

MUNICIPIO DE MEDELLÍN - UNIVERSIDAD EAFIT

CONVENIO DE ASOCIACIÓN No. 4600076515 de 2018

OBJETO:

Convenio de asociación para la identificación del riesgo de detalle en algunas zonas del Municipio de Medellín

SECTOR EL FARO

Agosto de 2019

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	2
3. METODOLOGÍA	4
3.1. CARTOGRAFÍA ESCALA DE TRABAJO	4
3.2. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA	4
3.2.1. Recopilación de información secundaria y productos base.....	4
3.2.2. Visitas de reconocimiento.....	4
3.2.3. Generación de mapas temáticos	5
3.2.4. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio.....	6
3.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos	7
3.2.6. Definición de los modelos geológico – geotécnicos	8
3.2.7. Evaluación de la estabilidad.	8
3.2.8. Análisis de la distancia de viaje	9
3.2.9. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa.....	10
3.3. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD	10
3.3.1. Fichas de levantamiento de la información.	11
3.3.2. Trabajo de campo.....	11
3.3.3. Análisis de la información	12
3.4. VULNERABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES	12

3.4.1.	Cálculo de la fragilidad.....	12
3.4.2.	Intensidad de los movimientos en masa lentos en edificaciones.....	13
3.4.3.	Intensidad de los movimientos en masa rápidos en edificaciones.	13
3.5.	VULNERABILIDAD EN LAS LÍNEAS VITALES	14
3.5.1.	Fragilidad en líneas vitales	14
3.5.2.	Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa lentos	16
3.5.3.	Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa rápidos.....	16
3.6.	VULNERABILIDAD EN LAS PERSONAS	17
3.7.	CÁLCULO Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	17
3.8.	EVALUACIÓN DEL RIESGO.....	18
3.8.1.	Riesgo por Elementos Expuestos.	18
3.8.2.	Riesgo por Polígono.	19
4.	REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA	21
5.	ASPECTOS GEOLÓGICOS GENERALES.....	29
5.1	GEOLOGÍA REGIONAL	29
5.1.1	Estratigrafía	31
5.2	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL	35
5.2.1	Valle de Aburrá Medio (VM).....	36
5.3	TECTÓNICA REGIONAL	44
5.3.1	Sistemas de fallas.	44
6.	CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES DEL SECTOR EL FARO	46
6.1	DEFINICIÓN DE LA UMI	46
6.2	FOTOINTERPRETACIÓN	50

6.3	UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA	55
6.3.1	Derivados de roca in situ	56
6.3.2	Depósitos de vertiente	60
6.4	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL.....	63
6.4.1	Orientación y buzamiento	63
6.4.2	Espaciamiento	66
6.4.3	Persistencia	67
6.4.4	Apertura	68
6.4.5	Rugosidad	69
6.4.6	Relleno	71
6.4.7	Meteorización	72
6.4.8	Agua – Filtraciones	73
6.4.9	Resistencia de las paredes	74
6.5	MORFOMETRÍA	75
6.6	GEOMORFOLOGÍA LOCAL.....	80
6.6.1	Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA)	82
6.7	MORFODINÁMICA.....	92
6.7.1	Reporte histórico de eventos	92
6.7.2	Identificación de procesos morfodinámicos	94
6.8	CLASIFICACIÓN Y USOS DEL SUELO.....	99
7.	EVALUACION GEOTÉCNICA	102
7.1	EXPLORACION DE CAMPO.....	102
7.1.1	Exploración Directa	102

7.1.2	Exploración Indirecta	105
7.2	RESULTADOS Y ANALISIS DE LABORATORIO	113
7.3	ANALISIS GEOTECNICO	116
7.3.1	Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos	116
7.3.2	Definición de modelos geológico-geotécnicos	126
7.3.3	Análisis de estabilidad condición actual	132
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	149
8.1	MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL	149
8.2	UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS LOCALES.....	152
8.2.1	Análisis de resultados.....	154
8.3	PERMEABILIDAD	159
9.	ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS	161
9.1	AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA	161
9.1.1	Amenaza por estabilidad	161
9.1.1.1	Amenaza en condiciones estáticas.....	162
9.1.1.2	Amenaza en condiciones saturadas	165
9.1.2	Amenaza por runout	166
9.1.3	Amenaza total	168
10.	VULNERABILIDAD	172
10.1	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR MOVIMIENTO EN MASA.....	172
10.1.1	Cálculo de la fragilidad de las construcciones.....	172
10.1.2	Cálculo de la intensidad sobre las construcciones.....	177

10.1.3	Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones	178
10.2	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR MOVIMIENTO EN MASA.....	179
10.2.1	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – energía	180
10.2.2	Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía	180
10.2.3	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía.....	182
10.2.4	Cálculo de la fragilidad de la línea vital – vías.....	182
10.2.5	Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías.....	183
10.2.6	Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías	184
10.2.7	Cálculo de la fragilidad del acueducto.....	185
10.2.8	Cálculo de la intensidad del acueducto.....	186
10.2.9	Cálculo de la vulnerabilidad del acueducto	187
10.2.10	Cálculo de la fragilidad del alcantarillado	188
10.2.11	Cálculo de la intensidad del alcantarillado	189
10.2.12	Cálculo de la vulnerabilidad del alcantarillado.....	190
10.3	VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	191
10.3.1	Análisis de vulnerabilidad de personas.	191
10.4	DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS CONSTRUCCIONES.....	192
11.	ZONIFICACIÓN DE RIESGOS	193
11.1	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	193
11.1.1	Riesgo individual.....	193
11.1.1.1	Análisis de riesgo de las construcciones.....	194
11.1.1.2	Análisis de riesgo de línea vital - energía.....	194

11.1.1.3	Análisis de riesgo de línea vital - vías	195
11.1.1.4	Análisis de riesgo de línea vital - acueducto	196
11.1.1.5	Análisis de riesgo de línea vital - alcantarillado	197
11.1.1.6	Análisis de riesgo de personas.	198
11.1.2	Riesgo por polígono.....	199
12.	APTITUD GEOLÓGICA	202
13.	RECOMENDACIONES	205
13.1	RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS.....	205
13.1.1	Análisis de estabilidad condición proyectada	207
13.1.2	Dimensionamiento geotécnico de obras	212
13.1.3	Plan de Seguimiento y Monitoreo	231
13.1.4	Recomendaciones particulares excavación de pilas	234
13.1.5	Viviendas afectadas por obras propuestas	236
13.2	RECOMENDACIONES GENERALES.....	237
13.2.1	Modificaciones del terreno	237
13.2.2	Control de drenaje	240
13.3	RECOMENDACIONES DE VULNERABILIDAD	244
13.3.1	Servicios públicos domiciliarios.....	244
13.3.2	Líneas vitales – energía y alumbrado público	245
13.3.3	Vías de acceso y obras de drenaje.....	245
13.3.4	Mejoramiento saludable.....	245
13.3.5	Mejoramiento locativo	245
13.4	OTRAS RECOMENDACIONES	246

14. CONCLUSIONES	250
15. LIMITACIONES.....	253
16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	255

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general del polígono denominado El Faro	3
Figura 2. Mapa geológico regional del polígono El Faro. Tomado de AMVA - Alcaldía de Medellín, 2017	30
Figura 3. Mapa de macrounidades geomorfológicas. Tomado de AMVA, 2007	40
Figura 4. Geomorfología regional polígono El Faro. Tomado de AMVA, 2007.	43
Figura 5. UMI definida para el polígono denominado “El Faro”.	49
Figura 6. Fotografía aérea del año 1943 para el polígono El Faro	51
Figura 7. Fotografía aérea del año 1983 para el polígono El Faro	52
Figura 8. Fotografía aérea del año 1994 para el polígono El Faro	53
Figura 9. Fotografía aérea del año 2014 para el polígono El Faro	54
Figura 10. Mapa formaciones superficiales, polígono El Faro	55
Figura 11. Perfil geológico generalizado, polígono El Faro	56
Figura 12. Afloramiento suelo residual – nivel IB, en el sector aledaño a tanque de Llanaditas	57
Figura 13. Espesor de ceniza volcánica y materia orgánica suprayaciendo suelo residual de Dunita de Medellín, base de cerro de la Cruz.	58
Figura 14. Afloramiento saprolito – nivel IC, asociado a talud superior de la vía La Cuesta	59
Figura 15. Afloramiento roca alterada en corte realizado en la finca las Nubes, sobre la vertiente sur de la quebrada La Loca.....	60
Figura 16. Afloramiento roca alterada en talud posterior al corte realizado para construcción de vivienda	60

Figura 17. Afloramiento depósito de flujo de lodos y escombros asociado a talud superior de la finca Las Nubes	61
Figura 18. Afloramiento depósito de flujo de lodos asociado a sendero peatonal de acceso a la zona.....	62
Figura 19. Afloramiento depósito de flujo de escombros asociado a talud superior de sendero de acceso a la zona.	62
Figura 20. Mapa de localización de la estación con información de las discontinuidades.	64
Figura 21. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades para el polígono El Faro. Realizado en Stereo32 ®.....	65
Figura 22. Diagrama de rosas con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades. Realizado en Dips.5 ®.....	66
Figura 23. Análisis de las características de espaciamiento de las discontinuidades.	67
Figura 24. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades.	68
Figura 25. Análisis de la característica de apertura de las discontinuidades.	69
Figura 26. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Hoek, 1981).	70
Figura 27. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades.	71
Figura 28. Análisis de la característica relleno de las discontinuidades.	72
Figura 29. Análisis de la característica meteorización en las discontinuidades.	73
Figura 30. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades.	74
Figura 31. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	75
Figura 32. Mapa de morfometría, polígono El Faro	76
Figura 33. Rango de pendiente de 0 – 10%, donde se localiza la finca Las Nubes.....	77
Figura 34. Rango de pendiente de 10 - 25%, asociado al tanque de Llanaditas y la ladera localizada al sur entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.....	77
Figura 35. Rango de pendiente de 25 - 40%, asociado a ladera localizada al sur, entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1	78

Figura 36. Rango de pendiente de 40 - 60% al sur de la Chorro Hondo 1	79
Figura 37. Rango de pendiente de 60 - 100%, asociado a vertientes que descienden hacia la quebrada La Loca	80
Figura 38. Mapa de subunidades geomorfológicas locales, polígono El Faro	81
Figura 39. Panorámica unidad de lomos de laderas cortas, rectas y muy abruptas, vertiente norte de la quebrada La Loca 2	82
Figura 40. Panorámica unidad de lomos de laderas cortas, cóncavas y muy abruptas, vertiente sur de la quebrada La Loca.....	83
Figura 41. Panorámica unidad de ladera cóncava, larga y muy abrupta, al oriente de la finca La Nubes	83
Figura 42. Panorámica unidad de lomo de laderas cortas convexas y muy abruptas, al sur de la finca Las Nubes.	84
Figura 43. Panorámica unidad de ladera convexa, corta y muy inclinada hacia la base de la finca Las Nubes	85
Figura 44. Panorámica unidad de ladera irregular, larga y abrupta, en la zona central del polígono.....	85
Figura 45. Panorámica unidad de ladera irregular, larga y abrupta, asociado a vertiente norte de la quebrada Chorro Hondo 1	86
Figura 46. Panorámica unidad de ladera cóncava moderada y muy inclinada, hacia la zona central del polígono analizado	87
Figura 47. Panorámica unidad de ladera convexa, moderada y muy inclinada, en sector al oriente de la Cancha de Tavo	87
Figura 48. Panorámica unidad de tope corte e irregular, donde se ha construido la vía La Cuesta	88
Figura 49. Panorámica unidad de ladera irregular, larga e inclinada en zona aledaña a sendero peatonal de acceso al cerro La Cruz.....	88
Figura 50. Panorámica unidad de ladera convexa, muy larga y muy inclinada, localizada entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.	89
Figura 51. Panorámica unidad de lomo de laderas cortas, cóncavas e inclinadas, localizado en la vertiente norte de la Chorro Hondo 1.	89

Figura 52. Panorámica unidad de ladera recta, moderada y abrupta en la base del cerro La Cruz.....	90
Figura 53. Panorámica unidad de ladera convexa, muy larga y muy inclinada, en la vertiente sur de la quebrada Chorro Hondo 1.....	90
Figura 54. Panorámica unidad de ladera irregular, larga y muy inclinada, al oriente del camino de la vida.....	91
Figura 55. Panorámica unidad de explanaciones, finca Las Nubes.	91
Figura 56. Mapa de reporte de eventos en el período comprendido entre 2004 y 2016 de acuerdo a base de datos del DAGRD para el polígono El Faro	93
Figura 57. Reporte de eventos del DAGRD para el polígono El Faro.....	94
Figura 58. Mapa de procesos morfodinámicos, polígono El Faro.....	95
Figura 59. Movimientos en masa activos en talud superior de la finca Las Nubes	96
Figura 60. Movimientos en masa inactivos en zona aledaña a finca Las Nubes	96
Figura 61. Movimientos en masa rotacional identificado en talud inferior de sendero peatonal.....	97
Figura 62. Movimientos en masa planar localizado hacia el costado nororiental de la zona analizada	98
Figura 63. Movimientos en masa rotacional en el costado nororiental del tanque de Llanaditas	98
Figura 64. Movimientos en masa asociado a realización de cortes.....	99
Figura 65. Mapa de clasificación del suelo para el polígono El Faro. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.	100
Figura 66. Mapa de usos del suelo para el polígono El Faro Tomado de Acuerdo 48 de 2014.	101
Figura 67. Localización sondeos exploratorios polígono El Faro.....	103
Figura 68. Muestreador estándar para el ensayo SPT	105
Figura 69. Muestreador de pared delgada	105

Figura 70. Localización Geográfica para las líneas sísmicas para el polígono de El Faro.	106
Figura 71. Zona de ejecución línea SIS_EFR_01.	107
Figura 72. Curva dromocrónicas para la línea SIS_EFR_01.	108
Figura 73. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_01.	109
Figura 74. Zona de ejecución línea SIS_EFR_02.	110
Figura 75. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_02.	110
Figura 76. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_02.	111
Figura 77. Zona de ejecución línea SIS_EFR_03.	112
Figura 78. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_03.	112
Figura 79. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_03.	113
Figura 80. Localización perfiles y sondeos Polígono El Faro	127
Figura 81. Modelo geológico- geotécnico perfil 1 El Faro.	128
Figura 82. Modelo geológico-geotécnico perfil 2 El Faro.	129
Figura 83. Modelo geológico-geotécnico perfil 3 El Faro.	130
Figura 84. Modelo geológico-geotécnico perfil 4 El Faro.	131
Figura 85. Modelo geológico-geotécnico perfil 5 El Faro.	132
Figura 86. Análisis de estabilidad perfil 1 condición actual estático.	135
Figura 87. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual pseudoestática.	136
Figura 88. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual saturada.	137
Figura 89. Análisis estabilidad Perfil 2 situación actual, condición estática.	138
Figura 90. Análisis estabilidad perfil 2 condición pseudoestática.	139
Figura 91. Análisis estabilidad perfil 2 condición saturada.	140

Figura 92. Análisis estabilidad Perfil 3 situación actual, condición estática.	141
Figura 93. Análisis estabilidad perfil 3 condición pseudoestática.	142
Figura 94. Análisis estabilidad perfil 3 condición saturada.	143
Figura 95. Análisis estabilidad Perfil 4 situación actual, condición estática.	144
Figura 96. Análisis estabilidad perfil 4 condición pseudoestática.	144
Figura 97. Análisis estabilidad perfil 4 condición saturada.	145
Figura 98. Análisis estabilidad Perfil 5 situación actual, condición estática.	146
Figura 99. Análisis estabilidad perfil 5 condición pseudoestática.	147
Figura 100. Análisis estabilidad perfil 5 condición saturada.	148
Figura 101. Unidades hidrogeológicas para el Valle de Aburrá, modificado de AMVA 2013.	151
Figura 102. Localización Geográfica para las tomografías eléctricas para el polígono de El Faro.....	154
Figura 103. Zona de ejecución línea TER_EFR_01	155
Figura 104. Interpretación de la tomografía TER_EFR_01.	156
Figura 105. Zona de ejecución línea TER_EFR_02.	157
Figura 106. Interpretación de la tomografía TER_EFR_02.	158
Figura 107. Zonificación de amenazas por estabilidad para el polígono El Faro	163
Figura 108. Zonificación de amenazas por estabilidad en condiciones saturadas para el polígono El Faro	166
Figura 108. Contornos de runout para el polígono El Faro.....	168
Figura 109. Zonificación de amenaza por movimientos en masa para el polígono El Faro	169
Figura 110. Distribución espacial de la fragilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.	174

Figura 111. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono El Faro.	175
Figura 112. Tipología construcciones simples (F). Estructura ubicada en el polígono El Faro.	176
Figura 113. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D). Estructura ubicada en el polígono El Faro	177
Figura 114. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	178
Figura 115. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	179
Figura 116. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	180
Figura 117. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.....	181
Figura 118. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.....	182
Figura 119. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.	183
Figura 120. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.	184
Figura 121. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.....	185
Figura 122. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	186
Figura 123. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	187
Figura 124. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	188
Figura 125. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono de El Faro.	189

Figura 126. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	190
Figura 127. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	191
Figura 128. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	194
Figura 129. Distribución espacial del riesgo de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	195
Figura 130. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vías por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	196
Figura 131. Distribución espacial del riesgo de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	197
Figura 132. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.	198
Figura 133. Zonificación de riesgos por polígono, El Faro	201
Figura 134. Zonificación de aptitud geológica para el polígono El Faro	204
Figura 135. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición estática.	208
Figura 136. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final, condición pseudoestática.	208
Figura 137. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición saturada.	209
Figura 138. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final condición estática.	210
Figura 139. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final, condición pseudoestática.	211
Figura 140. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final condición saturada.	212
Figura 141. Localización obras proyectadas Polígono El Faro.	213
Figura 142. Geometría para cálculo de fuerzas sobre estructuras de contención	217
Figura 143. Definición de fuerzas para análisis geotécnicos en Allpile.	220
Figura 144. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Pantalla inferior perfil 2.	222

Figura 145. Asentamientos estimados Pilas Pantalla inferior, perfil 2	222
Figura 146. Análisis capacidad lateral de las pilas Pantalla inferior Perfil 2.....	223
Figura 147. Variación del módulo de reacción lateral con la profundidad.....	224
Figura 148. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Pantalla superior perfil 2.....	225
Figura 149. Asentamientos estimados Pilas pantalla superior, perfil 2.....	226
Figura 150. Análisis capacidad lateral de las pilas Pantalla superior, perfil 2.	227
Figura 151. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Pantalla perfil 3	228
Figura 152. Asentamientos estimados Pantalla perfil 3.....	229
Figura 153. Análisis capacidad lateral de las pilas Pantalla perfil 3.....	230
Figura 154. Variación del módulo de reacción lateral con la profundidad.....	231
Figura 155. Localización programa de monitoreo Polígono El Faro.	232
Figura 156. Detalle de inclinómetro.....	233
Figura 157. Detalle de piezómetro de tubo abierto.....	234
Figura 158. Construcción de una pila in-situ.	236
Figura 159. Recomendaciones para modificaciones del talud e implantación de viviendas.	238
Figura 160. Esquema de recomendaciones para taludes	239
Figura 161. Características de las cunetas	240
Figura 162. Forma de construcción de las cunetas propuestas	241
Figura 163. Esquema de bajantes	242
Figura 164. Características de los filtros propuestos.....	244

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).	18
Tabla 2. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.	20
Tabla 3. Jerarquía geomorfológica regional	35
Tabla 4. Fotografías aéreas empleadas para proceso de fotointerpretación polígono El Faro	50
Tabla 5. Distribución de los datos tomados en las estaciones de campo.	63
Tabla 6. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades, (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989)).	67
Tabla 7. Descripción de la continuidad de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989)).	68
Tabla 8 .Descripción de la abertura de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989)).	69
Tabla 9. Descripción de la meteorización de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989)).	72
Tabla 10. Descripción de la filtración de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989)).	73
Tabla 11. Descripción de la resistencia de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989)).	74
Tabla 12. Distribución de la variable pendiente para el polígono El Faro	76
Tabla 13. Coordenadas de los sondeos de exploración realizados.	103
Tabla 14. Numero de sondeos exploratorios y longitud alcanzada.	104
Tabla 15. Configuración geométrica de la línea sísmica.	106

Tabla 16. Tipos de ensayos y cantidad de muestras analizadas.....	114
Tabla 17. Resultados de laboratorio Polígono El Faro.	114
Tabla 18. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos.	121
Tabla 19. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico	122
Tabla 20. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del Depósito de vertiente.	123
Tabla 21. Parámetros geomecánicos del estrato Depósito de vertiente.	123
Tabla 22. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del horizonte IB de Dunita.	124
Tabla 23. Parámetros geomecánicos del horizonte IB de Dunita	124
Tabla 24. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del horizonte IB de Dunita.	125
Tabla 25. Parámetros geomecánicos del horizonte IC de Dunita.....	125
Tabla 26. Factores de seguridad para el análisis de estabilidad (Tomado de Tabla H.2.4-1. NSR-10 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos)	133
Tabla 27. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño (Tomado Microzonificación sísmica Medellín, 2006).....	134
Tabla 28. Valores de Kst/amax (Tomado NSR-10)	134
Tabla 29. Unidades hidrogeológicas del centro y sur del Valle de Aburrá (Modificado de AMVA, 2013)	149
Tabla 30. Configuración geométrica de la línea geoelectrica.	153
Tabla 31. Estratigrafía para la tomografía TER_EFR_01.	156
Tabla 32. Estratigrafía para la tomografía TER_EFR_02.	158
Tabla 33. Valores relativos de permeabilidad. (Fuente: Terzaghi K y Peck R, 1980)	159
Tabla 34. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).	193
Tabla 35. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.	199

Tabla 36. Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación. Pantalla inferior perfil 2.....	221
Tabla 37. Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura	223
Tabla 38. Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación muro de contención.....	225
Tabla 39. Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura Pilas Pantalla sup. perfil 2	226
Tabla 40. Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación Pantalla perfil 3.	228
Tabla 41. Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura Pantalla perfil No 3.....	229
Tabla 42. Viviendas afectadas por obras en el polígono El Faro.....	236

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1. Metodología
- Anexo 2. Registros de perforación
- Anexo 3. Resultados de laboratorio
- Anexo 4. Memoras de cálculo geotécnico
- Anexo 5. Fichas de vulnerabilidad
- Anexo 6. Memorias de cálculo y diseños estructurales
- Anexo 7. Sísmica y geoeléctrica

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del Convenio No. 4600076515 de 2018 cuyo objeto es *“La identificación del riesgo de detalle en algunas zonas del municipio de Medellín”*, entre el Municipio de Medellín y la Universidad EAFIT, se realizaron los estudios de diferentes polígonos ubicados en las comunas 6, 7, 8, 9, 16 y en el corregimiento de Altavista.

Estos estudios, corresponden a los estudios de detalle requeridos para las zonas de condición de riesgo por el decreto Nacional 1077 de 2015 y por el decreto Municipal 1626 de 2015, e igualmente recoge el decreto Metropolitano 09 del 25 de mayo de 2012.

En el desarrollo de este proyecto, se realizaron discusiones metodológicas y de los resultados por parte de los grupos técnicos del Municipio de Medellín y la Universidad EAFIT, integrando la experiencia obtenida a partir de convenios anteriores, al igual que el conocimiento técnico y académico de los dos grupos en torno a los resultados esperados.

Los tipos de amenaza evaluada en los polígonos de interés, corresponden a movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. Para el polígono denominado El Faro, la amenaza que define la condición de riesgo en el Acuerdo 48 de 2014 – POT, corresponde a movimientos en masa, amenaza que fue evaluada en detalle en el presente estudio.

Además de la amenaza, se evaluó la vulnerabilidad física de acuerdo a las características de los elementos expuestos, (construcciones y líneas vitales), a partir de la definición de la fragilidad y la intensidad de los fenómenos que los podrían afectar.

Igualmente, se evaluó el riesgo, integrando la información de la amenaza y la vulnerabilidad. Este riesgo se determinó a nivel de cada elemento expuesto y a nivel de polígono, determinando de esta manera los polígonos de riesgo alto no mitigable, riesgo alto mitigable, riesgo medio y riesgo bajo.

Finalmente, de acuerdo a las condiciones encontradas en cada polígono, se definieron las acciones estructurales y no estructurales necesarias para la mitigación del riesgo y que una vez ejecutadas y monitoreadas permitirán reducir la amenaza o la vulnerabilidad y cambiar el nivel de riesgo donde fuera posible.

2. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza sobre el flanco oriental del Valle Medio del río Aburrá, hacia la zona de nacimiento de las quebradas La Loca y Chorro Hondo, en la vereda Matasanos del corregimiento de Santa Elena, en límites con el barrio Llanaditas de la comuna 8. El polígono denominado El Faro, abarca un área de 10,9 ha (Figura 1) e incluye las áreas con condición de riesgos denominadas en el POT con el código 9003-27.

El área de estudio asociada al denominado polígono El Faro incluye dos sectores, el primero de ellos corresponde a la vertiente sur de la quebrada La Loca, aproximadamente desde la confluencia de la quebrada La Loca N° 2 hasta la actual vía a la Cuesta, en la zona aledaña al tanque de EPM incluyendo los sectores denominados como Golondrinas y El Faro (El Tanque, La Torre y Cancha de Tavo) (Figura 1).

El segundo sector, se extiende al sur del denominado sector El Faro, sobre la vertiente sur de la quebrada Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, en límites con el denominado sector de Altos de la Torre. En este sector se localiza un tramo del proyecto denominado “Camino de la Vida” que se extiende hacia la base del Cerro Pan de Azúcar (Figura 1).

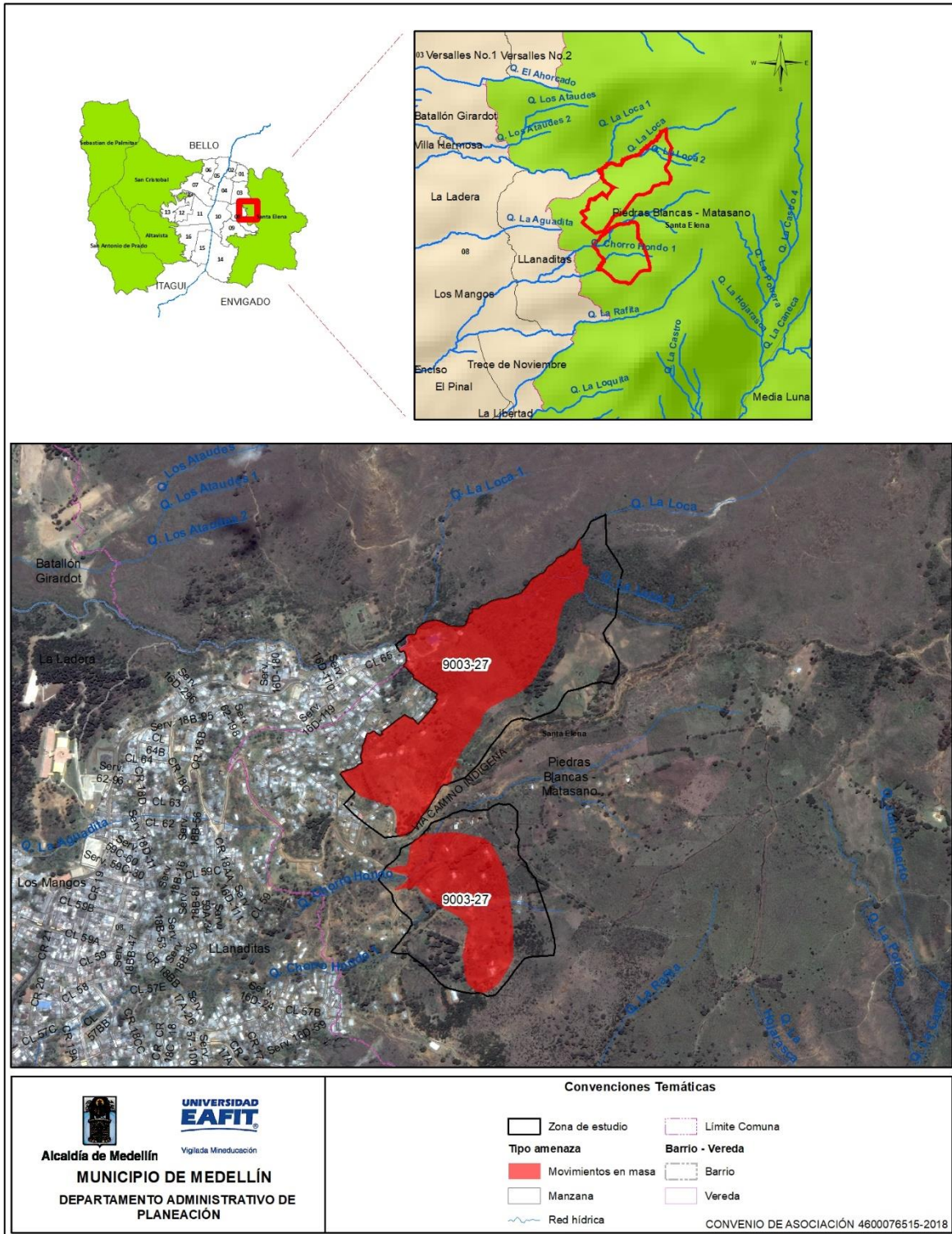


Figura 1. Localización general del polígono denominado El Faro

3. METODOLOGÍA

Los procedimientos seguidos para realizar los estudios de riesgo de detalle por movimientos en masa, con sus respectivas medidas de intervención, se describen con detalle en el Anexo 1 “Documento metodológico”.

Cada componente tiene su propia metodología, la cual se describe brevemente a continuación.

3.1. CARTOGRAFÍA ESCALA DE TRABAJO

De acuerdo con el decreto nacional 1077 de 2015 y al decreto municipal 1626 de 2015, para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa se utilizó la escala 1:2.000, específicamente se tuvo en cuenta la información de la restitución de la EDU, la información del POT de Medellín y levantamientos puntuales donde no se contó con esta.

3.2. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El propósito de este capítulo consiste en la definición de la metodología empleada para generar los mapas de zonificación de amenazas por fenómenos de remoción en masa mediante la utilización de métodos determinísticos, y cuyos procesos principales consisten en los siguientes: generación de mapas temáticos, exploración del subsuelo, estratigrafía, análisis de estabilidad y evaluación de la amenaza. A continuación, se explican cada uno de estos procesos:

3.2.1. Recopilación de información secundaria y productos base

En esta fase inicial se acopió y revisó la información disponible para la caracterización geológica y geomorfológica del área de interés. Los estudios de Microzonificación sísmica detallada realizados para Medellín y su área metropolitana, son la base para los análisis geológicos locales, además de otros informes realizados por diferentes entidades como se sintetiza en el capítulo 4.

3.2.2. Visitas de reconocimiento.

Con el objeto de realizar un reconocimiento de los sectores o polígonos con “condición de riesgo” a estudiar, se realizó una visita de reconocimiento con el supervisor del Departamento Administrativo de Planeación Municipal y

profesionales de la Universidad. En estas visitas se discutió la delimitación de las unidades morfodinámicas independientes UMI con base en los criterios definidos por el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 y la ubicación de las perforaciones y sus cantidades, se dieron las recomendaciones sobre cada uno de los polígonos en función de sus características particulares y se plantearon acciones generales a ejecutarse por parte de la Universidad.

3.2.3. Generación de mapas temáticos

Durante este proceso se recopiló la información cartográfica disponible sobre cada uno de los mapas temáticos o mapas índices empleados en el desarrollo de esta metodología, los cuales en este caso correspondieron a geología y formaciones superficiales, geomorfología, pendiente y procesos morfodinámicos.

Las UMI fueron delimitadas por el grupo de profesionales del proyecto de las áreas de geología, geomorfología, geotecnia, hidrología e hidráulica a la escala de trabajo, de acuerdo a los lineamientos establecidos en el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012.

Geología y formaciones superficiales: para el desarrollo de esta variable fue necesaria la realización de un mapa preliminar, para el cual se utilizó como insumo base la cartografía geológica existente a escala 1:10.000 del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la cual fue actualizada y redelimitada con base en la información obtenida del análisis de sensores remotos y la interpretación fotografías aéreas donde fue posible identificar unidades principalmente cuaternarias y estructuras geológicas.

Durante el trabajo de campo y con el objetivo de obtener información de detalle del suelo y subsuelo para la zonificación de amenazas en el área de estudio, se realizó la caracterización y mapeo de las unidades geológicas y formaciones superficiales a escala 1: 2.000 a partir del mapa preliminar, de acuerdo a la disponibilidad de afloramientos y los sondeos exploratorios. La clasificación de las unidades de suelo y definición del grado de meteorización de la roca se basó en el perfil de meteorización de Deere & Patton (1971).

Geomorfología: la construcción de los mapas geomorfológicos primero correspondió a la generación de un mapa preliminar donde se delimitaron los elementos geomorfológicos usando la información básica disponible como información secundaria, análisis de sensores remotos y fotografías aéreas, mapas topográficos, mapa de pendientes y un modelo de elevación digital (MED).

La caracterización y jerarquización geomorfológica se basó en la definición presentada en el estudio “Microzonificación sísmica detalladas del Valle de Aburrá, a escala 1:10.000” (AMVA, 2007). Para la caracterización de la morfología de los elementos geomorfológicos, se utilizaron los atributos de inclinación, longitud y forma de la ladera.

Morfometría: para este estudio de amenaza por movimientos en masa a escala detallada se utilizó la pendiente como variable morfométrica. La definición del mapa de pendientes se realizó en porcentajes, que representa la tangente del ángulo de inclinación del terreno.

Inventario de movimientos en masa: para la generación del mapa de amenaza por movimientos en masa, la cartografía de los procesos morfodinámicos ocurridos en el área de estudio representa uno de los insumos básicos con el fin de identificar las condiciones dinámicas, la continuidad y recurrencia de eventos y su distribución dentro de cada zona.

Para el desarrollo de esta variable fue igualmente necesaria la realización de un mapa preliminar, en donde se incluyeron los procesos morfodinámicos identificados a partir del análisis de fuentes secundarias como bases de datos del DAGRD, SIMMA, Desinventar, Planeación Municipal y demás estudios que se han realizado en la zona. Adicionalmente, se incluyeron los procesos identificados durante la etapa de análisis de sensores remotos.

Este mapa preliminar fue verificado, ajustado y redefinido de acuerdo con las condiciones actuales vistas durante el trabajo de campo. El producto final es la distribución espacial de los movimientos, representados por áreas afectadas o polígonos.

3.2.4. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio

La exploración del subsuelo se realizó a partir de métodos directos e indirectos. Exploración directa: el programa de exploración del subsuelo para conocer las condiciones geotécnicas se realizó de acuerdo con la extensión de cada sector y a las problemáticas detectadas, las cuales alcanzaban profundidades que permitían generar el modelo geológico – geotécnico para la evaluación de la estabilidad y determinación de la amenaza por movimientos en masa.

La metodología de exploración consistió en la ejecución de perforaciones de pequeño diámetro (entre 65 y 100 mm). En los sondeos exploratorios se ejecutó el

ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m en los materiales de suelo, donde esto fuera posible y se recuperaron muestras remoldeadas tomadas con muestreador estándar “Split Spoon”; adicionalmente se obtuvieron muestras inalteradas con tubo de pared delgada “Shelby”. Los materiales encontrados fueron debidamente caracterizados para elaborar columnas estratigráficas utilizadas posteriormente para correlacionar la distribución espacial de los materiales.

Exploración indirecta: las técnicas de geofísica aplicadas estaban orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encontraban en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, la resistividad eléctrica, etc. Las pruebas utilizadas en el presente estudio son conocidas como Tomografías Electricas Resistivas (TER) y sísmica de refracción.

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

A las muestras alteradas se les realizaron ensayos de límites de plasticidad, granulometría y humedad natural, con el fin de obtener su clasificación con base en el sistema USCS.

3.2.5. Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

De acuerdo a la información de campo obtenida de la exploración geotécnica, los recorridos de los geólogos y los análisis de laboratorio, se levantó la estratigrafía del sector y a las unidades se les asignaron los parámetros geotécnicos.

Estratigrafía: concluida la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustaron y complementaron los perfiles topográficos representativos de la estructura del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo a las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Parámetros geomecánicos: la definición de estos parámetros se realizó a partir de la información recolectada de los sondeos exploratorios, del análisis de las muestras extraídas en cada uno de ellos, de las pruebas en campo y laboratorio como la prueba SPT adelantada in-situ y los ensayos de caracterización como granulometrías, límites de Atterberg, humedad natural y corte directo, de acuerdo con los estratos identificados. Al analizar esta información en conjunto fue posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

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

3.2.6. Definición de los modelos geológico – geotécnicos

Con base en la determinación de la estratigrafía para cada perfil topográfico seleccionado por parte de los geólogos, se plasmaron las condiciones geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los polígonos, incluyendo en el mismo, los parámetros anteriormente definidos, al igual que las condiciones de nivel freático.

3.2.7. Evaluación de la estabilidad.

Para el análisis de estabilidad se utilizó el software Slide v 6.0 basado en la teoría del equilibrio límite, el cual calcula por diferentes métodos (Morgenstern and Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc) los factores de seguridad más críticos para diferentes superficies de falla en el talud.

Para efectos de determinar las características topográficas de los taludes a evaluar, se levantaron secciones topográficas, sobre las cuales se plasmaron las condiciones estratigráficas y geomecánicas de los diferentes estratos que componen cada uno de los sectores.

Para evaluar la estabilidad de cada sector se consideraron tres situaciones: inicialmente se analizó el modelo para el caso estático, seguidamente se realizó el análisis bajo consideraciones normales y extremas de lluvia y posterior a esto se evaluó el comportamiento del terreno bajo solicitaciones sísmicas, obteniendo los

factores de seguridad de cada superficie de falla, verificando el cumplimiento de los valores mínimos planteados por el decreto municipal 1626 de 2015

La condición sísmica se simuló considerando la actuación de fuerzas sísmicas que dependen del coeficiente de aceleración pico efectiva (A_a) dado para cada municipio por la NSR-10 y bajo las consideraciones además del estudio de microzonificación sísmica para el área urbana de Medellín (1999).

3.2.8. Análisis de la distancia de viaje

La distancia de viaje o Run-Out se determinó siguiendo la metodología propuesta por Guimarães (2015), donde se tomó en cuenta la distancia de la masa del deslizamiento a partir del cálculo de parámetros geométricos, tomando las siguientes variables y su relación con la expresión:

$$Z = \frac{H}{d}$$

Dónde:

H= Es la relación o diferencia de cotas entre el punto de desprendimiento del material y la parte más baja de la vertiente, es decir, los valores de cota máxima (C_{Tmax}) y cota mínima (C_{Tmin}).

d= Es la distancia entre el punto de desprendimiento del material y un pixel con un valor de cota mínima determinado.

Z= Se asocia al isocontorno formado por las diferentes trayectorias o valores de d resultantes.

Los puntos críticos o zonas desde las cuáles se pudo generar un desprendimiento de materiales en la parte alta de las laderas analizadas, se determinaron a partir de los resultados obtenidos en los análisis de amenaza. Una vez realizado este proceso y en conjunto con las diferencias de cotas obtenidas a partir del MDE, se aplicó la ecuación para cada uno de los puntos analizados, obteniendo como resultado la generación de un isocontorno con diferentes probabilidades de trayectoria de desplazamiento.

Para el presente estudio se tomó el valor del cociente aplicado entre la variable H y la d, a partir de 0.4, ya que este concentra hasta el 90% de probabilidad de las trayectorias, por lo tanto, el isocontorno arrojado no se asocia en sí a la trayectoria

del material, sino que se entiende en términos de probabilidad.

3.2.9. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

Para el correcto desarrollo de la zonificación de amenaza por movimientos en masa se tuvo como principal criterio los parámetros establecidos en el decreto 1626 de 2015, basados en la información de detalle obtenida de la inspección de campo y la exploración del subsuelo para posteriormente calcular los factores de seguridad al deslizamiento de cada perfil. Estos modelos requirieron de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se tomó de acuerdo a lo planteado en el decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo. Para el caso seudoestático se consideró que factores por encima de 1.1 garantizan la estabilidad de la ladera, siendo este criterio utilizado en la práctica general.

Los resultados de los análisis de estabilidad se extrapolaron a todo el polígono utilizando criterios geomorfológicos, buscando integrar áreas con las mismas características presentes en los perfiles de estabilidad, para lo cual se utilizó el criterio experto del geólogo y geotecnista. Se descartó la utilización de metodologías de superposición de mapas, puesto que en estudios anteriores los técnicos de Planeación Municipal consideraron este tipo de mapas, menos precisos.

3.3. ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD

Para la evaluación de la vulnerabilidad por movimientos en masa se partió de la metodología planteada por el SGC (2015), con la cual se caracterizaron los elementos expuestos y se evaluó la fragilidad de los mismos. Finalmente se estimó la intensidad para los escenarios de movimientos en masa lentos y rápidos, de acuerdo a las características de cada una de las zonas en estudio. Es de anotar que, de acuerdo a la normatividad nacional y municipal, la vulnerabilidad evaluada fue únicamente la de tipo físico.

Para la definición de la vulnerabilidad física en los polígonos que comprendieron el área de estudio se realizó un análisis para las construcciones y para las líneas vitales.

3.3.1. Fichas de levantamiento de la información.

Esta etapa comprendió la revisión de la información secundaria, la generación de mapas que integraron la información de catastro y la red vial, además de la generación y validación de las fichas de levantamiento de la información. Estas últimas se modificaron a partir de la metodología del SGC (2015) y fueron adaptadas según las condiciones encontradas en los polígonos.

Las fichas elaboradas para el levantamiento de información y el diligenciamiento para su instructivo se encuentran en la carpeta de anexos y se enumeran a continuación:

- Ficha de levantamiento de construcciones
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Acueducto
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Energía
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Vías
- Ficha de levantamiento de líneas vitales: Alcantarillado

3.3.2. Trabajo de campo

El trabajo de campo incluyó dos etapas, la primera de ellas relacionada con la validación y construcción de las fichas de levantamiento de información y la segunda, que comprendió el mayor porcentaje de las actividades de campo, estuvo asociada al diligenciamiento de las fichas en cada uno de los polígonos que incluyó un registro fotográfico de cada uno de los elementos. La identificación de las construcciones se realizó por medio del código catastral CBML (Comuna – Barrio – Manzana – Lote), cuando se presentaron viviendas nuevas en los polígonos, se les asignó un nuevo código CBML según la ubicación del lote, para permitir su referenciación y levantamiento.

Para el análisis de las líneas vitales, se realizó el levantamiento de la totalidad de ellas en el caso de las redes viales; mientras que para las de acueducto y alcantarillado su levantamiento estuvo supeditado a su visualización. Finalmente, las fichas de las estructuras relacionadas con las redes de energía se diligenciaron para aquellas que presentaron daños o algún tipo de deterioro.

Es de anotar que, para el levantamiento de las fichas de campo, se desarrolló un aplicativo digital, el cual garantizó la integridad de la información y la digitalización directamente en campo.

3.3.3. Análisis de la información

Una vez concluido el trabajo de campo, se realizó el procesamiento de la información, los distintos parámetros obtenidos permitieron la identificación y localización de los elementos expuestos, la evaluación de la fragilidad y la resistencia de cada una de las construcciones y las líneas vitales levantadas.

3.4. VULNERABILIDAD EN LAS CONSTRUCCIONES

Para la evaluación de la vulnerabilidad por construcción como se mencionó anteriormente, se partió de la metodología planteada por el SGC (2015), sin embargo, a esta se le realizaron algunos ajustes en función de incluir algunos factores que para el contexto de la ciudad de Medellín son importantes, como la inclusión del tema de servicios públicos específicamente acueducto y alcantarillado. De igual manera, fueron ajustados los valores de fragilidad de algunos factores, pues la aplicación en otros ejercicios anteriores, mostraban que eran muy restrictivos

3.4.1. Cálculo de la fragilidad

Para el caso de los elementos a evaluar (construcciones y líneas vitales) dependió de las características de estos.

Fragilidad para movimientos en masa: siguiendo la metodología propuesta por Li et al. (2010), modificada por Du et al. (2013), se consideraron cuatro parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones, relativos al tipo de estructura (S_{tip}), su altura (S_{alt}), su conservación (S_{con}) y su edad (S_{ed}), adicional a los anteriores, se adicionaron la fragilidad de acueducto y de alcantarillado, debido a la influencia de estos factores en la vulnerabilidad de las construcciones ubicadas en las laderas de la ciudad. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de la estructura (S_e) con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_e = 1 - \pi (1 - s_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip}) (1 - S_{alt}) (1 - S_{con}) (1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros

3.4.2. Intensidad de los movimientos en masa lentos en edificaciones.

Los parámetros de intensidad para este escenario de análisis, según la propuesta de Du et al. (2013), son la velocidad, las deformaciones locales y la profundidad del deslizamiento, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$I_{len} = 1 - (1 - I_{l-def}) (1 - I_{l-vel}) (1 - I_{l-prof})$$

Donde

I_{len} es la intensidad para movimientos lentos. Un valor de intensidad de 1,0 indica que el evento tiene el potencial de destruir todos los elementos en su trayectoria.

I_{l-def} es el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen asentamientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones. El parámetro de intensidad I_{l-def} se da para la relación de estas deformaciones con respecto a los umbrales tolerables según la tipología de la edificación.

I_{l-vel} es el parámetro de intensidad por velocidad.

I_{l-prof} es el parámetro de intensidad por profundidad de la masa deslizada. Para edificaciones localizadas sobre deslizamientos activos, el grado de daño depende principalmente de la profundidad relativa de la cimentación de la estructura con respecto a la profundidad de la superficie de falla.

En el anexo metodológico se encuentra las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.4.3. Intensidad de los movimientos en masa rápidos en edificaciones.

En términos generales, la intensidad de los movimientos en masa en este escenario se definió en función de su profundidad y de la presión de impacto según la siguiente ecuación la ecuación propuesta por Du et al. (2013):

$$I_{rap} = 1 - (1 - I_{f-pre}) (1 - I_{f-prof})$$

I_{rap} es la intensidad para el escenario con movimientos rápidos.

I_{f-pre} es el parámetro de intensidad debido a la presión y se estima a partir de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la estructura.

I_{f-prof} es el parámetro de intensidad por la profundidad del deslizamiento. Este parámetro se presenta en función de la relación entre la profundidad del deslizamiento y la altura de la edificación.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5. VULNERABILIDAD EN LAS LÍNEAS VITALES

De manera análoga, la evaluación de la vulnerabilidad en las construcciones para las líneas vitales se calculó la fragilidad de acuerdo a la característica de cada línea y posteriormente la intensidad.

Para los diferentes fenómenos amenazantes, la fragilidad se consideró igual y la intensidad si presenta variaciones de acuerdo al fenómeno.

3.5.1. Fragilidad en líneas vitales

La fragilidad en las líneas vitales se evaluó para las redes viales, de acueducto y alcantarillado y energía, esta última evaluada a partir de los postes.

Fragilidad en vías: para evaluar la fragilidad en las vías se consideraron los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y daños. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad de las vías con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$S_{vías} = 1 - (1 - S_{mat})(1 - S_{dr})(1 - S_{da})$$

$$S = S_i \cdot \text{Factor incidencia}$$

Dónde S_{mat} es el factor de fragilidad por material/tipo; S_{dr} es el factor de fragilidad por existencia de obras de drenaje y S_{da} es el factor de fragilidad por existencia de daños en el tramo de estudio.

Fragilidad en acueducto: para evaluar la fragilidad en el acueducto se consideraron los parámetros de operador de red, el estado, el diámetro, la deflexión y el material. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad del acueducto con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{Sacued = 1 - (1 - Soperad \text{ de red})(1 - Sestado)(1 - Sdiám)(1 - Smat)}$$

Dónde *Soperad de red* es el factor de fragilidad por operador de red; *Sestado* es el factor de fragilidad por estado, *Sdiám* es el factor de fragilidad por diámetro y *Smat* es el factor de fragilidad por material.

Fragilidad en alcantarillado: para evaluar la fragilidad en el alcantarillado se consideraron los parámetros de operador de red, el estado y el material. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad del alcantarillado con la siguiente ecuación que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{Salcant = 1 - (1 - Soperador \text{ de red})(1 - Sest)(1 - Smater)}$$

Donde *Soperador de red* es factor de fragilidad por operador de red, *Sest* es el factor de fragilidad por estado de red y *Smater* es el factor de fragilidad por material

Fragilidad en la energía: para evaluar la fragilidad en la energía se consideraron los parámetros de carga y estado de las redes. Partiendo de estos parámetros, se calculó la fragilidad con la ecuación que se presenta a continuación, que al desarrollar cada uno de sus factores se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{Senergía = 1 - (1 - Scarga)(1 - Sestado)}$$

Donde *Scarga* es el factor de fragilidad por carga de red y *Sestado* es el factor de fragilidad por estado de la red.

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para cada uno de los parámetros.

3.5.2. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa lentos

Para el cálculo de la intensidad por movimientos en masa lentos para líneas vitales, se siguió la metodología propuesta por el SGC (2015), en donde se empleó el parámetro de intensidad por deformación. Entre las deformaciones se incluyen hundimientos, desplazamientos horizontales e inclinaciones.

Intensidad en vías: para el caso de vías, de acuerdo con los niveles de daño definidos para los pavimentos flexibles y rígidos en las guías de inspección visual del Invías (2006 a y b), el umbral tolerable de deformación es 40 mm.

Intensidad en acueducto: considerando que el deslizamiento impone una carga uniforme a lo largo del tubo, los umbrales tolerables están dados por la ecuación

$$\delta = 0,0075 \frac{1}{D}$$

Con el diámetro D en metros.

Intensidad en alcantarillado: teniendo en cuenta las características de las uniones de las tuberías de gres, se definió un umbral tolerable de 5 cm.

Intensidad en energía: para este caso se utilizó la mitad de la flecha máxima permitida para el diseño de los postes, correspondiente al 3 % de la altura nominal de estos.

3.5.3. Intensidad en líneas vitales para movimientos en masa rápidos

Para este tipo de eventos según el SGC (2015), en las vías se contemplaron los parámetros de intensidad en función del ancho invadido, para redes de acueducto y alcantarillado los desplazamientos inducidos al terreno y para las redes de electricidad la presión ejercida por masa deslizada sobre los postes.

El parámetro de intensidad de la amenaza para redes viales se definió a partir del ancho de vía invadido u ocupado por la masa deslizada.

Para evaluar la intensidad en redes de acueducto y alcantarillado, con un escenario de movimiento rápido de la masa inestable, se estableció el parámetro en función de la relación de desplazamientos inducidos y el umbral tolerable, como se definió para movimientos lentos (SGC, 2015).

En el anexo metodológico se encuentran las diferentes tablas y fórmulas requeridas para calcular cada uno de los parámetros.

3.6. VULNERABILIDAD EN LAS PERSONAS

La evaluación de la vulnerabilidad en las personas, se desarrolló a partir de la metodología planteada por el SGC (2015). Sin embargo, como el inventario de elementos expuestos se realizó por construcción y no correspondió a un censo de población, se tomó para su cálculo el número de personas promedio por vivienda del barrio.

La vulnerabilidad física de personas se evaluó en conjunto con la vulnerabilidad de edificaciones). Para este trabajo, la fragilidad de personas en estructuras se determinó en función de la fragilidad de tales estructuras, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S_{per} = (S_e)^{3.2}$$

Donde S_{per} es la fragilidad de las personas.

La intensidad en las personas se evaluó de la misma manera que se evaluó para las construcciones.

3.7. CÁLCULO Y ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad es función de la fragilidad y de la intensidad del evento amenazante, para su cálculo se evaluaron las metodologías propuestas por Guimarães (2015) y por Du et al. (2013, 2014, en SGC, 2015). Los resultados de las metodologías son muy similares, siendo un poco más conservadora la metodología de Du et al, la cual fue empleada para este estudio y la cual se resume en la siguiente ecuación.

$$V = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(\frac{I}{1-S} \right)^2 & I \leq 1 - S \\ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{1-I}{S} \right)^2 & I > 1 - S \end{cases}$$

Dónde:

V es la vulnerabilidad de los elementos expuestos a la amenaza

I es la intensidad del evento

S es la fragilidad del elemento expuesto

Los rangos dados a la vulnerabilidad fueron: para vulnerabilidad baja valores menores de 0,1, para vulnerabilidad media valores entre 0,1 y 0,5, y para vulnerabilidad alta valores superiores a 0,5.

Se definieron las categorías de vulnerabilidad para personas en edificaciones basados en Li et al. (2010), Du et al. (2013) y Coburn (2002, en Du et al., 2013). Para el cálculo y la zonificación de la vulnerabilidad en las personas, se partió de la misma ecuación y se tomó el valor de S como la fragilidad de las personas.

3.8. EVALUACIÓN DEL RIESGO

La evaluación del riesgo se realizó para cada uno de los elementos expuestos (construcciones y líneas vitales) en función de definir acciones puntuales de mitigación y para los polígonos de análisis en función de definir restricciones de uso desde la planificación.

3.8.1. Riesgo por Elementos Expuestos.

El riesgo es función de la amenaza y la vulnerabilidad, para fines cartográficos se definió la siguiente regla de decisión para determinar el nivel de riesgo para los elementos expuestos, la cual ha sido modificada del decreto 1626 de 2015 (Tabla 1).

Tabla 1. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

La regla de decisión utiliza los valores de los rangos de amenaza y vulnerabilidad definida en los componentes anteriores. De igual manera, en función de determinar

la probabilidad de que se generen daños y su magnitud a partir de la vulnerabilidad y el fenómeno amenazante, se realizó la estimación de la probabilidad anual para la amenaza. Para el caso de los movimientos en masa esta probabilidad anual estuvo en función de los periodos de retorno de los eventos de lluvia que tienen una incidencia sobre los movimientos en masa y de los sismos, para el cual se trabajó con el periodo de retorno de 475 años. El valor de la amenaza se multiplicó con la vulnerabilidad y de esta manera se obtuvo el indicador de riesgo por elemento expuesto.

Para el riesgo por personas se aplicó esta misma tabla de decisión y la cantidad total de personas en riesgo se evaluó a partir de un valor promedio de habitante por vivienda en cada barrio. Es de anotar que el número de personas en riesgo es un estimado, ya que no se realizó un censo de población.

3.8.2. Riesgo por Polígono.

Para realizar la evaluación de riesgo por polígono para movimientos en masa, se revisaron varias metodologías como la de Cardinali et al., (2002) y de Fell y Hartford (1997). Finalmente, a partir de los posibles escenarios y de integrar la magnitud de la amenaza, que depende de la velocidad y la profundidad, con la probabilidad de que se presente el fenómeno, obtenida de la amenaza o del análisis de estabilidad, se elaboró la siguiente regla de decisión. Es de anotar que la condición de mitigabilidad de una zona está en función no solo de las características de la amenaza y la vulnerabilidad, sino de la relación costo beneficio (Tabla 2).

Tabla 2. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.

Factores	Magnitud de la amenaza	Amenaza según factores seguridad	Índice de vulnerabilidad (Edificaciones)	Zona de riesgo por movimientos en masa
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Alta	1.0	Extremadamente alto/No Mitigable/Soluciones Alto Costo
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Media	1.0	Riesgo Alto
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Baja	1.0	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Alta	0,6	Riesgo Alto
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Media	0,6	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Baja	0,6	Bajo
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Alta	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Media	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Baja	0.7	Bajo
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Alta	0,5	Riesgo Alto
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Media	0,5	Medio
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Baja	0,5	Bajo
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Alta	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Media	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Baja	0.4	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Alta	0.1	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Media	0.1	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Baja	0.1	Bajo

Los parámetros de magnitud y probabilidad de la amenaza, se combinaron en la regla de decisión generando un criterio para determinar la zona de riesgo. Ahora bien, el nivel de mitigabilidad está en función de la relación de los elementos expuestos, específicamente de su cantidad y calidad, con los costos de las obras de mitigación, por lo tanto, la definición de mitigabilidad se hizo de manera particular para cada polígono estudiado y no obedece a una regla de decisión fija.

4. REVISIÓN DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

Para la elaboración de este documento, se tuvo en cuenta la información secundaria recopilada en varias instituciones, tales como el Departamento Administrativo de Planeación, Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Corantioquia. La información utilizada se sintetiza a continuación, donde se indica cuáles son los datos más relevantes y de utilidad para el proyecto.

Título	Mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas en la jurisdicción de Corantioquia
Autor (es)	Corantioquia
Año	2002
Localización de referencia: Jurisdicción de Corantioquia	
Resumen: Este mapa representa la geomorfología de los municipios que conforman la jurisdicción de Corantioquia, organizada de forma jerárquica a escala 1:100.000, donde se tienen en cuenta el origen de las unidades. Además, se presenta el mapa de amenazas y áreas degradadas, donde se señalan las áreas prioritarias para la intervención de la corporación.	
Observaciones: La jerarquización establecida en el mapa geomorfológico de Corantioquia permite amarrar los a niveles regionales los mapas geomorfológicos de cada polígono.	

Título	Estudio geológico y patológico estructural en zonas de riesgo del barrio Llanaditas
Autor(es)	Solingral S.A.
Año	2006
Localización de referencia	Llanaditas, comuna 8
Resumen: En este documento se presenta un análisis de la problemática del sector de Llanaditas basada en los estudios geológicos y geomorfológicos, apoyados en los resultados de los recorridos de campo, de la exploración geotécnica y los ensayos de laboratorio. Se presentan las características del terreno, la capacidad de soporte del suelo y las recomendaciones para mejorar los problemas de estabilidad. Se presentan los lineamientos generales para el diseño y construcción de las obras recomendadas tendientes a mejorar las condiciones de estabilidad global. También se presentan las conclusiones con respecto a la evaluación de la patología estructural de las viviendas y se dan algunas recomendaciones para mejorar el comportamiento de las mismas.	
Observaciones: Concluye que el barrio Llanaditas tiene un grado medio de estabilidad, condicionada al manejo del territorio, no se presenta evidencias de deslizamientos antiguos de gran magnitud directamente en los terrenos estudiados; se identificaron algunos deslizamientos	

activos y caídas de bloques rocosos en las laderas más escarpadas, pero corresponden a procesos de erosión superficial que deben ser tratados.

Permite ajustar y correlacionar información de campo y de sondeos realizados con la exploración programada para el polígono Llanaditas.

Título	Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado
Autor (es)	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Año	2007
Localización de referencia: Municipios del Valle de Aburrá	
Resumen: Un estudio detallado de la geología, geomorfología, neotectónica, geotecnia y de la amenaza sísmica para los municipios del Valle de Aburrá, permitieron obtener la Microzonificación Sísmica detallada de estos municipios. Se define para el municipio de Medellín que la aceleración máxima en el basamento rocoso con un periodo de retorno promedio de 475 años es de 0,22 g y se pueden presentar desplazamientos máximos del terreno de 22 cm.	
Observaciones (Pertinencia para el estudio): Información básica de geología y geomorfología escala 1:10.000, de la cual se parte para detallar a escala 1:2.000 en los polígonos objeto de estudio.	

Título	Descripción de zonas homogéneas - Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2011
Localización de referencia: Municipio de Medellín	
Resumen: Después de entrar en vigencia la norma NSR-2010 y el estudio de Microzonificación sísmica del 2007, se definieron 14 zonas homogéneas para el municipio de Medellín de acuerdo con el comportamiento particular de los diferentes tipos de suelos frente a los sismos. También se presenta el mapa con la distribución espacial de estas zonas y los coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño para cada una de éstas, valores que corresponden a la aceleración máxima esperada en la superficie del terreno.	
Observaciones (Pertinencia para el estudio): De esta información se obtiene el valor de aceleración máxima en el terreno para el sismo para los análisis geotécnicos de estabilidad de las laderas.	

Título	Implementación de estudios, monitoreo y caracterización geotécnica hidrogeológica y análisis de vulnerabilidad estructural a desarrollar a través de la inversión de recursos de presupuesto participativo en las comunas de la ciudad de Medellín según puntos de referencia
Autor(es)	EIP LTDA

Año	2011
Localización de referencia: Barrio 13 de noviembre, sector Isaac Gaviria.	
Resumen: El estudio detalla aspectos geológico, geotécnico, hidráulico y estructural para determinar las causas de los problemas que se presentan en cada sector asignado, para lo cual se presentaran las conclusiones y recomendaciones orientadas a definir si es del caso las obras de intervención necesarias para mitigar, corregir o prevenir posibles efectos negativos sobre el terreno que afecten de manera directa la población.	
Observaciones: Se propone diferentes alternativas de intervención de aquellos sectores o zonas donde se presenten problemas asociados a la dinámica geomorfológica, a las condiciones estructurales de las edificaciones que se requieren para efectos de lograr mejorar las condiciones de estabilidad de la zona.	
La información presentada en el estudio, en especial las descripciones geológicas y geotécnicas permitirán acopiar información para los análisis del sector Llanaditas	

Título	Formulación, planificación y estudios técnicos del proyecto cinturón verde metropolitano, en el área perteneciente al municipio de Medellín, Escala Media: Formulación de planes maestros del cinturón verde metropolitano en Medellín / Empresa de Desarrollo Urbano ; Departamento Administrativo de Planeación
Autor (es)	Empresa de Desarrollo Urbano (EDU)
Año	2013
Localización de referencia: Medellín	
Resumen: El documento desarrolla el diagnóstico y la formulación de 14 planes maestros para las áreas del CVM. Se identificaron las problemáticas y potencialidades del territorio, se plantearon los objetivos y estrategias específicas para cada tipo de borde, y se establecieron las diferentes tipologías de proyecto. Así mismo se definieron los proyectos a priorizar para una intervención a mediano plazo (tomado de la metodología)	

Título	Elaboración de estudios geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, de estabilidad de laderas, análisis de la vulnerabilidad estructural de las edificaciones y diseños de obras en zonas vulnerables de las comunas 1, 8 y 13 del municipio de Medellín
Autor (es)	GEOCING
Año	2013
Localización de referencia: Comuna 8 – sector Enciso (calle 59 A con carrera 22 A)	
Resumen: Este documento presenta la recopilación de información, la interpretación de las observaciones realizadas durante la fase de reconocimiento en campo, indicando características geológicas – geotécnicas de la zona de estudio, que corresponde a dos sectores incluidos dentro de la UMI. Dentro de los elementos realizados dentro de este estudio, se encuentran:	

- Definición de las características geológicas y geomorfológicas
- Identificación de procesos de inestabilidad actual y potencial, estableciendo los mecanismos de falla presentes, área de influencia y grado de actividad.
- Identificación de factores contribuyentes y detonantes de los procesos de remoción en masa.
- Zonificación de amenazas por movimientos en masa de acuerdo a análisis geotécnicos.
- Identificación de la vulnerabilidad estructural de las viviendas ubicadas en la zona
- Elaboración de los diseños para construcción de las obras recomendadas, soportados técnicamente en los análisis de ingeniería, representados en planos y esquemas.

Observaciones: Para los polígonos se realizaron 2 perforaciones de 20m cada una de ellas, 12 trincheras y 4 líneas sísmicas, las cuales se utilizan como referencia para los análisis de este proyecto. Para los perfiles analizados se plantea la colocación de Anclajes de 10 Ton, de 15 m de longitud cada 3.0 m instalados con un ángulo de 15° con la horizontal

Título	Estudios de microzonificación geológico – geotecnia, de Suelos, e hidrológicos y análisis de estabilidad de laderas para la recuperación de zonas de riesgo en sectores del Barrio Llanaditas influenciadas por los proyectos del Cinturón verde metropolitano en la ciudad de Medellín.
Autor (es)	Deacivil
Año	2014
Localización de referencia: Barrio Llanaditas y vereda Matasanos (Santa Elena)	
<p>Resumen: Este documento contiene la metodología de exploración, cálculo y análisis efectuados para realizar la zonificación de amenaza ante movimientos en masa y zonificación de aptitud geológica dentro de la zona de estudio especificada, la cual corresponde al barrio Llanaditas y parte del suelo rural en la zona aledaña al camino indígena que conduce hasta la laguna de Guaren. Dentro de los alcances de este estudio se encuentran:</p> <p>Los alcances mínimos de este trabajo son los siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Estudio geológico y geomorfológico detallado siguiendo los lineamientos del acuerdo metropolitano 09 de 2012 • Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio según los lineamientos del acuerdo metropolitano 09 de 2012 • Análisis de estabilidad de taludes de los taludes en las condiciones actuales y considerando las intervenciones del Cinturón Verde. En los análisis se considerarán los escenarios y criterios definidos en el acuerdo metropolitano 09 de 2012. • Zonificación de la amenaza por movimientos de masa en la zona de estudio. • Estimación y análisis de vulnerabilidad de la zona en estudio. • Zonificación de vulnerabilidad por movimientos de masa en la zona de estudio. • Estimación y análisis de riesgo debido a movimientos de masa de la zona en estudio. 	
Observaciones:	

- Este estudio sirve como base para la definición de las condiciones geológicas y geomorfológicas de la zona, debido a que se presenta una caracterización detallada de dichos elementos al igual que exploración del subsuelo.
- Se presenta un análisis de valores de resistencia del suelo, además de parámetros de cohesión y fricción para las formaciones superficiales identificadas, que igualmente sirven de base para el análisis acá propuesto.
- igualmente se presenta una zonificación de amenazas, vulnerabilidad riesgos, con metodologías que difieren a las empleadas en el actual de estudio, pero que igualmente sirven de referencia.
- Se presentan recomendaciones para cada zona de aptitud geológica generada, muchas de las cuales actualmente son aplicables, por lo que se pueden retomar.

Título	Estudios de microzonificación geológico – geotecnia, de Suelos, e hidrológicos y análisis de estabilidad de laderas para la recuperación de zonas de riesgo en sectores del Cerro Pan de Azúcar influenciadas por los proyectos del Cinturón verde metropolitano en la ciudad de Medellín.
Autor (es)	Deacivil
Año	2014
Localización de referencia: Los límites del polígono definido para el estudio son la quebrada la Castro al norte, divisoria de aguas de la cañada del Cura y la quebrada La Castro No. 2 en el sur, la divisoria de aguas entre las quebradas La Castro 4 y la Chorro Hondo en el occidente.	
Resumen: Este documento contiene la metodología de exploración, cálculo y análisis efectuados para realizar la zonificación de amenaza ante movimientos en masa y zonificación de aptitud geológica dentro de la zona de estudio especificada, la cual corresponde al barrio Llanaditas y parte del suelo rural en la zona aledaña al camino indígena que conduce hasta la laguna de Guaren. Dentro de los alcances de este estudio se encuentran: Los alcances mínimos de este trabajo son los siguientes: <ul style="list-style-type: none"> • Estudio geológico y geomorfológico detallado siguiendo los lineamientos del acuerdo metropolitano 09 de 2012 • Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio según los lineamientos del acuerdo metropolitano 09 de 2012 • Análisis de estabilidad de taludes de los taludes en las condiciones actuales y considerando las intervenciones del Cinturón Verde. En los análisis se considerarán los escenarios y criterios definidos en el acuerdo metropolitano 09 de 2012. • Zonificación de la amenaza por movimientos de masa en la zona de estudio. • Estimación y análisis de vulnerabilidad de la zona en estudio. • Zonificación de vulnerabilidad por movimientos de masa en la zona de estudio. • Estimación y análisis de riesgo debido a movimientos de masa de la zona en estudio. 	
Observaciones:	

- Este estudio sirve como base para la definición de las condiciones geológicas y geomorfológicas de la zona, debido a que se presenta una caracterización detallada de dichos elementos al igual que exploración del subsuelo.
- Se presenta un análisis de valores de resistencia del suelo, además de parámetros de cohesión y fricción para las formaciones superficiales identificadas, que igualmente sirven de base para el análisis acá propuesto.
- igualmente se presenta una zonificación de amenazas, vulnerabilidad riesgos, con metodologías que difieren a las empleadas en el actual de estudio, pero que igualmente sirven de referencia.
- Se presentan recomendaciones para cada zona de aptitud geológica generada, muchas de las cuales actualmente son aplicables, por lo que se pueden retomar.

Título	Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín. Acuerdo 048 de 2014
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2014
Localización de referencia: Municipio de Medellín.	
Resumen: Plan de Ordenamiento Territorial se consigna el conjunto de objetivos, directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas para orientar y administrar el desarrollo físico del territorio y la utilización del suelo urbano y rural del municipio de Medellín.	
Observaciones: El acuerdo 048 de 2014, define las zonas con condiciones de riesgo y las zonas de amenaza alta, que son objeto para la elaboración de los estudios de riesgo o de amenaza de detalle que definan su mitigabilidad o no. Dichos estudios, determinarán la posibilidad de desarrollo del suelo o su permanencia dentro de la categoría de suelo de protección. Una vez sean redelimitadas dichas zonas, les aplicarán las demás normas generales del polígono en el que se ubiquen. A partir del POT igualmente se determina la clasificación del suelo y se determinan las otras restricciones que desde el punto de vista ambiental exhiben cada uno de los polígonos estudiados.	

Título	Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de detalle para los polígonos de barrios sostenibles en el municipio de Medellín. Polígonos Golondrinas y El Faro
Autor (es)	SIGA Ingeniería y consultoría
Año	2016
Localización de referencia: Barrio Llanaditas	
Resumen: En este informe se presentan los resultados de los estudios de los polígonos correspondiente a los sectores El Faro y Golondrinas del barrio Llanaditas. El alcance final fue la definición de las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del Polígono, por medio de métodos cuantitativos y fácilmente reproducibles. Al	

interior de las zonas con riesgo mitigable se definen las medidas de estabilización estructural y no estructural, que puedan ayudar a la mitigación de dicho riesgo.

La metodología empleada en dichos informes se basa en la implementación de teorías de equilibrio límite, flujo de agua y flujo de detritos y la probabilidad de ocurrencia de los mismos, que permiten determinar condiciones críticas de factor de seguridad, velocidades de flujo y niveles de agua y establecer con estas las condiciones de amenaza regional y local de la zona de estudio. Las condiciones de amenaza por los diferentes eventos se analizaron a la luz de la información de la infraestructura física presente en cada uno de los polígonos, determinándose para tal fin la vulnerabilidad física de las estructuras a través de la identificación de algunos aspectos específicos de la misma como son el tipo de estructura y sus materiales, el estado o mantenimiento y el nivel de fundación. Finalmente, los análisis de amenaza y vulnerabilidad por los diferentes escenarios permitieron obtener las zonas de riesgo y determinar si el mismo puede ser mitigable o no mitigable.

Observaciones: La zona con condición de riesgo específica no incluye la zona objeto de este estudio, sin embargo, la caracterización realizada para la UMI si es aplicable, por lo que se retoman los siguientes aspectos:

- Este estudio sirve como base para la definición de las condiciones geológicas y geomorfológicas de la zona, debido a que se presenta una caracterización detallada de dichos elementos al igual que exploración del subsuelo.
- Se presenta un análisis de valores de resistencia del suelo, además de parámetros de cohesión y fricción para las formaciones superficiales identificadas, que igualmente sirven de base para el análisis acá propuesto.
- igualmente se presenta una zonificación de amenazas, vulnerabilidad riesgos, con metodologías que difieren a las empleadas en el actual de estudio, pero que igualmente sirven de referencia.

Se presentan recomendaciones para cada zona de aptitud geológica generada, muchas de las cuales actualmente son aplicables, por lo que se pueden retomar.

Título	Gestión del riesgo y desastre en el Municipio de Medellín, Lecciones aprendidas
Autor (es)	Mario Augusto Flórez Arroyave
Año	2016
Localización de referencia: Municipio de Medellín	
Resumen: El libro presenta una recopilación y un análisis detallado de los principales eventos (movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) que han ocurrido en la ciudad de Medellín desde el año 1954, con énfasis en los grandes desastres como Villatina, El Socorro, Alto Verde, etc, y a partir de los cuales se precisa en la ciudad el concepto de riesgos, a partir de una serie de estudios, proyectos y programas, para el manejo integral de la gestión del riesgo, los cuales han permitido su incorporación en el ordenamiento territorial y desarrollo de la ciudad.	
Observaciones: Los datos de obtenidos de esta información permite reportar los eventos ocurridos en cada polígono para entender el contexto de la morfodinámica del sector.	

Título	Inventarios de eventos reportados por el DAGRD y departamento de Planeación Alcaldía de Medellín
Autor (es)	Alcaldía de Medellín
Año	2017
Localización de referencia: Medellín	
Resumen: La información relacionada con visitas a diferentes sectores de la ciudad, donde han ocurrido emergencias por diferentes fenómenos (movimientos en masa, inundaciones, incendios, etc.) son consignadas en fichas y mapas que permiten tener construir un registro histórico de los eventos en la ciudad.	
Observaciones: Los datos de obtenidos de esta información permite reportar los eventos ocurridos en cada polígono para entender el contexto de la morfodinámica del sector.	

5. ASPECTOS GEOLÓGICOS GENERALES

5.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se localiza sobre la vertiente oriental del Valle de Aburrá, donde el basamento rocoso y las rocas más antiguas se encuentran representadas por rocas metamórficas de edad Triásica denominadas Anfibolita de Medellín (TRaM) las cuales se presentan como una secuencia de rocas intercaladas que afloran especialmente asociados a salientes topográficos. Esta unidad de rocas, fue obducida durante el Jurásico por cuerpos alargados de composición dunítica, basaltos y sedimentos de origen marino, fuertemente afectados tectónicamente representados por la denominada “Dunita de Medellín (JKuM)”. Adicionalmente estas unidades han sido intruídas por las rocas ígneas de edad Cretácica representadas por el Stock de San Diego, además de un pequeño cuerpo del Stock de las Estancias. Finalmente y asociado a los procesos naturales que han afectado dicha vertiente se identifican una serie de materiales recientes de edad Cuaternaria, correspondientes a depósitos de vertiente asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y que se han acumulado en zonas de menor pendiente, representando una compleja secuencia de depósitos con edades desde el Terciario Tardío hasta el Cuaternario, además de depósitos aluviales y aluvio – torrenciales asociados a la dinámica deposicional de algunos cuerpos de agua como la quebrada Santa Elena y algunos de sus principales afluentes (Figura 2).

A continuación, se describen las características principales asociado a los materiales de roca que desde el punto de vista regional afloran en la zona de estudio.

