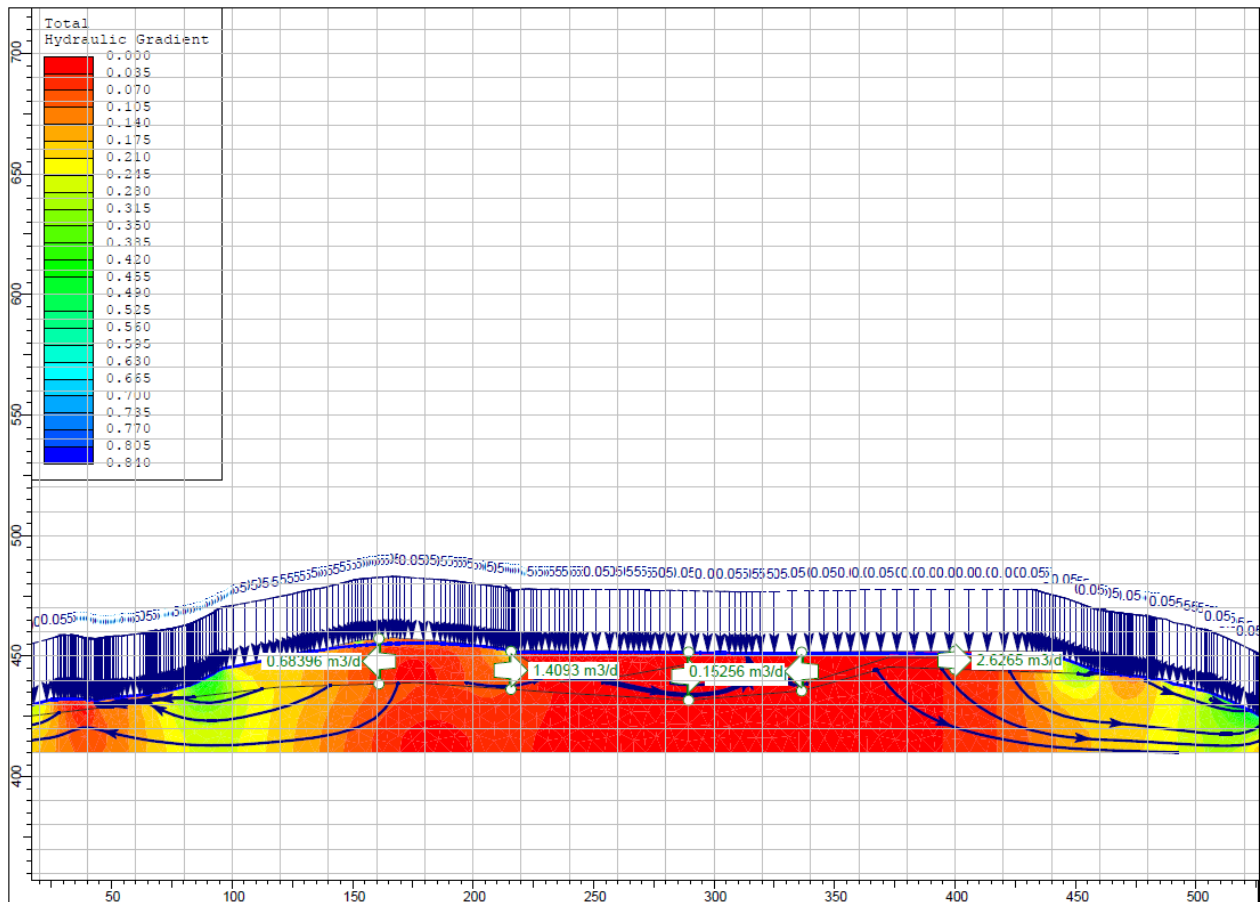
En este perfil se muestra que el agua de escorrentía va por la superficie del terreno y solo en la parte más alta alcanza a tener flujo de 2 metros de profundidad, la permeabilidad del terreno no permite la existencia de nivel freático. Como se observa el flujo en las secciones de control tiene un caudal muy pequeño.

Figura 58.*Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 3.*

En esta imagen se muestra como el agua que alcance a filtrarse de manera lenta en la masa de suelo se desplaza en el sentido de las flechas moradas que indican el sentido del recorrido del agua. Además, se observa que la permeabilidad del material coluvial permite el flujo de agua muy pequeño y el suelo residual o roca fragmentada es casi nulo su flujo.

Figura 59.*Cabeza de presión. Perfil 4*

En este perfil se muestra que el agua de escorrentía va por la superficie del terreno y solo en la parte más alta alcanza a tener flujo de 2 metros de profundidad, la permeabilidad del terreno no permite la existencia de nivel freático. Como se observa el flujo en las secciones de control tiene mayor caudal en el estrato de relleno.

Figura 60.*Gradiente hidráulico y líneas de flujo. Perfil 4*

En este perfil se muestra como el agua alcanza a saturar el suelo con un nivel freático que se marca hasta el metro de profundidad, seguido de esto como este es un corte paralelo a la ladera donde se construirá se ve que el agua continua su flujo por la parte superficial y se dirige en la dirección donde los 3 perfiles anteriores mostraban.

5.11 Evaluación de la amenaza

Como se mencionó en el numeral 0 Evaluación de la **amenaza**, los análisis detallados sobre el área de estudio se realizaron mediante modelos de estabilidad sobre secciones de ladera tomados

de perfiles geológico-geotécnicos considerando los efectos debido a sobrecargas, cortes y cambios en las condiciones de flujos de aguas superficiales y subsuperficiales, esto con el fin de determinar la probabilidad de falla que generaría posibles deslizamientos.

Según lo anterior, la probabilidad de falla se calculará teniendo en cuenta el siguiente procedimiento:

1. Definición de las unidades de análisis y secciones de falla.
2. Determinación del modelo geológico-geotécnico en la sección de análisis.
3. Determinación de la cabeza de presión para cada escenario de análisis.
4. Determinación de la aceleración para cada escenario de análisis.
5. Cálculo del factor de seguridad para cada escenario de análisis.

5.11.1 Definición de las unidades de análisis y secciones de falla

En el numeral 5.10.3 se establecieron las unidades de análisis y secciones de falla que se emplearan en este capítulo.

5.11.2 Modelo geológico geotécnico

Los modelos geológicos y geotécnicos fueron descritos en el numeral 5.10.4 al igual que se establecieron las propiedades de cada uno de los estratos homogéneos de suelos a analizar.

5.11.3 Factores detonantes

Los factores detonantes considerados comúnmente como afectación de movimientos en masa son la lluvia y el sismo, calculados de la siguiente forma:

5.11.3.1 Lluvia. El detonante por lluvia se analiza a partir de la ocurrencia de deslizamientos en función del régimen de precipitación utilizando las características geomecánicas e hidrológicas del suelo. El principal insumo para el análisis de lluvia corresponde a la precipitación tomada de información pluviográfica o pluviométrica registrada en una estación cercana al sitio de estudio. Dicha estación deberá estar lo más cerca posible de la zona de interés, no poseer una diferencia de nivel de 500 metros y contar un registro diario de por lo menos 15 años consecutivos.

Los valores pluviográficos permiten calcular la intensidad esperada sobre el área de estudio, como se mostró en el capítulo 5.10 análisis de flujo usando curvas IDF

5.10.3.2 Sismo. El efecto de las condiciones pseudoestáticas para los análisis de amenaza se toman según la influencia de la aceleración horizontal basada para un período de retorno establecido. Para efectos del presente estudio se utilizará el valor de carga sísmica reducida establecido por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 para el municipio de Betulia.

5.11.4 Análisis de estabilidad

- **Modelo utilizado**

Para el análisis del modelo geotécnico se utilizó el software para computador Rocscience Slide Versión 6, software que analiza la estabilidad en superficies de deslizamientos usando métodos de equilibrio límite con rodajas verticales para obtener los factores de seguridad al deslizamiento de los taludes.

- **Métodos de análisis**

Aunque el programa permite trabajar con nueve diferentes métodos de análisis (Bishop, Janbu, Spencer, GLE/Morgenstern – Price y otros métodos de análisis), para objeto del presente estudio

se trabajó de manera general con los resultados obtenidos en el **GLE/Morgenstern**, los resultados mostrados en cada uno de los escenarios corresponden al análisis de la falla probabilística con factor de seguridad más crítico.

- **Propiedades del suelo**

Se utilizó el sistema de parámetros totales de resistencia, de acuerdo al sistema de Mohr-Coulomb definidos en la tabla 34 Parámetros geotécnicos de análisis

- **Parámetros sísmicos de diseño**

Para el análisis de estabilidad se consideran los efectos sísmicos de acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 el cual contempla criterios de falla para el diseño de taludes y atendiendo a esos criterios se utiliza la zonificación de amenaza sísmica y movimientos de diseño para el municipio de Betulia que se ubica en la zona de amenaza sísmica intermedia.

- Valores de A_a y A_v

De acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, los movimientos sísmicos de diseño para el municipio de Betulia son los siguientes:

A_a (Coeficiente que representa la aceleración horizontal pico efectiva): 0.20

A_v (Coeficiente que representa la velocidad horizontal pico efectiva): 0.20

- Coeficiente F_a de períodos cortos del espectro

El valor de **F_a** para períodos cortos del espectro (tabla A.2.4-3) es: 1.4 para Perfil D.

Tabla 35.

Valores del coeficiente F_a , para la zona de periodos cortos del espectro

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

Nota: Tomada de NSR-10 TABLA A.2.4-3.

- Coeficiente F_v de períodos cortos del espectro

El valor de F_v para períodos intermedios del espectro (tabla A.2.4-4) es 2.00 para Perfil D.

Tabla 36.

Valores del coeficiente F_v , para la zona de períodos intermedios del espectro

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Tomada de NSR-10 TABLA A.2.4-4.

Para los suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados el valor es $0.8 \cdot a_{m\acute{a}x}$. Para el presente dise\u00f1o se realiza la determinaci\u00f3n de KST a partir de la NSR-10, con el objeto de alcanzar valores de factores de seguridad de dise\u00f1o m\u00ednimos, reportados en la Tabla H.2.4-1 de la NSR – 10 (Factores de seguridad b\u00e1sicos m\u00ednimos directos).

Según la tabla A.2.4-3 de la NSR-10 se tienen valores del coeficiente de aceleración $F_a=1.4$, para A_a de 0.20 y un perfil de suelo tipo D y tomando un coeficiente de importancia I de 1.0, se halla mediante la siguiente expresión el valor del coeficiente de aceleración sísmica:

$$K_H = KST * F_a * I * A_a = 0.8 * 1.4 * 1.0 * 0.20 = 0.22$$

El coeficiente pseudoestático horizontal K_h .

$$K_h=0.22g$$

El valor a utilizar para los análisis de estabilidad es de 0.22g.

- **Escenarios de análisis**

Para los análisis de amenaza se realizaron tres tipos de escenarios para el cálculo factor de seguridad. El **primer escenario** analiza las condiciones actuales existentes en el sitio de estudio; el **segundo escenario** considera los cortes de las excavaciones generadas para la construcción del proyecto. Finalmente, el **escenario tres** muestra la estabilización de los cortes generados a partir de obras de mitigación y las cargas del proyecto.

Para los tres escenarios se estiman los valores de seguridad en condiciones bajo efectos estático y dinámico teniendo en cuenta la influencia de las lluvias.

Estos escenarios de análisis se realizaron para cada sección (perfil) definido en el modelo geológico – geotécnico.

5.11.4.1 Escenario 1 – condiciones actuales. Para los análisis de este escenario, se buscó con el programa la condición de falla más crítica y el factor de seguridad respectivo, arrojando los siguientes valores.

Tabla 37.*Análisis de estabilidad Escenario 1*

ESCENARIO 1				
PERFIL	CONDICION	ANALISIS	F.S. GLE/ M-P	PF
Perfil 1	Actual	Estático	1,889	0,29%
Perfil 1	Actual	Estático + Lluvias	1,214	18,87%
Perfil 1	Actual	Dinámico	1,125	31,16%
Perfil 1	Actual	Dinámico + Lluvias	0,715	100,00%
Perfil 2	Actual	Estático	1,477	3,41%
Perfil 2	Actual	Estático + Lluvias	0,944	80,14%
Perfil 2	Actual	Dinámico	0,964	60,99%
Perfil 2	Actual	Dinámico + Lluvias	0,597	100,00%
Perfil 3	Actual	Estático	2,703	0,05%
Perfil 3	Actual	Estático + Lluvias	1,703	0,64%
Perfil 3	Actual	Dinámico	1,42	3,72%
Perfil 3	Actual	Dinámico + Lluvias	0,807	96,64%
Perfil 4 IZQ	Actual	Estático	3,21	0,03%
Perfil 4 IZQ	Actual	Estático + Lluvias	1,931	1,45%
Perfil 4 IZQ	Actual	Dinámico	1,561	6,94%
Perfil 4 IZQ	Actual	Dinámico + Lluvias	0,919	82,67%
Perfil 4 DER	Actual	Estático	2,647	0,46%
Perfil 4 DER	Actual	Estático + Lluvias	1,585	13,30%
Perfil 4 DER	Actual	Dinámico	1,495	10,14%
Perfil 4 DER	Actual	Dinámico + Lluvias	0,854	91,01%

Nota: Elaboración propia. Resultados software equilibrio límite.

Figura 61.

Análisis Estático, Perfil 1. Condición Actual

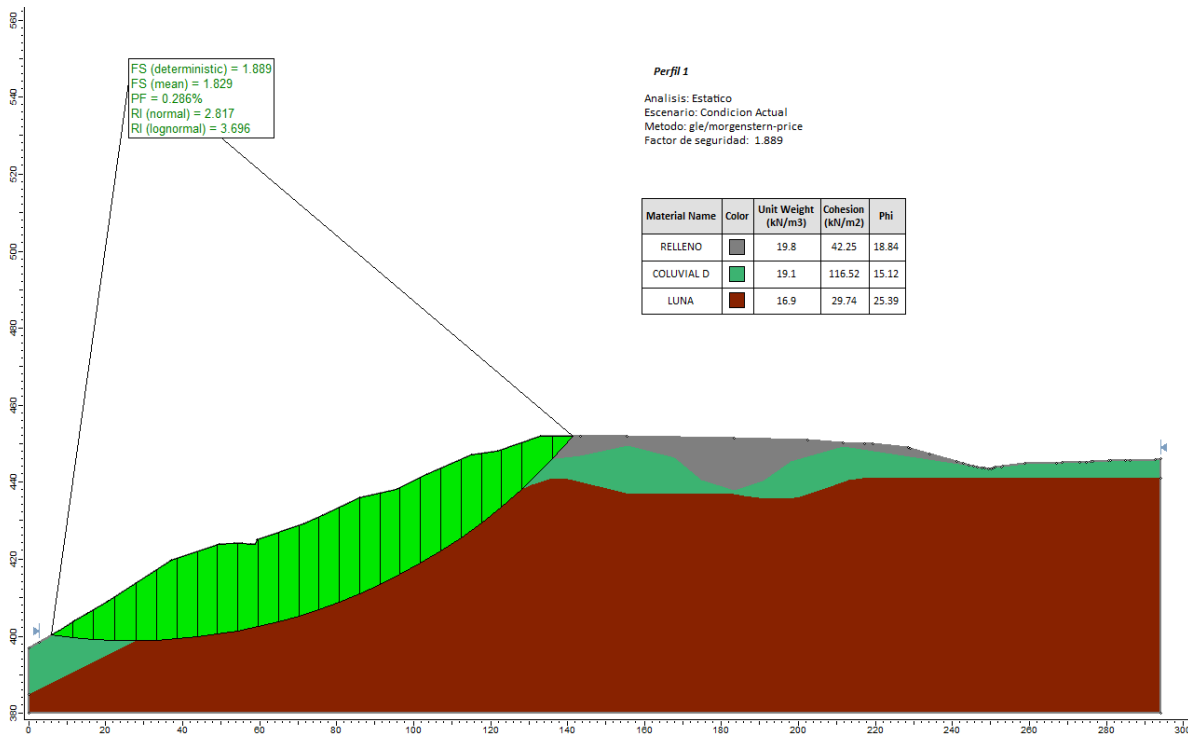


Figura 62.

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 1. Condición Actual

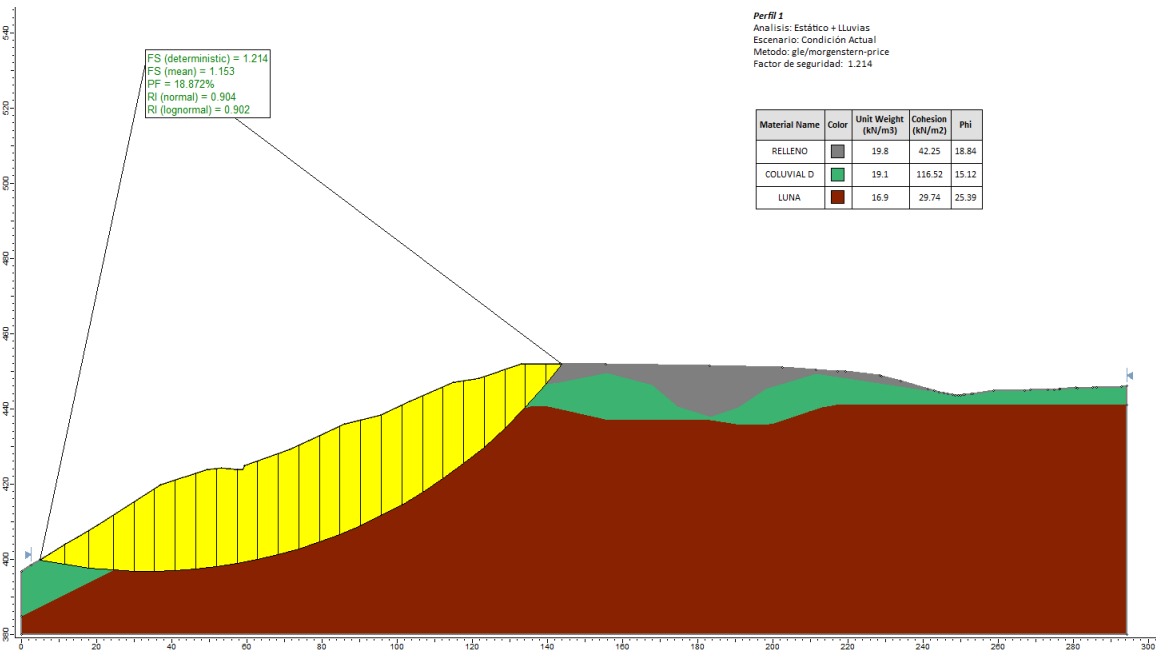


Figura 63.

Análisis Dinámico, Perfil 1. Condición Actual

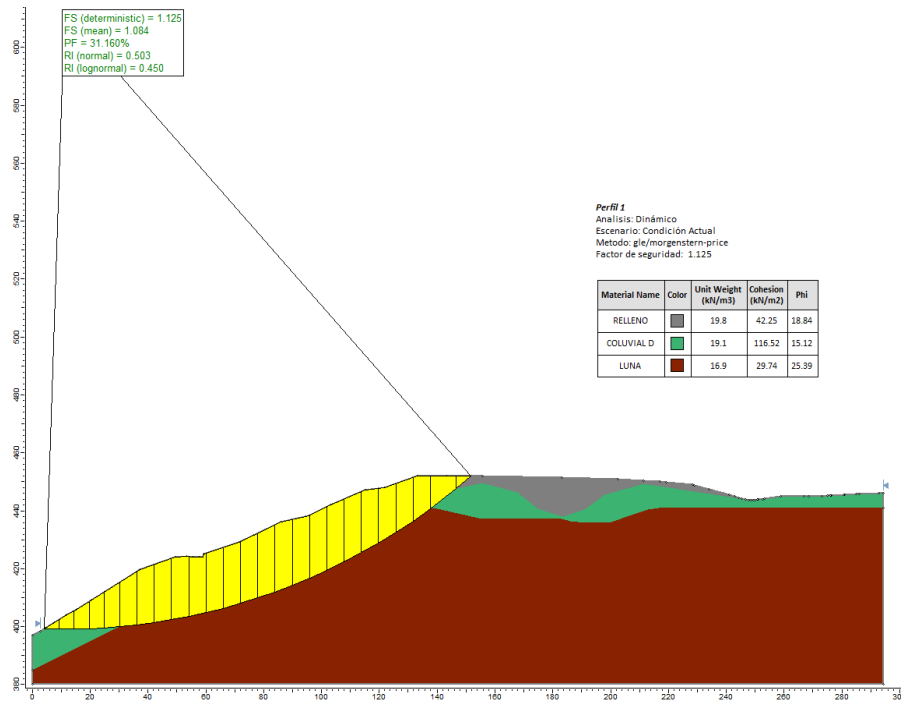


Figura 64.