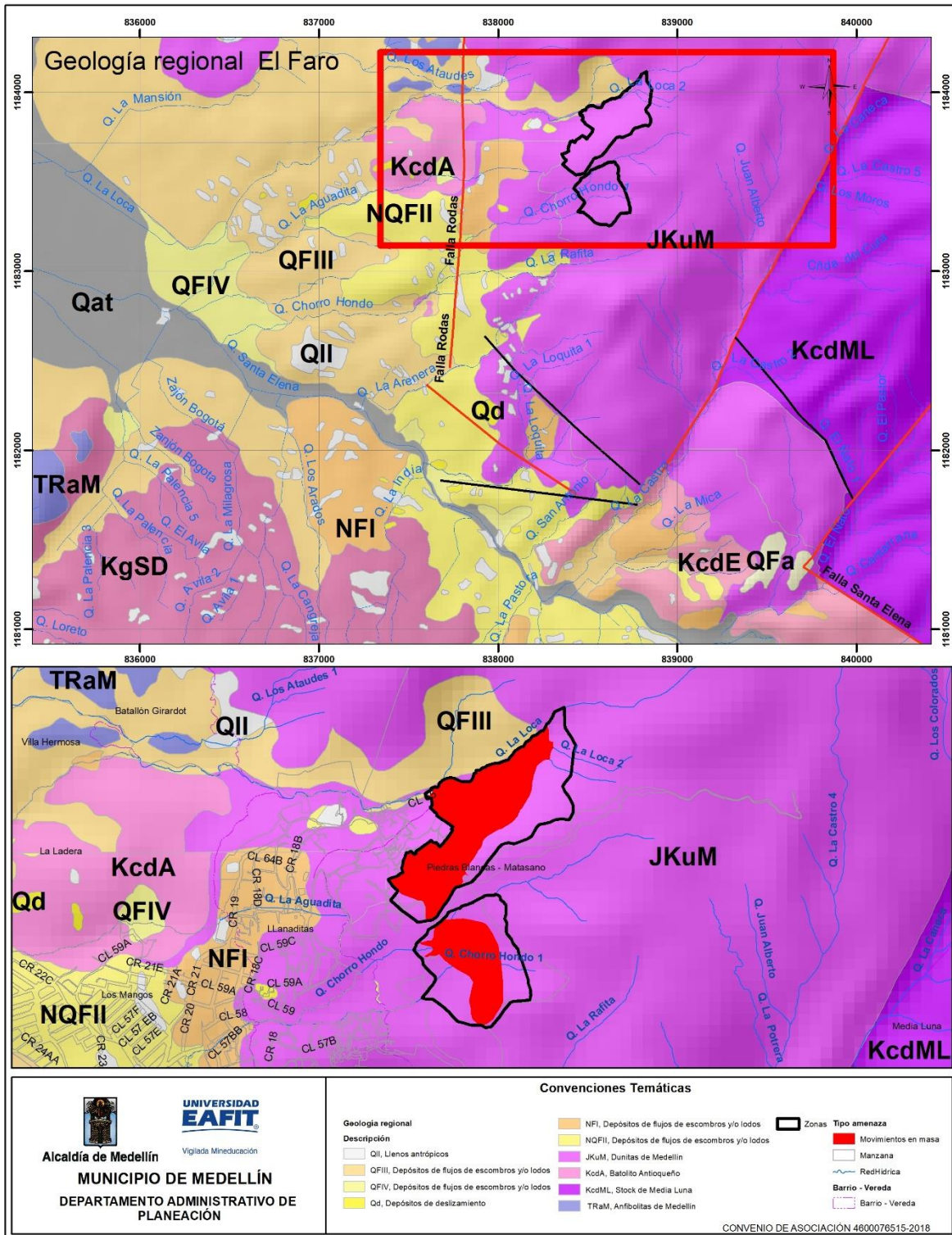


Figura 2. Mapa geológico regional del polígono El Faro. Tomado de AMVA - Alcaldía de Medellín, 2017

5.1.1 Estratigrafía

- ***Anfibolita de Medellín (TRaM)***

Definidas por Jaramillo (1971), como Anfibolitas de Medellín, están incluidas dentro del Complejo El Retiro; posteriormente ha sido estudiada recientemente por Correa et al. (2005), Pereira et al (2006), Restrepo (2008) y Rodríguez et al. (2008), y proponen diferentes formas de agruparla con otros cuerpos metamórficos, origen y edad. En este trabajo se describe la unidad Anfibolitas de Medellín, en el sentido de Correa et al (2005) conservando la nomenclatura usada por AMVA (2007).

Estas rocas conforman un cuerpo elongado con dirección N – S, que se extiende el municipio de Belmira al norte hasta los municipios de El Retiro y La Ceja al sur. Está compuesta por metabasitas de alto grado asociadas localmente con paquetes de esquistos y paraneises cuarzo feldespáticos con biotita. Macroscópicamente la unidad se caracteriza por la presencia de pocas bandas cuarzo-feldespáticas de espesor milimétrico a centimétrico, y por lineación de anfíboles (Correa et al.; 2005). En general, la roca está profundamente meteorizada, desarrolla suelos residuales con espesores superiores a los 20 m, la textura es limosa y el color predominante es amarillento a amarillo rojizo. Se presentan comúnmente un cambio gradual a un saprolito limo arenoso de color gris verdoso con láminas blancas, el cual presenta estructuras heredadas de la roca parental y donde se define la textura de la roca bandeada. Con frecuencia están cubiertos por depósitos de vertiente derivados de estas mismas rocas (AMVA, 2007).

- ***Dunitas de Medellín (emplazamiento) (JKuM)***

Conforman una faja en forma de cuña dispuesta NNW, ubicada al oriente del Valle de Aburrá, la cual se extiende desde el sector de las Palmas hasta el municipio de San Pedro. Se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita; con alteraciones parciales a minerales del grupo de la serpentinita y está asociada en su origen con los metagabros mencionados. La roca presenta un color negro, verde oscuro o café cuando está meteorizada, se observa un intenso fracturamiento, que se hace más fuerte en las cercanías de las zonas de contacto (AMVA, 2007).

Esta litología conforma las zonas de topografía más abrupta que se observan al oriente del Valle de Aburrá (comuna nororiental), entre las que se incluyen las vertientes escarpadas. La meteorización de estas rocas genera suelos residuales que dependiendo de factores tales como el grado de fracturamiento del macizo,

inclinación de la vertiente, geoformas presentes y condiciones hidrológicas, presentan condiciones y características muy diversas, con espesores variables entre 10 y 40 m. Dichos suelos poseen capas con un alto contenido de hierro, evidenciado por la presencia hacia la superficie de gran cantidad de nódulos de este mineral. Hacia los horizontes más profundos del perfil se observa una mezcla de bloques residuales embebidos en una matriz de material fino, correspondiente a suelo residual, generando una apariencia de depósito de vertiente (AMVA, 2007).

- ***Batolito Antioqueño (KcdA)***

Mencionado inicialmente por Boussignault (1825) y posteriormente descrito por Ospina (1911). El nombre de Batolito Antioqueño fue dado por Botero en el año de 1940 (Ingeominas, 2001). Este cuerpo que está localizado en la parte central del departamento de Antioquia es el más grande y septentrional en la cordillera Central, aflora en un área de 7 221 Km² (Feininger y Botero, 1982). Ingeominas (2001) describe la forma del Batolito como trapezoidal; Feininger y Botero (1982) describen el piso del batolito como una superficie planar, quebrada en algunos lugares por intrusiones de fallas regionales. El contacto con rocas metamórficas regionales es discordante y tajante, generalmente intrusivo con desarrollo de aureolas de contacto, excepto contra anfibolita donde han tenido lugar algunas mezclas (Feininger y Botero, 1982).

- ***Stock de San Diego (KgSD)***

Descrito por Botero, 1963; quien lo consideró como una cúpula menor del Batolito Antioqueño. Posteriormente Restrepo y Toussaint (1984), lo clasifican como stock, determinan un área de unos seis kilómetros cuadrados y le dan el nombre de Stock de San Diego. Es un cuerpo plutónico constituido por rocas ígneas básicas que varían composicionalmente desde dioritas hasta gabros. Mineralógicamente se presentan plagioclasas y hornblenda principalmente, además de algún contenido de olivino y piroxenos. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada, desarrollando suelos residuales, que pueden alcanzar hasta 45 m de espesor, como en el área del Seminario Mayor. Dichos suelos son predominantemente limo - arcillosos, en tonalidades claras de amarillo y blanco con manchas pardas, variando comúnmente a arenas finas (AMVA, 2007).

- ***Stock de Media Luna (KcdML)***

Esta unidad hace parte de un cuerpo menor del Batolito Antioqueño, el cual es bastante similar en características físicas, composición y grado de meteorización con una composición cuarzodiorítica de textura fanerítica media. El contacto, con la Anfibolita de Medellín, se encuentra sepultado por un depósito de deslizamiento y por lo tanto se observa es un cambio geomorfológico.

Se desarrolla suelo (Horizonte IC) producto de la meteorización de la roca original, el cual se caracteriza por ser de color moteado blanco con tonalidades rojizas y amarillosas cuyo espesor visible es de siete metros. Éste se encuentra aflorando en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que de Santa Elena conduce a Medellín (AMVA, 2007)

- ***Stock de Las Estancias (Kcd)***

Corresponde a cuerpos menores de granitoides que, aunque separados geográficamente del cuerpo principal del Batolito Antioqueño, presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares y una posición que hace suponer una relación genética con éste. El Stock de Las Estancias es un cuerpo localizado entre los bloques sur y central de la Dunita de Medellín, en contacto fallado con esta unidad e intrusivo en anfibolitas, presenta una forma irregular con una extensión de 3,6 km², longitud mayor de dirección SW-NE de unos dos kilómetros y una amplitud NW–SE de 1,2 km (AMVA, 2007).

- ***Depósitos de vertiente (FI, FII, FIII)***

Un conjunto de depósitos no litificados que están intercalados con las rocas antes descritas se presentan en el área de interés. Se encuentran depósitos de diferentes edades, que de acuerdo con las características que exhiben en cuanto a grado de consolidación, madurez y grado de incisión son considerados de edades anteriores al Cuaternario y por medio de las relaciones entre ellos son agrupados por eventos. En este grupo se encuentran depósitos de flujos de escombros y/o lodos frescos y maduros y depósitos de deslizamiento.

Los flujos de escombros y/o lodos (NQFI, NQFII, QFIII, QFIV, QFa) representan una serie de eventos relacionados con depósitos de vertiente, donde los depósitos más antiguos se localizan en la parte media y alta de las laderas y los más jóvenes están en la parte baja de éstas. Estos depósitos se caracterizan por la variación en la relación matriz/bloques, la cual confiere el carácter de flujo de lodos o flujo de escombros a los eventos, y aunque esta proporción está muy relacionada con la

fuelle de donde se originaron los depósitos, también es frecuente encontrar una mezcla de ambos depósitos para un único evento. En términos generales se componen por un conjunto de bloques de roca que presentan diferentes grados de meteorización y están embebidos en una matriz más fina, por lo general arcilla o limo, que también puede estar meteorizada (AMVA, 2007).

Los depósitos de deslizamiento o depósitos coluviales (Qd), representan la acumulación de materiales producto de procesos de inestabilidad o movimientos en masa, y que se localizan sobre las vertientes donde hay zonas de baja pendiente y topografía suave (AMVA, 2007).

En general, los depósitos de flujo de lodo y/o escombros se caracterizan por presentar grandes diferencias en el grado de meteorización y mezclas caóticas (fabrica aleatoria) de fragmentos de roca (principalmente de origen Metamórfico) que varían de tamaño grava a bloques, embebidos en una matriz arcillosa principalmente, con una relación matriz - clastos muy variable (AMVA, 2007).

- ***Depósitos aluviales y aluvio - torrenciales (Qat)***

Son los depósitos encontrados en el fondo de los valles de los principales drenajes del sector; están dispuestos como franjas angostas, alargadas e irregulares a lo largo de las quebradas y se identifican por presentar una morfología suave. De acuerdo con su dinámica pueden ser de dos tipos: depósitos aluviales y depósitos aluviotorrenciales (AMVA, 2007).

Los depósitos aluviales (Qal) se presentan conformando las llanuras de inundación y terrazas aluviales de las corrientes. Son superficies suaves, generalmente planas, conformadas por clastos que tienen una selección moderada, alto grado de redondez y ligera imbricación (AMVA, 2007).

Los depósitos aluviotorrenciales (Qat) se caracterizan por su composición heterogénea, donde el tamaño de sus componentes varía desde bloques rocosos hasta arenas finas y limos. Estos depósitos están asociados a cuencas de montaña, donde los canales tienen altas pendientes y se desarrollan flujos turbulentos con alta energía, que moviliza materiales de diferente granulometría hasta encontrar zonas de pendientes suaves aledañas al cauce, donde se depositan los materiales (AMVA, 2007).

- **Llenos antrópicos (QII)**

Constituyen depósitos artificiales, con una composición muy heterogénea, incluyendo aquellos materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas, y materiales mixtos tales como basura, materia orgánica y escombros vertidos sin disposiciones geotécnicas adecuadas. También se consideran llenos antrópicos las acumulaciones artificiales realizadas para la construcción de obras de infraestructura (AMVA, 2007).

5.2 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL

La zona de estudio se ubica en la zona más septentrional de la cordillera Central, asociada directamente al valle del río Medellín - Porce. La evolución geomorfológica se retoma para este estudio de la interpretación evolutiva es a partir del análisis desarrollado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en el estudio de Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, donde jerarquiza el valle en unidades de Paisaje, Macrounidades y unidades geomorfológicas.

De acuerdo con la Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, la zona evaluada se localiza dentro de la unidad de paisaje denominada Valle de Aburrá – Valle Medio. En cada uno de las unidades se reconocieron macrounidades geomorfológicas denominadas en este informe como Bloques, los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los adyacentes. De acuerdo a esta metodología, la zona de estudio se encuentra enmarcada en la siguiente clasificación geomorfológica (Tabla 3).

Tabla 3. Jerarquía geomorfológica regional

UNIDAD DE RELIEVE	UNIDAD DE PAISAJE	MACROUNIDAD	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
Norte de la cordillera central	Valle de Aburrá -Valle Medio (VM)	Bloque comuna nororiental Alta	Lomos
			Rasgos morfotectónicos
			Peldaño
			Superficies suaves en depósito moderadamente incisada
		Bloque comuna nororiental Baja	Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas
			Superficies suaves en depósito poco incisadas
			Superficies suaves en depósito moderadamente incisadas
		Bloque Santa Elena	Lomos

UNIDAD DE RELIEVE	UNIDAD DE PAISAJE	MACROUNIDAD	UNIDAD GEOMORFOLÓGICA
			Peldaños
			Superficies suaves en depósito poco incisadas
			Superficies suaves en depósito moderadamente incisadas
			Escarpes semicirculares superiores
		Bloque El Salvador	Lomos
			Superficies suaves en depósito poco incisadas
			Vertientes en suelos residuales poco incisadas
			Picacho
		Bloque Fondo del Valle	Llanura Aluvial
			Superficies suaves en depósito poco incisada

5.2.1 Valle de Aburrá Medio (VM).

Se extiende aproximadamente desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos. La zona estudiada, se localiza dentro de los bloques denominados como: bloque Comuna Nororiental Alta, Bloque comuna Nororiental baja, Bloque Santa Elena, bloque El Salvador y Bloque Fondo del Valle. Estas macrounidades se localizan sobre la vertiente oriental del Valle Medio de Aburrá (Figura 3).

- **Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA)**

Esta macrounidad corresponde a una franja de terreno alargada en sentido N-S, desarrollada sobre rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) y muy localmente sobre depósitos de vertiente. Su característica principal es el claro control estructural.

Está limitada al noreste por el cauce de la quebrada Rodas, que coincide con la traza de la falla de igual nombre; al sureste por el altiplano de Santa Elena; al sur por el filo que sirve de divisoria de aguas con la quebrada Chorro Hondo y al este por varias fallas (entre ellas la falla Manrique) de tendencia N-S, las cuales a su vez tienen asociado un marcado cambio morfológico. Esta franja de terreno involucra

alturas desde los 2 600 msnm en inmediaciones de Santa Elena hasta los 1 750 msnm por debajo de los barrios San Blas y Santo Domingo Savio.

Dentro de este polígono predominan las pendientes moderadas, con algunos sectores escarpados hacia la parte alta y sobre la vertiente derecha de la quebrada La Sucia (límite Bello - Medellín), además de algunos sectores de pendientes suaves que a su vez conforman una franja en el centro de la macrounidad, definiendo de esta manera un escalonamiento de la vertiente. El avance remontante del frente erosivo del río Aburrá, a través de las corrientes del sector, ha generado un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S (paralelos a la falla Rodas) y en el sector sur E-W. Dichos lomos en general tienen flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares.

En medio de esta unidad geomorfológica, con una distribución irregular, se identifican áreas de topografía suave, orientadas en sentido N-S y desarrolladas sobre suelos residuales de dunitas. Por su paralelismo con estructuras regionales se interpretan como Peldaños, cuya correlación altitudinal con otras zonas suaves localizadas en esta misma vertiente y en las adyacentes debe ser motivo de investigaciones posteriores, de tal manera que se refine su modelo genético. En el sector de Santo Domingo Savio se presenta en medio de la vertiente un cerro de carácter regional, el cual tiene una base oval de tendencia N-S y laderas empinadas, el cual fue cartografiado como Picacho. Finalmente, hacia la parte baja de polígono y en estrecha relación espacial con las fallas N-S se identificaron una serie de facetas triangulares, definidas en este trabajo como rasgos morfotectónicos (AMVA, 2007).

- ***Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB)***

En estrecha relación con la macrounidad anterior se presenta otra franja de terreno de tendencia también N-S, localizada en la misma vertiente nororiental del Valle Medio, pero más abajo, ocupando terrenos entre los 1.750 y 1.450 msnm. Esta macrounidad está limitada al este por una serie de fallas y lineamientos de tendencia N-S, que coincide con un marcado incremento de la pendiente; al sur por la zona suave de los depósitos aluviotorrenciales asociados a la quebrada Santa Elena, al oeste y norte por el río Aburrá y/o sus depósitos aluviales asociados.

Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con vergencia hacia al fondo del valle; constituidas principalmente por espesos suelos residuales

de rocas ultrabásicas cizalladas y localmente por depósitos de vertiente; en medio de las cuales las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas. Este tipo de morfología se extiende al sur siguiendo el borde oriental de la macrounidad. Al sur del polígono se presentan pendientes suaves que descienden hasta confundirse con el fondo del valle y cuya configuración morfológica indica una génesis depositacional, asociada a los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Dentro de estos materiales es factible identificar sectores con diverso grado de incisión. Por otro lado, dentro del polígono también se identificaron una serie de zonas de pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cercana a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños (AMVA, 2007).

- ***Bloque Santa Elena (VM-BSE)***

Como su nombre lo indica esta macrounidad coincide con la parte alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena, aunque vale la pena aclarar que las cabeceras de esta corriente están por fuera del Valle de Aburrá. Este polígono tiene la forma semicircular característica de un frente erosivo, realizada por el contraste morfológico respecto a los remanentes de la superficie de erosión localizados al oriente y que están claramente cortados por este rasgo regional. Dentro de esta macrounidad se observa el predominio de laderas empinadas y escarpadas hacia la parte superior (cota 2.650 msnm aproximadamente), definiendo un sistema de escarpes semicirculares asociados a las cabeceras de las quebradas del sector. Por debajo de estas vertientes y como resultados también de la erosión, se identificaron varios tipos de lomos.

Sobre la vertiente sur (margen derecha de la quebrada Santa Elena), los lomos tienen orientación S-N a SSE-NNW, con topes redondeados, flancos convexos y vaguadas intermedias, estrechas y moderadamente entalladas. Por el contrario, los lomos de la vertiente norte exhiben topes agudos, flancos rectos, empinados y con vaguadas profundamente encañonadas (p.e. quebradas La Castro y Chorro Hondo); además, presentan orientación diversa con claros efectos tectónicos en la parte inferior, sector de Las Estancias y La Sierra, siguiendo los lineamientos cartografiados. Un rasgo característico de esta macrounidad es la presencia de descansos topográficos o zonas de pendiente suave en medio de las laderas, definidos en este trabajo como peldaños. Especial atención merece el ubicado sobre la vertiente derecha de la cuenca, con una altura de aproximadamente 1.900 msnm (centro de meditación Las Mercedes), el cual, por el fuerte control estructural en todos sus bordes, la morfología reinante y los espesores de suelos parece un bloque

descendido desde los altiplanos circundantes. Esta hipótesis deberá ser objeto de investigaciones académicas más detalladas.

Finalmente, en la parte centro occidental del polígono, especialmente sobre la parte baja de la ladera izquierda (sector de Quinta Linda y Cauces de Oriente) se observan zonas de topografía ondulada e inclinaciones suaves, que corresponden a depósitos de vertiente con diverso grado de incisión.

- ***Bloque El Salvador (VM-BES)***

Corresponde a la margen izquierda de la cuenca baja de la quebrada Santa Elena, sobre el extremo occidental y el flanco norte del lomo regional que involucra los terrenos del Seminario Mayor de Medellín. Este polígono ocupa terrenos desde los 2100 y los 1500 msnm, con vertientes suaves a moderadas, cóncavas e irregulares; las cuales están constituidas por suelos residuales del Gabro de San Diego y depósitos de vertiente. Hacia la parte alta de la margen norte de la cuenca de la Santa Elena y toda la vertiente occidental (hacia el río Medellín) se presentan lomos irregulares, poco incisados y de baja altura, con topes redondeados y amplios. Más abajo, cerca de la quebrada Santa Elena, se presenta una ladera regular poco incisada desarrollada en suelos residuales. En el extremo noroccidental de este polígono se presenta un cerro bajo, de vertientes moderadas, tope suave y amplio que resalta en el oriente de Medellín, denominado cerro El Salvador; el cual fue cartografiado como un picacho. En sus flancos, especialmente hacia la quebrada Santa Elena, se identifican una serie de laderas muy suaves, cuya configuración revela su origen depositacional (flujos de lodos y/o escombros) además de superficies en suelos residuales poco incisados (p.e. barrio Las Palmas). (AMVA, 2007).

- ***Bloque Fondo de Valle (VM-BFV)***

Corresponde como su nombre lo dice, al fondo del valle del río, caracterizada por ser una zona conformada casi en su totalidad por depósitos aluviales y aluviotorrenciales, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas entre los que se identifican los cerros el Volador y Nutibara. Es una zona de pendientes rectas a levemente cóncavas en su cercanía a las vertientes occidental y oriental del valle. Estas zonas están relacionadas a los eventos de deposición del río Medellín y su red de drenaje asociada.

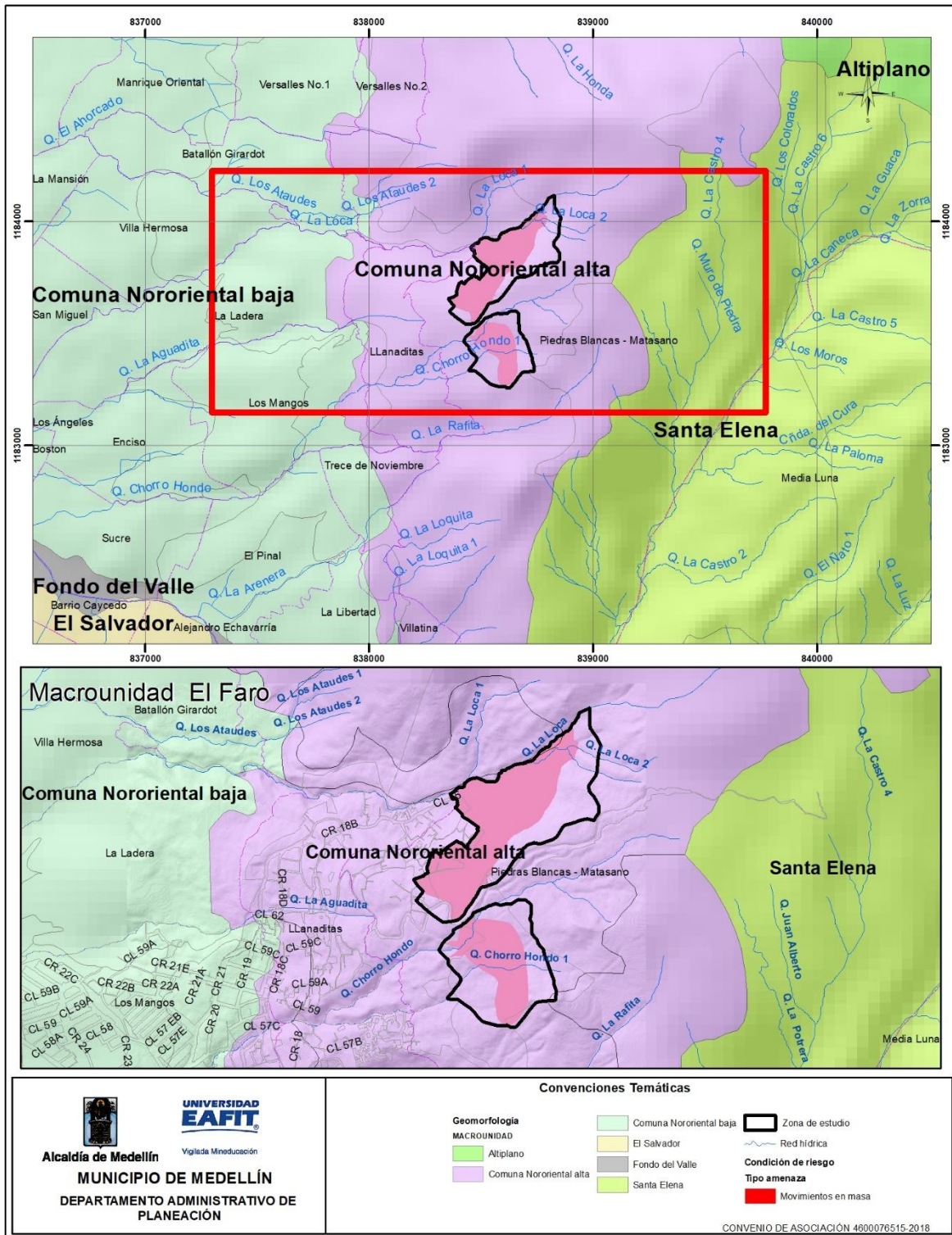


Figura 3. Mapa de macrounidades geomorfológicas. Tomado de AMVA, 2007

Como parte de la identificación de las unidades geomorfológicas se presentan en el área de estudio las siguientes geoformas (Figura 4):

L - Lomos: Son filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Son las unidades dominantes y de mayor cobertura dentro del área de estudio.

VSRMI - Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas: Son vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan. Afloran en el municipio de Medellín en la comuna nororiental, están enmarcadas en rocas duníticas y metagabros.

SSDPI - Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión baja a muy baja.

SSDMI - Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados: Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión moderado.

RMT - Rasgos Morfotectónicos: Son pequeños cuerpos que coinciden con zonas de rasgos tectónicos como lineamientos, fallas y contactos geológicos. Hacia el municipio de Medellín en límites con Bello se presentan pequeñas unidades asociadas con los rasgos tectónicos de la falla Rodas.

PÑ – Peldaño: Son geoformas relativamente continuas, con una pendiente suave a moderada. Se presentan en la parte alta de las zonas de estudio.

VSRPI - Vertientes en Suelos Residuales Poco Incisadas: Son pequeñas vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos, presentan un bajo grado de incisión. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan.

ESCS - Escarpes semicirculares superiores: Son geoformas ubicadas entre zonas escarpadas en superficies rocosas hacia los límites de los altiplanos, presentan además fuertes pendientes.

LLA - Llanura Aluvial: Esta unidad involucra el cauce y las riberas del río Aburrá y algunas de sus quebradas o tributarios principales como la quebrada Santa Elena. Es una forma continua, de pendientes suaves y topografía plana; contiene materiales producto de la sedimentación aportada por estas corrientes e incluye además algunos niveles de terrazas bajas.

P – Picacho: Son cerros o prominencias que se destacan en el paisaje, ubicados a diferentes alturas y con formas diferentes, sus pendientes son de moderadas a fuertes y localmente escarpadas.

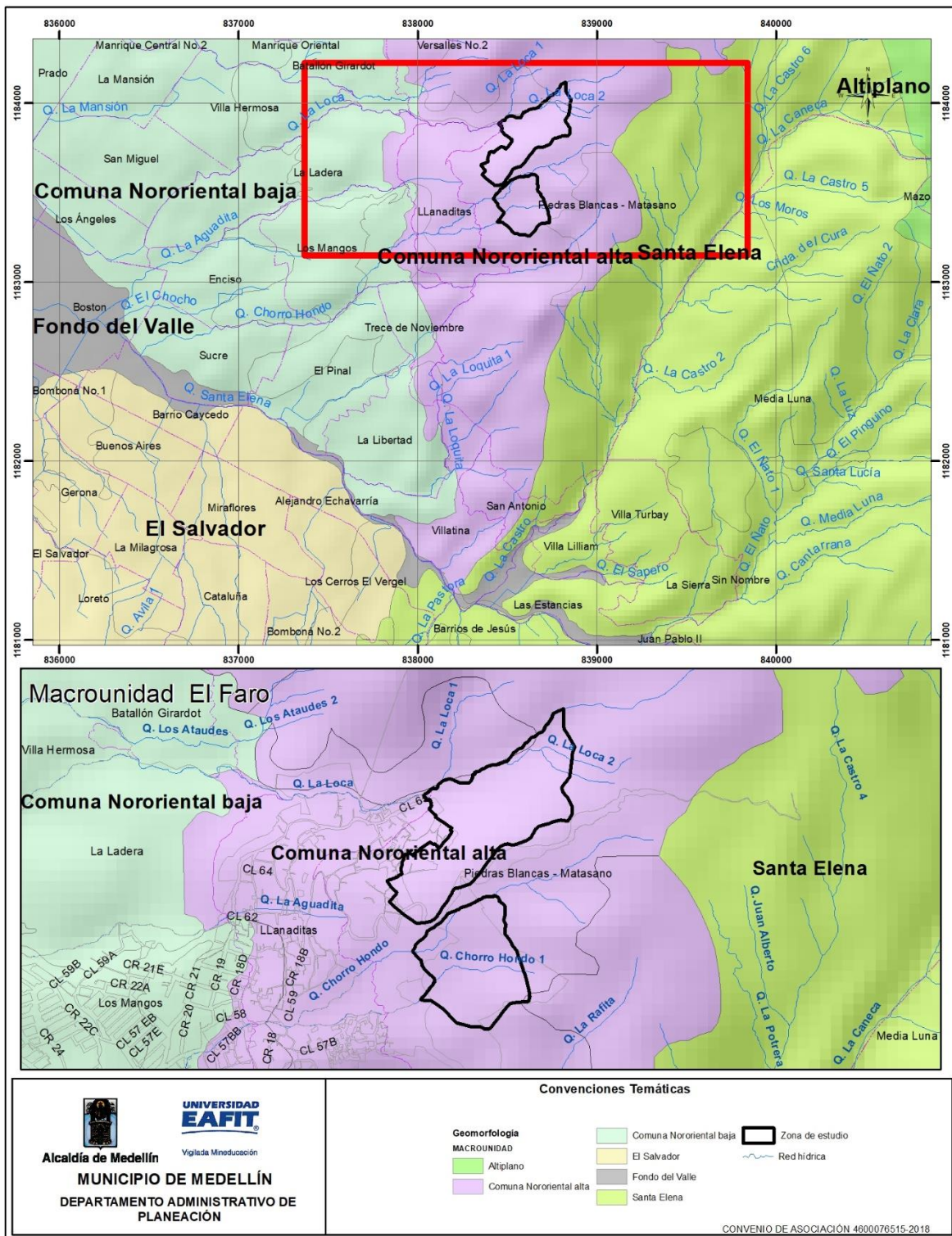


Figura 4. Geomorfología regional polígono El Faro. Tomado de AMVA, 2007.

5.3 TECTÓNICA REGIONAL

Debido a la localización en el flanco Oeste de la Cordillera Central, la tectónica del Valle de Aburra está dominada por las fallas del Sistema Cauca-Romeral; el cual atraviesa el territorio nacional con una dirección aproximada N-S. Este sistema está compuesto por dos grupos de estructuras, hacia el oeste se tiene el sistema Cauca y al Este el sistema Romeral. Este último sistema es el más cercano a la ciudad de Medellín.

El complejo sistema de fallas N-S, del sistema de falla de Romeral involucra el flanco Oriental de la ciudad y las estribaciones de las superficies de erosión; posee una moderada a baja expresión geomorfológica en la cual se dificulta su observación por la presencia de lineamientos N-W y E-W que los desplazan (AMVA, 2007).

Rendón en 1999 plantea en el área Urbana de Medellín, la presencia de al menos tres grupos de estructuras tectónicas principales, las relacionadas con la obducción de una secuencia ofiolítica; las de tendencias N-S y las de tendencia N-W (AMVA, 2007).

Las estructuras tectónicas de obducción o cabalgamiento están relacionadas a un extenso cuerpo dunítico que cruza el sector Oriental de la ciudad con dirección general N-NE; el cual corresponde a una antigua escama de material ultrabásico oceánico, emplazado tectónicamente por un complejo proceso de obducción durante el Cretáceo Inferior (102 m.a., aproximadamente) sobre las anfibolitas (Restrepo, 1986). Asociadas a este fenómeno se desarrollaron una serie de estructuras tectónicas que marcan el contacto aproximadamente subhorizontal entre las dunitas y las anfibolitas (AMVA, 2007).

5.3.1 Sistemas de fallas.

A continuación se describen las características regionales, de las fallas reportadas a lo largo del corredor evaluado:

- **Falla La Acuarela**

Ingeominas (2007) propone este nombre a la falla de rumbo de N-S a N NW, que ha sido denominada por otros autores como falla Pericos y falla Rodas (Rendón, 1999; GSM, 1999), con el fin de diferenciarla de la falla de cabalgamiento de Rodas y de la falla Otú - Pericos. Ingeominas (2007) la propone con una longitud de 35 km y su continuidad hacia el norte con las trazas de falla del Sistema Belmira. Esta falla presenta una bifurcación y se presenta como dos trazas bien diferenciadas, desde

la quebrada Las Palmas (Sector Paulandia) hasta la Curva de Rodas sobre la vía Medellín- Bogotá. Estos autores la describen como una falla en cola de caballo con dos trazas que localmente alcanzan una separación mayor a 1,1 km (AMVA, 2007).

Geomorfológicamente, la describen como una falla que presenta un fuerte cambio de pendiente, y alineamiento de drenajes (quebrada Rodas y quebrada Seca; quebrada Santa Elena y quebrada Espíritu Santo), forma además una depresión a lo largo de su traza y entre las dos trazas de la falla se forman colinas alargadas en sentido NS en los sectores de las veredas Pericos y Santa Elena. La traza occidental de la falla presenta rumbo NS y N15°W con buzamientos de 58°W a verticales, mientras que la traza oriental presenta valores entre N10°E y N10°W, y buzamientos entre 56° y vertical generalmente hacia el oriente. Le asignan un movimiento lateral izquierdo (AMVA, 2007).

- ***Falla de Rodas***

De dirección general NS/45°NS/45°E, pone en contacto las Dunitas de Medellín con las Anfibolitas. Con buzamiento 45°NE y se ha determinado de carácter normal. No presenta evidencias de desplazamientos horizontales y con desplazamiento vertical desconocido (AMVA, 2007).

- ***Falla Santa Elena***

Documentada por Sierra y Zapata, 1989, como lineamiento Buenos Aires, y asociado a la Falla Santa Elena. Evidenciado por cambios notables de pendiente y facetas triangulares, hacia la parte baja del cerro El Gallo sobre el cauce de la quebrada El Viento, presenta una zona de unos seis metros de material cizallado y dirección EW a N80°NS/45°E y buzamiento subvertical (AMVA, 2007).

6. CONDICIONES GEOLÓGICAS LOCALES DEL SECTOR EL FARO

6.1 DEFINICIÓN DE LA UMI

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

Teniendo en cuenta las características anteriormente referenciadas, para el área de estudio se delimitan seis (6) unidades morfodinámicas independientes (UMI), que se delimitan de la siguiente forma (Figura 5):

UMI 1: Corresponde a la UMI localizada más al norte del área de estudio por lo que abarca el tramo comprendido entre el cauce principal de la quebrada La Loca y un afluente localizado al sur, denominado La Loca N°2, presentando los siguientes límites

- Al norte se encuentra definido por el cauce principal de la quebrada La Loca que transcurre con dirección SW-NE.
- Al sur por un afluente de la quebrada La Loca, denominado La Loca N°2, que igualmente se presenta con dirección predominante SW-NE, y se encuentra localizada aproximadamente 40m más al sur del cauce principal.
- Al oriente está dada por el cambio de pendiente que se presenta a la altura de la cota 2130 msnm, donde las vertientes que definen esta zona marcan un cambio morfológico en la forma e inclinación de dicha ladera.

- Al occidente por la confluencia de la quebrada La Loca N°2 en el cauce principal de la quebrada La Loca.

UMI 2: Se extiende hacia la vertiente sur de las quebradas La Loca y La Loca N° 2, y exhibe los siguientes límites:

- Al norte por un afluente de la quebrada La Loca, denominado La Loca N°2, que transcurre con dirección predominante SW-NE, y se localiza aproximadamente 40m más al sur del cauce principal.
- Al sur se define por una divisoria de aguas, dada por la presencia de un pequeño lomo que se extiende en dirección E-W.
- Al oriente está dada por el cambio de pendiente que se presenta a la altura de la cota 2130 msnm, donde las vertientes que definen esta zona marcan un cambio morfológico en la forma e inclinación de dicha ladera.
- Al occidente está dado por la divisoria de aguas que marca el lomo que desciende en sentido E-W hasta la quebrada La Loca.

UMI 3: Corresponde a la UMI de mayor predominio, abarcando gran parte del área donde se localizan los sectores Las Golondrinas y El Faro, correspondiente a la vertiente sur de la quebrada La Loca. Los límites corresponden a:

- Al norte está dada inicialmente una divisoria de aguas, marcada por la presencia de un pequeño lomo que se extiende en dirección E-W, hasta el cauce de la quebrada La Loca, continuando por ésta quebrada hasta la calle 65, donde se presenta un pequeño cambio de pendiente.
- Al sur está dado por una divisoria de aguas, marcada en sentido NW-SE, en la zona aledaña al denominado camino de la Cuesta, el cual corresponde a un antiguo Camino indígena.
- Al oriente por la divisoria de aguas que marca la vertiente sur de la quebrada La Loca, la cual se presenta hacia la zona donde se localiza el camino de la Cuesta y el antiguo camino indígena, desde la zona donde se localiza el tanque de Llanaditas hasta el sector de la cancha de Tavo.
- Al occidente está dada por el cambio de pendiente que se presenta a la altura de la cota 2012 msnm, donde las vertientes que definen esta zona marcan

un cambio morfológico en la forma e inclinación de dicha ladera. Esta zona corresponde al sector hasta donde pueden desplazarse los materiales asociados a la ocurrencia de un movimiento en masa en la parte alta del polígono analizado

UMI 4: Se localiza en el sector denominado El Faro, correspondiente a la vertiente norte de la quebrada Chorro Hondo, y exhibe los siguientes límites:

- Al norte corresponde a la divisoria de aguas que marca la vertiente norte de la quebrada Chorro Hondo, la cual se presenta hacia la zona donde se localiza el camino de la Cuesta y el antiguo camino indígena.
- AL sur por el cauce de la quebrada Chorro Hondo entre las cotas 2090 y 2042 msnm, al occidente del denominado camino de la vida.

UMI 5: Corresponde al sector comprendido entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, y presenta los siguientes límites:

- Al norte por el cauce de la quebrada Chorro Hondo, al oriente del denominado camino de la vida entre las cotas 2042 y 2090 msnm.
- Al sur por el cauce de la quebrada Chorro Hondo 1, entre las cotas 2050 msnm sobre el denominado camino de la vida y 2108 msnm a la altura del cerro de la Cruz.
- Al oriente está dado por el cambio de pendiente que se presenta a la altura del sendero de acceso al cerro de la cruz, donde las vertientes que definen esta zona marcan un cambio morfológico en la forma e inclinación de dicha ladera.
- Al occidente por el cambio de pendiente que se presenta por donde se localiza el denominado Camino de la vida, donde se presenta un descanso en la pendiente, correspondiente al sector hasta donde pueden desplazarse los materiales asociados a la ocurrencia de un movimiento en masa en la parte alta del polígono analizado.

UMI 6: Corresponde a las laderas que descienden del cerro de la cruz hasta el cauce de la quebrada Chorro Hondo 1, correspondiente al límite más sur del polígono analizado y que presenta los siguientes límites:

- Al norte por el cauce de la quebrada Chorro Hondo 1, entre las cotas 2108 msnm a la altura de sendero de acceso al cerro de la Cruz y la cota 2050 msnm sobre el denominado camino de la vida.
- Al sur por la divisoria de aguas que marca un pequeño lomo que se desprende desde el cerro de la cruz y desciende en sentido SW-NE y NW-SW hasta el cauce de la quebrada Chorro Hondo 1.
- Al oriente por la divisoria de aguas que marca una de las laderas del cerro de la cruz, que desciende en sentido N-S.
- Al occidente por la intersección de la divisoria de aguas correspondiente al límite sur y la quebrada Chorro Hondo 1.

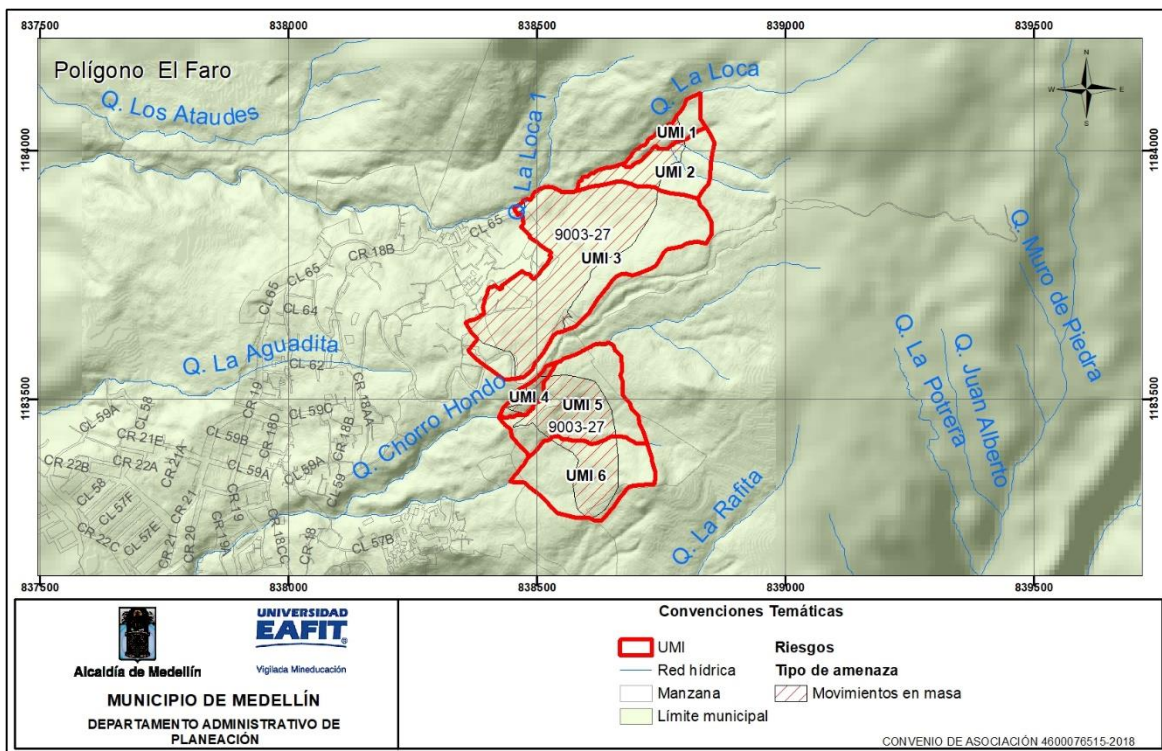


Figura 5. UMI definida para el polígono denominado “El Faro”.

6.2 FOTOINTERPRETACIÓN

Se realiza la interpretación de sensores remotos a partir de un análisis multitemporal con fotografías aéreas y ortofotos que varían entre los años de 1943 y el 2016. Este análisis tiene como objetivo identificar las condiciones morfológicas, los procesos morfodinámicos y su evolución en el tiempo, al igual que las intervenciones de tipo antrópico. A continuación, se presenta el listado de fotografías aéreas empleadas, al igual que los mapas resultantes de este proceso para el área de estudio para cada uno de los años estudiados.

Tabla 4. Fotografías aéreas empleadas para proceso de fotointerpretación polígono El Faro

Vuelo	Faja	Fotos	Año	Escala
C395		95 - 96	1943	
R898	1	267 - 268	1983	1:5500
Geovial 65	3	135 - 136	1994	1:5000
Ortofotos cinturón verde			2012	1:2000
Ortofotos alcaldía de Medellín			2016	1:2000

El polígono analizado corresponde a la zona comprendida entre las quebradas La Loca al norte y la vertiente norte de la quebrada La Rafita al sur, donde se presentan vertientes rectas, de pendientes abruptas a escarpadas, desarrolladas sobre rocas y suelos residuales de la Dunita de Medellín. Estas vertientes, hacia la parte media y baja se encuentra suavizada por la acumulación de antiguos movimientos en masa que generan zonas de aspecto irregular.

Para el año 1943 la zona se presenta libre de construcciones y las intervenciones antrópicas están representadas por la apertura del antiguo camino indígena, que corresponde a la principal vía de acceso del sector y que actualmente se denomina vía La Cuesta (Figura 6). Se destaca que en la fotografía no se encuentra incluido el total del polígono analizado.

Geomorfológicamente la zona se caracteriza por corresponder a una serie de lomos y laderas que descienden en dirección NW-SE hacia la quebrada La Loca, y en dirección SW-NE entre las quebradas Chorro Hondo y La Rafita. Los cañones de las quebradas se encuentran bien definidos y asociado a ellos no se identifican movimientos en masa y las intervenciones antrópicas corresponde principalmente a la construcción de senderos de tipo peatonal, especialmente hacia la parte alta asociado al sendero que conduce al cerro Pan de Azúcar. Hacia las zonas de mayor

pendiente predomina cobertura boscosa y en el resto de la zona pastos. Se destaca que asociado a las zonas que han sido intervenidas por la apertura del antiguo camino indígena, se observa la conformación de pequeños canales posiblemente asociados a procesos de erosión superficial (Figura 6).

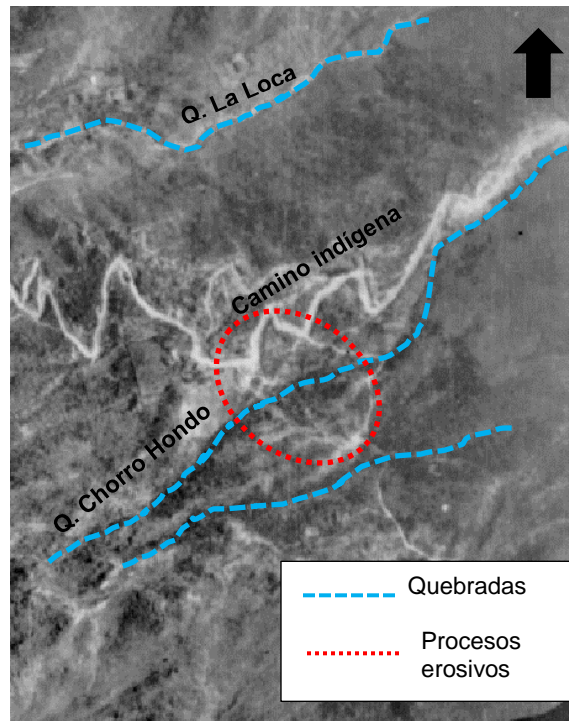


Figura 6. Fotografía aérea del año 1943 para el polígono El Faro

Para el año 1983 la zona exhibe una baja densidad de viviendas, caracterizada por la presencia de fincas aisladas, con importantes zonas de cultivos asociadas. Se destaca que, hacia la zona central, en la zona aledaña al antiguo camino indígena (vía La Cuesta), se observa una marcada presión antrópica, representada en la conformación llenos, la realización de cortes y de explanaciones. Se destaca que para este tiempo se encuentra mejor definido el sendero peatonal que conduce al cerro Pan de Azúcar (Figura 7).

Las condiciones morfológicas son igual a las descritas para el año anterior, en donde predominan lomos y laderas irregulares, de pendientes muy inclinadas a abruptas. No se identifican procesos de remoción en masa, sin embargo, en las zonas desprovistas de vegetación e intervenidas antrópicamente se muestra un marcado predominio de procesos de tipo erosivo, asociado principalmente a las zonas aledañas al antiguo camino indígena (Figura 7).

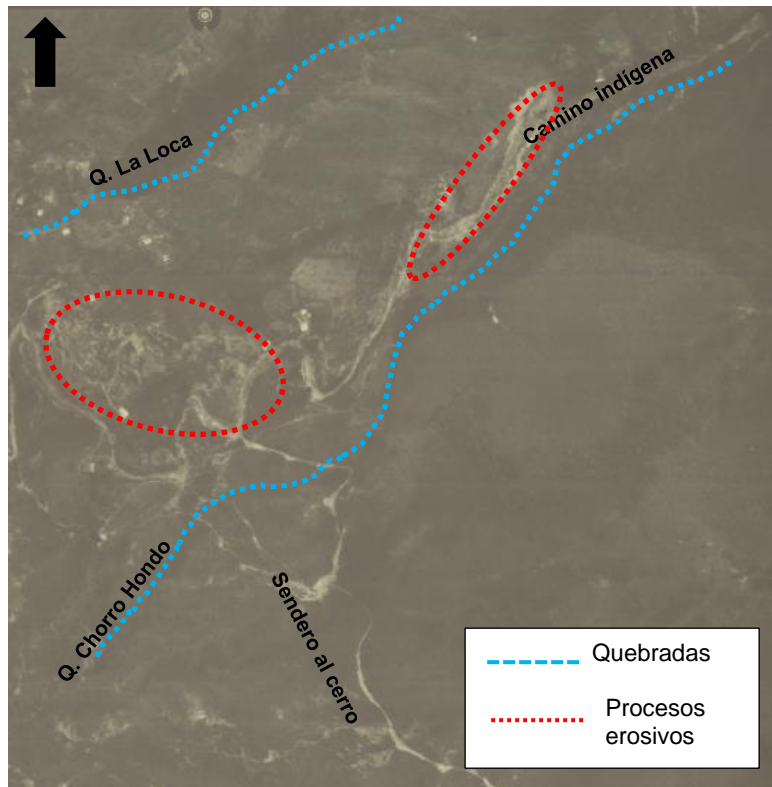


Figura 7. Fotografía aérea del año 1983 para el polígono El Faro

Para el año 1994 la densidad de viviendas sigue siendo baja, donde se identifican construcciones aisladas, algunas de ellas muy cercanas al cauce de la quebrada La Loca, y las coberturas predominantes corresponden, en la mayor parte de la zona a pastos, y hacia el costado nororiental bosques. No se identifica la apertura de vías de acceso adicionales a las ya existentes (Figura 8).

Los cañones de las quebradas La Loca y Chorro Hondo se encuentran bien definidos, y asociado a esta última se identifican algunas cicatrices de movimientos en masa que generan una concavidad sobre el terreno, y hacia su zona de nacimiento se presenta un área de aspecto irregular que sugiere empozamiento de aguas. Asociado a las vías de acceso continua el predominio de procesos de tipo erosivo (Figura 8).

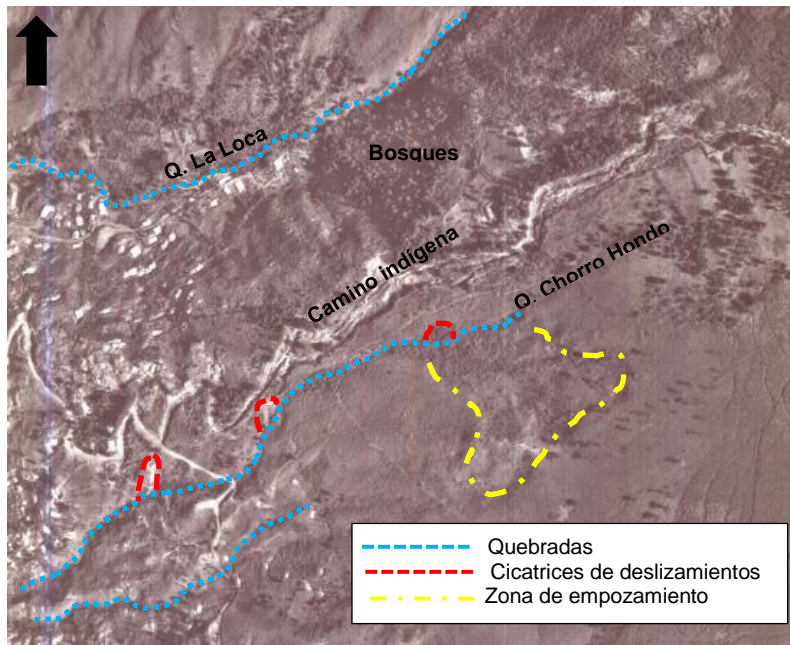


Figura 8. Fotografía aérea del año 1994 para el polígono El Faro

Para el año 2012 la zona presenta los niveles de ocupación que exhibe en la actualidad, en donde se identifican viviendas aisladas y fincas. Las coberturas vegetales predominantes corresponden igualmente a pastos y se observa una disminución en la zona boscosa. Los drenajes continúan discurriendo a través de canales naturales, poco intervenidos antrópicamente (Figura 9).

Las condiciones morfológicas corresponden a las ya referenciadas y no se identifican procesos de tipo morfodinámicos, sin embargo, en las zonas desprovistas de vegetación y los senderos peatonales se observa el predominio de procesos de tipo erosivo (Figura 9).

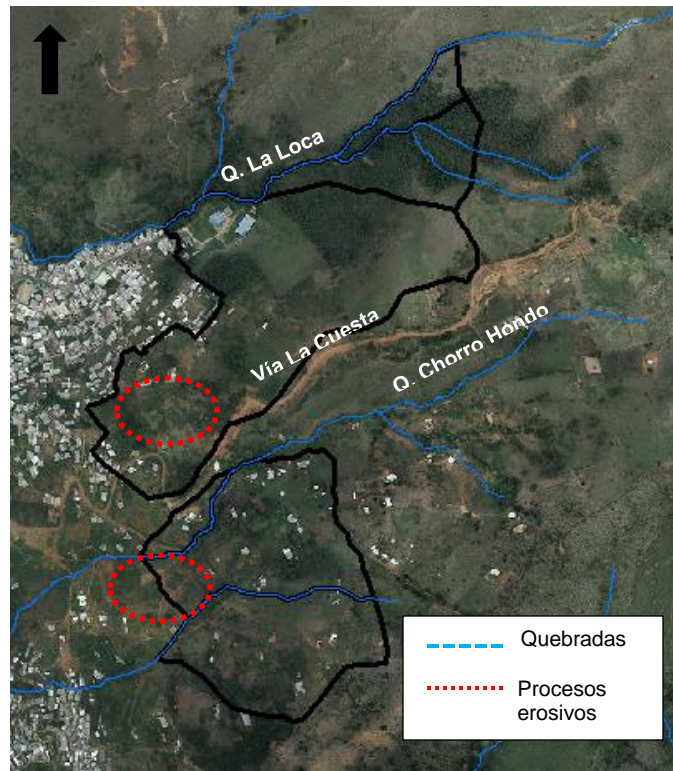


Figura 9. Fotografía aérea del año 2014 para el polígono El Faro

A partir del proceso de fotointerpretación llevado a cabo para el polígono analizado, se puede concluir que la zona geomorfológicamente corresponde a una serie de lomos y laderas que descienden en dirección NW-SE hacia la quebrada La Loca, y en dirección SW-NE entre las quebradas Chorro Hondo y La Rafita, donde se presentan canales naturales, de incisión moderada y bien definidos. En esta zona la evolución en el proceso de ocupación e intervención antrópica ha sido lenta y se ha dado de forma dispersa desde el año 1983 principalmente hasta en el 2014 alcanzar la densidad actual.

A lo largo de los años analizados, se identifica la presencia de irregularidades que sugieren la presencia de antiguos movimientos en masa localizados principalmente sobre la margen norte de la quebrada Chorro Hondo, y que han sido cartografiados en el año 1994. Se destaca que la mayor parte de estos procesos no son observables en las fotografías recientes

6.3 UNIDADES GEOLÓGICAS PARA INGENIERÍA

Las unidades geológicas para ingeniería (UGI) que afloran en la zona del proyecto, corresponden principalmente a suelos residuales, y rocas moderadamente meteorizadas de las rocas ígneas pertenecientes a la Dunita de Medellín, la cual corresponde al basamento de la mayor parte de la zona estudiada. Esta unidad se encuentra cubierta por depósitos de vertiente de edad cuaternaria asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y se han depositado conformando zonas de menor pendiente y aspecto irregular.

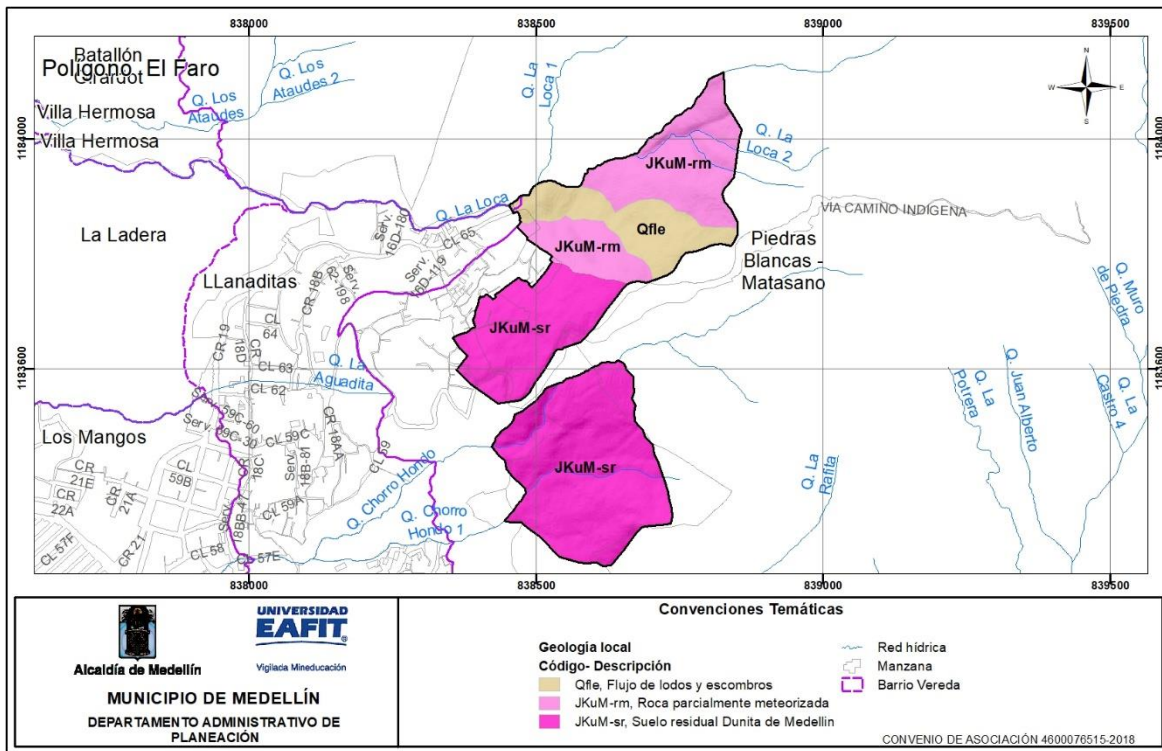


Figura 10. Mapa formaciones superficiales, polígono El Faro

A continuación, se describen el perfil y las unidades geológicas para ingeniería identificadas para la zona de estudio, teniendo en cuenta para su caracterización los diferentes afloramientos encontrados en los recorridos de campo, las disposiciones estructurales y los sondeos exploratorios ejecutados para el análisis geotécnico (Figura 11).

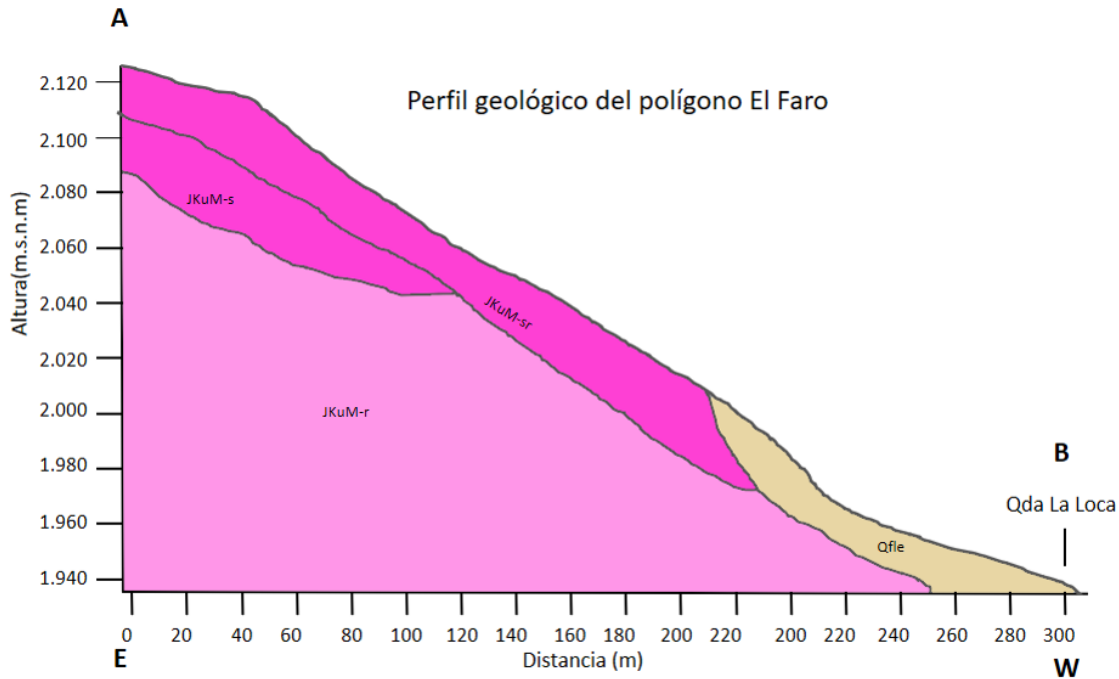


Figura 11. Perfil geológico generalizado, polígono El Faro

6.3.1 Derivados de roca in situ

Esta unidad litológica representa el basamento rocoso de la mayor parte de la ladera estudiada, sin embargo, hacia la zona central en la vertiente sur de la quebrada la Loca, esta unidad se encuentra cubierta por depósitos de vertiente de poco espesor. Los principales afloramientos se observan principalmente hacia las márgenes de la quebrada La Loca, en las zonas de mayor pendiente, hacia la divisoria que marca el límite entre las quebradas La Loca y Chorro Hondo, y en los cortes realizados para las adecuaciones de tipo urbanístico (vías de acceso y establecimiento de viviendas).

En la zona se presenta un pobre desarrollo de suelo residual en afloramiento, por lo que sólo se identifica el nivel superior del perfil de meteorización (Nivel IB) hacia el tope del lomo que define la divisoria de aguas de las quebradas La Loca y Chorrohondo, en el sector conocido como El Faro, y al sur en el sector comprendido entre las quebradas Chorro Hondo y La Rafita. Infrayaciendo esta unidad en un contacto gradacional y aflorando en algunos sectores, se presenta la roca de parcialmente meteorizada o roca alterada, la cual exhibe altos niveles de fracturamiento (nivel IIA y IIB), con los principales afloramientos hacia las zonas de mayor pendiente, en el costado nororiental y en el lecho de las quebradas. El

horizonte de transición o saprolito (Nivel IC) no es continuo y sólo es observable en algunos afloramientos.

A continuación, se describe el perfil de meteorización generalizado observado en la zona:

Horizonte orgánico rico en materia orgánica, de color variable entre ocre y café, deleznable, textura arcillo limosa, con abundantes raíces y restos de material vegetal.

Suelo residual – nivel IB (JKuM-sr): Este estrato está constituido por limos – arcillosos de color pardo rojizo a café amarillento, de consistencia blanda y compacidad media, con espesores entre 4 - 5 m; no se observa la textura original de la roca. Localmente se presentan zonas de oxidación que imprimen coloraciones negras sobre el material y fragmentos de roca con un grado de meteorización menor (Figura 12).



Figura 12. Afloramiento suelo residual – nivel IB, en el sector aledaño a tanque de Llanaditas

Los afloramientos de esta unidad se identifican principalmente hacia la divisoria de aguas de las quebradas La Loca y Chorro Hondo, en el sector conocido como El Faro, y al sur, en el sector comprendido entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. En esta última zona, el suelo residual se encuentra suprayacido por un estrato caracterizado por una mezcla de cenizas volcánicas y materia orgánica, de características arcillo – limosas, de coloraciones café oscuro a gris oscuro, de espesor variable entre 1 y 1.5m, con presencia de raicillas (Figura 13). Estos materiales orgánicos y de cenizas volcánicas igualmente fueron identificados en la muestra 1 de los sondeos P-7 y P-9 con un espesor de 1 y 1.5m.

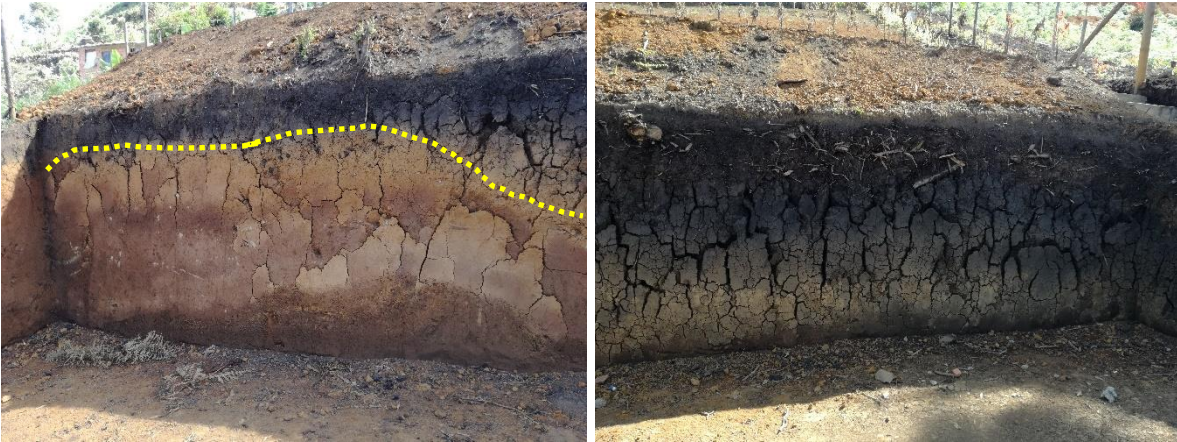


Figura 13. Espesor de ceniza volcánica y materia orgánica suprayaciendo suelo residual de Dunita de Medellín, base de cerro de la Cruz.

Este estrato de suelo residual fue identificado en gran parte de las perforaciones ejecutadas, donde se observa en la muestra 1 del sondeo P-3, en las muestras 1 y 2 del sondeo P-5, en las muestras 2 y 3 del sondeo P-7, en las muestras 1 y 2 del sondeo P-8, en las muestras 2 y 3 del sondeo P9, en las muestras 1, 2 y 3 del sondeo P10, en las muestras 1, 2 y 3 del sondeo P-12, y en las muestras 2 y 3 del sondeo P-13, donde alcanza espesores variables entre 1.5 y 3.5m, siendo en los sondeos P-10 y P-12 donde se alcanza el mayor espesor (3m).

Saprolito – nivel IC (JKuM-s): Los saprolitos derivados de la Dunita de Medellín, en esta zona, se presentan como limos arcillosos de coloraciones café amarillenta con zonas blancas. El material conserva parte de la textura de la roca original donde se observa parcialmente la serpentinita a través de planos bien definidos, además de oxidación en estructuras heredadas. Esta unidad exhibe espesores variables entre 1 y 1.5m en afloramiento, y sólo se observó en campo asociados al talud superior del camino a la Cuesta, frente al tanque de Llanaditas (Figura 14).



Figura 14. Afloramiento saprolito – nivel IC, asociado a talud superior de la vía La Cuesta

Este estrato se identifica en gran parte de las perforaciones ejecutadas, donde se observa en las muestras 3 a 11 del sondeo P-5 a una profundidad entre 3 y 10.20m y un espesor de 7.20m; muestras 4 a 12 del sondeo P-7 a una profundidad entre 3 y 11.5m y un espesor de 8.5m; muestras 3 a 19 del sondeo P-8 a una profundidad entre 2 y 13.5m y un espesor de 11.5m; muestras 4 a 11 del sondeo P-9 a una profundidad entre 3 y 10.5m y un espesor de 7.5m; muestras 4 a 7 del sondeo P-10 a una profundidad entre 3 y 6.5m y un espesor de 3.5m ; muestras 4 a 11 del sondeo P-12 a una profundidad entre 3.5 y 10.9m y un espesor de 7.4m; y finalmente en las muestras 4 a 6 del sondeo P-13 a una profundidad entre 3 y 6.5m y un espesor de 3.5m.

Roca alterada - nivel IIA (JKuM-ra): Este nivel de meteorización se observa principalmente al norte, hacia el cañón de la quebrada La Loca, asociado a zonas de fuerte pendiente, en la zona aledaña a la finca Las Nubes.

Esta unidad se presenta como bloques de dunita, altamente fracturados, y meteorizados, correspondiente a una roca finogranular, de color gris verdoso dado por la presencia de serpentización principalmente hacia los planos de debilidad. Se identifica que estos bloques se encuentran rodeados de una escasa matriz de textura limo arenosa de color café amarillento correspondiente a suelo con un grado de meteorización mayor (Figura 15 y Figura 16).

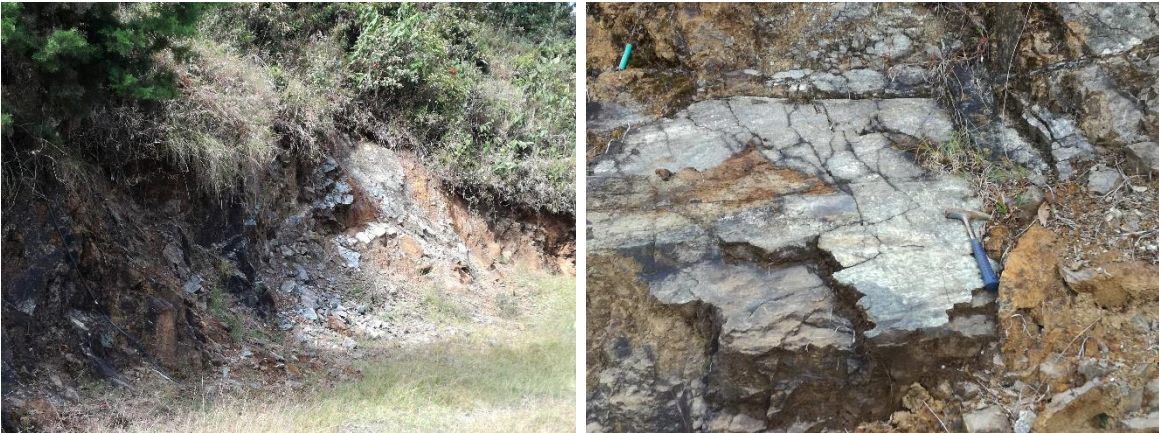


Figura 15. Afloramiento roca alterada en corte realizado en la finca las Nubes, sobre la vertiente sur de la quebrada La Loca.



Figura 16. Afloramiento roca alterada en talud posterior al corte realizado para construcción de vivienda

Este estrato se identifica en la mayor parte de las perforaciones ejecutadas, exceptuando el sondeo P-6, y se presentan principalmente infrayaciendo los materiales anteriormente descritos entre las profundidades de 10.20m y 15m en los sondeos P-5, P-7, P-8, P-9 y P-12; entre los 6 y los 15m en los sondeos P-1, P2, P-10 y P-13; y con un mayor espesor en los sondeos P-3 y P-4 donde se presenta desde la superficie hasta los 10m explorados.

6.3.2 Depósitos de vertiente

Depósitos de flujo de lodos y escombros (Qfle): Corresponde a materiales asociados a depósitos generados a lo largo de la vertiente, producto de la meteorización, desprendimiento y arrastre de los mismos desde las partes alta de

la ladera a través de antiguos movimientos en masa. Estos materiales se identifican principalmente hacia el costado norte, caracterizándose por presentar una composición heterogénea, con porcentajes entre los bloques y la matriz en proporciones variables.

Estos corresponden a depósitos de flujos de lodos y escombros, cuyos porcentajes de matriz/clastos varían dependiente de la localización y las características topográficas de la zona. A continuación, se describen las características asociadas a los afloramientos observados.

Asociado al talud superior de la finca Las Nubes (detrás de galpones), se identifica un depósito de flujo de lodos y escombros, conformado por limos arenoso, de color café amarillento, con fragmentos de rocas (Dunita principalmente), de formas subangulares a subredondeadas, moderadamente meteorizados, con diámetros variables entre 0.3 y 0.7m. El porcentaje bloques/matriz es de aproximadamente 60/40. El espesor del depósito en este afloramiento es de 3 a 4m (Figura 17).



Figura 17. Afloramiento depósito de flujo de lodos y escombros asociado a talud superior de la finca Las Nubes

Hacia el costado nororiental, en los cortes realizados a lo largo del sendero peatonal que une la finca Las Nubes con el sector del Faro, estos depósitos de vertiente se presentan como flujos de lodos, conformados por limos arenosos de colores café amarillento a café oscuro, donde se identifican pequeños fragmentos de rocas, altamente meteorizados, de formas angulares a subangulares, además de materia orgánica. El contenido bloques/matriz es de 20/80 por lo que se clasifica como un flujo de lodos (Figura 18).



Figura 18. Afloramiento depósito de flujo de lodos asociado a sendero peatonal de acceso a la zona

En los cortes asociados a este mismo sendero, estos depósitos se caracterizan por corresponder a limos arenosos de color café a café amarillento, con bloques de formas angulares principalmente. Los fragmentos de rocas corresponden a dunitas moderada a altamente meteorizadas, y presentan diámetros variables entre 0.3 y 0.7m. El porcentaje matriz/ clastos es de 30/70 por lo que en este sitio se clasifica como un flujo de escombros (Figura 19). Es espesor identificado en campo es de 3m aproximadamente.



Figura 19. Afloramiento depósito de flujo de escombros asociado a talud superior de sendero de acceso a la zona.

Estos depósitos de vertiente igualmente se identifican en las perforaciones ejecutadas, donde se presenta en las muestras 1 a 4 del sondeo P-1 a una profundidad entre 0 y 4m; y en las muestras 3 a 6 del sondeo P-2 a una profundidad de 2.5 a 5.7m, donde alcanza un espesor de 3.2m.

6.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

Para el análisis de la geología estructural del polígono El Faro, se caracterizaron los afloramientos de macizo rocoso encontrados durante el trabajo de campo, una vez identificados dichas zonas, se realizó el levantamiento manual de los diferentes planos de discontinuidades identificados, en donde se recolectó la información de la orientación de los planos, el espaciamiento, persistencia, la abertura, rugosidad, el relleno, alteración, filtración y la resistencia de las paredes, siguiendo la clasificación propuesta por Bieniawski, Z. T. (1989).

A continuación, se hace una descripción breve de cada una de las mediciones realizadas y de los resultados obtenidos.

6.4.1 Orientación y buzamiento

Para cada uno de los afloramientos en donde se presentaba el macizo rocoso se recolectaron los datos de orientación y buzamiento de los planos de discontinuidad (Dip/Dip Direction). En total para el polígono de El Faro se tomaron 59 datos distribuidas en 3 estaciones. En la Tabla 5 se presenta la localización y los datos para las zonas de estudio y en la Figura 20 correspondiente al mapa:

Tabla 5. Distribución de los datos tomados en las estaciones de campo.

Estación	Coordenadas		Número de Datos
	X	Y	
ESTACIÓN 8	838.532	1.183.860	37
ESTACIÓN 9	838.484	1.183.795	10
ESTACIÓN 10	838.424	1.183.286	12

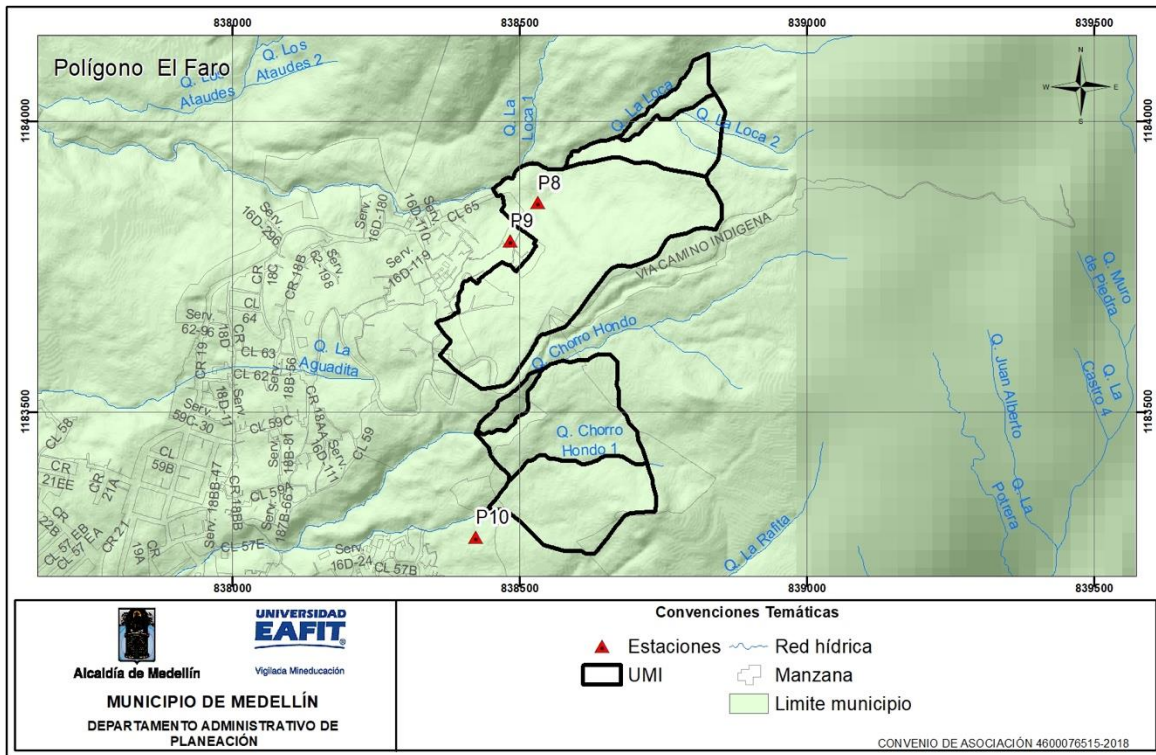


Figura 20. Mapa de localización de la estación con información de las discontinuidades.

Los datos estructurales obtenidos en el trabajo de campo se representan en la Figura 21 correspondiente al diagrama de polos y en la Figura 22 la cual muestra el diagrama de rosas de la misma. Con base en esta información se puede definir que en la zona se presentan tres tendencias principales, la más marcada es la que va hacia el NW, la otra tiende hacia el NE la cual tiene ángulos de buzamiento medio-bajo de mínimo 4° y un máximo de 52° y la tercera tiende hacia el S con ángulos de buzamientos altos.

Los diagramas obtenidos no son representativos para la construcción del modelo estructural debido a la ausencia una alta densidad de macizos rocosos, con presencia de discontinuidades y fracturamiento para la obtención de datos, ya que la zona de estudio es dominada por suelo residual y depósitos.

Los resultados indican que la zona de estudio está dominada por 3 familias de discontinuidades, Según el diagrama vemos las direcciones de éstos planos, los cuales son E-W, N-S y NW-SE.

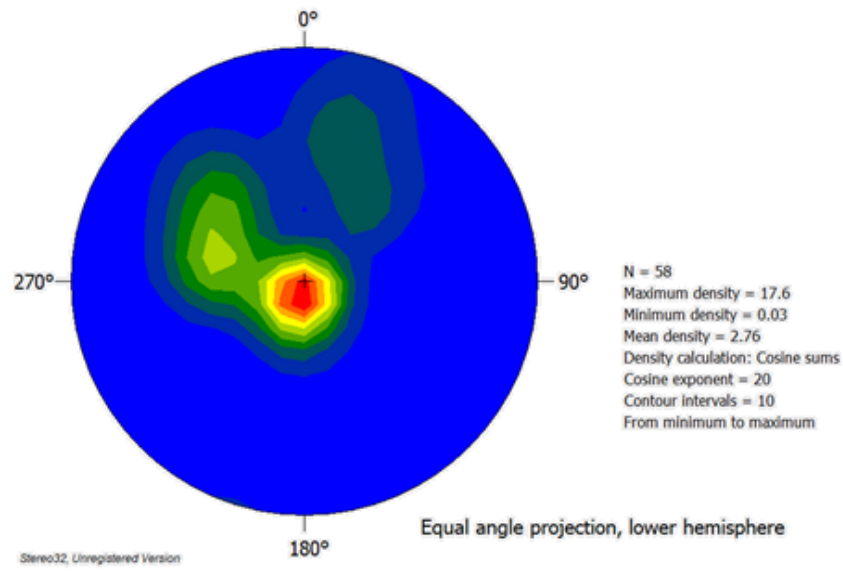
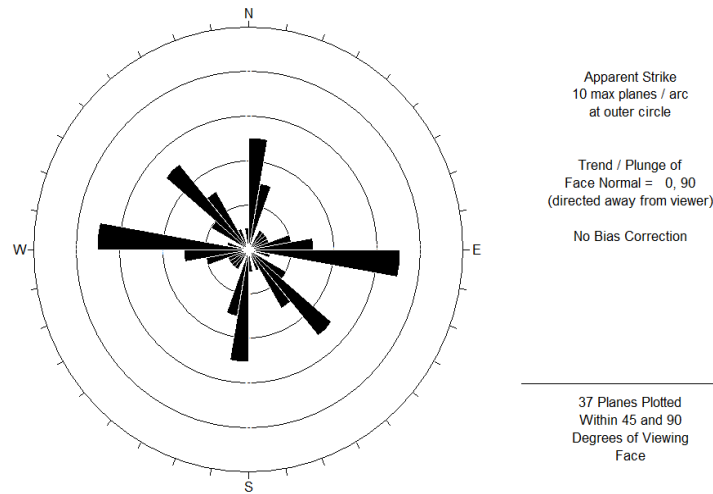


Figura 21. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades para el polígono El Faro. Realizado en Stereo32 ®.



Dirección Buz	Buzamiento	Dirección Buz	Buzamiento	Dirección Buz	Buzamiento	Dirección Buz	Buzamiento
270	44	185	85	10	28	310	45
289	50	164	79	10	18	315	40
270	49	184	85	40	50	318	30
285	40		90	40	52	310	28
272	48	186	55	40	40	321	30
280	50		90	50	20	330	43
274	60	175	82	45	48	230	72
283	51		90	220	70	210	82
273	48	184	82	230	86	215	70
285	32	160	80	240	78	190	72
296	41	10	30	230	82	186	60
308	46	12	30	225	86	92	82
318	28	30	40	105	32	85	80
175	82	20	15	145	40		
155	76	20	4	325	65		

Figura 22. Diagrama de rosas con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades. Realizado en Dips.5 ®.

6.4.2 Espaciamiento

Se define como la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad en una misma familia. Influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques. Para la categorización de esta propiedad se usaron los rangos indicados en la Tabla 6 y su comportamiento dentro del macizo rocoso en la Figura 23.

Tabla 6. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades, (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989).

DESCRIPCIÓN	MEDIDA
Extremadamente junta	< 2 cm
Muy junta	2 cm - 6 cm
Junta	6 cm- 20 cm
Moderadamente junta	20 cm - 60 cm
Separada	60 cm - 2 m
Muy separada	2 m - 6 m
Extremadamente separada	> 6 m

En los levantamientos realizados predominan discontinuidades moderadamente juntas con un 64%, seguido de las juntas (22%) y el 14% restante se presentan separadas (Figura 23).

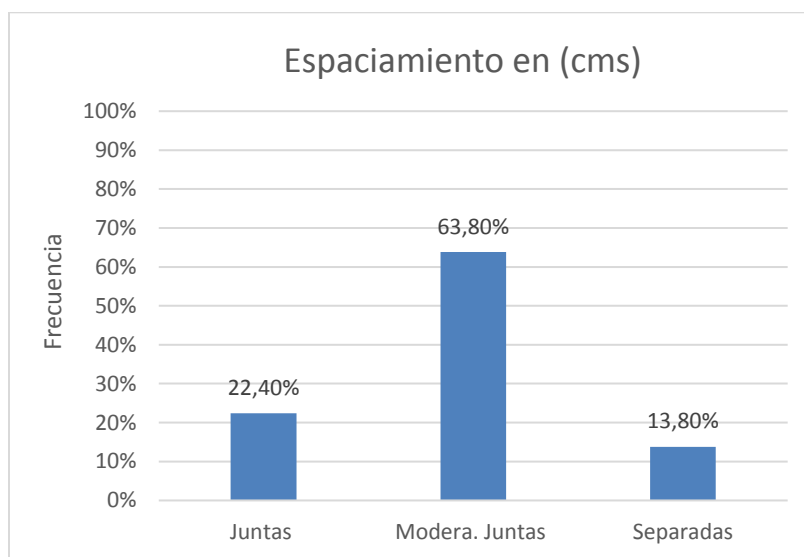


Figura 23. Análisis de las características de espaciamiento de las discontinuidades.

6.4.3 Persistencia

Se trata de la extensión del plano de discontinuidad en el rumbo. En la Tabla 7 se muestran los rangos para la categorización de esta propiedad, y en la Figura 24 se pueden observar los resultados.

Tabla 7. Descripción de la continuidad de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989).

DESCRIPCIÓN	MEDIDA
Muy baja	< 1 m
Baja	1 m - 3 m
Moderado	3 m - 10 m
Alta	10 m - 20 m
Muy alta	> 20 m

En términos de persistencia la mayor parte de las discontinuidades se clasifican como de persistencia muy baja como <3 m en un 95%, el 5% restante exhiben persistencia baja (Figura 24).

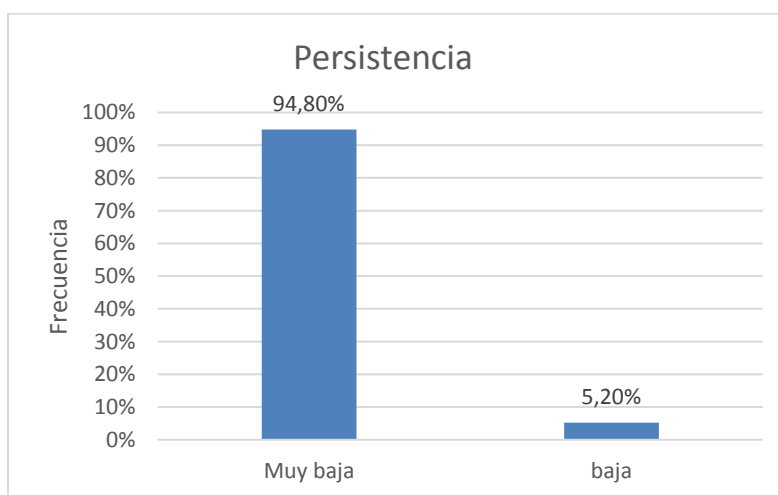


Figura 24. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades.

6.4.4 Apertura

Corresponde a la distancia perpendicular al buzamiento que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. En la siguiente Tabla 8 se muestran los rangos en los cuales está subdividida esta propiedad y los resultados se presentan en la Figura 25.

Tabla 8 .Descripción de la abertura de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989).

DESCRIPCIÓN	MEDIDA
Muy cerrada	< 0,1 mm
Cerrada	0,1 mm - 0,25 mm
Parcialmente abierta	0,25 mm - 0,5 mm
Abierta	0,5 mm - 2,5 mm
Moderadamente abierta	2,5 mm - 10 mm
Ancha	10 mm - 1 cm
Muy ancha	1 cm - 10 cm
Extremadamente ancha	10 cm - 100 cm
Cavernosa	> 100 cm

Las aperturas que predominan corresponden a las parcialmente abiertas esto equivale a tener aperturas de 0.25mm- 0,5mm en un 74%. Los procesos que más favorece la abertura de estos planos se asocian a la meteorización y disolución en la roca. Un 23% exhiben una apertura denominada abierta y el 4% restante moderadamente abierta (Figura 25).

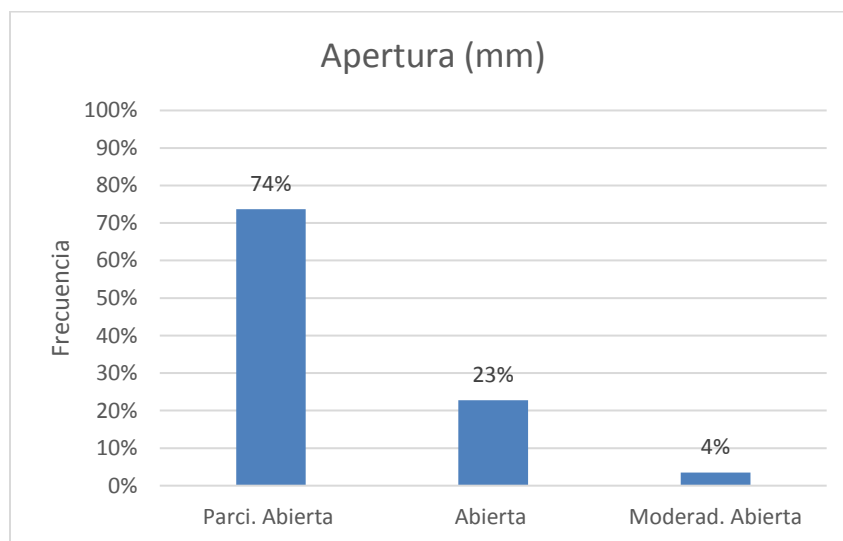


Figura 25. Análisis de la característica de apertura de las discontinuidades.

6.4.5 Rugosidad

Esta propiedad determina la resistencia al corte de la discontinuidad. Las discontinuidades estructurales de los macizos de roca dura no son planas y lisas,

estas presentan irregularidades visibles o sensibles al tacto, con influencia variable sobre la resistencia al corte. Al respecto se reconocen dos tipos de asperezas o rugosidad superficial: uno de primer orden, u ondularidad que se relacionan con la forma de las diaclasas (decimétricas a métricas) y otro de segundo orden, o asperezas, el cual se relacionan con la naturaleza de la superficie de discontinuidad (centimétricas a milimétricas). Las irregularidades de primer orden se describen como planares, onduladas y pulidas (Figura 26).


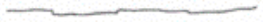
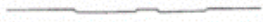






Descripción	Perfil
Rugosa	   Escalonada
Suave	
Pulida	
Rugosa	   Ondulada
Suave	
Pulida	
Rugosa	   Plana
Suave	
Pulida	

Figura 26. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Hoek, 1981).

En términos de la rugosidad las discontinuidades se presentaron ondulada lisa en un 62% y lo restante se distribuye en plana lisa (21%) y ondulada rugosa (17%) casi en las mismas cantidades (Figura 27).

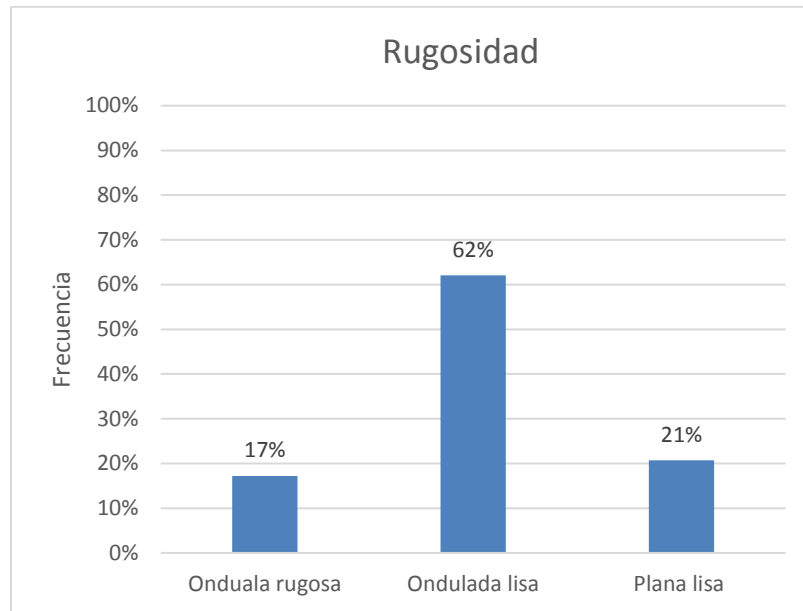


Figura 27. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades.

6.4.6 Relleno

Dentro de las discontinuidades puede aparecer relleno, principalmente de materiales blandos arcillosos o arenosos con materiales rocosos de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno pueden ser variables y controlan el comportamiento de la discontinuidad.

De los datos obtenidos se destaca que el 71% de las estructuras presentan algún tipo de relleno. Este relleno puede tener más o menos de 1- 5 mm y generalmente se presenta como un material limoso y arenoso húmedo que debe ser producto de la meteorización y precipitación del suelo. El 29% restante no presenta ningún tipo de relleno (Figura 28).

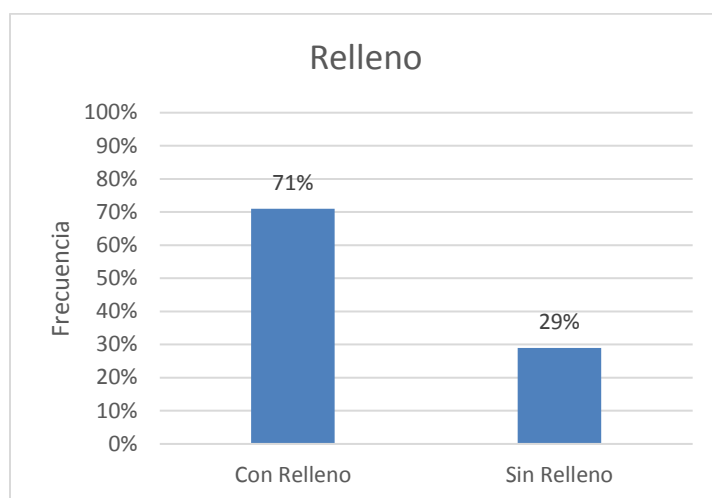


Figura 28. Análisis de la característica relleno de las discontinuidades.

6.4.7 Meteorización

Hace referencia a la alteración de la roca. Las categorías utilizadas son: Sana, algo meteorizada, medianamente meteorizada, muy meteorizada, completamente meteorizada y suelo residual (Tabla 9).

Tabla 9. Descripción de la meteorización de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989).

DESCRIPCIÓN	
Meteorización	Sana I
	Algo meteorizada II
	Media meteorizada III
	Muy meteorizada III
	Compl.Meteorizada IV
	Suelo residual V
	No Aplica

Desde el punto de vista de la meteorización identificada en las discontinuidades, la mayoría de las mismas presentan media meteorización correspondiente al 81%, el 19% restante se presentan algo meteorizadas (Figura 29).

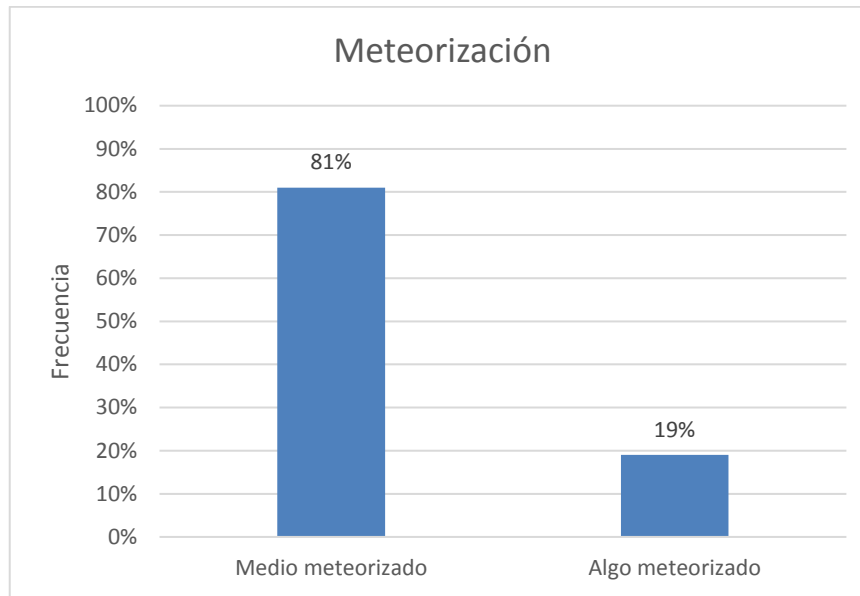


Figura 29. Análisis de la característica meteorización en las discontinuidades.

6.4.8 Agua – Filtraciones

Esta característica se refiere el flujo que circula por las discontinuidades. Los rangos de esta característica consideran como posibilidades que la discontinuidad esté seca, húmeda, goteo y flujo (Tabla 10).

Tabla 10. Descripción de la filtración de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989).

DESCRIPCIÓN	
Filtraciones	Seco
	Húmedo
	Goteos
	Flujo

Desde el punto de vista de las condiciones de humedad identificadas en las discontinuidades, la mayoría de la roca se encontraban húmedas en un 64%, eso se debe también al tiempo de cuando se tomaron los datos. El 36% no presentaban ningún tipo de humedad por lo que se clasifican como secas (Figura 30).

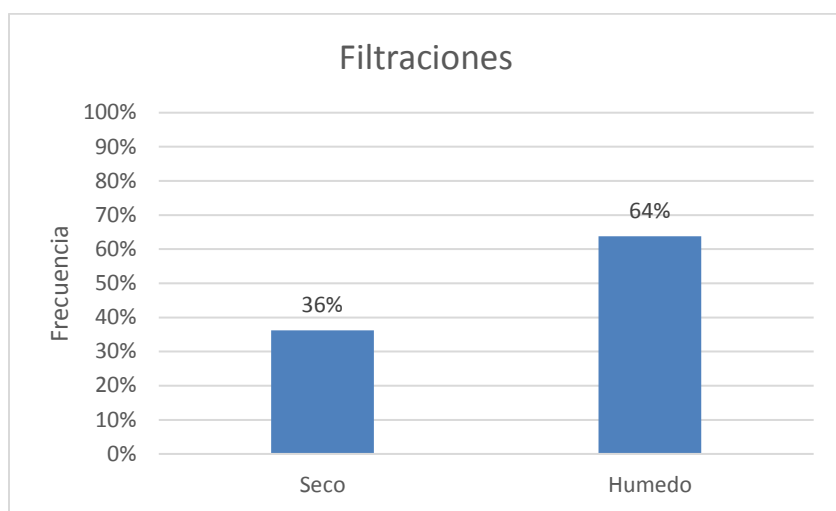


Figura 30. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades.

6.4.9 Resistencia de las paredes

Hace referencia a la resistencia a la compresión inconfiada. Los rangos de esta característica son muy blando, blando, consistente, muy consistente, duro y muy duro (Tabla 11). La medición se realiza de manera representativa teniendo en cuenta el grado de alteración de las discontinuidades y la rugosidad. Para dicha calificación se empleó la punta del martillo geológico con la cual se hace presión sobre las paredes y cualitativamente se describe la respuesta del material y se califica teniendo en cuenta la siguiente tabla.

Tabla 11. Descripción de la resistencia de las discontinuidades (Modificado de Bieniawski, Z. T. (1989).

DESCRIPCIÓN	
Resistencia	Muy blando
	Blando
	Consistente
	Muy consistente
	Duro
	Muy duro
	No Aplica

Desde el punto de vista de la resistencia, el material observado en campo presenta una resistencia muy consistente en el 100% de las discontinuidades analizadas (Figura 31).

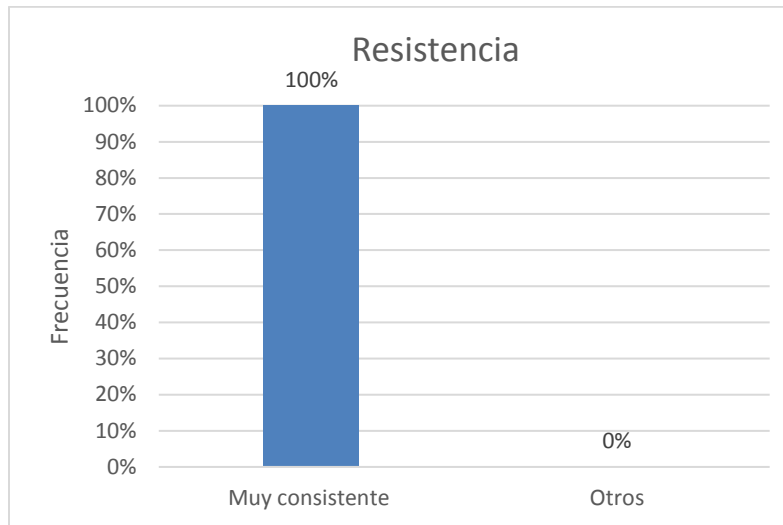


Figura 31. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades.

6.5 MORFOMETRÍA

La morfometría, como componente del relieve, se refiere al grado de inclinación del terreno o gradiente, expresado en porcentaje o grados. El mapa resultante de este análisis, muestra la distribución de las pendientes naturales del área de estudio, de acuerdo con los rangos preestablecidos. La importancia de este análisis radica en que, en la evaluación de la susceptibilidad a movimientos en masa, el análisis de éstas no se puede pasar por alto, ya que cada material superficial posee un comportamiento geomecánico diferente, según la pendiente donde este localizado. Igualmente, el desarrollo urbanístico y el uso del suelo se encuentran restringidos por esta variable.

La zona de estudio se caracteriza por tener una topografía dominada por rangos de pendientes abruptas a muy abruptas en una gran porción de su extensión, la mayor parte de éstas asociado a los lomos que descienden hacia el cauce de la quebrada La Loca. Hacia el costado sur predominan zonas inclinadas a muy inclinadas, asociadas a las zonas que han sido suavizadas por la acumulación de depósitos de vertiente y a las laderas irregulares que se desprenden del cerro de L Cruz, y descienden hacia las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Igualmente se identifican zonas de menor pendiente (muy suave a suaves) asociadas a las zonas intervenidas antrópicamente para el establecimiento de viviendas, vías de acceso, equipamientos y adecuaciones de tipo urbanístico. En la siguiente tabla se presenta

la distribución de los diferentes rangos de pendientes para la zona de estudio y en la Figura 32 el correspondiente mapa:

Tabla 12. Distribución de la variable pendiente para el polígono El Faro

Rango pendiente	Total Área (ha)	Porcentaje (%)
0 - 3% (muy suave)	0.24	1.1
3 - 10% (suave)	0.38	1.8
10 - 25% (inclinada)	1.85	8.6
25 - 40% (muy inclinada)	4.88	22.7
40 - 60% (abrupta)	6.29	29.3
60 - 100% (muy abrupta)	7.22	33.6
>100% (escarpada)	0.62	2.9

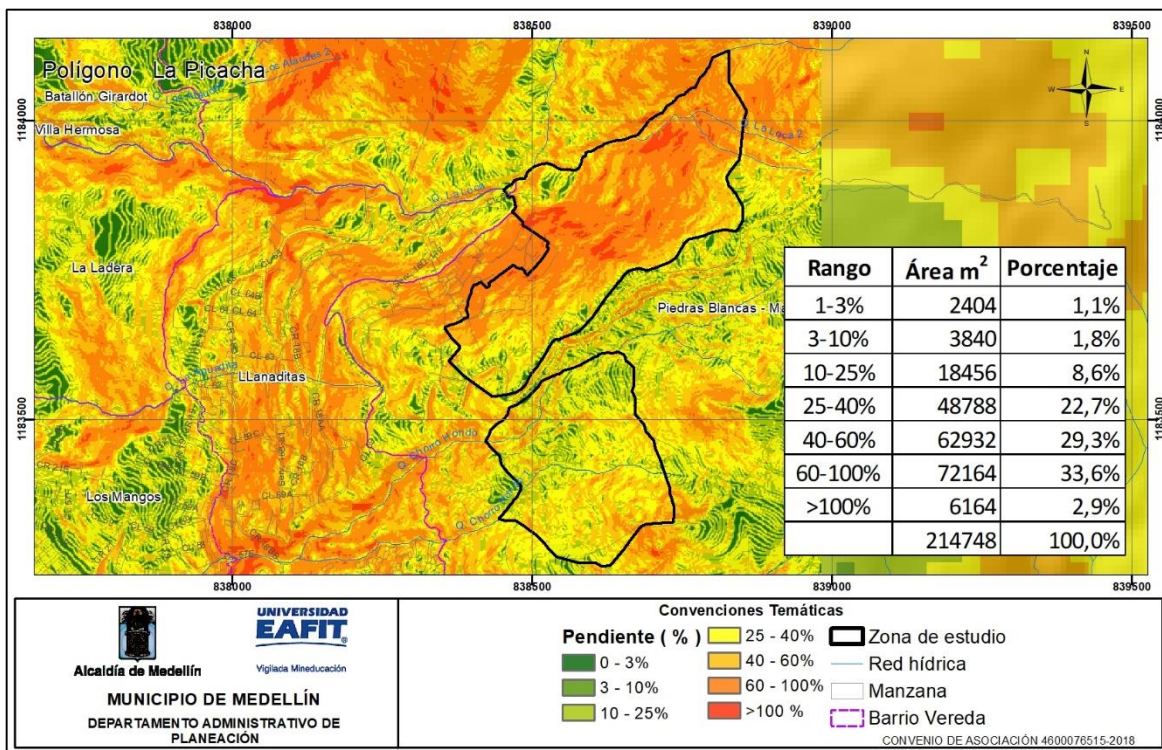


Figura 32. Mapa de morfometría, polígono El Faro

Rango de pendientes 0 – 10% (muy suave – suave): pertenece a un rango poco distribuido, correspondiente al 2.9% del total del área de estudio y se relaciona principalmente con las zonas que han sido modificadas antrópicamente mediante la realización de explanaciones para la adecuación urbanística como es el caso del

sector aledaño a la finca Las Nubes, el tanque de Llanaditas, y la cancha de Tavo (Figura 33).



Figura 33. Rango de pendiente de 0 – 10%, donde se localiza la finca Las Nubes

Rango de pendiente 10 – 25% (inclinada): corresponde a un rango de pendientes poco distribuido ocupando el 8.6% del total del área de estudio. La distribución de este rango de pendientes se da principalmente hacia las zonas que han sido modificadas antrópicamente mediante la realización de explanaciones para la adecuación urbanística, las zonas suavizadas por la acumulación de depósitos de vertiente, y al sur en las vertientes irregulares que se presentan entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (Figura 34).



Figura 34. Rango de pendiente de 10 - 25%, asociado al tanque de Llanaditas y la ladera localizada al sur entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1

En este rango de pendientes, la topografía condiciona moderadamente el diseño urbanístico, se requiere cuidado en el desarrollo de cortes para carreteras, banqueos para el establecimiento de viviendas y llenos.

Rango de pendientes de 25 – 40% (muy inclinada): Corresponde a un rango de distribución moderada, correspondiente al 22.7% del total de la zona de estudio y se asocia principalmente a las laderas de aspecto irregular que definen que la zona en estudio hacia el costado sur, en el sector comprendido entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, y a las vertientes suavizadas por la acumulación de depósitos de vertiente asociados a antiguos movimientos en masa, localizado hacia el sector del Faro, en la zona aledaña a la cancha de Tavo (Figura 35).



Figura 35. Rango de pendiente de 25 - 40%, asociado a ladera localizada al sur, entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1

En este rango de pendientes, la topografía condicionada grandemente el desarrollo urbanístico, por lo que se requiere de un estudio geológico – geotécnico de detalle para su desarrollo y donde igualmente se incluyan las recomendaciones de manejo y las obras de mitigación a llevar a cabo en caso de ser necesaria la realización de cortes o llenos para la apertura de vías de acceso, o la ocupación urbana.

Rango de pendientes de 40 - 60% (abrupta): Este rango de pendientes se distribuye a lo largo de toda la zona, ampliamente distribuido, y se encuentra intercalado de forma irregular con otros rangos de pendientes. Su distribución se asocia a las vertientes desarrolladas sobre suelos residuales y rocas moderadamente meteorizadas que se extienden principalmente hacia el costado norte, en la vertiente sur de la quebrada La Loca, y hacia el sur de la quebrada Chorro Hondo 1, asociado a las verienes que descienden del cerro de la Cruz

(Figura 36). Ocupa un porcentaje del 29.3% con respecto al total de la zona de estudio, correspondiente a uno de los rangos de mayor distribución.

Las pendientes con este porcentaje no son aptas para urbanizaciones continuas, es un rango con características condicionadas para procesos urbanísticos y regularmente requiere obras de mitigación para su adecuación y manejo.



Figura 36. Rango de pendiente de 40 - 60% al sur de la Chorro Hondo 1

Rango de pendientes de 60 – 100% (muy abrupta): Representa el rango de mayor distribución, correspondiente al 33.6% del total del área analizada presentando un marcada predominio hacia el costado norte, asociado a los sistemas de lomos y vertientes que descienden hacia la quebrada La Loca (Figura 37).

Las pendientes con este porcentaje no son aptas para urbanizaciones continuas, es un rango con características condicionadas para procesos urbanísticos y regularmente requiere obras de mitigación para su adecuación y manejo.



Figura 37. Rango de pendiente de 60 - 100%, asociado a vertientes que descienden hacia la quebrada La Loca

Rango de pendientes de > 100% (escarpada): Pertecene a un rango de poca distribución, correspondiente al 2.9% del total de la zona de estudio y se localiza en pequeños sectores relacionados con el rango de pendientes anterior y distribuidos principalmente hacia el cañón de la quebrada La Loca.

6.6 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

La zona de estudio presenta un comportamiento geomorfológico asociado a la unidad denominada por el AMVA en el 2007 como lomos, los cuales corresponden a filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal que en este caso corresponde al río Aburrá. Están desarrollados sobre rocas y materiales residuales principalmente. Teniendo en cuenta la escala del trabajo, estas unidades han sido diferenciadas de acuerdo a las características particulares que exhiben cada una de las vertientes que lo conforman, entre las que se destacan la forma, longitud de la ladera y la inclinación de las pendientes.

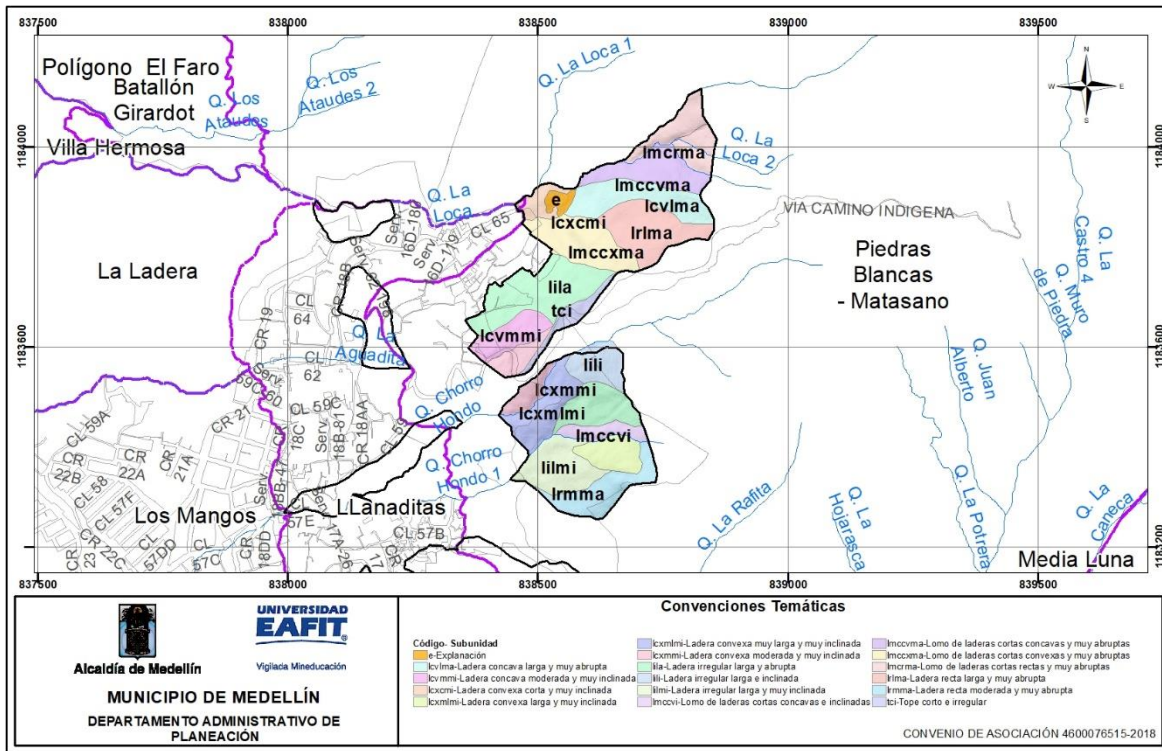


Figura 38. Mapa de subunidades geomorfológicas locales, polígono El Faro

Para el polígono en estudio las condiciones geomorfológicas se asocian a un lomo de pendientes abruptas a escarpadas, desarrollado sobre suelos residuales y rocas meteorizadas asociadas a la Dunita de Medellín que descende en sentido SW-NE, limitado por las quebradas La Loca y Chorrohondo. Esta unidad hacia la parte media y baja se encuentra cubierta por depósitos de vertiente, lo cual genera laderas de aspecto irregular de pendientes un poco menores. Hacia el costado sur, en el sector comprendido entre las quebradas Chorro Hondo y La Rafita, las condiciones geomorfológicas son similares, por lo que se presentan igualmente lomos, de pendientes inclinadas a muy inclinadas, que descenden en el mismo sentido, que se desprenden desde el cerro de la Cruz (Figura 38).

A continuación se describen las subunidades geomorfológicas identificadas en la zona de estudio:

6.6.1 Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA)

Lomos (VM-BCNA-L): son filos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal que en este caso corresponde al río Aburrá. Están desarrollados sobre rocas y materiales residuales principalmente.

Lomos de laderas cortas, rectas y muy abruptas (VM-BCNA-L-lmcrma): Corresponde a pequeños lomos que se localizan de forma paralela a la quebrada La Loca, en el sector comprendido entre ésta y la quebrada La Loca 2, en el costado nororiental de la zona analizada, las cuales descenden en sentido SW-NE hacia la confluencia de éstas quebradas (Figura 39).

Estos lomos exhiben un índice de relieve bajo, de laderas cortas, variables entre 20 y 25m, de aspecto rectos, incisión moderada a alta, y pendientes muy abruptas, del orden de 60-100%. Esta subunidad se desarrolla sobre rocas parcialmente meteorizadas de la Dunita de Medellín y sobre ella se identifican cicatrices de antiguos movimientos en masa, principalmente hacia el cañón de la quebrada La Loca.



Figura 39. Panorámica unidad de lomos de laderas cortas, rectas y muy abruptas, vertiente norte de la quebrada La Loca 2

Lomo de laderas cortas, cóncavas y muy abruptas (VM-BCNA-L- Imccvma): Corresponde a pequeños lomos desarrollados sobre suelos residuales y rocas alteradas de la Dunita de Medellín, que se extiende hacia la vertiente sur de la quebrada La Loca, en el costado nororiental de la zona analizada. Estos lomos se extienden de forma semi perpendicular a la quebrada La Loca 2, con dirección predominante NE -SW. Exhibe un índice de relieve bajo, de laderas cortas, variables entre 10 y 15m, de aspecto cóncavas y pendientes muy abruptas a escarpadas, del

orden de 60-100%. Asociado a esta subunidad se identifican movimientos en masa superficiales y procesos de tipo erosivo (Figura 40).



Figura 40. Panorámica unidad de lomos de laderas cortas, cóncavas y muy abruptas, vertiente sur de la quebrada La Loca

Ladera cóncava, larga y muy abrupta (VM-BCNA-L-lcvlma): Se presenta como una ladera de forma cóncava, de longitud larga, variable entre 70 y 80m, de pendientes muy abruptas a escarpadas (>60%). Esta unidad se desarrolla sobre rocas parcialmente meteorizadas de la Dunita de Medellín y asociado a ella no se identifican movimientos en masa, pero si procesos de tipo erosivo asociado a la presencia de ganado. Esta unidad se extiende hacia el costado nororiental de la zona analizada, al oriente de la finca Las Nubes (Figura 41).



Figura 41. Panorámica unidad de ladera cóncava, larga y muy abrupta, al oriente de la finca Las Nubes

Ladera recta, larga y muy abrupta (VM-BCNA-L-Irlma): Se extiende hacia el sur de la unidad anteriormente descrita, extendiéndose desde la vía a la Cuesta hasta la cota 2030 msnsm, y exhibe características de longitud (70 y 80m) y pendiente (60 – 100%) iguales, lo que lo diferencia corresponde a la forma de la ladera, la cual en este caso es recta dado por la presencia de afloramientos de roca que marcan esta tendencia.

Lomo de laderas cortas, convexas y muy abruptas (VM-BCNA-L-Imccxma): Corresponde a pequeños lomos desarrollados sobre rocas meteorizadas de la Dunita de Medellín, que se localiza hacia la vertiente sur de la quebrada La Loca y se extiende desde la vía a la Cuesta hasta el sendero peatonal que conduce desde la finca Las Nubes hasta el sector del Faro. Esta unidad exhibe un índice de relieve bajo, de laderas cortas, variables entre 20 y 30m, de aspecto convexo y pendientes muy abruptas, del orden de 60 y 100% principalmente. Asociado a esta subunidad no se identifican procesos morfodinámicos (Figura 42).



Figura 42. Panorámica unidad de lomo de laderas cortas convexas y muy abruptas, al sur de la finca Las Nubes.

Ladera convexa, corta y muy inclinada (VM-BCNA-L-Lcxcmi): Corresponde a una ladera que corresponde a la terminación de un lomo que fue intervenido mediante explanaciones para la localización de la finca Las Nubes, por lo que sólo se conserva la ladera final del mismo, caracterizada por presentar aspecto convexo, longitud corta, variable entre 20 y 30m, y pendientes muy inclinadas (25 – 40%). Asociado a esta subunidad se identifican algunos procesos principalmente de tipo erosivo, donde predominan coberturas de pastos (Figura 43).



Figura 43. Panorámica unidad de ladera convexa, corta y muy inclinada hacia la base de la finca Las Nubes

Ladera irregular, larga y abrupta (VM-BCNA-L-lila): Se presenta como una ladera larga, variable entre 100 y 120m, de aspecto irregular en sentido transversal a la pendiente dada por la presencia de zonas tanto cóncavas como convexas que le imprimen esta irregularidad al terreno, pendientes abruptas a muy abruptas, variables entre 40 - 100%. Esta subunidad se desarrolla sobre suelos residuales derivados de la Dunita de Medellín y asociado a ella se observan algunos deslizamientos de tipo superficial, además de procesos de tipo erosivo. Esta unidad se presenta en dos sectores, el primero de ellos hacia la zona central del polígono analizado, desde la prolongación de la servidumbre 16d-110 hasta la servidumbre 16d-119, y entre la vía a la Cuesta hasta el sendero peatonal que une la vía finca Las Nubes y el sector del Faro (Figura 44).



Figura 44. Panorámica unidad de ladera irregular, larga y abrupta, en la zona central del polígono

La segunda zona se extiende sobre la vertiente norte de la quebrada Chorro Hondo 1, donde se presenta como una ladera muy continua que se extiende desde el sendero de acceso al cerro la Cruz hasta el camino de la vida. Se destaca que en este sector no se identifican procesos morfodinámicos, las construcciones se presentan de forma aislada y no se identifican intervenciones antrópicas de importancia (Figura 46).



Figura 45. Panorámica unidad de ladera irregular, larga y abrupta, asociado a vertiente norte de la quebrada Chorro Hondo 1

Ladera cóncava, moderada y muy inclinada (VM-BCNA-L-lcvmmi): Se extiende hacia la zona central, en la zona aledaña al sector de la cancha de Tavo, donde se presenta como una ladera con una leve concavidad que en algunos sectores se presenta más recta, de longitud moderada, variable entre 50 y 60m, de pendientes muy muy inclinadas (25 - 40%). Esta unidad se desarrolla sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y asociado a ella se identifican movimientos en masa, principalmente de tipo traslacional, además de deslizamientos superficiales asociados a las intervenciones antrópicas allí identificadas. Esta unidad exhibe una densidad alta de viviendas donde las zonas más escarpadas aún permanecen libres de construcciones (Figura 46).



Figura 46. Panorámica unidad de ladera cóncava moderada y muy inclinada, hacia la zona central del polígono analizado

Ladera convexa, moderada y muy inclinada (VM-BCNA-L-lcxmmi): Se localiza hacia la zona central, asociado a dos polígono. El primero de ellos al oriente del sector de la cancha de Tavo y el segundo sobre la vertiente norte de la quebrada Chorro Hondo, donde se presentan laderas de longitud media, del orden de 60 a 70m, de aspecto convexo y pendientes muy inclinadas (25 - 40%). Esta unidad se desarrolla sobre depósito de vertiente y sobre ella no se identifican procesos morfodinámicos, sin embargo, asociado a las características de pendiente, se da un desarrollo importante de construcciones de viviendas (Figura 47).



Figura 47. Panorámica unidad de ladera convexa, moderada y muy inclinada, en sector al oriente de la Cancha de Tavo

Tope corto e irregular (VM-BCNA-L-tci): Se extiende hacia la zona central, por lo que representan la zona más alta que marca la divisoria de aguas entre las quebradas La Loca y Chorro Hondo, correspondiente a un tope de longitud corta,

entre 18 y 30m, de pendientes inclinadas y forma plana a irregular, con un leve escalonamiento. Asociado a esta unidad no se identifican procesos morfodinámicos. Se destaca que siguiendo la trayectoria de este tope es que se ha construido el antiguo camino indígena y actual vía la cuesta (Figura 48).



Figura 48. Panorámica unidad de tope corte e irregular, donde se ha construido la vía La Cuesta

Ladera irregular, larga e inclinada (VM-BCNA-L-lili): Se presenta como una ladera larga, variable entre 90 y 100m, de aspecto irregular en sentido transversal a la pendiente, y pendientes inclinadas, variables entre 10 y 25%. Esta unidad se desarrolla sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y asociado a ella no se identifican procesos morfodinámicos. Se localiza en la vertiente sur de la quebrada Chorro Hondo, al inicio del sendero que conduce de la vía a la Cuesta al cerro de la Cruz, donde predominan fincas aisladas (Figura 49).



Figura 49. Panorámica unidad de ladera irregular, larga e inclinada en zona aledaña a sendero peatonal de acceso al cerro La Cruz

Ladera convexa, muy larga y muy inclinada (VM-BCNA-L-lcxmli): se presenta como una ladera muy larga, variable entre 150 y 160m, de aspecto convexo, bastante continua y pendientes inclinadas a muy inclinadas, del orden de 25 - 40%, aunque localmente se presentan zonas de menor pendiente. Esta unidad se desarrolla sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y asociado a ella no se identifican procesos morfodinámicos. Esta subunidad exhibe un importante predominio y se localiza entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, y entre el camino de la vida y el sendero que conduce al cerro de la Cruz (Figura 50).



Figura 50. Panorámica unidad de ladera convexa, muy larga y muy inclinada, localizada entre las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.

Lomo de laderas cortas, cóncavas e inclinadas (VM-BCNA-L-lmccvi): Se conforma un pequeño lomo desarrollado sobre suelos residuales, que se extiende hacia la vertiente norte de la quebrada Chorrohondo 1, y se extiende de forma casi paralela a dicha quebrada, con dirección predominante E-W. Exhibe un índice de relieve bajo, de laderas cortas, variables entre 20 y 25m, de aspecto cóncavo y pendientes inclinadas, variables entre 10 y 25% principalmente. Asociado a esta subunidad no se identifican procesos morfodinámicos (Figura 51).



Figura 51. Panorámica unidad de lomo de laderas cortas, cóncavas e inclinadas, localizado en la vertiente norte de la Chorro Hondo 1.

Ladera recta, moderada y muy abrupta (VM-BCNA-L-lrmma): Corresponde a una ladera que se extiende al sur del área de estudio limitando con el Cerro de la Cruz, caracterizada por corresponder a una ladera recta desarrollada sobre rocas parcialmente meteorizadas de la Dunita de Medellín, lo que genera la regularidad en la vertiente, de longitud moderada entre 50 y 65m, y pendientes abruptas a muy abruptas (60 – 100%). Asociado a esta unidad no se identifican procesos morfodinámicos (Figura 52).



Figura 52. Panorámica unidad de ladera recta, moderada y abrupta en la base del cerro La Cruz

Ladera convexa, muy larga y muy inclinada (VM-BCNA-L-lcxmimi): Se localiza en la vertiente sur de la quebrada Chorro Hondo 1, al occidente del sendero que conduce al cerro de la Cruz. Corresponde a una ladera larga, variable entre 80 y 100m, de aspecto convexo, y pendientes inclinadas a muy inclinadas, del orden de 10 - 40%. Esta unidad se desarrolla sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y asociado a ella no se identifican procesos morfodinámicos (Figura 53).



Figura 53. Panorámica unidad de ladera convexa, muy larga y muy inclinada, en la vertiente sur de la quebrada Chorro Hondo 1

Ladera irregular, larga y muy inclinada (VM-BCNA-L-ilmi): Se localiza en la vertiente sur de la quebrada Chorro Hondo 1, al oriente del camino de la vida. Se presenta como una ladera larga, variable entre 80 y 100m, de aspecto irregular en sentido transversal a la pendiente, y pendientes muy inclinadas, variables entre 25 y 40%. Esta unidad se desarrolla sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y asociado a ella no se identifican procesos morfodinámicos y los procesos antrópicos no son de importancia debido a que se presentan viviendas de forma aislada (Figura 54).



Figura 54. Panorámica unidad de ladera irregular, larga y muy inclinada, al oriente del camino de la vida

Explanaciones (VM-BCNA-L- exp): Corresponde a modificaciones realizadas sobre el terreno, para el establecimiento de intervenciones de tipo urbanístico, que en este caso corresponden a las explanaciones realizadas en la zona donde se localiza la finca Las Nubes. Esta unidad exhibe aspecto regular a plano, de pendientes predominantemente suaves a inclinadas.



Figura 55. Panorámica unidad de explanaciones, finca Las Nubes.

6.7 MORFODINÁMICA

A continuación se expone la morfodinámica presente en el polígono El Faro la cual se desarrolló a partir de un análisis del reporte histórico de eventos y de los procesos identificados en el trabajo de campo.

6.7.1 Reporte histórico de eventos

Para el análisis del registro histórico de eventos del polígono de estudio se recopila la información que contienen los reportes de las bases de datos del DAGRD y del Departamento Administrativo de Planeación, al igual que los estudios llevados a cabo en la zona, esto con el fin de verificar la ocurrencia de movimientos en masa en el sector y que debido a las condiciones de intervención antrópica no sean posibles de determinar. Este registro de eventos igualmente sirve como insumo para determinar la continuidad o recurrencia de los movimientos en masa identificados para el polígono en estudio.

Para el polígono en estudio, la base de datos de visitas de DAGRD reporta la ocurrencia de 8 eventos en el período comprendido entre los años 2004 y 2018, la mayor parte de ellos concentrados en las mismas zonas, como se presenta en la Figura 56.

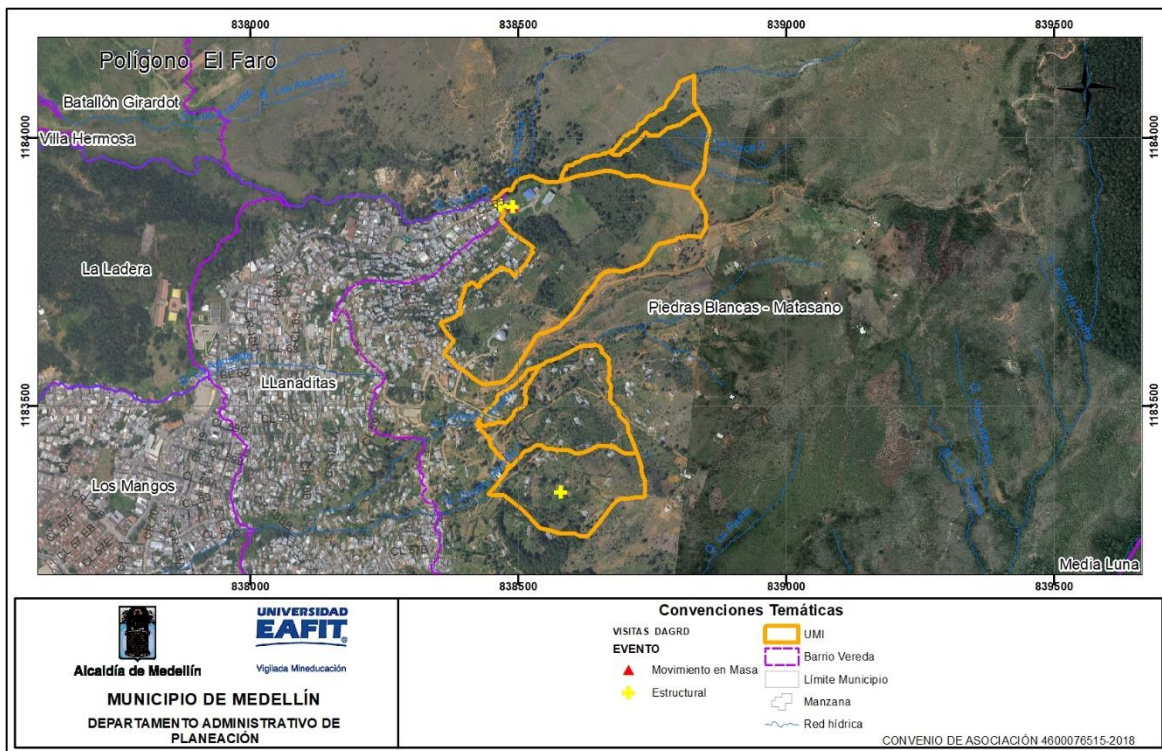


Figura 56. Mapa de reporte de eventos en el período comprendido entre 2004 y 2016 de acuerdo a base de datos del DAGRD para el polígono El Faro

Del total de eventos reportados por el DAGRD el 50% de los eventos (4 reportes) corresponden a movimientos en masa, el 50% restante (4 reportes) corresponde a deterioros de tipo estructura (Figura 57). De acuerdo con este reporte a partir de la ocurrencia de estos eventos se ha requerido la evacuación definitiva de 4 viviendas.

Además de los reportes anteriormente descritos, dentro del inventario de eventos con que cuenta el Departamento Administrativo de planeación y los identificados en los estudios llevados a cabo en la zona, se reporta la presencia de siete cicatrices de movimientos en masa que se distribuyen a lo largo de todo el polígono.

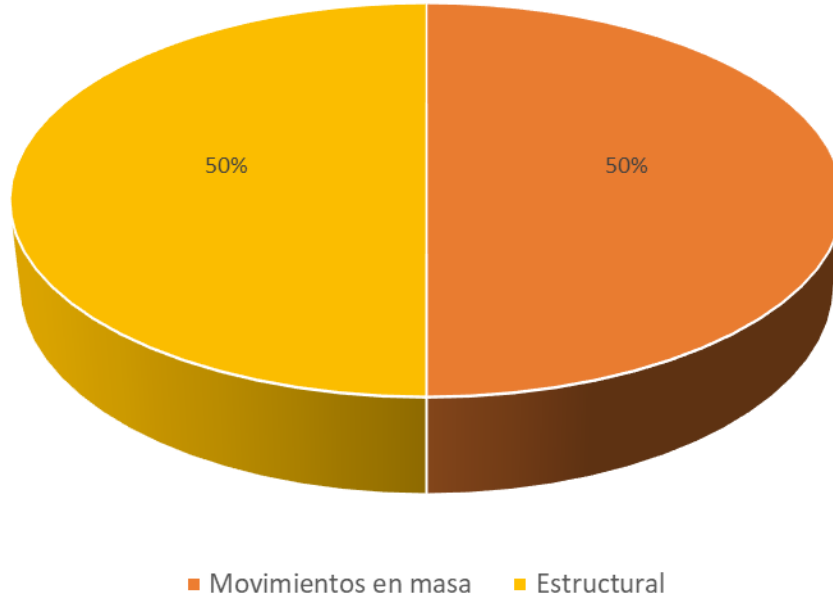


Figura 57. Reporte de eventos del DAGRD para el polígono El Faro

6.7.2 Identificación de procesos morfodinámicos

Dentro del polígono en estudio, los movimientos en masa identificados corresponden principalmente a deslizamientos con características planares, la mayor parte de ellos inactivos, siendo más predominantes hacia las unidades geomorfológicas de mayor pendiente localizadas hacia el costado norte, al igual que en los cañones de las quebradas La Loca y Chorro Hondo, y asociados principalmente a las zonas conformadas geológicamente por suelos residuales derivados de la Dunita de Medellín (Figura 58).

Estos movimientos en masa tienen origen por diferentes factores, tanto naturales como antrópicos. Entre las causas naturales se encuentran la saturación de los suelos por períodos intensos de lluvias, además de la pendiente, la forma y longitud de las laderas. Las causas atribuidas a factores antrópicos son principalmente sobrecargas, pérdida de soporte en taludes por modificaciones para la apertura de vías de acceso y la construcción de viviendas, ausencia de sistemas de drenaje o en su defecto sistemas mal contruidos e inadecuado uso y manejo del suelo.

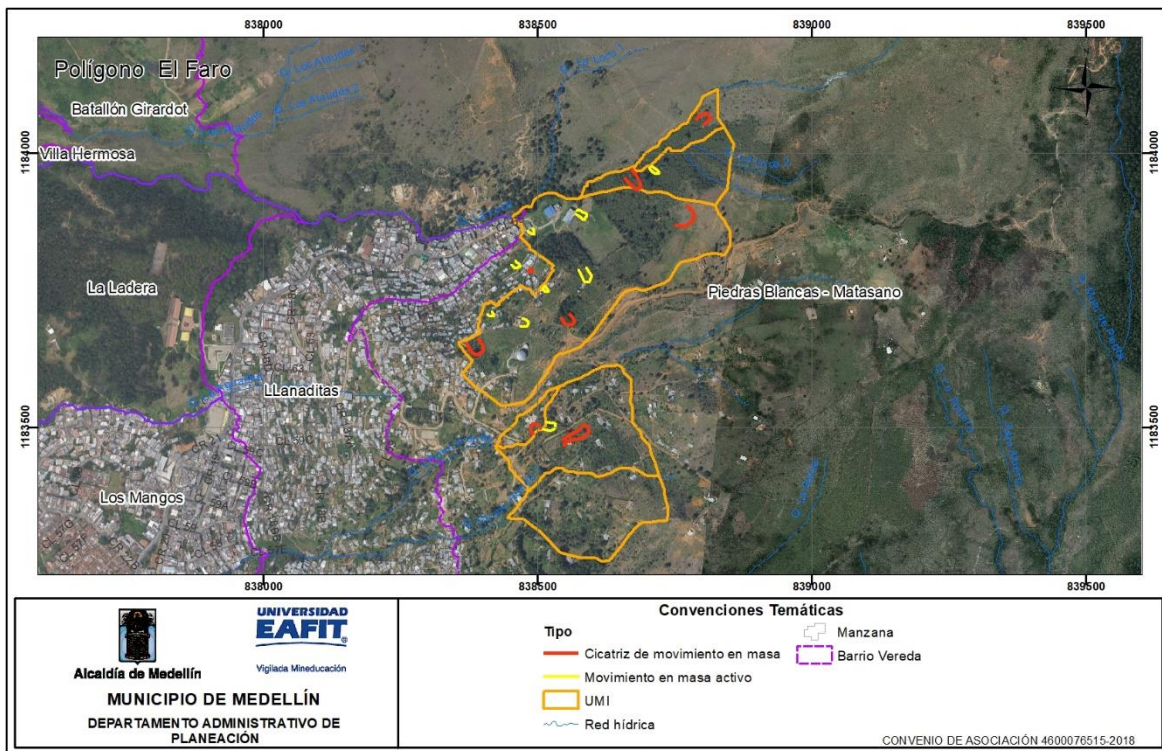


Figura 58. Mapa de procesos morfodinámicos, polígono El Faro

En la margen sur de la quebrada La Loca, en el talud superior de la finca las Nubes se identifica la ocurrencia de un deslizamiento de tipo traslacional, que afecta depósitos de vertiente y cuya superficie de falla se da a lo largo de contacto con el material más competente (roca IIA). Este movimiento en masa se manifiesta por la presencia de irregularidades en el terreno, deformaciones, árboles deformados y el desplazamiento de material. Este movimiento en masa presenta una superficie de falla poco profunda y se asocia a la realización de cortes en zonas de pendiente fuerte sin ningún tipo de obra de mitigación, además de la presencia de zonas afectadas por sobrepastoreo. Se destaca que este movimiento exhibe un carácter retrogresivo (Figura 59).



Figura 59. Movimientos en masa activos en talud superior de la finca Las Nubes

En este mismo sector igualmente se identifica cicatrices de deslizamientos de menor dimensión, la mayor parte de ellos localizados hacia los taludes de corte generados para las adecuaciones del lote donde se localiza la finca. Estos movimientos se encuentran inactivos y son fácilmente identificables por la concavidad e irregularidad que generan en el sector afectado (Figura 60).



Figura 60. Movimientos en masa inactivos en zona aledaña a finca Las Nubes

Hacia la zona nororiental del polígono analizado, en el talud inferior del sendero que comunica la finca Las Nubes con el sector del Faro, se presenta un deslizamiento de tipo rotacional, desarrollado sobre suelos residuales y asociados a la realización de cortes de importante altura hacia la base del mismo, sin ningún tipo de control o estructura de contención. Este movimiento exhibe una superficie de falla moderada, presenta una altura aproximada de 5m y una amplitud de 3 a 4m, que genera un

escarpe irregular variable entre 0.4 y 0.8m, y cuyo material movilizado generó afectaciones sobre las viviendas localizadas en la base, algunas de las cuales (2) han sido demolidas por su grado de afectación. Se destaca que hacia la corona del movimiento en masa se ha realizado un muro de confinamiento del sendero peatonal, restringiendo el avance del proceso inestable, por lo que puede catalogarse como estabilizado (Figura 61).



Figura 61. Movimientos en masa rotacional identificado en talud inferior de sendero peatonal

Un poco más al sur, hacia el talud superior del sendero peatonal, en la zona de mayor pendiente, se identifica la ocurrencia de un deslizamiento planar cuya superficie de falla está dada por el contacto del suelo residual con la roca alterada, y que se evidencia en el terreno por la presencia de un escarpe variable entre 0.5 y 0.7m hacia la corona, además de deformaciones e irregularidades hacia el cuerpo del mismo. Se destaca que al interior del movimiento se identifican algunas viviendas, las cuales presentan desplazamientos menores de materiales. Este movimiento en masa se encuentra activo y exhibe evidencias del carácter retrogresivo (Figura 62).



Figura 62. Movimientos en masa planar localizado hacia el costado nororiental de la zona analizada

En el costado nororiental de la zona del tanque de Llanaditas se identifica la cicatriz de un movimiento en masa de tipo rotacional, el cual es identificable por la concavidad que genera en el terreno en una zona con una longitud aproximada de 6m y un ancho de 5m. Este movimiento en masa se encuentra inactivo y con procesos de revegetalización. Se destaca que hacia la base del movimiento en masa se identifica una vivienda la cual fue construida posterior a la ocurrencia del evento, por lo que no se identifican afectaciones asociadas al mismo (Figura 63).



Figura 63. Movimientos en masa rotacional en el costado nororiental del tanque de Llanaditas

Igualmente, a lo largo de toda la zona se identifican movimientos en masa tanto activos como inactivos, de dimensiones menores asociados a la realización de

cortes de forma inadecuada, lo que genera desplazamientos de materiales hacia los taludes posteriores de las viviendas, generando problemas principalmente de humedades en paredes (Figura 64).



Figura 64. Movimientos en masa asociado a realización de cortes.

Además de los procesos naturales y socio – naturales descritos anteriormente, en la zona igualmente se identifican intervenciones de tipo antrópico que detonan y aceleran la ocurrencia de movimientos en masa. Las afectaciones identificadas corresponden principalmente a conformación de zonas de botaderos en zonas de pendientes altas, la realización de banqueros para el establecimiento de viviendas, en zonas de pendientes altas sin ningún tipo de especificaciones técnicas, el vertimiento de aguas lluvias y residuales directamente sobre los taludes y la conformación de sistemas de vallados sin ningún tipo de confinamiento. Este tipo de intervenciones antrópicas se identifican a lo largo de toda la zona.

6.8 CLASIFICACIÓN Y USOS DEL SUELO

Basado en el Acuerdo 48 de 2014, el polígono en estudio se localiza en zona rural y sobre él se identifican categorías del suelo de protección correspondientes a áreas de la estructura ecológica principal, áreas de amenaza y riesgo y zonas de producción sostenible, las cuales ocupan la mayor parte de la zona de estudio.

Las áreas de la Estructura Ecológica Principal incluyen las áreas protegidas públicas, así como las áreas de interés estratégico que contienen el sistema hidrográfico (ríos y quebradas con sus retiros), el sistema orográfico (cerros tutelares), los elementos estructurantes de la red de conectividad ecológica y las

áreas de interés recreativo y paisajístico (Acuerdo 48 de 2014). Para el polígono en estudio, estas áreas de interés estratégico corresponden a los retiros asociados a las quebradas La Loca, Chorrohondo y Chorrohondo 1, para las cuales se presenta un retiro de 30m debido a que corresponden a tramos naturales (Figura 65).

Gran parte del polígono se incluye dentro de las denominadas áreas de amenaza y riesgo, que incluye las áreas de amenaza alta (por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) y las áreas de alto riesgo no mitigable, así como las áreas con condiciones de riesgo (Acuerdo 48 de 2014). Para este caso corresponde a la zona con condición de riesgo que corresponde al área de análisis de este estudio (Figura 65).

Teniendo en cuenta que parte del polígono se localiza en suelo urbano, en él se identifican figuras de protección relacionadas con la aplicación del Decreto 3600, por lo que predominan áreas definidas como de protección para a producción, que es este caso corresponde a la producción agroforestal (Figura 65).

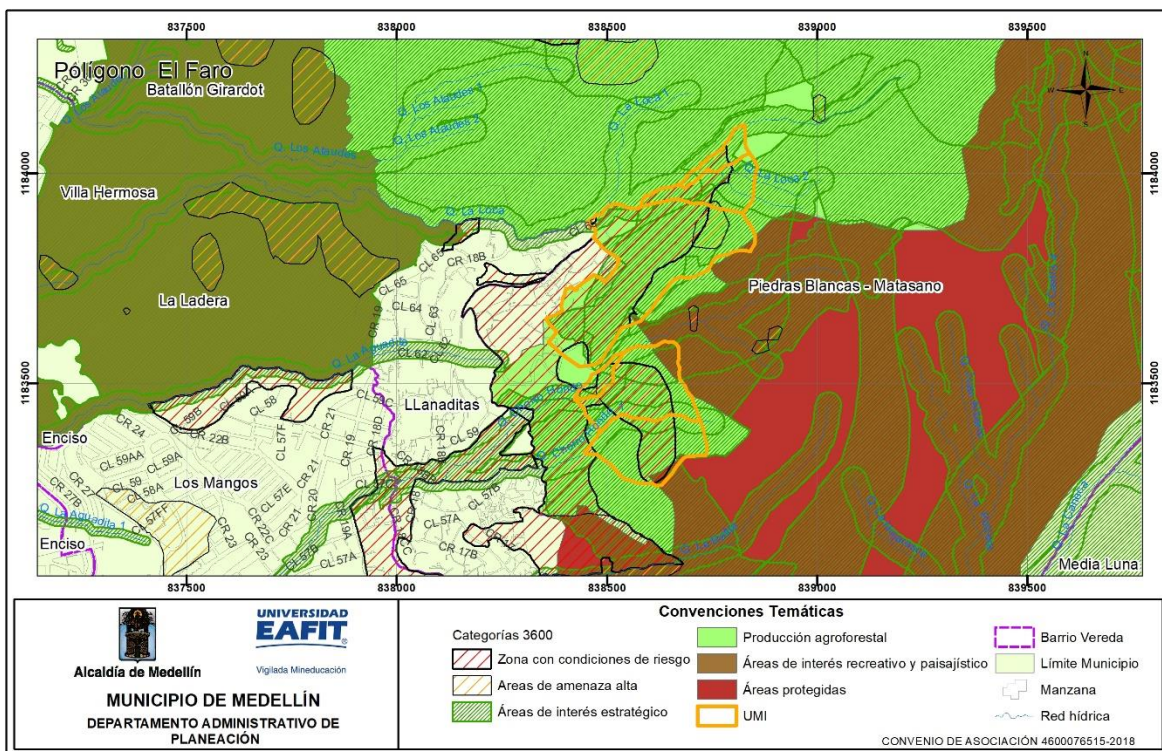


Figura 65. Mapa de clasificación del suelo para el polígono El Faro. Tomado de Acuerdo 48 de 2014.

Igualmente, en el Acuerdo 48 de 2014 se define que los usos del suelo corresponden a la distribución espacial de las actividades desarrolladas por agentes

públicos y privados, que permiten establecer las características de animación de la ciudad y la utilización y ocupación del suelo. Estas normas generales buscan optimizar las infraestructuras de urbanización y fomentar relaciones socio-económicas más eficientes a partir de la interrelación entre las actividades, mitigando los impactos generados y atendiendo a las características del territorio. Teniendo en cuenta éstas premisas y dicho acuerdo, para el polígono El Faro se define como uso predominante el agroforestal y solo unos pequeños sectores forestal protector (Figura 66).

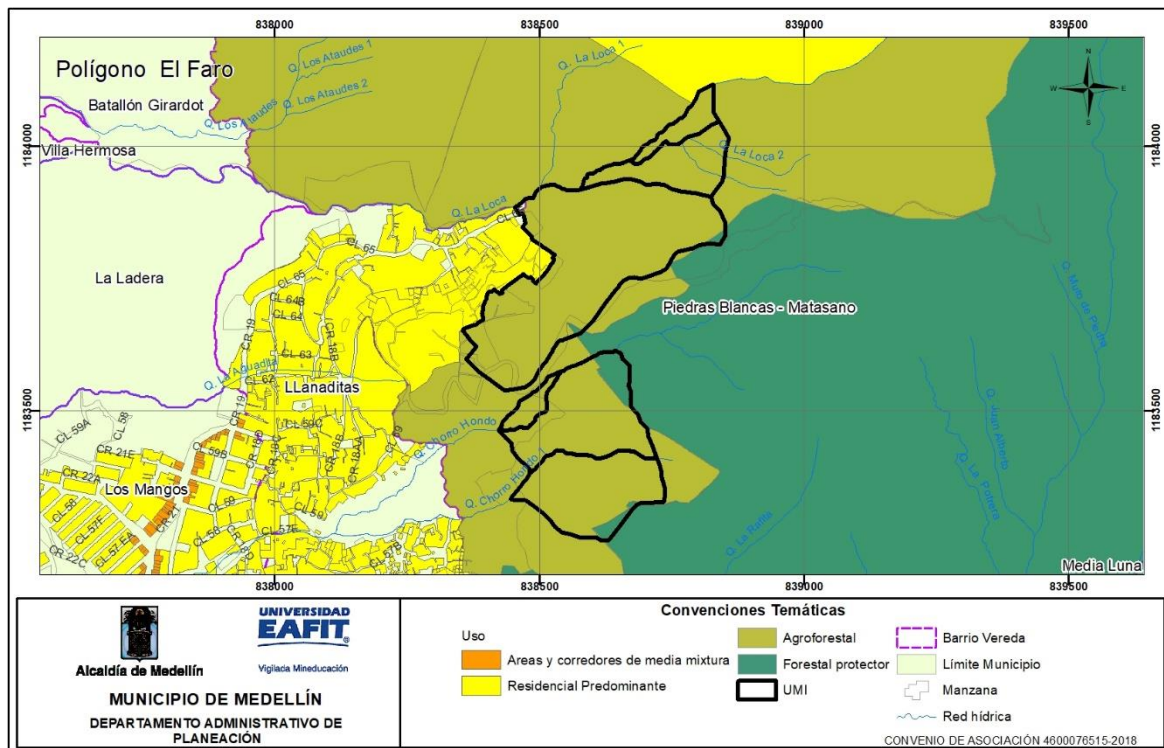


Figura 66. Mapa de usos del suelo para el polígono El Faro Tomado de Acuerdo 48 de 2014.

Se destaca que el uso agroforestal se ubica en áreas donde los árboles interactúan biológicamente con cultivos y animales; el propósito fundamental es diversificar y optimizar la producción respetando el principio de sostenibilidad, con estratos vegetativos, diversidad de especies y heterogeneidad en la estructura horizontal y vertical de las especies vegetales asociadas a los cultivos (Acuerdo 48 de 2014).

7. EVALUACION GEOTÉCNICA

En este capítulo se presentan los principales aspectos geotécnicos del polígono El Faro, los cuales fueron el resultado de las visitas de inspección y reconocimiento, de las exploraciones de campo, de los resultados de laboratorio y de los análisis geotécnicos en general.

7.1 EXPLORACION DE CAMPO

7.1.1 Exploración Directa

Basado en las características topográficas y las formaciones geológicas de la zona a estudiar, se planteó un programa de exploración, que permitió definir el modelo geológico y geotécnico del polígono y sus características estratigráficas como físico-mecánicas, insumo fundamental en los análisis de estabilidad y en la definición y diseño de las obras de estabilización que se puedan requerir.

El trabajo de exploración contempló la ejecución de once (11) perforaciones, para definir cinco (5) perfiles o secciones de análisis, cada uno con al menos dos sondeos.

El programa de exploración directa se realizó con taladros mecánicos, por el sistema de rotopercusión, que permitió explorar tanto suelos como rocas o mezclas de estos. Adicionalmente, se realizaron intentos iniciales en las perforaciones P-7 (2), P-8 (1), P-9 (2) y P-10 (2) a través del método de percusión que no alcanzó profundidades importantes, dando paso al equipo de rotación para cumplir las profundidades propuestas.

La localización de los sondeos estuvo igualmente gobernada por la disponibilidad de espacios aptos para tal fin, pues como se puede verificar las condiciones de altas pendientes y las dificultades para obtener los permisos en algunos predios.

Los sondeos definidos para el análisis fueron distribuidos de tal manera que se lograra la mayor cobertura del área a evaluar y adicionalmente se ubicaron para conformar pares de sondeos con el fin de establecer perfiles estratigráficos. Estos sondeos fueron denominados en este informe como P-1 hasta P-13 (excluyendo P-11 y P-12).

La localización geográfica de los sondeos se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 13. Coordenadas de los sondeos de exploración realizados.

Sondeo	Coordenada Norte	Coordenada Este
P-1	838648	1183814
P-2	838581	1183887
P-3	838517	1183689
P-4	838415	1183736
P-5	838364	1183639
P-6	838270	1183790
P-7	838646	1183467
P-8	838463	1183429
P-9	838648	1183348
P-10	838479	1183343
P-13	838527	1183585

En la siguiente figura se representa la ubicación de cada uno de los sondeos.

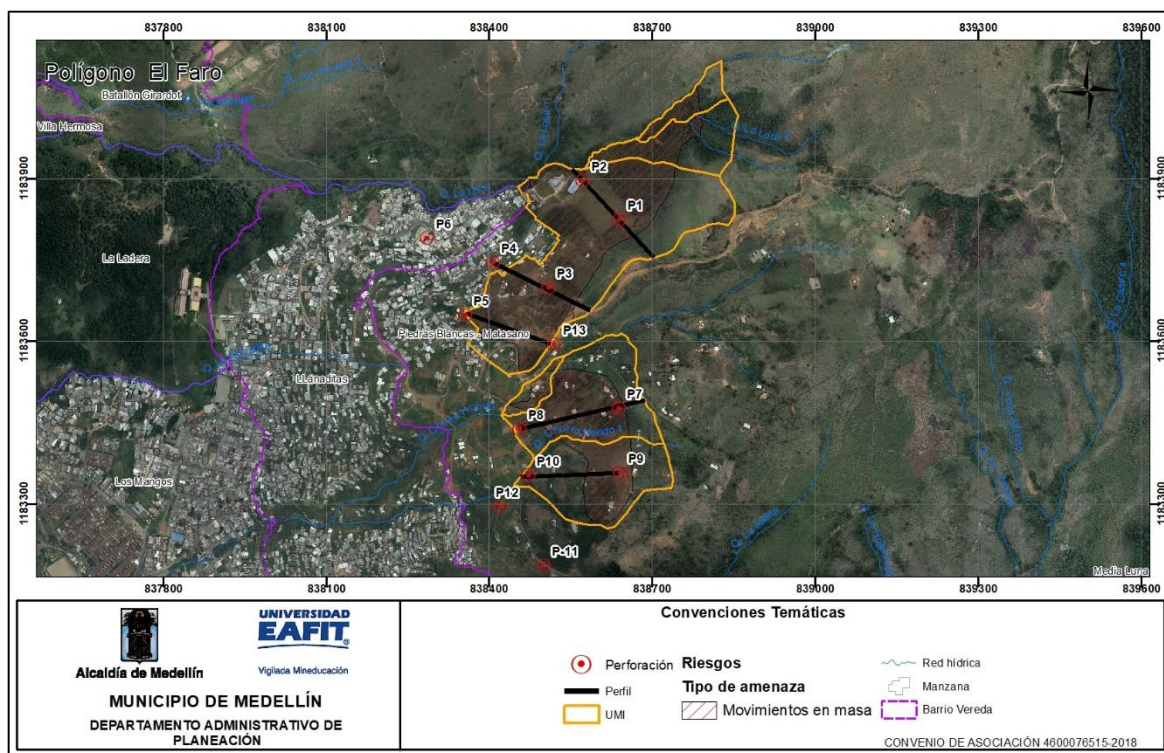


Figura 67. Localización sondeos exploratorios polígono El Faro

Las perforaciones que se ejecutaron en este proyecto, para el polígono El Faro alcanzaron profundidades entre 10.0 y 15.0 m, donde se recuperaron tanto

muestras alteradas como inalteradas. En la Tabla 14 se indica la profundidad alcanzada en cada uno de los sondeos. De cada sondeo ejecutado se levantó una columna estratigráfica que contiene la descripción de los materiales y sus propiedades, las cuales son presentadas en este documento en el Anexo No 2.