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 1. Condición Actual

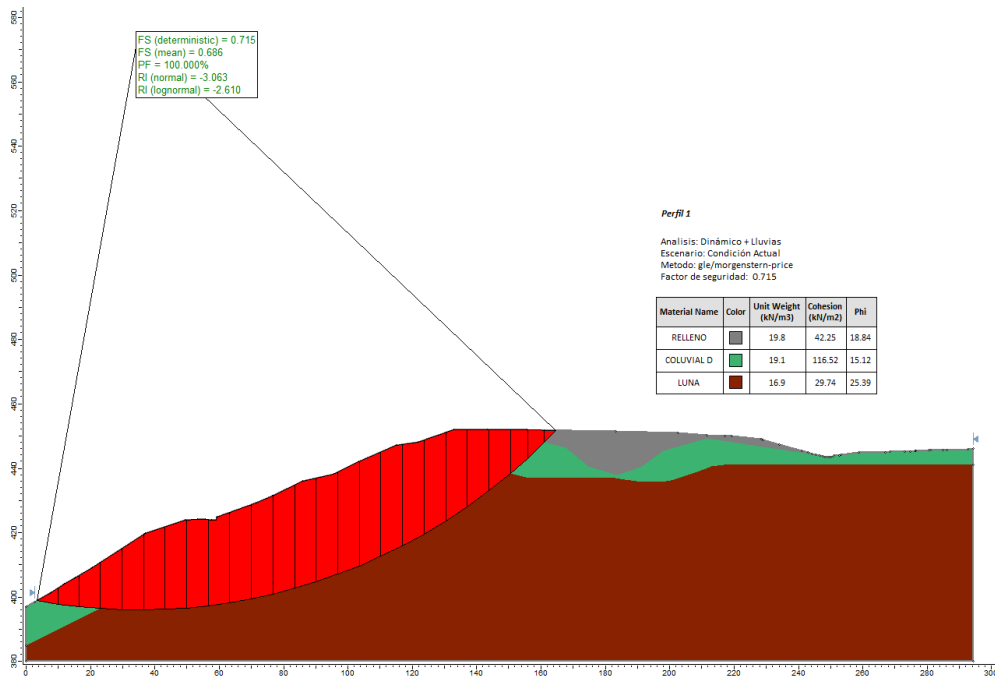


Figura 65.

Análisis Estático, Perfil 2. Condición Actual

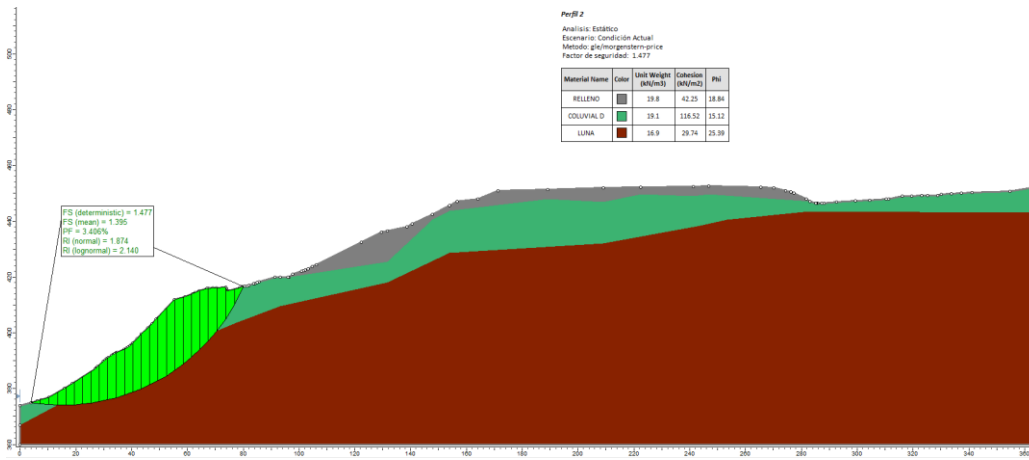


Figura 66.

Análisis Estático+ Lluvias, Perfil 2. Condición Actual

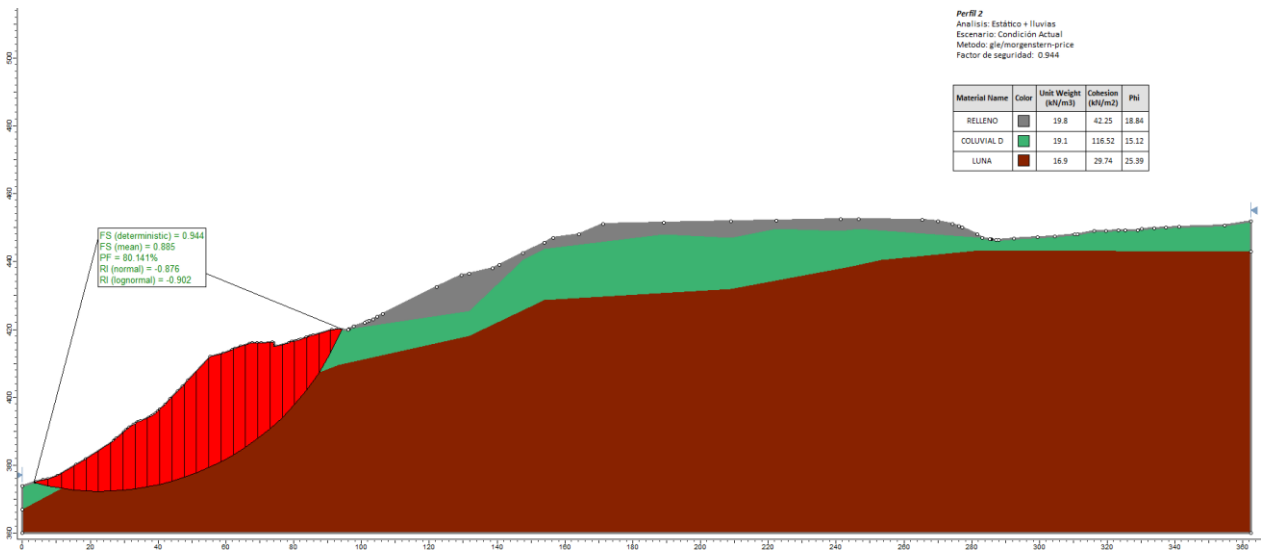


Figura 67.

Análisis Dinámico, Perfil 2. Condición Actual

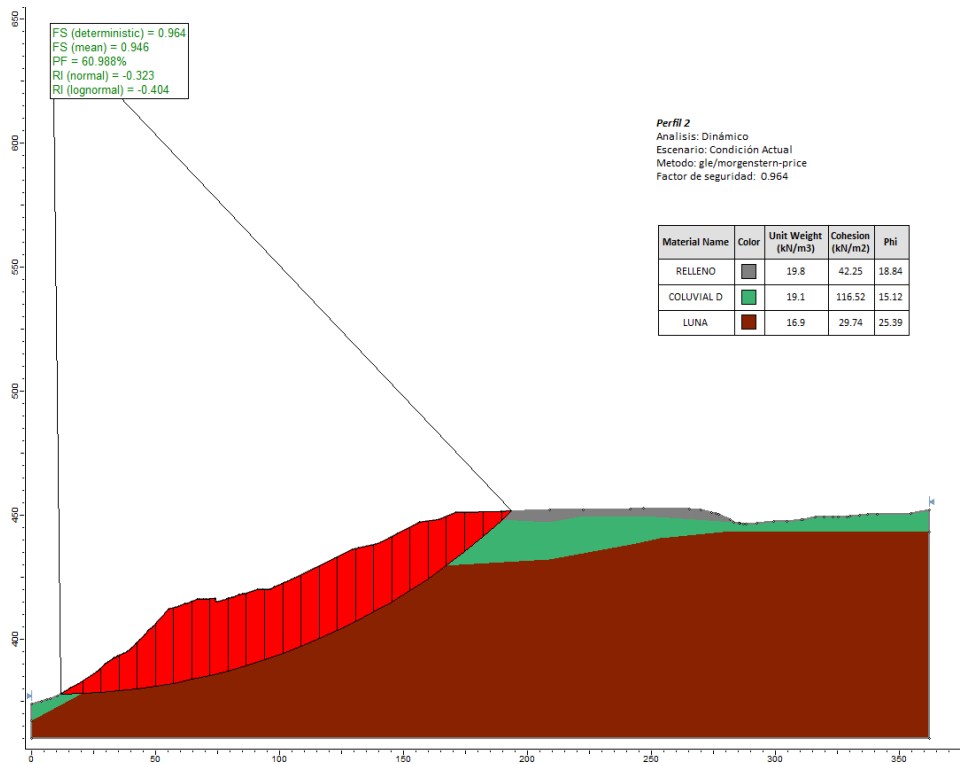


Figura 68.

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Condición Actual

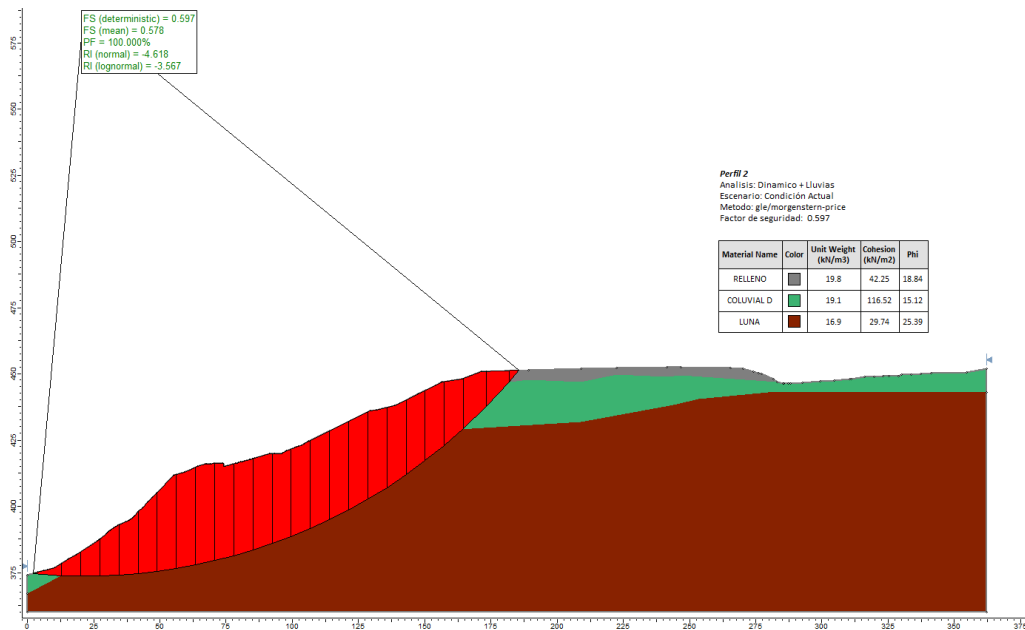


Figura 69.

Análisis Estático, Perfil 3. Condición Actual

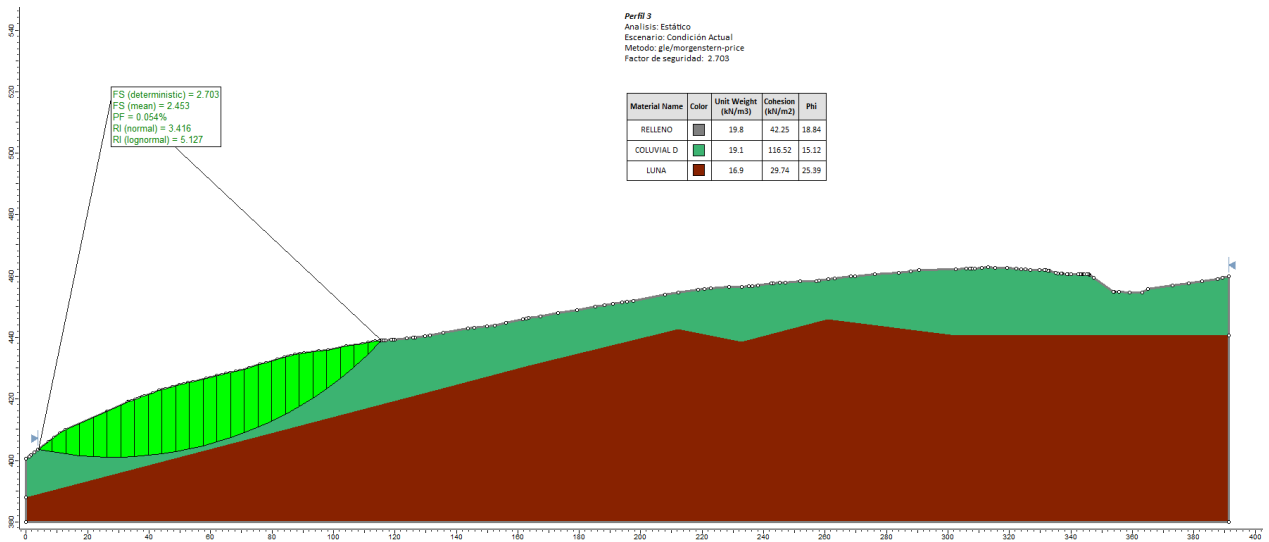


Figura 70

Estático+ Lluvias , Perfil 3. Condición Actual

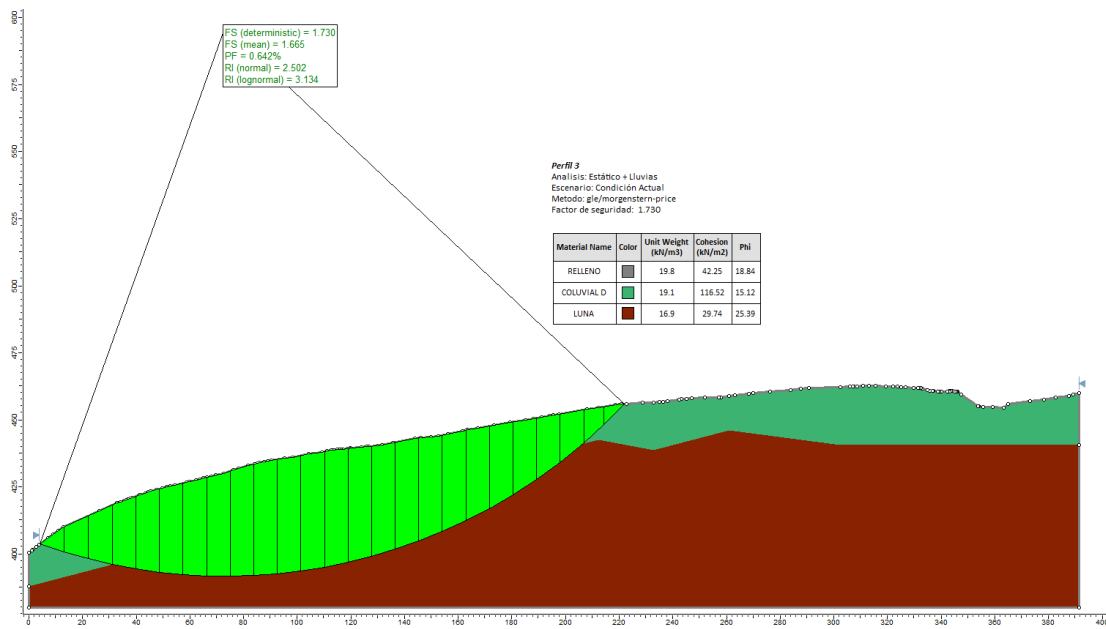


Figura 71.

Análisis Dinámico, Perfil 3. Condición Actual

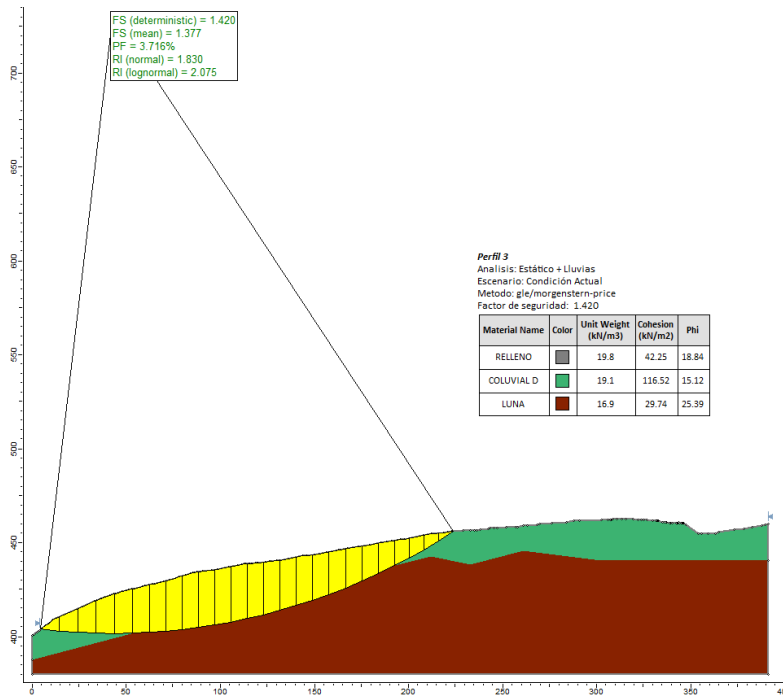


Figura 72

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Condición Actual

Fuente propia

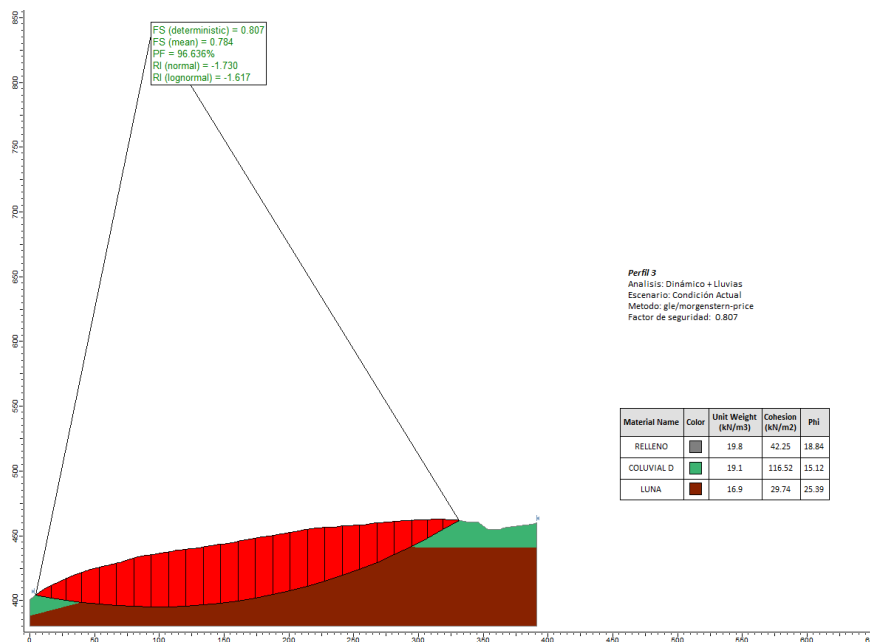


Figura 73.