Tabla 14. Numero de sondeos exploratorios y longitud alcanzada.

Sondeo	Profundidad (m)
P-1	10.0
P-2	11.5
P-3	10.0
P-4	15.0
P-5	15.0
P-6	15.0
P-7	15.0
P-8	15.0
P-9	15.0
P-10	15.0
P-13	15.0

Durante la campaña exploración e investigación del subsuelo para cada uno de los sondeos ejecutados se llevó a cabo el ensayo de penetración estándar (SPT) a intervalos de 1.0 m, el cual permite conocer el número de golpes requerido al introducir un muestreador 45 cm, obteniendo un valor de N que corresponde a la suma de los golpes necesarios para penetrar los últimos 30 cm; este valor resulta útil en la determinación de la consistencia del material y la obtención de parámetros geomecánicos que caracterizan el subsuelo que conforma los diferentes estratos a partir del uso de correlaciones disponibles en la literatura.

Metro a metro para cada uno de los sondeos proyectados se toman muestras del material, el cual es visualmente caracterizado y almacenado en bolsas plásticas a fin de preservar sus características propias de estado límite, estas se conocen como muestras alteradas o remoldeadas por ser extraídas con un muestreador estándar, las muestras representativas son llevadas al laboratorio donde se les practican ensayos de clasificación para conocer el tipo de suelo y propiedades como humedad y límites de Atterberg. Adicionalmente, se toman muestras inalteradas, extraídas con tubo Shelby, las cuales por la forma en que fueron recuperadas permiten obtener a través de ensayos específicos, como corte directo y compresión confinada, parámetros de resistencia que posteriormente son comparados con los obtenidos a través de las correlaciones disponibles en la literatura especializada y

que se apoyan en los resultados obtenidos del ensayo en campo SPT. Las siguientes imágenes presentan los muestreadores utilizados.



Figura 68. Muestreador estándar para el ensayo SPT



Figura 69. Muestreador de pared delgada

7.1.2 Exploración Indirecta

Para el complemento y ajuste de la caracterización de los terrenos que conforman el polígono El Faro se auscultó el subsuelo mediante técnicas de exploración indirecta, en este caso líneas sísmicas que mediante la medición de la respuesta del suelo a impulsos u ondas generadas en superficie se pueden obtener los parámetros estratigráficos y geotécnicos del sector (Anexo 3).

Las técnicas de geofísica aplicada están orientadas a distinguir o reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la densidad, la velocidad de las ondas elásticas, la resistividad eléctrica, etc.

Para la toma de datos se utilizó el equipo de sísmica GEA24 el cual consta de 24 geófonos con una tarjeta de adquisición de 24 bits, dos cables con 12 conectores, cable de extensión trigger, un trigger o disparador, una placa de impactos de aluminio, una almádana y un interfaz USB para un computador externo.

Trabajo de campo

Para el polígono El Faro se realizaron 3 líneas; las cuales están localizadas así: La línea sísmica SIS_EFR_01 se realizó cerca del camino indígena por los tanques de EPM y las líneas sísmicas SIS_EFR_02 y SIS_EFR_03 se obtuvieron en el sendero CAI periférico Altos del Faro. Las coordenadas planas de la ubicación de los puntos de cada una de las líneas sísmicas están consignadas en la siguiente tabla:

Tabla 15. Configuración geométrica de la línea sísmica.

Línea	Inicio		Espaciamiento (m)	Longitud (m)	Orientación de la línea (°)	No° de Geófonos
	E	N				
SIS_EFR_01	880281	1877494	4.5	108	226	24
SIS_EFR_02	880179	1877302	2	48	070	24
SIS_EFR_03	880135	1877239	1.5	30	349	20

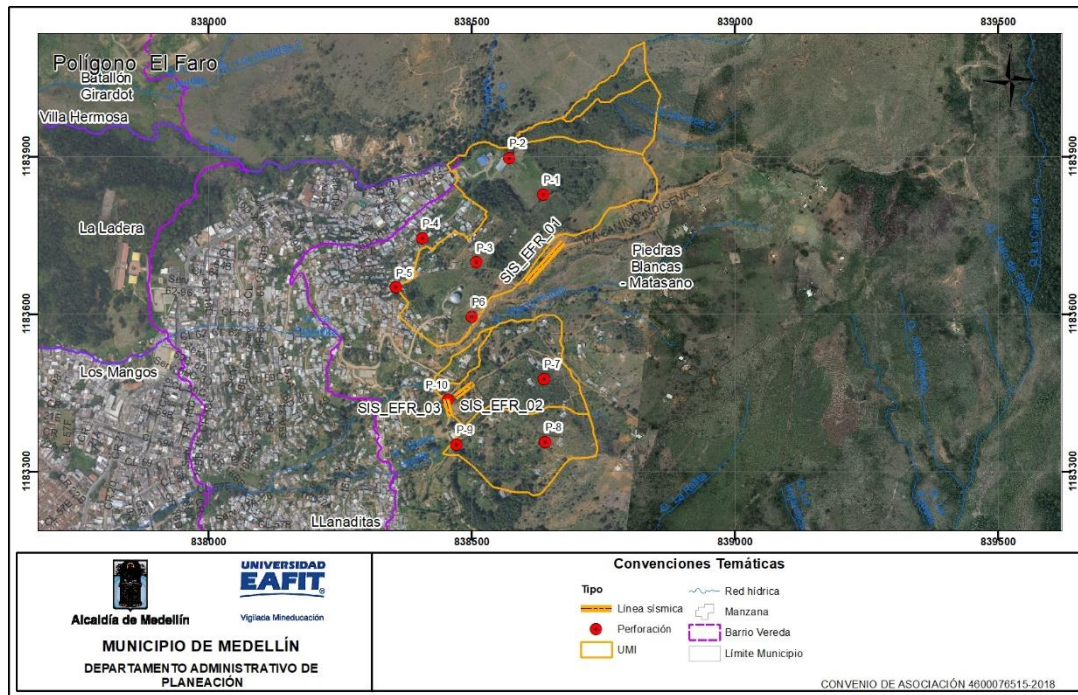


Figura 70. Localización Geográfica para las líneas sísmicas para el polígono de El Faro.

Resultados de la línea SIS_EFR_01

La línea SIS_EFR_01 presenta una longitud de 108 metros, con una orientación de 226° y separación de 4.5 metros, realizada en el camino indígena cercana a los

tanques de EPM (Figura 71), se obtuvieron 20 registros usando 2 repeticiones del impacto en las posiciones -4.5 m, 6.75 m, 20.25 m, 47.25 m, 60.75 m, 74.25 m, 87.75 m, 96.75 y 108 m.



Figura 71. Zona de ejecución línea SIS_EFR_01.

Las curvas dromocrónicas obtenidas empleando los resultados del ensayo son presentadas en la Figura 72, en ellas se observa la presencia de 2 estratos que presentan velocidades diferentes como atestiguan las pendientes de las líneas.

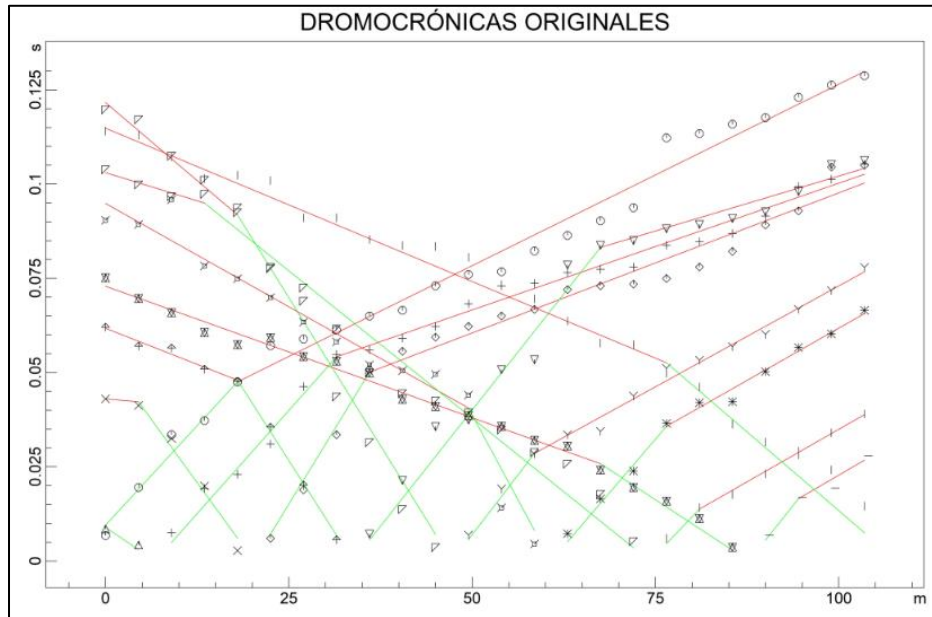


Figura 72. Curva dromocrónicas para la línea SIS_EFR_01.

La Figura 73 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea SIS_EFR_01. Los resultados permiten inferir dos estratos principales en la zona:

- Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas primarias (P) de 426 m/s, y con espesores variables entre 5 a 7 m.
- El segundo paquete presenta una velocidad de propagación de ondas primarias (P) de 1136 m/s, con espesores variables entre 1 a 3 m.

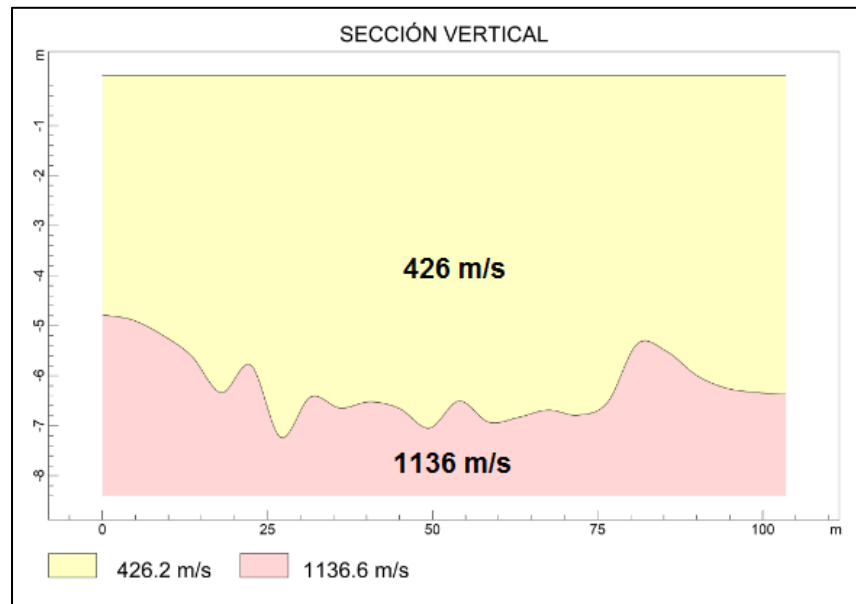


Figura 73. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_01.

Resultados de la línea SIS_EFR_02

La línea SIS_EFR_02 presenta una longitud de 48 metros, con una orientación de 070° y separación de 2 metros, realizada en el sedero que conduce al CAI periférico Altos del Faro (Figura 74), se obtuvieron 18 registros usando 2 repeticiones del impacto en las posiciones -2 m, 3 m, 20 m, 25 m, 31 m, 37 m, 41 m y 48 m.



Figura 74. Zona de ejecución línea SIS_EFR_02.

Las curvas dromocrónicas obtenidas empleando los resultados del ensayo son presentadas en la Figura 75, en ellas se observa la presencia de 3 estratos que presentan velocidades diferentes, reflejadas en las pendientes de las líneas.

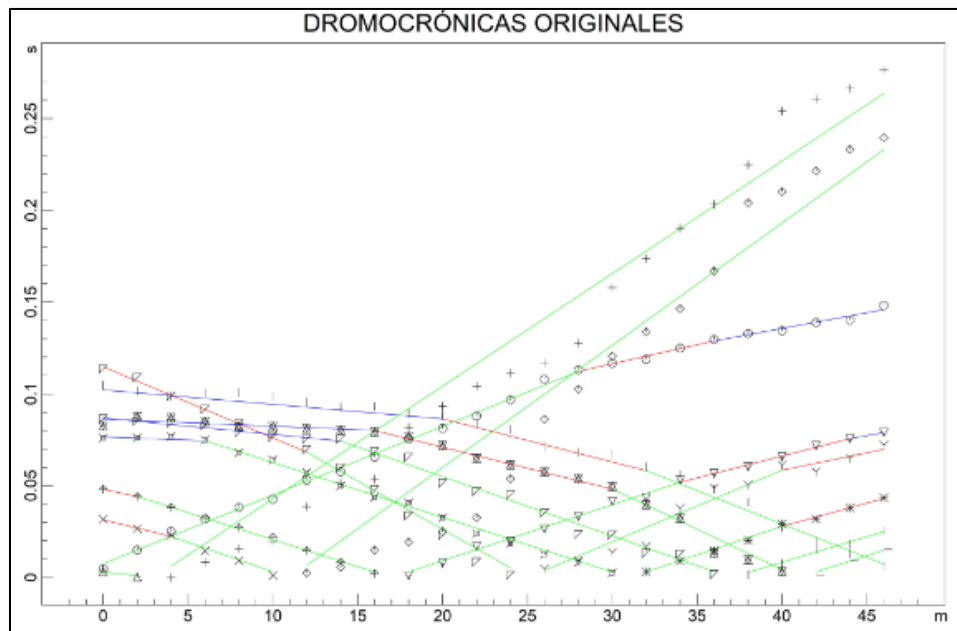


Figura 75. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_02.

La Figura 76 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea SIS_EFR_02. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona:

- Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas primarias (P) de 271 m/s, y con un espesor de variable entre 2.5 y 7.5 m.
- El segundo paquete presenta una velocidad de propagación de ondas primarias (P) de 363 m/s, con espesores variables, hacia el inicio de la línea no supera los 2 m, mientras que al final de la misma es de aproximadamente 15 m.
- La capa más profunda identificada corresponde a un material con 812 m/s bajo el cual no se presenta refracción y, por tanto, no se conoce su espesor.

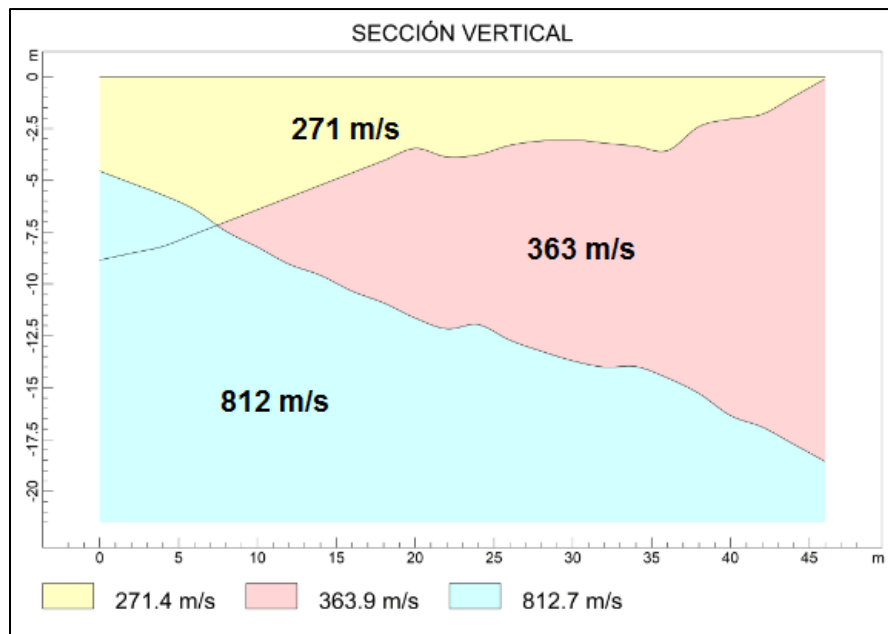


Figura 76. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_02.

Resultados de la línea SIS_EFR_03

La línea SIS_EFR_03 presenta una longitud de 30 metros, con una orientación de 349° y separación de 1.5 metros, realizada en CAI periférico Altos del Faro (Figura 77), se obtuvieron 16 registros usando 2 repeticiones del impacto en las posiciones -1.5 m, 2.25 m, 6.75 m, 11.25 m, 17.25 m, 21.75 m, 26.25 m y 30 m.



Figura 77. Zona de ejecución línea SIS_EFR_03.

Las curvas dromocrónicas obtenidas empleando los resultados del ensayo son presentadas en la Figura 78, en ellas se observa la presencia de 3 estratos que presentan velocidades diferentes, atestiguan las pendientes de las líneas.

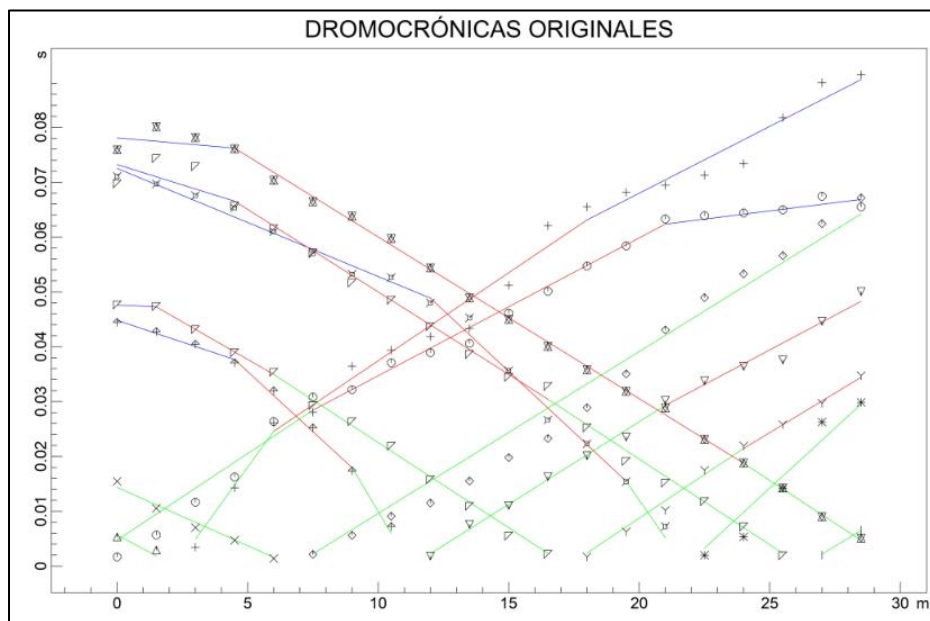


Figura 78. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_03.

La Figura 79 presenta la distribución de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales en la línea SIS_EFR_03. Los resultados permiten inferir tres estratos principales en la zona:

- Una capa superficial con velocidad promedio de propagación de ondas primarias (P) de 254 m/s, y con espesores variables entre 0 a 3 m.
- El segundo paquete presenta una velocidad de propagación de ondas primarias (P) de 388 m/s, con espesores variables entre 3 a 6 m.
- La tercera capa presenta una velocidad de propagación de ondas primarias (P) de 540 m/s, con un espesor máximo de 3 m.

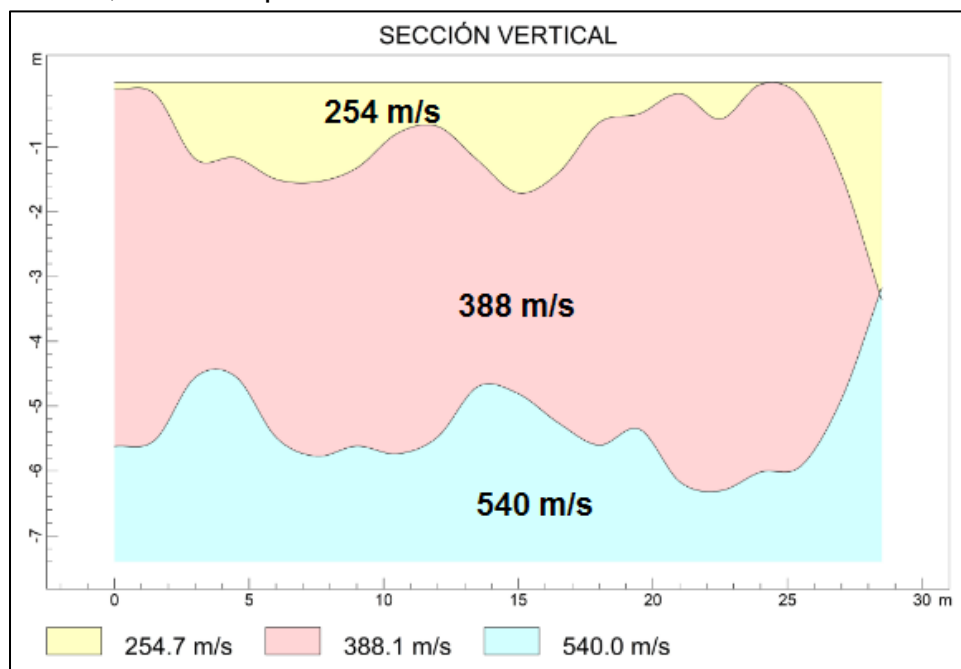


Figura 79. Modelo de capas del ensayo de refracción sísmica línea SIS_EFR_03.

7.2 RESULTADOS Y ANALISIS DE LABORATORIO

Finalizado el trabajo de los sondeos o exploración directa, las muestras obtenidas en estos son llevadas al laboratorio de suelos, donde el equipo técnico conformado por geólogos y geotecnistas inspeccionaron los materiales y definieron para cada sondeo, una columna estratigráfica del material que compone el terreno, para posteriormente integrar la información de la totalidad de sondeos y establecer el modelo geológico de la zona, verificando y ajustando las descripciones dadas por el operario técnico que ejecuta el trabajo de exploración.

Una vez se tiene el perfil estratigráfico del subsuelo, se seleccionaron las muestras representativas de cada estrato las cuales son enviadas al laboratorio de suelos en donde se practican diferentes ensayos de caracterización. Para las muestras remoldeadas tomadas con el muestreador estándar se llevan a cabo ensayos como humedad natural, límites de Atterberg que dan como resultado los límites de consistencia e índice de plasticidad y el ensayo de granulometría que permite la clasificación del material por el método U.S.C.S o ASHTHO. Sobre las muestras inalteradas tomadas en tubos shelby se llevan a cabo ensayos como corte directo o compresión confinada que permiten la obtención de las propiedades de resistencia de los suelos.

La Tabla 16 contiene la cantidad de muestras analizadas por cada tipo de ensayo:

Tabla 16. Tipos de ensayos y cantidad de muestras analizadas.

Tipo de ensayo	Cantidad
Limite Liquido	25
Limite Plástico	25
Humedad Natural	34
Granulometría por lavado sobre tamiz N° 200	25
Corte directo CD	9

En la tabla siguiente se presenta un resumen de los resultados de los ensayos realizados a las muestras recuperadas.

Tabla 17. Resultados de laboratorio Polígono El Faro.

RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO										
Ensayos Sondeo-Muestra	Prof muestra (m)	Humedad Natural (%)	Límite liquido (%)	Limite plástico (%)	Índice plástico (%)	Pasa malla 200 (%)	Cohesión KPa	Ang Fricción (°)	Peso unitario (kN/m3)	Clasificación USCS
P1-M2	1.45	38.1	37.2	20.8	16.3	24.6				GC
P1-M3	2.45	17.83	31.3	18.7	12.6	19.2				GC
P1-M4	3.0	50.4					27.0	14.1	16.0	
P1-M4	3.45	39.07	61.1	32.7	28.4	81.9				MH
P2-M3	2.0	39.1					0.0	44.1	17.9	
P2-M3	3.0	38.0	47.3	27.6	19.7	56.6				ML
P2-M4	3.45	17.7	33.3	17.7	15.7	61.8				CL
P2-M6	6.0	23.89	--	--	NP	8.8				GP-GM

RESULTADOS ENSAYOS DE LABORATORIO										
Ensayos Sondeo- Muestra	Prof muestra (m)	Humedad Natural (%)	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice plástico (%)	Pasa malla 200 (%)	Cohesión KPa	Ang Fricción (°)	Peso unitario (kN/m3)	Clasifica ción USCS
P4-M2	2.45	35.13	23.6	17.7	5.9	11.2				GP-GC
P4-M3	3.45	29.46	37.3	22.3	14.9	19.0				GC
P4-M4 (INT 2)	3.0	34.8					8.5	24.5	16.6	
P4-M8	7.9	15.88	29.5	18.7	10.8	29.5				GC
P5-M1	3.0	44.0					15.0	25.5	17.5	
P5-M1	1.45	43.24	65.9	33.1	32.8	82.2				MH
P5-M2	2.45	51.57	55.0	32.5	22.5	87.0				MH
P5-M4	4.45	11.74	34.8	19.6	15.2	40.1				SC
P5-M7	6.95	37.12	45.5	29.6	16.0	52.8				ML
P5-M10	9.95	42.96	42.3	27.2	15.0	34.2				GM
P7-M4 (INT 2)	3.0	45.6					12.0	42.0	17.7	
P7-M4 (INT 2)	3.45	48.26	45.1	27.7	17.4	57.3				ML
P8-M4 (INT 1)	4.45	41.64	48.7	24.8	23.9	39.4				GC
P8-M4 (INT 1)	3.0	17.0					2.2	40.1	21.1	
P9-M4	3.45	50.71	79.7	42.5	37.2	76.7				MH
P9-M4 (INT 1)	3.0	48.4					10.4	44.3	18.0	
P9-M4 (INT2)	3.0	61.4					0.0	27.8	15.7	
P9-M4 (INT 2)	3.45	60.81	69.0	41.7	27.3	92.1				MH
P10-M4 (INT 2)	3.45	34.03	66.9	34.4	32.5	82.6				MH
P10-M7 (INT 2)	6.0	56.1					5.7	26.9	15.8	
P10-M7 (INT 2)	6.45	56.61	75.9	43.5	32.4	74.4				MH

7.3 ANALISIS GEOTECNICO

Con base en la caracterización geológica y los resultados del programa de exploración, así como los resultados de los diferentes ensayos practicados a las muestras seleccionadas, se realizó el análisis geotécnico que, basado en la definición y caracterización del modelo geológico y geotécnico, permitió realizar los análisis de estabilidad de las zonas evaluadas.

7.3.1 Estratigrafía y definición de parámetros geomecánicos

Concluidas la etapa de exploración del subsuelo, la revisión y agrupación de muestras y los ensayos de laboratorio, se ajustan y complementan perfiles representativos de la conformación del terreno por medio de la definición de columnas estratigráficas en cada sondeo y su posterior correlación de acuerdo con las observaciones en campo y el criterio de los profesionales involucrados.

Estratigrafía

Para el sector del polígono El Faro se detectaron materiales antrópicos en superficie dispuestos sin ninguna especificación técnica. Estos materiales reposan sobre suelos residuales de la dunita, encontrándose los horizontes IB, IC, IIA e incluso IIB del perfil de meteorización de Deere y Patton. A continuación, se hace una descripción de los estratos identificados y sus variaciones significativas.

- **Llenos antrópicos:** El material de origen antrópico fue detectado de forma superficial en los sondeos P-2 y P-13 con espesores entre 1.0 y 2.5 m. Este material conforma principalmente los terrenos de vías (P-13) y zonas aledañas a las viviendas donde se han depositado materiales de origen heterogéneo. Están compuestos por arcillas limosas a limos arenosos de color café oscuro. Contiene restos de material orgánico, raíces, basuras, escombros y fragmentos de rocas. Las propiedades físicas de estos materiales se detallan a continuación:

Clasificación USC: MH, CL.

Humedad natural: 9.1% - 43.1%

Límite líquido: 26.5% - 71.9%

Índice plástico: 8.0% - 46.4%

Pasa malla 200: 28.8% - 83.5%

- **Depósito de vertiente:** Este material fue detectado en los sondeos P-2, P-6 y subyaciendo el lleno antrópico en el sondeo P-1; sus espesores son variables, desde 3-4 m (P-2 y P-1 respectivamente) hasta del orden ≈ 8 m encontrado en P-6, donde además se reconoce una serie de al menos dos eventos de acumulación. Los materiales están conformados por una matriz limo arcillosa de color café a café amarillento, húmeda, con bloques de dunita angulares moderadamente meteorizados en relación variable 20%-30% bloques 80%-70% matriz (flujos de lodos y escombros). El segundo evento identificado en P-6 muestra un aspecto limo-arenoso de color gris-verdoso oscuro en la matriz que embebe bloques subangulares de dunita con moderado grado de meteorización en relación aproximada 60% bloques 40% matriz (flujo de escombros).

Estos materiales presentan las siguientes propiedades:

Clasificación USC: MH, ML, CL, GC.

Humedad natural: Varía entre 17.7 y 39.1%

Límite líquido: Varía entre 31.3% y 61.1%

Índice plástico: Varía entre 12.6% y 28.4%

Pasa malla 200: Varía entre 19.2% y 81.9%

- **Suelo residual de dunita IB:** Correspondiente al nivel superior del perfil de meteorización; se observó en los sondeos P-3, P-5, P-7, P-8, P-9, P-10 Y P-13 con espesor promedio ≈ 2 m. Corresponde a un Limo arcilloso de color café amarillento a café rojizo, completamente meteorizado, plástico y húmedo, en algunas ocasiones mezclado con fragmentos de roca meteorizados a levemente meteorizados. Se identifican zonas de oxidación. Las siguientes son las propiedades físicas principales:

Clasificación USC: MH, ML.

Humedad natural: Varía entre 43.2% y 51.6%

Límite líquido: Varía entre 45.1% y 65.9%

Índice plástico: Varía entre 17.4% y 32.8%

Pasa malla 200: Varía entre 57.3% y 87.0%

- **Saprolito de dunita (Horizonte IC):** Estos materiales se detectaron en los sondeos P-5, P-7, P-8, P-9, P-10 Y P-13.

Corresponden a un suelo limo arenoso de color pardo amarillento con zonas grises verdosas, en ocasiones mezclado con fragmentos de roca parcialmente meteorizada. El material conserva parte de la textura de la roca original donde se conserva parte de la serpentinita a través de planos bien definidos. Igualmente se observan zonas de oxidación a través de planos heredados de la roca original.

Las siguientes son las propiedades físicas principales:

Clasificación USC: MH, ML, GM, GC, SC.

Humedad natural: Varía entre 11.7% y 60.8%

Límite líquido: Varía entre 34.8 y 79.7%

Índice plástico: Varía entre 15.0% y 37.2%

Pasa malla 200: Varía entre 34.2% y 92.1%

- **Dunita alterada (Horizonte IIA):** Identificado hasta la profundidad explorada en todos los sondeos con excepción de los sondeos P-4 y P-6. Se compone de bloques y fragmentos de dunita frecuentemente fracturados y meteorizados de coloración gris verdoso, con presencia de serpentización, presenta de forma ocasional una escasa matriz limo arcillosa en tonalidades café amarillento a café rojizo.

Para la caracterización geotécnica de este material rocoso se utilizó información extractada de la recuperación de las muestras obtenidas en los sondeos y de algunos afloramientos observados en campo. Teniendo en cuenta la caracterización de la roca se utilizó la metodología GSI para determinar los parámetros que gobiernan la resistencia de la roca.

- **Dunita alterada (Horizonte IIB):** Identificado en la P-4 como continuación en profundidad del desarrollo del perfil de meteorización en la roca. Se compone de bloques y fragmentos de dunita, fracturados y meteorizados en las discontinuidades, presentando una coloración gris oscura a gris verdosa

en los sectores con mayor ocurrencia de serpentización.

Para la caracterización geotécnica de este material rocoso se utilizó información extractada de la recuperación de las muestras obtenidas en los sondeos y de algunos afloramientos observados en campo. Teniendo en cuenta la caracterización de la roca se utilizó la metodología GSI para determinar los parámetros que gobiernan la resistencia de la roca.

Definición de parámetros geomecánicos

Los parámetros geomecánicos se obtuvieron a partir de la información recopilada de los sondeos exploratorios y de los análisis de los resultados de los diferentes ensayos practicados a las muestras extraídas en cada uno de ellos, teniendo en cuenta también el comportamiento del suelo a partir del ensayo SPT realizado en campo y los valores de referencias bibliográficas de reconocidos autores. Al analizar esta información en conjunto es posible conocer las propiedades del suelo de manera aproximada.

En la literatura especializada existen diversas correlaciones entre el valor de N, obtenido del ensayo SPT, y los parámetros de cohesión y ángulo de fricción. Los valores obtenidos a través de las correlaciones son analizados por el personal técnico de acuerdo con su experiencia y conocimientos sobre la zona de objeto de estudio.

Las correlaciones disponibles para la obtención de parámetros como cohesión y ángulo de fricción que se encuentran en la literatura requieren el análisis del valor de N obtenido en el ensayo SPT y corregirlo posteriormente, para lo cual se utiliza la ecuación propuesta por Bowles, la cual permite obtener un valor de N corregido que posteriormente permite una mejor aproximación a los valores de resistencia. Dicha ecuación tiene en cuenta correcciones por confinamiento, energía del martillo, longitud de las barras de perforación, por el tomamuestras y finalmente por el diámetro de la perforación.

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

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

Donde:

N: N de Campo

C_n: Corrección por confinamiento.

η₁: Corrección por energía del martillo.

η₂: Corrección por longitud de barras de perforación

η₃: Corrección por tomamuestras.

η₄: Corrección por diámetro de la perforación

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

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

Tabla 18. Correlaciones utilizadas para la definición de parámetros geomecánicos.

CORRELACIONES USADAS PARA DETERMINAR PARÁMETROS DE RESISTENCIA A PARTIR DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)	
Kulhaw y Mayne (1990)	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \left(\frac{\sigma_0}{Pa} \right)} \right)^{0.34}$
Wolff (1989)	$\phi = 27.1 + 0.3 \cdot N_{corr} - 0.00054 N_{corr}^2$
Hatanaka y Uchida (1996)	$\phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 20} \quad \phi = \sqrt{20 \cdot N_{corr} + 17}$
Parra y Ramos (2006)	$\phi = 5.35 \ln(N) + 14.44$ $Cu = 0.22 \cdot \ln(N) - 0.4$
Müller (1970)	$\phi = 24 + 5.77 \ln(0.1667 N_{SPT})$
Peck	$\phi = 28.5 + 0.25 N_{145}$
Peck, Hanson y Thornburn	$\phi = 26.25 * \left(2 - e^{\left(-\frac{N_{145}}{62} \right)} \right)$
Kishida	$\phi = 15 + \sqrt{(20 * N_{145})}$
Schmertmann	$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{N_{60}}{43.3} \right)^{0.34}$
Japan National Railway	$\phi = 27 + 0.1875 * N_{145}$
Japan Road Bureau	$\phi = 15 + (9.375 * N_{145})^{0.5}$
Stroud (1974)	$C_u = K \cdot N [kN/m^2] \quad K \begin{cases} 3.5 \text{ kN/m}^2 \\ 6.5 \text{ kN/m}^2 \end{cases}$
Hara y otros (1971)	$C_u = 29 \cdot N^{0.72} [kN/m^2]$
Mesri (1989)	$Cu = 0.22 * \sigma_0$

Para cada uno de los sondeos ejecutados se corrigió el valor de N de campo a partir de la ecuación propuesta por Bowles y hallando los parámetros de cohesión y fricción según los golpes del ensayo SPT, delimitando dentro de cada sondeo los estratos litológicos que se identificaron en el mismo. Posteriormente se hizo un análisis para cada estrato, agrupando los parámetros de cohesión y fricción obtenidos de cada sondeo para el estrato correspondiente, los resultados se presentan en el anexo 3.

Con la información anterior se procedió a la definición de los parámetros para cada estrato, ajustándose además con los resultados de la modelación de la problemática que se presenta en campo y que se evidenció durante los recorridos del equipo técnico. Se utilizaron todas las correlaciones presentadas en la tabla anterior, de las cuales se descartaron aquellas que arrojaron magnitudes que a criterio del geotecnista y apoyado en valores de la literatura especializada, se encuentran fuera de los intervalos considerados “representativos” para cada tipo de suelo. El procedimiento para obtener los valores finales de cohesión y fricción consiste en la obtención de un valor promedio, mínimo y máximo de dichos valores para cada una de las correlaciones utilizadas, descartando aquellas consideradas no representativas. Posteriormente, a criterio del geotecnista se selecciona ya sean los

valores mínimos, máximos o promedios que se constituirán como la muestra estadística final para obtener la media, la desviación estándar, el mínimo y el máximo de los parámetros geomecánicos.

De igual manera, es preciso aclarar que en el proceso de selección de los parámetros geomecánicos, se realizó adicionalmente un proceso de ajuste de estos, mediante los análisis de estabilidad en la condición actual, que permitieron calibrar el modelo para que los resultados reflejaran las condiciones observadas en campo. Para este aspecto se consideraron criterios propuestos por los autores Rodrigo Arellano, Javier Bielefeldt y Dennys Correa en su documento “Análisis de taludes mediante ensayos y back análisis de fallas” donde mencionan que para taludes que no han fallado “Si el talud exhibe grietas de tracción incipientes en su coronación se puede utilizar un $1.1 < FS < 1.15$ para el análisis retrospectivo. Si no se encuentran grietas el factor de seguridad debería ser mayor a 1.3.

A continuación, se detallan los parámetros de resistencia de los diferentes estratos que conforman el perfil geológico-geotécnico:

LLENO ANTRÓPICO

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 24° y 34° (ignorando los valores máximos obtenidos con Kulhawy) y entre 4.6 kPa y 42 kPa para la cohesión.

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores mínimos obtenidos con cada correlación, descartando las propuestas de Kulhawy y Peck; para el caso de la cohesión se tomó el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación, descartando la propuesta de Stroud. Los valores seleccionados se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 19. Parámetros geomecánicos del lleno antrópico

	Fricción ($^\circ$)	Cohesión (kPa)
Media	28	9.7
Desviación	2	2.6
Mínimo	24	6.0
Máximo	30	12.0

DEPOSITO DE VERTIENTE

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 26° y 39° (ignorando los valores máximos obtenidos con Kulhawy, Hatanaka y Schmertmann) y para la cohesión entre 0.8 kPa y 46.1 kPa (ignorando los valores máximos obtenidos con Stroud).

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 20. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del Depósito de vertiente.

Muestra	Material	Ensayo	Fricción ($^\circ$)	Cohesión (kPa)
P1-M4	Dep Ver	Corte CD	14.1	27.0
P2-M3	Dep Ver	Corte CD	44.1	0.0

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores mínimos obtenidos con cada correlación, descartando la propuesta de Kulhawy, Peck, Hatanaka y Schmertmann y para el caso de la cohesión se tomó el promedio de los valores promedio descartando las propuestas de Stroud y Parra. En los análisis estadísticos solo se incluyó el valor de cohesión de 27.0 kPa obtenido del resultado de laboratorio.

Tabla 21. Parámetros geomecánicos del estrato Depósito de vertiente.

	Fricción ($^\circ$)	Cohesión (kPa)
Media	28	19.3
Desviación	1	7.6
Mínimo	26	9.0
Máximo	30	27.0

HORIZONTE IB SUELO RESIDUAL DE DUNITA

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 23° y 34° (ignorando los valores máximos obtenidos con Kulhawy) y para la cohesión entre 2.8 kPa y 18.6 kPa (ignorando los valores máximos obtenidos con Stroud).

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 22. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del horizonte IB de Dunita.

Muestra	Material	Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
P5-M1	SRIB	Corte CD	22.5	15
P7INT2-M4	SRIB	Corte CD	42	12
P9INT1-M4	SRIB	Corte CD	44.3	10.4

Se tomó como parámetro de ángulo de fricción el promedio de los valores mínimos obtenidos (descartando la propuesta de Kulhawy) y para la cohesión el promedio de los valores promedio obtenidos con cada correlación (descartando la propuesta de Stroud). Adicionalmente, se incluyó en el análisis estadístico el resultado del ensayo de laboratorio, a excepción de los ángulos de fricción de 42° y 44°. En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 23. Parámetros geomecánicos del horizonte IB de Dunita

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	26	11.1
Desviación	3	2.8
Mínimo	23	6.0
Máximo	30	15.0

HORIZONTE IC DE DUNITA

Los valores encontrados con las correlaciones varían para el ángulo de fricción entre 22° y 39° (ignorando los valores máximos obtenidos con Kulhawy, Hatanaka y Schmertmann) y para la cohesión entre 2.8 kPa y 46.1 kPa (ignorando los valores máximos obtenidos con Stroud y Otros).

Los resultados de ensayos de caracterización geomecánica realizados sobre muestras de este material arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 24. Parámetros geomecánicos ensayos de laboratorio del horizonte IB de Dunita.

Muestra	Material	Ensayo	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
P8INT1-M4	SRIC	Corte CD	40.1	2.2
P9INT2-M4	SRIC	Corte CD	27.8	0
P10INT2-M7	SRIC	Corte CD	26.9	5.7

Para el ángulo de fricción se seleccionó como parámetro geomecánico, el promedio de los valores mínimos obtenidos con cada correlación y para la cohesión se seleccionaron los valores promedios de los valores promedio descartando las propuestas de Stroud y Otros. En los análisis estadísticos solo se incluyeron los resultados del ensayo de laboratorio correspondientes a ángulos de fricción de 27.8° y 26.9°. Finalmente, los parámetros seleccionados fueron:

Tabla 25. Parámetros geomecánicos del horizonte IC de Dunita

	Fricción (°)	Cohesión (kPa)
Media	27	28.5
Desviación	3	4.5
Mínimo	22	24.0
Máximo	31	33.0

DUNITA FRACTURADA Y METEORIZADA




Para la definición de los parámetros geomecánicos del material clasificado como roca fracturada y meteorizada se utilizó la metodología generalizada de Hoek and Brown fundamentada en el GSI.

Para lo anterior, se evaluaron y analizaron algunos afloramientos en el polígono de estudio, además de la revisión detallada de los materiales recuperados en los sondeos. Con base en dicha información se seleccionaban los valores de GSI, constante m_i de la roca intacta, factor de disturbancia y la resistencia a la compresión uniaxial de la roca intacta requeridos por el software Slide. Se utilizaron los valores recomendados en las tablas de dicho software.

Para la caracterización del horizonte IIA y IIB se utilizaron las muestras obtenidas en los diferentes sondeos en donde se determinó el porcentaje de bloques vs matriz y se evaluaron las propiedades físicas relevantes de dichos materiales, definiendo

con lo anterior el tipo de análisis a realizar: para el caso de predominio de matriz se utilizó la teoría de Mohr-Coulomb (utilizada para suelos) y para el caso de materiales con predominio de roca, se utilizó la teoría de Hoek and Brown, fundamentada en el factor GSI. La evaluación de las características de las rocas permitió adicionalmente diferenciar los horizontes IIA y IIB.

Para el caso de la roca tipo dunita (nivel IIA y IIB) se utilizaron los siguientes parámetros:

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	UCS (kN/m ²)	m	s	a
Dunita IIA		24	Generalised Hoek-Brown			35000	1.43582	0.000137913	0.543721
Dunita IIB		25	Generalised Hoek-Brown			175000	2.93298	0.00127263	0.511368
Sin sondear2		25	Generalised Hoek-Brown			175000	2.93298	0.00127263	0.511368

Dado que los sondeos exploratorios en la mayoría de los casos alcanzaron profundidades no superiores a 17 metros, en la configuración del modelo geológico-geotécnico para los análisis se consideró como hipótesis conservadora, que a partir del final del sondeo hacia profundidad el material era similar al último reportado en la perforación. Teniendo en cuenta que en todos los perfiles se detectaron materiales residuales, esta suposición tiene validez.

Para los análisis estadísticos de los parámetros y propiedades, se asumirá una función de distribución de probabilidad normal para cada uno de los parámetros involucrados (cohesión y ángulo de fricción interna). Se considera que una función normal, es una de las que mejor se ajusta a la distribución de variables o propiedades en la naturaleza. Las variables determinadas por una compleja combinación de múltiples factores tienden a comportarse, ‘normalmente’, es decir, tienden a estar bien representadas por una ‘distribución normal’ o ‘curva de campana’.

Nivel Freático: Encontrado en los sondeos P-2 (2.5 m), P-7 (3.5 m), P-9 (7-0 m) y P-10 (2.8 m) en el tiempo y las condiciones al momento de la exploración; sin embargo, esta condición puede variar dependiendo de las condiciones climáticas imperantes.

7.3.2 Definición de modelos geológico-geotécnicos

Una vez terminado el programa de exploración y obtenidos los resultados de laboratorio, se plasmó en los perfiles topográficos, la información geológica y

geotécnica, construyendo de esta manera el modelo de análisis, que involucra la estratigrafía, las características físicas y mecánicas de los estratos, la presencia de nivel freático entre otros.

Como se mencionó anteriormente, para el polígono El Faro se levantaron cinco (5) perfiles topográficos, con los cuales se hicieron los respectivos análisis geotécnicos. En la siguiente figura se muestra la ubicación de los sondeos y los perfiles correspondientes.

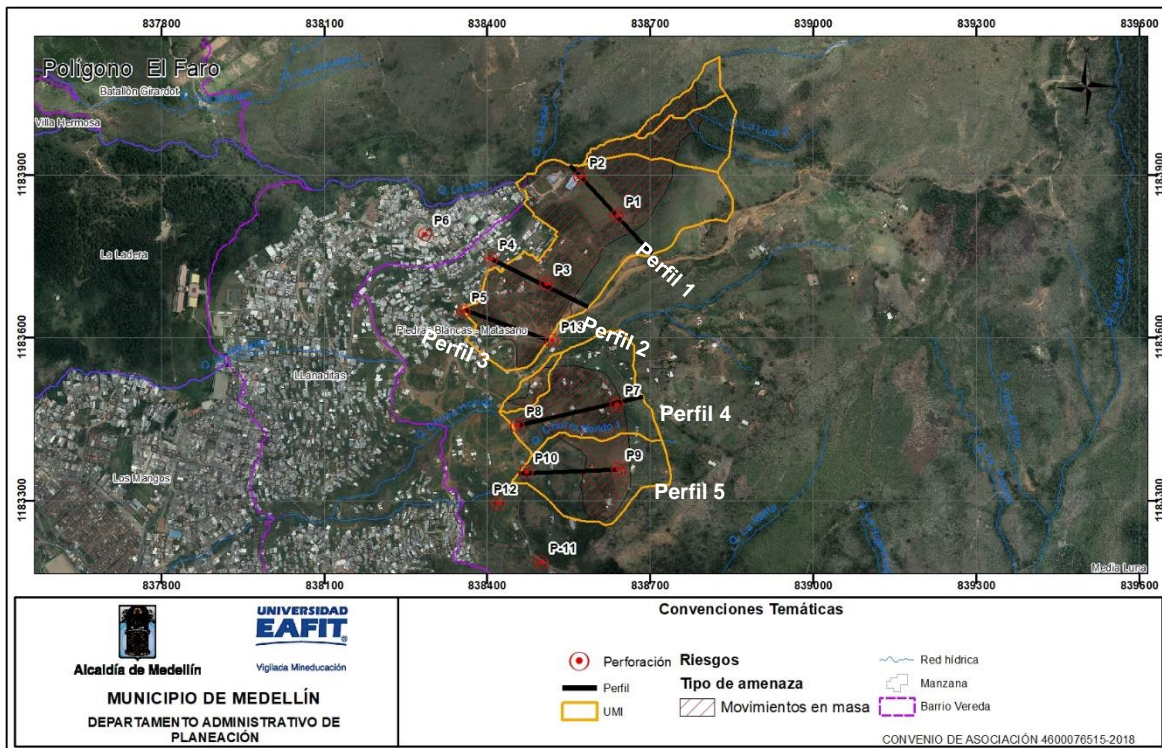


Figura 80. Localización perfiles y sondeos Polígono El Faro

Perfil 1. Ubicado en el extremo norte del polígono de estudio. Se orienta en dirección N43W. Tiene una longitud aproximada de 220 m y un desnivel de 135 metros aproximadamente y está definido estratigráficamente por los sondeos P1 y P-2.

Estratigráficamente se conforma por el perfil de meteorización de la dunita con predominio del horizonte IIA, suprayacida por materiales como depósitos de vertiente y llenos antrópicos.

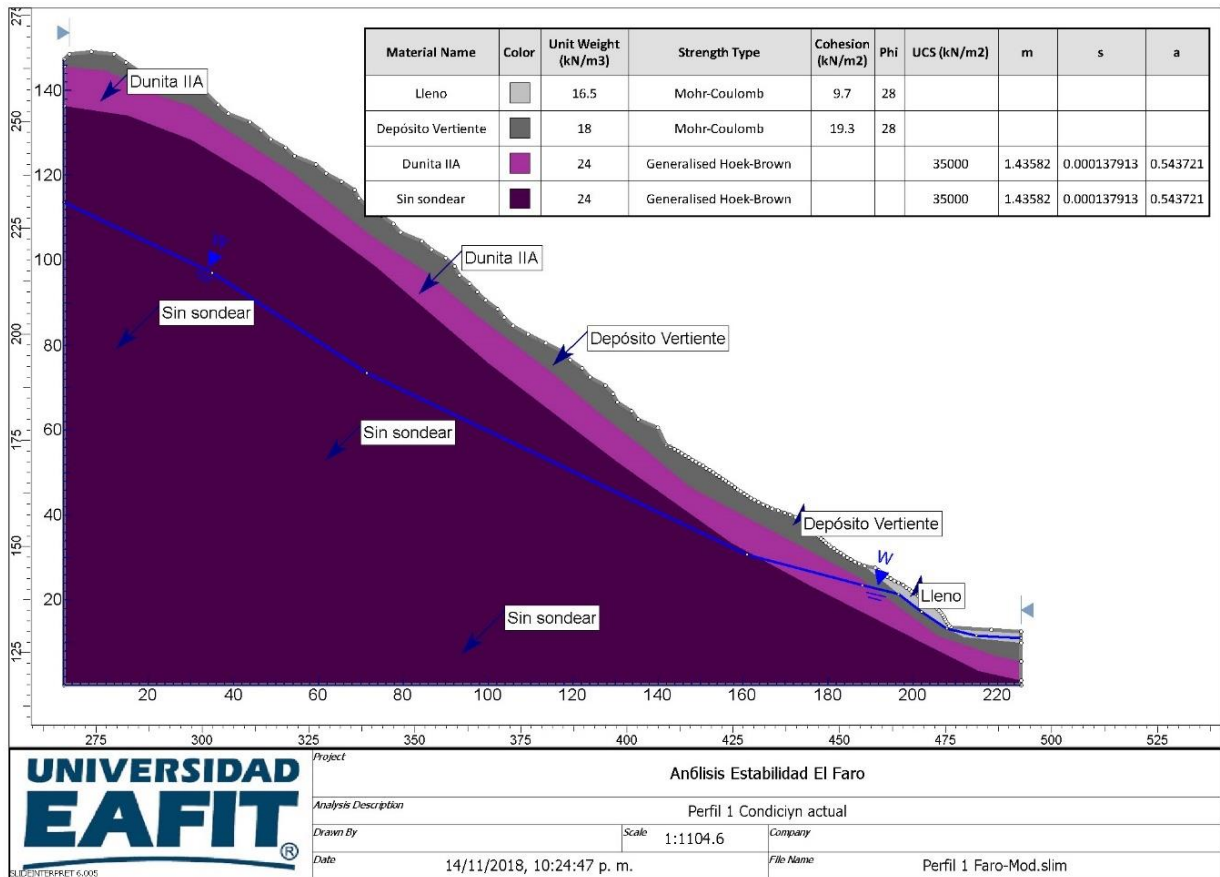


Figura 81. Modelo geológico- geotécnico perfil 1 El Faro

Perfil 2. El perfil No 2 se ubica en la zona centro norte del polígono. Tiene una longitud aproximada de 200 metros y un desnivel de 94 metros; se orienta en dirección N64W. Está definido por los sondeos P-3 y P-4.

Estratigráficamente se localizan los suelos producto del perfil de meteorización de la dunita, teniendo los horizontes IB y IC suprayaciendo la roca meteorizada y fracturada relacionada a los horizontes IIA y IIB. En el sector inferior del perfil se limita la distribución de los horizontes IB y IC (este último restringido a la zona superior) según lo encontrado en los sondeos de exploración.

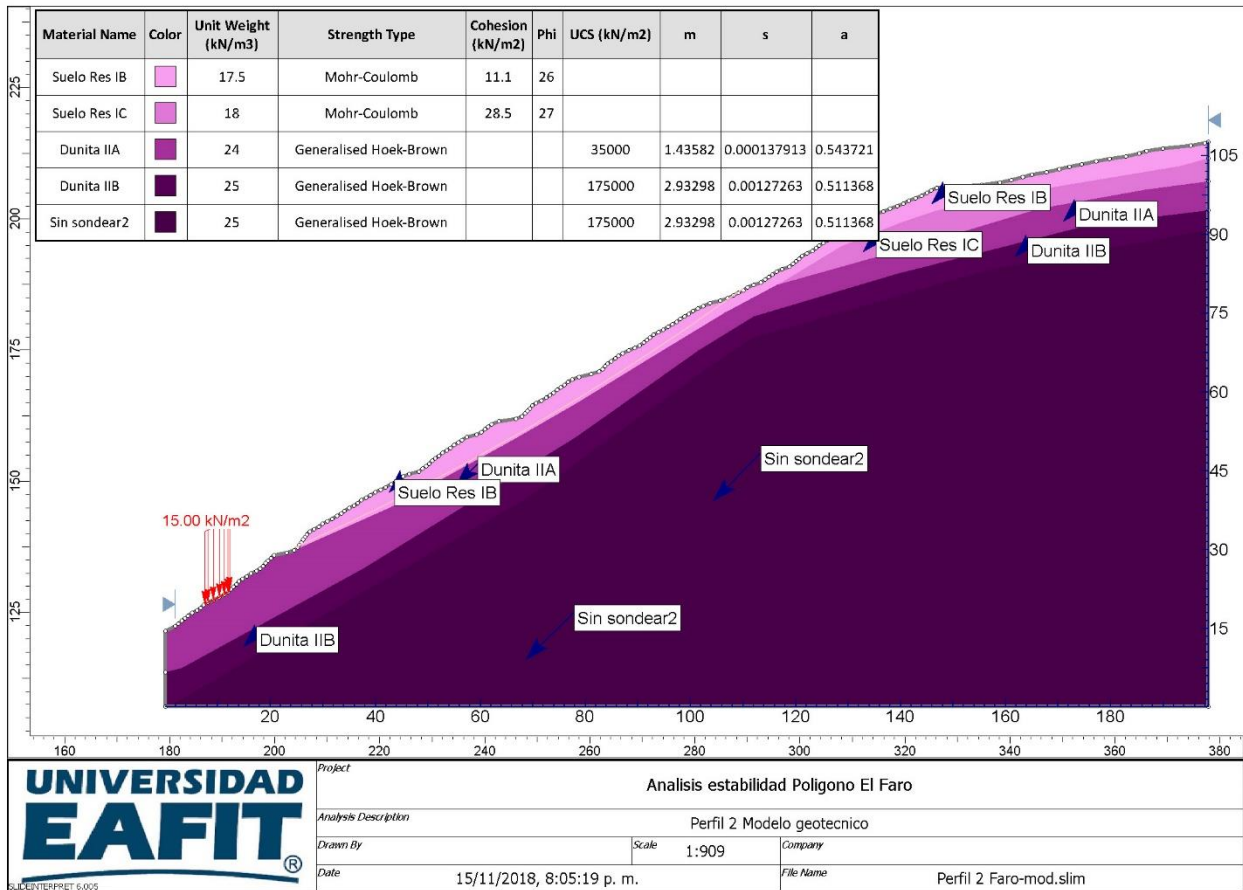


Figura 82. Modelo geológico-geotécnico perfil 2 El Faro

Perfil 3. Localizado en la zona central, Tiene una longitud aproximada de 165 metros y un desnivel de 50 metros; se orienta en dirección N70W y está definido por los sondeos P-13 y P-5.

Este perfil se compone suelos residuales de poco espesor suprayaciendo la roca fracturada y meteorizada del perfil de meteorización de la dunita con predominio de los horizontes IB, IC y IIA.

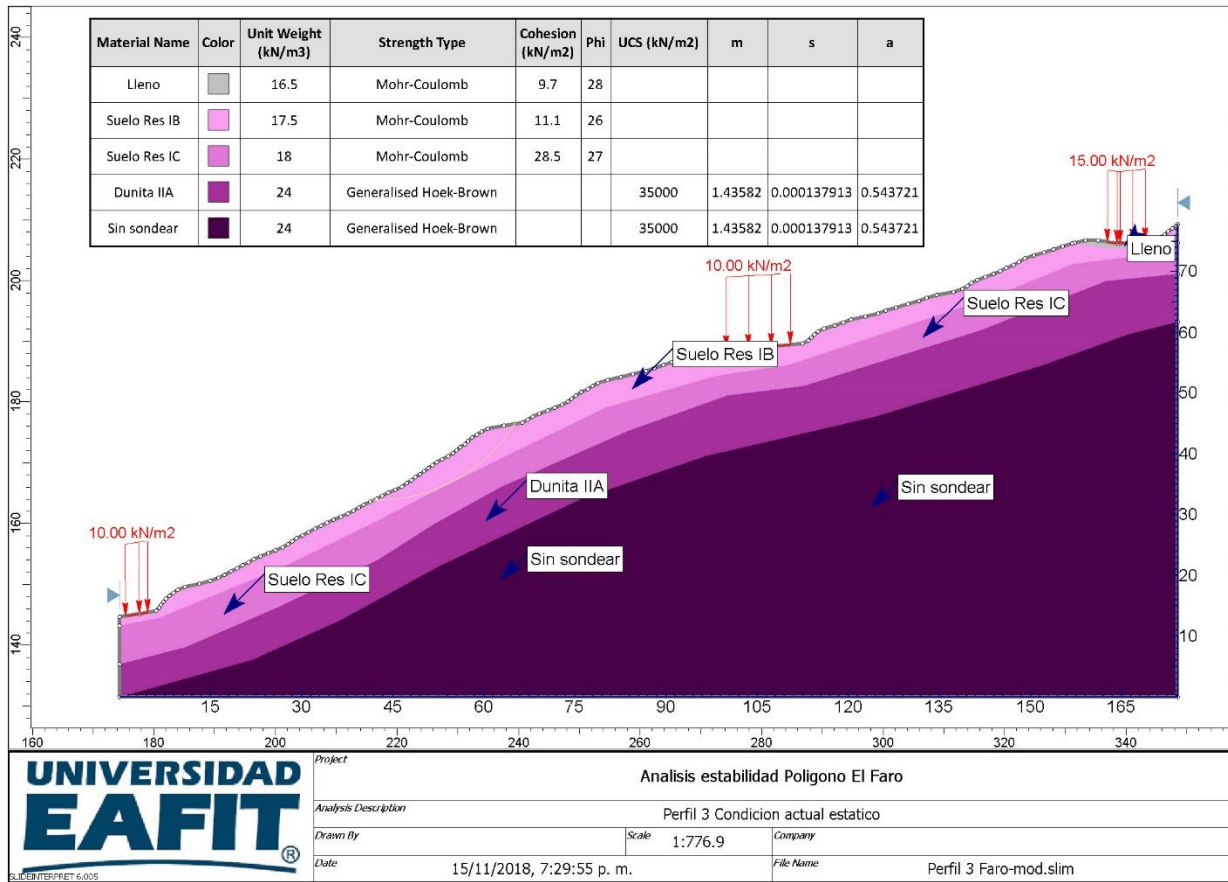


Figura 83. Modelo geológico-geotécnico perfil 3 El Faro

Perfil 4. Ubicado en la franja centro sur del polígono, tiene una longitud de 195 metros y un desnivel de 36 metros aproximadamente. Se orienta en sentido N77E y está definido por los sondeos P-7 y P-8.

Este perfil se compone de manera general por suelos residuales derivados de la dunita (horizontes IB y IC), subyacidos por la roca fracturada y meteorizada (horizonte IIA).

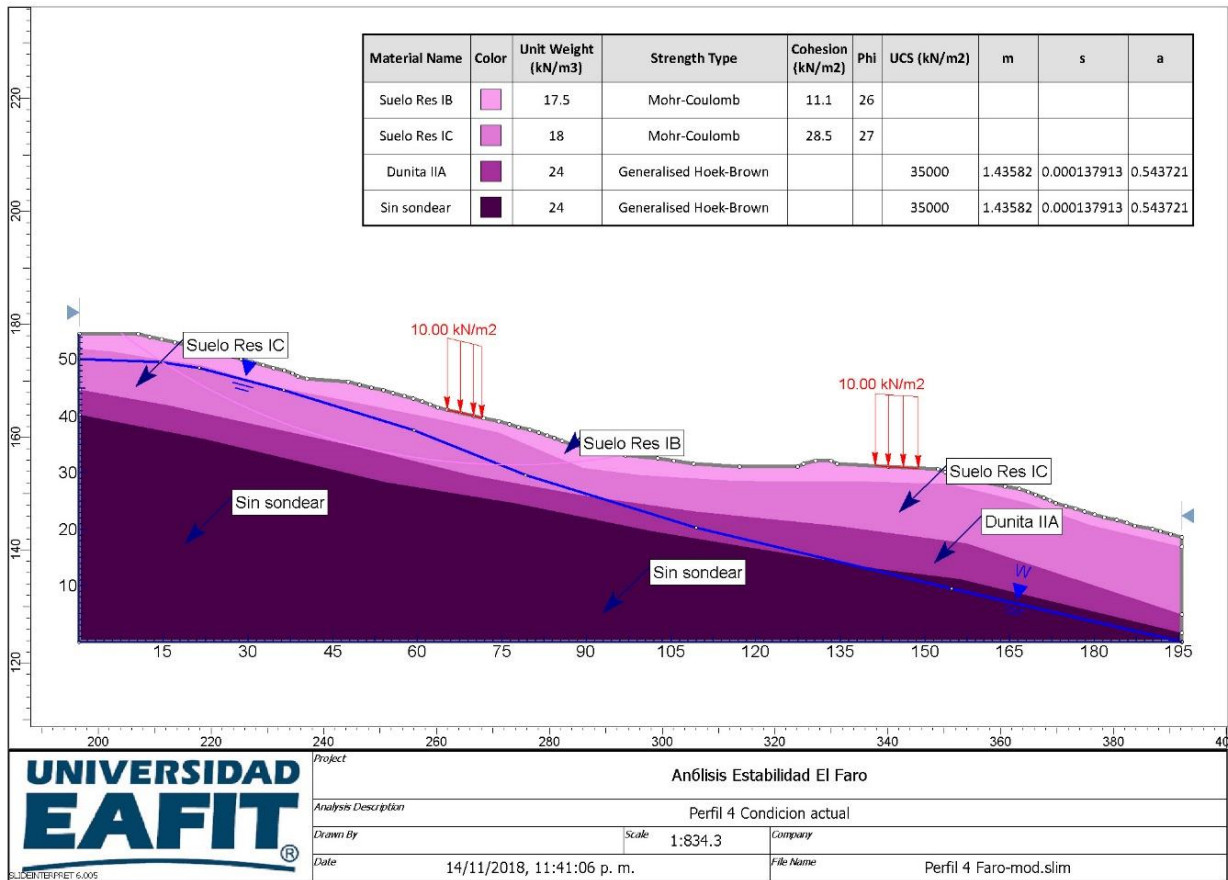


Figura 84. Modelo geológico-geotécnico perfil 4 El Faro

Perfil 5. Se localiza en el sector sur del polígono. Tiene una longitud de 183 metros aproximadamente y un desnivel de 64 metros. Se orienta en sentido N87E y está definido por los sondeos P-9 y P-10.

Este perfil se compone de manera regular por suelos residuales derivados de la Dunita (horizontes IB y IC), subyacidos por la roca fracturada y meteorizada (horizonte IIA).

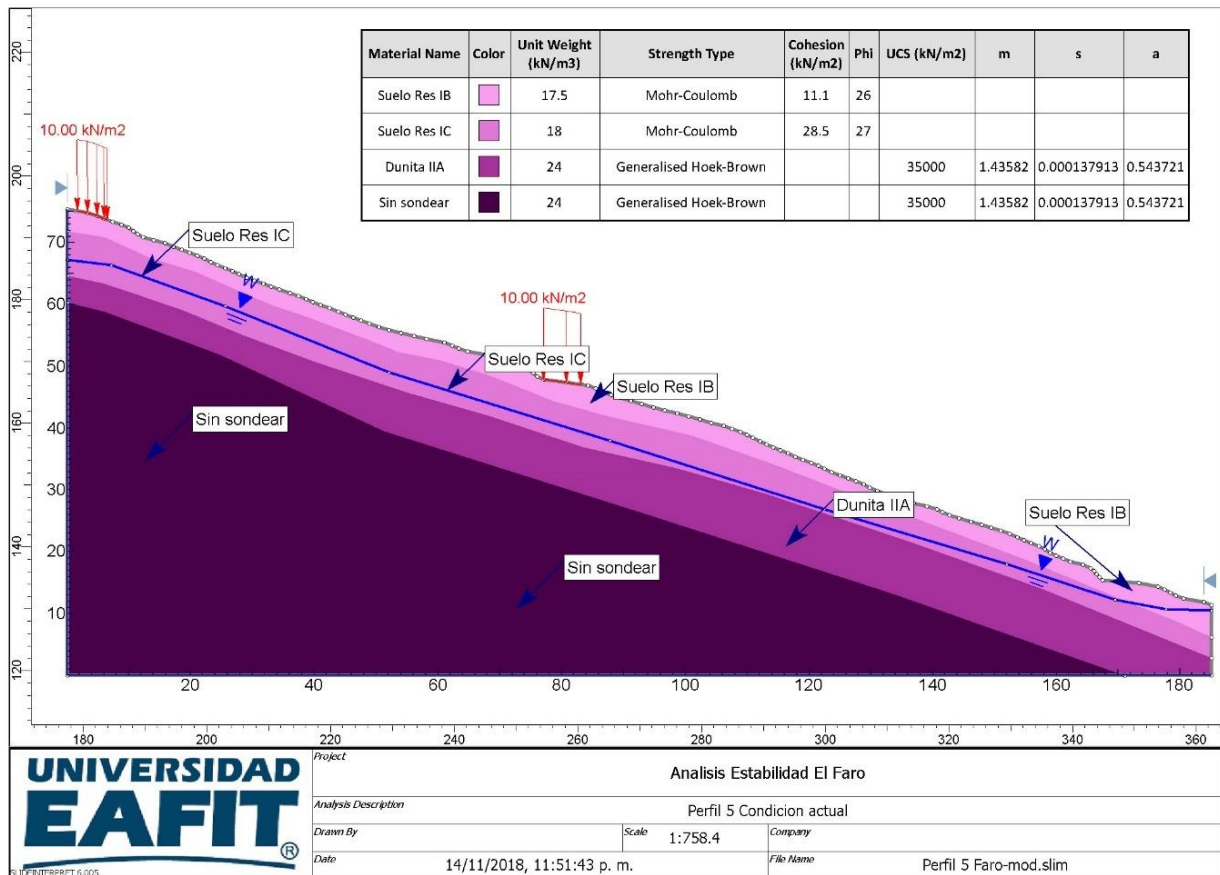


Figura 85. Modelo geológico-geotécnico perfil 5 El Faro

7.3.3 Análisis de estabilidad condición actual

Para evaluar la estabilidad de la zona de estudio se consideró la situación actual definida por las condiciones encontradas al momento de realizar los sondeos y exploraciones en campo. Este escenario fue considerado tanto en condiciones estáticas como seudoestáticas y un panorama adicional de suelos saturados.

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

Como se mencionó anteriormente, para el polígono El Faro se levantaron cinco (5) perfiles topográficos típicos que representaban las condiciones morfométricas del sector, en los cuales se plasmó la información estratigráfica y geotécnica.

El valor límite para el factor de seguridad en el caso estático y seudoestático fue tomado de las recomendaciones de la Norma de construcciones sismoresistentes (NSR-10) (Tabla 26).

Tabla 26. Factores de seguridad para el análisis de estabilidad (Tomado de Tabla H.2.4-1. NSR-10 Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos)

Condición	FSBM		FSBUM	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta + Carga Viva Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta + Carga Viva Máxima	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo-estático	1.10	1.00 (*)	No se permite	No se permite
Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes – Condición Seudo-estática con Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sísmico de Diseño	1.05	1.00 (*)	No se permite	No se permite

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

Para el análisis seudoestático se utilizarán las recomendaciones establecidas en la NSR-10 numeral H.5.2.5 Sismo de diseño, en donde se especifica que el coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestáticos de taludes (KST) deberá estimarse en función de la aceleración máxima del terreno (a_{max}) y ésta a su vez se calcula en función de la aceleración pico efectiva (A_a), del factor de amplificación F_a y del coeficiente de importancia (I) como:

$$a_{max} = a_a * F_a * I$$

Para el caso de la zona donde se ubica el Polígono El Faro, el estudio de microzonificación sísmica del área urbana de Medellín estableció un valor de a_{smax} 0.09 para sismos de servicio y F_a como 2.78. Considerando el tipo de edificaciones (grupo III), el coeficiente de importancia es 1.0. Si se reemplazan estos valores en la ecuación anterior se tiene que: $a_{max} = 0.25g$.

Tabla 27. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daños y de diseño
(Tomado Microzonificación sísmica Medellín, 2006)

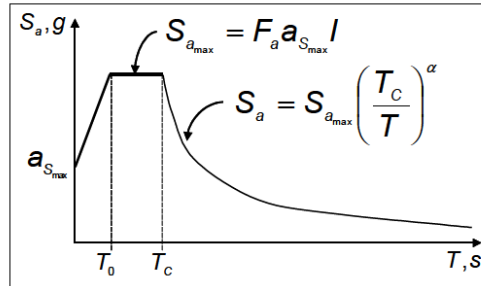


Figura 0. Espectro generalizado

Zona Homogénea	Sismo de control de daños						Sismo de diseño					
	$a_{S_{max}}$	F_a	$S_{a_{max}}/I$	T_0	T_c	α	$a_{S_{max}}$	F_a	$S_{a_{max}}/I$	T_0	T_c	α
1	0.05	4.50	0.23	0.10	0.50	1.43	0.27	2.60	0.70	0.10	0.60	1.34
2	0.08	2.80	0.22	0.10	0.30	1.17	0.34	2.35	0.80	0.10	0.40	1.17
3	0.07	3.57	0.25	0.10	0.50	1.48	0.30	2.66	0.80	0.20	0.70	1.52
4	0.05	3.60	0.18	0.10	0.60	1.46	0.23	2.17	0.50	0.10	0.65	1.22
5	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
6	0.05	2.81	0.14	0.10	0.40	1.11	0.20	2.50	0.50	0.10	0.50	1.07
7	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
8	0.08	2.25	0.18	0.10	0.65	1.52	0.23	2.40	0.55	0.10	0.75	1.37
9	0.06	3.75	0.23	0.10	0.40	1.31	0.26	2.70	0.70	0.10	0.55	1.28
10	0.09	2.78	0.25	0.10	0.40	1.35	0.38	2.10	0.80	0.10	0.50	1.29
11	0.06	3.75	0.23	0.10	0.50	1.43	0.26	2.88	0.75	0.10	0.65	1.43
12	0.06	4.16	0.25	0.10	0.65	1.67	0.26	3.07	0.80	0.15	0.70	1.52
13	0.06	4.16	0.25	0.10	0.40	1.35	0.26	3.07	0.80	0.10	0.50	1.29
14	0.05	2.81	0.14	0.10	0.50	1.23	0.20	3.00	0.60	0.10	0.55	1.21

El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático de taludes KST tiene valor inferior o igual al de a_{max} y se admiten los siguientes valores mínimos de K_{ST}/a_{max} , dependiendo del tipo de material térreo (reforzado o no) y del tipo de análisis.

Tabla 28. Valores de K_{ST}/a_{max} (Tomado NSR-10)

Valores de K_{ST}/a_{max} Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes

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

Para el caso de suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados se tiene una relación $K_{ST}/a_{max} = 0.80$, entonces El coeficiente sísmico de diseño para análisis seudoestático sería $(K_{ST}) = 0.20$.

Perfil 1

El primer escenario evaluado correspondió a la situación actual que considera la estabilidad en las condiciones encontradas durante el estudio. El factor de seguridad determinístico mínimo obtenido en esta situación bajo la consideración estática fue de 1.22 y el factor de seguridad medio es de 1.26 con una probabilidad de falla del 3.2%. De manera similar para la situación actual, pero bajo la influencia del sismo el factor de seguridad determinístico se reduce a 0.88 y el factor de seguridad medio es de 0.92 con una probabilidad de falla de 73.9% (Figura 87). Los resultados presentados corresponden al método de Morgenstern and Price.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como media, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad se ubican entre 1.2 y 1.5. La profundidad de falla se estima en 5.0 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta, dadas las condiciones del material susceptible a desplazarse y las altas pendientes del sector.

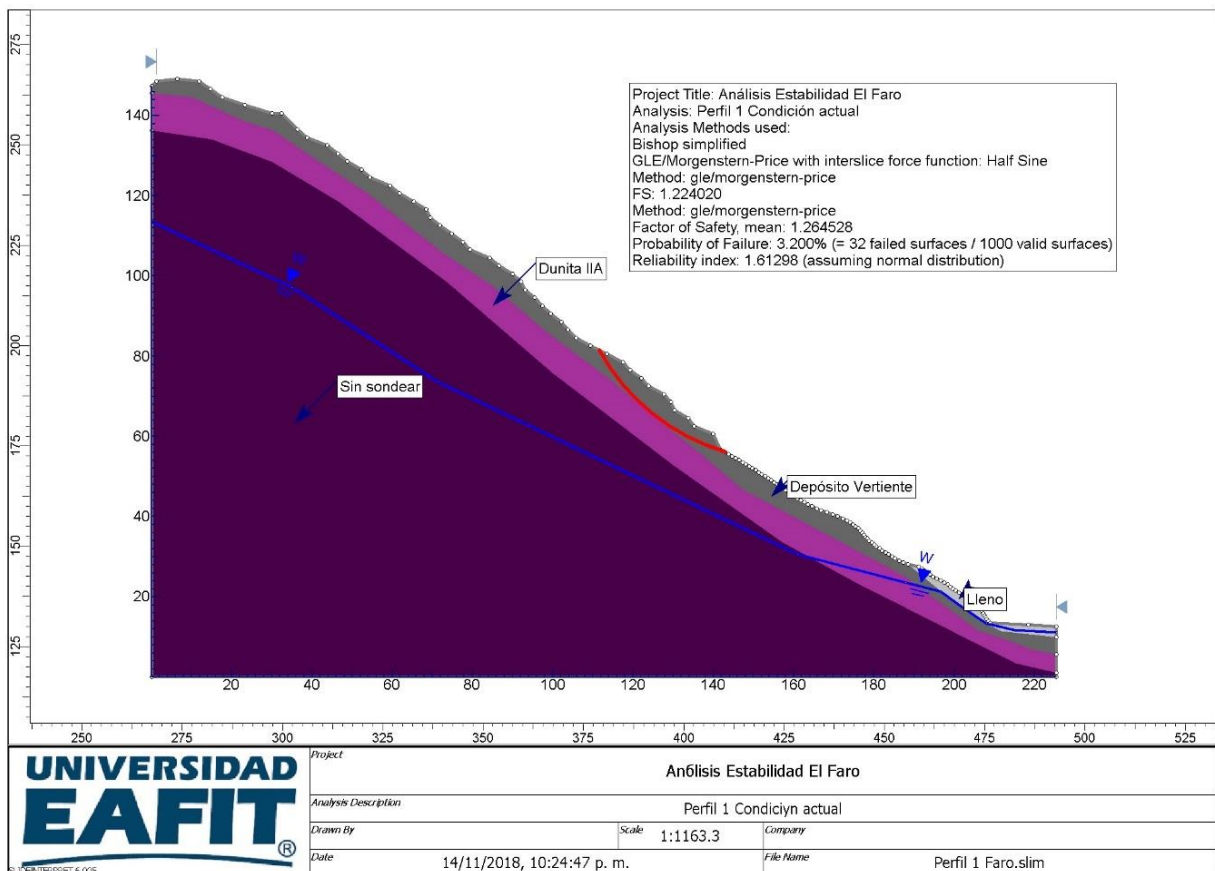


Figura 86. Análisis de estabilidad perfil 1 condición actual estático.