Análisis Estático, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual

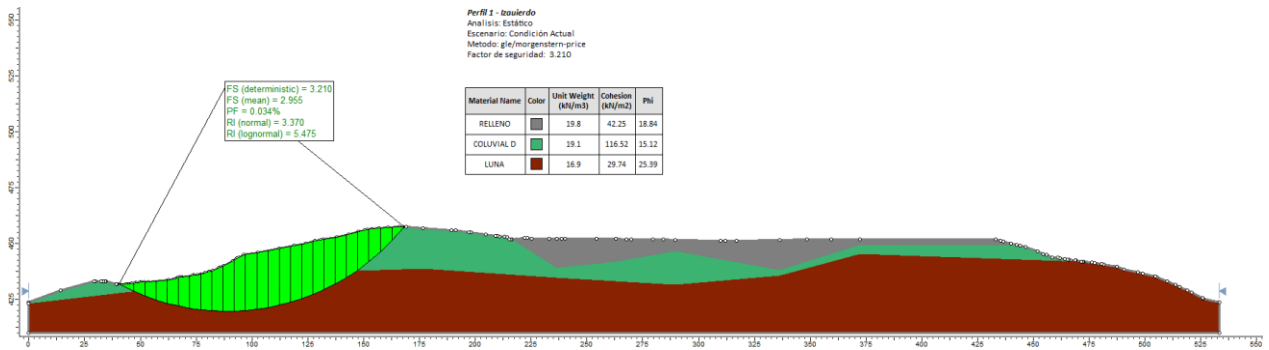


Figura 74

Análisis Estático, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual

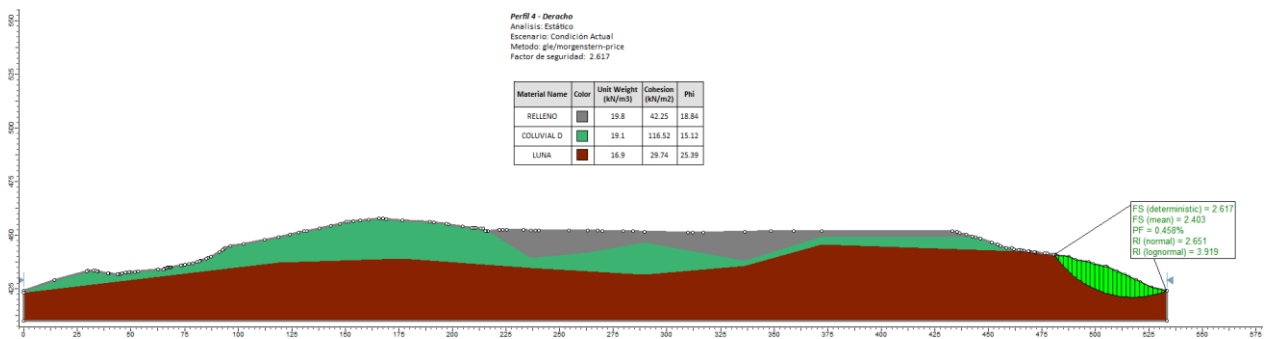


Figura 75

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual

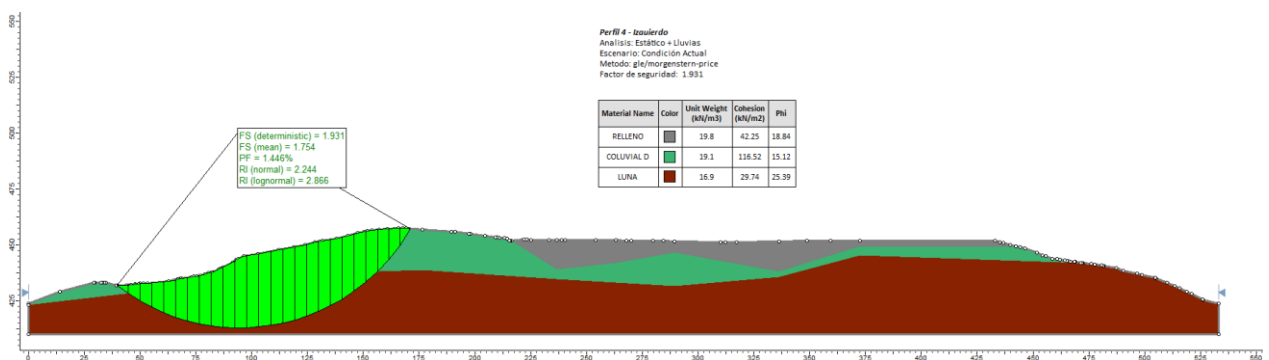


Figura 76

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual

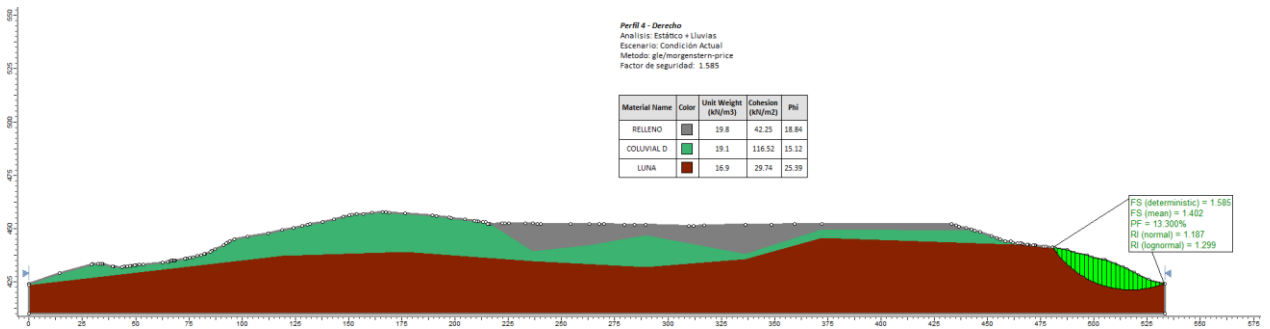


Figura 77.

Análisis Dinámico, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual

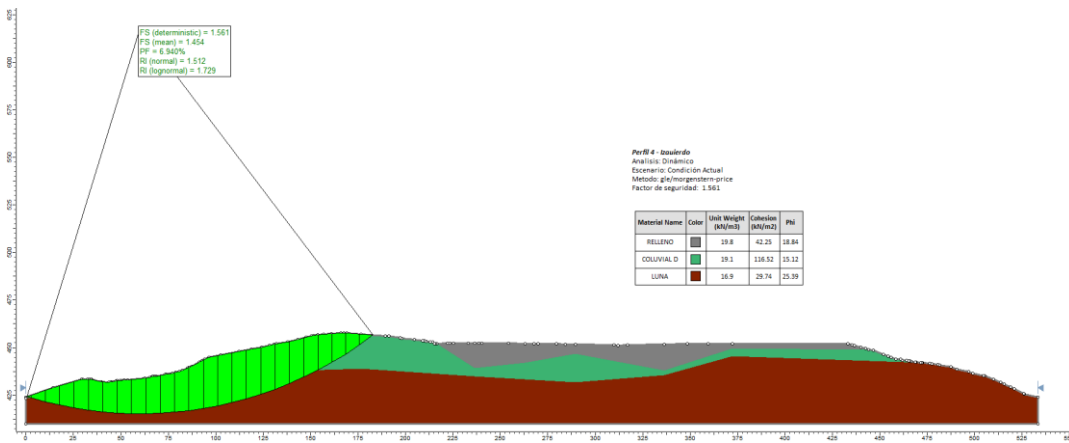


Figura 78.

Análisis Dinámico, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual

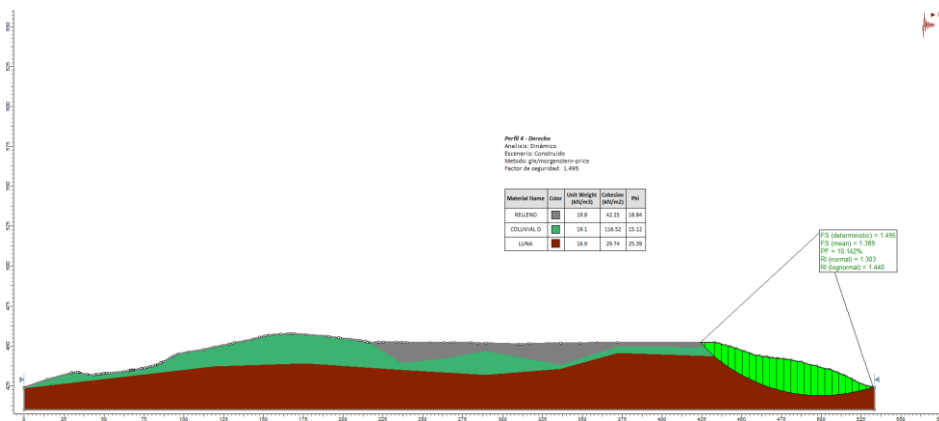
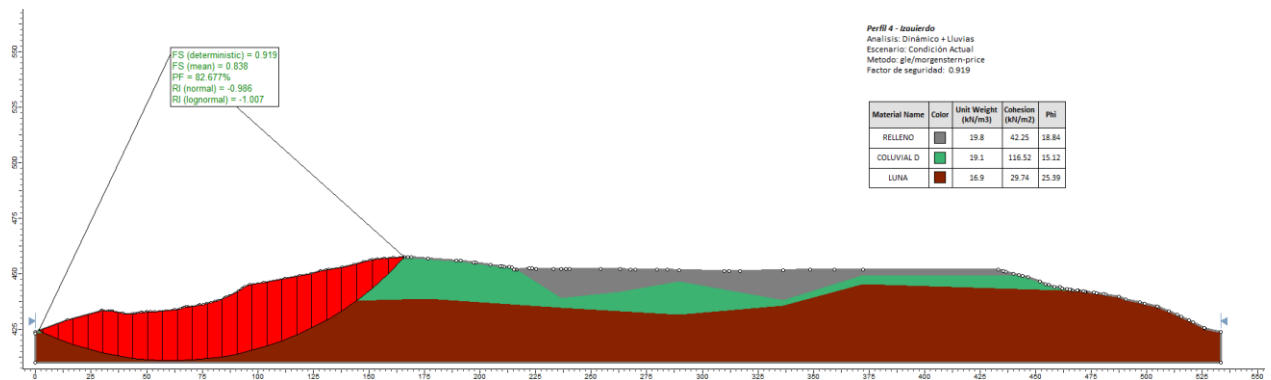
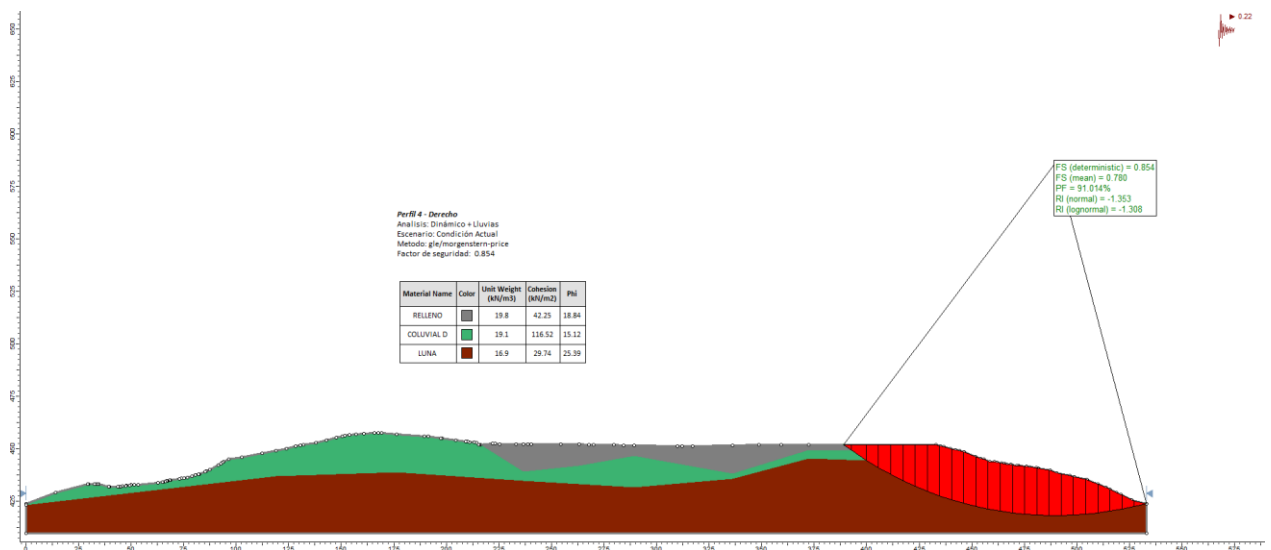


Figura 79.*Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Condición Actual***Figura 80.***Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Condición Actual*

5.11.4.2 Escenario 2 – considerando cortes de tierra del proyecto. Este escenario muestra las condiciones de estabilidad de los cortes realizados sobre el terreno requeridos para la construcción del proyecto. Los perfiles realizados consideran las zonas más críticas según los planos arquitectónicos. A continuación, se muestran los valores de factor de seguridad obtenidos.

- **Estabilidad cortes de estructuras**

Tabla 38.*Análisis de estabilidad Escenario 2 cortes de tierra*

ESCENARIO 2				
PERFIL	CONDICION	ANALISIS	F.S. GLE/ M-P	PF
Perfil 1	Excavación	Estático	1,935	0,25%
Perfil 1	Excavación	Estático + Lluvias	1,935	0,25%
Perfil 1	Excavación	Dinámico	1,149	26,73%
Perfil 1	Excavación	Dinámico + Lluvias	1,149	26,73%
Perfil 2	Excavación	Estático	1,474	3,42%
Perfil 2	Excavación	Estático + Lluvias	1,474	3,42%
Perfil 2	Excavación	Dinámico	0,961	62,70%
Perfil 2	Excavación	Dinámico + Lluvias	0,961	62,70%
Perfil 3	Excavación	Estático	2,701	0,05%
Perfil 3	Excavación	Estático + Lluvias	1,726	0,67%
Perfil 3	Excavación	Dinámico	1,427	4,41%
Perfil 3	Excavación	Dinámico + Lluvias	0,809	94,88%
Perfil 4 IZQ	Excavación	Estático	3,268	0,00%
Perfil 4 IZQ	Excavación	Estático + Lluvias	3,268	0,00%
Perfil 4 IZQ	Excavación	Dinámico	1,612	1,60%
Perfil 4 IZQ	Excavación	Dinámico + Lluvias	1,612	1,60%
Perfil 4 DER	Excavación	Estático	2,618	0,01%
Perfil 4 DER	Excavación	Estático + Lluvias	2,618	0,01%
Perfil 4 DER	Excavación	Dinámico	1,537	2,17%
Perfil 4 DER	Excavación	Dinámico + Lluvias	1,537	2,17%

Nota: Resultados software equilibrio límite.

Figura 81.

Análisis Estático, Perfil 1. Cortes excavaciones

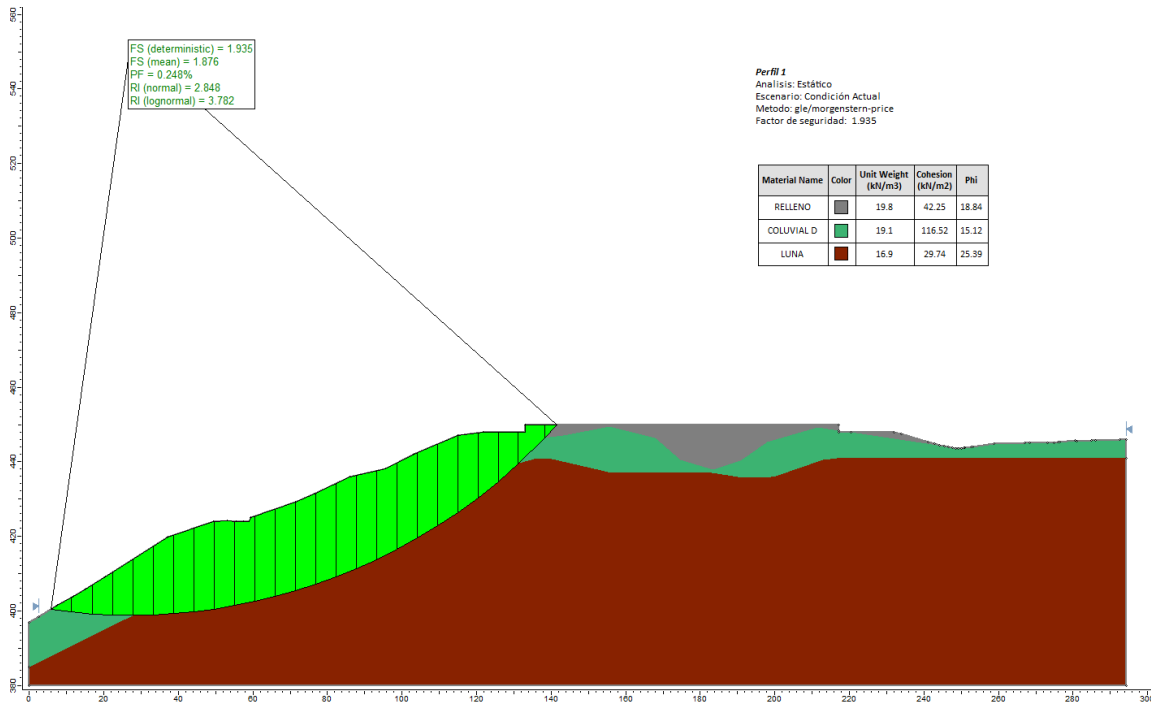


Figura 82.

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones

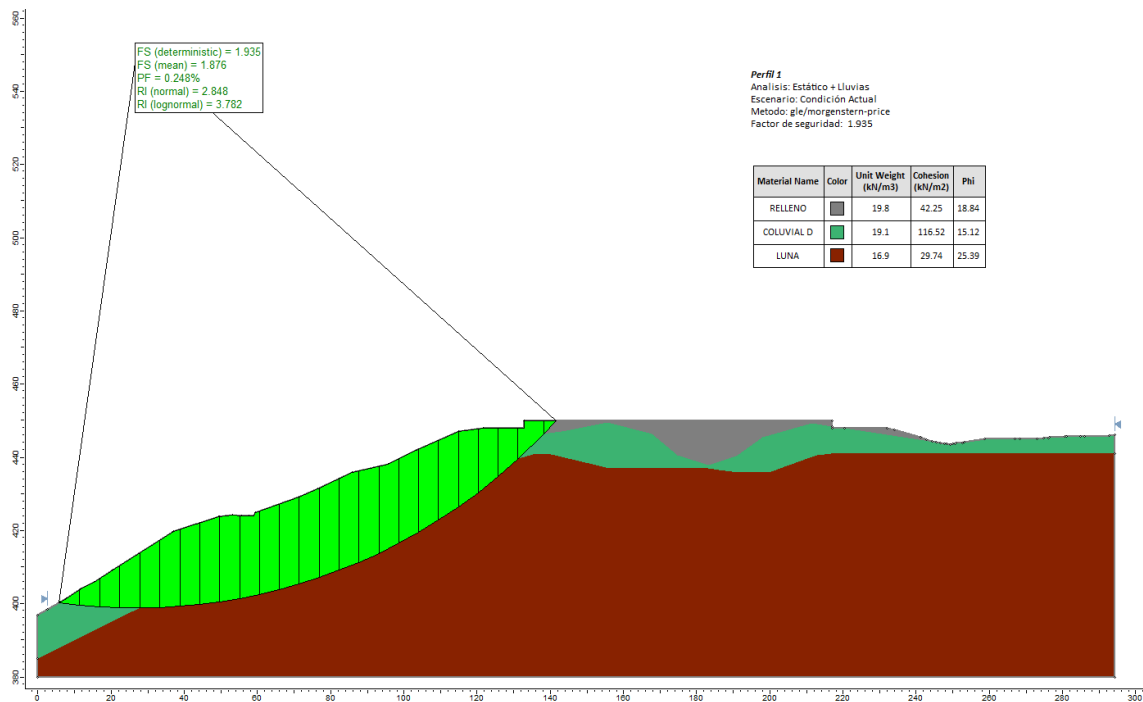


Figura 83.