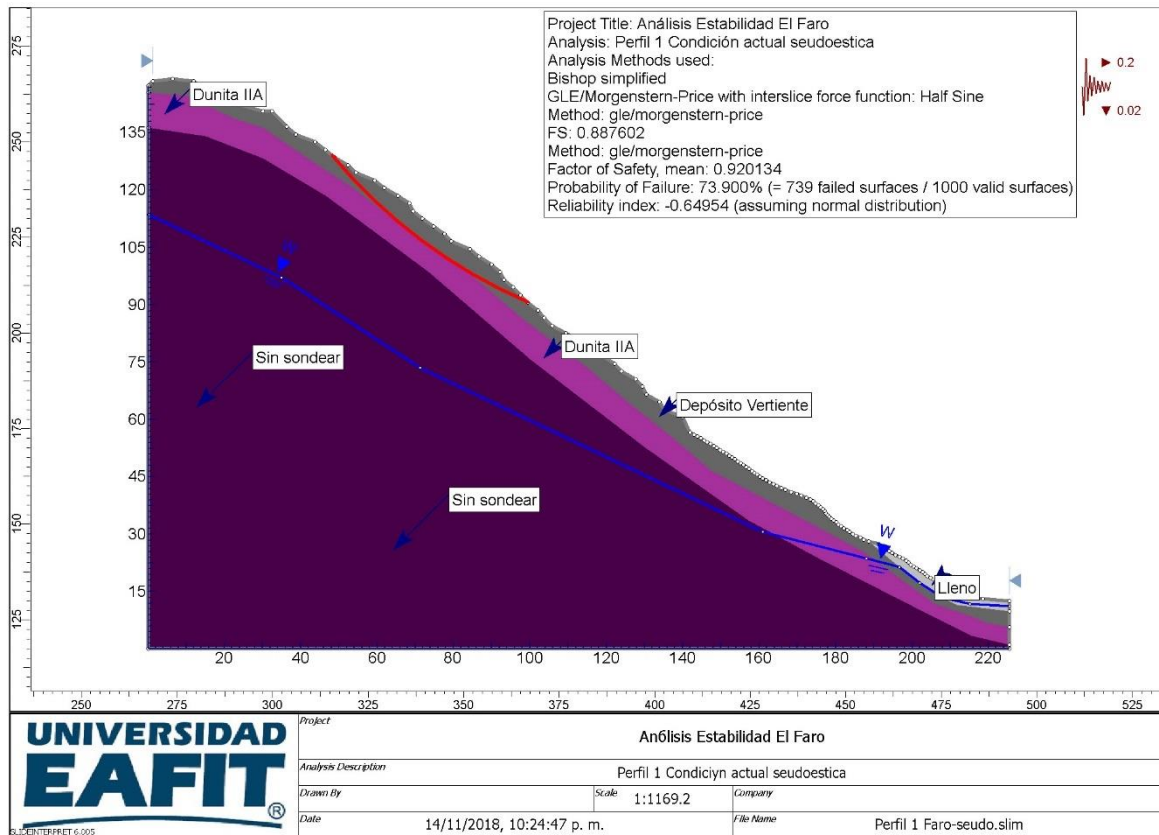


Figura 87. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual pseudoestática.

Finalmente, para el perfil No 1 se realizó el análisis de estabilidad para una condición hipotética en donde se simuló la saturación de los materiales que componen el perfil sin considerar la influencia del sismo. Para lo anterior, se contempló un nivel freático muy cerca de la superficie. Bajo esta situación se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.072 y un factor de seguridad medio de 1.115, con una probabilidad de falla de 28.1%. Este resultado es indicativo de la influencia negativa del agua en la formación de procesos en este tipo de materiales localizados en laderas de alta pendiente.

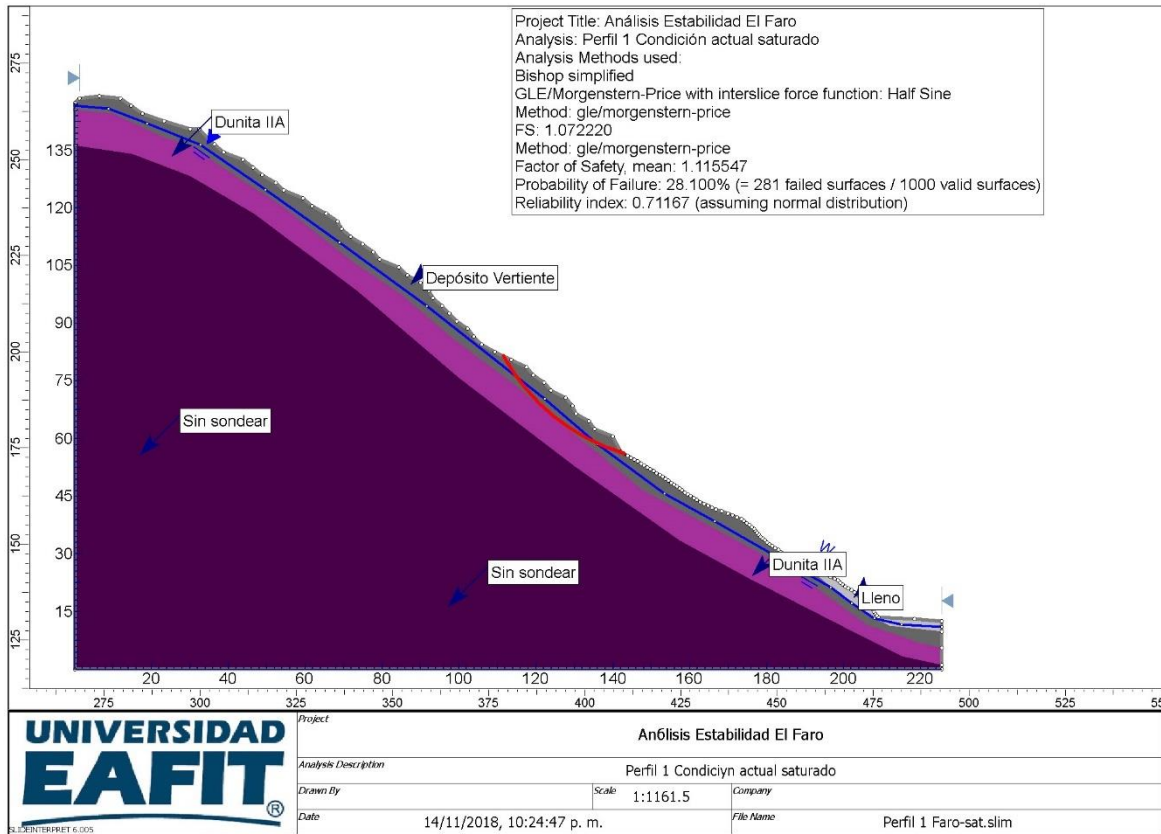


Figura 88. Análisis estabilidad perfil 1 condición actual saturada.

Perfil 2.

El análisis de estabilidad para el perfil No 2 muestra la probabilidad de ocurrencia de una falla de gran radio, que semeja una superficie cuasi planar con poca profundidad de afectación en donde se involucra el suelo residual de la dunita, específicamente el horizonte IB. Para esta condición se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.313 y un factor medio de 1.316 con una probabilidad de falla de 2.4%.

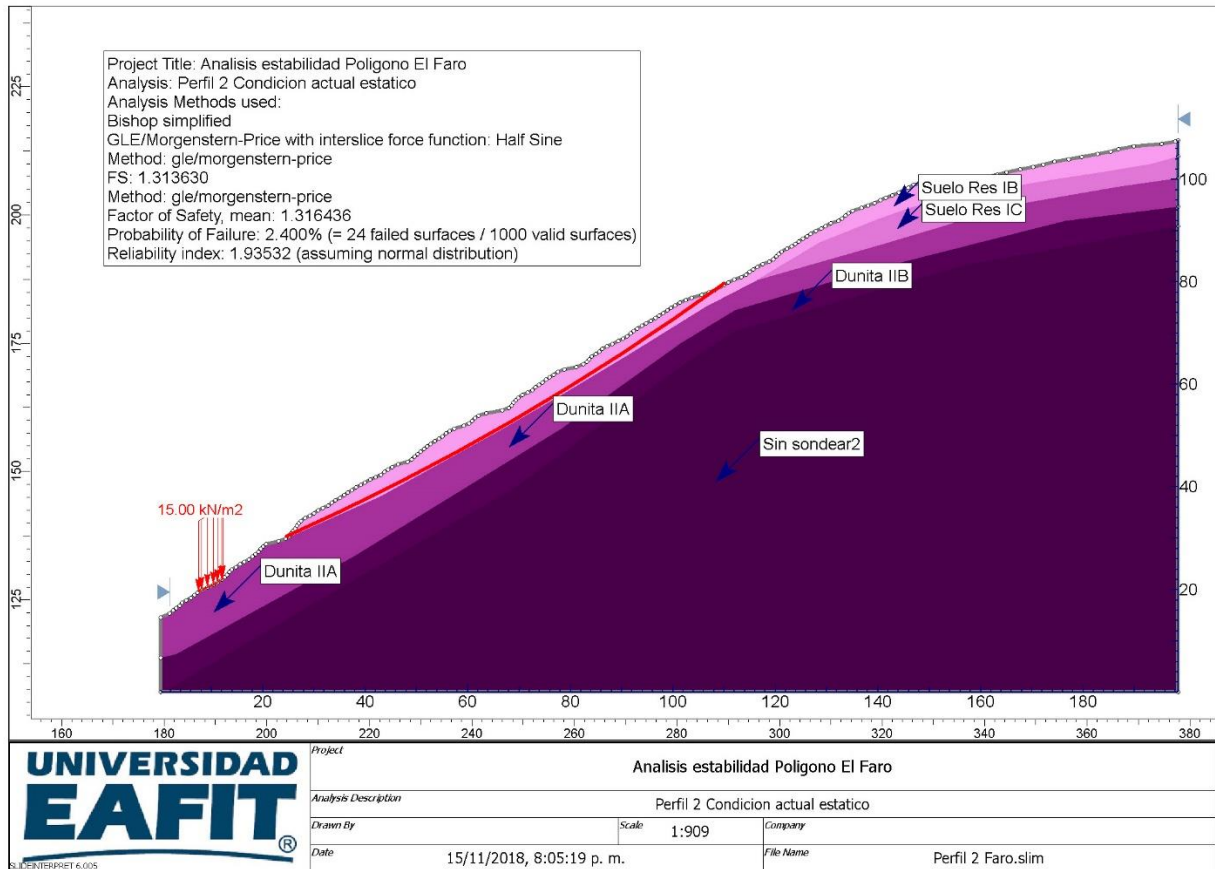


Figura 89. Análisis estabilidad Perfil 2 situación actual, condición estática.

El análisis seudoestático para la condición actual para el perfil No 2 arrojó un factor de seguridad determinístico de 0.89 y un factor de seguridad medio de 0.90 con una probabilidad de falla de 80.0%.

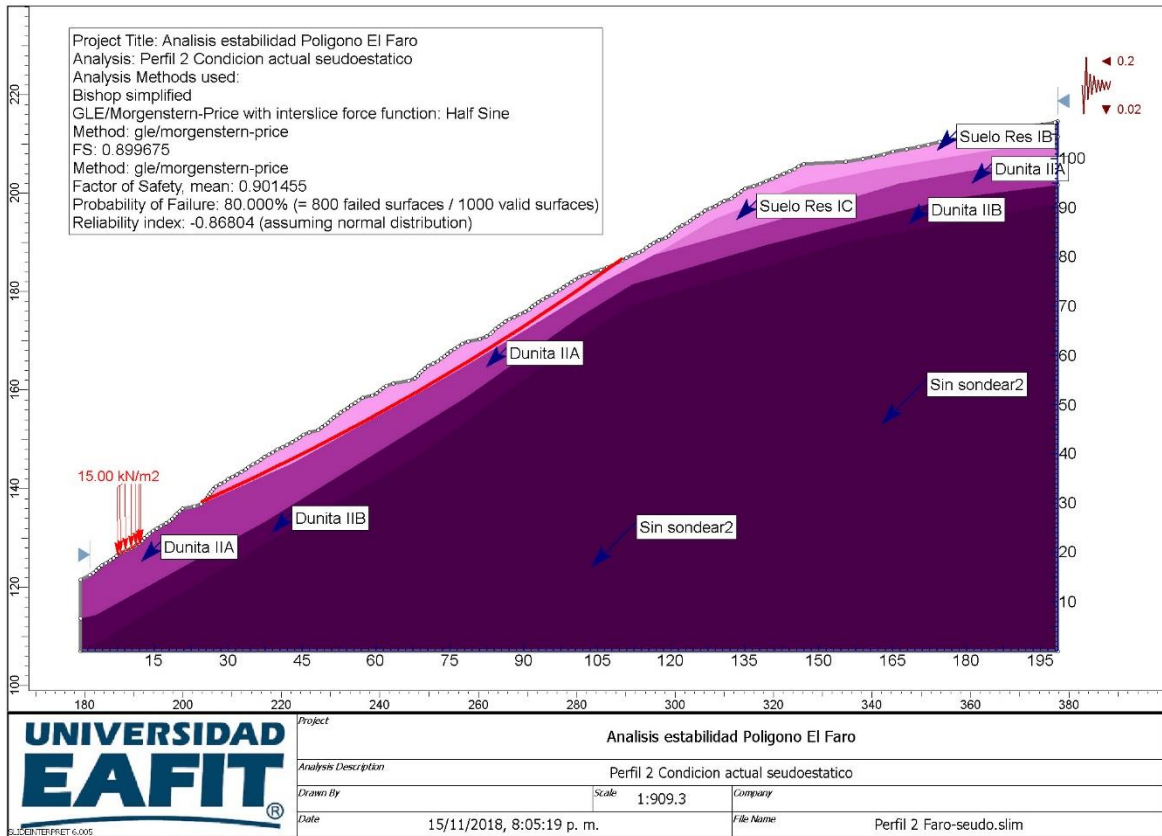


Figura 90. Análisis estabilidad perfil 2 condición pseudoestática.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa para esta zona y sus alrededores como media, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad determinísticos se ubican entre 1.2 y 1.5. La profundidad de falla se estima en 3.50 m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad alta, dadas las condiciones de alta pendiente en el sector.

Se analizó la estabilidad del perfil No 2 para una condición extrema que considera la saturación del perfil, para lo cual se graficó la línea del nivel freático cerca de la superficie. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.212 y un factor de seguridad medio de 1.215 con una probabilidad de falla de 7.0%.

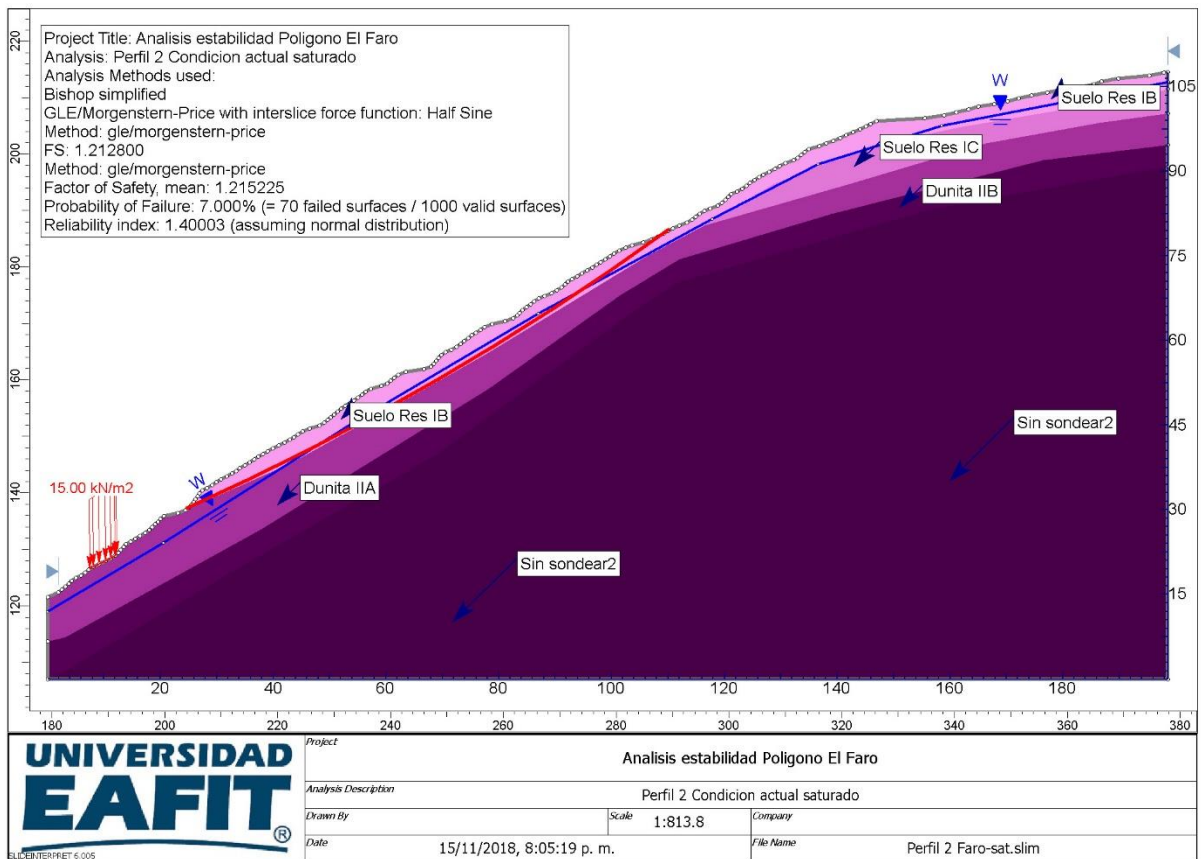


Figura 91. Análisis estabilidad perfil 2 condición saturada.

Perfil 3.

El análisis de estabilidad para el perfil No 3 para la condición actual arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.442 y un factor medio de 1.446 con una probabilidad de falla de 0.50%. Como se puede observar en la figura siguiente, la superficie de falla potencial se desarrolla en el suelo residual, específicamente en el horizonte IB, susceptible a los procesos de saturación, que modifican las propiedades de resistencia de estos.

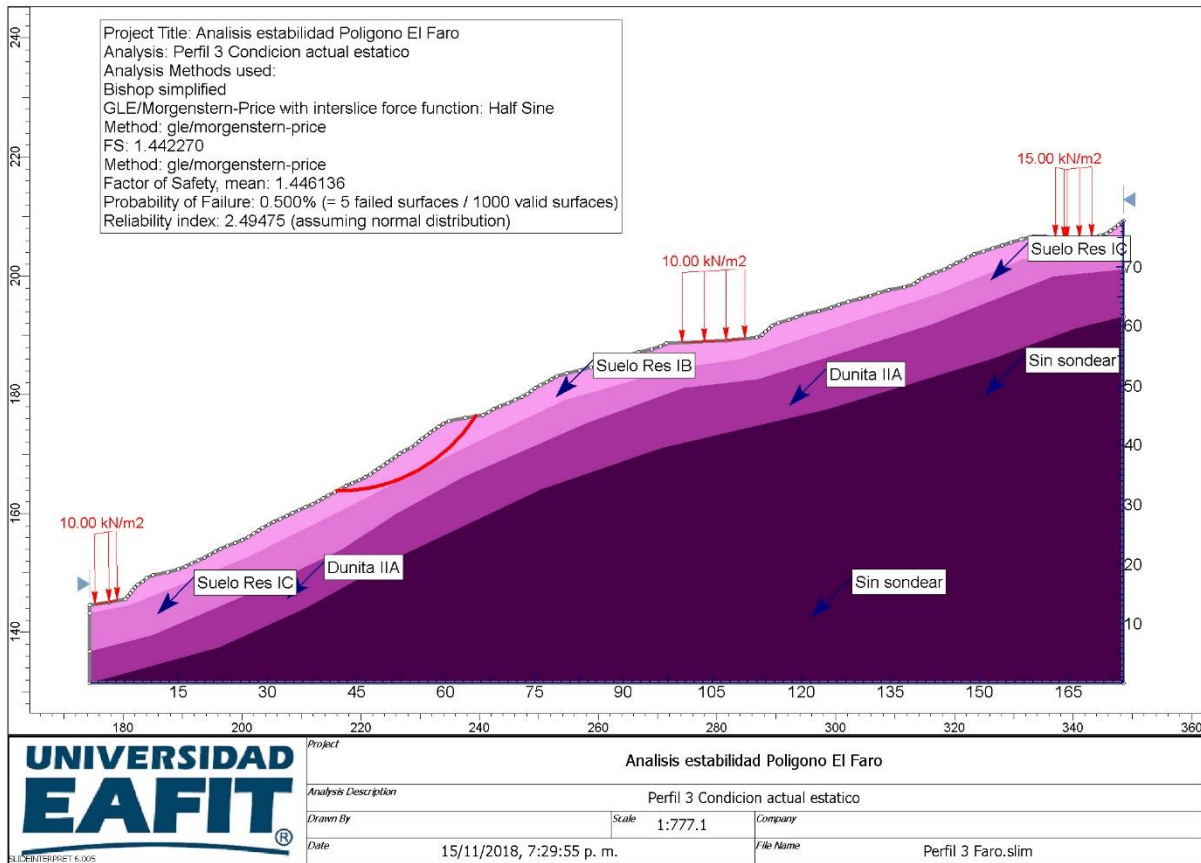


Figura 92. Análisis estabilidad Perfil 3 situación actual, condición estática.

El análisis seudoestático para la condición actual del perfil No 3 arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.003 y un factor de seguridad medio de 1.006 con una probabilidad de falla de 49.6%.

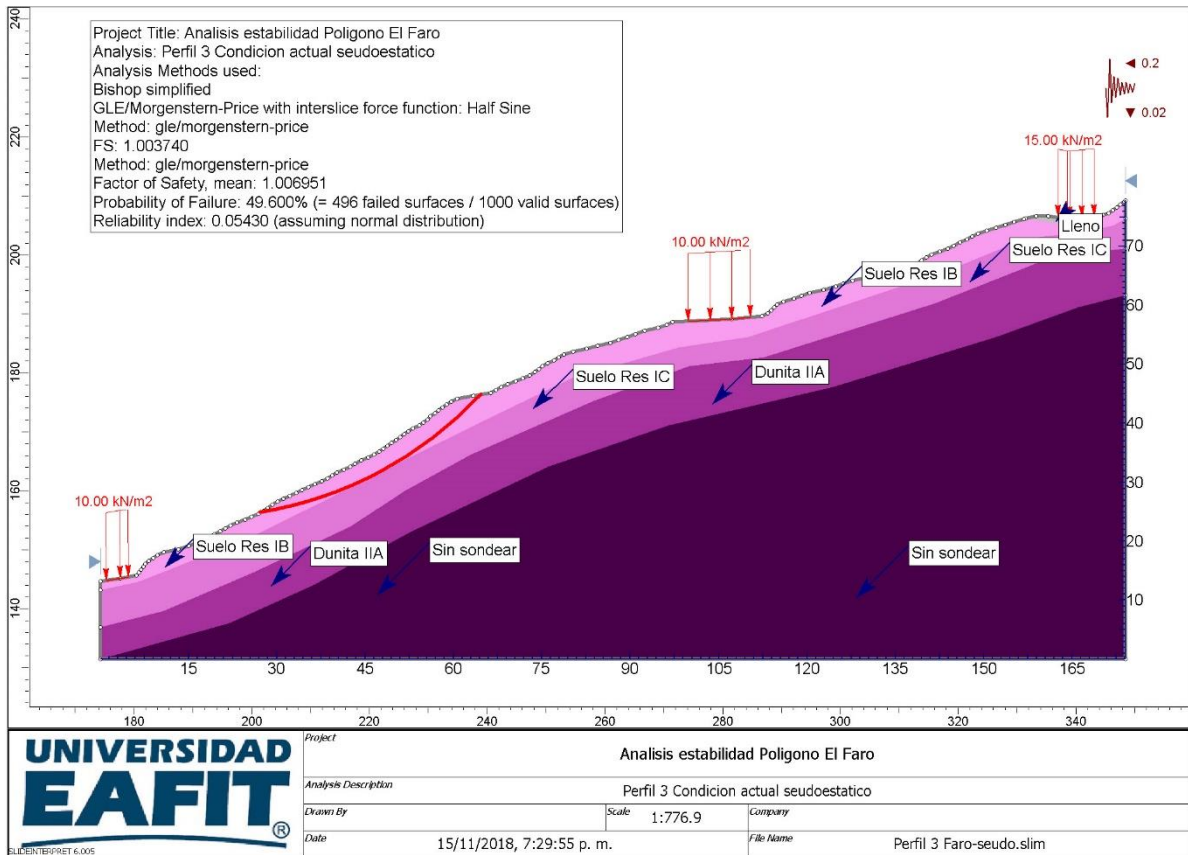


Figura 93. Análisis estabilidad perfil 3 condición seudoestática.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como media, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad determinísticos se ubican por encima entre 1.2 y 1.5. La profundidad de falla se estima en 4.0m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad media a alta, dadas las condiciones de pendiente de la zona.

Se analizó la estabilidad del perfil No 3 para una condición extrema que considera la saturación del perfil, para lo cual se graficó la línea del nivel freático cerca de la superficie actual del terreno. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.189 y un factor de seguridad medio de 1.187 con una probabilidad de falla de 4.20%. Como se puede observar el incremento en los niveles freáticos, generan una afectación mayor, involucrando en la falla el horizonte IB y IC de la dunita.

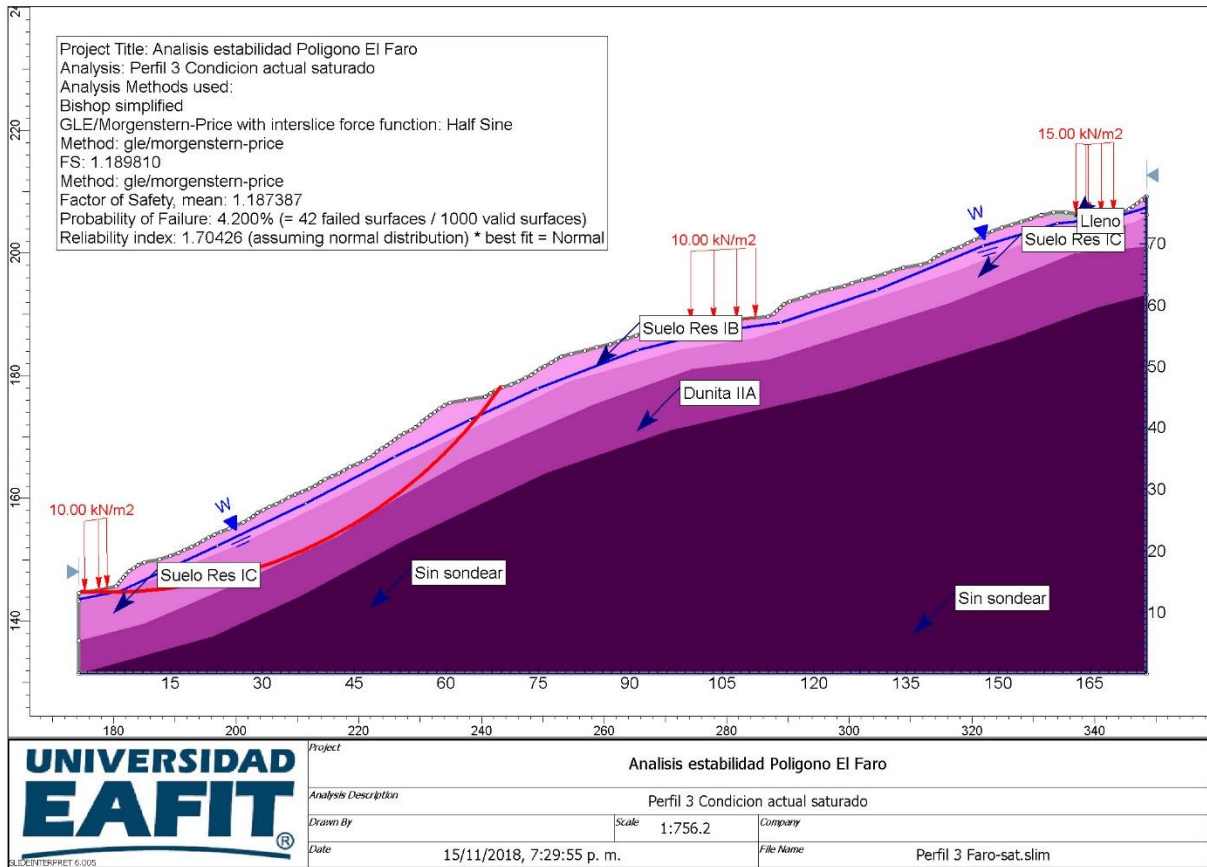


Figura 94. Análisis estabilidad perfil 3 condición saturada.

Perfil 4.

El análisis de estabilidad para el perfil No 4 para la situación actual en condiciones estáticas arrojó un factor de seguridad determinístico de 2.628 y un factor medio de 2.629 con una probabilidad de falla de 0.0%. Este valor corrobora las observaciones de campo, en donde se tienen terrenos de pendiente suave a moderada, sin la presencia de procesos morfodinámicos de relevancia.

El análisis seudoestático para la condición actual arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.409 y un factor de seguridad medio de 1.410 con una probabilidad de falla de 0.0%.

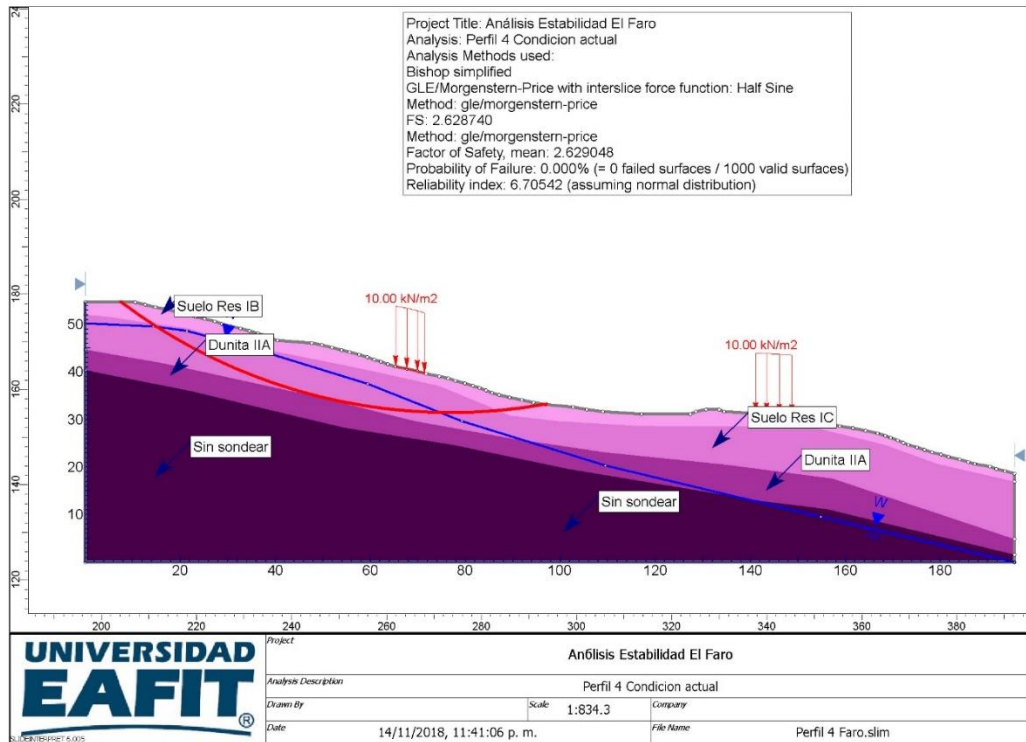


Figura 95. Análisis estabilidad Perfil 4 situación actual, condición estática.

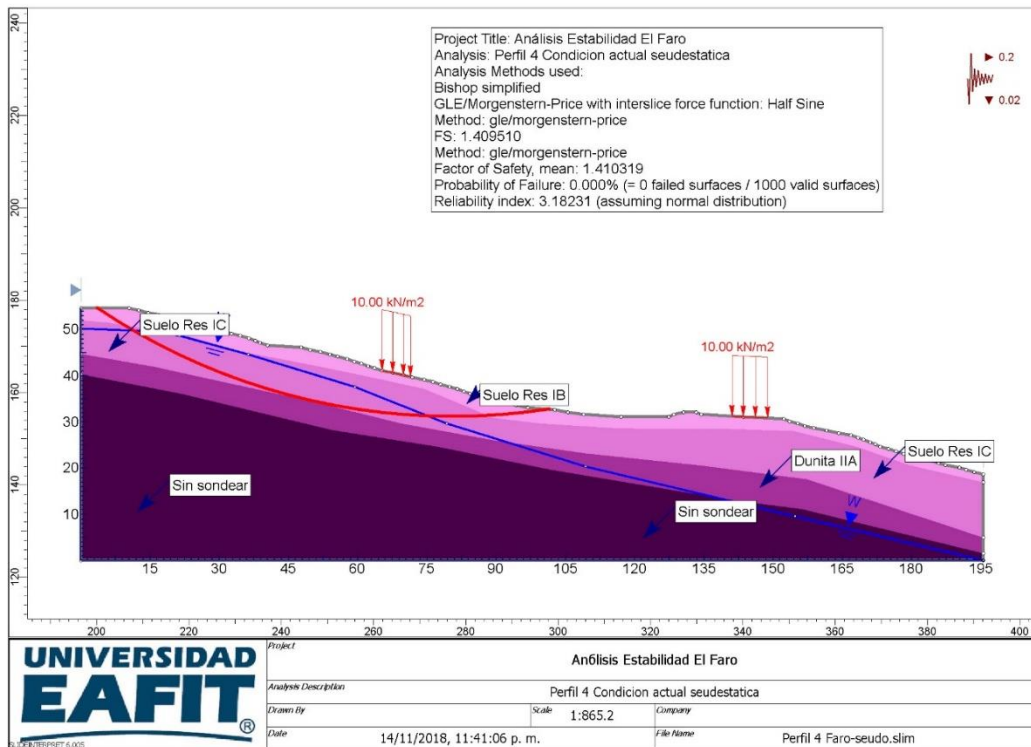


Figura 96. Análisis estabilidad perfil 4 condición seudoestática.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como baja, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad determinísticos se ubican por encima de 1.5. Teniendo en cuenta los espesores de materiales residuales, se espera que una potencial superficie de falla alcance profundidades hasta de 9.0 m y se espera un movimiento lento, dada la profundidad de falla y las condiciones de pendiente de la zona.

Se analizó la estabilidad del perfil No 4 para una condición extrema que considera la saturación del perfil, para lo cual se graficó la línea del nivel freático cerca de la superficie. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 2.161 y un factor de seguridad medio de 2.159 con una probabilidad de falla de 0.0%.

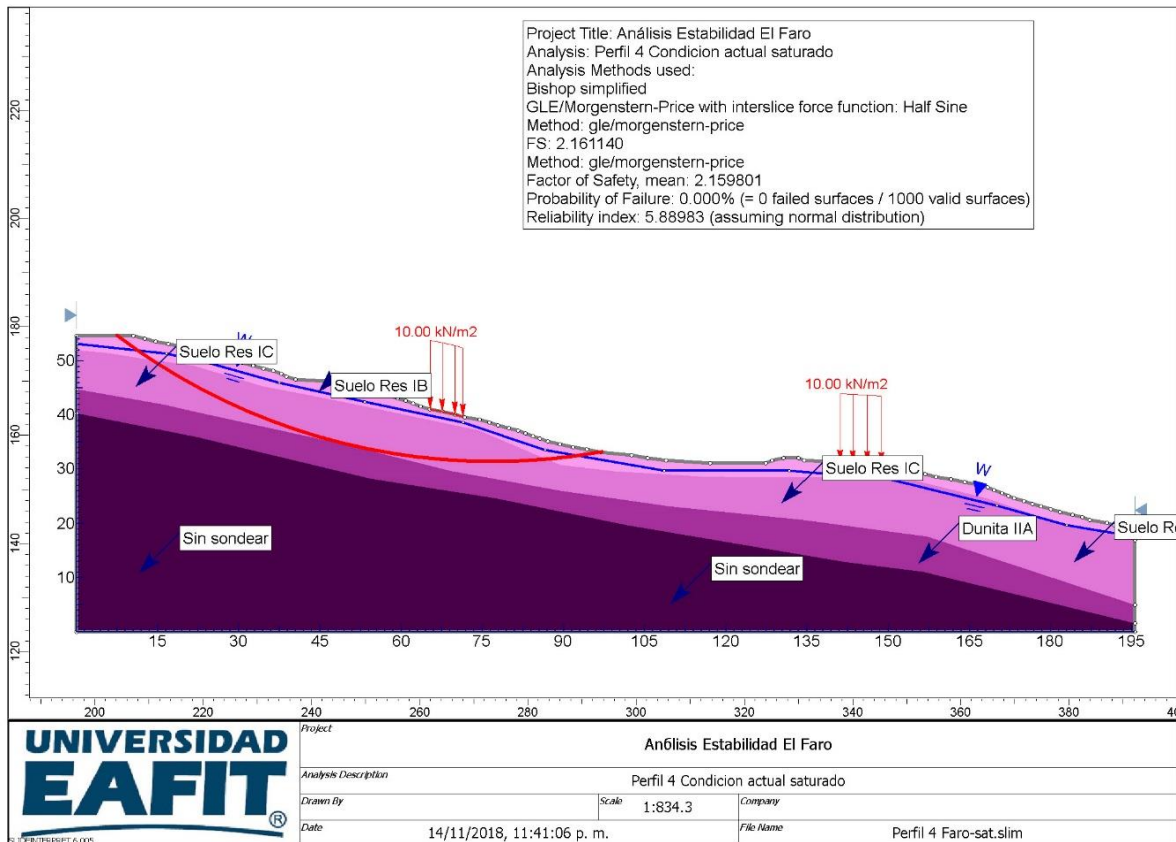


Figura 97. Análisis estabilidad perfil 4 condición saturada.

Perfil 5.

El análisis de estabilidad para el perfil No 5 para la situación actual en condiciones estáticas dio como resultados un factor de seguridad mínimo determinístico de 2.128 y un factor medio de 2.127 con una probabilidad de falla de 0.0%. Lo anterior

denota condiciones adecuadas de estabilidad, que se corroboran con las observaciones de campo. Una potencial falla involucra los suelos residuales (horizontes IB y IC) de la dunita.

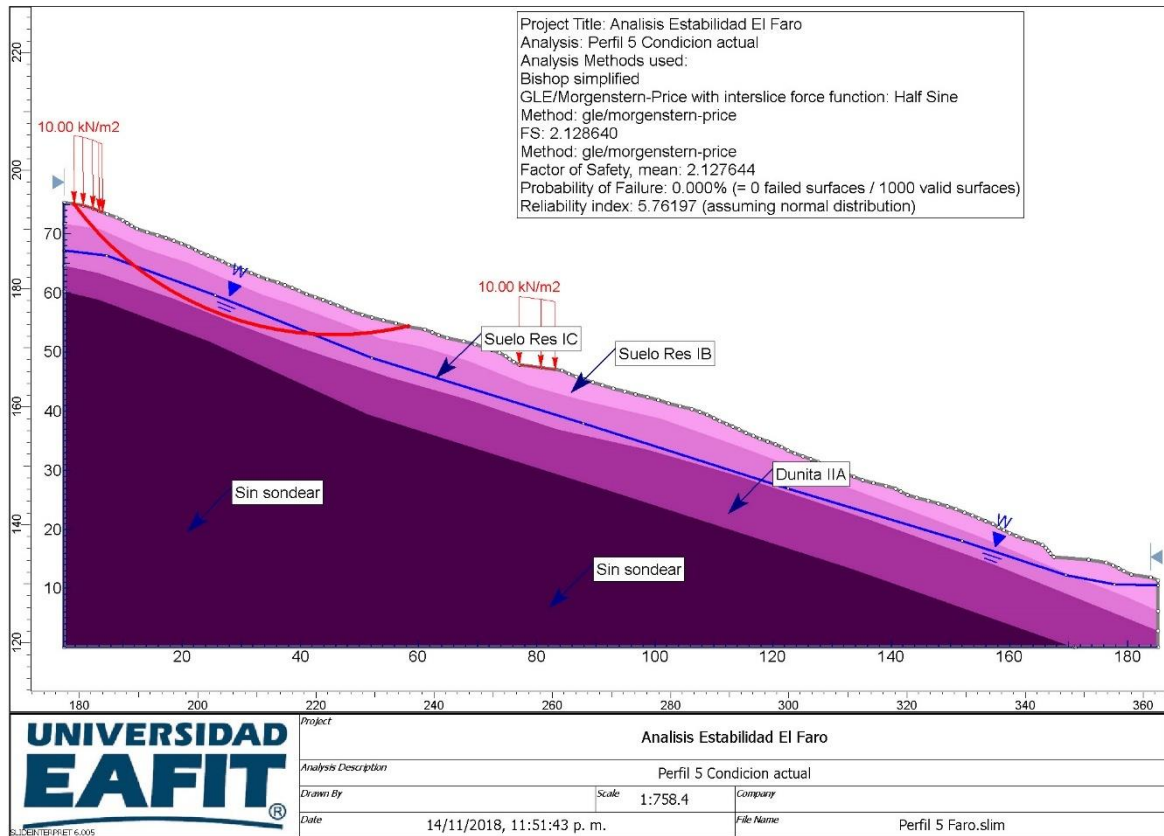


Figura 98. Análisis estabilidad Perfil 5 situación actual, condición estática.

El análisis seudoestático para la condición actual arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.35 y un factor de seguridad medio de 1.34 con una probabilidad de falla de 0.0%.

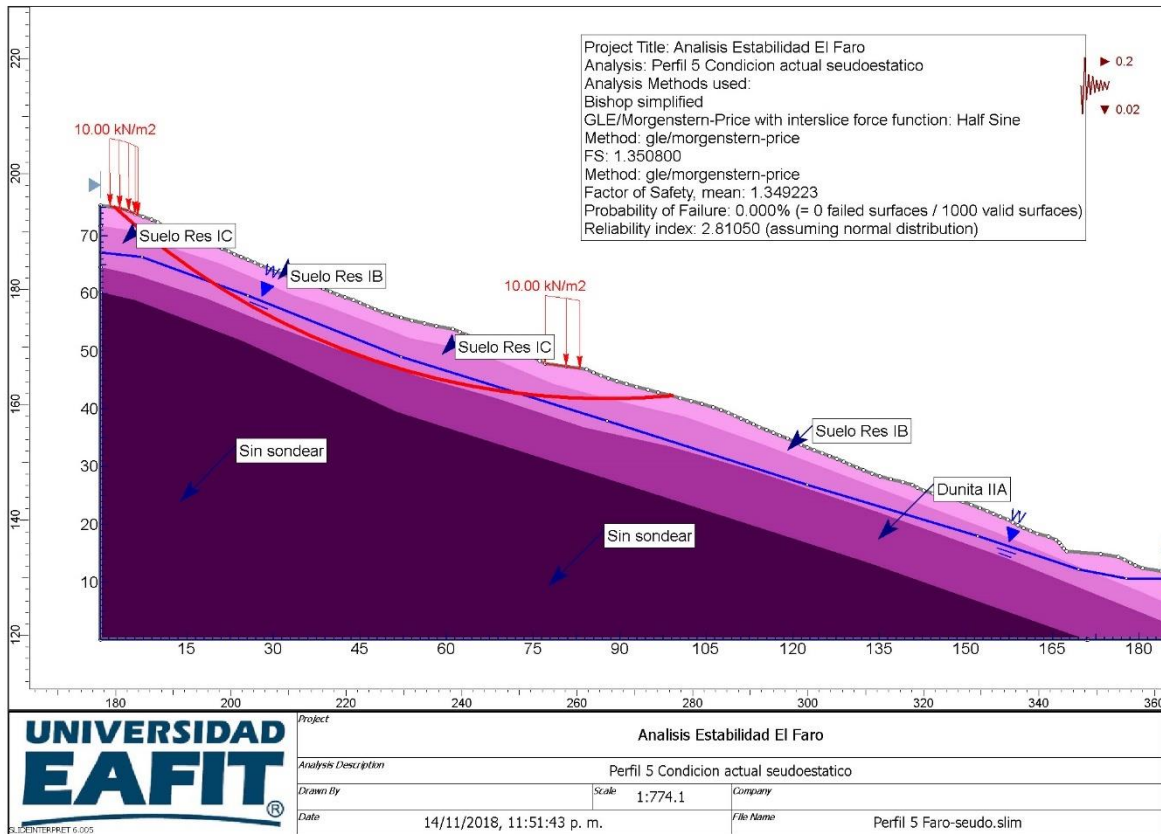


Figura 99. Análisis estabilidad perfil 5 condición seudoestática.

Los resultados anteriores permiten clasificar la amenaza por movimientos en masa como baja, según decreto 1626 de 2015, pues los factores de seguridad determinísticos se por encima de 1.5. La profundidad de falla se estima en 8.0m aproximadamente y se espera un movimiento de velocidad baja.

Se analizó la estabilidad del perfil No 5 para una condición extrema que considera la saturación del perfil, para lo cual se graficó la línea del nivel freático cerca de la superficie. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.649 y un factor de seguridad medio de 1.646 con una probabilidad de falla de 0.0%.

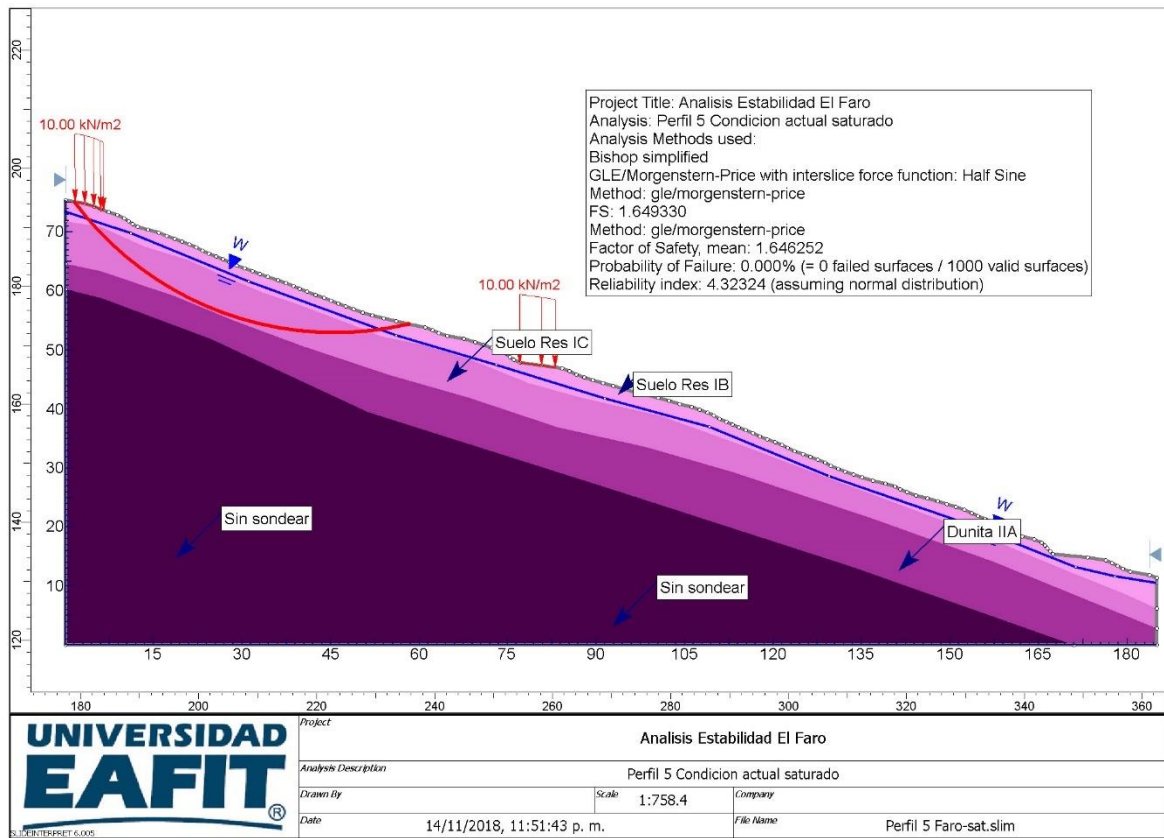


Figura 100. Análisis estabilidad perfil 5 condición saturada.

8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

8.1 MODELO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

Considerando las características geológicas de una región, el primer elemento a analizar, en la búsqueda de potenciales unidades almacenadoras de agua subterránea, son las condiciones texturales y estructurales de las unidades litológicas de la zona de estudio. Se plantean aquí unas premisas en términos de la expectativa que, a nivel descriptivo, generarían las condiciones de porosidad y permeabilidad primaria (textura) o secundaria (estructuras y meteorización) (AMVA, 2013)

De lo expuesto en el capítulo correspondiente a Geología se retoma aquí las condiciones que, además de la composición y origen, determinan características texturales de los materiales de la corteza terrestre, dentro del dominio espacial del Valle de Aburrá; aquí radica el sentido de incluir dentro de la descripción geológica un minucioso nivel de detalle en términos de mineralogía, afectación estructural y meteorización de saprolitos. De acuerdo con esto, en la Tabla 29 se sintetiza una interpretación que da lugar a una primera aproximación acerca de las potenciales bondades hidrogeológicas de las unidades litológicas descritas; dentro de las rocas ígneas se considera que las características adquiridas a través de procesos de fracturamiento y meteorización en la Dunita de Medellín, el Batolito Antioqueño, y el Stock de Las Estancias, hacen de estas unidades objeto de un análisis más detallado para evaluar la probabilidad de constituir posibles acuíferos o zonas de recarga. Dentro de las rocas metamórficas se encontraron condiciones de posible interés desde el punto de vista de la recarga a las Metabasitas del Picacho y las Anfibolitas de Medellín. Respecto a los depósitos del Cuaternario, todos son considerados en principio como posibles reservorios de agua subterránea (AMVA, 2013).

Tabla 29. Unidades hidrogeológicas del centro y sur del Valle de Aburrá (Modificado de AMVA, 2013)

TIPO DE ROCA	UNIDAD GEOLÓGICA	ASIGNATURA	CARACTERÍSTICAS TEXTURALES	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	DIAGNOSTICO HIDROGEOLÓGICO
ÍGNEAS	Dunitas de Medellín	(JKuM)	Roca compacta, Saprolito limo arcilloso	Diaclasada y karstificada	Buen potencial hidrogeológico
METAMÓRFICAS	Metabasitas del Picacho	(JKmbP)	Saprolito limoso	Se encuentran diaclasadas	Probable potencial hidrogeológico

TIPO DE ROCA	UNIDAD GEOLÓGICA	ASIGNATURA	CARACTERÍSTICAS TEXTURALES	CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES	DIAGNOSTICO HIDROGEOLÓGICO
DEPÓSITOS	Depósitos Aluviales	(Qal)	Matriz areno limosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos Aluviotorrenciales	(Qat)	Matriz areno gravosa	No reportadas	Buen potencial hidrogeológico
	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos	(QFa)	Bloques en matriz que varía de arena fina a arcillosa	Sin Reportar	Buen potencial hidrogeológico
		(QFIII)			
		(QFIV)			
		(NQFII)			
		(NFI)			
		(NFprel)			

Según el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2013, en el Valle de Aburrá existen tres unidades hidrogeológicas de interés acuífero (Figura 101), y se designan como:

- Acuífero Libre del Valle de Aburrá: Conformado por los depósitos aluviales del río Aburrá - Medellín y sus afluentes, y los depósitos de vertiente, categorizados como flujos de lodo y escombros con edades del Neógeno o el Cuaternario. Texturalmente estos depósitos están constituidos por gravas, arenas y cantos en matriz areno-arcillosa gradando a arcillosa hacia la base, con presencia de lentes de grava y arcilla.
- Acuífero semiconfinado del Valle de Aburrá: Conformado por depósitos de origen aluvial, separados del acuífero libre por una capa sellante de carácter arcilloso. El acuífero semiconfinado estaría localizado en la parte central y sur del valle, está conformado por gravas, arenas y cantos en matriz arcillo-arenosa con pequeños lentes de arena o arcilla; aún no se tiene suficiente información para modelar con certeza la geometría de esta unidad.
- Acuífero de la Dunita de Medellín. El grado de fracturamiento de esta unidad de roca, sumado a la aparente condición de pseudokarst que se registra en algunos sectores (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Antioquia, 2012) y algunos datos de caudal reportados en afloramientos y obras de control geotécnico, indican que en la Dunita de Medellín se podría estar almacenando un importante volumen de agua subterránea, que podría llegar a ser utilizable con fines de abastecimiento en algunos sectores del área urbana o rural de los municipios de Bello, Medellín o Envigado. Las bondades de la Dunita de Medellín, como formación acuífera, no han sido exploradas.

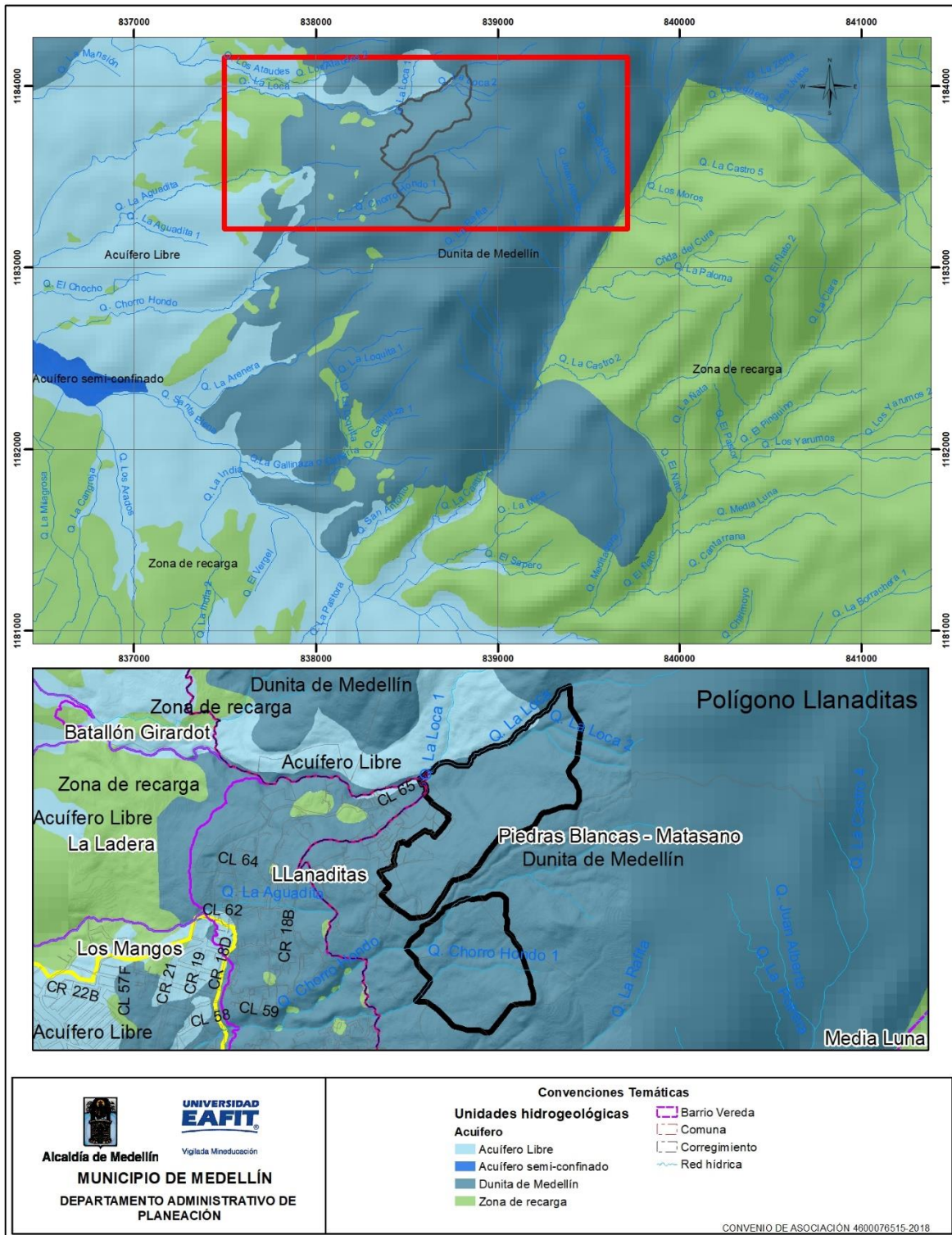


Figura 101. Unidades hidrogeológicas para el Valle de Aburrá, modificado de AMVA 2013.

Los factores que condicionan la recarga de un sistema acuífero son la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas, las características geomorfológicas que posee el paisaje, los rasgos estructurales de las rocas que rodean a los acuíferos, el tipo de cobertura, la hidrografía, las características hidráulicas de los suelos y las condiciones hidrometeorológicas (AMVA, 2013).

De acuerdo con la conceptualización general al respecto, algunos factores antrópicos pueden constituir también fuentes de recarga, estos son: los retornos por riego, las fugas en redes de acueducto y alcantarillado, y la recarga artificial (AMVA, 2013).

Para la determinación de las potenciales áreas de re- carga en el valle de Aburrá se tiene como hipótesis la existencia de tres posibles fuentes de recarga: I) una re- carga distribuida en las superficies libres donde afloran las unidades acuíferas, II) la interacción hidráulica que existe con los principales cuerpos de agua superficial, como lo son el río Aburrá-Medellín y sus principales afluentes, y III) la recarga proveniente de los aportes de flujos regionales, a partir de las rocas encajantes que presentan permeabilidad secundaria (AMVA, 2013).

La dirección del flujo subterráneo proviene desde las zonas de recarga hacia el río, siguiendo en términos generales el sentido de la pendiente; es evidente el papel del río Aburrá-Medellín como frontera hidráulica que capta el flujo base. Llama la atención el sector ubicado en inmediaciones de La Aguacatala hasta el Cerro Nutibara, el cual coincide con un tramo en el que el río cambia su curso y describe una curva cóncava hacia el oeste, allí las líneas de flujo subterráneo que tienen su origen en la vertiente oriental del valle, trascienden el cauce superficial para luego confluir con las líneas de flujo que provienen del occidente, en un sector alineado subparalelamente al río. Esta situación podría ser un indicio de la existencia de paleocauces o de intervenciones antrópicas (AMVA 2013).

8.2 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS LOCALES

Para el complemento y ajuste de la caracterización de los terrenos que conforman el polígono de El Faro, se utilizaron las técnicas de exploración indirecta para el entendimiento de las características del subsuelo, implementando las líneas de geoelectrica (Tomografías Eléctricas Resistivas) que mediante la medición de las resistividades se pueden obtener las parámetros estratigráficos, hidrológicos y geológicos del sector.

La geofísica es una de las principales disciplinas que apoyan las actividades de exploración geológica, ella utiliza los métodos de la física para poder estudiar las propiedades de los materiales que conforman el subsuelo.

Mediante la adquisición de datos de resistividades aparentes de las capas del subsuelo es posible hacer un perfil geoeléctrico donde se observen las variaciones laterales de resistividad y, así, inferir información relevante de las propiedades del medio tales como: porosidad, discontinuidades, saturación, profundidad del basamento, condiciones del suelo, entre otras de las unidades geológicas de estudio (Kearey et al, 2002).

La prueba utilizada en el presente estudio se conoce como Tomografía Eléctrica Resistiva (TER), utiliza un tendido y equipo multielectrónico para el registro de resistividades aparentes de terreno con el fin de obtener una imagen de un perfil a través de una pseudosección en 2-D, ilustrando las variaciones en el subsuelo de las resistividades de los materiales, estos valores son obtenidos empleando las técnicas numéricas y algoritmos de inversión (elementos finitos, mínimos cuadrados y diferencias finitas) para realizar el cálculo de las resistividades reales de las propiedades del subsuelo permitiendo una interpretación de estas.

La línea geoeléctrica TER_EFR_01 se realizó vía CAI periférico Alto del faro y la línea geoeléctrica TER_EFR_02 se realizó en el tramo noreste de la vía calle 65 sobre el costado este de la quebrada La Loca N°1. Las coordenadas planas de la ubicación de los puntos iniciales y finales de cada una de las TER están consignadas en la siguiente tabla:

Tabla 30. Configuración geométrica de la línea geoeléctrica.

Línea	Inicio		Final		Espaciamiento (m)	Longitud (m)	Orientación de la línea (°)	No° de Electrodos
	E	N	E	N				
TER_EFR_01	880562	1881738	880190	1877211	2.5	60	108	25
TER_EFR_02	880221	1877702	880159	1877663	2.5	72.5	256	30

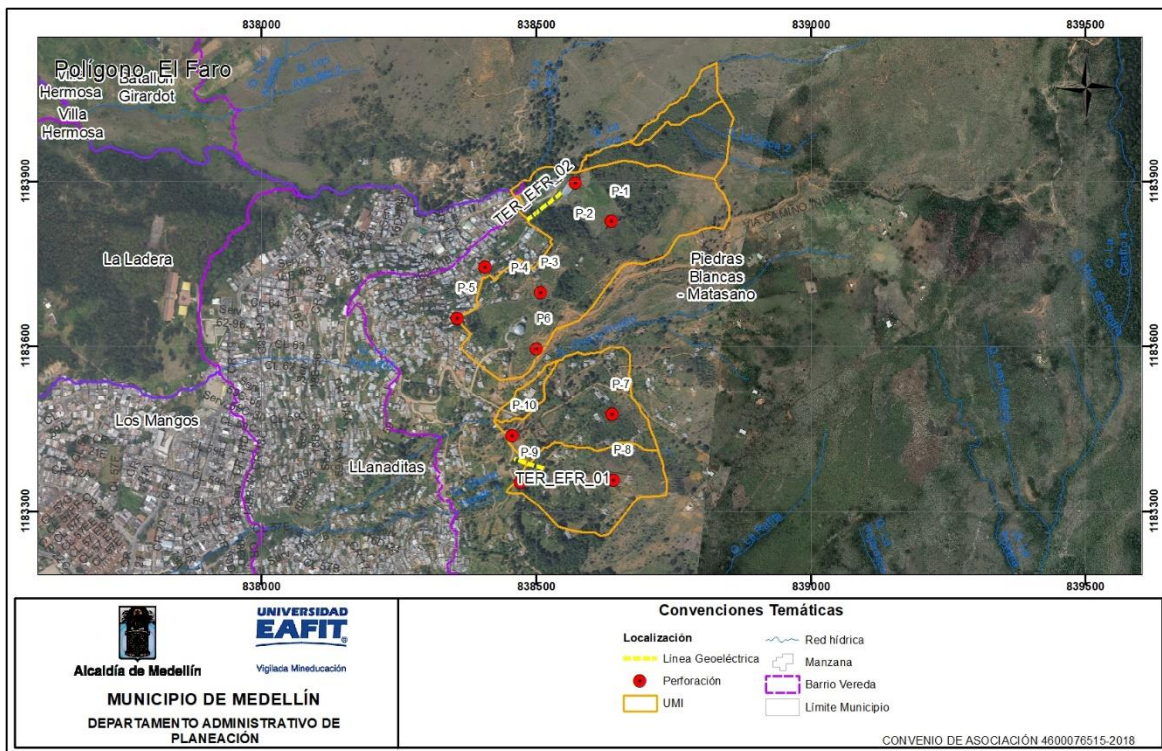


Figura 102. Localización Geográfica para las tomografías eléctricas para el polígono de El Faro.

8.2.1 Análisis de resultados

• TER_EFR_01

Se elaboró en sentido general 108° con una longitud total de 60 metros y con elevaciones que oscilan entre los 2027 y los 2047 m.s.n.m (Figura 103). El tope de penetración máxima de esta tomografía en profundidad es de 12 metros, con alturas de penetración que oscilan entre 2040 a 2028 m.s.n.m. Se utilizaron 25 electrodos espaciados 2.5 metros entre sí. El trazo de la línea permite tener información de la aparente zona del nivel freático y geología local.



Figura 103. Zona de ejecución línea TER_EFR_01

La distribución de resistividades y la litología se correlacionan de la siguiente manera (Figura 104 y Tabla 31):

La primera franja, más cercana a la superficie hacia el centro de la tomografía, con resistividades entre 400 y 550 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de 0 a 1 m de profundidad, se interpreta como **ceniza volcánica (Qcv)**, y a lo largo del perfil en relación con la primera franja sectorizado en 4 partes, se interpreta un **suelo residual** de la unidad conocida como **Dunita de Medellín (JKuM-sr)**, con resistividades entre 180 y 400 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de profundidad entre 1 y 3 m aproximadamente, seguido de la unidad de suelo residual con una profundidad de 5 a 10 m se interpreta como **saprolito de la Dunita de Medellín (JKuM-s)** seco con resistividades entre 50 y 180 ohm-m. Finalmente, la franja más profunda, con resistividades entre 12 a 50 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de 6 a 12 m de profundidad (2037 a 2027 m.s.n.m), se interpreta como el **nivel freático** y la zona saturada ubicada por debajo del mismo compuesto por el **saprolito de la Dunita de Medellín (JKuM-s)**.

Tabla 31. Estratigrafía para la tomografía TER_EFR_01.

ESTRATIGRAFÍA					
Edad	Rango de Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Unidad Geológica para Ingeniería (UGI)
Cuaternario	400 a 550	1	0 a 1	Ceniza volcánica. Limo arcilloso, de baja densidad	Qcv
Jurásico	180 a 400	1 a 3	1 a 3	Suelo residual de Dunita de Medellín (Nivel IB). Limo arcilloso completamente meteorizado.	JKuM-sr
	50 a 180	2 a 3	3 a 6	Saprolito de Dunita de Medellín (Nivel IC): Limo arenoso a limo arcilloso secos	JKuM-s
	Nivel Freático: 6.5 metros				
	12 a 50	2 a 12	6 a 12	Saprolito de Dunita de Medellín (Nivel IC): Limo arenoso a limo arcilloso saturados con agua subterránea	JKuM-s

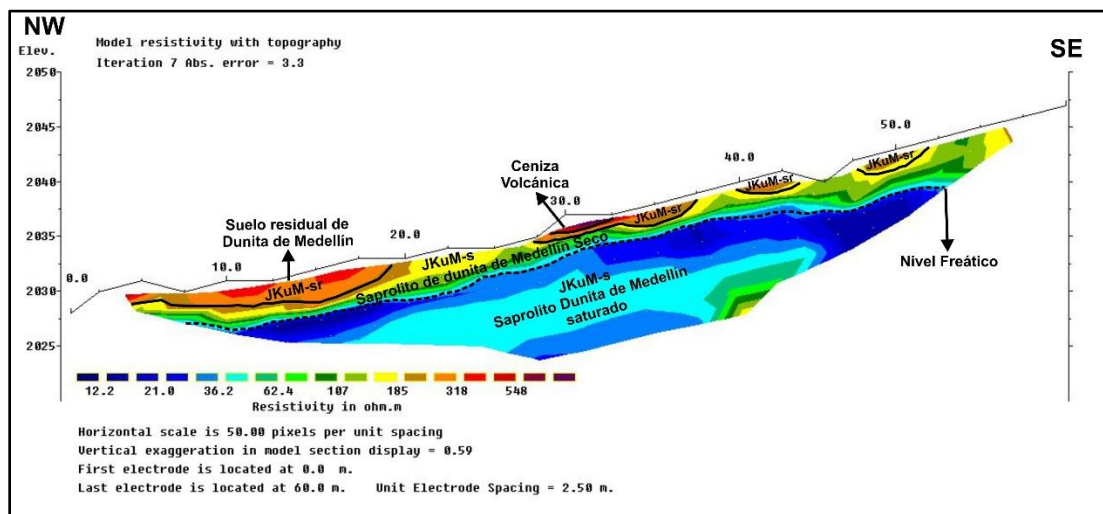


Figura 104. Interpretación de la tomografía TER_EFR_01.

- **TER_EFR_02**

Se elaboró en sentido general 256° con una longitud total de 72.5 metros y con elevaciones que oscilan entre los 2006 y los 2010 m.s.n.m (Figura 105). El tope de penetración máxima de esta tomografía en profundidad es de 15 metros, con alturas de penetración que oscilan entre 2010 a 1994 m.s.n.m. Se utilizaron 30 electrodos espaciados 2.5 metros entre sí. El trazo de la línea permite tener información de la aparente zona del nivel freático y geología local.



Figura 105. Zona de ejecución línea TER_EFR_02.

La distribución de resistividades y la litología se correlacionan de la siguiente manera (Figura 106 y Tabla 32):

La primera franja, más cercana a la superficie, con resistividades entre 30 y 45 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de 0 a 3 m de profundidad, se interpreta como material no consolidado, es decir, **llenos antrópicos (QII)** compuesto por material arcillo limoso y fragmentos de roca y escombros; esta se encuentra en el costado NE del perfil, y a lo largo del perfil en relación con la segunda franja, a 3.3 m de profundidad, se interpreta como el **nivel freático** (2006 m.s.n.m) y la zona saturada ubicada por debajo del mismo compuesto por un **depósito de vertiente (Qfle)** caracterizado por un flujo de lodos y escombros de materiales de limo arenosos a limo arcillosos, hacia el NE del perfil, con resistividades entre 45 y 80 ohm-m, aproximadamente y en un intervalo de profundidad entre 3 y 15 m aproximadamente, en la parte SW con resistividades entre 180 y 400 ohm-m se

interpreta como **roca alterada de la Dunita de Medellín (JKuM-sm)** saturado con agua subterránea con cambios de granulometría y fracturada.

Tabla 32. Estratigrafía para la tomografía TER_EFR_02.

ESTRATIGRAFÍA					
Edad	Rango de Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología	Unidad Geológica para Ingeniería (UGI)
Cuaternario	30 a 45	3	0 a 3	Lleno Antrópico. Arcilla limosa	QII
	Nivel Freático: 3.3 metros				
	45 a 80	12	3 a 15	Depósito de vertiente. Flujo de lodos y escombros. Limo arenoso a limo arcilloso saturado con agua subterránea	Qfle
Jurásico	180 a 400	15	0 a 15	Roca alterada de Dunita de Medellín (Nivel IIA). Fragmentos de Dunita con cambios en la granulometría saturado con agua subterránea	JKuM-sm

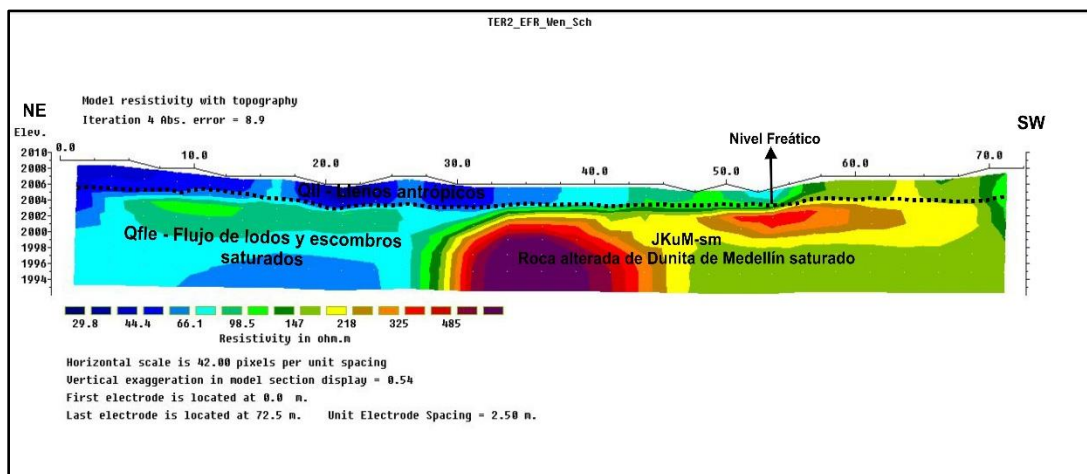


Figura 106. Interpretación de la tomografía TER_EFR_02.

8.3 PERMEABILIDAD

Considerando la permeabilidad como la capacidad de un suelo para permitir el paso de un fluido (en términos particulares, el agua) sin que dicho tránsito altere la estructura interna del suelo, se valoró de manera general la permeabilidad de los suelos superficiales que conforman el polígono El Faro. Para lo anterior, se analizaron los resultados de la exploración geológica de campo, el muestreo de los materiales a partir de los sondeos exploratorios y los resultados de los ensayos de laboratorio practicados a las muestras obtenidas en los sondeos, específicamente lo que corresponde a las clasificaciones granulométricas de los materiales, con los cuales se realizó la valoración relativa de la permeabilidad de dichos materiales, utilizando para esto la información que se muestra en la Tabla 33 extractada de Mecánica de suelos en la ingeniería práctica de Terzaghi y Peck (1980).

Tabla 33. Valores relativos de permeabilidad. (Fuente: Terzaghi K y Peck R, 1980)

Permeabilidad relativa	Valores de K (cm/seg)	Suelo típico
Muy permeable	$> 1 * 10^{-1}$	Grava gruesa
Moderadamente permeable	$1 * 10^{-1}$ a $1 * 10^{-3}$	Arena, arena fina
Poco permeable	$1 * 10^{-3}$ a $1 * 10^{-5}$	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	$1 * 10^{-5}$ a $1 * 10^{-7}$	Limo y arenisca fina
Impermeable	$< 1 * 10^{-7}$	Arcilla

Para el polígono de El Faro, la campaña de exploración del subsuelo y los trabajos de campo permitieron configurar el mapa de formaciones superficiales que muestra la distribución areal de las unidades geológicas en el polígono mencionado. En este se muestra que hacia la zona nororiental existe un predominio de terrenos de alta pendiente donde se observan afloramientos de roca tipo dunita, con alto grado de fracturamiento, suprayacida por escaso material de suelo y eventualmente depósitos coluviales. En este sector, es de esperar que la permeabilidad esté controlada por los patrones de fracturamiento de la roca, desarrollando una permeabilidad secundaria a través de las familias de diaclasas. Para los sectores donde fueron cartografiados algunos depósitos de vertiente tipo coluvión con limos y arcillas como matriz que engloban bloques y fragmentos de roca, la permeabilidad está controlada por la textura de la matriz. Bajo esta consideración, para este sector del polígono es de esperarse valores de permeabilidad (K) que oscilan entre 1×10^{-1} y 1×10^{-3} clasificándolos como materiales moderadamente permeables, por lo que es de esperarse que se produzca una tasa moderada de infiltración, que, sin embargo, está controlada por las altas pendientes de la zona, lo cual ocasiona incremento de la escorrentía y disminución de la infiltración. Para las zonas del extremo nororiental

donde predominan algunos depósitos de vertiente, teniendo en cuenta la textura de la matriz que conforma dichos depósitos, se estima que la permeabilidad tenga valores que oscilen entre 1×10^{-3} y 1×10^{-5} , es decir materiales poco permeables que al igual que los anteriores, dicha permeabilidad está controlada por las altas pendientes del sector.

Hacia la zona centro y sur del polígono, predominan los afloramientos de suelos residuales derivados de la meteorización de las dunitas, donde abundan los limos arcillosos, arcillas y Como se observa en el mapa geológico para la zona centro y sur del polígono existe un predominio de los suelos residuales derivados de rocas tipo dunita, que se clasifican como MH, CH y ML principalmente. La meteorización principalmente química ha desarrollado espesores considerables de estos materiales. Bajo esta consideración es de esperarse que para este sector del polígono en estudio, la permeabilidad de los suelos superficiales pueda clasificarse como muy poco permeable con valores de K entre 1×10^{-5} hasta 1×10^{-7} , por lo que es de esperarse que exista un predominio de la escorrentía sobre la infiltración.

9. ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS

Para el polígono El Faro, la zonificación de amenazas incluye la relacionada como movimientos en masa, debido a que en el acuerdo con el Acuerdo 48 de 2014 la zona analizada se clasifica como de condición de riesgo por este evento.

9.1 AMENAZAS POR MOVIMIENTOS EN MASA

A continuación se presentan la zonificación de amenazas por movimientos en masa llevada a cabo a partir de la combinación de los análisis de estabilidad y los contornos obtenidos por el runout. La descripción de esta metodología se encuentra en detalle en el Anexo 1 y en capítulo 3 del presente informe.