Análisis Dinámico, Perfil 1. Cortes excavaciones

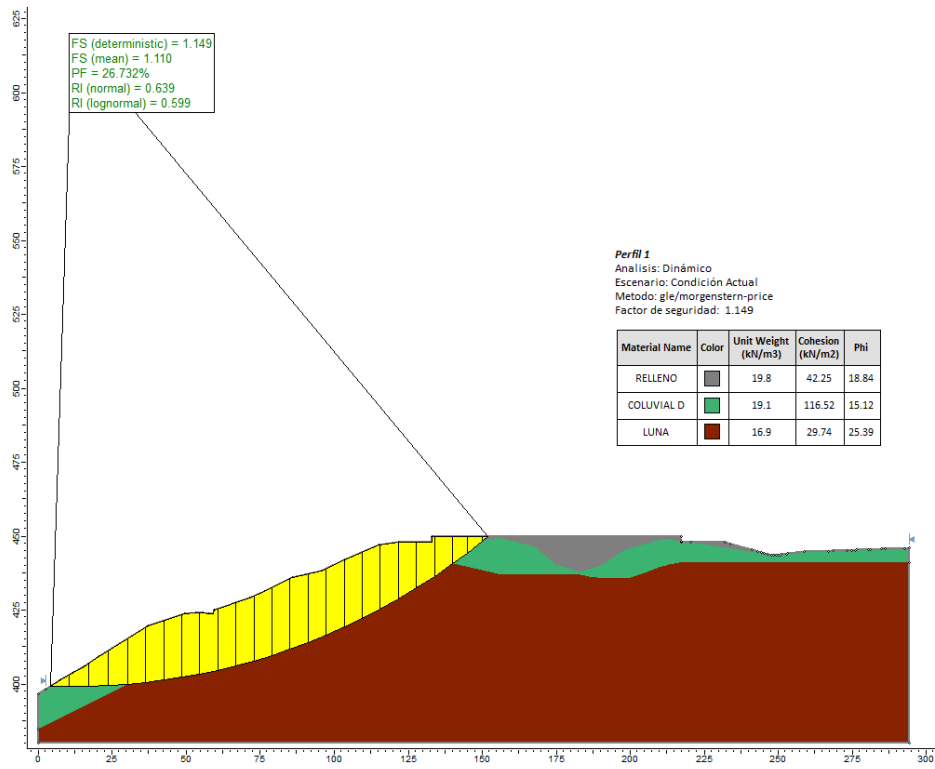


Figura 84

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones

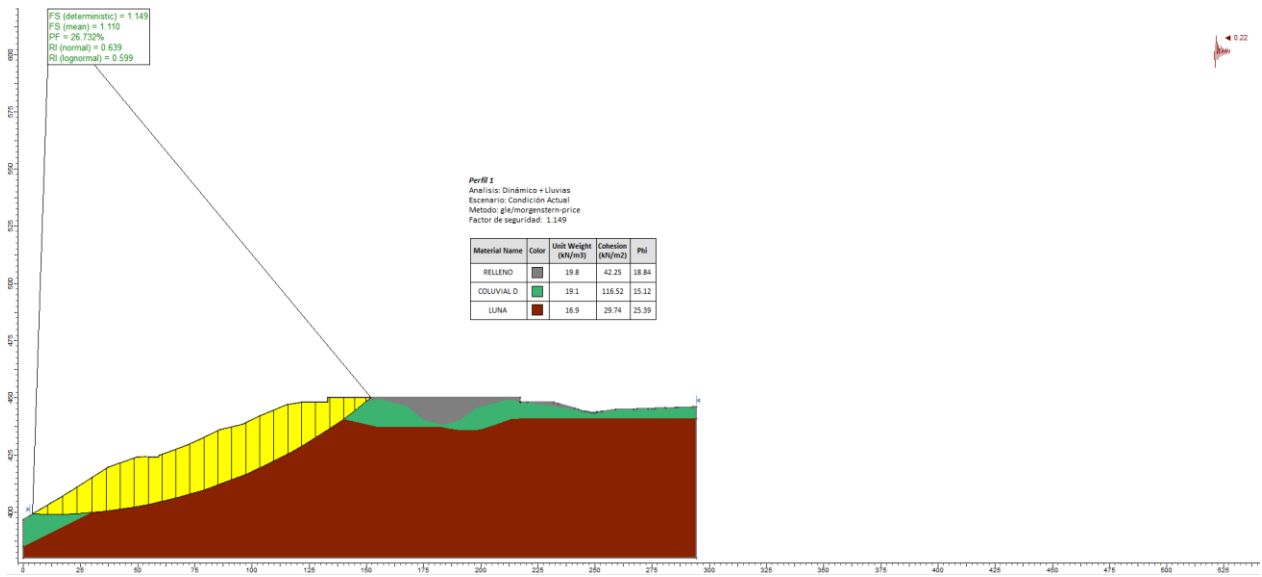


Figura 85

Análisis Estático Perfil 2. Cortes excavaciones

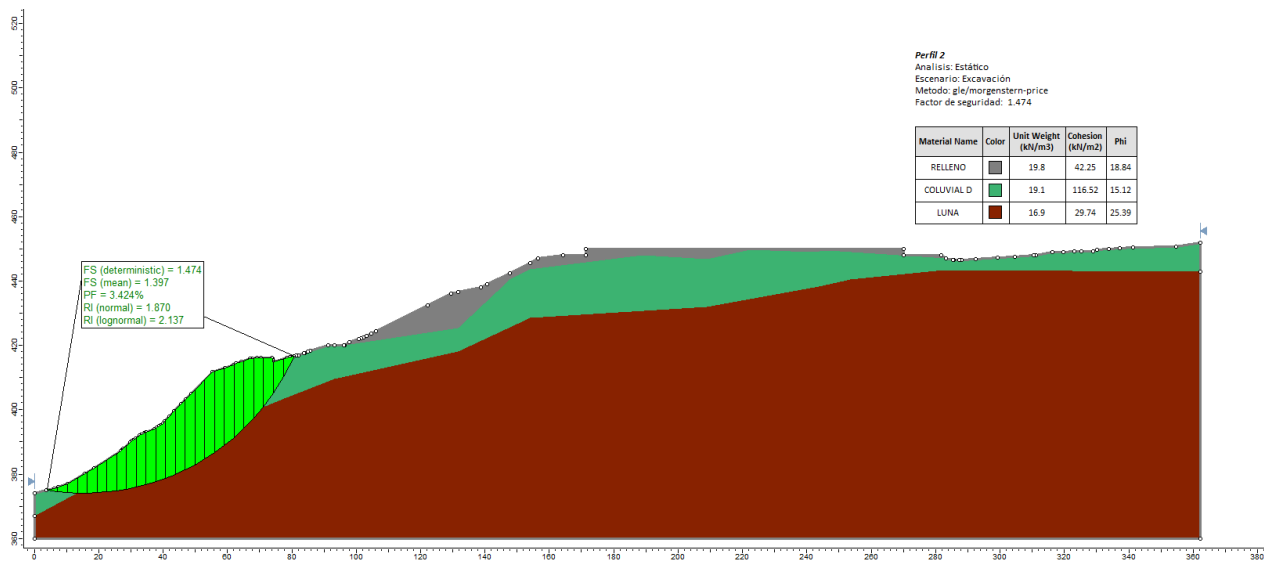


Figura 86.

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 2. Cortes excavaciones

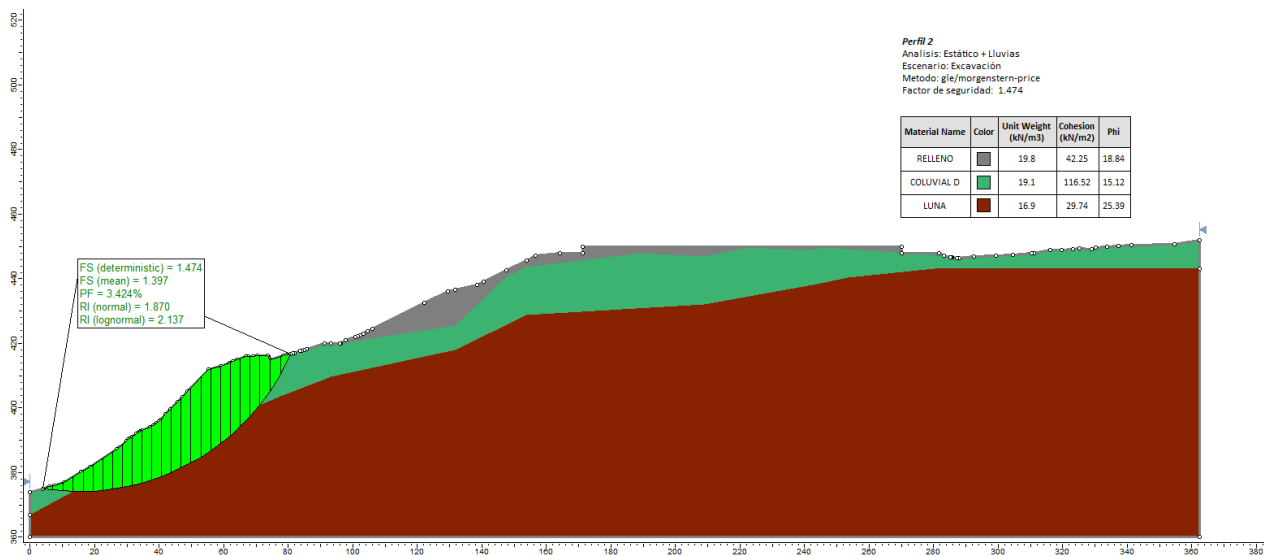


Figura 87.

Análisis Dinámico, Perfil 2. Cortes excavaciones

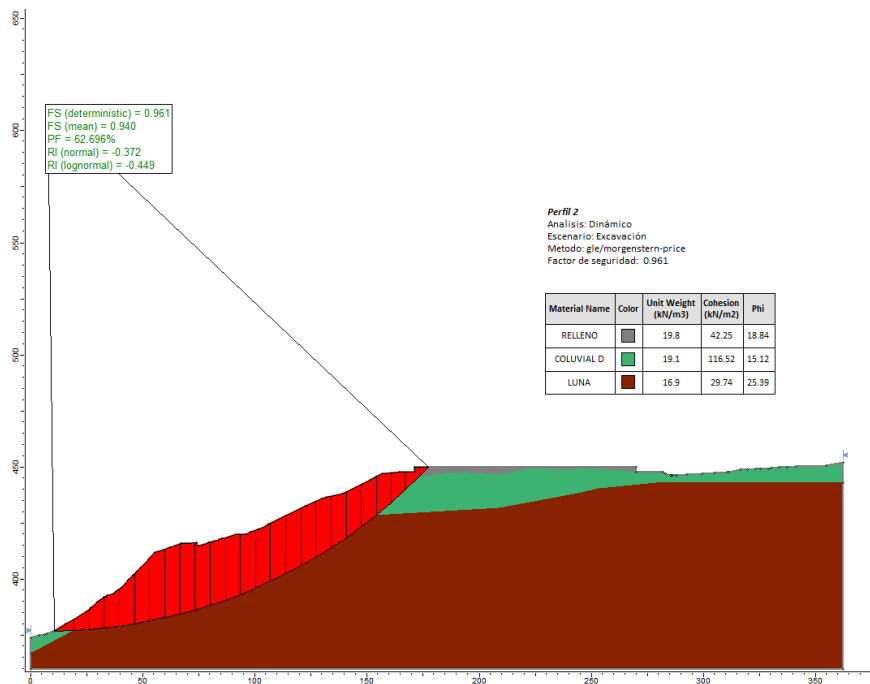


Figura 88

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Cortes excavaciones

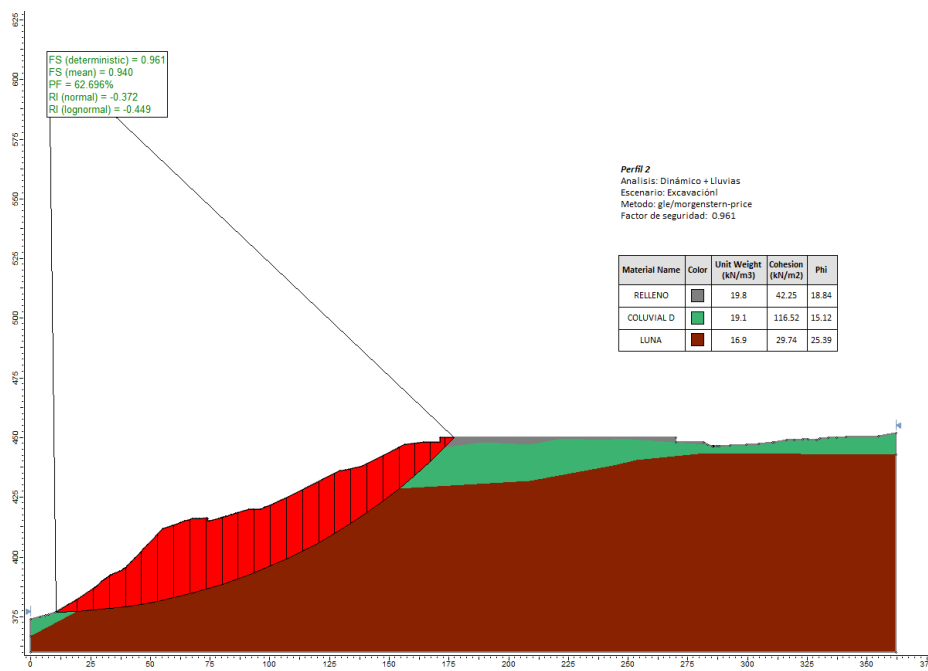


Figura 89.

Análisis Estático, Perfil 3. Cortes excavaciones

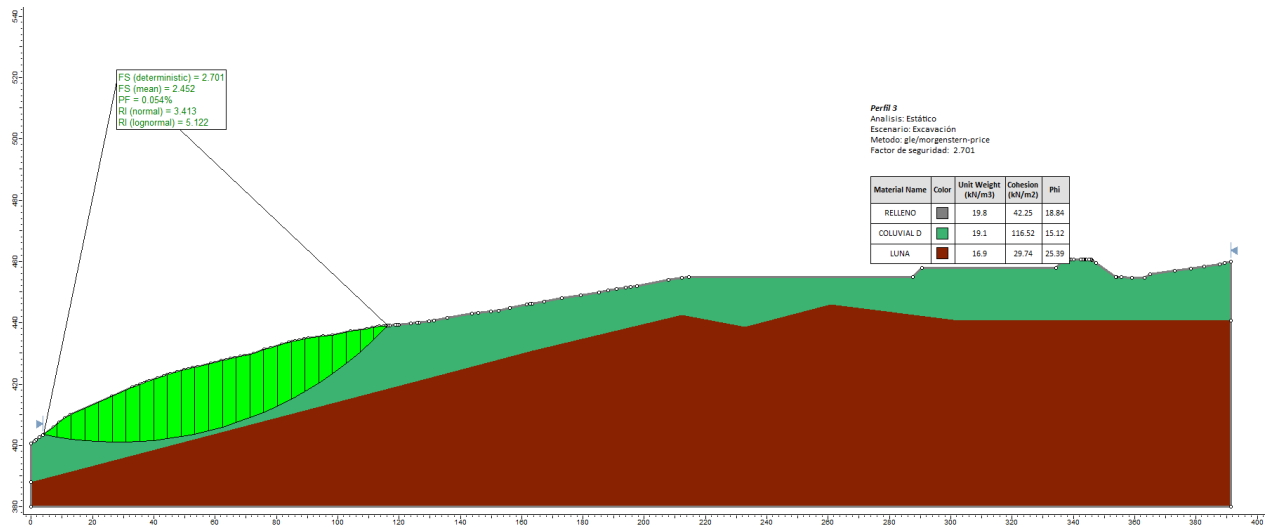


Figura 90.

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 3. Cortes excavaciones

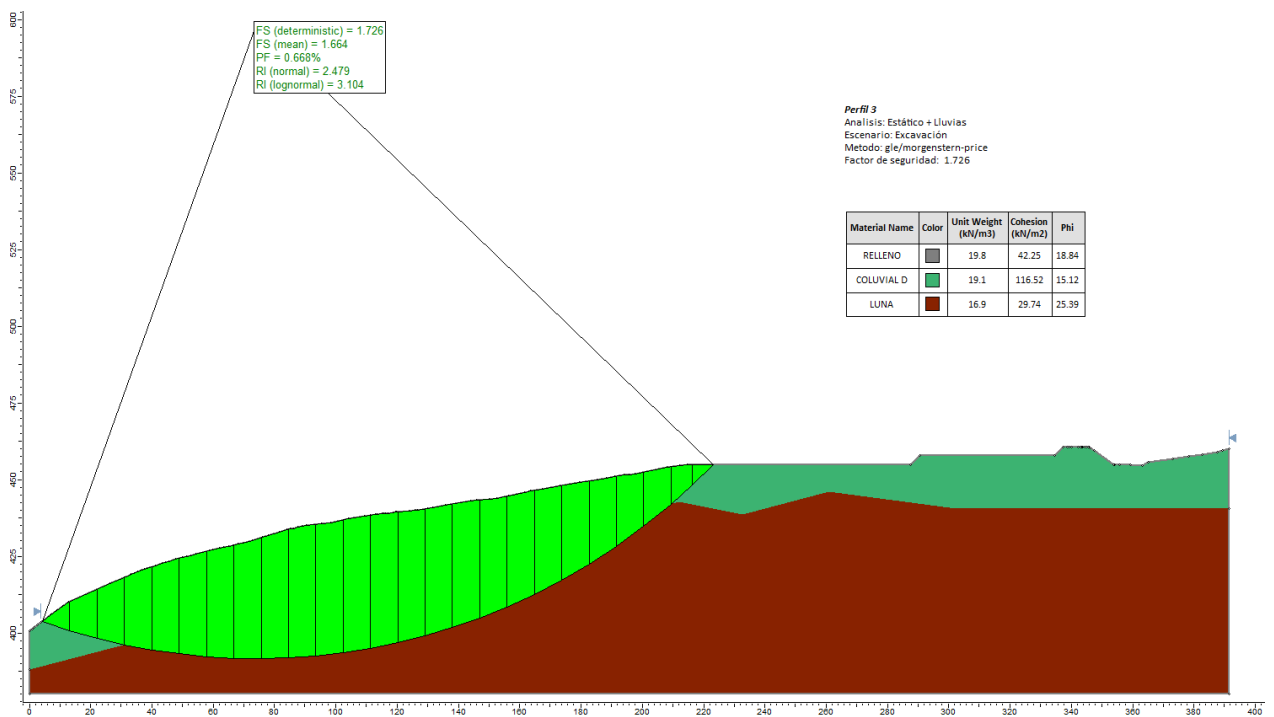


Figura 91.

Análisis Dinámico, Perfil 3. Cortes excavaciones

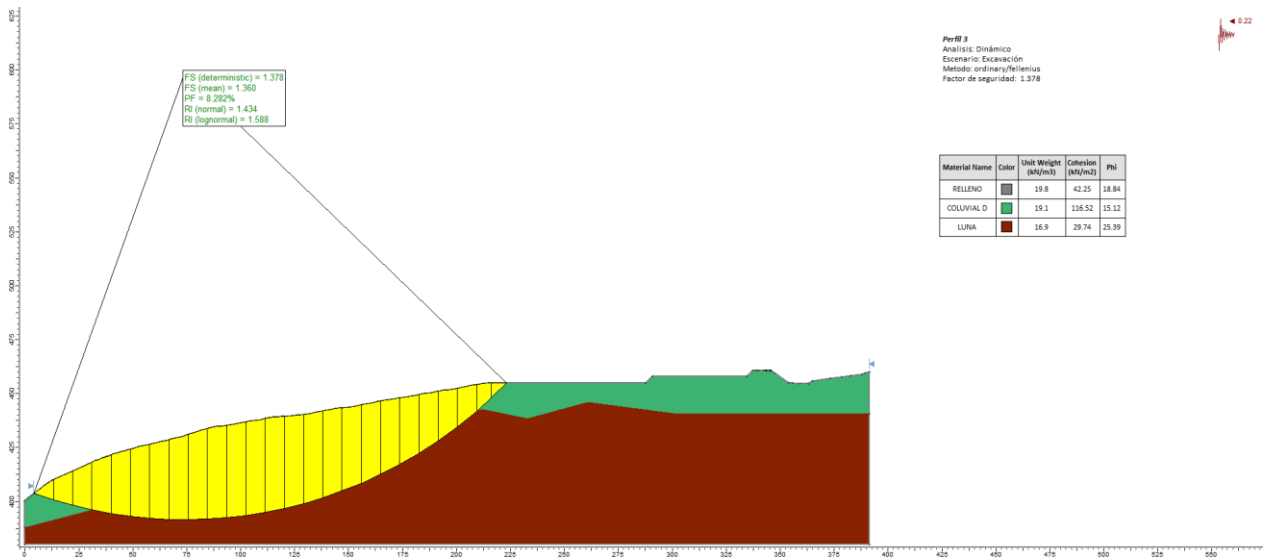


Figura 92.

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Cortes excavaciones

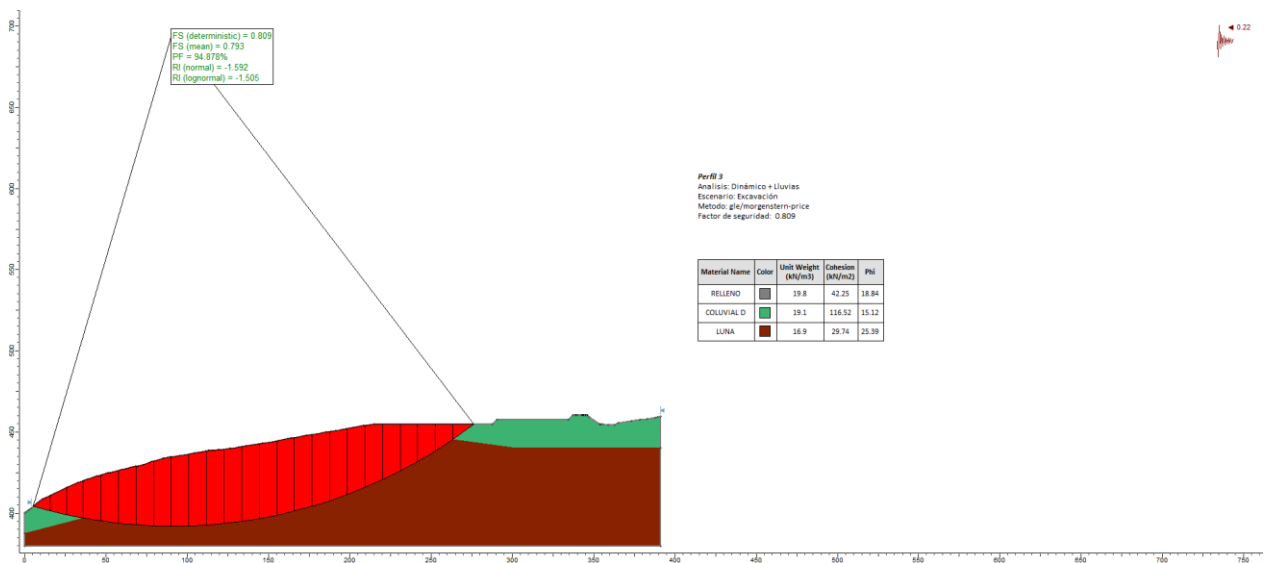


Figura 93.

Análisis Estático, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones

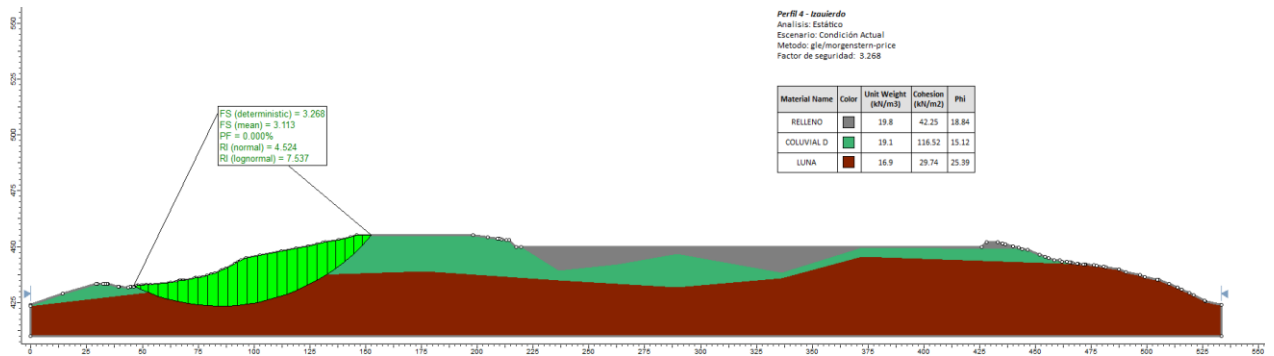


Figura 94.

Análisis Estático, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones

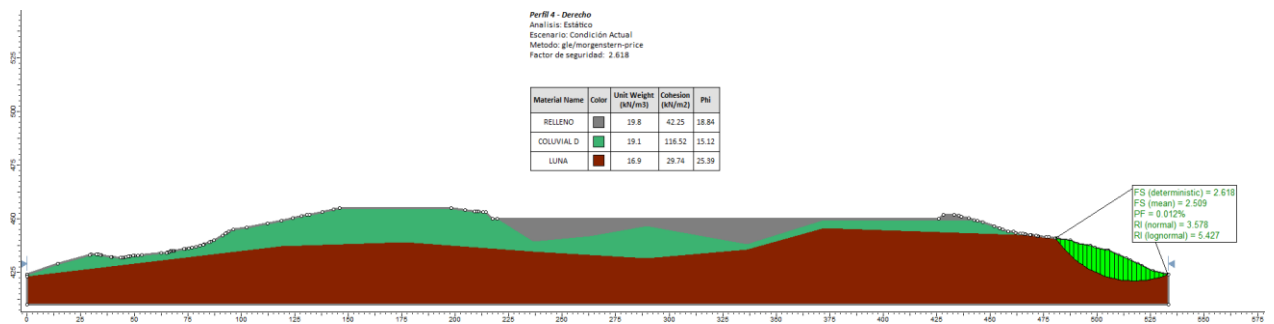


Figura 95

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones

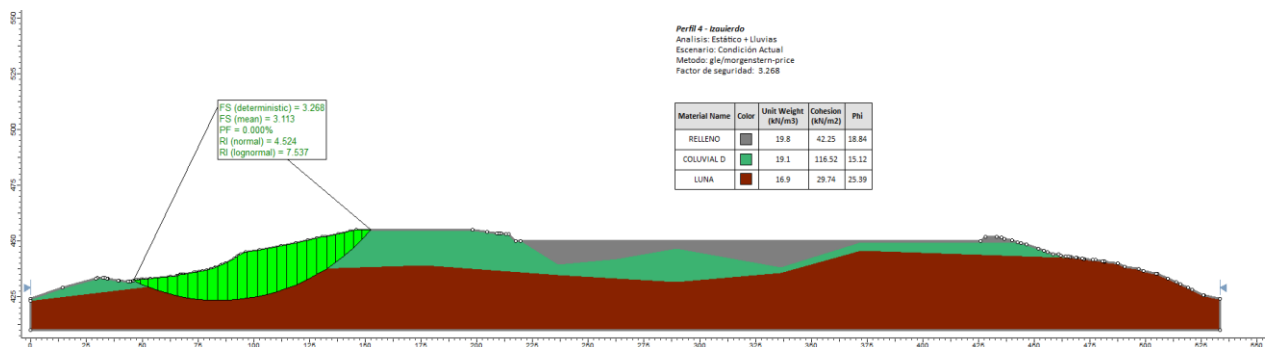


Figura 96

Estático + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones

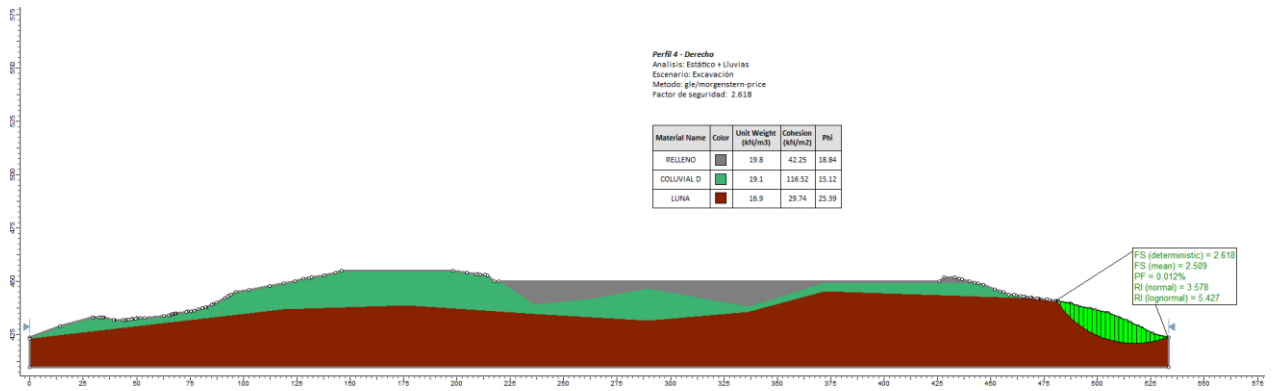


Figura 97.

Análisis Dinámico, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones

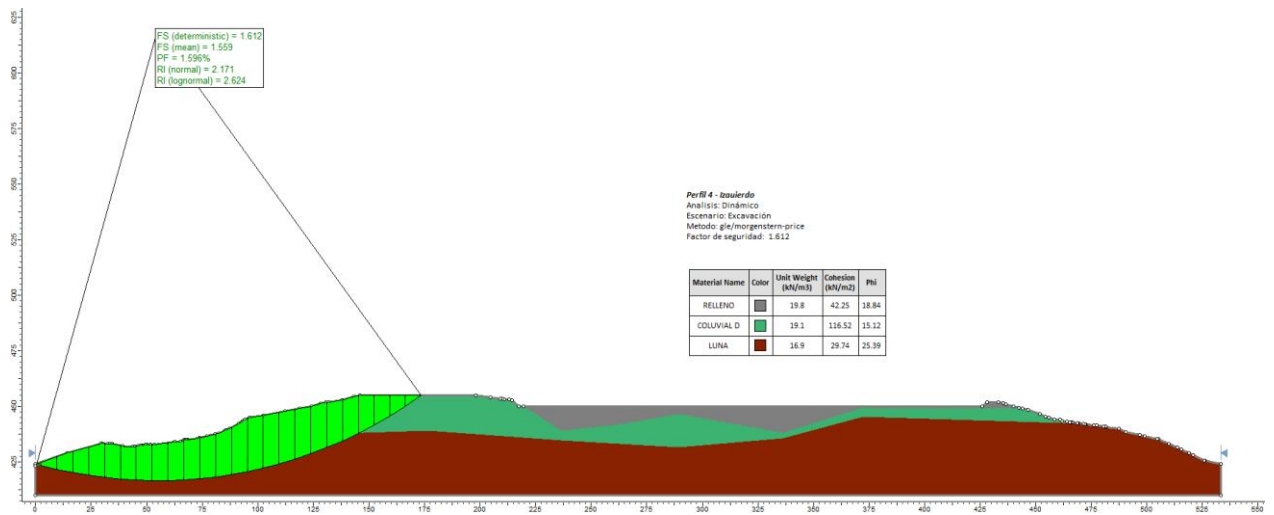


Figura 98.

Análisis Dinámico, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones

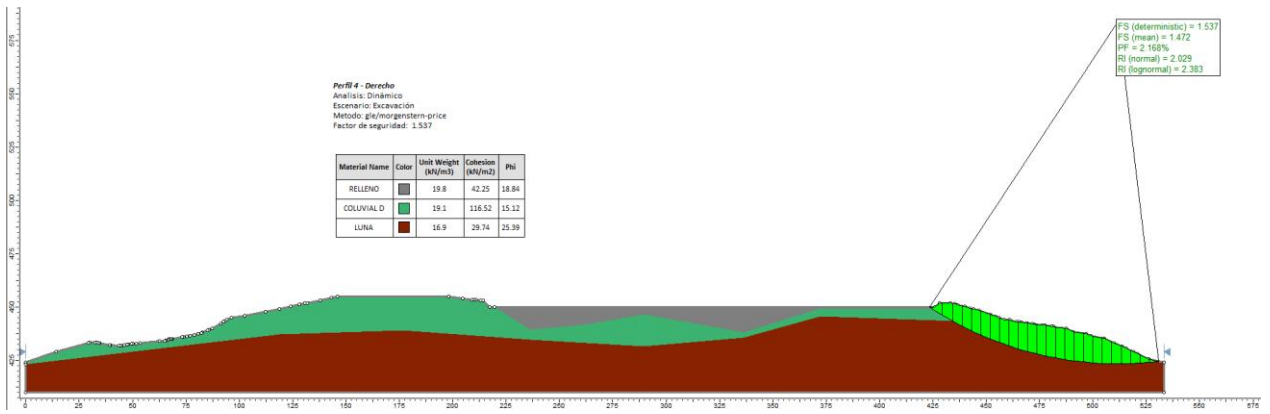


Figura 99

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones

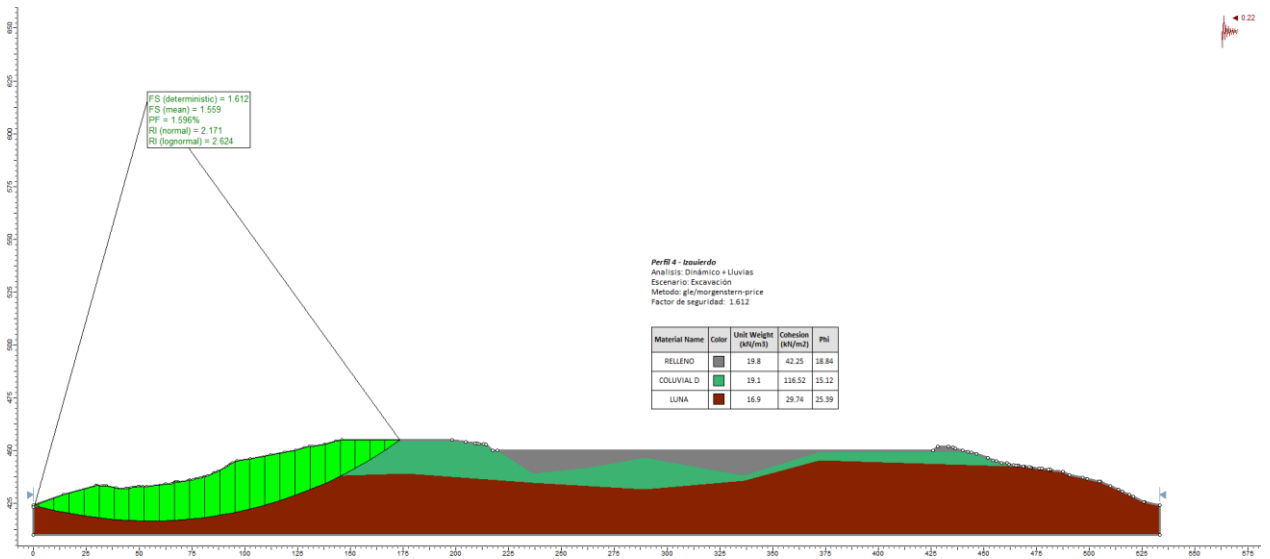
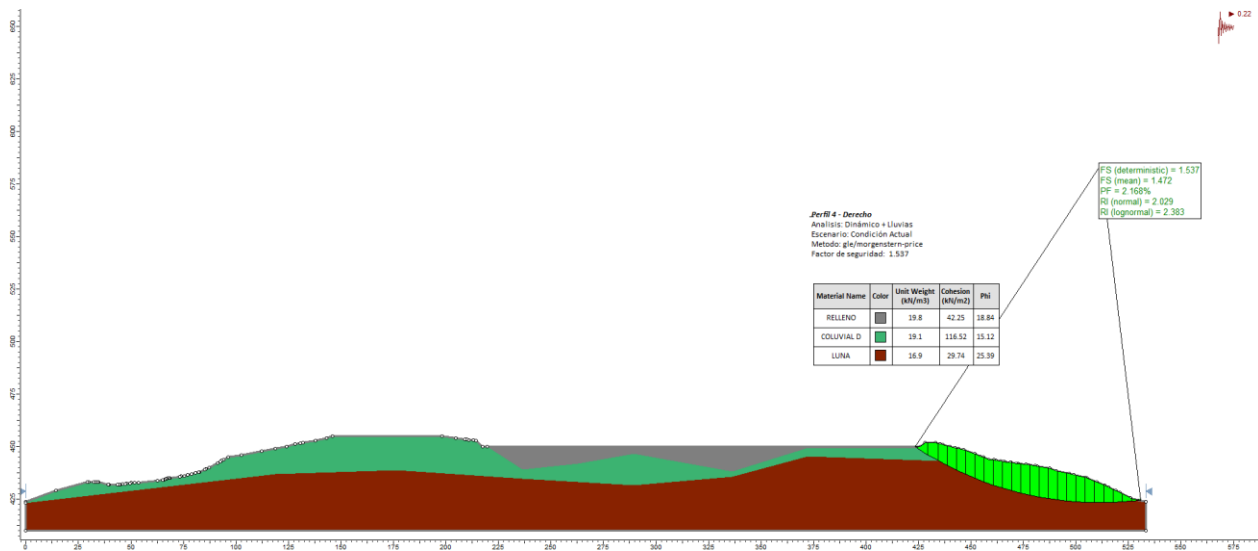


Figura 100.*Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Cortes*

5.11.4.3 Escenario 3 – Considerando cortes y cargas de edificaciones. Este escenario corresponde a los cortes mostrados en el escenario 2 pero incluyendo la carga de las edificaciones que serán construidas en el predio de estudio. Los perfiles realizados consideran las zonas más críticas según los planos arquitectónicos. A continuación, se muestran los valores de factor de seguridad obtenidos.