Una vez se obtienen los resultados de los análisis de estabilidad, se extrapolaron a todo el polígono utilizando criterios geomorfológicos, buscando integrar áreas con las mismas características presentes en los perfiles de estabilidad, para lo cual se utilizó el criterio experto del geólogo y geotecnista. Se descartó la utilización de metodologías de superposición de mapas, puesto que en estudios anteriores los técnicos de Planeación Municipal consideraron este tipo de mapas, menos precisos.

9.1.1 Amenaza por estabilidad

Para la zonificación de amenazas por movimientos en masa se utilizó el método determinístico, el cual corresponde a un análisis cuantitativo en el que se calcula el factor de seguridad de cada ladera. Para la aplicación específica del método se elaboran modelos de análisis de estabilidad de taludes con base en la información de detalle obtenida a partir de la información de campo y de la exploración del subsuelo, y se calculan los factores de seguridad al deslizamiento. Estos modelos requieren de información específica sobre estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales, ángulo de fricción interno, y modelos de simulación de niveles freáticos.

Para el análisis de amenaza por estabilidad, el valor límite para el factor de seguridad en el caso estático se toma de acuerdo a lo planteado en el Decreto 1626 de 2015, en el cual se define que para valores inferiores a 1.2 (o $PF > 0.05/\text{año}$) el nivel de amenaza es alto, valores entre 1.2 y 1.5 (PF entre 0.002 y 0.05/año) se clasifican con nivel de amenaza media y factores de seguridad > 1.5 ($PF < 0.002$) se definen con nivel de amenaza bajo.

Para el caso estático se determina la condición de amenaza de acuerdo con el factor de seguridad obtenido, para los casos pseudoestático y saturado se tomarán como valores de referencia los correspondientes a la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla presentada en los diferentes análisis realizados es un valor adimensional y corresponde a la probabilidad de que ocurra una falla en el talud, dado que se está presentando un escenario específico, por ejemplo, en el caso pseudoestático la probabilidad de falla presentada corresponde a la probabilidad de falla dado que en ese momento se está presentando el sismo definido, sin embargo, para obtener la probabilidad real debe considerarse también la probabilidad que el sismo realmente ocurra.

La lluvia y el sismo son los factores detonantes considerados dentro de los escenarios planteados y estos factores se encuentran asociados a un periodo de retorno determinado, por lo tanto, la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento viene definido por $1/Tr$, donde Tr es el periodo de retorno del factor detonante con unidades 1/año; al realizar el producto de esta probabilidad de ocurrencia por la probabilidad de falla presentada en cada modelo se obtendrá la probabilidad final para cada escenario analizado, (la cual responde a la probabilidad de que ocurra X dado que ocurrió Y), por ejemplo, la probabilidad de que se dé un deslizamiento dado que se está presentando el sismo (que es finalmente el factor detonante).

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, y considerando que el periodo de retorno del sismo incorporado en los análisis es de 475 años ($PF=0.0021/\text{año}$) se calculan las probabilidades de falla para este escenario y se presentan en cada perfil de manera detallada, lo cual se presenta de manera similar para el escenario saturado donde el periodo de retorno es de 54,6 años.

9.1.1.1 Amenaza en condiciones estáticas

Basado en la metodología anterior, y en los rangos definidos por el Decreto 1626 de 2015 se definieron las siguientes zonas de amenazas para el polígono de desarrollo (Figura 107):

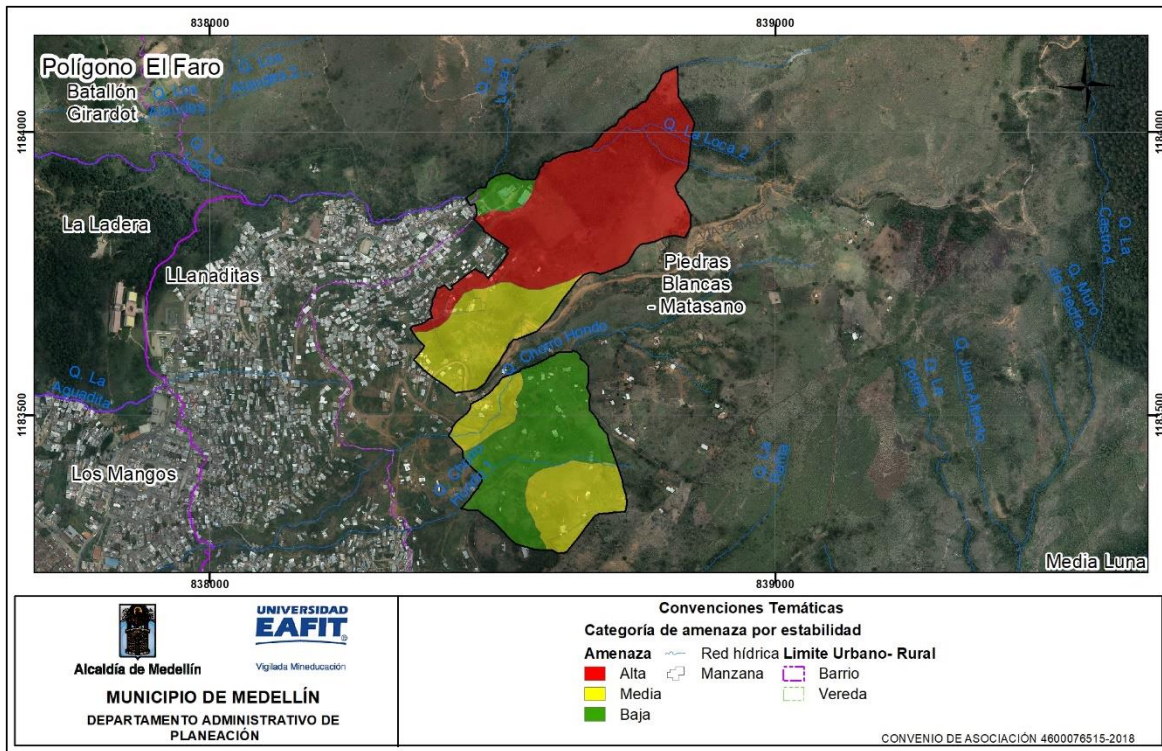


Figura 107. Zonificación de amenazas por estabilidad para el polígono El Faro

Amenaza alta: corresponde a zonas con una alta probabilidad de presentar movimientos en masa debido a que se encuentran afectadas por procesos geológicos activos e inactivos naturales y antrópicos, presentan pendientes muy abruptas a escarpadas y los suelos presentan altas restricciones para el establecimiento de intervenciones. Estas zonas se encuentran directamente relacionadas con las áreas de morfodinámica alta y se consideran como zonas potencialmente inestables en cuanto a procesos geológicos.

Bajo esta categoría se encuentra el costado nororiental de la zona de estudio, asociado a la vertiente sur de la quebrada La Loca, en la zona aledaña a la finca Las Nubes. Estas zonas geológicamente se encuentran conformadas por suelos residuales, rocas parcialmente meteorizadas, además de depósitos de vertiente, los cuales desarrollan lomos de laderas cortas cóncavas y convexas de pendientes muy abruptas a escarpadas. Asociado a esta zona se identifican deslizamientos de tipo traslacional principalmente, tanto activos como inactivos.

Asociado a esta zona, se analizaron los resultados de los análisis de estabilidad correspondientes al perfil 1 donde en condiciones actuales se identificó un factor de

seguridad de 1.22, indicativo de unas condiciones de estabilidad moderadas, donde se esperan movimientos de velocidad alta que pueden alcanzar espesores hasta de 5 metros. Sin embargo, es necesario evaluar otros factores que influyen en la definición y caracterización de la amenaza por movimientos en masa, tales como la presencia de procesos morfodinámicos, las condiciones topográficas y acciones antrópicas que modifican los terrenos.

Para el caso del polígono El Faro se reportan varios procesos de remoción en masa, la mayoría inactivos, de poco espesor y que comprometieron áreas poco extensas. Así mismo, las condiciones de alta pendiente que caracterizan los terrenos del sector nororiental del polígono se constituyen en un factor importante a la hora de definir la susceptibilidad de estos terrenos a la formación de inestabilidades. Si a lo anterior, se agrega que corresponde a suelos rurales con vocación forestal, es necesario replantear la zonificación de la amenaza por movimientos en masa, que bajo los análisis de estabilidad la clasificaron como media, para clasificarla como alta, por los aspectos antes mencionados.

Amenaza Media: Corresponde a zonas con una moderada probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa y que presentan procesos geológicos generalmente inactivos los cuales podrían reactivarse si no se toman correctivos. Aunque los procesos morfodinámicos en estas zonas no abundantes, su composición geológica y las altas pendientes hacen que esta zona sea más susceptible a este tipo de amenaza, por eso requieren un especial cuidado, ya que la amenaza media puede convertirse fácilmente en amenaza alta, si los usos del suelo no son adecuados.

Este tipo de amenaza se encuentra ampliamente distribuida en la zona de estudio, por lo que se identifica en tres sectores principalmente: el primero de ellos en la zona noroccidental, entre el camino a la Cuesta y el sendero que comunica la finca las Nubes y el sector del Faro, incluyendo el sector donde se localiza el tanque de Llanaditas. La segunda zona se extiende sobre ambos márgenes de la quebrada Chorrohondo; y finalmente la tercera zona se localiza al sur, asociado a las laderas que definen el Cerro de La Cruz. Estas zonas se desarrollan sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y en ella se identifican principalmente movimientos en masa, la mayor parte de ellos superficiales y asociados a los procesos de intervención antrópica a los que se ha visto sometida la zona.

Asociado a estas zonas de amenaza media se analizan los resultados de los perfiles 1 y 2, donde se obtienen factores de seguridad de 1.22 y 1.44 en condiciones estáticas, presentando deslizamientos de velocidad media a alta con superficies de

falla moderadamente profundas, asociados a las zonas de contacto entre el suelo residual y la roca más competente. Se destaca que este factor de seguridad indica que es probable la formación de inestabilidades asociadas al tipo de material detectado y a las altas pendientes del sector y no satisface los valores de factor de seguridad estipulados en los códigos para garantizar la estabilidad de la zona, por lo que se determina un nivel de amenaza media.

Amenaza Baja: Esta categoría de amenaza se extiende principalmente hacia el costado sur de la zona analizada, incluyendo la zona comprendida entre las quebradas Chorrohondo y Chorrohondo 1, y en un pequeño sector al costado nororiental donde se localiza la casa de la Finca Las Nubes. Esta zona se caracteriza por presentar pendientes predominantemente inclinadas y puntualmente suaves en zonas intervenidas antrópicamente, conformadas por suelos residual de la Dunita de Medellín, que definen laderas largas de aspecto irregular. No se identifican movimientos en masa.

Asociado a estas zonas de amenaza baja se analizan los resultados de obtenidos en los perfiles 4 y 5, donde se obtienen factores de seguridad de 2.6 y 2.1 respectivamente indicativos de condiciones óptimas de estabilidad. Igualmente se analizan los resultados del análisis de estabilidad del perfil 1 en donde no se observa la generación de superficies de falla asociadas a esta parte baja de dicho perfil, esto posiblemente relacionado con las condiciones de pendiente.

El mapa de zonas homogéneas geotécnicas corresponde al mapa de estabilidad, dado que este homogeniza las condiciones geotécnicas en los diferentes rangos de amenaza, los cuales son producto de los factores de seguridad obtenidos en cada uno de los perfiles analizados.

9.1.1.2 Amenaza en condiciones saturadas

El cálculo de la amenaza en condiciones saturadas se realizó a partir de los factores de seguridad obtenidos en los perfiles analizados bajo una condición de saturación de los materiales que componen el perfil de suelos, para los cuales se obtuvieron valores de 1.07, 1.2 y 1.18 para los perfiles 1, 2 y 3, por lo que la amenaza en esta condición se califica como alta.

Para los perfiles 4 y 5, se obtuvieron factores de seguridad de 2.16 y 1.64 respectivamente por lo que la amenaza se calificaría como baja, sin embargo, en la

zonificación final, es necesario evaluar otros factores que influyen en la definición y caracterización de la amenaza por movimientos en masa, tales como la presencia de procesos morfodinámicos activos, las condiciones topográficas (alta pendiente) y las acciones antrópicas que modifican la zona, por lo que teniendo en cuenta lo anterior, se define un nivel de amenaza medio en dichas zonas, tal y como se realiza para el análisis estático.

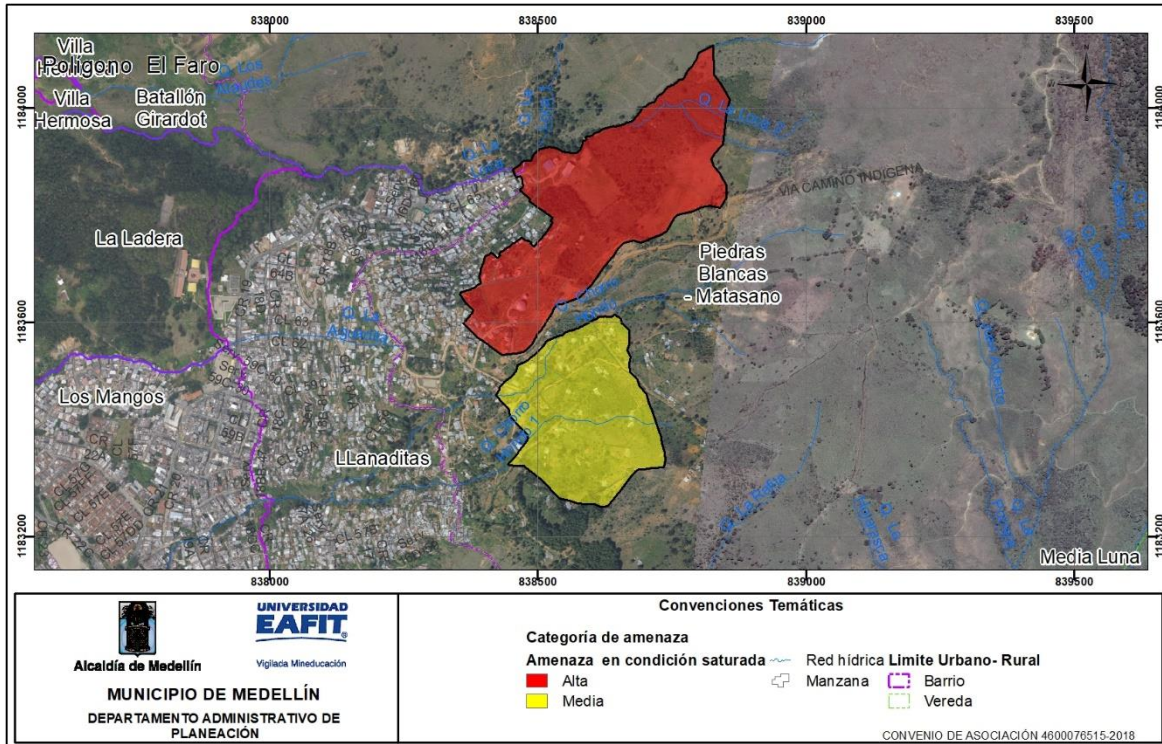


Figura 108. Zonificación de amenazas por estabilidad en condiciones saturadas para el polígono El Faro

9.1.2 Amenaza por runout

Una vez calificada y analizada la amenaza por estabilidad, se ubicaron puntos a lo largo de la parte alta de la zona de falla, para poder conocer la altura desde la cual podría desprenderse el movimiento en masa, y por medio del modelo de elevación digital se obtuvieron los parámetros para poder conocer cuáles serían las distancias y el recorrido que podría tomar dicho deslizamiento. De acuerdo con la metodología aplicada (Guimarães, 2015), el contorno 0.4 representa una probabilidad del 90% de que hasta esta zona pueda desplazarse los materiales asociados a la ocurrencia de un movimiento en masa.

Para el polígono de El Faro los análisis del runout muestran que los deslizamientos que se generan al costado norte, hacia la parte alta de la zonas de amenaza alta y media por estabilidad, es decir a la altura del camino a la Cuesta, tienen probabilidad de descender hasta el cauce de la quebrada La Loca, por fuera de la zona de estudio, por lo que se requeriría ampliar el polígono de análisis (Figura 109). Sin embargo, hacia la parte media y baja de esta zona, es decir, en el sector de Golondrinas, ya se cuenta con estudios de detalle llevados a cabo en años anteriores, por lo que prevalecen las condiciones de amenaza identificadas en dichos estudios sin generarse la ampliación correspondiente al runout.

Hacia el costado sur, el análisis de runout muestra que los deslizamientos que se generen hacia la zona altas, asociado a la pendiente y las características de la ladera tienen poca distribución y expansión, quedando incluidos dentro de la misma mancha de amenaza establecida (Figura 109).

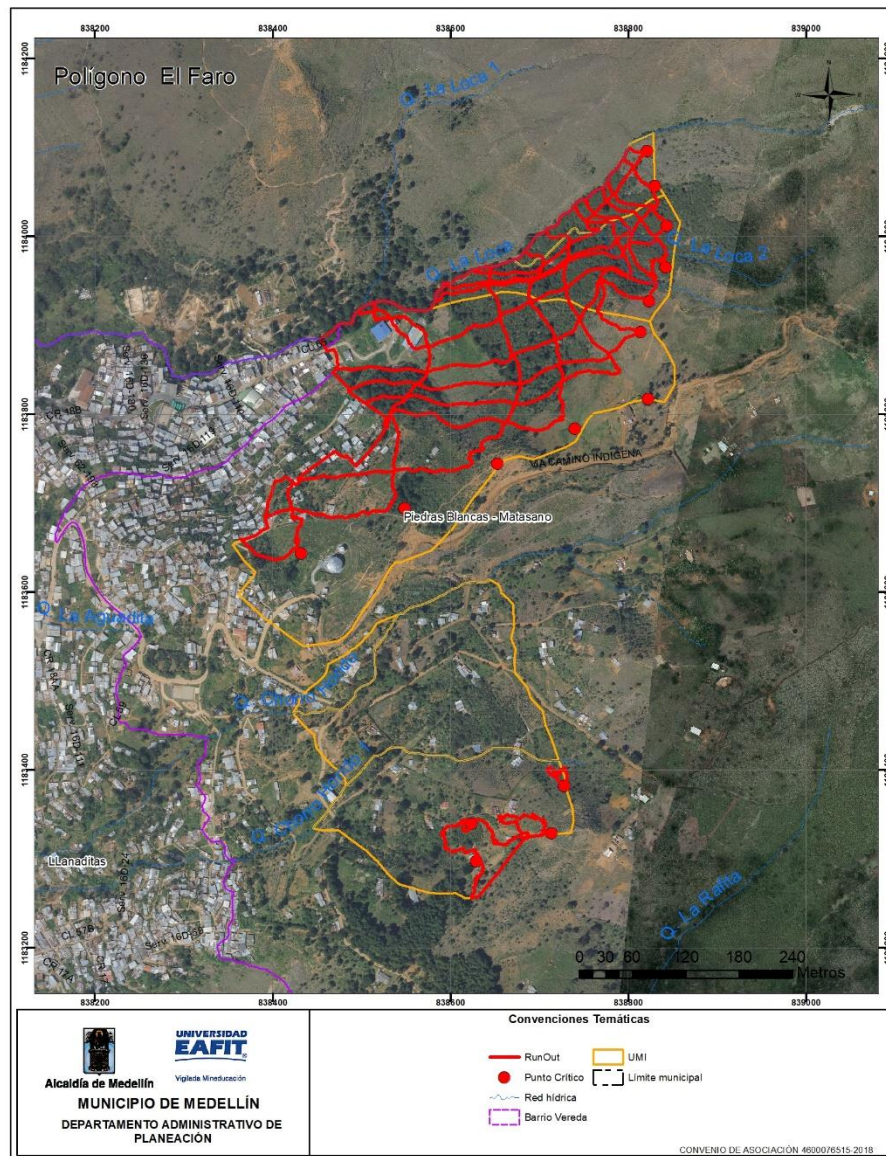


Figura 109. Contornos de runout para el polígono El Faro

9.1.3 Amenaza total

La definición de la amenaza final resulta de la combinación de la amenaza obtenida mediante el método determinístico (análisis de estabilidad) y la distancia de viaje (runout), debido a que es necesario establecer tanto la zona donde hay probabilidad de que se generen los movimientos en masa, como su zona de influencia y depositación. Teniendo en cuenta lo anterior, el nivel de amenaza para una zona está condicionado tanto a la estabilidad propia del terreno en condiciones estáticas como a la probabilidad de que se vea afectada por la depositación de materiales

asociados a movimientos en masa que se generen en la zona circundante. Se destaca que la valoración de la amenaza de las zonas afectadas por runout depende directamente del nivel de amenaza obtenido en la zona con probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa (Ver anexo 1 y capítulo 3).

Teniendo en cuenta lo anterior, para el polígono El Faro, se identifican zonas de amenaza alta, media y baja por movimientos en masa, que exhiben una distribución muy similar a la obtenida en la amenaza por estabilidad, debido a que las afectaciones por runout solo condicionan el costado nororiental de la zona analizada (Figura 110):

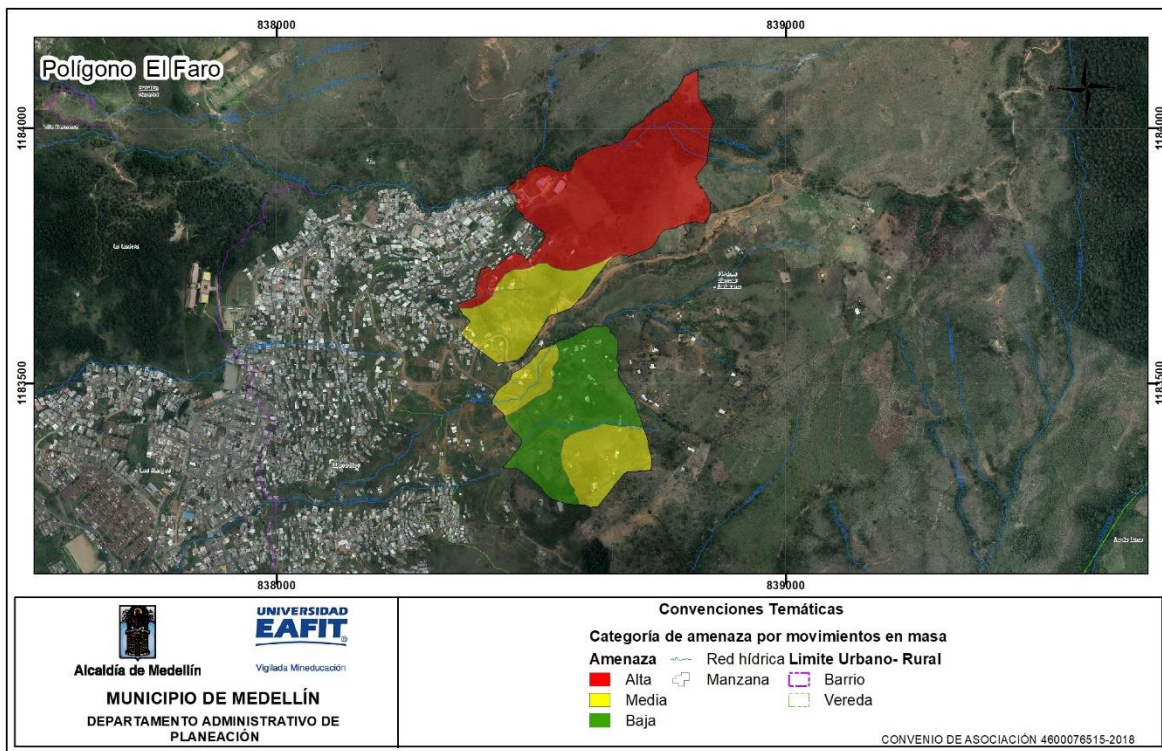


Figura 110. Zonificación de amenaza por movimientos en masa para el polígono El Faro

Amenaza Alta: Según el POT (2014) corresponden a áreas con inestabilidad manifiesta o con alta probabilidad de presentar movimientos en masa o ser afectadas por el material desplazado, debido a la acción en conjunto de la lluvia, la geología, la geomorfología y factores antrópicos.

Corresponde al costado nororiental de la zona de estudio, asociado a la vertiente sur de la quebrada La Loca, en la zona aledaña a la finca Las Nubes.

En estas zonas el nivel de amenaza alta está dada porque a lo largo de dichas laderas, existe una probabilidad alta a la ocurrencia de movimientos en masa, donde se obtienen factores de seguridad de 1.22 en condiciones actuales, cuyos materiales movilizados favorecido por las pendientes y la diferencia de altura, pueden llegar a depositarse hasta el cauce de la quebrada. Se destaca que esta zona exhibe una morfodinámica importante, donde se cartografiaron deslizamientos principalmente de tipo traslacional y esperan movimientos de velocidad alta que pueden alcanzar espesores hasta de 5 metros.

Amenaza media: De acuerdo con el POT (2014) son áreas con un nivel medio de probabilidad que se presenten movimientos en masa o ser afectadas por el material desplazado, debido a la acción en conjunto de la lluvia, la pendiente y en alguna medida a factores antrópicos. Presentan procesos morfodinámicos generalmente inactivos de poca densidad que pueden reactivarse si no se llevan a cabo acciones correctivas, en especial con el uso del suelo.

Este tipo de amenaza se encuentra ampliamente distribuida en la zona de estudio, por lo que se identifica en tres sectores principalmente: el primero de ellos en la zona noroccidental, entre el camino a la Cuesta y el sendero que comunica la finca las Nubes y el sector del Faro, incluyendo el sector donde se localiza el tanque de Llanaditas. La segunda zona se extiende sobre ambos márgenes de la quebrada Chorrohondo; y finalmente la tercera zona se localiza al sur, asociado a las laderas que definen el Cerro de La Cruz.

La amenaza en estos sectores está dada porque las zonas exhiben una moderada probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, dada por la obtención de factores de seguridad de 1.22 y 1.44 respectivamente en condiciones estáticas, y en el análisis de runout no se obtiene probabilidad de verse afectada por la acumulación de materiales asociados a la ocurrencia de movimientos en masa en la zona aledaña. En esta zona se esperan deslizamientos de velocidad media a alta con superficies de falla moderadamente profundas, asociados a las zonas de contacto entre el suelo residual y la roca más competente.

Amenaza baja: Según el POT (2014) corresponden a áreas con aceptables condiciones de estabilidad, sin evidencias físicas o históricas de procesos morfodinámicos, o si existen, su densidad es baja, con baja probabilidad de que se presenten movimientos en masa o ser afectadas por el material desplazado, debido a la acción en conjunto de la lluvia acumulada y las pendientes.

Este nivel de amenaza sólo se identifica hacia el costado sur de la zona analizada, incluyendo la zona comprendida entre las quebradas Chorrohondo y Chorrohondo 1, donde la amenaza por estabilidad es baja debido a que se obtienen factores de seguridad de 2.6 y 2.1, y en el análisis de runout no se obtiene probabilidad de verse afectada por la acumulación de materiales asociados a la ocurrencia de movimientos en masa en la zona aledaña.

10. VULNERABILIDAD

A continuación, se presenta el análisis de la vulnerabilidad por movimientos en masa para el polígono El Faro. Inicialmente se analizará el análisis para las construcciones y posteriormente para las líneas vitales. Al final del capítulo se presentará la estimación para personas, la cual se basa en datos de información secundaria y en aproximaciones a partir de la vulnerabilidad de las construcciones. La descripción de esta metodología se encuentra en detalle en el Anexo 1 y en capítulo 3 del presente informe.

De manera general, en el polígono del Faro se analizaron 176 construcciones, de las cuales son afectadas por la zona delimitada por el movimiento en masa 63 edificaciones, 40 postes de energía y 19 vías, esta información proviene de la evaluación realizada en campo, de su estructuración y almacenamiento en una base de datos y su procesamiento posterior (anexo 5).

10.1 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS CONSTRUCCIONES POR MOVIMIENTO EN MASA

La vulnerabilidad de las construcciones consta de dos factores: la fragilidad y la intensidad. El primero de ellos corresponde a la respuesta del elemento expuesto ante determinada amenaza y depende de las características propias, mientras que la intensidad depende de las características del fenómeno amenazante (velocidad, volumen de la masa deslizante, profundidad, entre otras).

10.1.1 Cálculo de la fragilidad de las construcciones

Para la identificación de la fragilidad de las construcciones, se tuvo en cuenta la evaluación o análisis de los parámetros predominantes de las estructuras expuestas, los cuales son: tipología estructural, edad de la construcción, cantidad de niveles de la edificación y estado de conservación de la misma, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico con la siguiente expresión (anexo 1).

$$S_e = 1 - \pi(1 - S_i)$$

$$S_e = 1 - (1 - S_{tip})(1 - S_{alt})(1 - S_{con})(1 - S_{ed})(1 - S_{Acueducto})(1 - S_{Alcantarillado})$$

Donde se consideran seis parámetros para la evaluación de la fragilidad de las edificaciones:

S_{tip} : Tipo de la edificación.

S_{alt} : Altura de la edificación.

S_{con} : Conservación de la edificación.

S_{ed} : Edad de la edificación.

$S_{Acueducto}$: Caracterización del sistema de acueducto de la edificación.

$S_{Alcantarillado}$: Caracterización del sistema del alcantarillado de la edificación.

De acuerdo con la Figura 111 se puede concluir que el 92% de las construcciones analizadas en el polígono denominado El Faro, presentan fragilidades altas, referenciadas en un rango entre 0.7 y 1, con un valor representativo de 58 edificaciones, las cuales se encuentran ubicadas de manera muy dispersa en la parte superior del polígono en límites con el corregimiento de Santa Elena y un poco más consolidadas en la parte intermedia (Figura 111, Figura 113 y Figura 114). El 8% restante pertenece a 5 edificaciones con fragilidad baja, referenciadas en un rango entre 0 y 0.5.

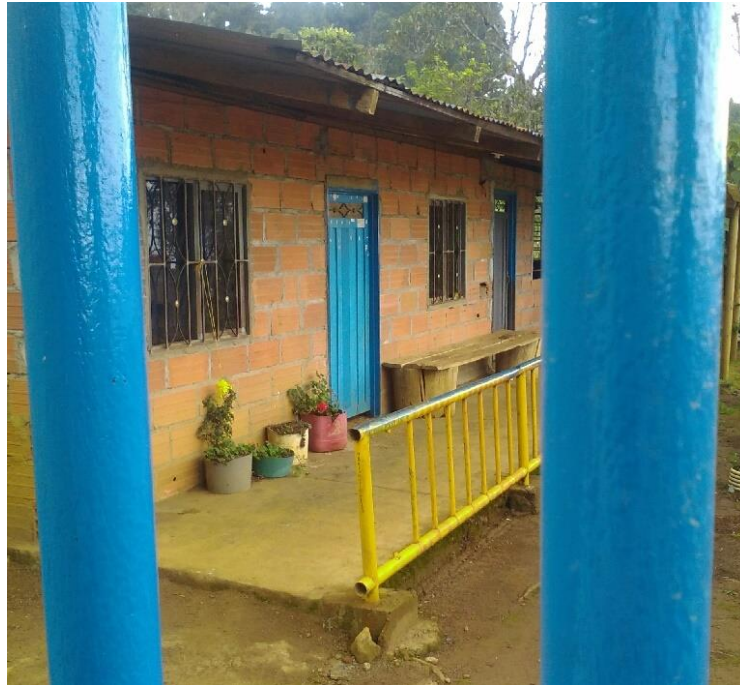


Figura 112. Tipología estructuras ligeras (E). Construcción ubicada en el polígono El Faro.

En la Figura 113, se visualiza una estructura que se clasifica como construcción improvisada dentro de la tipología F, la cual se caracteriza por no poseer una estructura definida y suele ser construida con materiales precarios o de recuperación, paneles de madera desgastados, metal, entre otros, estas estructuras no tienen un sistema de cimentación definido y usualmente se encuentran ubicadas en los puntos más altos o donde se visualizan grandes cambios de pendiente. Esta tipología representa el 41% de las construcciones del polígono.



Figura 113. Tipología construcciones simples (F). Estructura ubicada en el polígono El Faro.

En la Figura 114 se puede visualizar una estructura que tiene un valor de fragilidad intermedio asociado; la misma se puede clasificar como tipología D o estructuras con confinamiento deficiente e híbridas, ya que, si bien no cuentan con un confinamiento adecuado, tienen elementos estructurales que hacen que la edificación sea menos vulnerable, como columnas de sección menor y cimentaciones de zapatas. Esta tipología se encuentra representada en el 22% de las construcciones del polígono.



Figura 114. Tipología estructuras con confinamiento deficiente e híbridas (D). Estructura ubicada en el polígono El Faro

10.1.2 Cálculo de la intensidad sobre las construcciones.

En la valoración de la intensidad de los eventos amenazantes se tienen en cuenta dos tipos de movimientos que producen deformación en el terreno, el movimiento lento y el movimiento rápido.

En el polígono de estudio se presentan los movimientos rápidos, definidos en un escenario de desplazamiento en etapa de falla, donde se calcula la intensidad, en función de la relación entre la presión de impacto del deslizamiento y la presión límite soportada por la edificación, además, se debe tener en cuenta la relación existente entre la profundidad de la falla del deslizamiento y la altura de la edificación, descritos en el capítulo de Análisis Geotécnico. En el polígono El Faro se identifica una intensidad alta para el 92% construcciones evaluadas; como se mencionó anteriormente dicha intensidad está en función de la profundidad y la presión de impacto.

Para estructuras de tipología ligeras (E), las cuales son el 27% del total de las construcciones evaluadas, la presión límite de la estructura es 5 Kpa, del mismo modo para una presión límite se presenta una velocidad límite, la cual indica que los movimientos en masa a esas velocidades provocarían el colapso total de las estructuras (Figura 115).

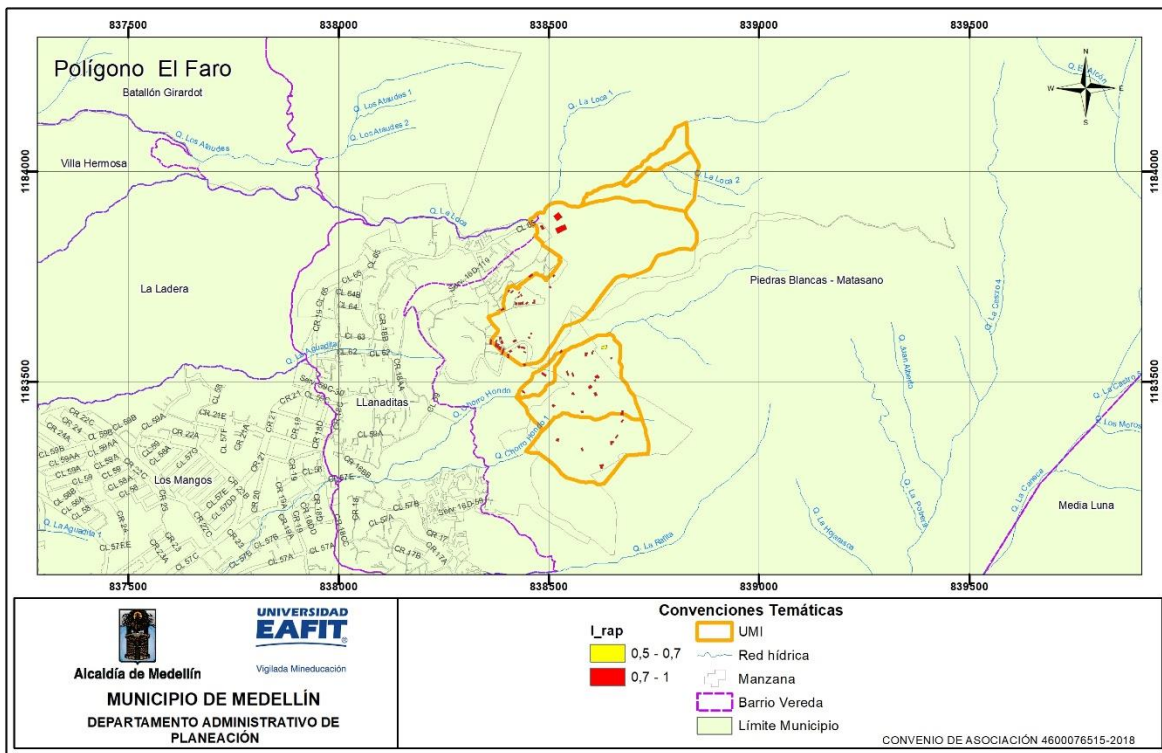


Figura 115. Distribución espacial de la intensidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.1.3 Cálculo de la vulnerabilidad de las construcciones

El grado de vulnerabilidad de una edificación se define como el factor de exposición de la misma a percibir daños a causa de amenazas naturales, conforme a esta premisa la vulnerabilidad se calcula teniendo presente los resultados obtenidos de la fragilidad y de la intensidad a partir de los parámetros representados en los ítems analizados anteriormente.

Los valores de la vulnerabilidad se determinan en los siguientes rangos: vulnerabilidad baja, cuando se obtienen resultados menores o iguales a 0,1, vulnerabilidad media cuando se obtienen resultados entre 0,1 y 0,5, y vulnerabilidad alta, cuando los resultados sobrepasan de 0,5 todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.4. (Anexo 1).

La vulnerabilidad alta corresponde al 100% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y altos a medios de intensidad; y estar ubicadas en el centro y sur del polígono (Figura 116).

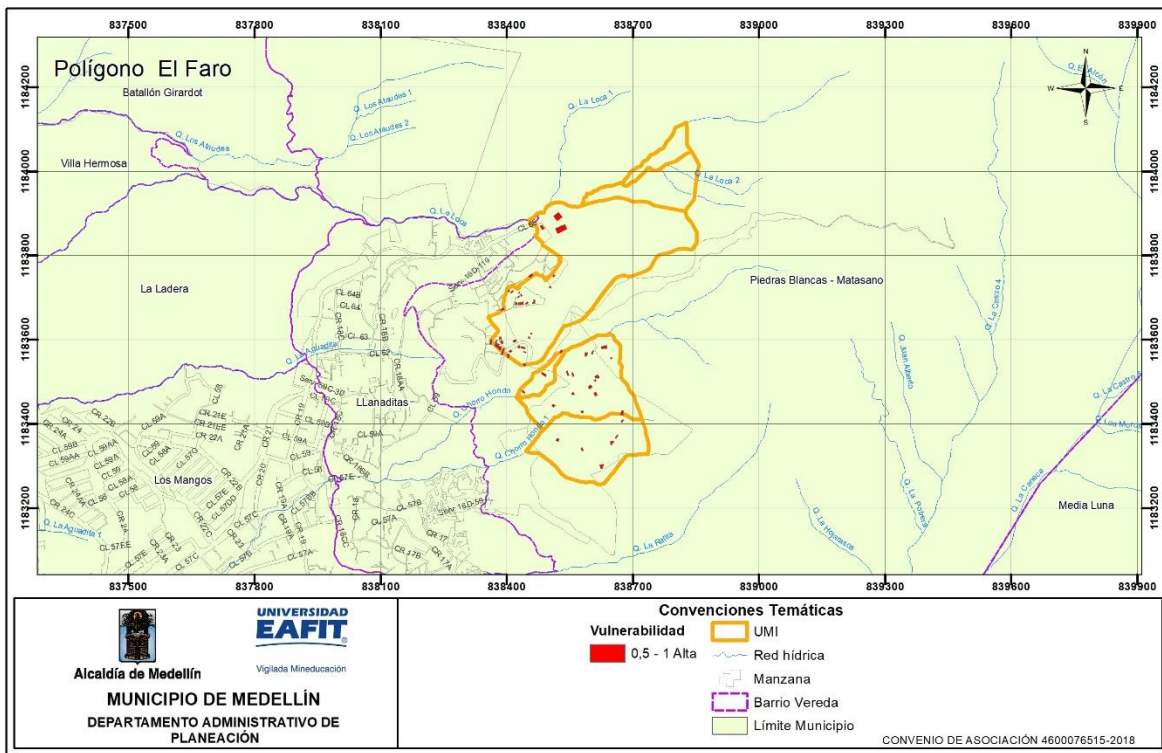


Figura 116. Distribución espacial de la vulnerabilidad de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.2 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS LÍNEAS VITALES POR MOVIMIENTO EN MASA

Similar al procedimiento, los parámetros y características que se utilizan para determinar la vulnerabilidad en construcciones, se deberá calcular la fragilidad conforme la información obtenida de campo y los criterios de medición en cada una de las denominadas líneas vitales (vías, energía, acueducto y alcantarillado, estos últimos dos cuando se identifican daños visibles en puntos específicos de la red) y luego se procede a realizar la evaluación de la intensidad.

Para el polígono El Faro se analizaron 40 postes de energía, 19 vías, 49 redes de acueducto y 25 de alcantarillado, las cuales corresponden al componente de líneas vitales (Anexo 5).

10.2.1 Cálculo de la fragilidad de la línea vital – energía

La fragilidad de la línea vital energía se mide teniendo en cuenta los parámetros de carga y estado de las redes localizadas en la zona de estudio del polígono denominado El Faro.

En el polígono El Faro se encontraron 40 postes, de los cuales 13 de ellos están en mal estado, es decir, agrietados y/o fisurados, éstos postes que presentan avería son todos de madera (13 unidades), por ende, su carga mínima de rotura es 0 (KgF), lo que hace que tengan una fragilidad de 1; con respecto a su localización, podemos decir que los mismos están ubicados de manera dispersa en el polígono (Figura 117).

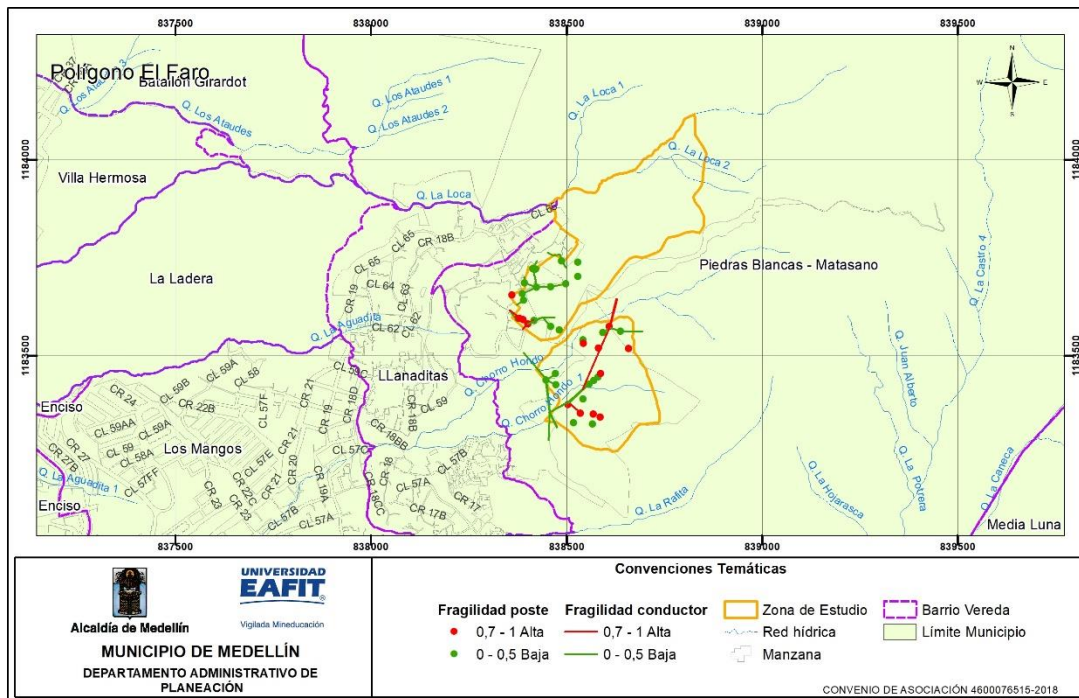


Figura 117. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.2.2 Cálculo de la intensidad de la línea vital – energía

Para la determinación de la intensidad en movimientos rápidos, como es el caso del polígono estudiado, el parámetro de intensidad en función de la presión de tierras crítica, se expresa como la relación entre la altura del deslizamiento y la altura nominal del poste (Anexo 1).

Con base en el criterio mencionado anteriormente y teniendo presente el valor de la tolerancia que tiene el material de los postes de energía se realiza el cálculo de la intensidad, para esto, se evalúa la mitad de la deflexión máxima permitida en el diseño de los postes, correspondiente al 3% de la altura nominal de estos.

Cuando se presenta el fenómeno de movimientos rápidos, como es el caso del polígono estudiado, el parámetro de intensidad en función de la presión de tierras crítica, se expresa como la relación entre la altura del deslizamiento y la altura nominal del poste (Anexo 1).

La intensidad de las líneas vitales energía en el polígono El Faro es alta con un 95% de los postes que se encuentran en el polígono, los cuales se localizan distribuidos de manera homogénea en la zona de estudio. Dicho resultado se debe a la relación que hay entre la altura del deslizamiento y la altura nominal de los postes, lo que indica que para los elementos que se encuentran dentro de la zona de viaje del deslizamiento, el mecanismo de impacto puede ser enterramiento e impacto. Adicionalmente se identifican 2 postes con intensidad media, representados porcentualmente con el 5% de la red de energía evaluada (Figura 118).

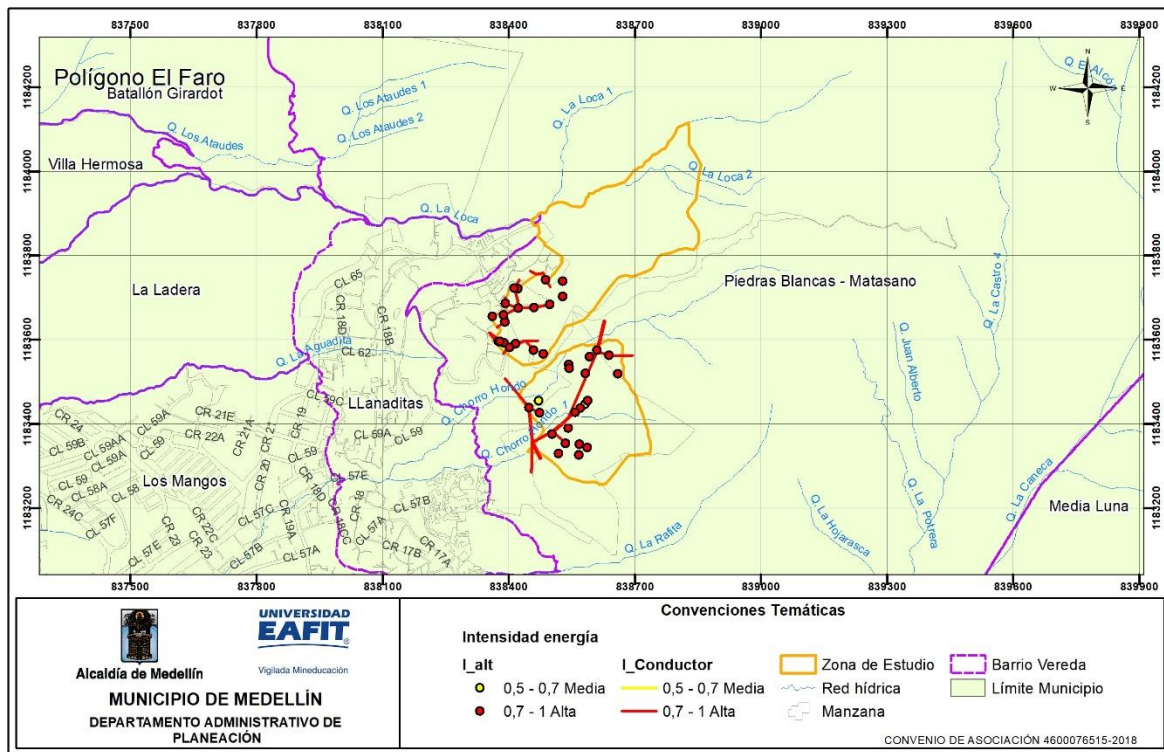


Figura 118. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.

10.2.3 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – energía

La vulnerabilidad alta corresponde al 33% de los postes de energía evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y altos a medios de intensidad, los postes con esta vulnerabilidad se ubican en el centro del polígono.

La vulnerabilidad media corresponde al 67% de los postes de energía evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores medios a bajos de fragilidad y medios a altos de intensidad, y estar ubicados en el occidente y suroriente del polígono (Figura 119).

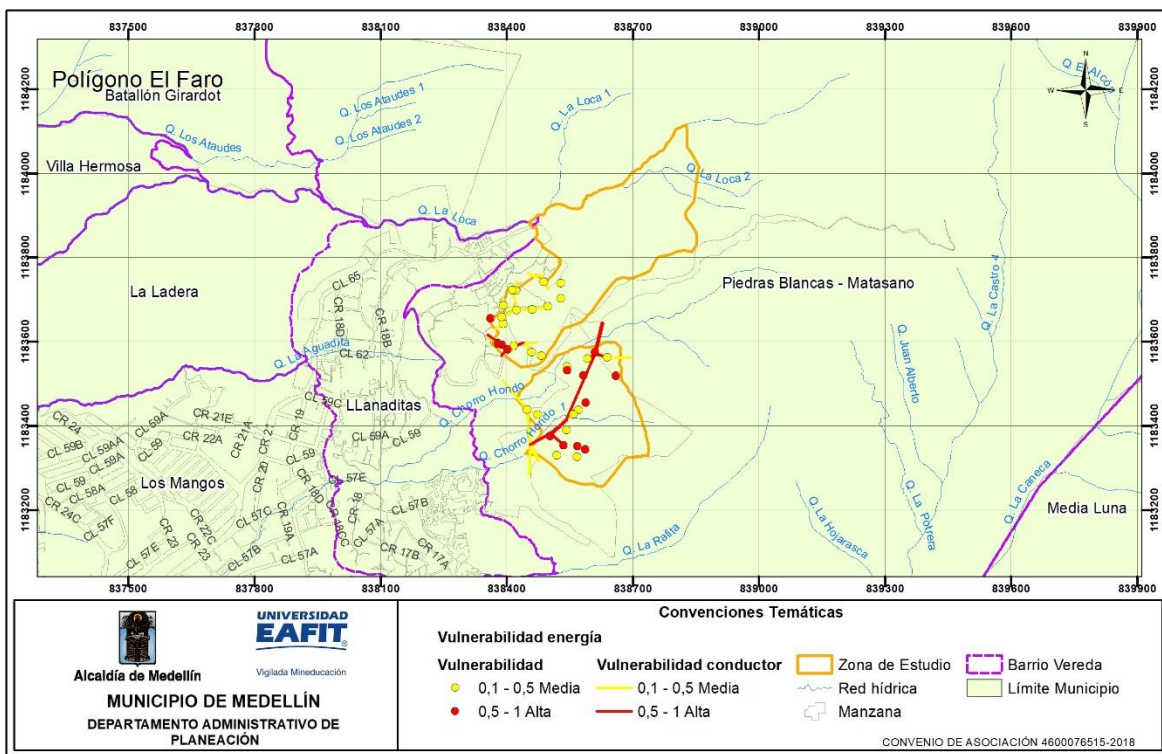


Figura 119. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital energía por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.

10.2.4 Cálculo de la fragilidad de la línea vital – vías

Para la valoración de la fragilidad de las vías, se consideran los parámetros de material o tipo, existencia de obras de drenaje y presencia de daños. La tipología de estas vías puede ser: vehicular, puente vehicular o peatonal, sendero peatonal a nivel y a desnivel (con escaleras).

Las vías de acceso del polígono que están representadas en color amarillo evidencian valores medios de fragilidad entre 0,5 y 0,7 debido a la presencia de daños como baches, fisuras entre otras que comprometen el ancho útil de la misma, correspondientes al 11%. Adicionalmente la falta de obras de drenaje hace que aumente la fragilidad de los accesos viales ya que la gran mayoría de las vías internas del polígono corresponden a vías locales como andenes de circulación, conformados por pavimento rígido a nivel y desnivel; la mayoría de tramos de vías que se identificaron en el polígono de estudio obtuvieron valoración entre 0,7 – 1 que representa una fragilidad alta, con un valor porcentual del 89% y se encuentran ubicadas de manera uniforme en el polígono (Figura 120).

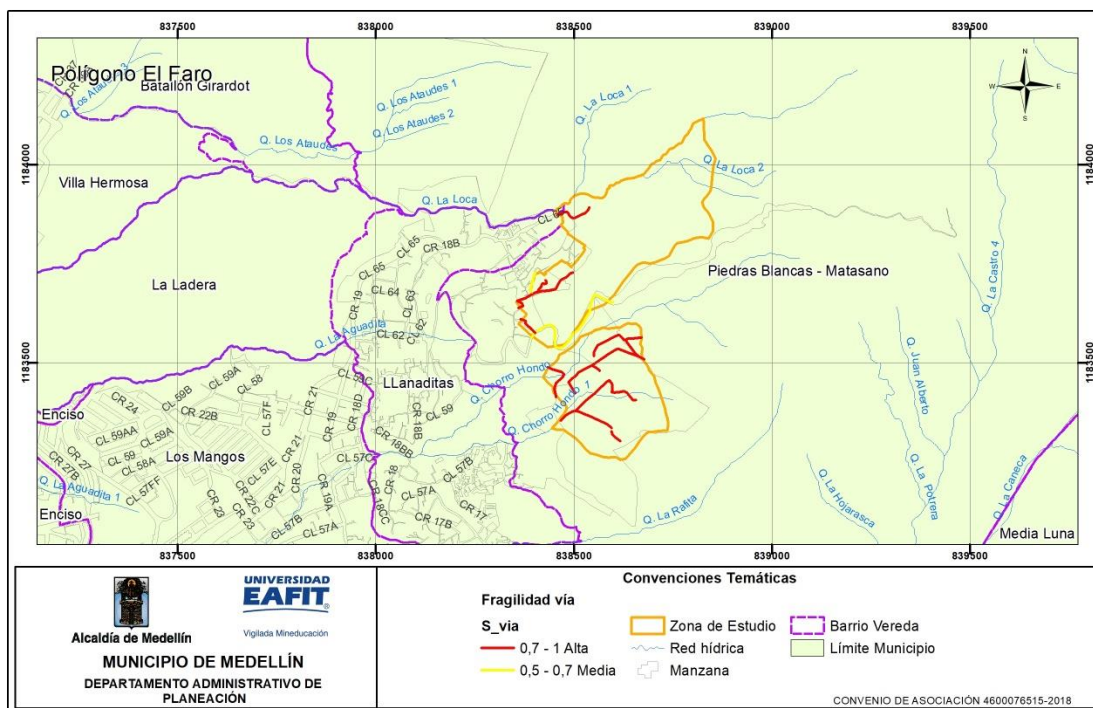


Figura 120. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.

10.2.5 Cálculo de la intensidad de la línea vital – vías

La determinación del parámetro de intensidad en movimientos rápidos para redes viales se define a partir de la ocupación por la masa deslizada o el ancho de vía invadido (determinado a partir de la distancia de viaje calculada de acuerdo con los métodos presentados en el capítulo de amenaza de la Metodología General).

La intensidad alta corresponde al 37% de las vías evaluadas, las cuales se define a partir del ancho invadido u ocupado por la masa deslizada, en el caso de registrarse

un movimiento, las vías con esta intensidad se localizan en el occidente del polígono.

La intensidad baja corresponde al 63% de las vías evaluadas, las cuales se define a partir del ancho invadido u ocupado por la masa deslizada, en el caso de registrarse un movimiento, las vías con esta intensidad se identifican en el suroccidente del polígono. (Figura 121)

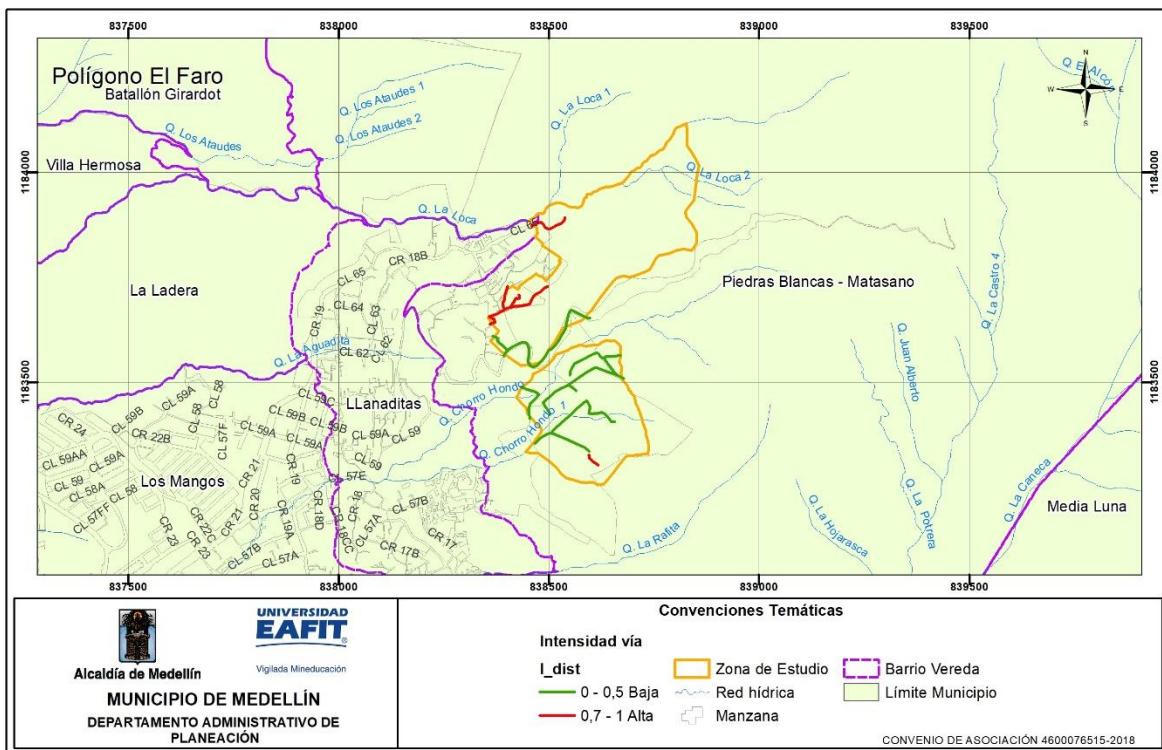


Figura 121. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.

10.2.6 Cálculo de la vulnerabilidad de la línea vital – vías

La vulnerabilidad alta corresponde al 95% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de fragilidad y altos a medios de intensidad, las vías con esta vulnerabilidad se ubican en el nororiente y suroccidente del polígono.

La vulnerabilidad baja corresponde al 5% de las vías evaluadas, la cual se caracteriza por presentar valores bajos de fragilidad y bajos a medios de intensidad, las vías con esta vulnerabilidad se localizan en el sur del polígono. (Figura 122)

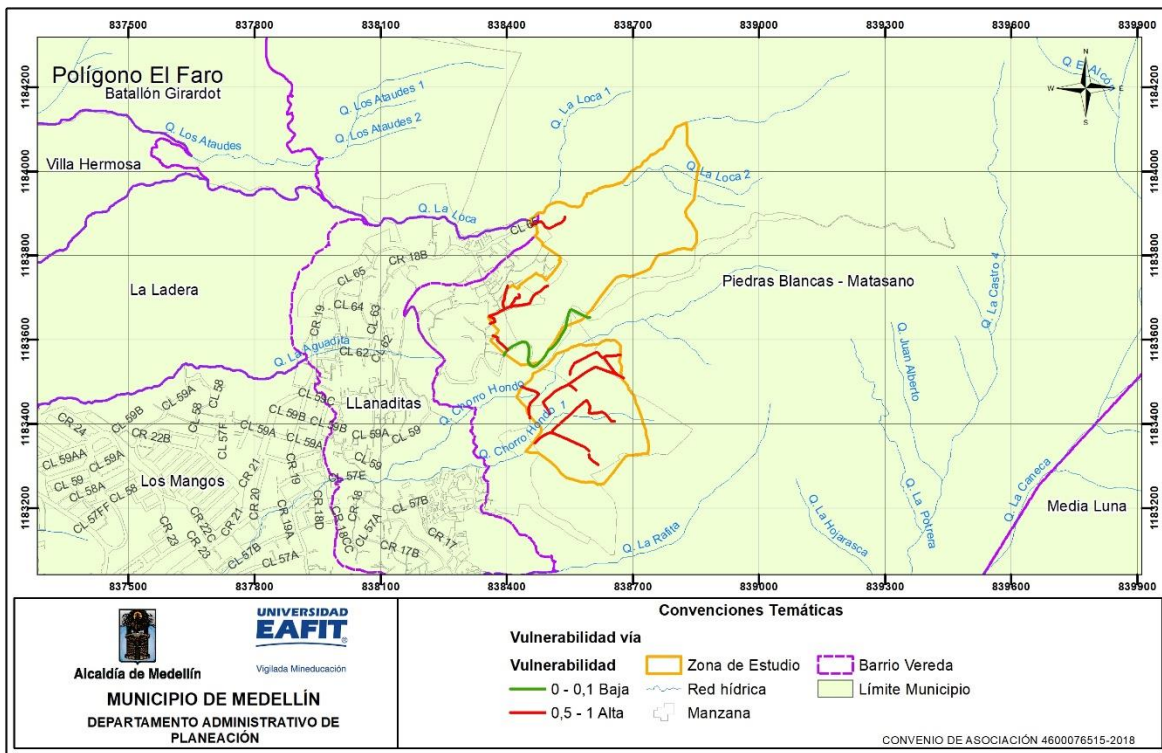


Figura 122. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital vías por movimiento en masa, identificadas en el polígono El Faro.

10.2.7 Cálculo de la fragilidad del acueducto

La fragilidad representa la respuesta de los elementos expuestos frente a las cargas generadas por la interacción de los movimientos en masa con dichos elementos, para determinar el cálculo de la fragilidad en el caso puntual de la línea vital de acueducto, es necesario contemplar los siguientes parámetros: operador de red, estado de la red, diámetro, si la tubería presenta deflexión y el tipo de material de la tubería, como, PVC, hierro dúctil, polietileno, etc.

La fragilidad en el 100% de la red del acueducto en el polígono de El Faro, arrojó valores bajos debido a las características propias de la red y a que no se hallaron daños en esta línea vital, donde se transporta agua potable, abastecida por EPM (Figura 123).

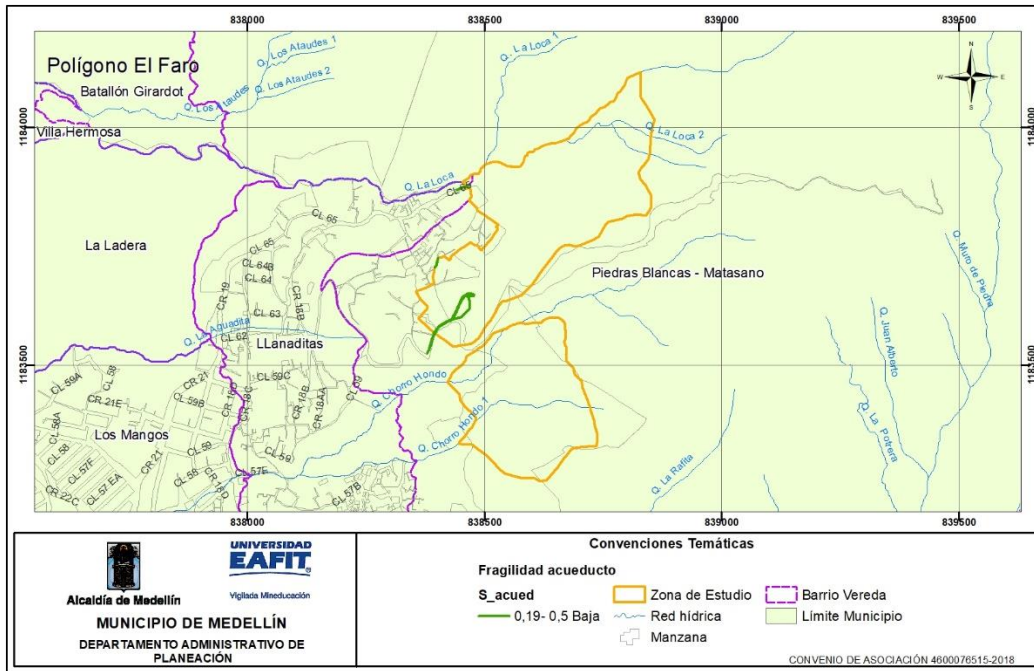


Figura 123. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.2.8 Cálculo de la intensidad del acueducto

Teniendo en cuenta que el fenómeno de movimiento en masa impone una carga uniforme a lo largo de la red del acueducto, la determinación de los umbrales tolerables está dada en función del diámetro de la tubería.

La intensidad del 100% del acueducto del polígono El Faro es baja. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas de acuerdo al diámetro de la tubería (Figura 124).

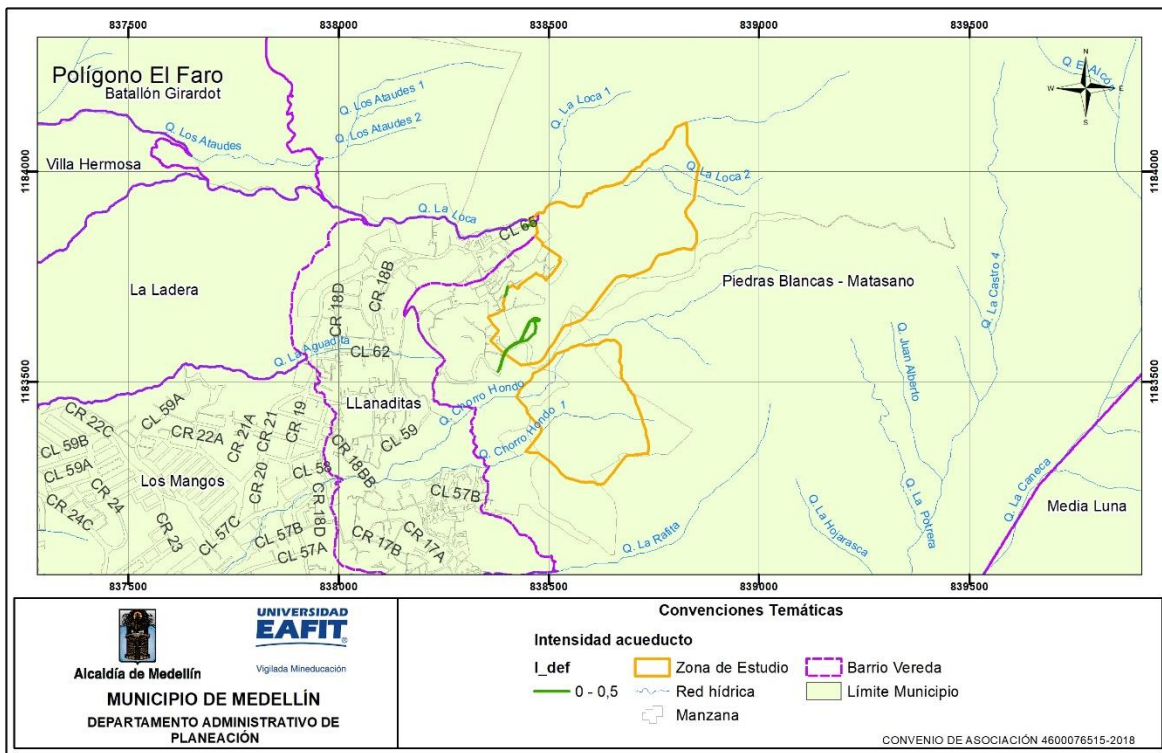


Figura 124. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.2.9 Cálculo de la vulnerabilidad del acueducto

Para el polígono El Faro, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos del acueducto evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, los tramos del acueducto con esta vulnerabilidad se ubican a lo largo del polígono (Figura 125).

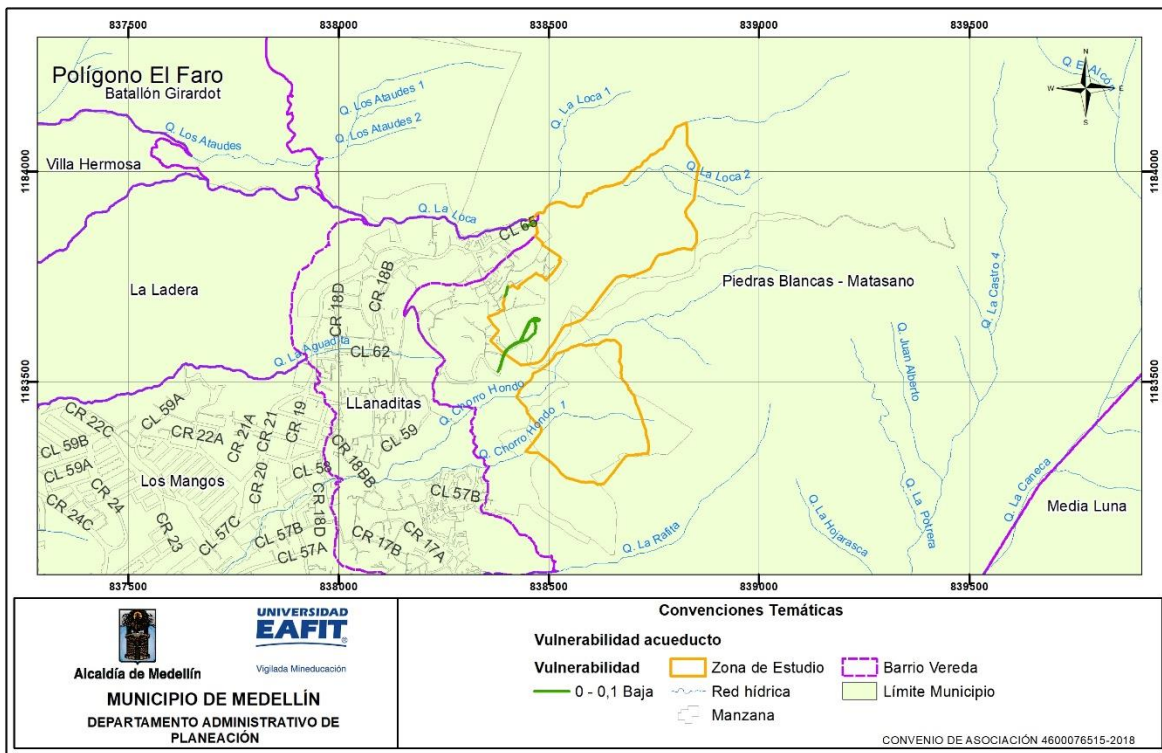


Figura 125. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital acueducto por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.2.10 Cálculo de la fragilidad del alcantarillado

El sistema de alcantarillado también tiene elementos expuestos, el parámetro de fragilidad depende de las características del bien que sufre afectación, es decir, que la fragilidad estará en función, en este caso, del operador de red, el estado de conservación y del material de fabricación de la tubería, como concreto PVC, hierro dúctil, etc.

La fragilidad en el 100% de la red del alcantarillado en el polígono El Faro, arrojó valores bajos debido a las características propias de la red y a que no se hallaron daños en esta línea vital, donde se transportan aguas residuales, recolectadas por EPM (Figura 126).

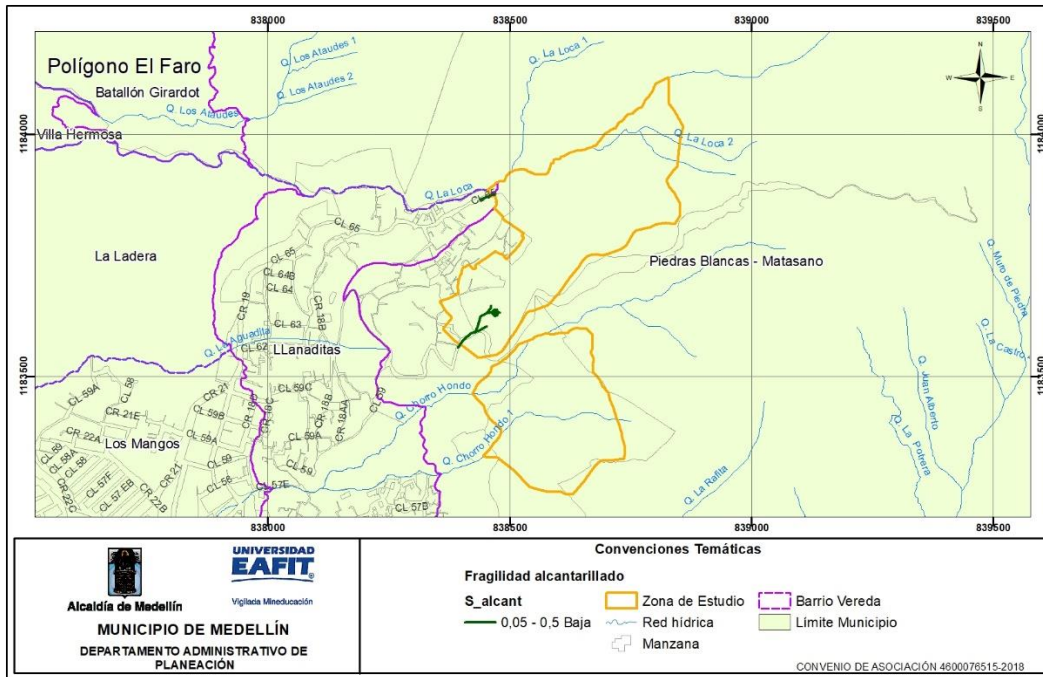


Figura 126. Distribución espacial de la fragilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono de El Faro.

10.2.11 Cálculo de la intensidad del alcantarillado

El cálculo de la intensidad de la red de alcantarillado se evalúa en función de la tolerancia que tiene el material del mismo. Conforme a las características de los elementos que hacen parte de la red, acorde al SGC se define un umbral tolerable para la misma de 5 cm.

La intensidad del 100% en el alcantarillado del polígono El Faro es baja. Dicho cálculo depende netamente de las deflexiones medidas en campo, con respecto a las deflexiones permitidas, acorde al SGC se define un umbral tolerable para la misma de 5 cm. (Figura 127)

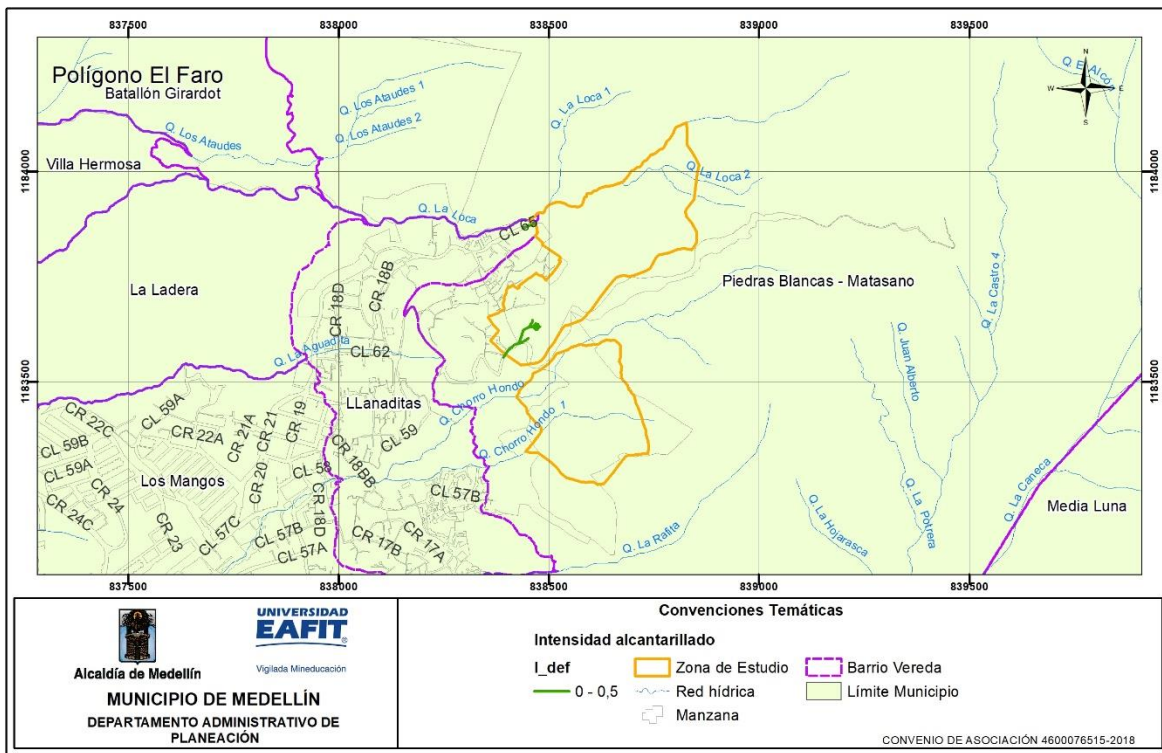


Figura 127. Distribución espacial de la intensidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.2.12 Cálculo de la vulnerabilidad del alcantarillado

Para el polígono El Faro, predomina la vulnerabilidad baja correspondiente al 100% de los tramos del alcantarillado evaluados, los cuales se caracterizan por presentar valores bajos de fragilidad y medios a bajos de intensidad, los tramos del acueducto con esta vulnerabilidad se ubican al sur del polígono (Figura 128).

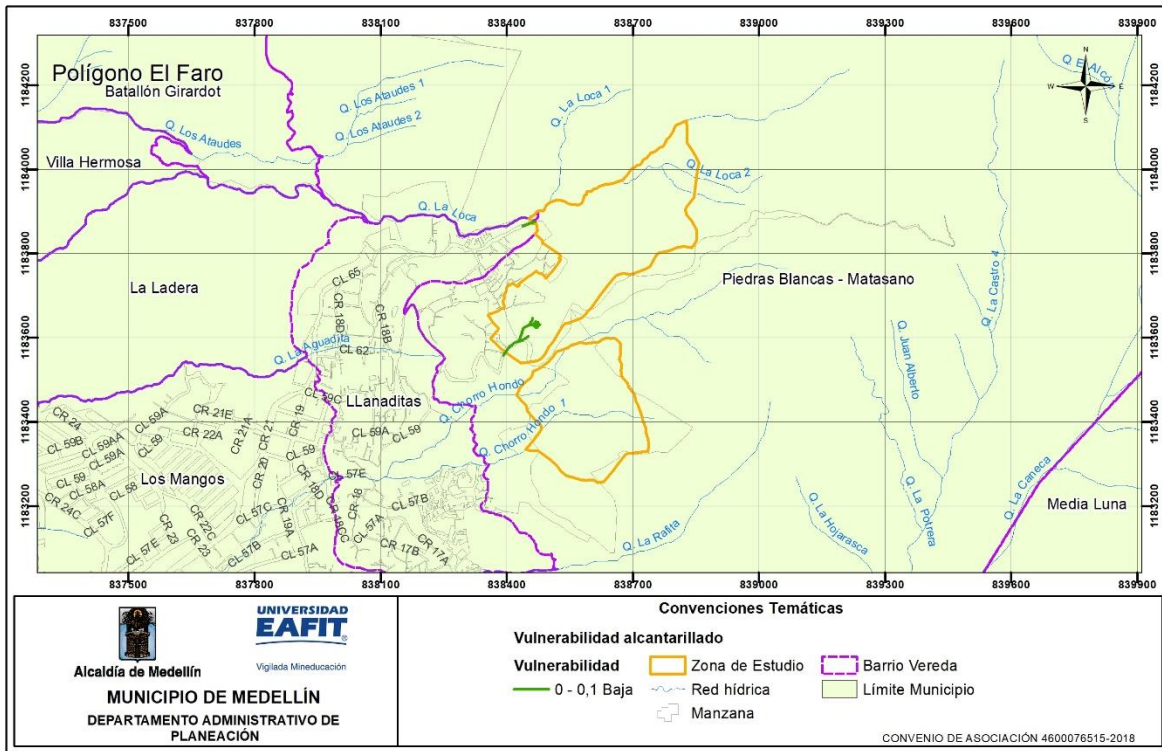


Figura 128. Distribución espacial de la vulnerabilidad de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

10.3 VULNERABILIDAD DE PERSONAS POR MOVIMIENTOS EN MASA.

10.3.1 Análisis de vulnerabilidad de personas.

Para hallar el número de personas en vulnerabilidad, se parte de la vulnerabilidad calculada para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,29 para el año 2018 de acuerdo con el análisis que presenta el Departamento Administrativo de Planeación - Subdirección de Información y Evaluación Estratégica, como resultado de la Encuesta de Calidad de Vida realizada en el año 2017). Para la clasificación de los valores se toma como una vulnerabilidad alta el rango entre 0,5-1, media el rango de 0,2-0,5 y por último baja entre 0-0,2.

El anterior análisis arroja que para el polígono El faro hay un número estimado de 221 personas en vulnerabilidad por movimientos en masa.

10.4 DESCRIPCIÓN DE PROBLEMAS ENCONTRADOS EN LAS CONSTRUCCIONES.

Las tipologías de las construcciones encontradas en un alto porcentaje, son estructuras ligeras con una fragilidad alta. Por lo tanto, son edificaciones que no cumplen con la Norma Sismo Resistente de 2010 NSR-10.

Las cimentaciones de las estructuras, en su gran mayoría son poco profundas y en algunos casos, no existen (anexo 5).

En las construcciones evaluadas se presentan fallas en los morteros de pega, se podría decir que en su mayoría corresponden a morteros con permeabilidad entre media y alta, lo que genera como consecuencia humedades interiores, sobre todo en zonas donde el viento golpea en momentos de lluvia.

Las fachadas en ladrillo no se encuentran protegidas (hidrofugadas) o con algún recubrimiento, brindando la posibilidad de generar eflorescencias, manchas y ensuciamiento.

En general la mampostería de las viviendas presenta procesos degradatorios incipientes y se identifica, presencia de cripto eflorescencias aisladas.

Se observan grietas sin tratamiento, muchas de ellas asociadas a uniones entre distintos materiales de cerramiento (ladrillo, ventanas, puertas).

Los tipos de cubiertas en losa de concreto, presentan permeabilidad, lo cual generan humedades al interior de las construcciones, lo anterior aplica para edificaciones de un solo nivel con dicho tipo de cubierta.

Se observaron humedades en general en sobre cimientos, ocasionado por aguas de escorrentía.

Se evidenció deterioro y desgaste propio del material en cubiertas en fibrocemento, zinc y barro, por malos procesos constructivos y falta de mantenimiento de los sistemas de cubiertas de las estructuras.

En algunas edificaciones se realiza la recolección de las aguas lluvias de techos mediante bajantes, pero estos son descargados al terreno natural por falta de una red de alcantarillado en la cercanía o desconocimiento del habitante, humedeciendo el suelo y por ende afectando las fundaciones y favoreciendo la amenaza.

11. ZONIFICACIÓN DE RIESGOS

De acuerdo con lo planteado en la metodología, se realiza el cálculo del riesgo de dos maneras. La primera, para las construcciones y líneas vitales de manera individual, a partir de la información recolectada en campo por cada uno de los elementos y que se encuentra en una base de datos con los debidos registros fotográficos. Este cálculo se enfoca hacia las acciones particulares en los elementos expuestos.

Por otro lado, se tiene el cálculo del riesgo por polígono a partir de la información de la magnitud de los movimientos (velocidad y profundidad) y de la probabilidad (factor de seguridad). Este último cálculo se enfoca hacia la planificación integral del sector y para la definición de acciones en congruencia con lo definido en el POT del municipio.

A continuación, se presenta la zonificación de riesgos por movimientos en masa para el polígono de El Faro. La descripción de esta metodología se encuentra en detalle en el Anexo 1 y en capítulo 3 del presente informe.

11.1 RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

En el análisis del riesgo por movimientos en masa se presenta tanto el análisis individual de los elementos expuestos como el análisis de riesgos por polígono.

11.1.1 Riesgo individual.

Una vez realizados los análisis de campo y laboratorio para todas las variables involucradas en los modelos de riesgo, se obtiene la zonificación de riesgo por movimientos en masa e inundaciones, para las construcciones y líneas vitales del polígono El Faro, de acuerdo con la regla de decisión de la Tabla 34 y como que se presenta a continuación.

Tabla 34. Regla de decisión para el riesgo individual. Modificado de Phoon (2008) citado por Alcaldía de Medellín (2015).

NIVEL DE AMENAZA	VULN. ALTA	VULN. MEDIA	VULN. BAJA
ALTA	ALTO	ALTO	MEDIO
MEDIA	ALTO	MEDIO	BAJO
BAJA	BAJO	BAJO	BAJO

11.1.1.1 Análisis de riesgo de las construcciones

En el polígono El Faro, se evidencia un nivel de riesgo alto para las construcciones, que corresponde al 70% de las edificaciones, las cuales se caracterizan por presentar valores altos de vulnerabilidad y medios a altos para la amenaza, las construcciones con este riesgo se localizan en su totalidad del polígono.

El riesgo bajo corresponde al 24% de las edificaciones evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios para la amenaza, las construcciones con este riesgo se localizan en el sur del polígono.

El riesgo no aplica corresponde al 6% de las edificaciones evaluadas, las cuales se caracterizan por no presentar amenaza, por estar fuera del polígono. (Figura 129).

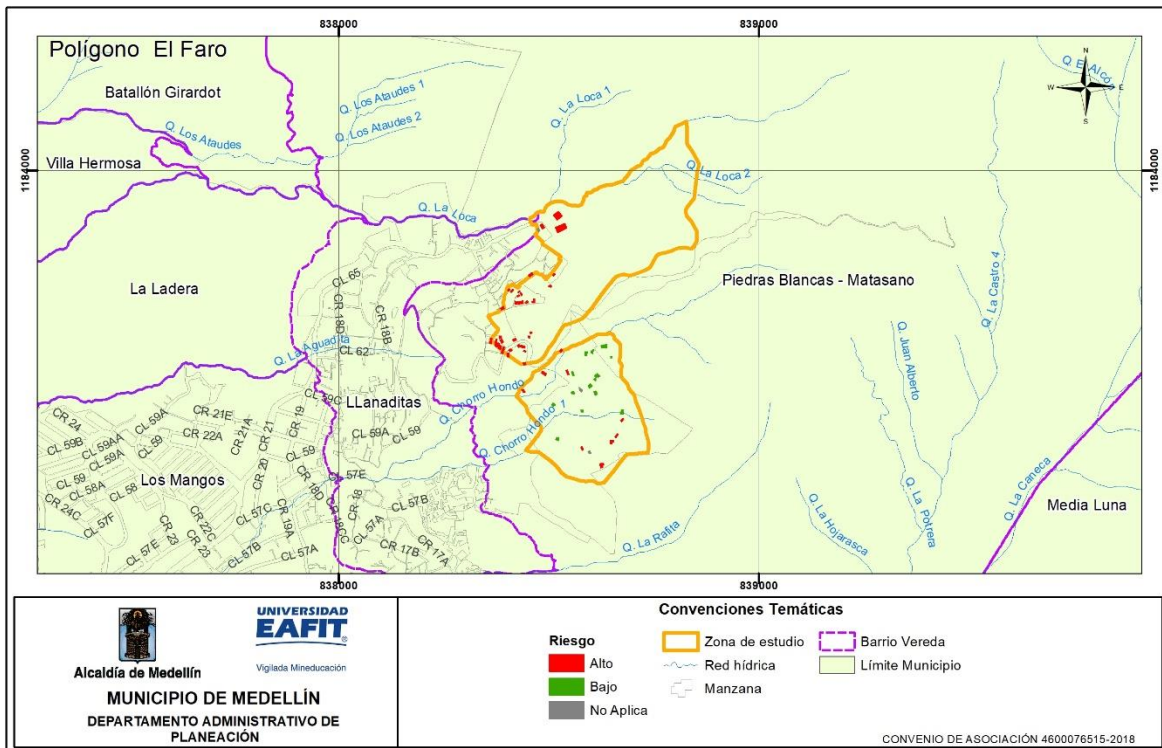


Figura 129. Distribución espacial del riesgo de las construcciones por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

11.1.1.2 Análisis de riesgo de línea vital - energía

En el polígono El Faro, se evidencia un nivel de riesgo alto para las redes de energía, que corresponde al 33% de los postes evaluados, los cuales se

El riesgo bajo corresponde al 26% de las vías evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores medios a altos de vulnerabilidad y bajos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan en la totalidad del polígono.

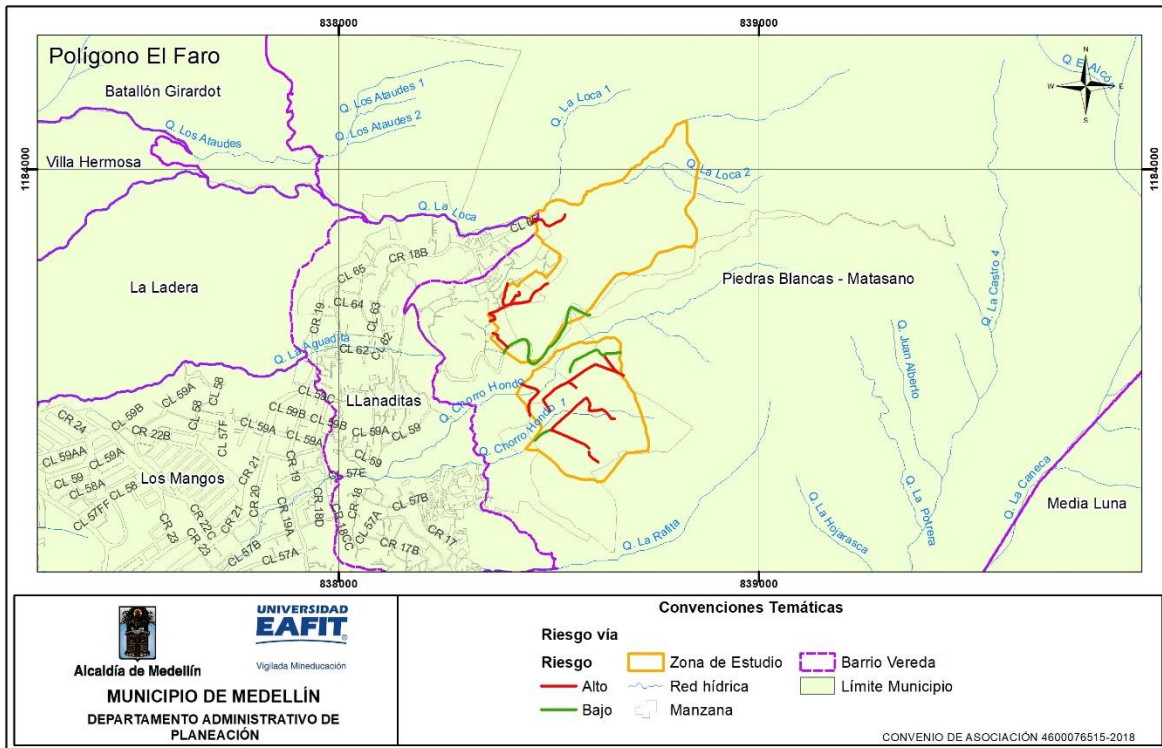
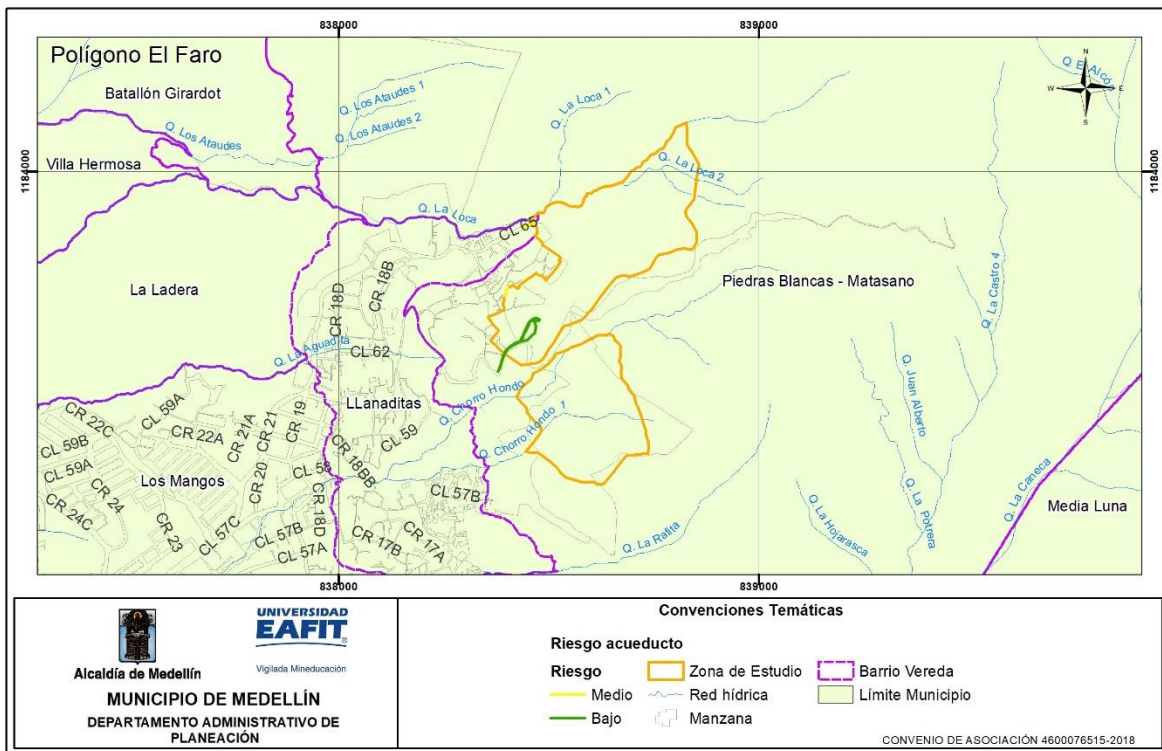


Figura 131. Distribución espacial del riesgo de la línea vital vías por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

11.1.1.4 Análisis de riesgo de línea vital - acueducto

En el polígono El Faro, se evidencia un nivel de riesgo medio para la red de acueducto, corresponde al 12%, de la red de acueducto evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, las vías con este riesgo se localizan al norte del polígono.

El riesgo bajo corresponde al 88% de la red acueducto evaluadas, las cuales se caracterizan por presentar valores bajos de vulnerabilidad y medios a bajos para la amenaza, los tramos de acueducto con este riesgo se localizan en el centro del polígono. (Figura 132)



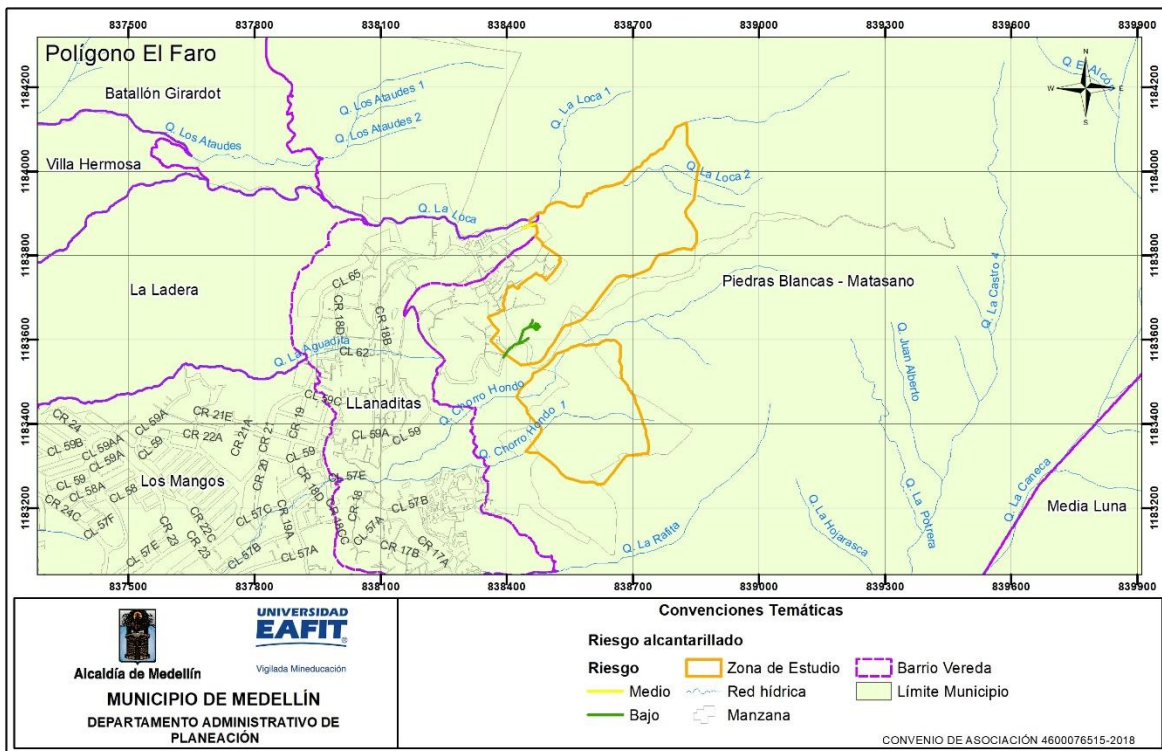


Figura 133. Distribución espacial del riesgo de la línea vital alcantarillado por movimiento en masa, identificada en el polígono El Faro.

11.1.1.6 Análisis de riesgo de personas.

Para hallar el número de personas en riesgo, se parte del nivel de riesgo calculado para las construcciones, (en el cual se cambia básicamente la fragilidad de la construcción por la fragilidad de las personas, todo esto de acuerdo a los parámetros y calificaciones definidos en el documento metodológico, más específicamente en el numeral 3.3.1. (Anexo 1.), del número de niveles de la edificación y el número de habitantes promedio por vivienda, el cual fue calculado en 3,29 para el año 2018 de acuerdo con el análisis que presenta el Departamento Administrativo de Planeación- Subdirección de Información y Evaluación Estratégica, como resultado de la Encuesta de Calidad de Vida realizada en el año 2017.

El anterior análisis arroja que para el polígono El Faro hay un número estimado de 166 personas en riesgo alto.

11.1.2 Riesgo por polígono

Teniendo en cuenta la zonificación de amenazas obtenida, al igual que la profundidad y la velocidad de los procesos morfodinámicos probables a generarse, se establece que para el polígono El Faro, de acuerdo con la regla de decisión de la Tabla 35, se obtienen zonas de riesgo alto mitigable y de riesgo bajo, como se describen a continuación (Figura 134):

Tabla 35. Regla de decisión para el riesgo por polígono para movimientos en masa.

Factores	Magnitud de la amenaza	Amenaza según factores seguridad	Índice de vulnerabilidad (Edificaciones)	Zona de riesgo por movimientos en masa
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Alta	1.0	Extremadamente alto/No Mitigable/Soluciones Alto Costo
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Media	1.0	Riesgo Alto
Velocidad Alta / Profundidad Alta	Muy Alta	Baja	1.0	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Alta	0,6	Riesgo Alto
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Media	0,6	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Alta	Alta	Baja	0,6	Bajo
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Alta	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Media	0.7	Riesgo Alto
Velocidad Media -Alta/Profundidad Media	Alta	Baja	0.7	Bajo
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Alta	0,5	Riesgo Alto
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Media	0,5	Medio
Velocidad Baja/Profundidad Media	Media	Baja	0,5	Bajo
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Alta	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Media	0.4	Medio
Velocidad Alta/Profundidad Baja	Media	Baja	0.4	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Alta	0.1	Medio
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Media	0.1	Bajo
Velocidad Media - Baja / Profundidad Baja	Baja	Baja	0.1	Bajo

Riesgo alto no mitigable: según el Decreto 1626 de 2015 corresponde a aquellas áreas de alto riesgo donde la implementación de medidas de mitigación estructural resulta de mayor complejidad y costo técnico- económico que llevar a cabo el reasentamiento de la población y equipamiento urbano respectivo.

En el análisis de riesgo por polígono que parte del análisis de la amenaza y la comparación con los resultados de la vulnerabilidad, se determina que la zona de amenaza alta por estabilidad correspondiente a la vertiente sur de la quebrada La Loca, en la zona aledaña a la finca Las Nubes, asociado a la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa de altas velocidades y espesores medios a profundos de hasta 5m, se considera como no mitigable, considerado que las pendientes allí identificadas restringen los procesos de ocupación, y la realización de intervenciones antrópicas condiciona la estabilidad por *runout* de la zona baja.

Riesgo alto mitigable: es definido por el Decreto 1626 de 2015 como aquellas áreas en las cuáles el fenómeno es controlable a través de la implementación de obras de mitigación y/o protección (medidas estructurales y/o no estructurales) cuyas consecuencias de tipo económico, ambiental, financiero y social traen consigo un costo razonable y no se hace necesario el reasentamiento de la población.

Dentro de esta categoría se incluye la mayor parte del área analizada, identificándose en tres sectores principalmente: el primero de ellos en la zona noroccidental, entre el camino a la Cuesta y el sendero que comunica la finca las Nubes y el sector del Faro, incluyendo el sector donde se localiza el tanque de Llanaditas. La segunda zona se extiende sobre ambas márgenes de la quebrada Chorrohondo; y finalmente la tercera zona se localiza al sur, asociado a las laderas que definen el Cerro de La Cruz.

En estas zonas a partir de los análisis de estabilidad se establece que los movimientos en masa exhiben una probabilidad media de ocurrencia, y exhiben profundidad moderada y velocidades altas a medias, por lo que se clasifican como de riesgo alto. Se destaca que debido a que las obras propuestas en el presente estudio garantizan la estabilidad y la permanencia de los elementos expuestos allí localizados se define como de alto riesgo mitigable.

Riesgo Bajo: corresponde a aquellas áreas donde sólo se requieren medidas mínimas de prevención y/o de control de amenaza y vulnerabilidad (Decreto 1626 de 2015). Las zonas de riesgo bajo, coinciden con las identificadas como de amenaza baja y ocupadas con viviendas, correspondiente al costado sur de la zona analizada, incluyendo la zona comprendida entre las quebradas Chorrohondo y Chorrohondo 1. Se destaca que debido a que la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa es baja, la vulnerabilidad es poco representativa por lo que el grado de riesgo se determina en este nivel.

Las categorías del riesgo definidas en este informe pueden variar en función de la amenaza, la cual es un proceso dinámico en el tiempo y cuya condición puede cambiar de acuerdo con la recurrencia de movimientos en masa ocasionadas por prácticas inadecuadas para la construcción y mal manejo de aguas lluvias y residuales. Así mismo, una vez se ejecuten las obras propuestas, el grado de riesgo en las categorías alta y media, disminuyen a riesgo bajo, es por esto que se deben atender las recomendaciones que se presentan en el siguiente capítulo.

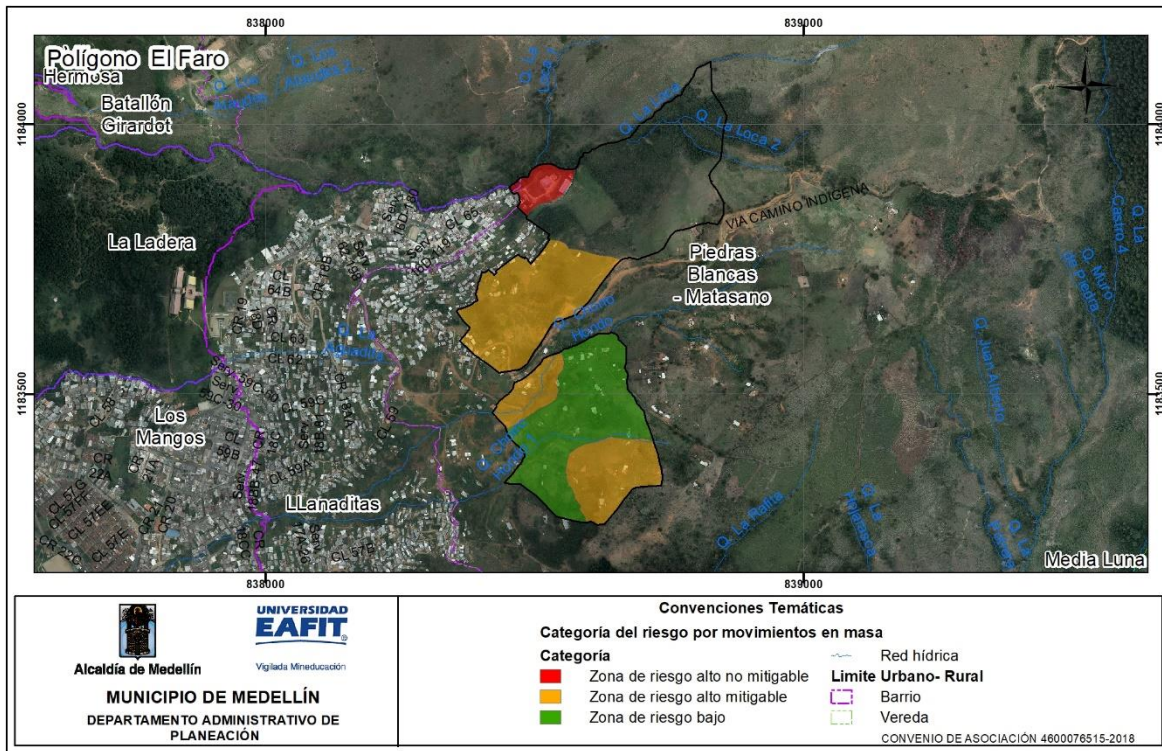


Figura 134. Zonificación de riesgos por polígono, El Faro

12. APTITUD GEOLÓGICA

Esta zonificación se realiza partiendo de los aspectos topográficos, geológicos, geomorfológicos y de procesos morfodinámicos identificados durante el trabajo de campo y los cuales condicionan en forma directa el grado de estabilidad de las laderas.

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

Para el polígono El Faro se consideran cuatro tipos de zona de acuerdo a las características geológicas y geomorfológicas y a la complejidad de los procesos morfodinámicos identificados, las cuales se describen a continuación (Figura 135):

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

En esta categoría se incluye la zona definida como de amenaza baja por movimientos en masa, en condiciones estáticas, y que en el análisis de runout no se obtiene probabilidad de verse afectada por la acumulación de materiales asociados a la ocurrencia de movimientos en masa en la zona aledaña. Se localiza hacia el costado sur de la zona analizada, incluyendo la zona comprendida entre las quebradas Chorrohondo y Chorrohondo 1. Esta zona se caracteriza por presentar pendientes predominantemente inclinadas y puntualmente suaves en zonas intervenidas antrópicamente, conformadas por suelos residual de la Dunita de Medellín, que definen laderas largas de aspecto irregular. No se identifican movimientos en masa.

Zonas Aptas con Restricciones Altas: Corresponde a zonas en las cuales se evidencia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa localizados en el predio de interés y en la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte sobre estas. El estudio debe evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas dentro del lote y la UMI asociada (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría se incluyen las zonas clasificadas como de amenaza alta por movimientos en masa, asociado a parte de la vertiente sur de la quebrada La Loca en una franja que se extiende en la zona aledaña al sendero peatonal que comunica la finca La Nubes con el sector del Faro. Estas zonas geológicamente se encuentran conformadas por suelos residuales, rocas parcialmente meteorizadas, además de depósitos de vertiente, los cuales desarrollan lomos de laderas cortas cóncavas y convexas de pendientes muy abruptas a escarpadas. Asociado a esta zona se identifican deslizamientos de tipo traslacional principalmente, tanto activos como inactivos.

Zonas Aptas con Restricciones Moderadas: Corresponden a zonas estables dentro del predio de interés; sin embargo, su estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa identificados en la UMI asociada; la estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte. Se considera que las obras de estabilización proyectadas son técnica y económicamente viables (Acuerdo 09 de 2012).

En esta categoría se incluyen las zonas definidas como de amenaza media por movimientos en masa, correspondiente a la zona de mayor predominio, asociado a la zona noroccidental, entre el camino a la Cuesta y el sendero que comunica la finca las Nubes y el sector del Faro, incluyendo el sector donde se localiza el tanque de Llanaditas; y la zona sur, asociado a las laderas que definen el Cerro de La Cruz.

Estas zonas se desarrollan sobre suelos residuales de la Dunita de Medellín y en ella se identifican principalmente movimientos en masa, la mayor parte de ellos superficiales y asociados a los procesos de intervención antrópica a los que se ha visto sometida la zona.

Zonas No Aptas: Son aquellas zonas con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa dentro del lote de interés y la UMI asociada; el estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son técnicamente complejas y de alto costo con respecto a las inversiones proyectadas en la zona o predio de interés. Las zonas con restricciones normativas se considerarán como No Aptas (Acuerdo 09 de 2012).

Para el polígono en estudio, estas áreas zonas no aptas corresponden a las áreas definidas como suelos de protección en el Acuerdo 48 de 2015, correspondiente a:

- Los retiros asociados a las quebradas La Loca, La Loca N° 2, Chorrohondo y Chorrohondo 1 para las cuales se presenta un retiro de 30m en los tramos naturales.
- El costado nororiental de la zona analizada, donde las condiciones de amenaza asociado a las características de pendiente, geológicas y geomorfológicas permiten definirla como no apta.

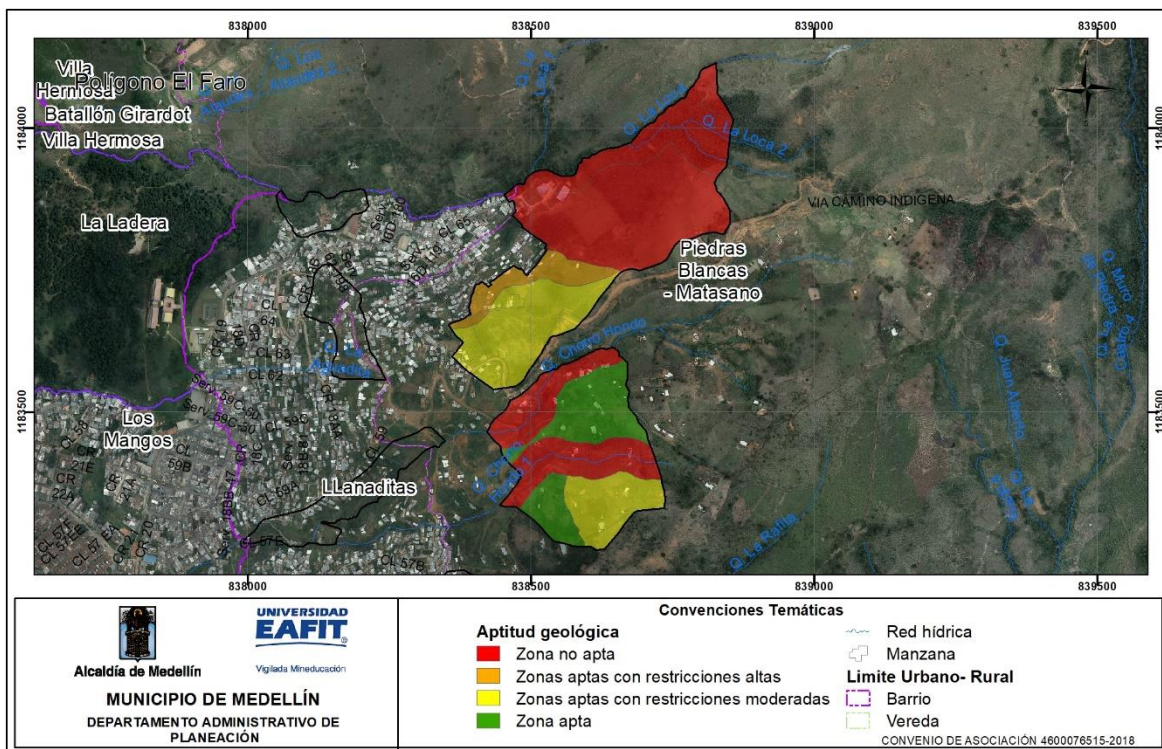


Figura 135. Zonificación de aptitud geológica para el polígono El Faro

13. RECOMENDACIONES

Los análisis de estabilidad realizados en capítulos anteriores permitieron realizar la evaluación de la amenaza y vulnerabilidad del polígono objeto de estudio. En dichos análisis es evidente que los perfiles 1, 2 y 3 arrojaron factores de seguridad en condiciones estáticas con valores comprendidos entre 1.2 y 1.5, por lo que el sector aferente a dichos perfiles fue clasificado como amenaza media. Para los perfiles 4 y 5 los factores de seguridad obtenidos están por encima de 1.5, lo cual catalogaría la amenaza como baja según decreto 1626 de 2015. Teniendo en cuenta los resultados anteriores, es necesario la implementación de obras y acciones en las zonas aferentes a los perfiles 1, 2 y 3 que permitan mejorar las condiciones de estabilidad, con el fin de reducir el riesgo sobre la población allí asentada.

Las recomendaciones que se presentan a continuación, como se dijo anteriormente, tienen como objetivo disminuir los niveles de riesgo identificados en el polígono en estudio, las cuales corresponden a medidas principalmente de tipo estructural que incluyen obras de ingeniería que buscan la estabilización de las laderas comprometidas, así como obras complementarias que se deben adelantar en todo el polígono de interés, por lo que para garantizar la estabilidad de la zona y el cambio en las restricciones establecidas se requiere de una intervención de tipo integral en donde se ejecuten de forma conjunta los planteamientos aquí establecidos.

Es preciso aclarar que los análisis realizados son de carácter general y evalúan la estabilidad global de la zona; sin embargo, pueden existir sectores particulares o locales que requieran análisis detallados y obras específicas para su tratamiento, las cuales no se encuentran en los alcances de este estudio.

13.1 RECOMENDACIONES GEOTÉCNICAS

Teniendo en cuenta las condiciones geológicas y topográficas que caracterizan el polígono El Faro y los resultados de los análisis de estabilidad de cada uno de los perfiles evaluados, se propone la implementación de las siguientes obras:

Perfil 1. Teniendo en cuenta las características geotécnicas, topográficas y demográficas del trazo del perfil 1 y a pesar de catalogarse con factores de seguridad que arrojan una amenaza alta por movimientos en masa según decreto 1626 de 2015, se propone catalogar dicho sector como una zona de riesgo alto no mitigable para destinar estos sectores a la protección del suelo y el establecimiento

de usos agroforestal de acuerdo a lo que establece el POT, por lo que no se prevé la estructuración de obras civiles en términos de estabilidad.

Perfil 2. Las características topográficas y geológicas del sector restringen el número de alternativas que permitan mejorar las condiciones de estabilidad del sector; es así como analizadas las diferentes variables que condicionan las propuestas de estabilización se ha optado por recomendar para la zona aferente al perfil No 2 la implementación de una serie de pantallas de pilas pre-excavadas amarradas con una viga cabezal, dispuestas a lo largo de la ladera objeto de análisis; de esta manera se plantea la construcción de 2 pantallas de pilas (zona superior y zona inferior) unidas mediante vigas de enlace y ubicadas en la parte media y baja de la ladera esquematizada en el perfil de análisis geotécnico (Figura 136).

Perfil 3. De igual manera a como se definieron las obras para el perfil No 2, en este caso para el perfil No 3, se evaluaron dos alternativas de obras para mejorar las condiciones de estabilidad. Estas alternativas corresponden a pantallas de pilas pre-excavadas o sistemas de contención anclados. Teniendo en cuenta los aspectos topográficos, geotécnicos y de accesibilidad se ha optado por recomendar la construcción de una pantalla de pilas pre-excavadas, la cual se ubicará en la zona inferior de la ladera esquematizada en el perfil de análisis geotécnico (Figura 139).

Perfil 4. Teniendo en cuenta las características geotécnicas y topográficas, así como el análisis de las condiciones actuales ejecutado donde se obtuvieron factores de seguridad por encima de lo requerido por normatividad, no se prevé la realización de obras de estabilidad en la zona aferente al perfil evaluado.

Perfil 5. Teniendo en cuenta las características geotécnicas y topográficas, así como el análisis de las condiciones actuales ejecutado, donde se obtuvieron factores de seguridad por encima de 1.5, corroborado con la escasa presencia de procesos morfodinámicos, no se prevé la realización de obras de estabilidad en la zona aferente al perfil evaluado.

A continuación, se analizará la estabilidad de cada uno de los perfiles establecidos en donde se definió la necesidad de implementar obras de estabilización, que en este caso corresponde a las zonas aferentes a los perfiles 2 y 3, pero ahora bajo la consideración de que se incluirán las obras o propuestas de mejoramiento de la estabilidad, para cada uno de éstos.

13.1.1 Análisis de estabilidad condición proyectada

Como se mencionó anteriormente, el análisis de la condición futura o proyectada (con obras) se realizará únicamente para los perfiles 2 y 3 en donde se requiere la implementación de obras que permitan mejorar las condiciones de estabilidad.

Perfil 2

Considerando las condiciones topográficas y geotécnicas del perfil y la evaluación de la estabilidad en condiciones existentes, se planteó como propuesta para mejorar la estabilidad la construcción de dos pantallas de pilas pre-excavadas, que se ubicarán en las cotas 2038.5 y 2057, que se han denominado pantalla inferior y pantalla superior respectivamente. Dichas pantallas tendrán una longitud aproximada de 115 metros cada una. Las pantallas superior e inferior se conformarán con pilas pre-excavadas de 10 m de longitud proyectando empotrarlas en la roca fracturada y meteorizada, con 1.0 m de diámetro, espaciadas cada tres diámetros (3.0 m) entre ejes y unidas por una viga cabezal. Estas obras permitirán controlar potenciales deslizamientos que podrían afectar las viviendas ubicadas en la zona media y baja de la ladera.

El análisis de esta configuración por el método de Morgenstern para el perfil No 2 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.52, un valor medio de 1.53 y una probabilidad de falla de 0.0% (Figura 136). La falla potencial con este valor se ubica en la zona comprendida entre las dos pantallas de pilas.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición pseudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.045, un factor de seguridad medio de 1.047 con una probabilidad de falla de 37.30%. Si bien los valores del factor de seguridad se ubican ligeramente o debajo de la normatividad (1.05) se considera que el factor de seguridad obtenido satisface los requerimientos o recomendaciones para garantizar la estabilidad bajo un evento sísmico. (Figura 137).

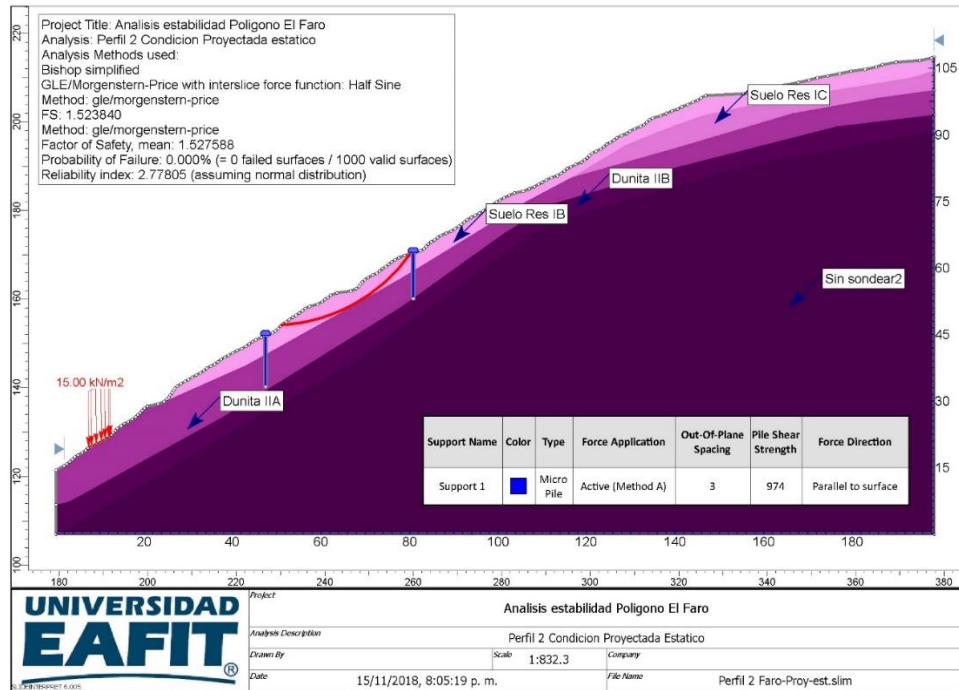


Figura 136. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición estática.

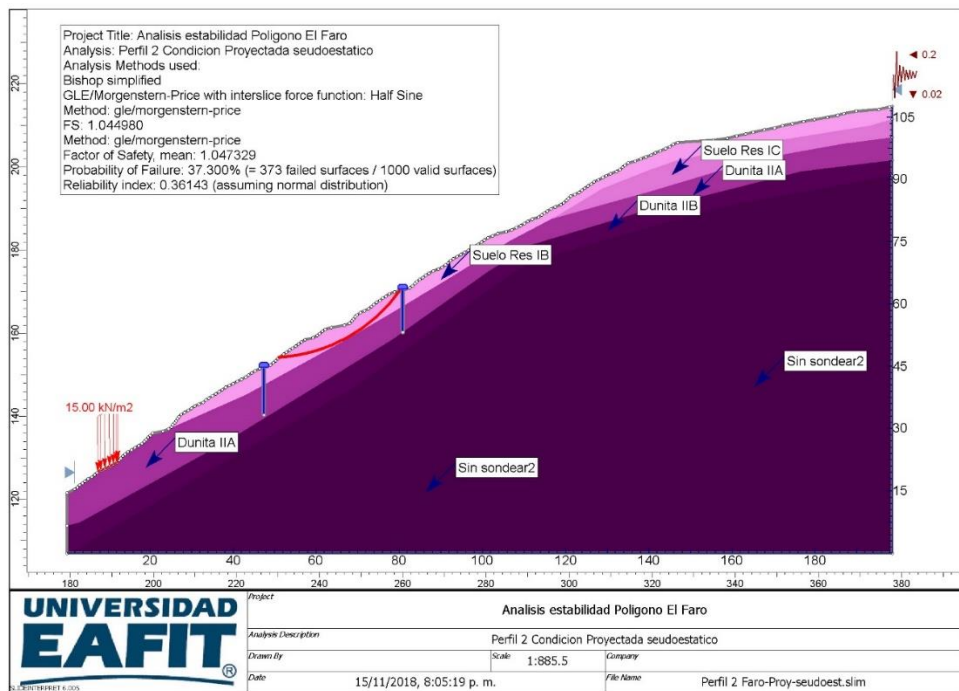


Figura 137. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final, condición pseudoestática.

Finalmente, se analizó la estabilidad del perfil 2 para una condición extrema de saturación que se simuló considerando un nivel freático cerca de la superficie. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.435 y un factor medio de 1.438 con una probabilidad de falla del 0.6% (Figura 138). Es claro que se requiere un manejo y control de aguas subsuperficiales para evitar la disminución del factor de seguridad, para lo cual se recomienda la instalación de drenes subhorizontales en la zona de la pantalla de contención, así como el manejo de las aguas de escorrentía en la zona.

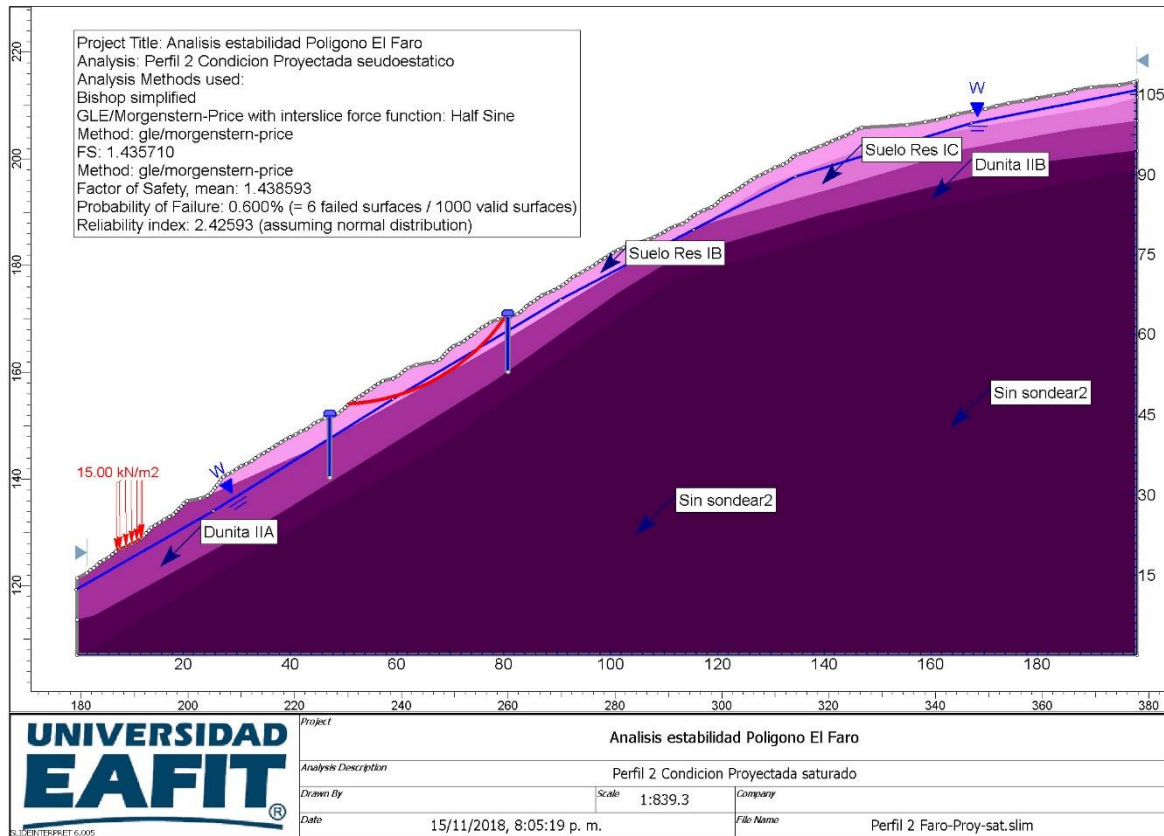


Figura 138. Análisis estabilidad perfil 2. Solución final condición saturada.

Perfil 3

Los análisis de estabilidad para este perfil para el escenario actual arrojaron factores de seguridad entre 1.2 y 1.5 que catalogaron la zona como de amenaza media, por lo que se requiere la implementación de obras que permitan mejorar las condiciones de estabilidad y disminuir el riesgo para este sector. Considerando las condiciones geotécnicas y de pendiente del sector evaluado se ha planteado como solución la

implementación de una estructura de contención localizada en la zona media inferior del perfil evaluado. Esta estructura estará compuesta por un sistema de pantalla de pilas pre-excavadas amarradas en superficie por una viga cabezal. Las pilas que compondrán la pantalla tendrán un diámetro de 1.0 metro y una longitud de 12 metros. Se espaciarán 3.0 metros entre centros. La pantalla se construirá sobre la cota 2045.

El análisis de esta configuración para el perfil No 3 en condición estática arrojó un factor de seguridad determinístico de 1.73, un factor medio de 1.73 y una probabilidad de falla de 0.0% (Figura 139), con lo cual se garantiza teóricamente la estabilidad de la zona.

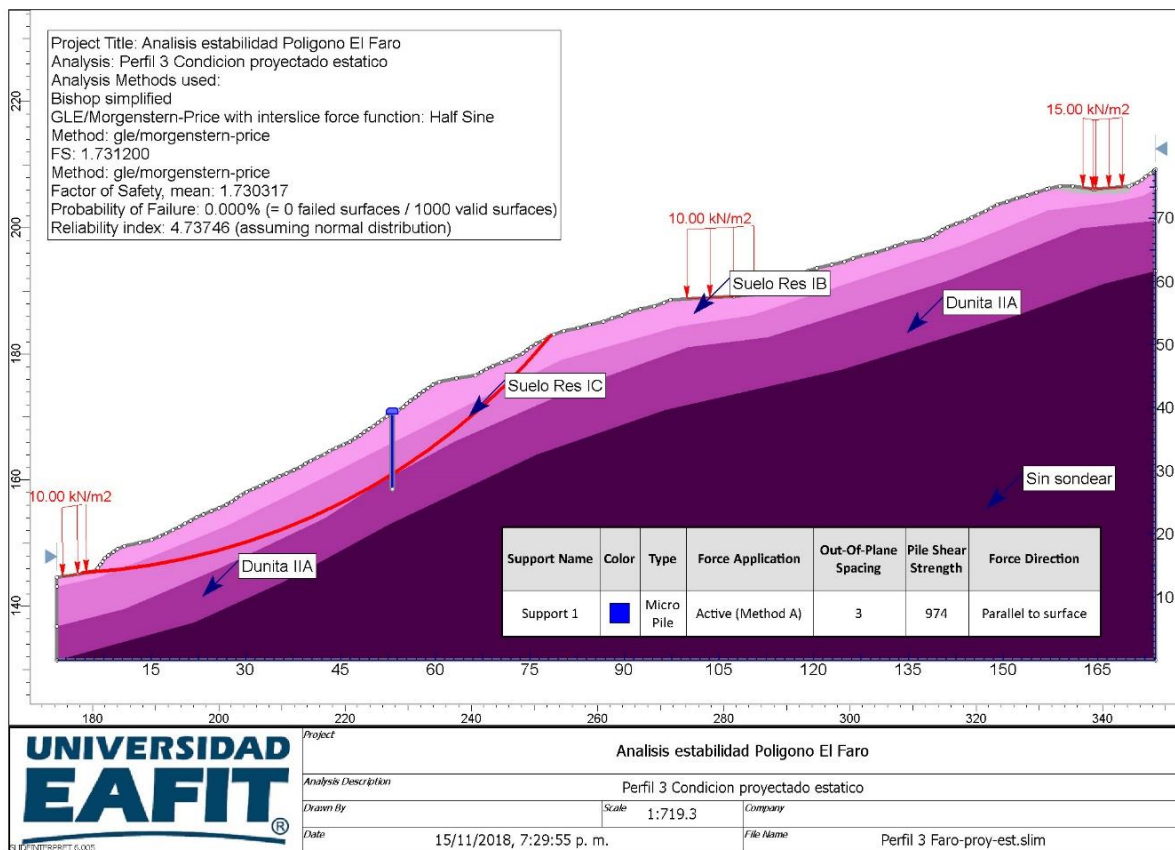


Figura 139. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final condición estática.

Cuando se analiza este perfil bajo la condición pseudoestática, se obtiene un factor de seguridad determinístico de 1.166, un factor de seguridad medio de 1.667 con

una probabilidad de falla de 9.1%, que satisface los requerimientos o recomendaciones de la normatividad vigente (Figura 140).

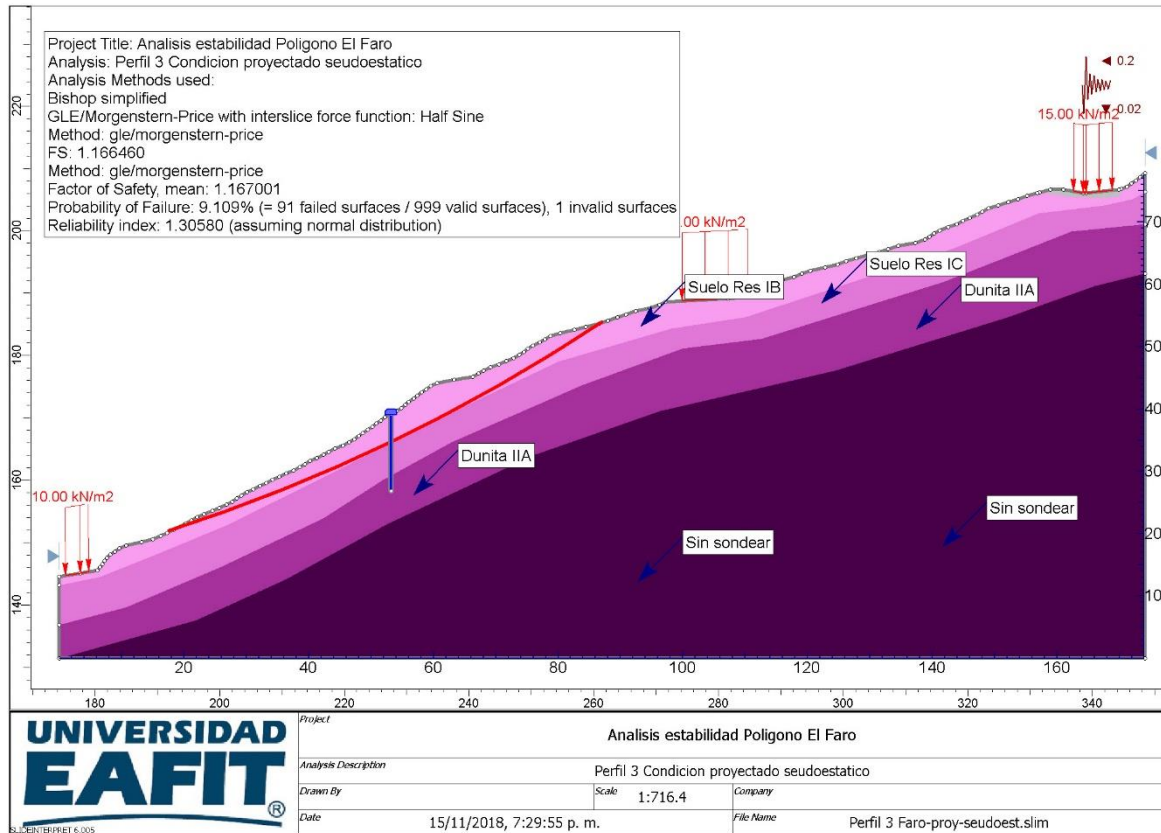


Figura 140. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final, condición pseudoestática.

Finalmente, se analizó la estabilidad del perfil 3 para una condición extrema de saturación que se simuló considerando un nivel freático cerca de la superficie. Bajo este supuesto se obtuvo un factor de seguridad determinístico de 1.289 y un factor medio de 1.287 con una probabilidad del 0.20% (Figura 141).

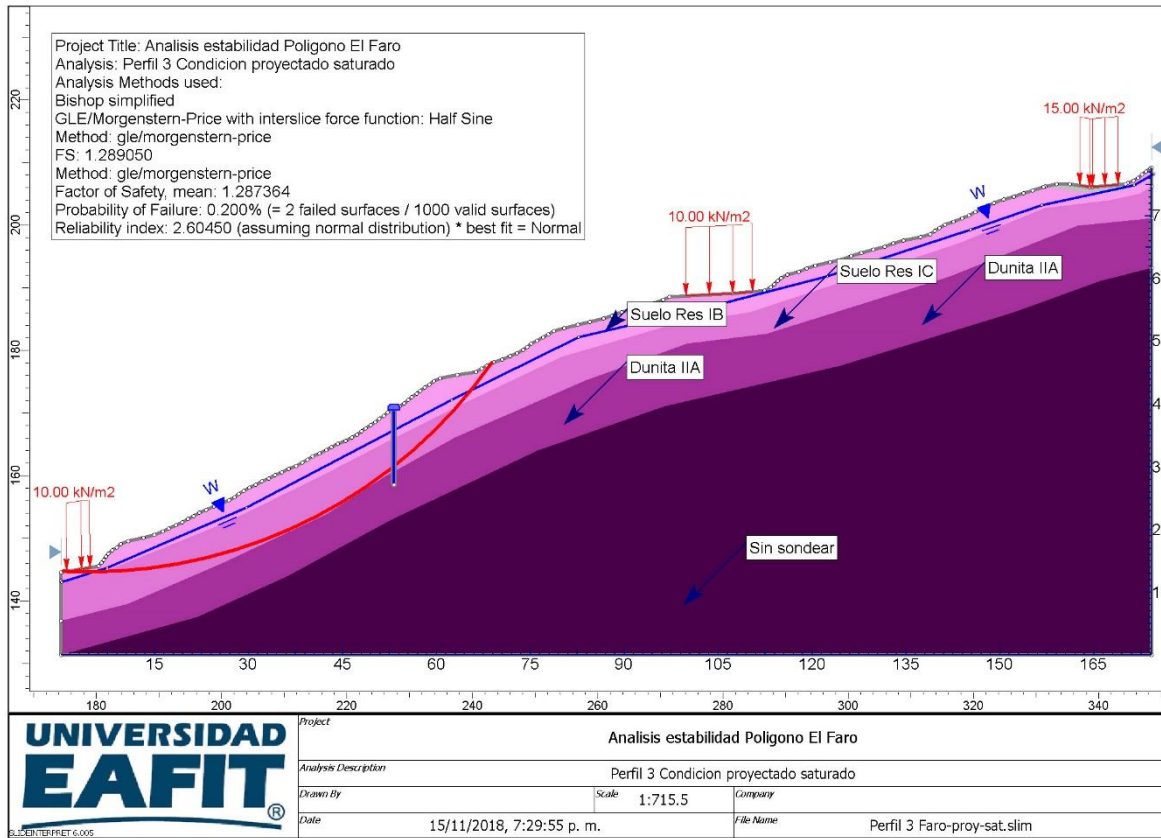


Figura 141. Análisis estabilidad perfil 3. Solución final condición saturada.

13.1.2 Dimensionamiento geotécnico de obras

Para el polígono El Faro se ha recomendado con base en las observaciones de campo y los análisis de estabilidad del sector, la implementación de una serie de obras que buscan mantener y mejorar la estabilidad de las zonas evaluadas (específicamente en las zonas que contienen los perfiles 2 y 3). Como se ha mencionado anteriormente, las obras que se recomiendan son las siguientes (Figura 142):

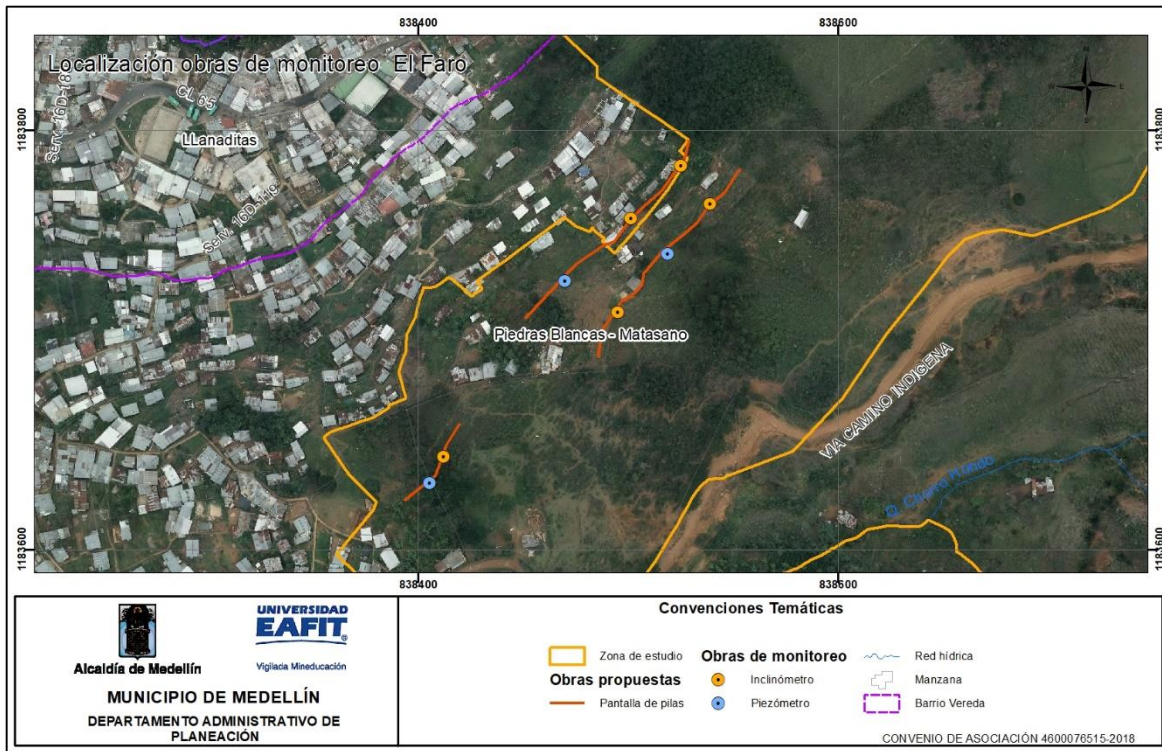


Figura 142. Localización obras proyectadas Polígono El Faro.

Perfil 2

Con base en los diferentes análisis de estabilidad se concluye que es necesario la construcción de 2 estructuras de contención a lo largo de la ladera, que se ubicarán en las cotas 2038.5 y 2057, que se han denominado pantalla inferior y pantalla superior respectivamente. Dichas pantallas tendrán una longitud aproximada de 115 metros cada una. Las pantallas superior e inferior se conformarán con pilas pre-excavadas de 10 m de longitud con 1.0 m de diámetro, espaciadas cada tres diámetros (3.0 m) entre ejes y unidas por una viga cabezal. Teniendo en cuenta el perfil estratigráfico generalizado del sector, con la anterior longitud de pilas, se estima que las estructuras de contención estarán apoyadas y empujadas en la roca fracturada tipo dunita (Nivel IIA).

Como obra complementaria se recomienda la construcción de baterías de drenes subhorizontales que tendrán longitudes de 15 m y diámetro mínimo de 2 pulgadas, envueltos en tela de geotextil no tejido tipo NT 2500 o equivalente. Para el caso de las pantallas de contención, distribuidas a lo largo de la ladera, se deberá construir como mínimo una batería de drenes por cada pantalla, espaciándolos así: para las pantallas inferior y superior los drenes se ubicarán cada 2 pilas es decir cada 6.0 m.

Los drenes se deberán construir con una pendiente con respecto a la horizontal de 3° a 5° para facilitar el escurrimiento. La tubería de p.v.c del dren se deberá prolongar al menos 0.20 m por fuera de la cara del muro para facilitar la disposición de las aguas captadas. Para captar y conducir las aguas de los drenes se colocará a la salida de cada uno de los drenes una manguera flexible que recoja las aguas de estos y las lleve a un drenaje natural o la red de aguas lluvias del sector.

Perfil 3

Como se mencionó anteriormente, para mejorar las condiciones de estabilidad del perfil No 3 y las zonas aferentes se ha planteado como solución la implementación de una estructura de contención compuesta por una pantalla de pilas pre-excavadas unidas en superficie por una viga cabezal, que tendrá una longitud de 45 metros aproximadamente. Esta estructura se construirá sobre la cota 2045. Las pilas que compondrán la pantalla tendrán un diámetro de 1.0 metro y una longitud de 12 metros. Se espaciarán 3.0 metros entre centros.

Como obra complementaria se recomienda la construcción de baterías de drenes subhorizontales que tendrán longitudes de 15 m y diámetro mínimo de 2 pulgadas, envueltos en tela de geotextil no tejido tipo NT 2500 o equivalente, los cuales se ubicarán entre las pilas de cimentación espaciándolos cada 6 m, de manera que éstos se localicen entre las pilas de cimentación.

Los drenes se deberán construir con una pendiente con respecto a la horizontal de 3° a 5° para facilitar el escurrimiento. La tubería de p.v.c del dren se deberá prolongar al menos 0.20 m por fuera de la cara del muro para facilitar la disposición de las aguas captadas. Para captar y conducir las aguas de los drenes se colocará a la salida de cada uno de los drenes una manguera flexible que recoja las aguas de estos y las lleve a un drenaje natural o la red de aguas lluvias del sector.

Análisis Geotécnicos

Pantalla de pilas

Cálculo de capacidad de carga vertical y asentamientos

Para el análisis de la capacidad de carga vertical y estimación de asentamientos se utilizó el software Allpile de Civiltech fundamentado en los procedimientos descritos en “The Foundations & Earth Structures, Design Manual 7.02”, publicados por el Department of Navy, Naval Facilities Engineering Command.

Para el cálculo del asentamiento de los pilotes individuales se utilizan el método semiempíricos propuestos por Vesic (1977)

El asentamiento de un pilote está constituido por la suma de tres componentes

S_t =asentamiento total de un pilote

S_s = asentamiento debido a la deformación axial del fuste del pilote

S_p =asentamiento de la base o la punta del pilote

S_{ps} = asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a través del fuste del pilote. Estas tres componentes se determinan separadamente y se adicionan al mismo tiempo.

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps}$$

Utilizando el software All Pile, mencionado anteriormente y considerando un factor de seguridad de 3.0 para la capacidad por punta, 2.0 para la capacidad por fricción y 2.0 para la resistencia al levantamiento.

Análisis de carga lateral

Para analizar las diferentes estructuras que se proponen y determinar la deflexión, carga lateral, fuerza de cortante y momento del sistema suelo-pila, se utilizó el programa Allpile, el cual trabaja con el modelo elástico mediante la solución de la ecuación diferencial mostrada a continuación:

$$EI \frac{d^4 Y}{dZ^4} + Q \frac{d^2 Y}{dZ^2} - R - P_q = 0$$

Where Q = axial compression load on the pile

Y = lateral deflection of pile at depth of Z

Z = depth from top of pile

R = soil reaction per unit length

E = modules of elasticity of pile

I = moment of inertia of the pile

P_q = distributed load along the length of pile

$$EI\left(\frac{d^3Y}{dZ}\right) + Q\left(\frac{dY}{dZ}\right) = P$$

Where P = shear in the pile

Where M = bending moment of the pile

$$\frac{dY}{dZ} = S,$$

$$EI\left(\frac{d^2Y}{dZ^2}\right) = M$$

Las cargas y fuerzas que actuarán sobre la estructura y que se utilizarán en el software AllPile fueron estimadas con base en los modelos geológico-geotécnicos mostrados anteriormente y considerando empujes para el estado activo seleccionado. El punto de análisis corresponde a la cabeza de las pilas, que coincide con la superficie de falla, con lo cual se analiza el empotramiento requerido para garantizar la estabilidad del sistema. La longitud total de las pilas debe incluir la profundidad de empotramiento y la longitud por encima de la superficie de falla.

El procedimiento para calcular las fuerzas actuantes sobre las estructuras se detalla a continuación:

Una de las soluciones disponibles en Ingeniería Geotécnica para la estabilización de laderas y taludes inestables consiste en el uso de pantallas, generalmente de pilas, que atraviesen con suficiente longitud la superficie de deslizamiento. Se puede contar así con la resistencia estructural al corte de las pilas, que se suma a la del terreno, permitiendo reducir sus deformaciones y aumentar su estabilidad.

Pueden distinguirse dos fases principales de diseño:

- 1.La obtención de la fuerza de estabilización necesaria para lograr el factor de seguridad deseado.
- 2.El cálculo estructural de la pantalla para que soporte dicha fuerza.

La primera fase, y que es la que nos ocupa en el aspecto geotécnico, es relativamente sencilla. La única variable que se necesita de la pantalla es su posición en la ladera, así como su longitud para evaluar la seguridad frente a roturas globales (por debajo del pie de la pantalla, por ejemplo).

Para el desarrollo de la primera fase, y con base en el análisis realizado, se determina la superficie de falla que se quiere estabilizar, para determinar así la ubicación de la pantalla de pilas. La posición idónea de la pantalla dependerá de la geometría del problema y del perfil geotécnico en cada caso.

Cuando se dispone una pantalla formada por una pantalla de pilas, éstas trabajan a cortante y a flexión. El cortante suele ser máximo en la sección que intercepta la superficie de deslizamiento, y los momentos en la zona de empotramiento de la pantalla.

Teniendo en cuenta lo anterior, y una vez localizada (tentativamente) la pantalla de pilas se determina la altura de la masa inestable en este sector, la cual llamaremos H , con base en este parámetro y teniendo en cuenta las características del material inestable se estiman los empujes, momentos y carga aplicados a esta profundidad (H) (Figura 143).

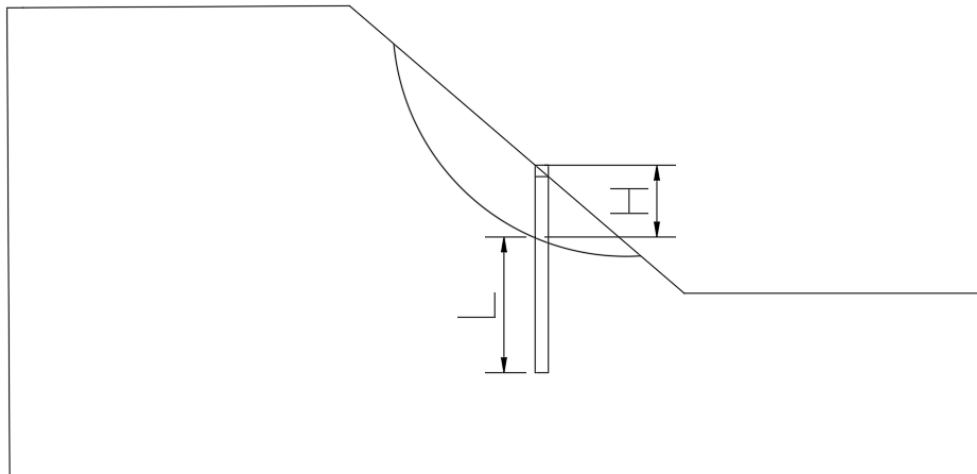


Figura 143. Geometría para cálculo de fuerzas sobre estructuras de contención

A esta profundidad se calculan la fuerza, momentos y sobrecarga, los cuales se estiman así:

Empujes (P):

Los empujes sobre la estructura a diseñar se obtendrán bajo dos teorías:

La primera considera la teoría de Rankine para suelos mixtos para relleno inclinado y la segunda estará soportada en el análisis de Back Analysis del software Slide que permite obtener la fuerza activa necesaria para alcanzar un factor de seguridad de 1.5

En el primer caso con la teoría de Rankine para suelos mixtos (cohesión – fricción) y considerando un terraplén inclinado, la presión activa se calcula como:

$$\sigma_a = \gamma z K_a = \gamma z K'_a \cos \alpha$$

Donde K'a se calcula como:

$$K'_a = \frac{1}{\cos^2 \phi} \left\{ \frac{2 \cos^2 \alpha + 2 \left(\frac{c}{\gamma z} \right) \cos \phi \sin \phi}{-\sqrt{\left[4 \cos^2 \alpha (\cos^2 \alpha - \cos^2 \phi) + 4 \left(\frac{c}{\gamma z} \right)^2 \cos^2 \phi + 8 \left(\frac{c}{\gamma z} \right) \cos^2 \alpha \sin \phi \cos \phi \right]}} \right\} - 1$$

γ = peso unitario del material

z = profundidad de análisis

α = inclinación del terraplén o talud

Y la fuerza total por unidad de longitud de muro se calcula como:

$$Pa = \frac{1}{2} K'_a \gamma H^2$$

Dónde K'a es el coeficiente de presión activa de tierra para suelo (cohesión – fricción).

Para el segundo caso, como se mencionó se tomará el valor de la fuerza activa proporcionado por el software slide para el back análisis considerando alcanzar un factor de seguridad de 1.5

Los valores así obtenidos se comparan y se tomará para el análisis el valor de mayor magnitud.

Para el diseño estructural, el especialista evaluará los valores presentados por el área de geotecnia y tomará el valor de empujes sobre la estructura que considere más adecuados para su análisis.

Momento: (M)

Dado que la fuerza estimada (presión activa) actúa a una distancia $H/3$ de la superficie de falla, el momento en este sector generado por la masa inestable viene dado por la relación:

$$M = \frac{1}{3} H P_a$$

Carga Vertical (Q)

Para la carga vertical se toma el peso de la pila desde la cabeza de la pila hasta la profundidad de la superficie de falla (H).

Para estimar la longitud de la pila se utiliza como criterio principal las deformaciones en la cabeza de esta, para esto se utiliza el programa AllPile de Civiltech, en el cual se modela únicamente el empotramiento de la pila en suelo estable, es decir, la longitud de la pila por debajo de la superficie de falla, teniendo en cuenta que en este sector se estimaron las fuerzas horizontales, verticales y momentos ejercidos por la masa de suelo inestable (Figura 144).