Tabla 39*Análisis de estabilidad Escenario 3 cortes y cargas de edificaciones*

ESCENARIO 3				
PERFIL	CONDICION	ANALISIS	F.S. GLE/ M-P	PF
Perfil 1	Construido	Estático	1,905	0,29%
Perfil 1	Construido	Estático + Lluvias	1,905	0,29%
Perfil 1	Construido	Dinámico	1,142	27,95%
Perfil 1	Construido	Dinámico + Lluvias	1,142	27,95%
Perfil 2	Construido	Estático	1,478	3,42%
Perfil 2	Construido	Estático + Lluvias	1,478	3,42%
Perfil 2	Construido	Dinámico	0,955	64,01%
Perfil 2	Construido	Dinámico + Lluvias	0,955	64,19%
Perfil 3	Construido	Estático	2,071	0,05%

ESCENARIO 3				
PERFIL	CONDICION	ANALISIS	F.S. GLE/ M-P	PF
Perfil 3	Construido	Estático + Lluvias	1,723	0,68%
Perfil 3	Construido	Dinámico	1,376	8,35%
Perfil 3	Construido	Dinámico + Lluvias	0,771	99,52%
Perfil 4 IZQ	Construido	Estático	3,21	0,00%
Perfil 4 IZQ	Construido	Estático + Lluvias	3,21	0,00%
Perfil 4 IZQ	Construido	Dinámico	1,533	2,32%
Perfil 4 IZQ	Construido	Dinámico + Lluvias	1,6	1,55%
Perfil 4 DER	Construido	Estático	2,618	0,01%
Perfil 4 DER	Construido	Estático + Lluvias	2,618	0,01%
Perfil 4 DER	Construido	Dinámico	1,491	3,34%
Perfil 4 DER	Construido	Dinámico + Lluvias	1,431	6,11%

Nota: Resultados software equilibrio límite.

Figura 101.

Análisis Estático, Perfil 1. Cortes y cargas de edificaciones

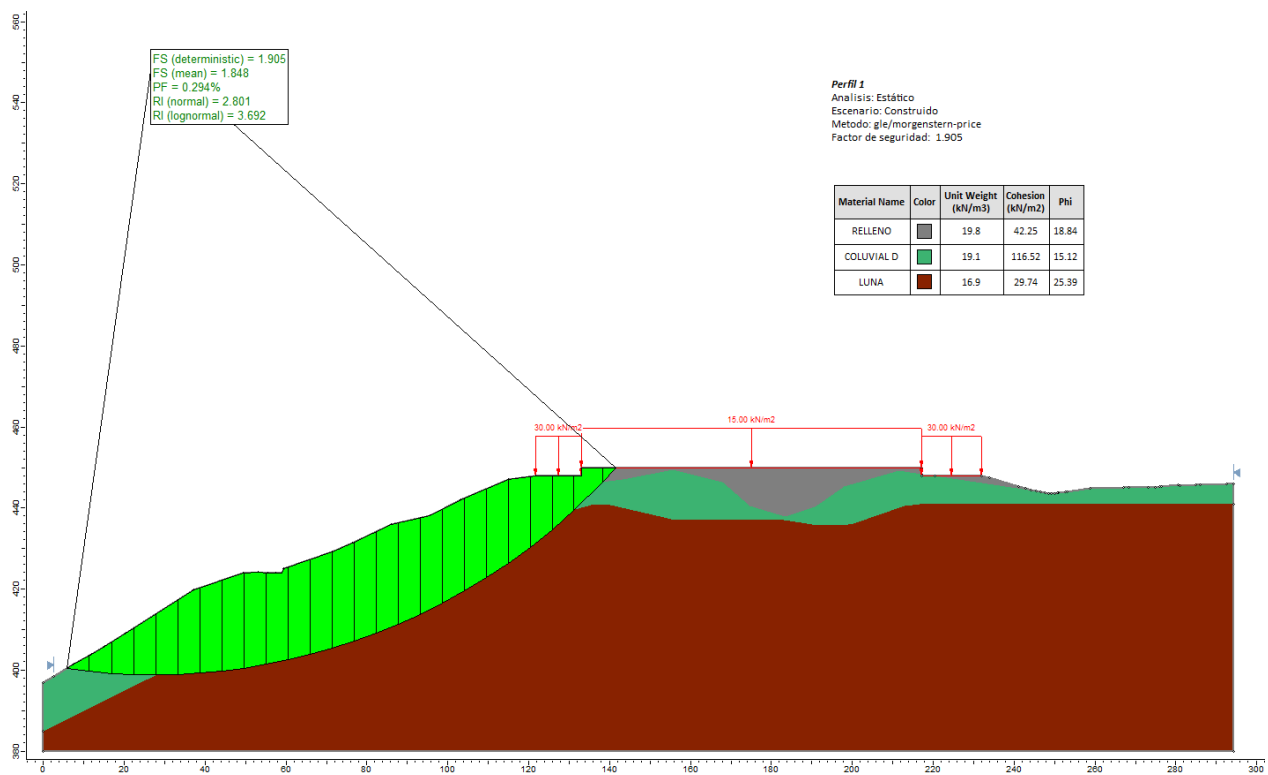


Figura 102.

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

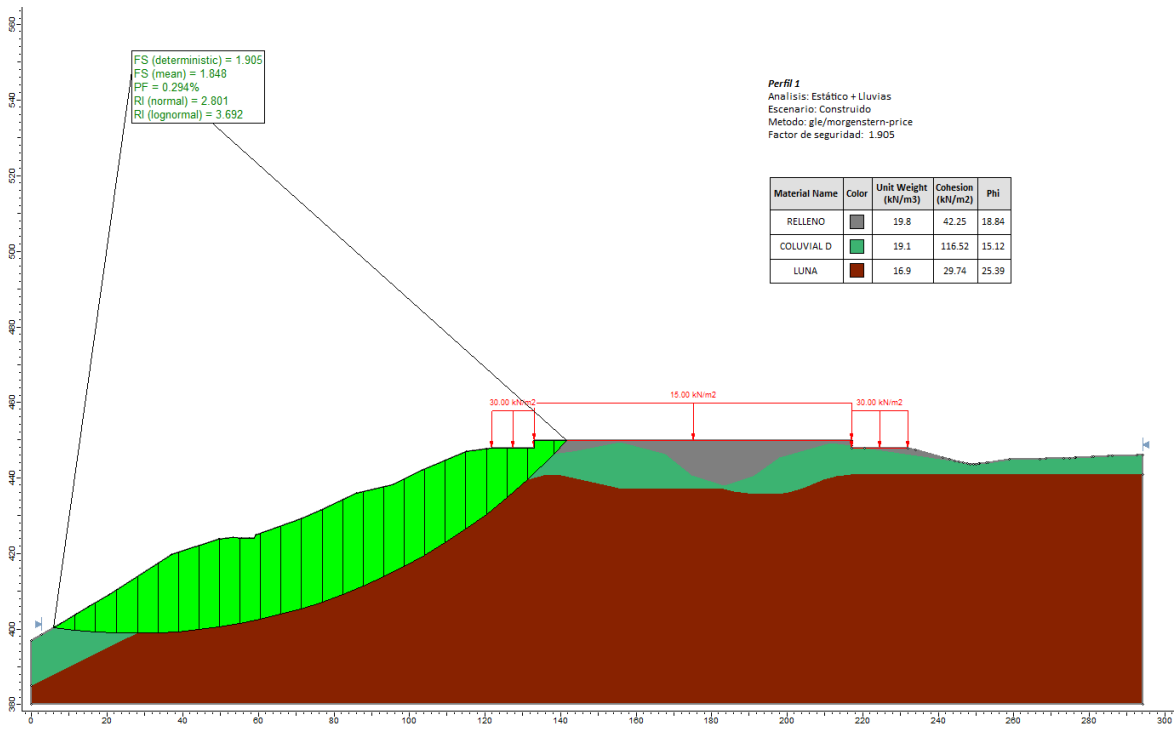


Figura 103.

Análisis Dinámico, Perfil 1. Cortes y cargas de edificaciones

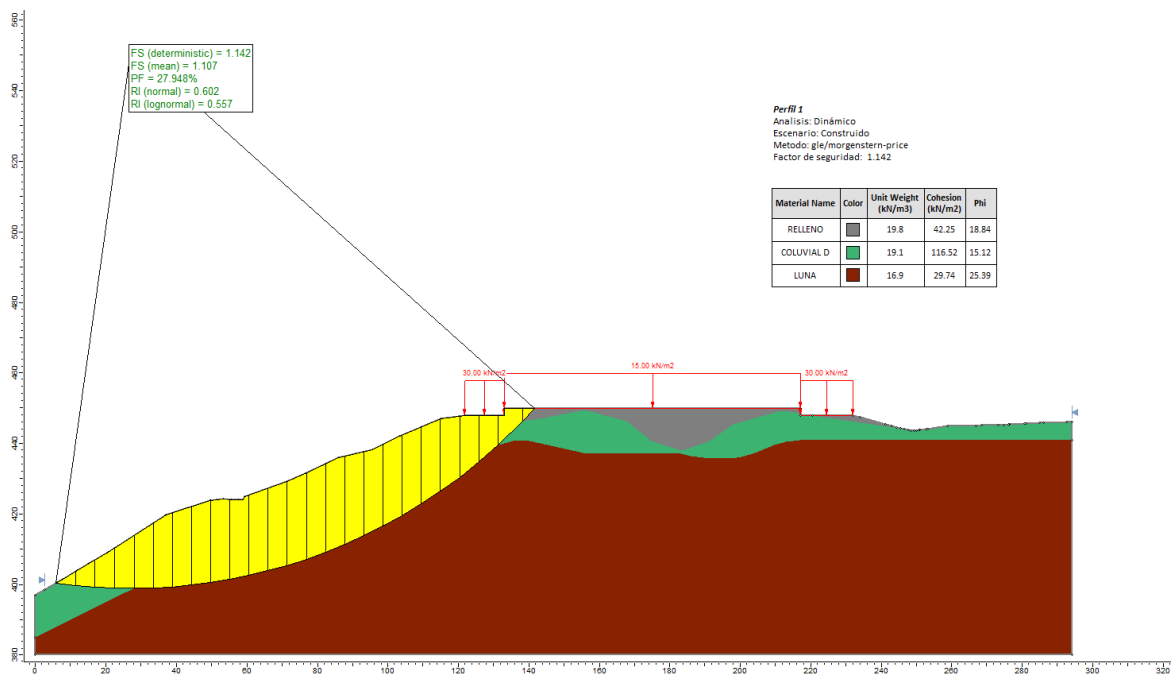


Figura 104.

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 1. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

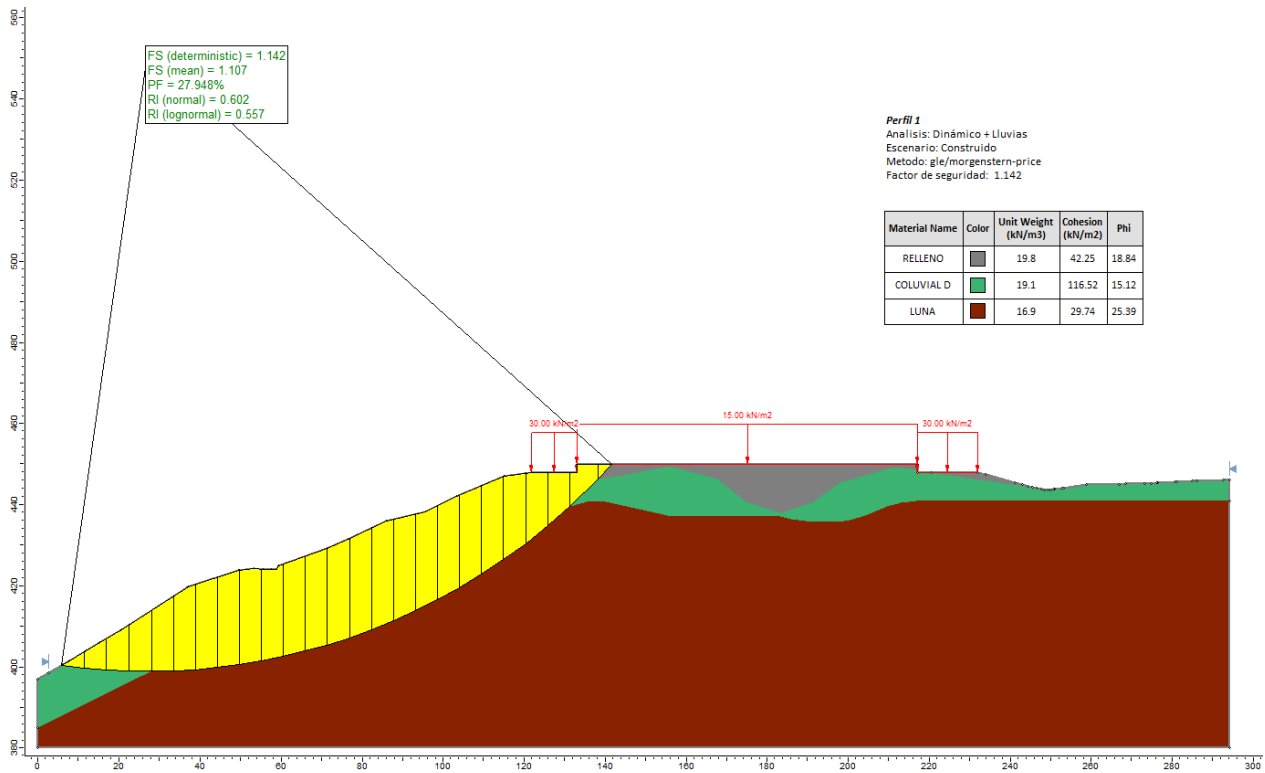


Figura 105.

Análisis Estático, Perfil 2. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

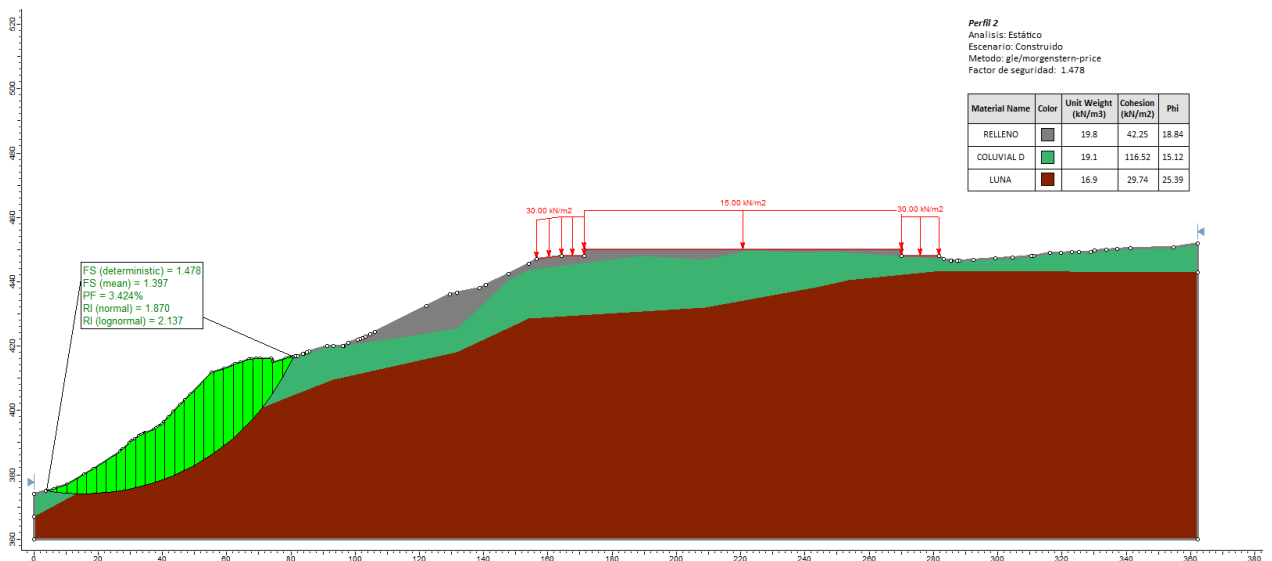


Figura 106

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 2. Cortes y cargas de edificaciones

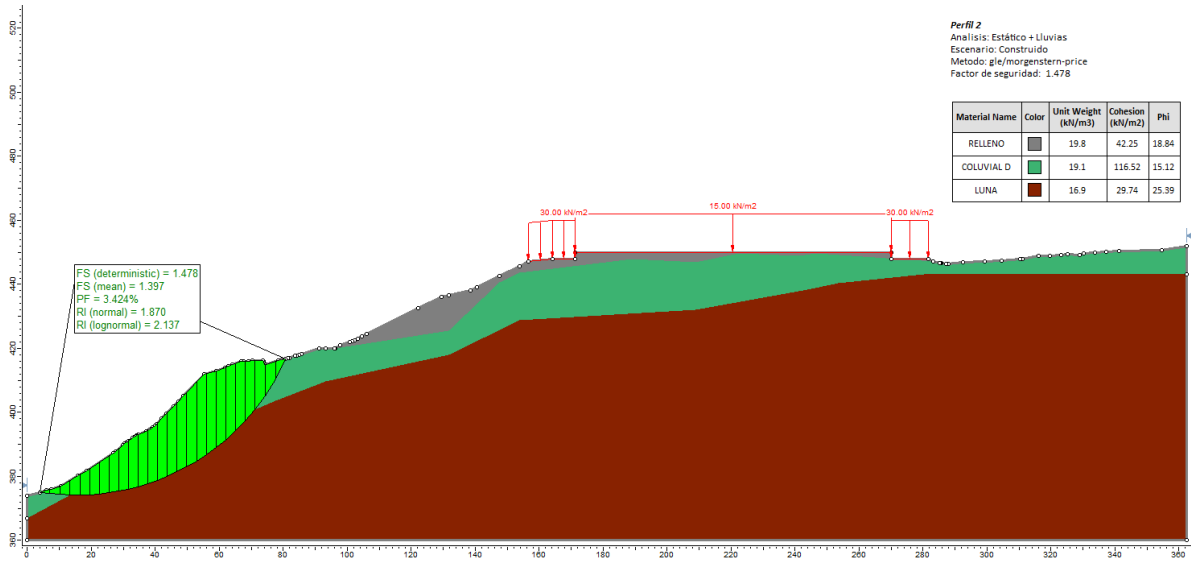


Figura 107.

Análisis Dinámico, Perfil 2. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

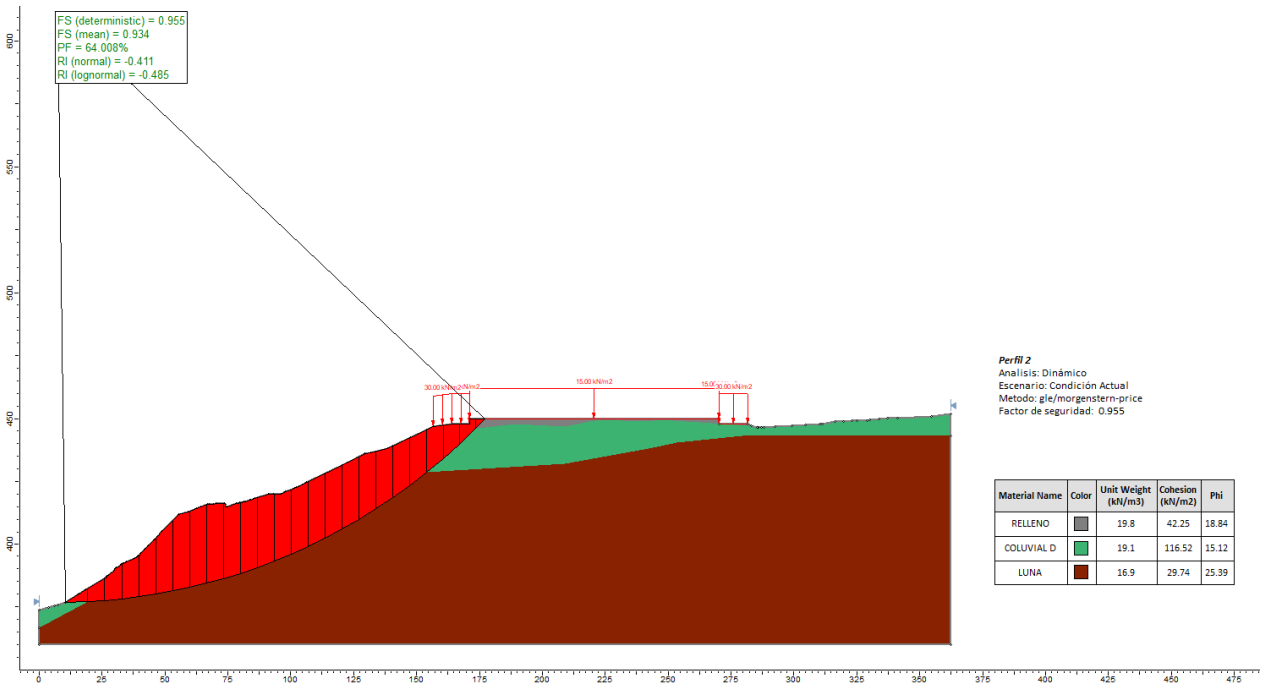


Figura 108.

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

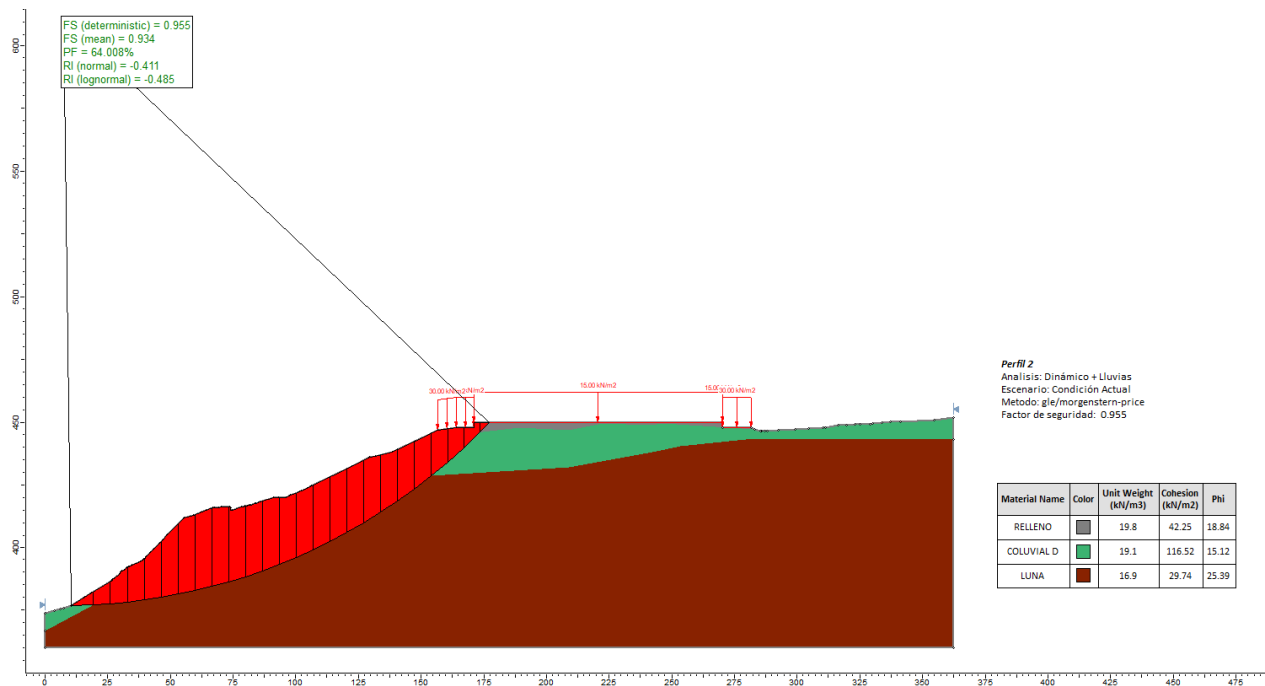


Figura 109.

Análisis Estático, Perfil 3. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

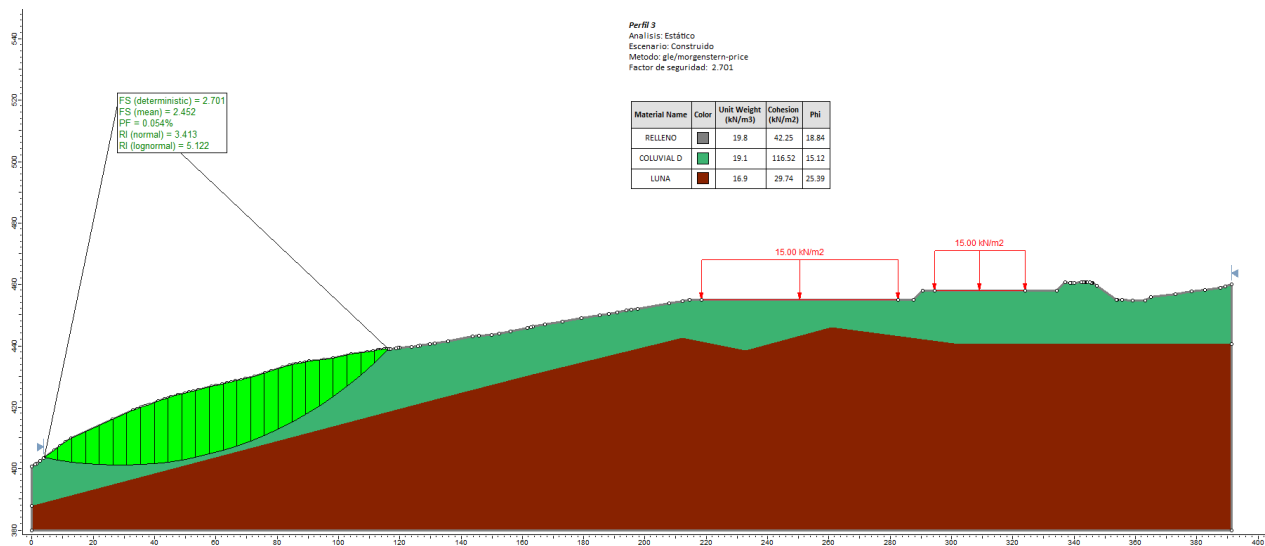


Figura 110.

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 3. Cortes y cargas de edificaciones

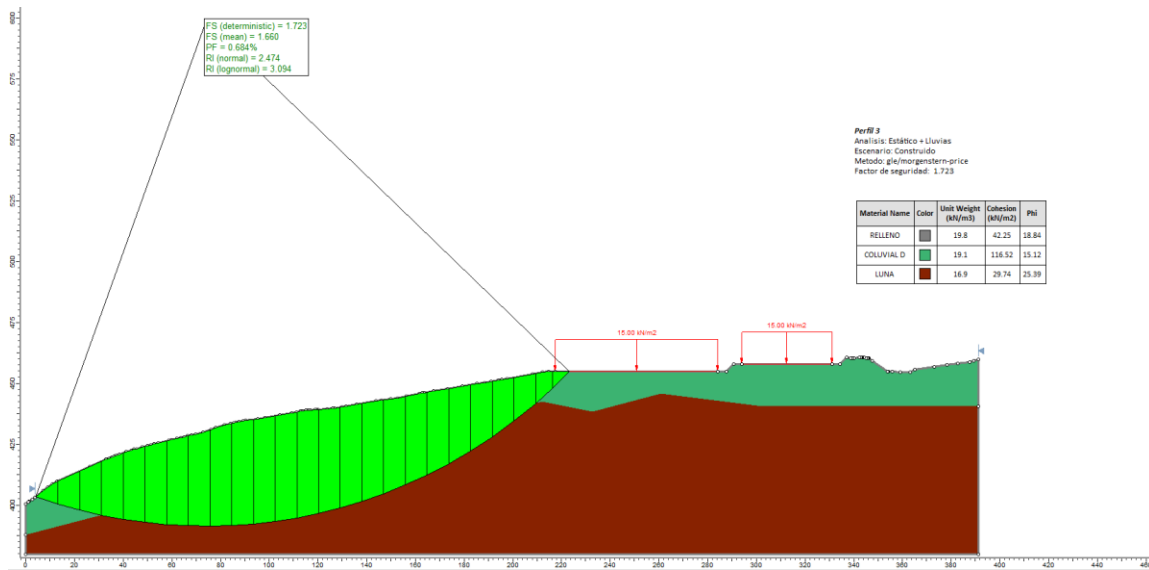


Figura 111.

Análisis Dinámico, Perfil 3. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

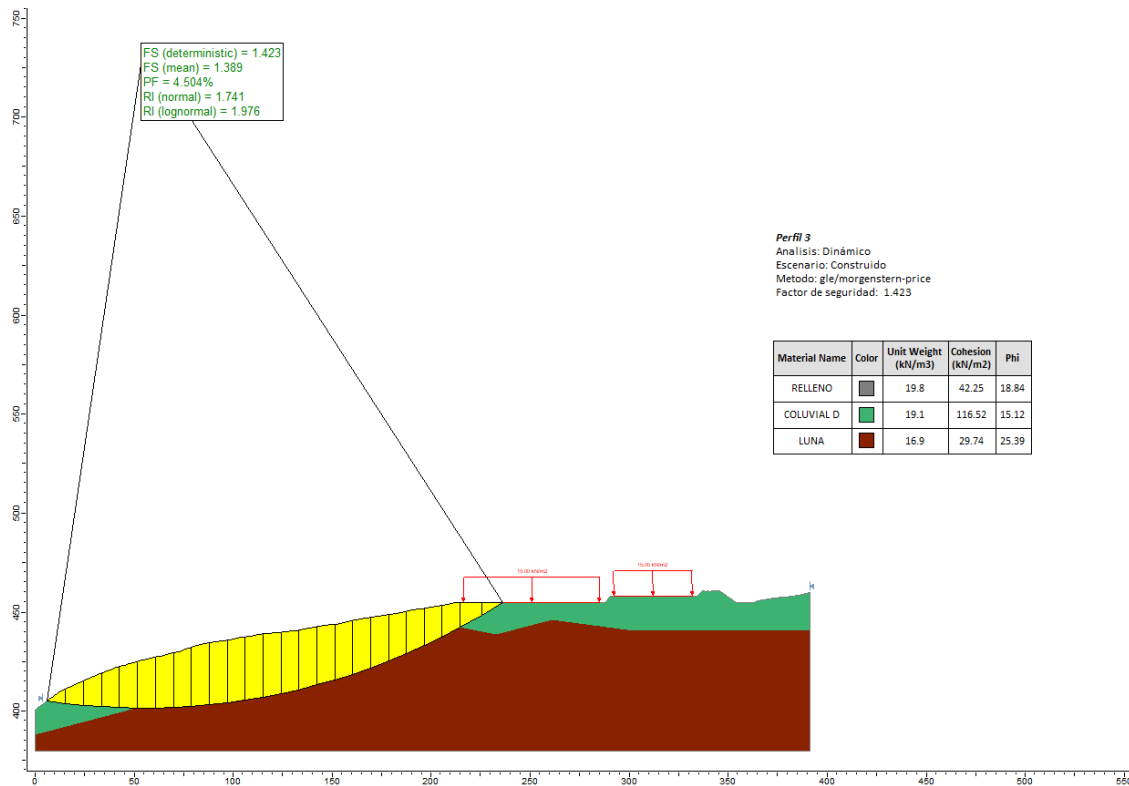


Figura 112

Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

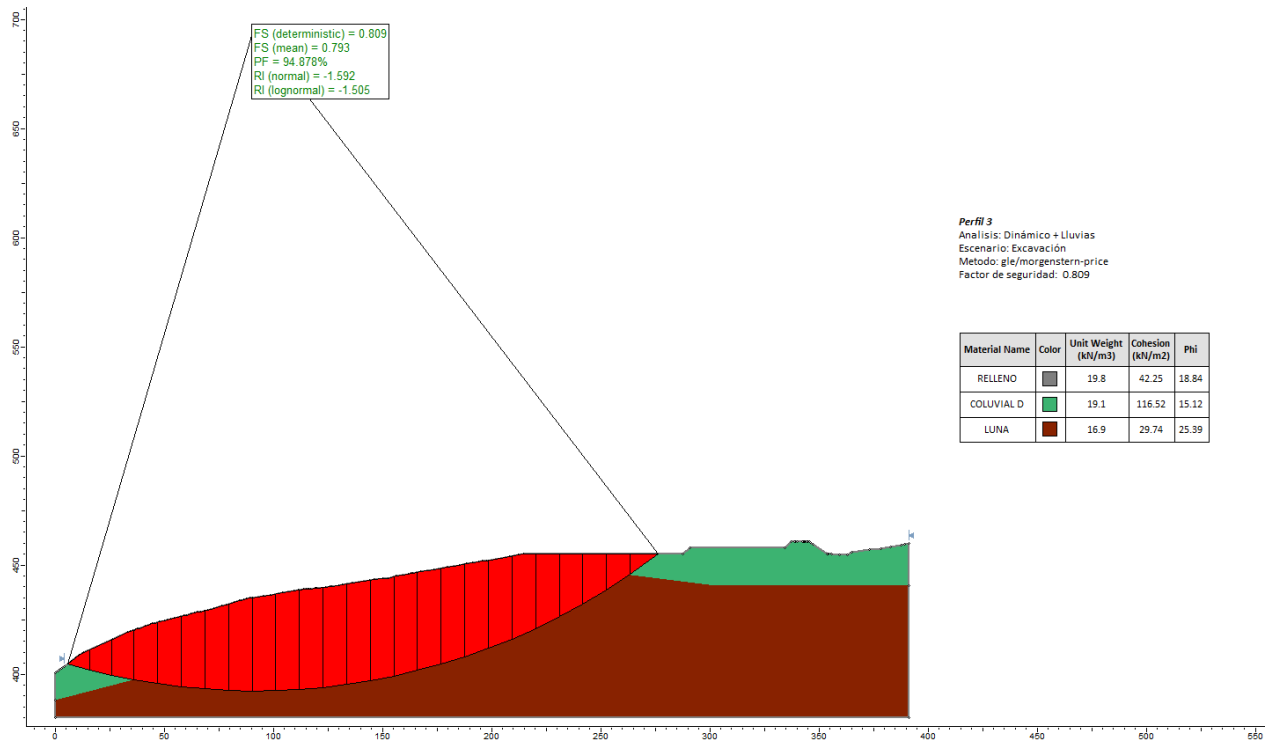


Figura 113.

Análisis Estático, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

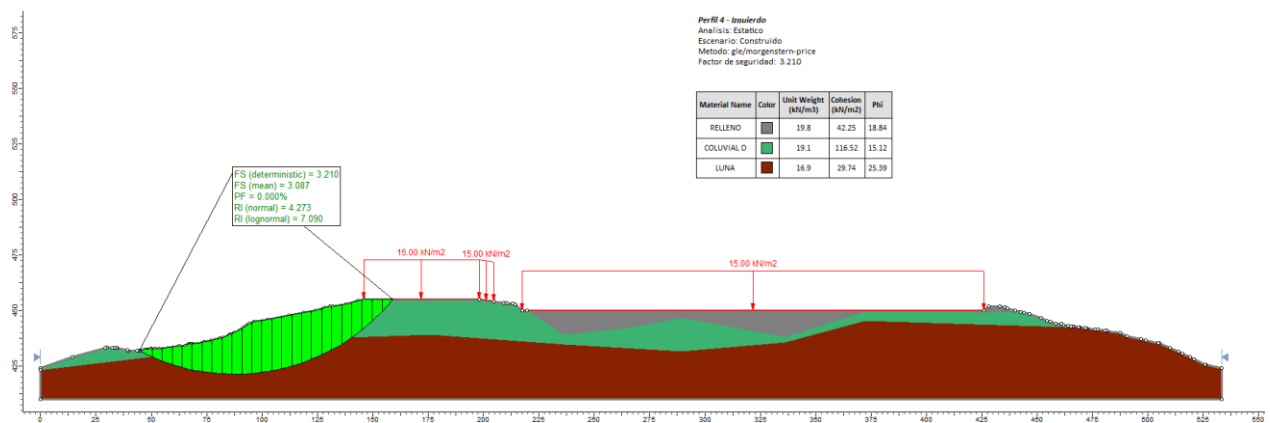


Figura 114.

Análisis Estático, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

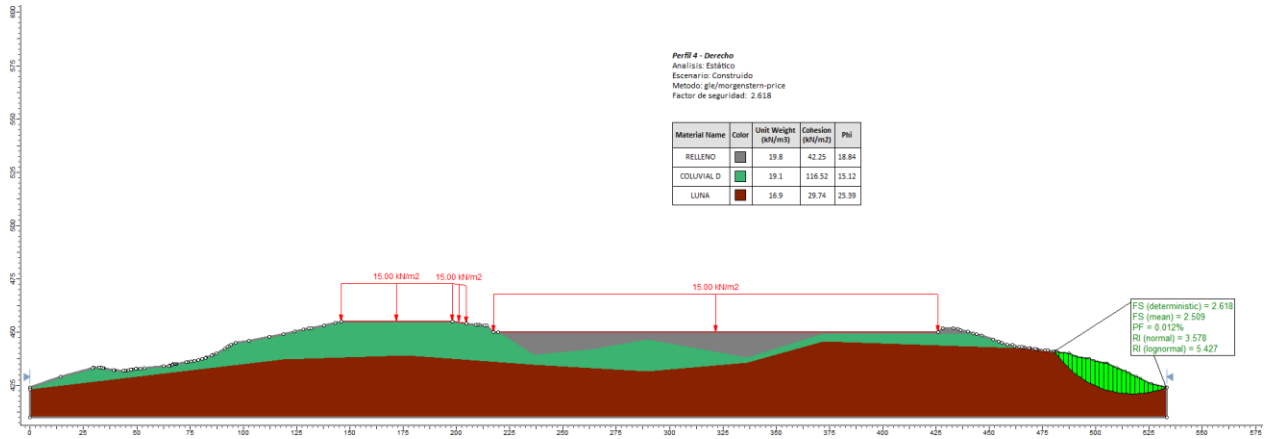


Figura 115

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

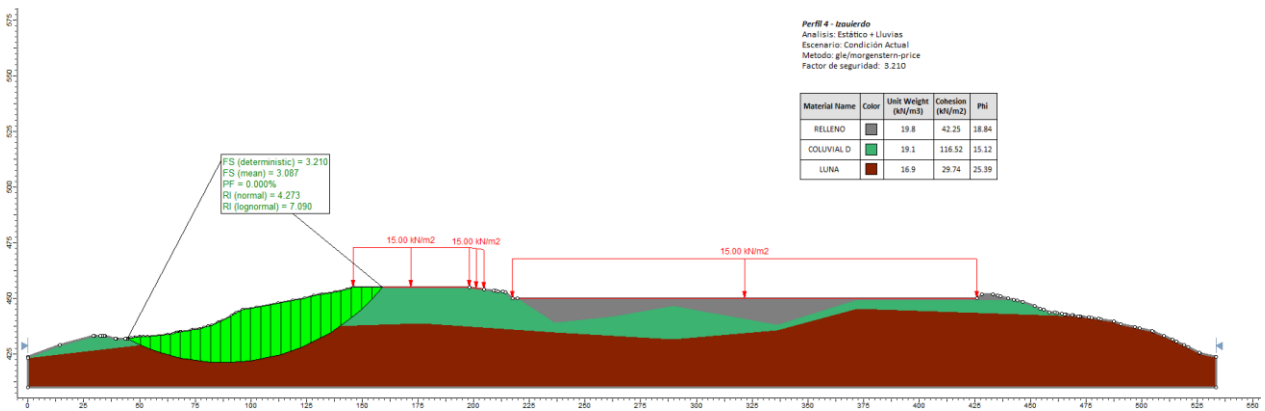


Figura 116

Análisis Estático + Lluvias, Perfil 4 - Derecho. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

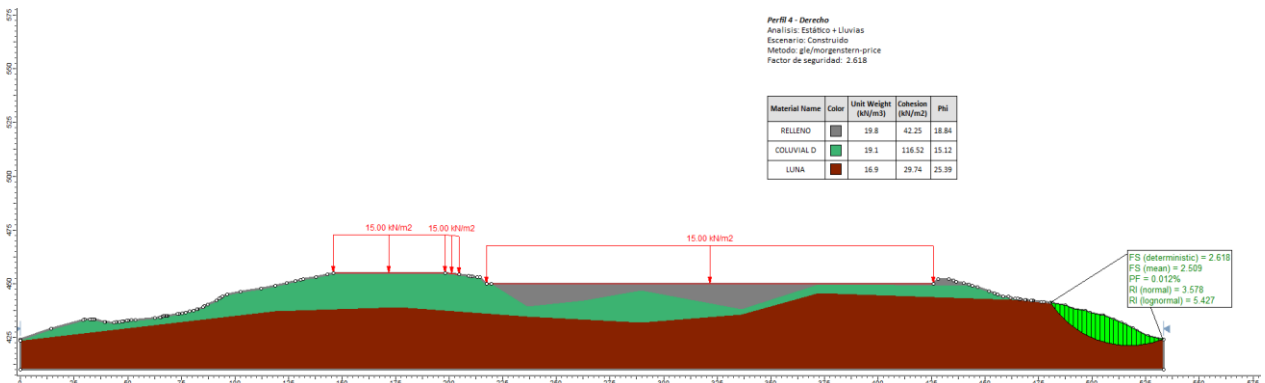


Figura 117

Análisis Dinámico, Perfil 4 - Izquierdo. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones

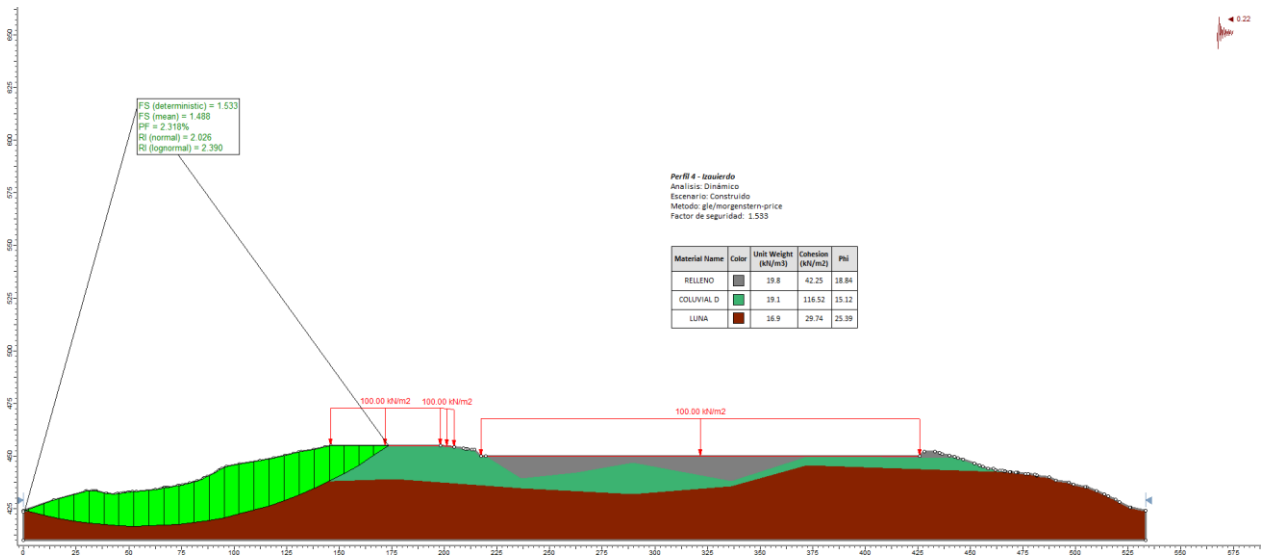
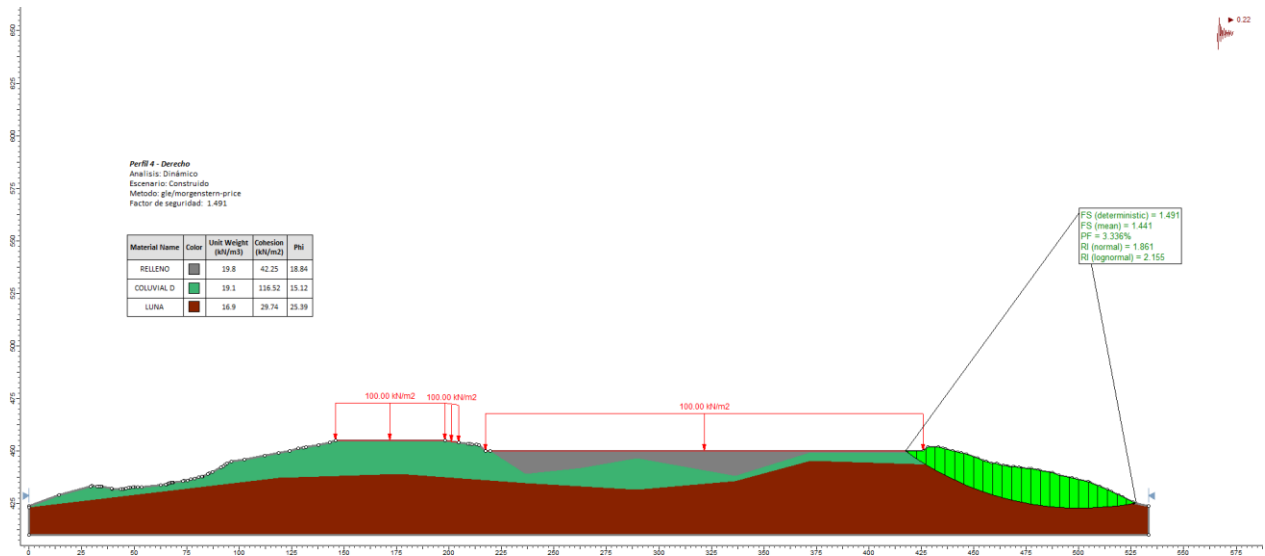


Figura 118

Análisis Dinámico, Perfil 4 -Derecho. Cortes excavaciones y cargas de edificaciones



Se realiza el análisis de construcción de anclajes como obras de estabilización de laderas en el escenario donde se encuentra construido el parque y se presenta la condición de sismo y lluvias.

Se debe realizar un perfilado uniforme y estable a lo largo del talud en el que se va colocar los anclajes, con el fin de que no queden materiales sueltos sobre este, así mismo se debe tener en cuenta el espaciamiento que se debe dejar entre ellos.

Los anclajes fueron diseñados con una longitud de bulbo como mínimo de 15 m que deben llegar hasta la roca y una longitud libre por delante de la superficie de falla.

El bulbo será inyectado a una presión como mínimo de 5.0 Kg/cm² y máxima de 10.0 Kg/cm² y cada anclaje puede soportar una carga de 45 T y quedarán distribuidos en una cuadrícula de 2.5 m en sentido vertical y 2.5 m en sentido horizontal de acuerdo con las memorias de cálculo del Anexo E.

Tabla 40.

Análisis de estabilidad Escenario 3 cortes sobrecargas y obras de estabilización

ESCENARIO 3				
PERFIL	CONDICION	ANALISIS	F.S. GLE/ M-P	PF
Perfil 1	Construido + Anclajes	Dinámico + Lluvias	1.537	1.52%
Perfil 2	Construido + Anclajes	Dinámico + Lluvias	1.275	13.05%
Perfil 3	Construido + Manejo de aguas de escorrentía	Dinámico + Lluvias	1.292	11.48%

Nota: Resultados software equilibrio límite.

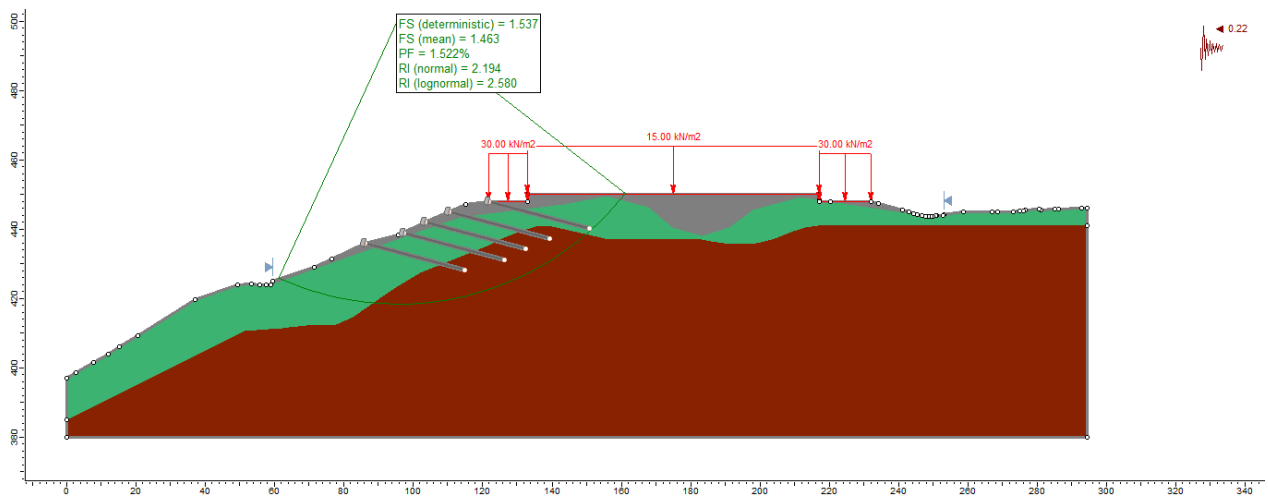
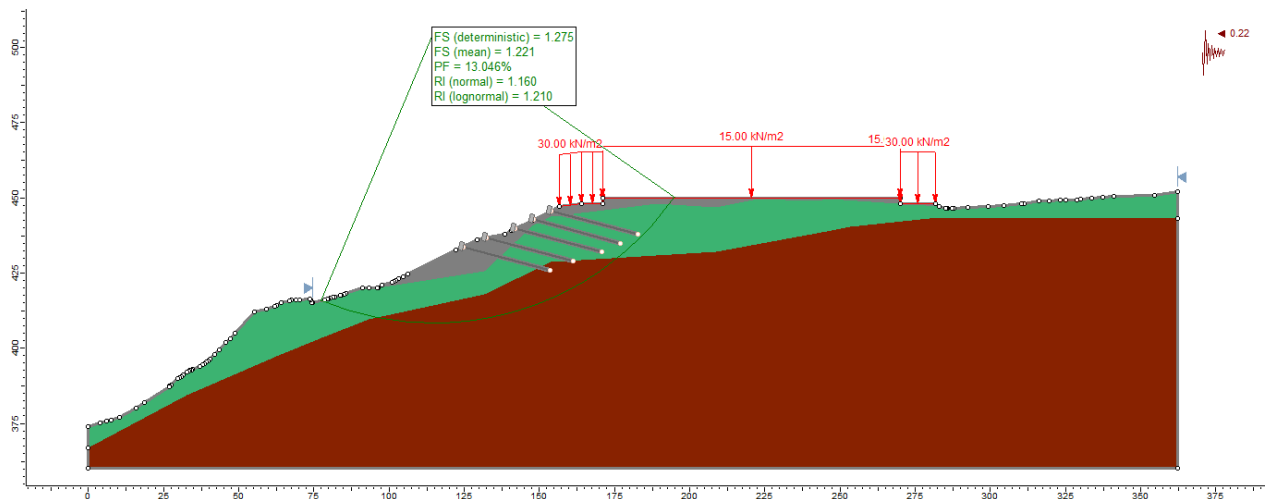
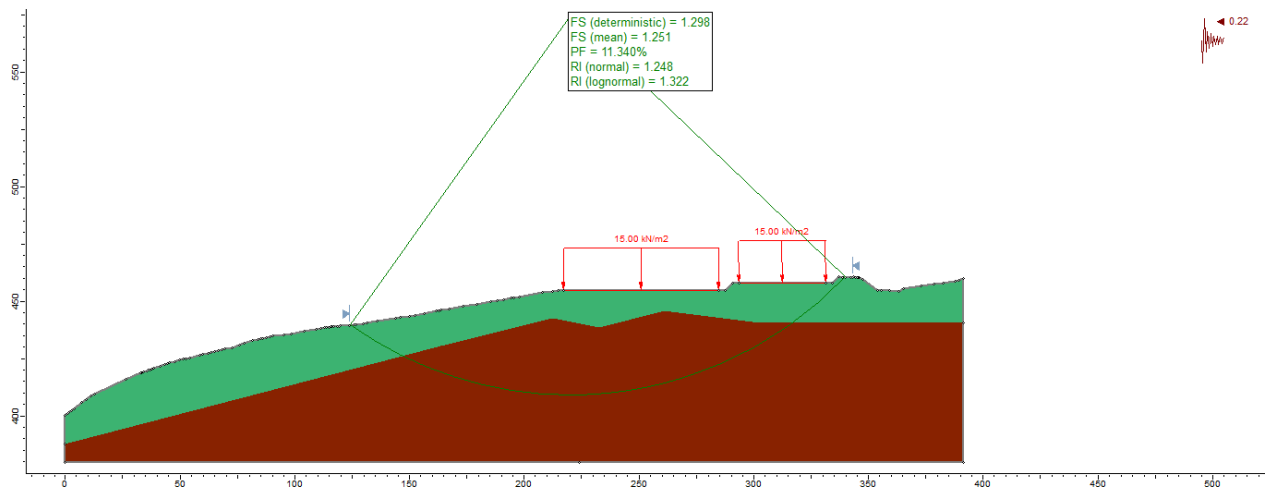
Figura 119.*Análisis Dinámico + Lluvias , Perfil 1. Obras en ladera***Figura 120.***Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 2. Obras en ladera*

Figura 121.*Análisis Dinámico + Lluvias, Perfil 3. Obras en ladera*

5.10.5 Nivel de Amenaza

La clasificación del nivel de amenaza para cada uno de los escenarios analizados se realizará mediante los valores de factor de seguridad de cada modelo de estabilidad, de acuerdo al criterio planteado en la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos del Servicio Geológico Colombiano:

Tabla 41.*Clasificación de amenaza*

Clasificación	Factor de seguridad
Amenaza baja	> 1.5
Amenaza media	1.1 – 1.5
Amenaza alta	< 1.

Según la anterior clasificación se definen las amenazas para cada escenario analizado como se muestra a continuación.

Tabla 42*Nivel de amenaza para cada escenario analizado*

PERFIL	ANÁLISIS	ACTUAL	EXCAVACION	CONSTRUIDO	OBRAS DE LADERA
		F.S. GLE/ M-P			
Perfil 1	Estático	1,9	1,9	1,9	1,9
Perfil 1	Estático + Lluvias	1,2	1,9	1,9	1,9
Perfil 1	Dinámico	1,1	1,1	1,1	1,5
Perfil 1	Dinámico + Lluvias	0,7	1,1	1,1	1,5
Perfil 2	Estático	1,5	1,5	1,5	1,5
Perfil 2	Estático + Lluvias	0,9	1,5	1,5	1,5
Perfil 2	Dinámico	1,0	1,0	1,0	1,3
Perfil 2	Dinámico + Lluvias	0,6	1,0	1,0	1,3
Perfil 3	Estático	2,7	2,7	2,1	2,1
Perfil 3	Estático + Lluvias	1,7	1,7	1,7	2,1
Perfil 3	Dinámico	1,4	1,4	1,4	1,4
Perfil 3	Dinámico + Lluvias	0,8	0,8	0,8	1,3
Perfil 4 IZQ	Estático	3,2	3,3	3,2	3,2
Perfil 4 IZQ	Estático + Lluvias	1,9	3,3	3,2	3,2
Perfil 4 IZQ	Dinámico	1,6	1,6	1,5	1,5
Perfil 4 IZQ	Dinámico + Lluvias	0,9	1,6	1,6	1,6
Perfil 4 DER	Estático	2,6	2,6	2,6	2,6
Perfil 4 DER	Estático + Lluvias	1,6	2,6	2,6	2,6
Perfil 4 DER	Dinámico	1,5	1,5	1,5	1,5
Perfil 4 DER	Dinámico + Lluvias	0,9	1,5	1,4	1,4

6. Conclusiones y recomendaciones

Los análisis de estabilidad realizados permitieron evaluar las condiciones de estabilidad en diferentes escenarios, y a su vez revisar el cumplimiento de los factores de seguridad mínimos exigidos por el reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10), posterior a la implantación de obras de estabilización en los cortes realizados.

Se logró identificar el nivel de amenaza que presentará el proyecto con base en las características geológicas, geomorfológicas, geotécnicas que influyen directamente en el área del proyecto. Se identificaron niveles de amenaza media y alta en las tres condiciones de estados de obra (sin obras, excavaciones, construido) y un nivel bajo de amenaza una vez construidas las obras de mitigación.

En rellenos de media ladera es necesario llevar un registro de la caracterización del material que se usa como relleno al igual que el registro de densidades de compactación usadas para futuras construcciones.

El material de relleno presente en el lugar de estudio presenta una heterogeneidad que impide que se pueda considerar como un material isotrópico para los análisis.

Al realizar análisis estadísticos con programas de elementos finitos es necesario contar con un amplio número de ensayos de laboratorio para la obtención de parámetros que permitan evaluar la interacción del factor de seguridad con la variabilidad de las características del suelo y poder obtener una probabilidad de falla adecuada a partir de un modelo calibrado.

En este estudio se puede observar que la disminución del nivel de altura de relleno incide en un factor de seguridad mayor en los perfiles analizados lo que se puede considerar como mayor estabilidad de la ladera.

El predio se puede dividir en dos zonas para la construcción de obras de estabilización de manera que en la zona donde se encuentra el relleno antrópico se realice la construcción de anclajes que en el caso de los modelos se usaron anclajes de 30 m con 15 metro de bulbo a 15° respecto a la horizontal, además de canaletas y estructuras para el manejo de aguas de escorrentía. En el sector donde no se encuentra relleno antrópico se podrá realizar el manejo de aguas de escorrentía solamente de manera que incida en un factor de seguridad mayor.

Referencias Bibliográficas

Geotechnical Testing S.A.S., (2019). Estudio detallado de amenaza, vulnerabilidad y/o riesgo por fenómenos de remoción en masa e inundación (PR-GT-19-01).

Alfonso Uribe & Cía. S.A., (2011). Estudio de suelos, análisis de cimentaciones y estudio geológico. (AUS20907)

Servicio Geológico Colombiano, (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa escala detallada, Bogotá D.C., Colombia.* Imprenta nacional de Colombia.

Alcaldía de Betulia, (2017). Esquema de ordenamiento territorial. Recuperado el 14 de septiembre de 2020, del sitio web de la Alcaldía municipal de Betulia Santander: <http://www.betulia-santander.gov.co/planes/esquema-de-ordenamiento-territorial>.

Ingeominas, (1977). *Geología de la Plancha 120 Bucaramanga.* Versión Digital 2010.

Diaz-Granados Y Vargas. Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración- frecuencia para Colombia. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Los andes.

Suarez Díaz, Jaime, (2009). Deslizamientos Tomo 1 análisis geotécnico. Ediciones UIS.

Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica. Norma Colombiana de diseño y construcción sismo-resistente, NSR-10. Bogotá AIS,2010.

Apéndices

Apéndice A. Mapas Temáticos

Apéndice B. Registro de ensayos de campo

Apéndice C. Resultados de ensayos de laboratorio