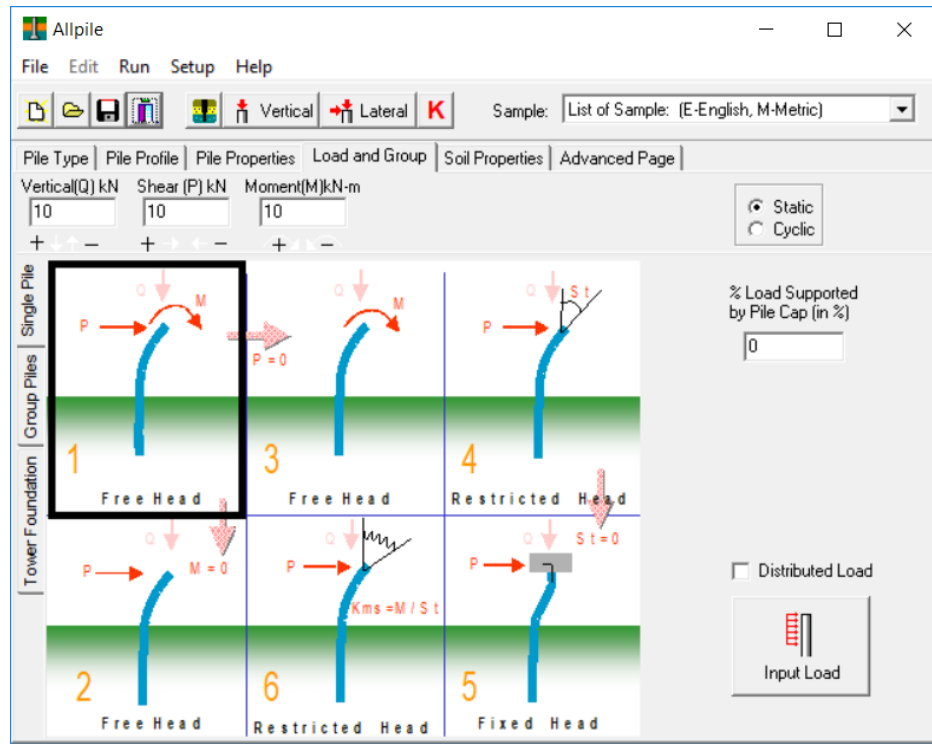


Figura 144. Definición de fuerzas para análisis geotécnicos en Allpile

De acuerdo con lo anterior, la longitud final de la pila será la suma de la longitud modelada en Allpile y la altura H (estrato inestable en el sector de implantación de la pila).

Los resultados de deflexión, momento, cortante y presión lateral entregados corresponden a análisis básicos que consideran aspectos geotécnicos y deberán ser revisados, ajustados o avalados por el diseñador estructural.

RESULTADOS

Perfil 1

A pesar de que la zona tiene factores de seguridad por debajo de 1.5, no se recomiendan obras y se propone catalogar como zona de riesgo alto no mitigable, con el fin de destinar estos sectores a la protección del suelo mediante recuperación de la cobertura vegetal.

Perfil 2

Pantalla inferior

Long total pila 10 m

Prof de falla: 3.1 m

Carga vertical (Q) : peso propio de la pila en una longitud de 3.1 m, incluye viga cabezal. Q= 106.7 kN

Empujes:

Cohesión: 11.1 kN/m²

Angulo de fricción: 26°

Peso unitario: 17.5 kN/m³

Fuerza por unidad de longitud de muro (P):

Según Rankine: 16.6 kN/m

Según Back Analysis Slide: 31.2 kN/m

Se toma el mayor valor, por lo tanto, P = 31.2 kN

Momento: $1/3H \cdot P = 32.2 \text{ kN-m}$

Capacidad de Carga vertical pilas

Tabla 36. Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación. Pantalla inferior perfil 2

Long pila (m)	Long empotramiento (m)	Diámetro (m)	Espaciamiento (m)	Capacidad carga vertical admisible (Ton)	Resistencia al levantamiento (Ton)	Asentamiento (cm)
10	6.9	1.0	3.0	202	92.8	0.02

En las siguientes ilustraciones se presentan la variación de la capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento con la profundidad. Así mismo, se presentan los asentamientos esperados Vs la carga vertical, estimados mediante el software Allpile que utiliza la metodología descrita anteriormente.

ALLOWABLE CAPACITY vs FOUNDATION DEPTH

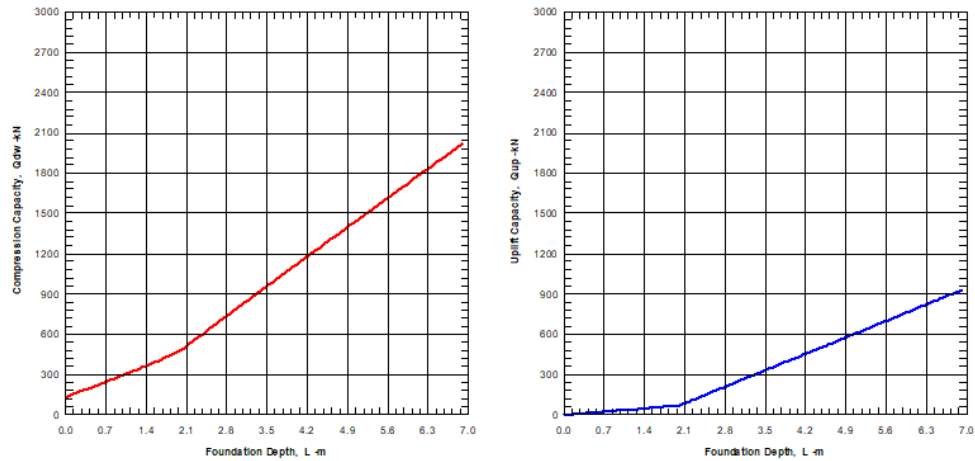


Figura 145. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Pantalla inferior perfil 2.

Vertical Load vs. Settlement

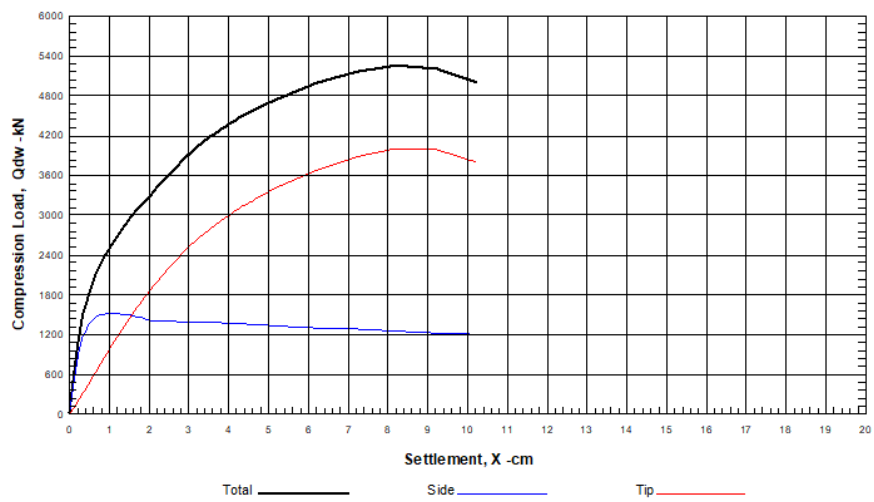


Figura 146. Asentamientos estimados Pilas Pantalla inferior, perfil 2

Análisis de Carga lateral

Tabla 37. Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura

Descripción	Valor
Longitud total de pila (m)	10
Deflexión en la cabeza (mm)	0.6
Momento máximo (kN-m)	87.2
Cortante máximo (KN)	57.1
Presión lateral máxima (KN/m ²)	13.5

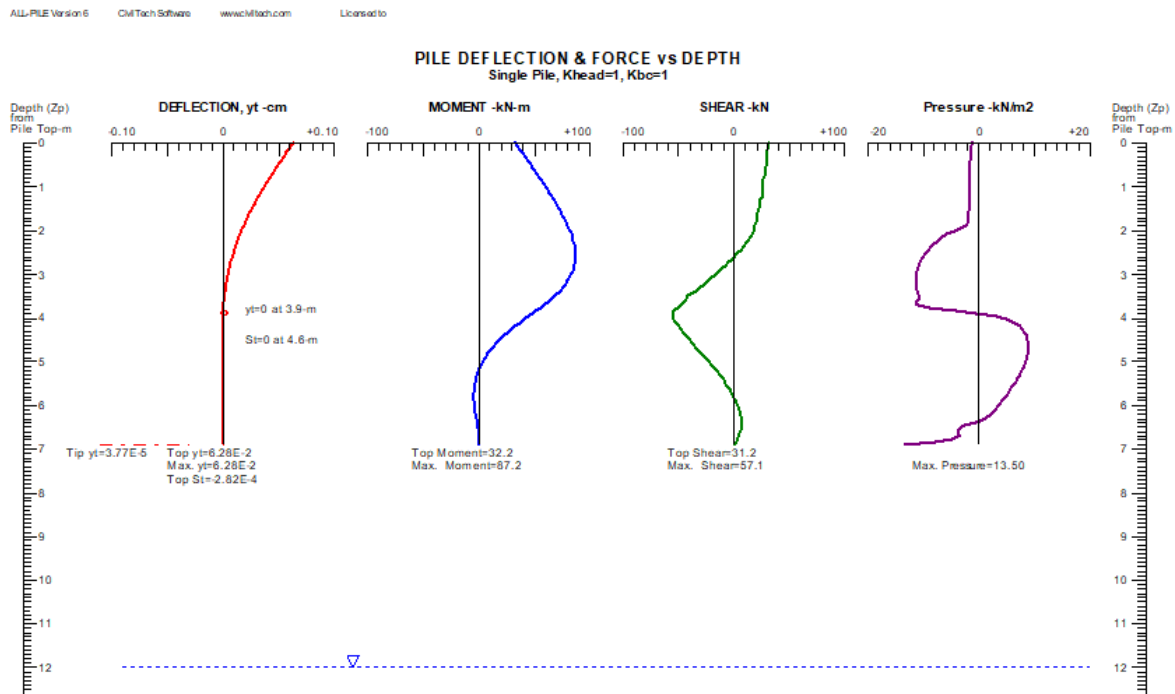


Figura 147. Análisis capacidad lateral de las pilas Pantalla inferior Perfil 2.

Pilas sometidas a fuerzas laterales

Para efectos de calcular las pilas sometidas a carga lateral se recomienda utilizar un valor de K_s que varía de la siguiente manera considerando los estratos presentes en el sitio:

De 0 (cabeza pila) a 2.0 m: 2904 kN/m³

De 2.0 m a 10.0 m: varía linealmente de 2904 a 73104 kN/m³

En la siguiente figura se muestra la variación del módulo Ks con la profundidad.

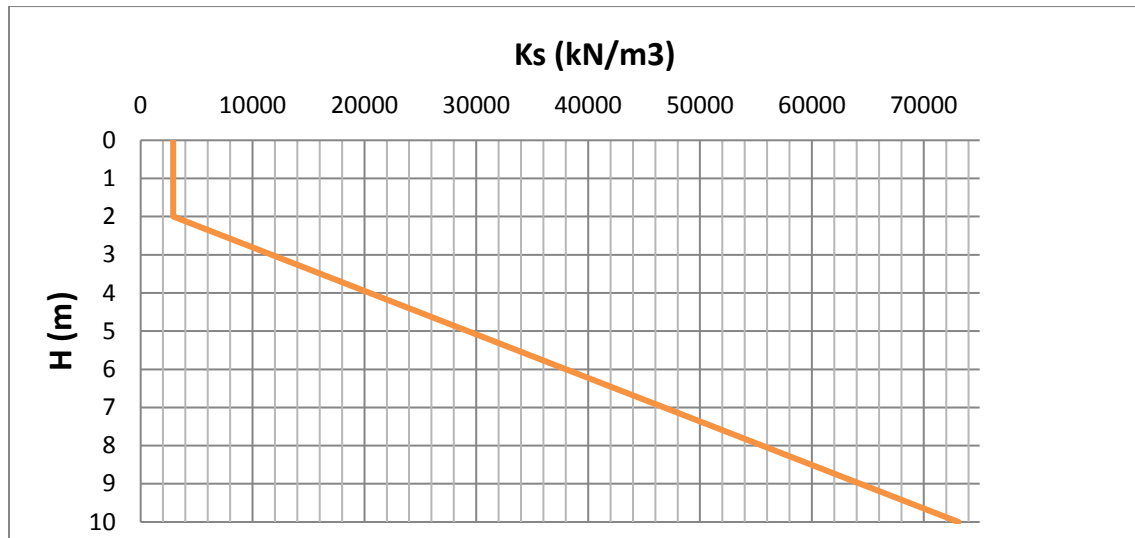


Figura 148. Variación del módulo de reacción lateral con la profundidad.

Perfil 2

Pantalla superior

Long total pila 10 m

Prof de falla: 2.75 m

Carga vertical (Q) : peso propio de la pila en una longitud de 2.75 m, incluye peso viga cabezal. $Q = 99.3$ kN

Empujes:

Cohesion: 11.1 kN/m²

Angulo de fricción: 26°

Peso unitario: 17.5 kN/m³

Fuerza por unidad de longitud de muro (P):

Según Rankine: 11.74 kN/m

Según Back Analysis Slide: 29.2 kN/m

Se toma el mayor valor, por lo tanto, $P = 29.2$ kN

Momento:

$1/3H \cdot P = 26.3$ kN/m

Capacidad de Carga vertical

Tabla 38. Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación muro de contención.

Long pila (m)	Long empotramient o (m)	Diámetr o (m)	Espaciamient o (m)	Capacida d carga vertical admisible (Ton)	Resistencia al levantamient o (Ton)	Asentamient o (cm)
10	7.25	1.0	3.0	213	98.9	0.015

En las siguientes ilustraciones se presentan la variación de la capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento con la profundidad. Así mismo, se presentan los asentamientos esperados Vs la carga vertical, estimados mediante el software Allpile que utiliza la metodología descrita anteriormente.

ALL-PILE Version 6 CivilTech Software www.civiltch.com Licensed to

ALLOWABLE CAPACITY vs FOUNDATION DEPTH

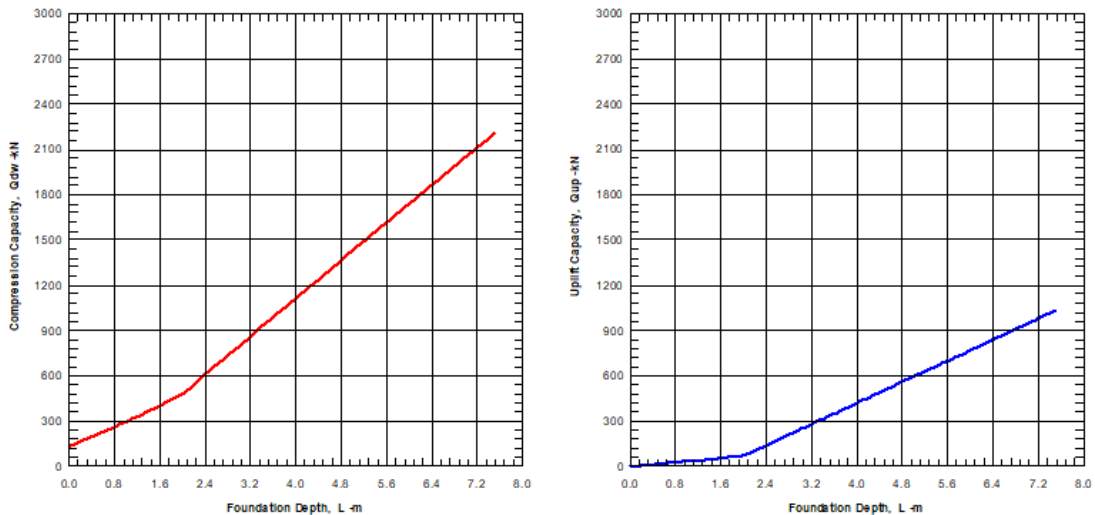


Figura 149. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Pantalla superior perfil 2.

Vertical Load vs. Settlement

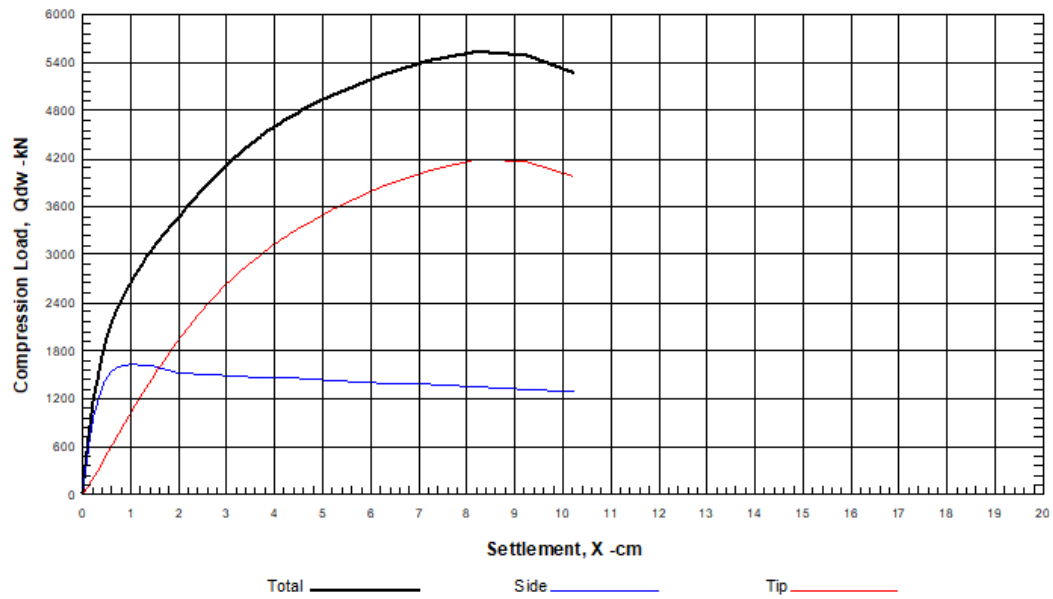


Figura 150. Asentamientos estimados Pilas pantalla superior, perfil 2

Análisis de Carga lateral

Tabla 39. Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura Pilas Pantalla sup. perfil 2

Descripción	Valor
Longitud total de pila (m)	10
Deflexión en la cabeza (mm)	0.5
Momento máximo (kN-m)	77.3
Cortante máximo (KN)	54.3
Presión lateral máxima (KN/m2)	14.1

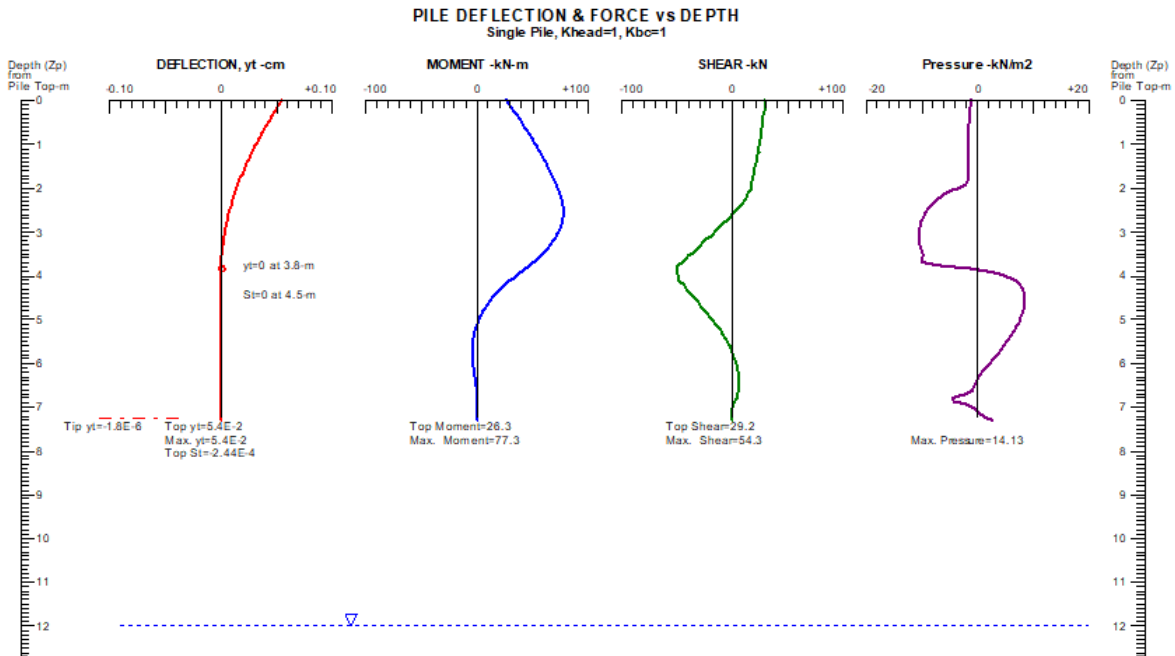


Figura 151. Análisis capacidad lateral de las pilas Pantalla superior, perfil 2.

Para el módulo de reacción lateral utilizar el presentado para el perfil 2 Pantalla inferior.

Perfil 3

Pantalla perfil 3

Long total pila 12 m

Prof de falla: 3.8 m

Carga vertical (Q) : peso propio de la pila en una longitud de 3.8 m y viga cabezal

Q= 119.6 kN

Empujes:

Cohesión: 11.1 kN/m²

Angulo de fricción: 26°

Peso unitario: 17.5 kN/m³

Fuerza por unidad de longitud de muro (P):

Según Rankine: 11.7 kN/m

Según Back Analysis Slide: 31.3 kN/m

Se toma el mayor valor, por lo tanto, P = 31.3 kN

Momento: $1/3H \cdot P = 39.6 \text{ kN-m}$

Capacidad de Carga vertical

Tabla 40. Capacidad de carga vertical y asentamientos pilas de fundación Pantalla perfil 3.

Long pila (m)	Long empotramiento (m)	Diámetro (m)	Espaciamiento (m)	Capacidad carga vertical admisible (Ton)	Resistencia al levantamiento (Ton)	Asentamiento (cm)
12	8.2	1.0	3.0	123.0	41.9	0.027

En las siguientes ilustraciones se presentan la variación de la capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento con la profundidad. Así mismo, se presentan los asentamientos esperados Vs la carga vertical, estimados mediante el software Allpile que utiliza la metodología descrita anteriormente.

ALL-PILE Version 6 CivilTech Software www.civiltach.com Licensed to

ALLOWABLE CAPACITY vs FOUNDATION DEPTH

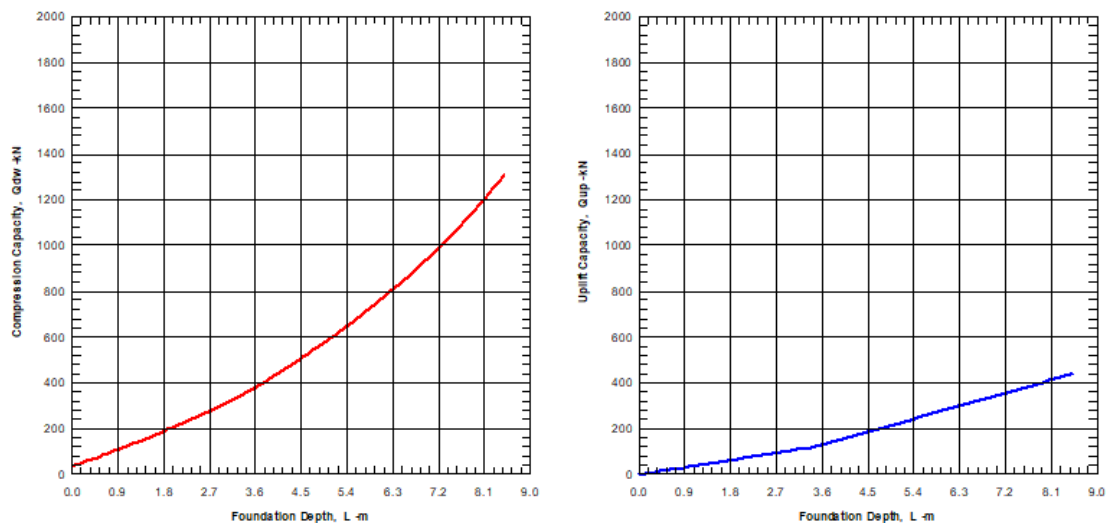


Figura 152. Capacidad de carga vertical y resistencia al levantamiento Pantalla perfil 3

Vertical Load vs. Settlement

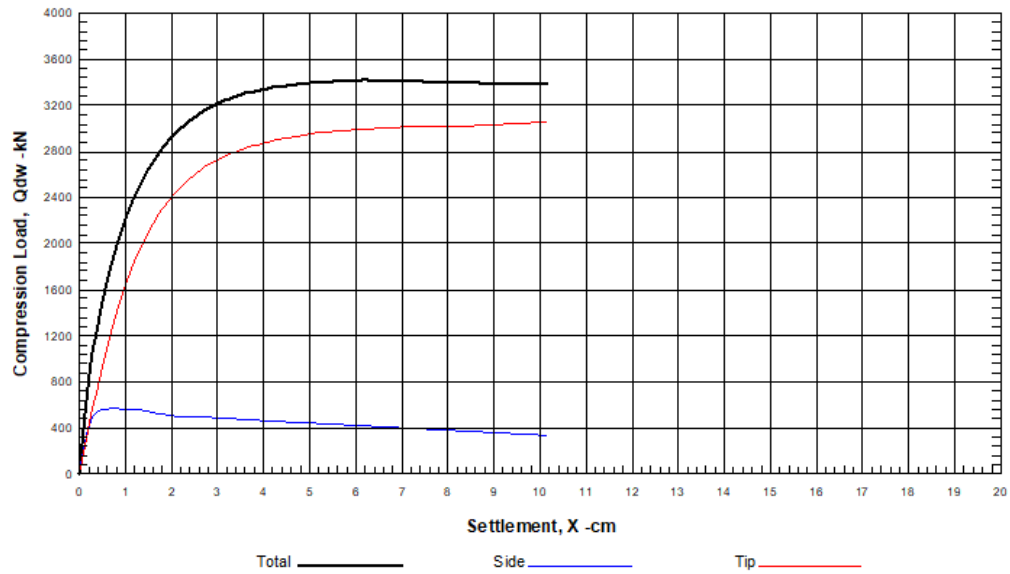


Figura 153. Asentamientos estimados Pantalla perfil 3

Análisis de Carga lateral

Tabla 41. Resultados Obtenidos Interacción suelo-estructura Pantalla perfil No 3

Descripción	Valor
Longitud total de pila (m)	12
Deflexión en la cabeza (mm)	1.3
Momento máximo (kN-m)	92.4
Cortante máximo (KN)	33.8
Presión lateral máxima (KN/m2)	9.25

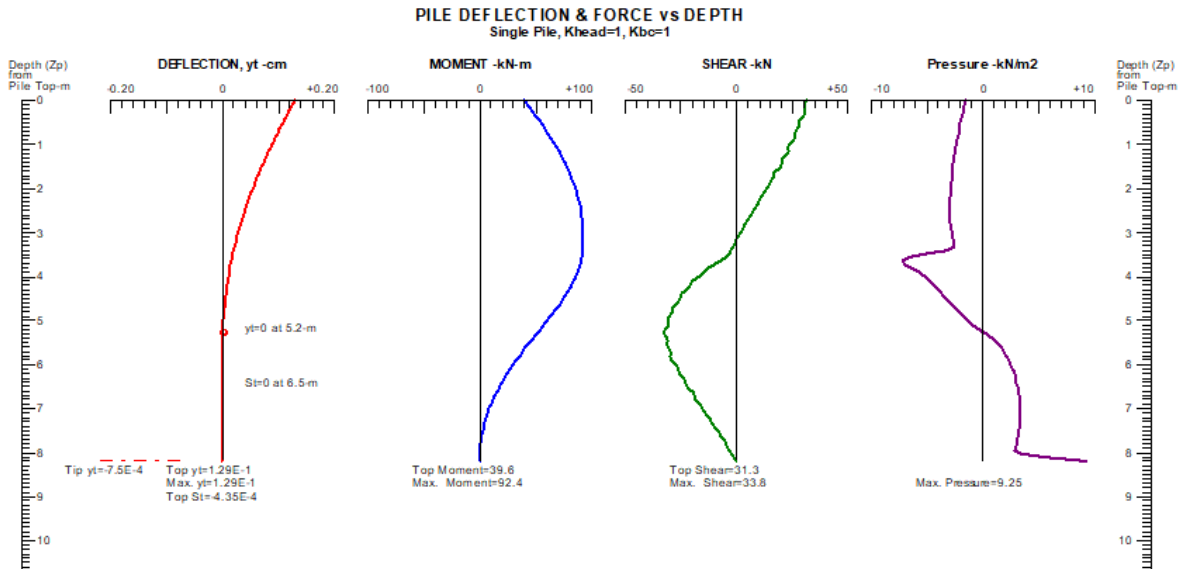


Figura 154. Análisis capacidad lateral de las pilas Pantalla perfil 3.

Pilas sometidas a fuerzas laterales

Para efectos de calcular las pilas sometidas a carga lateral se recomienda utilizar un valor de K_s que varía de la siguiente manera considerando los estratos presentes en el sitio:

El módulo de reacción lateral (k_s) varía de la siguiente forma:

De 0 (cabeza pila) a 2.0 m: 1565 kN/m³

De 2.0 m a 10.0 m: varía linealmente de 1565 a 7246 kN/m³

De 10.0 a 12 m: Varía linealmente de 7246 kN/m³ a 73104 kN/m³

En la siguiente figura se muestra la variación del módulo K_s con la profundidad.

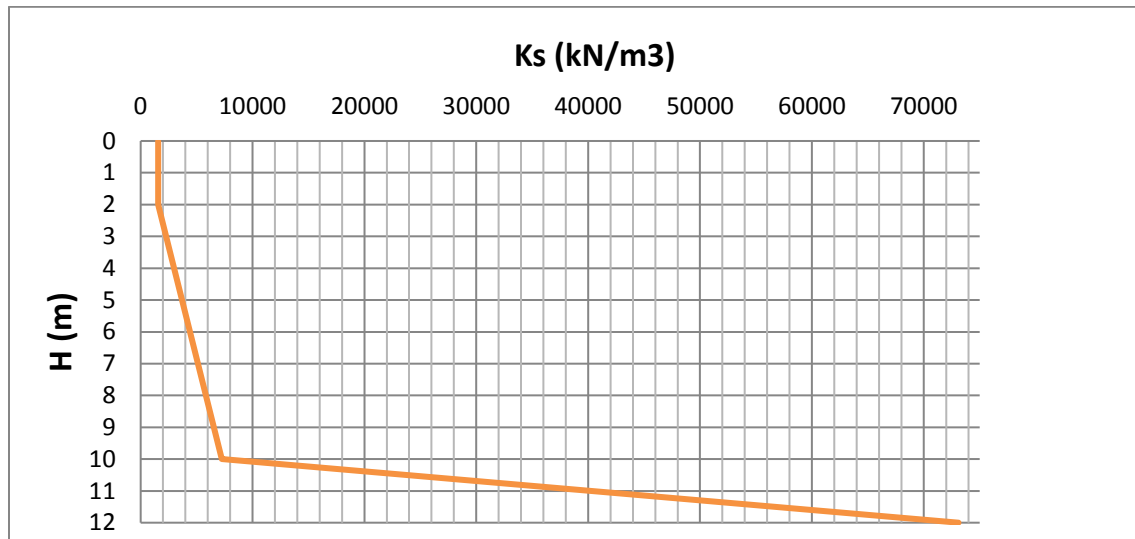


Figura 155. Variación del módulo de reacción lateral con la profundidad.

Perfil 4

Según las condiciones topográficas, geotécnicas y los resultados encontrados en el análisis de estabilidad de las condiciones actuales, no se prevé la recomendación de obras en la zona asociada a este perfil.

Perfil 5

Según las condiciones topográficas, geotécnicas y los resultados encontrados en el análisis de estabilidad de las condiciones actuales, no se prevé la recomendación de obras en la zona asociada a este perfil.

13.1.3 Plan de Seguimiento y Monitoreo

Para el polígono El Faro se propone instalar dos inclinómetros por cada pantalla de pilas del perfil No 2 y para el perfil No 3 se recomienda instalar al menos un inclinómetro detrás de la pantalla de pilas proyectada.

Los inclinómetros en cada una de las pantallas de pilas del perfil No 3 se podrán ubicar uno dentro de una pila, preferiblemente en la zona central de dicha pantalla y el otro detrás de la pantalla de pilas, pero cercano a las mismas. En el caso del inclinómetro ubicado en una de las pilas, la longitud del inclinómetro será igual a la de la pila (10m). Para el caso del inclinómetro ubicado en el terreno por detrás de la pantalla se recomienda que alcance una profundidad de 20 metros.

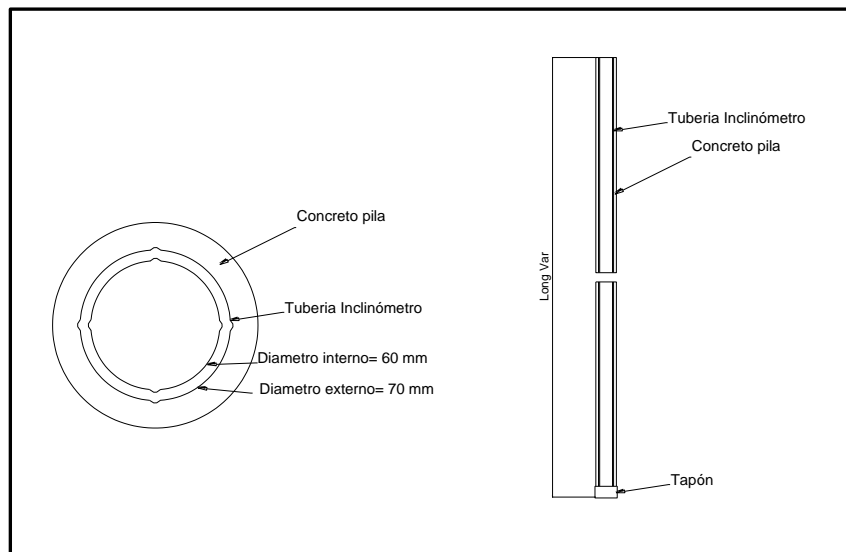


Figura 157. Detalle de inclinómetro

Se recomienda colocar en la cabeza del inclinómetro una caja o protector metálico para preservarlo de actos vandálicos.

La lectura de inicio o lectura base se podrá realizar una vez haya fraguado la lechada que fija el tubo al terreno y a partir de esta lectura se recomienda realizar lecturas mensuales durante al menos dos años, que iniciarán una vez se encuentre construida la pantalla de contención.

La propuesta de monitoreo del nivel freático para el polígono El Faro, consiste en instalar un piezómetro de tubo abierto de 15 m de longitud detrás de cada una de las pantallas de pilas proyectadas.

Estos elementos permitirán realizar seguimiento a las variaciones del nivel freático y advertir sobre elevaciones del mismo para evaluar la eficiencia de las obras de drenaje proyectadas. El piezómetro propuesto consiste en realizar una perforación con diámetro NQ en la longitud recomendada e instalar una tubería de p.v.c ranurada de 1 ½ "envuelta en geotextil no tejido tipo NT 2000 o equivalente. El espacio entre el tubo y la pared de la perforación se deberá rellenar con arena gruesa o gravilla limpia. En el fondo de la tubería se deberá colocar un tapón que evite el ingreso de sedimento a la tubería. De igual manera en la parte superior, se deberá construir una caja o protector metálico para su preservación.

El nivel freático se podrá medir con un indicador de nivel acústico y se llevará el registro de las mediciones, anotando, además, la ocurrencia o no de lluvias en horas

previas a la medición. Se propone realizar las mediciones de control y seguimiento en un período no inferior a 24 meses con lecturas de periodicidad mensual.

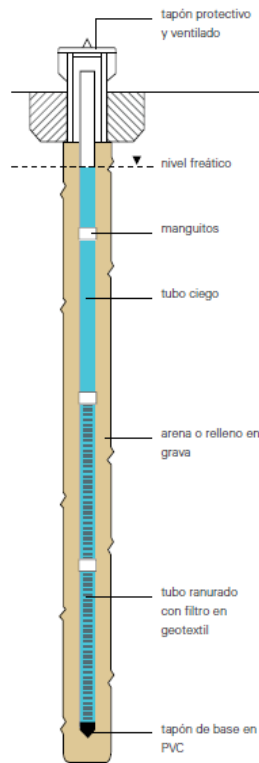


Figura 158. Detalle de piezómetro de tubo abierto

Debe tenerse en cuenta que el monitoreo no está concebido para definir un sistema de alerta sino para el evaluar el comportamiento de las obras construidas y proceder con la desafectación de la áreas o polígonos con condición de riesgo. Se ha aclarado con el DAP que la desafectación solo se hará cuando se hayan construido las obras y verificado su adecuado funcionamiento de las mismas. El plan de monitoreo propuesto busca determinar la efectividad de las obras y en caso extremo proponer soluciones complementarias para lograr la estabilidad que garantice la desafectación de las áreas involucradas. Se consideran deformaciones admisibles hasta de una pulgada, sin embargo, cuando se haya alcanzado el 50% de esta magnitud, se deberá alertar sobre esta condición.

13.1.4 Recomendaciones particulares excavación de pilas

Al iniciar una excavación en el terreno, se producen alteraciones en las tensiones normales del mismo, rompiendo el equilibrio que existe, aunque el terreno

normalmente reestablece este equilibrio en ocasiones se producen deslizamientos de las paredes que afectan la estabilidad de esta sección de la obra, por lo que se deben seguir ciertas recomendaciones que minimicen la posible ocurrencia de estos eventos:

- Se deberá evitar la acumulación de materiales en los bordes de las excavaciones a fin de prevenir deslizamientos por causa de sobrecargas en la sección de corte, según la experiencia es recomendable que la distancia mínima libre de material acumulado sea igual o mayor a la profundidad excavada.
- Se recomienda cuidar el paso de maquinaria cerca al borde de la excavación con el fin de evitar posibles sobrecargas dinámicas que provoquen afectaciones negativas a la excavación
- Se recomienda que los cortes realizados no se dejen expuestos un periodo prolongado de tiempo, realizando las actividades de excavación y construcción con una secuencia lo más inmediata posible, evitando así remoldeo en el material (suelo) de cimentación.
- En todos los casos es necesario que el fondo de la excavación, conocida como la profundidad de desplante se encuentre libre de cualquier objeto extraño o material suelto, por lo que se recomienda una limpieza de las superficies que garantice superficies libres de material removido evitando así la posible ocurrencia de asentamientos considerables del elemento de cimentación.
- En caso de que el nivel al cual se proyectó el desplante de la cimentación posea un material diferente al especificado en el informe, el paso a seguir será continuar la excavación hasta encontrarse, rellenando el volumen sobre-excavado con concreto ciclópeo.
- Antes de vaciar las cimentaciones, se deberá limpiar todo el material del fondo de la excavación, con el fin de evitar que estos materiales puedan ocasionar asentamientos considerables a la estructura.
- Durante la etapa de construcción se recomienda llevar un control de los asentamientos y deformaciones cuyo objetivo estará ligado a controlar y verificar la magnitud de estos respecto a los esperados o permisibles dentro del cálculo de la cimentación.
- Se recomienda entibar toda la longitud de la pila utilizando anillos de concreto, para evitar deterioro del terreno y garantizar la seguridad del personal que labora en ellas.



Figura 159. Construcción de una pila in-situ.

- Se recomienda tener un estricto control de las aguas de escorrentía y aguas lluvias que tengan influencia en el lugar de construcción pues la ausencia de este hará que el flujo no controlado se desplace por las superficies pudiendo tener una afectación negativa en las propiedades de los materiales y generando eventos de inestabilidad en excavaciones y superficies de terreno.

13.1.5 Viviendas afectadas por obras propuestas

Para la localización de las obras de estabilización propuestas para el polígono de El Faro, se presenta afectación en un total de 6 edificaciones, localizadas en las obras propuestas en los perfiles 2 y 3 principalmente. A continuación, se relacionan las viviendas afectadas para el polígono:

Tabla 42. Viviendas afectadas por obras en el polígono El Faro

OBRA	COBAMAC
Muros perfil N° 2	90080260043
	90080000037
	90080260044
	90080260046
	90080260047
	90080260058

13.2 RECOMENDACIONES GENERALES

En terrenos inclinados la fuerza de gravedad juega un importante papel en la formación de inestabilidades pues existe un componente sobre la masa de suelo que induce a que una masa se deslice a lo largo de una superficie de falla, una vez se supera la resistencia al cortante de dicho material. Para que esto suceda existen una serie de factores que coadyuvan a que se disminuyan las propiedades de resistencia de los suelos tales como incremento de los niveles de humedad – saturación, inclinación o pendiente de los terrenos, modificaciones antrópicas entre otras.

Con el fin de mitigar las inestabilidades generadas o prevenir la ocurrencia de estas, se presentan a continuación una serie de medidas que deben tenerse en cuenta en los procesos de intervención de un terreno. Las medidas se plantean como obras de mitigación y/o control hacia dos aspectos fundamentales: Las modificaciones del terreno por factores antrópicos y el control de las aguas, que constituyen la principal causa de la formación de inestabilidades en nuestro medio.

Para la construcción de viviendas nuevas, legalización de las existentes y desarrollo de obras de infraestructura, se deben realizar los estudios geotécnicos o de suelos puntuales, de conformidad con la NSR-10 y el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012. Dichos estudios deberán ser aprobados en las curadurías urbanas.

13.2.1 Modificaciones del terreno

La creciente demanda por terrenos para construir viviendas ha hecho que se ocupen terrenos de altas pendientes y pobres propiedades geotécnicas, mediante emplazamientos logrados a través de cortes de las laderas que deterioran la estabilidad precaria de por sí, de las mismas.

Con el fin de prevenir inestabilidades en las zonas de alta pendiente, es necesario incluir en las prácticas de construcción algunas recomendaciones que pretenden disminuir la probabilidad de que ocurran movimientos en masa que pueden tener graves consecuencias en los aspectos económicos y sociales

Es necesario que la comunidad que interviene las laderas que conforman las vertientes de las diferentes quebradas, conserven el retiro mínimo establecido en el POT de la ciudad, con el fin de prevenir emergencias asociadas a las crecientes o avenidas torrenciales como a la posibilidad de ser afectados por movimientos en masa.

En primer lugar, se recomienda que los cortes de la ladera que se realizan entre viviendas adyacentes no deben superar 3 m de altura y es necesario mantener un retiro mínimo de las zonas de taludes para el establecimiento de la vivienda, dejando un retiro tanto en la parte superior del talud como en la parte inferior del mismo, no menos de $\frac{2}{3}$ de la altura antes mencionada, como se muestra en la Figura 160.

En el caso de existir taludes con mayores alturas a la mencionada se deberán construir estructuras de contención que permitan garantizar la estabilidad de esta. Estas estructuras deberán cimentarse adecuadamente sobrepasando materiales de lleno y empotrándose en terrenos aptos para tal fin.

Para el caso de terrenos con predominio de materiales limo arcillosos o arcillosos, se podrán conformar taludes hasta la altura recomendada anteriormente con inclinación que mantenga una relación de corte de 0.5H:1V (62°). En el caso de materiales limosos o arenosos, la inclinación o pendiente del talud generado no debe exceder de 1H:1V.

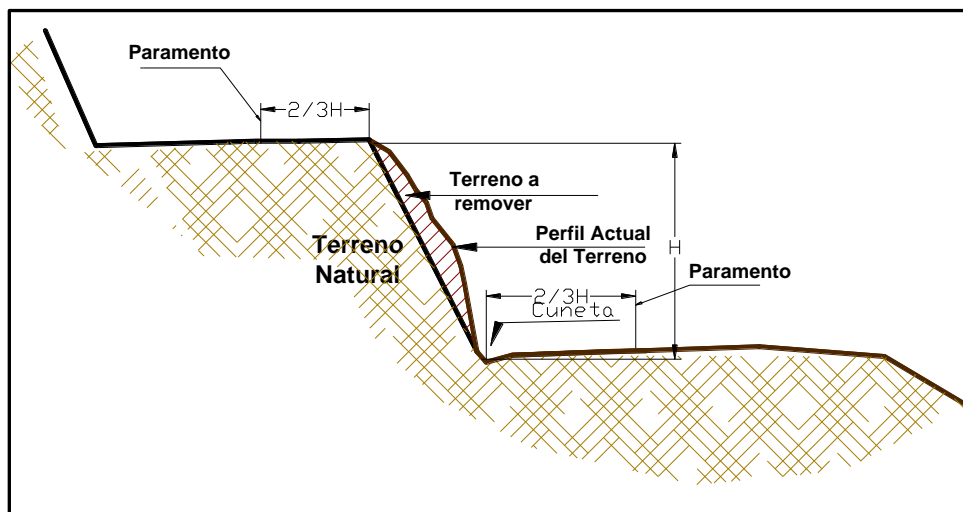


Figura 160. Recomendaciones para modificaciones del talud e implantación de viviendas.

En sectores en donde se detecte la presencia de agrietamientos en el terreno o deformaciones en el talud que amenacen el sector, deben intervenir estos taludes retirando el material inestable y conformando las pendientes anteriormente recomendadas, de acuerdo con el tipo de material que conforma el talud (Figura 161). Esta intervención debe realizarse con medios manuales y con la orientación

de personal calificado, además de tener las respectivas medidas de seguridad para el personal que labore allí.

Si el talud a intervenir presenta suelos limo arcillosos o arcillosos se podrá cubrir el área afectada o intervenida con cespedones de grama o en su defecto se podrán utilizar productos sintéticos (biomantos, agromantos, etc) mezclados con semillas de pastos que permitan el establecimiento de la cobertura en el menor tiempo posible

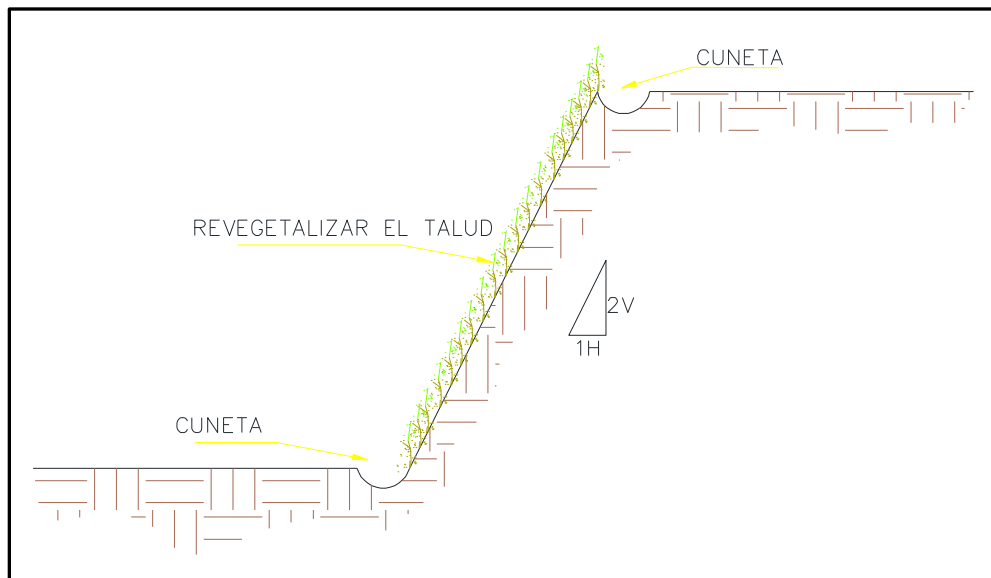


Figura 161. Esquema de recomendaciones para taludes

Si los materiales que conforman el talud son limosos o arenosos, se recomienda el cubrimiento de la zona expuesta mediante la utilización de malla de gallinero y mortero. La malla debe anclarse al talud utilizando pernos de acero, que deberán tener longitudes no inferiores a 0.50 m. Sobre la malla se colocará un mortero de arena-cemento en un espesor no inferior a 5 cm. se deberán dejar oídos o lloraderos para permitir el drenaje de aguas infiltradas detrás de la piel o placa. Estos lloraderos se construirán con trozos de tubería pvc sanitaria de 2 pulgadas de diámetro de 40 cm de longitud, que atravesarán la cubierta y se dejará 5 cm por fuera de la misma. Se deberá garantizar una pendiente del 5% con respecto a la horizontal.

En sectores donde se presenten grietas de tensión, se deberá inicialmente rellenarlas y sellarlas utilizando el siguiente procedimiento:

En primer lugar, se debe preparar una lechada de agua-cal lo suficientemente fluida para que percole por la grieta y descienda la mayor profundidad posible. Una vez hecho esto, se excavará a lado y lado de la grieta en un ancho máximo de 10 cm, y hasta una profundidad no inferior a 0.50 m, donde se colocará una mezcla de suelo y cal en proporción de 8:1, la cual colocará en capas de no más de 0.20 m y se compactará utilizando pisones manuales, hasta alcanzar la superficie del terreno. Se deberá mantener la vigilancia sobre estos terrenos y en caso de que se presenten nuevos agrietamientos, se deberá evaluar la posibilidad de intervenir el talud reconfigurándolo con las inclinaciones anteriormente mencionadas.

13.2.2 Control de drenaje

El agua constituye un factor determinante en la formación de inestabilidades de terrenos inclinados, pues causan deterioro de las propiedades que gobiernan la resistencia de los suelos que conforman los taludes. Por lo anterior, es preciso mantener el control estricto sobre las aguas lluvias y de escorrentía para prevenir o mitigar efectos adversos sobre la estabilidad de taludes y laderas. Para lograr el fin antes mencionado, se presentan algunas recomendaciones generales que buscan el control de las aguas y por ende mantener condiciones de estabilidad adecuadas.

Cunetas y rondas de coronación

Es necesario que, en sectores con áreas aferentes importantes, se construya una cuneta o ronda de coronación que intercepte las aguas de escorrentía que puedan afectar el talud objeto de intervención. Estas cunetas o rondas deben construirse por detrás de la corona de este, a una distancia mínima de 1.0 m. Estos elementos deberán tener una pendiente no inferior al 2% y no superior al 5% y deberán entregarse a drenajes naturales o a la red de aguas lluvias. Estas cunetas se podrán construir con sacos de suelo-cemento o con concreto simple, como se muestra en la Figura 162.

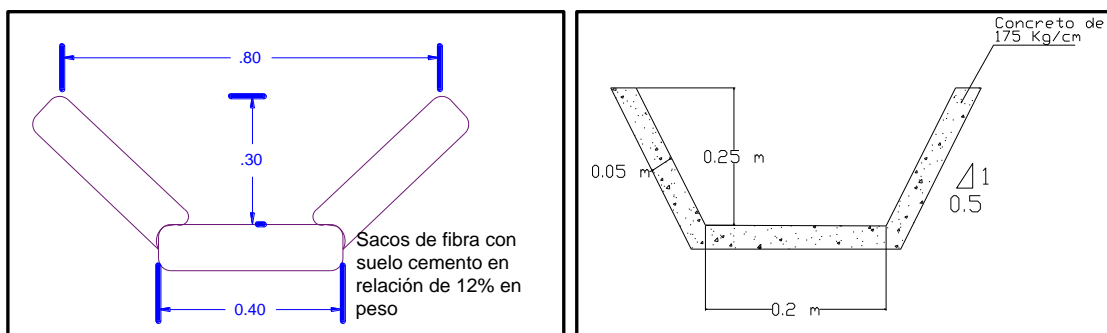


Figura 162. Características de las cunetas

En la parte inferior del talud (pie o pata del talud) se deberá construir una cuneta que permita captar y conducir las aguas de escorrentía que fluyan por el talud, de tal manera que se evite la infiltración o la formación de procesos erosivos.

Las cunetas recomendadas podrán construirse en concreto y debajo de la misma, se deberá colocar un entresuelo en piedra y arena con espesor no inferior a 10 cm. Las especificaciones de pendiente y entrega serán las recomendadas anteriormente para las rondas de coronación. Estas cunetas deberán llevar las aguas hacia la red de aguas lluvias de la zona o hacia los drenajes naturales. Se debe verificar que la entrega se haga de manera adecuada, evitando la formación de procesos erosivos.

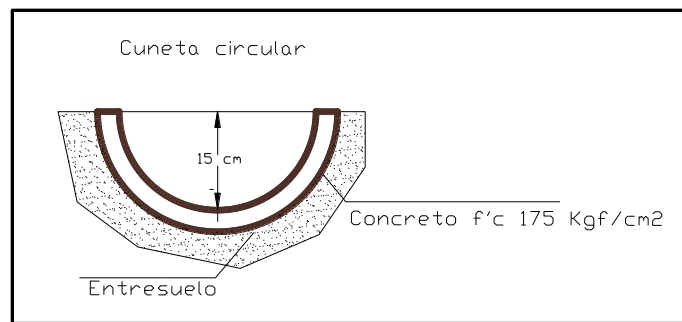


Figura 163. Forma de construcción de las cunetas propuestas

Captación y conducción de aguas lluvias en viviendas

Cada vivienda debe implementar un sistema de captación y conducción de aguas lluvias mediante canoas que recojan las aguas de los techos y las conduzcan por medio de bajantes a la red de aguas lluvias del sector o en su defecto a tanques de almacenamiento para ser aprovechadas en labores de limpieza.

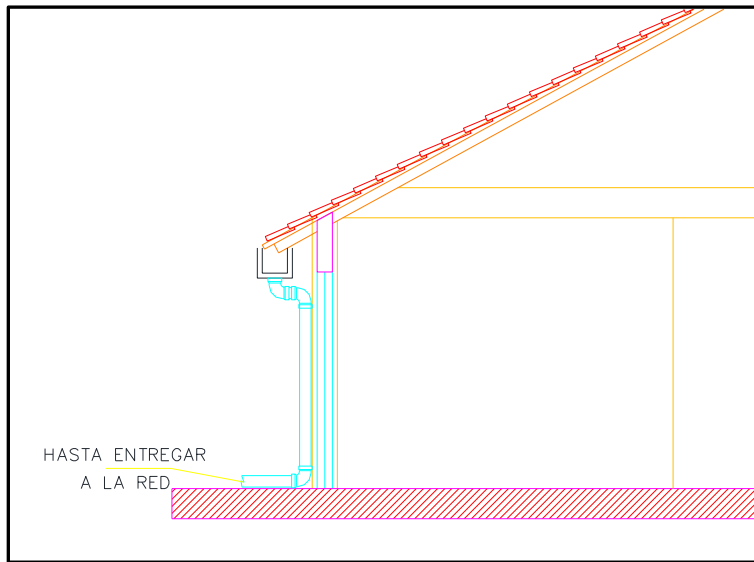


Figura 164. Esquema de bajantes

Las redes de acueducto y alcantarillado de cada vivienda deben construirse en tuberías de p.v.c que permitan cierta flexibilidad y eviten el rompimiento o deterioro ante pequeños movimientos o desplazamientos del terreno. Debe realizarse periódicamente evaluaciones del estado de las redes con el fin verificar su adecuado comportamiento y/o la necesidad de reemplazar alguna de ellas.

Es necesario que al interior y/o exterior de cada vivienda se verifique que no existen zonas de empozamiento y que las aguas lluvias y de escorrentía fluyen adecuadamente hacia las obras de drenaje o hacia los drenajes naturales.

Drenaje en vías y senderos

Se debe implementar o mejorar el sistema de drenaje en calles y senderos mediante la construcción o adecuación de cunetas y canales que permitan captar y conducir adecuadamente las aguas lluvias y de escorrentía hacia la red de aguas lluvias o drenajes naturales. Para lo anterior, durante el programa de intervención se definirán los trazados de las redes de cunetas, ajustándose a las condiciones de espacio, pendiente y caudal o se reemplazarán las que se requieran por su estado o por su capacidad.

Estos sistemas de captación de aguas lluvias deberán estar provistos de estructuras de disipación para atravesar terrenos de muy alta pendiente, sin que se afecte el flujo normal de las aguas.

Tanto las redes de acueducto como alcantarillado deben ubicarse sobre terrenos estables. En sectores que muestren alguna actividad inestable, deberán colocarse superficialmente para mantener vigilancia sobre las mismas.

Deberá procurarse la construcción de sumideros en calles y senderos para captar las aguas lluvias y escorrentías que fluyen por los mismos y conducirlos adecuadamente hacia la red de aguas lluvias o drenajes naturales.

Obras de drenaje complementarias

Todas las obras de ingeniería que se recomiendan para mejorar la estabilidad tales como muros, pantallas ancladas, pantalla de pilas etc, deberán complementarse con obras de drenaje que eviten el deterioro o la falla de estas. En este orden se deberán construir cunetas, filtros y drenes horizontales que mantengan controlado las aguas lluvias, de escorrentía y el nivel freático en los sectores intervenidos.

Drenes horizontales o de penetración.

Los drenes subhorizontales consisten en introducir una tubería de p.v.c con una leve pendiente al terreno para abatir o controlar el nivel freático y mantener las condiciones de estabilidad del sector. Los drenes se construirán en tubería de p.v.c sanitaria de 2 pulgadas de diámetro, ranurada o perforada y se forrará con tela de geotextil no tejido tipo NT 2500 o similar. La inclinación de los drenes será de 4 a 6° con respecto a la horizontal. El espaciamiento tanto vertical como horizontal se especifica en cada uno de los planos constructivos.

Se dejará un tramo de tubería de 15 a 20 cm por fuera del talud y se conectará con manguera flexible para conducir las aguas captadas hacia una cuneta, la red de aguas lluvias o hacia un drenaje natural.

Filtros detrás de muros

Detrás de las estructuras de contención es obligatorio la construcción de filtros para el control de las aguas infiltradas. Los filtros detrás de estructuras se podrán construir con material granular limpio envuelto en geotextil no tejido con un ancho mínimo de 0.50 m y con altura de 2/3 partes de la altura del muro. La parte restante hasta llegar a la corona del muro se hará con material de lleno convencional. En la parte inferior del filtro se colocará una tubería perforada de 4 pulgadas, que se conectará a la red de aguas lluvias o a un drenaje del sector.

En la figura siguiente se presentan los detalles para el filtro detrás de estructuras.

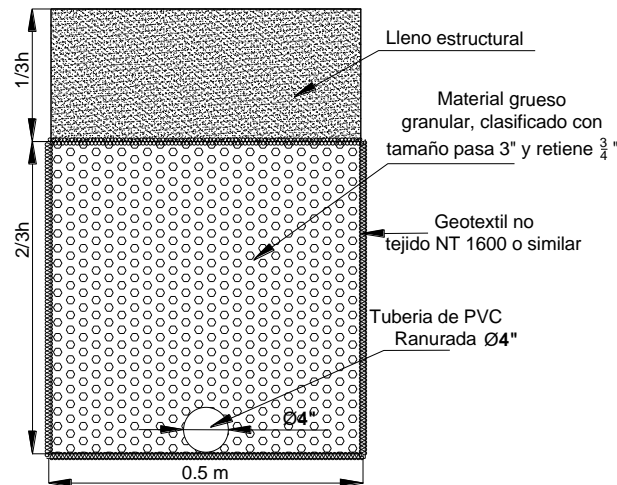


Figura 165. Características de los filtros propuestos

Es conveniente que en la pantalla del muro de contención se construyan oídos o lloraderos que faciliten la evacuación de excesos de agua para evitar presiones adicionales sobre la estructura. Estos oídos se conforman dejando embebido en el concreto la tubería de p.v.c de 2 pulgadas que atraviesan la pantalla de concreto.

13.3 RECOMENDACIONES DE VULNERABILIDAD

13.3.1 Servicios públicos domiciliarios

Consolidar la construcción de redes locales de acueducto, redes locales de alcantarillado de aguas servidas y lluvias en todo el polígono.

En el polígono estudiado se localizan 63 construcciones que presentan operador de acueducto no formalizado (comunal o conexiones erradas), para las cuales, se recomienda tramitar la conexión y legalización de este sistema ante la entidad prestadora del servicio, EPM. Igualmente 63 edificaciones presentan como tipo de descarga en talud y sistema no convencional, por lo tanto, se recomienda la conexión de dichos predios a la red de alcantarillado existente.

Finalmente, se localizan 63 construcciones que no cuentan con sistema de recolección de aguas lluvia, arrojando libremente dichas aguas al terreno, lo que

puede ocasionar la erosión, infiltración y humedades de las estructuras y taludes colindantes, por ende, se sugiere la adecuación de cubiertas y bajantes para la captación y conducción a la red de EPM.

13.3.2 Líneas vitales – energía y alumbrado público

En el polígono El Faro de los 40 postes de energía con lo que cuenta esta zona, se encontraron 13 postes que presentaron algún tipo de deficiencia, sea inclinación o fisuras, por lo tanto, se recomienda el reemplazo de estos, en especial a los que se les identifica madera como material de composición.

13.3.3 Vías de acceso y obras de drenaje

Se deben construir cunetas, sumideros y obras transversales en vías vehiculares, andenes o senderos peatonales.

13.3.4 Mejoramiento saludable

Este tipo de mejoramiento consiste en implementar obras menores, que tienen como finalidad mantener el inmueble en las debidas condiciones de higiene y ornato sin afectar su estructura portante, su distribución interior, sus características funcionales, formales y/o volumétrica, para las cuales no se requerirán licencias de construcción en los términos del artículo 10 del decreto Nacional 1469 de 2010 o a las normas que lo adicionen, modifiquen o sustituyan. Se otorga para corregir: habilitación o instalación de baños, lavadero, cocinas, redes hidráulicas y sanitarias, cubiertas parciales, pisos, enchapes, instalaciones eléctricas etc.

En el polígono El faro se identificaron 4 construcciones que representan las estructuras con tipologías (D), (C) y (B) que aplican a este tipo de mejoramiento.

13.3.5 Mejoramiento locativo

Mejoramiento estructural que se aplica, cuando supera una o varias deficiencias básicas perteneciente a un desarrollo legal o en proceso de legalización, para los cuales es necesario la consecución de permisos o licencias previas ante las autoridades competentes, dichas mejoras pueden consistir en: defectos de la cimentación, vigas, columnas, losas, muros, reforzamiento estructural para actualizarse a la Norma Sismo Resistente NSR-10.

La solución a las deficiencias constructivas que este tipo de mejoramiento pueden aportar serian:

- Tratamiento de grietas.
- Consolidación de ladrillos con proceso degradatorio incipiente.
- Cambio de chapas en los ladrillos con procesos degradatorios avanzados, en los cuales se haya presentado pérdida de volumen.
- Recuperación de morteros de pega.
- Mantenimiento y reposición de cubiertas, impermeabilización con productos epóxidos.
- Construcción de filtros perimetrales para recolección de aguas subterráneas
- Construcción de Sistemas de fundación y sistemas estructurales que brinden un confinamiento y otorgue estabilidad a las edificaciones, haciendo una rehabilitación sísmica o actualización a la Norma vigente, mediante un reforzamiento estructural.

Dicho tipo de mejoramiento es aplicable a 24 construcciones encontradas con tipología E, es decir, estructuras ligeras que son todas aquellas edificaciones construidas con materiales tradicionales o de baja calidad, con un sistema estructural de muros cargueros.

Adicionalmente en el polígono El Faro se encontró 26 construcción con tipología estructural “Construcciones Simple (F)”, es decir, aquellas edificaciones que no poseen una estructura definida y que generalmente son de carácter improvisado y construidas con materiales precarios o de recuperación, a las cuales se les recomienda realizar una intervención integral, dentro de los cuales se considera la reposición.

13.4 OTRAS RECOMENDACIONES

- Para la zona correspondiente al costado norte asociado a la vertiente sur de la quebrada La Loca, en la zona aledaña a la finca Las Nubes, se recomienda que permanezca libre de construcciones y se favorezcan la implementación de usos del suelo de tipo agroforestal, de acuerdo a lo que establece el POT para estas zonas.
- Las estructuras de contención no están diseñadas para soportar cargas adicionales de construcciones por lo cual debe prohibirse su desarrollo sobre este tipo de obras.

- A pesar de que en el tramo analizado no se identifican zonas de amenaza por inundación o avenida torrencial asociado a las quebradas La Loca y Chorrohondo, se recomienda recuperar el retiro de dichas corrientes y emprender procesos de restauración de la cobertura natural.
- Las zonas de retiro de las quebradas La Loca, Chorrohondo y Chorrohondo 1, están incluidas dentro de la categoría “Espacio público proyectado” del Acuerdo 48 de 2014, como Ecoparque de quebrada; por lo tanto, se recomienda tener en cuenta los resultados de este informe al momento de desarrollar los proyectos del POT
- Se recomienda restringir la realización de huertas en zonas de pendientes mayores al 40%, o en zonas de antiguos movimientos en masa.
- Se recomienda restringir la realización de escombreras y botaderos de basuras en las zonas denominadas como de amenaza alta y media por movimientos en masa.
- El cambio en las restricciones de uso del suelo para el polígono en estudio, están sujetas a la ejecución de las obras planteadas y su monitoreo, hasta que se garantice la estabilidad de la zona.
- Para la construcción de viviendas nuevas y obras de infraestructura se deben realizar los estudios de suelos ajustados a la Norma sismo resistente NSR-10, para definir las condiciones de estabilidad puntuales, estos estudios deben ser aprobados en curaduría de acuerdo a la normatividad vigente.
- Se recomienda realizar mantenimiento a las diferentes obras proyectadas, el cual incluye:
 - Mantenimiento rutinario, es aquel que puede realizarlo un grupo de personas no calificadas y que comprende labores básicas como limpieza de cunetas y rondas, también el retiro de escombros. Debe realizarse con la siguiente periodicidad: dos veces al mes, antes y después de una temporada invernal y cuando ocurra un evento que así lo requiera.
 - Mantenimiento periódico, es aquel que un grupo de personas calificadas para labores de reparación puede llevar a cabo. Comprende labores de reparaciones menores de estructuras de contención, sistemas de contención y de obras de drenaje. Este mantenimiento se debe realizar con la siguiente periodicidad: dos veces al año y cuando ocurra un evento que así lo requiera.

- Si para la ejecución de las obras geotécnicas se requiere la intervención de los árboles, se recomienda realizar un inventario forestal y tramitar los permisos ambientales ante la autoridad ambiental competente (Área Metropolitana el Valle de Aburrá – Corantioquía).
- Previo al desarrollo de anclajes o drenes se deberá consultar ante la empresa prestadora de servicios públicos si existen redes que puedan resultar afectadas, además se deberá tener en cuenta el artículo 557 del Acuerdo 48 de 2014: *“Criterios de seguridad que deben tener las obras geotécnicas que se realicen en el municipio de Medellín. Previo a la ejecución de obras geotécnicas que tengan prevista la realización de anclajes o subdrenes que traspasen a predios colindantes en proyectos urbanísticos, será necesario la constitución de servidumbre por los propietarios de los mismos, junto con un escrito de responsabilidad, suscrita por parte del constructor del proyecto o responsable de la obra geotécnica, que incluya la obligación de salvaguardar la integridad de las edificaciones, espacio público y las redes de líneas vitales vecinas. En el caso de no ser factible la localización de estas obras geotécnicas sobre predios vecinos, el responsable del proyecto deberá generar otra alternativa de obra geotécnica, que permita garantizar la estabilidad del terreno donde se proyecta la obra, de los predios y edificaciones colindantes”*.
- Cuando las obras de mitigación generen espacios residuales potencialmente aprovechables, se recomienda que éstos se adecúen como espacios públicos (zonas verdes, recreación pasiva, senderos, entre otros) para evitar la ocupación indebida (invasión) de los mismos.
- Previo a la ejecución de las obras de mitigación recomendadas para cada área de estudio, se debe verificar si las condiciones iniciales (geológicas, geomorfológicas, hidrológicas y geotécnicas) se mantienen, de lo contrario se tendría que realizar una actualización a los estudios y diseños de las mismas.
- Previo a la construcción de las obras de mitigación, se debe verificar si los predios a intervenir son de propiedad del municipio de Medellín, en caso contrario se deberán solicitar los respectivos permisos o proceder a realizar la compra de estos. Igualmente, las edificaciones afectadas por el desarrollo de las obras, deben ser compradas o reubicadas.

- Cuando las obras de mitigación recomendadas obedecen a causas generadas durante el desarrollo de un proceso constructivo, estas deberán ser ejecutadas por la firma o empresa constructora responsable de dicho proyecto.
- Si con el desarrollo de las obras de mitigación se generan descoles, producto del manejo de las aguas superficiales y subsuperficiales, estos deberán ser conducidos a una red de drenaje natural o artificial, previo trámite ante las entidades competentes.
- Las áreas de amenaza o riesgo medio y bajo, producto de un estudio de amenaza o riesgo de detalle, podrán ser objeto de otorgamiento de reconocimientos o licencias urbanísticas, prestación de servicios públicos cumpliendo con las normas establecidas en el Acuerdo 48 de 2014 y las disposiciones determinadas en la Norma NRS-10, el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012 o demás normas que las adicionen, modifiquen o sustituyan.
- El plan de monitoreo para hacer seguimiento al comportamiento de las obras de mitigación en el tiempo, deberá desarrollarse conforme se plantea en las recomendaciones de este estudio, en relación a la localización y profundidad de la instrumentación, la duración total del proceso y la periodicidad de las lecturas.

14. CONCLUSIONES

- Las unidades geológicas que afloran en la zona del proyecto corresponden principalmente a suelos residuales y rocas moderadamente meteorizadas de las rocas ígneas pertenecientes a la Dunita de Medellín, la cual corresponde a la unidad geológica predominante en la zona. Hacia el norte del área de estudio, esta unidad se encuentra cubierta por depósitos de vertiente de edad cuaternaria asociados a antiguos movimientos en masa que se han desprendido de la parte alta de la ladera y se han depositado conformando zonas de menor pendiente y aspecto irregular.
- La zona de estudio se caracteriza por tener una topografía dominada por rangos de pendientes abruptas a muy abruptas en una gran porción de su extensión, asociado a los lomos que descienden hacia el cauce de la quebrada La Loca. En el costado sur predominan zonas inclinadas a muy inclinadas, asociadas a zonas que han sido suavizadas por la acumulación de depósitos de vertiente y a las laderas irregulares que se desprenden del cerro de La Cruz, y descienden hacia las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Igualmente se identifican zonas de menor pendiente (muy suave a suaves) relacionadas a intervenciones antrópicas para el establecimiento de viviendas, vías de acceso, equipamientos y adecuaciones de tipo urbanístico.
- Para el polígono en estudio las condiciones geomorfológicas se asocian a un lomo de pendientes abruptas a escarpadas, que desciende en sentido SW-NE, limitado por las quebradas La Loca y Chorrohondo. Esta unidad hacia la parte media y baja se encuentra cubierta por depósitos de vertiente, lo cual genera laderas de aspecto irregular de pendientes un poco menores. Hacia el costado sur, en el sector comprendido entre las quebradas Chorro Hondo y La Rafita, las condiciones geomorfológicas son similares, por lo que se presentan igualmente lomos, de pendientes inclinadas a muy inclinadas, que descienden en el mismo sentido, que se desprenden desde el cerro de la Cruz.
- Dentro del polígono en estudio, los movimientos en masa identificados corresponden principalmente a deslizamientos con características planares, la mayor parte de ellos inactivos, siendo más predominantes hacia las unidades geomorfológicas de mayor pendiente localizadas hacia el costado norte, al igual que en los cañones de las quebradas La Loca y Chorro Hondo, y asociados

principalmente a las zonas conformadas geológicamente por suelos residuales derivados de la Dunita de Medellín.

- En la zona igualmente se identifican intervenciones de tipo antrópico que detonan y aceleran la ocurrencia de movimientos en masa. Las afectaciones identificadas corresponden principalmente a la realización de banqueos para el establecimiento de viviendas, en zonas de pendientes altas sin ningún tipo de especificaciones técnicas, el vertimiento de aguas lluvias y residuales directamente sobre los taludes y la conformación de sistemas de vallados sin ningún tipo de confinamiento.
- El perfil estratigráfico generalizado para la zona muestra que superficialmente se detectaron materiales antrópicos en superficie sin ninguna especificación técnica. Estos materiales reposan sobre suelos residuales de la dunita, encontrándose los horizontes IB, IC, IIA e incluso IIB del perfil de meteorización de Deere y Patton.
- Para el polígono del Faro se construyeron cinco perfiles topográficos típicos que representan las condiciones morfométricas del sector, en los cuales se plasmó la información estratigráfica y geotécnica, y a partir de los cuales se obtienen la zonificación de amenaza por estabilidad. Para los perfiles 1, 2 y 3, el factor de seguridad bajo la consideración estática fue de 1.22, 1.31 y 1.44 respectivamente; bajo la influencia del sismo se reducen a 0.88, 0.89 y 1.0, y considerando un incremento de la saturación, los factores de seguridad obtenidos son de 1.07, 1.21 y 1.18 respectivamente. De acuerdo con estos resultados la amenaza en dichos perfiles se clasifica como media, sin embargo, al evaluar otros factores como la presencia de procesos morfodinámicos, las condiciones topográficas y acciones antrópicas que modifican los terrenos se considera reclasificar la zona como de amenaza alta.
Para los perfiles 4 y 5, los factores de seguridad bajo consideraciones estáticas son de 2.62 y 2.12, bajo influencia del sismo 1.40 y 1.35 y en condiciones saturadas 2.16 y 1.64, por lo que la zona se clasifica como de amenaza baja por movimientos en masa
- Para el polígono de El Faro los análisis del runout muestran que los deslizamientos que se generan al costado norte tienen probabilidad de descender hasta el cauce de la quebrada La Loca. Hacia el costado sur, el análisis muestra que los deslizamientos que se generen hacia las zonas altas, asociado a la pendiente y las características de la ladera tienen poca distribución

y expansión, quedando incluidos dentro de la misma mancha de amenaza establecida.

- En el análisis de riesgo por polígono que parte del análisis de la amenaza y la definición de la profundidad de los movimientos en masa y su velocidad, se determina que la mayor parte de la zona se define como de riesgo alto mitigable, exceptuando el costado sur donde el riesgo se define como bajo.
- Las conclusiones y recomendaciones establecidas en el presente informe se basan en los resultados de un trabajo multidisciplinario que incluye actividades de campo y laboratorio enfocadas en evaluar las condiciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo particulares del polígono en estudio en condiciones actuales por lo que su vigencia es de un plazo máximo de 5 años, siempre y cuando, no se presenten cambios en las condiciones topográficas, hidráulicas o de intervención antrópica.

15. LIMITACIONES

- Las conclusiones y recomendaciones consignadas en este documento se basan en los resultados de las investigaciones de campo y laboratorio que se describen en los capítulos respectivos y en la experiencia de los profesionales que participaron en el estudio.
- Debe tenerse en cuenta que existen condiciones especiales en los diferentes polígonos que impidieron definir con precisión algunos aspectos fundamentales necesarios para los análisis, evaluaciones y recomendaciones requeridos en el proyecto, tales como la ocupación del territorio debido a la alta densidad de construcción, escasez de afloramientos y condiciones topográficas especiales que limitaron la accesibilidad a las zonas de afloramientos.
- Para subsanar las limitaciones mencionadas, se contó con la participación de un grupo de profesionales expertos en dichos temas quienes realizaron un amplio y detallado trabajo de campo ajustándolo de la mejor manera, con la información puntual obtenida de los sondeos.
- Los levantamientos topográficos corresponden en su mayoría a restituciones aerofotogramétricas, con los cuales se evaluaron los perfiles de estabilidad y ubicaron las obras propuestas. Es posible que se requiera precisar la ubicación de las obras con levantamientos en campo de mayor detalle.
- Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda que previo a la ejecución de las obras se deberán realizar el levantamiento topográfico complementario y los sondeos o exploraciones necesarias para ajustar y calibrar los modelos presentados en este documento, dando cumplimiento a los requisitos mínimos establecidos en el Código Colombiano de Puentes (CCP-14) en cuanto a número y profundidad de sondeos. Lo anterior, permitirá validar las hipótesis presentadas, ajustar las mismas o realizar los cambios requeridos a nivel geotécnico y estructural.
- Las recomendaciones planteadas en el documento buscan atender la estabilidad global de las laderas objeto de estudio, preservando y/o mejorando las condiciones geotécnicas actuales; sin embargo, los alcances contractuales no permiten definir obras locales para la atención de cada uno de los procesos reportados, para los cuales se presentan las recomendaciones de manejo

generales en aspectos como cortes, excavaciones, manejo de aguas superficiales y subsuperficiales entre otros.

16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCALDIA DE MEDELLÍN. 2014. Revisión y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín, Acuerdo 48 de 2014.

ALCALDÍA DE MEDELLÍN. 7 de Octubre de 2015. Decreto Municipal 1626 de 2015. Gaceta oficial No. 4347

ACUERDO METROPOLITANO 09/2012. Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2007. Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA. 2013. Determinación y protección de las potenciales zonas de recarga en el centro y sur del Valle de Aburrá, Medellín.

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLÉ DE ABURRÁ (AMVA)- ALCALDÍA DE MEDELLÍN. 2017. Armonización de la microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá e inclusión de los corregimientos de Medellín. En revisión.

CORANTIOQUIA. 2002. CORANTIOQUIA - Universidad Nacional de Colombia. 2002. Mapa geomorfológico, de amenazas y de áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000. Informe Final. Medellín. 143 pág.

NSR-10, Norma Sismo Resistente, R. C. D. C. S. 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá.