PRAMING
Proyectos amigables de ingeniería SAS

Taborda Velez & Cia.

Proyecto Hidroeléctrico COCORNÁ III

Estudio de Impacto Ambiental

Capítulo 5

Caracterización del Área de Influencia

Medio Abiótico Parte 1

Abril de 2022

Calle 33 A # 71 - 83, Medellín • Tel: (57) (4) 448 47 50
Info@praming.com.co • www.praming.com.co

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE FIGURAS iv
LISTADO DE TABLAS xi
LISTADO DE FOTOS xiv
LISTADO DE ANEXOS xvii
5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA 1
5.1 Geología 1
5.1.1 Geología Regional 1
5.1.1.1 Paleozoico 3
5.1.1.2 Cretácico 4
5.1.1.3 Holoceno 5
5.1.2 Geología estructural regional 5
5.1.2.1 Falla Caldera 6
5.1.2.2 Falla Miraflores 6
5.1.3 Geología del área de influencia 6
5.1.3.1 Batolito Antioqueño (Kcda/K2Pi) 8
5.1.3.2 Cuerpos cuaternarios 17
5.1.4 Geología estructural local 23
5.1.5 Sismicidad 25
5.1.5.1 Sismofuente del viejo Caldas 30
5.1.5.2 Sismofuente Nido de Bucaramanga 30
5.1.5.3 Sismofuentes de Murindó y Frontino 31
5.2 Geomorfología 31
5.2.1 Morfogénesis 32
5.2.1.1 Geomorfoestructura 32
5.2.1.2 Provincia geomorfológica 32
5.2.1.3 Región geomorfológica 32
5.2.1.4 Unidades geomorfológicas 33
5.2.2 Morfometría 51
5.2.2.1 Pendientes 51
5.2.2.2 Patrón y densidad de drenajes 56
5.2.3 Morfodinámica 57
5.2.3.2 Susceptibilidad de procesos de remoción en masa. 67

5.3 Hidrogeología....71
5.3.1 Hidrogeología regional....74
5.3.2 Exploración de campo....76
5.3.2.1 Ensayos de laboratorio....80
5.3.2.2 Ensayos geofísicos....85
5.3.2.3 Mediciones en campo....88
5.3.3 Hidrogeología local....138
5.3.3.1 Unidades hidrogeológicas....139
5.3.3.2 Condiciones de infiltración y flujo del agua subterránea....144
5.3.4 Implicaciones geotécnicas....149
5.3.4.1 Diagnóstico hidrogeológico para el macizo rocoso en el área de desarrollo del proyecto....149
5.3.4.2 Movimiento de agua en medios fracturados....157
5.3.4.3 Movimiento de agua en medios porosos (suelos)....158
5.3.4.4 Proceso de recarga....159
5.4 Geotecnia....162
5.4.1 Caracterización geología - geomorfológica y su relación con el proyecto....162
5.4.1.1 Captación y vía de acceso....163
5.4.1.2 Conducción....172
5.4.1.3 ZODMES....187
5.4.1.4 Casa de máquinas y vía de acceso....193
5.4.2 Campaña de exploración geotécnica.....197
5.4.2.1 Apiques....205
5.4.2.2 Perforaciones....238
5.4.3 Zonificación geotécnica....241
5.4.3.1 Metodología....242
5.4.3.2 Análisis de la información....243
5.4.4 Diseño Geotécnico....251
5.4.4.1 Metodología de análisis....251
5.4.4.2 Capacidad portante en suelos....252
5.4.4.3 Captación y canal de aducción....258
5.4.4.4 Desarenador....266
5.4.4.5 Conducción....269

5.4.4.6 Casa de maquinas 287
5.4.4.7 Acceso a casa de máquinas 291
5.4.4.8 Acceso a captación 293
5.4.4.9 Depósitos de material excedente 298
5.4.4.10 Presentación de resultados análisis de estabilidad 308
5.5 Suelos y usos de la tierra 313
5.5.1 Unidades Cartográficas de Suelos 313
5.5.1.1 Suelos ubicados en laderas de conos coluviales, a partir de rocas ígneas y cenizas volcánicas en un clima templado muy húmedo. 317
5.5.1.2 Suelos ubicados en planos y taludes de terraza, a partir depósitos coluvio aluviales y cenizas volcánicas en un clima templado muy húmedo. ... 322
5.5.2 Capacidad de uso 327
5.5.2.1 Clase 6, subclase pe. (6pe) 327
5.5.2.2 Clase 4, sub clase s. (4s) 329
5.5.3 Uso actual y potencial del suelo 330
5.5.3.1 Uso actual del suelo 330
5.5.3.2 Usos del suelo del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Samaná Norte. 334
5.5.3.3 Usos del suelo en el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Cocorná. 335
5.5.4 Conflictos por el uso de la Tierra 336
5.6 Paisaje 339
5.6.1 Territorio visual 339
5.6.2 Unidades del paisaje 346
5.6.3 Calidad Visual 362
5.6.4 Fragilidad Visual 366
5.6.5 Clasificación visual 370
5.6.6 Entorno del proyecto 373
BIBLIOGRAFÍA 380

LISTADO DE FIGURAS

Figura 5-1 Ubicación del área de estudio según el índice de localización. 1
Figura 5-2 Mapa geológico regional de la Cuenca del Río Cocorná 2
Figura 5-3 Mapa de geología local. 7
Figura 5-4. Proceso de formación de bloques por meteorización esferoidal. 9
Figura 5-5. Comparación entre los perfiles de meteorización de Deere y Patton (1971) y Dearman (1974). 12
Figura 5-6 Suelo de color rojizo de apariencia moteada con similitudes con la textura original 14
Figura 5-7 Mapa geología superficial 22
Figura 5-8 Fallas y lineamientos en el área de influencia 24
Figura 5-9 Mapa de zonificación sísmica de Colombia 26
Figura 5-10 Mapa radio de influencia para el análisis sísmico del proyecto. 28
Figura 5-11. Esquema de jerarquización geomorfológica 31
Figura 5-12 Mapa Geomorfológico de la Cuenca del Río Cocorná. 34
Figura 5-13 Mapa Geomorfológico del Área de Influencia. 35
Figura 5-14 Pendiente promedio por unidad geológica superficial 54
Figura 5-15 Pendiente media por unidad geomorfológica. 54
Figura 5-16 Mapa de pendientes. 55
Figura 5-17 Patrón de Drenaje 57
Figura 5-18. Mapa de procesos morfodinámicos lineales 59
Figura 5-19. Mapa de procesos morfodinámicos poligonales. 60
Figura 5-20. Mapa de procesos morfodinámicos puntuales 62
Figura 5-21 Susceptibilidad por movimiento en masa 70
Figura 5-22. Mapa hidrogeológico del Departamento de Antioquia y localización del área de estudio. 75
Figura 5-23. Ubicación de Sev realizados en el área de estudio. 76
Figura 5-24. Ubicación de apiques realizados en el área de estudio. 77
Figura 5-25. Ubicación de perforaciones realizados en el área de estudio. 78
Figura 5-26 Arreglo del muestreo tipo Schlumberger 87
Figura 5-27 Ministing, equipo de medición de la resistividad 88
Figura 5-28 Campaña de sondeos eléctricos verticales 90
Figura 5-29 Vista de referencia Sev1I 93
Figura 5-30 modelo Sev1I 94
Figura 5-31 Interpretación Sev1I 94
Figura 5-32 Vista de Sev2I 96
Figura 5-33 Modelo Sev2I 97
Figura 5-34 Interpretación Sev2I 97
Figura 5-35 Vista del Sev3I 99
Figura 5-36 Modelo Sev3I 100
Figura 5-37 Interpretación Sev3I 100
Figura 5-38 Vista del Sev4I 102
Figura 5-39 Modelo Sev4I 103
Figura 5-40 Interpretación Sev4I 103
Figura 5-41 Vista Sev5I 105

Figura 5-42 Modelo Sev5I 106
Figura 5-43 Interpretación Sev5I 106
Figura 5-44 Vista Sev6I 108
Figura 5-45 Modelo Sev6I 109
Figura 5-46 Modelo Sev6I 110
Figura 5-47 Vista Sev7I 112
Figura 5-48 Modelo Sev7I 113
Figura 5-49 Interpretación Sev7I 113
Figura 5-50 Vista Sev8I 115
Figura 5-51 Modelo Sev8I 116
Figura 5-52 Interpretación del Sev8 117
Figura 5-53 Vista Sev1D 119
Figura 5-54 Interpretación Sev1D 119
Figura 5-55 Vista Sev2D 121
Figura 5-56 Interpretación Sev2D 122
Figura 5-57 Vista Sev3D 124
Figura 5-58 Interpretación SEV3D 124
Figura 5-59 Vista Sev4D 126
Figura 5-60 Interpretación Sev4D 127
Figura 5-61 Vista Sev5D 129
Figura 5-62 Interpretación Sev5D 129
Figura 5-63 Vista Sev6D 131
Figura 5-64 Interpretación SEV6D 132
Figura 5-65 Vista Sev7D 134
Figura 5-66 Interpretación SEV7 134
Figura 5-67 Vista Sev8D 136
Figura 5-68 Interpretación SEV8D 137
Figura 5-69. Área investigada en la evaluación hidrogeológica del proyecto. 138
Figura 5-70. Unidades hidrogeológicas en la zona del proyecto 143
Figura 5-71. Relación entre límite líquido y permeabilidad calculada a partir de resultados de ensayos de consolidación. 146
Figura 5-72. Nomograma para la evaluación de la permeabilidad en macizos rocosos 148
Figura 5-73. Zonas típicas de acuíferos por fractura en rocas duras 150
Figura 5-74. Esquema de la circulación del agua en un conjunto de terrenos permeables recargados por la lluvia en los que se establece flujo local y flujo regional 151
Figura 5-75. Sistema de fracturas favorables a la recarga y a la circulación del agua subterránea. 152
Figura 5-76 Rangos de porosidad y conductividad hidráulica de algunos sedimentos y rocas 154
Figura 5-77. Captación de aguas subterráneas. 155
Figura 5-78. Efecto de las fracturas y discontinuidades en la dinámica del movimiento del agua subterránea en macizos afectados por discontinuidades, independientemente del origen de las discontinuidades. 156

Figura 5-79. Representación esquemática de distintos tipos de rocas indicando la relación entre su textura y porosidad. 156
Figura 5-80. Esquema de movimiento del agua en medios fracturados. 158
Figura 5-81. Esquema de recarga por precipitación 159
Figura 5-82. Zonas de recarga en la zona de estudio del proyecto hidroeléctrico. 160
Figura 5-83 Ubicación en planta de los perfiles geológicos 163
Figura 5-84 Captación y desarenadores. 164
Figura 5-85 Perfil transversal al azud B-B´ 166
Figura 5-86 Vía de acceso a captación 168
Figura 5-87 Geología de la vía de acceso a captación 169
Figura 5-88 Vía de acceso a captación A-A´ 171
Figura 5-89 Conducción 0+250 - 0+500 173
Figura 5-90 Perfil transversal a la conducción abscisa 0+ 300 C-C´ 174
Figura 5-91 Conducción 0+730 - 1+000 175
Figura 5-92 Perfil transversal a conducción abscisa 0+730 D-D´ 176
Figura 5-93 Conducción 1+250 – 1+500 177
Figura 5-94 Perfil transversal a conducción abscisa 1+500 E-E´ 178
Figura 5-95 Conducción 1+650 - 2+200 179
Figura 5-96 Perfil transversal a conducción abscisa 1+750 F-F´ 180
Figura 5-97 Conducción 2+750-3+250 181
Figura 5-98 Perfil transversal a la conducción abscisa 2+980 G-G´ 182
Figura 5-99 Depósito 1. 188
Figura 5-100 Depósito 2. 189
Figura 5-101 Depósito 3. 190
Figura 5-102 Depósito 4. 191
Figura 5-103 Depósitos 5 y 6 . 192
Figura 5-104 Casa de máquinas y vía de acceso 193
Figura 5-105 Vista de casa de máquinas y canal de descarga 194
Figura 5-106 Perfil transversal casa de máquinas H-H 196
Figura 5-107 Exploración Geotécnica. 200
Figura 5-108 Resultados de plasticidad en perforaciones 238
Figura 5-109 Mapa de zonificación geotécnica condición actual escala de trabajo 1:20.000. 249
Figura 5-110 Mapa de amenaza por procesos de inestabilidad escala de trabajo 1:20.000. 250
Figura 5-111 Esquema de zapata sometida a carga excéntrica. 253
Figura 5-112 Representación del ángulo θ. 255
Figura 5-113 Esquema de variación lineal de la rigidez del suelo en función de la profundidad 257
Figura 5-114 Ábaco de capacidad y asentamiento zapata cuadrada – Df = 5,0m – Depósito aluvial. 259
Figura 5-115 Modelo considerando lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A’ 261
Figura 5-116 Gradiente hidráulico - lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A’ 262

Figura 5-117 Cabeza total - lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A'.....262
Figura 5-118 Cabeza de presión - lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A'.....263
Figura 5-119 Secciones en planta de Captación y Casa de Máquinas. 264
Figura 5-120 Análisis de estabilidad estático. Talud derecho con corte propuesto. Sección B-B' – Captación.....265
Figura 5-121 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud derecho con corte propuesto. Sección B-B' – Captación 265
Figura 5-122 Ábaco de capacidad y asentamiento zapata cuadrada – Df = 3,0m – Depósito aluvial.....266
Figura 5-123 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección C-C' – Desarenador.....267
Figura 5-124 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección C-C' – Desarenador 268
Figura 5-125 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente. 270
Figura 5-126 Perfil Estratigráfico, km 0+310 – Conducción. 270
Figura 5-127 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+310 – Conducción. 271
Figura 5-128 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+310 – Conducción. 271
Figura 5-129 Perfil Estratigráfico, km 0+480 – Conducción. 272
Figura 5-130 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+480 – Conducción. 273
Figura 5-131 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+480 – Conducción. 273
Figura 5-132 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente. 274
Figura 5-133 Perfil Estratigráfico, km 0+910 – Conducción. 275
Figura 5-134 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km0+910 – Conducción. 275
Figura 5-135 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km0+910 – Conducción.....276
Figura 5-136 Perfil Estratigráfico, km 1+290 – Conducción. 277
Figura 5-137 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+290 – Conducción. 278
Figura 5-138 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+290 – Conducción.....278
Figura 5-139 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente. 279
Figura 5-140 Perfil Estratigráfico, km 1+680 – Conducción. 279
Figura 5-141 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km1+680 – Conducción. 280
Figura 5-142 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km1+680 – Conducción.....280

Figura 5-143 Perfil Estratigráfico, km 1+930 – Conducción. 281
Figura 5-144 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+930 – Conducción. 281
Figura 5-145 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+930 – Conducción. 282
Figura 5-146 Perfil Estratigráfico, km 1+930 – conducción. 283
Figura 5-147 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km2+310 – Conducción. 283
Figura 5-148 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km2+310 – Conducción. 284
Figura 5-149 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente. 285
Figura 5-150 Perfil Estratigráfico, km 3+110 – conducción. 285
Figura 5-151 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km3+110 – Conducción. 286
Figura 5-152 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km3+110 – Conducción. 286
Figura 5-153 Ábaco de capacidad y asentamiento zapata cuadrada – Df = 1,5 m – Depósito aluvial. 287
Figura 5-154 Localización en planta secciones casa de máquinas y su respectiva vía de acceso. 288
Figura 5-155 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM2–CM2’ – Casa de Máquinas. 289
Figura 5-156 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM2–CM2’ – Casa de Máquinas. 289
Figura 5-157 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM1-CM1’ – Casa de Máquinas. 290
Figura 5-158 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM1–CM1’ – Casa de Máquinas. 291
Figura 5-159 Análisis de estabilidad estático. Sección 3-3’ – Acceso a Casa de Máquinas. 292
Figura 5-160 Análisis de estabilidad seudo-estático. Sección 3–3’ – Acceso a Casa de Máquinas. 292
Figura 5-161 Localización en planta secciones acceso a captación. 294
Figura 5-162 Análisis de estabilidad estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 1-1’ – Vía a captación. 295
Figura 5-163 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 1-1’ – Vía a captación. 295
Figura 5-164 Análisis de estabilidad estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 2-2’ – Vía a captación. 296
Figura 5-165 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 1-1’ – Vía a captación. 296
Figura 5-166 Análisis de estabilidad estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 2-2’ – Vía a captación. 297
Figura 5-167 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 2-2’ – Vía a captación. 297

Figura 5-168 Análisis de estabilidad estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 2-2' – Vía a captación. 298
Figura 5-169 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 2-2' – Vía a captación. 298
Figura 5-170 Perfil Estratigráfico, sección E - Depósito 1. 299
Figura 5-171 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto sección E - Depósito 1. 300
Figura 5-172 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto sección E - Depósito 1. 300
Figura 5-173 Perfil Estratigráfico, depósito 2. 301
Figura 5-174 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 2. 301
Figura 5-175 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 2. 301
Figura 5-176 Perfil Estratigráfico, depósito 3. 302
Figura 5-177 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 3. 302
Figura 5-178 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 3. 303
Figura 5-179 Localización en planta sección H depósitos de material excedente 4. 304
Figura 5-180 Perfil Estratigráfico, depósito 4. 304
Figura 5-181 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 4. 305
Figura 5-182 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 4. 305
Figura 5-183 Perfil Estratigráfico, depósito 5. 306
Figura 5-184 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 5. 306
Figura 5-185 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 5. 307
Figura 5-186 Perfil Estratigráfico, depósito 6. 307
Figura 5-187 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 6. 308
Figura 5-188 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 6. 308
Figura 5-189. Pruebas para la identificación de presencia de cenizas volcánicas realizadas en los sitios de obra. Fuente: Praming SAS, 2020 314
Figura 5-190. Unidades cartográficas de suelos ubicadas en la zona donde se ubican las obras del proyecto Cocorná III 316
Figura 5-191. Mapa con el uso actual del suelo dentro del área de influencia del componente de suelos del proyecto Cocorná III 332
Figura 5-192. Distribución del área en porcentaje de los grupos de uso del suelo dentro del área de influencia. 334
Figura 5-193. Distribución del uso potencial del suelo por porcentaje dentro del área de influencia del componente suelos 335
Figura 5-194. Distribución del conflicto en el uso de suelo en el área de influencia, del proyecto Cocorná III. 338
Figura 5-195 Relieve Río Cocorná tramo intervenido 341
Figura 5-196 Zonas con visibilidad 342
Figura 5-197 Zonas de alcance o escala visual 344
Figura 5-198. Territorio visual y área de influencia componente paisaje 345
Figura 5-199 Distribución espacial Factor Pendiente del Terreno 347
Figura 5-200 Distribución espacial Factor Relieve relativo 348
Figura 5-201 Factor Coberturas de la Tierra 350
Figura 5-202 Factor Ecosistemas Terrestres 351

Figura 5-203 Unidades de paisaje en el área de influencia del paisaje.....353
Figura 5-204 Distribución coberturas de bosques y áreas seminaturales por rango de pendientes del terreno.....355
Figura 5-205 Unidades de paisaje asociadas a bosques y áreas seminaturales nivel 3 Coriene Land Cover 356
Figura 5-206 Distribución coberturas de territorios agrícolas por rango de pendientes del terreno.....358
Figura 5-207 Unidades de paisaje asociadas a territorios agrícolas nivel 3 Coriene Land Cover 359
Figura 5-208 Distribución coberturas de territorios artificiales y superficies de agua por rango de pendientes del terreno.....360
Figura 5-209 Unidades de paisaje asociadas a territorios artificiales y superficies de agua nivel 3 Coriene Land Cover 361
Figura 5-210 Calidad visual unidades del paisaje.....365
Figura 5-211 Fragilidad visual unidades del paisaje 369
Figura 5-212. Clasificación visual unidades del paisaje.....372
Figura 5-213 Localización de las obras en torno a las unidades de paisaje 374
Figura 5-214 Unidades de paisaje en las áreas de intervención del proyecto.....375
Figura 5-215 Calidad visual de las unidades de paisaje en el área de intervención del proyecto 377
Figura 5-216 Calidad visual unidades paisaje en el área de intervención del proyecto 379

LISTADO DE TABLAS

Tabla 5-1 Composición mineralógica promedio del Batolito Antioqueño.....4
Tabla 5-2 Perfil de meteorización según (Dearman, 1991).....12
Tabla 5-3 Tipos de estructuras en el área de influencia 25
Tabla 5-4 Sismicidad historia en el municipio de Cocorná.....29
Tabla 5-5 Rangos de pendiente para el área de influencia del proyecto.....52
Tabla 5-6 Relación espacial entre procesos morfodinámicos y el área de influencia 61
Tabla 5-7. Susceptibilidad a los movimientos en masa en el área de influencia 71
Tabla 5-8 Puntos hidrogeológicos 79
Tabla 5-9. Coordenadas de los puntos de muestreo realizado. 79
Tabla 5-10. Características y propiedades de los suelos de las formaciones superficiales en el área de estudio para el proyecto hidroeléctrico. 82
Tabla 5-11 Relación de distancia entre electrodos de potencial y electrodos de corriente en método de Schlumberger.....87
Tabla 5-12 Coordenadas sondeos eléctricos verticales.....88
Tabla 5-13 Resistividad aparente Sev1I 93
Tabla 5-14 Resistividad aparente Sev2I 96
Tabla 5-15 Resistividad aparente Sev3I 99
Tabla 5-16 Resistividad aparente Sev4I 101
Tabla 5-17 Resistividad aparente Sev5I 105
Tabla 5-18 Resistividad aparente Sev6I 108
Tabla 5-19 Resistividad aparente Sev7I 112
Tabla 5-20 Resistividad aparente Sev8I 115
Tabla 5-21 Resistividad aparente Sev1D 118
Tabla 5-22 Resistividad aparente Sev2D 121
Tabla 5-23 Resistividad aparente Sev3D 123
Tabla 5-24 Resistividad aparente Sev4D 126
Tabla 5-25 Resistividad aparente Sev5D 128
Tabla 5-26 Resistividad aparente Sev6D 131
Tabla 5-27 Resistividad aparente Sev7D 133
Tabla 5-28 Resistividad aparente Sev8D 136
Tabla 5-29. Tasas de infiltración en regolitos de la Cordillera Central 145
Tabla 5-30. Resumen de ensayos.....197
Tabla 5-31 Coordenadas puntos de muestro.....197
Tabla 5-32 Resumen de resultados de ensayos.....202
Tabla 5-33 Caracterización de los suelos en las perforaciones 239
Tabla 5-34. Perforaciones ejecutadas. 240
Tabla 5-35 Perforaciones 241
Tabla 5-36 Calificación cualitativa del resultado del algebra de mapas 243
Tabla 5-37 Variables geotécnicas adoptadas con sus respectivos pesos.....244
Tabla 5-38 Calificación procesos morfodinámicos.....245
Tabla 5-39 Calificación de pendientes.....245
Tabla 5-40 Calificación de unidades geomorfológicas.....246
Tabla 5-41 Calificación de unidades geológicas.....246

Tabla 5-42 Calificación de usos del suelo 247
Tabla 5-43 Calificación de hidrología 247
Tabla 5-44 Calificación de unidades hidrogeológicas 248
Tabla 5-45 Reclasificación por rangos de las variables geotécnicas 248
Tabla 5-46. Factores de seguridad adoptados para los análisis de estabilidad. 252
Tabla 5-47 Resumen resultados F.S. y tratamientos considerados en el análisis de estabilidad. 308
Tabla 5-48. Relación de los regímenes de humedad y de temperatura en el suelo con la subdirección de Agrología 315
Tabla 5-49. Leyenda de los suelos del área de influencia del proyecto Cocorná III 317
Tabla 5-50. Resultados de los análisis de fertilidad química y granulometría del perfil 32-04 321
Tabla 5-51. Resultados de los análisis de fertilidad química y granulometría del perfil 32-05 326
Tabla 5-52. Características y valores del perfil 32-04 327
Tabla 5-53 Características y valores del perfil 32-05 329
Tabla 5-54. Coberturas dentro del área de influencia del componente suelos y la interpretación de su uso predominante 331
Tabla 5-55. Grupos de usos principales del suelo dentro del área de influencia del proyecto Cocorná III. 333
Tabla 5-56. Usos principales del suelo sobre el área de influencia del componente suelos 334
Tabla 5-57. Calificación del conflicto en el uso del suelo, dentro del área de influencia del mismo componente en el proyecto Cocorná III. 336
Tabla 5-58. Fuentes de información para el análisis del paisaje 339
Tabla 5-59. Rangos de escala visual 343
Tabla 5-60. Cuantificación clases Factor Pendientes del Terreno 346
Tabla 5-61. Cuantificación clases Factor Relieve Relativo 346
Tabla 5-62. Cuantificación clases Coberturas del terreno 349
Tabla 5-63. Cuantificación clases Factor Ecosistemas Terrestres 349
Tabla 5-64. Unidades del Paisaje 352
Tabla 5-65. Clases de calidad visual BLM (1989) 362
Tabla 5-66. Evaluación de la calidad visual mediante el método BLM para las unidades de paisaje 362
Tabla 5-67. Cuantificación clases calidad visual 364
Tabla 5-68. Factores biofísicos (Yeomans 1986) 366
Tabla 5-69. Clases de fragilidad visual (adaptado de Yeomans, 1986) 366
Tabla 5-70. Evaluación de la fragilidad visual mediante el método BLM para las unidades de paisaje 367
Tabla 5-71. Cuantificación clases fragilidad visual 369
Tabla 5-72. Clases de valor paisajístico (Ramos et al, 1980) 370
Tabla 5-73. Calificación valor paisajístico (Ramos et al, 1980) 371
Tabla 5-74. Cuantificación clases valor paisajístico 371
Tabla 5-75 Unidades del Paisaje en el área de intervención del proyecto 373
Tabla 5-76. Cuantificación clases calidad visual área de intervención proyecto 376

Tabla 5-77. Cuantificación clases fragilidad visual área de intervención proyecto .378
Tabla 5-78. Cuantificación clases clasificación visual área de intervención proyecto 378

LISTADO DE FOTOS

Foto 5-1 Bloques residuales Batolito Antioqueño, Hacienda El Tesoro. 8
Foto 5-2. Meteorización esferoidal del Batolito Antioqueño, Km 22+200 Autopista Medellín-Bogotá. 9
Foto 5-3 Bloque de granitoídes con halos de hidróxidos, Hacienda El Tesoro. 10
Foto 5-4 Transformación de plagioclasa en caolinita, Hacienda El Tesoro. 11
Foto 5-5. Perfil de meteorización IV Zonas de color ocre oscuro - negro.....12
Foto 5-6 Perfil de meteorización IV zonas de color claro 13
Foto 5-7 Perfil de meteorización IV zonas con algunos bloques meteorizados.....13
Foto 5-8. Perfil de meteorización grado V 14
Foto 5-9. Perfil de meteorización en transición IV-III gruss.....15
Foto 5-10 Perfil de meteorización grado III 15
Foto 5-11 Perfil de meteorización grado II 16
Foto 5-12 Perfil de meteorización grado I 16
Foto 5-13 Suelo residual a partir de depósitos de vertiente con bloques ígneos y metamórficos.....18
Foto 5-14. Suelo residual a partir de depósitos de vertiente. 18
Foto 5-15 Terrazas aluvio-torrenciales en la margen derecha de la quebrada La Dolores.....19
Foto 5-16 Depósito aluvio-torrencial, margen izquierdo del río, puente Las Arenosas. 19
Foto 5-17 Depósito aluvio-torrencial Puente ubicado en la Vereda Mazotes. 20
9Foto 5-18 Depósito aluvio-torrencial margen derecha del río Cocorná 20
Foto 5-19 Horizontes de suelo orgánicos desarrollados a partir de aluviones, abanico entre la quebrada La Chorrera y el Río Cocorná 21
Foto 5-20 Lineamiento cartografiado sobre media ladera, margen derecho río Cocorná. 23
Foto 5-21. Lomas denudadas.....37
Foto 5-22. Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt) vía privada de ingreso a la Hacienda El Tesoro. 38
Foto 5-23 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft), vereda La Placeta. 39
Foto 5-24 Cauce aluvial (Fca) 40
Foto 5-25 Planicie aluvial confinada (Fpac) 41
Foto 5-26 Planicie aluvial confinada (Fpac) 42
Foto 5-27 Planicie aluvial confinada (Fpac) 43
Foto 5-28. Planicie aluvial confinada (Fpac) 44
Foto 5-29 Vista de terrazas sobre elevadas, margen izquierdo. 45
Foto 5-30 Terraza fluvio torrencial 46
Foto 5-31. Barra Puntual, cerca de la desembocadura de la quebrada La Chorrera en el río Cocorná.....47
Foto 5-32 Divagación de cause activo (Fdc) margen derecha río Cocorná a la altura del puente de la vereda Mazotes.....48
Foto 5-33 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae) 49
Foto 5-34 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae) 20 metros aguas abajo del puente Las Arenosas, margen derecha.....50

Foto 5-35 Escarpe de terraza de acumulación 5 metros aguas abajo del puente Las Arenosas, margen izquierda.....51
Foto 5-36 Socavación lateral de cauces aluviales margen derecho quebrada La Dolores, vereda El Tesoro.....63
Foto 5-37 Cárcavas sobre suelo Residual Batolito Antioqueño. 64
Foto 5-38 Organales encontrados en la margen derecha del río Cocorná.....65
Foto 5-39, Sedimentación aluvial cerca al puente Las Arenosas, margén derecha río Cocorná 66
Foto 5-40 Sedimentación aluvial cerca, cerca al puente de la vereda Mazotes.....66
Foto 5-41 Sedimentación en terrazas aluviotorrenciales (av) 67
Foto 5-42 Sedimentación aluvial sobre el cauce del río Cocorná. 67
Foto 5-43. Movimiento en masa rotacional, vereda El Tesoro. 68
Foto 5-44 Movimiento en masa rotacional, vía de acceso hacienda El Tesoro.....69
Foto 5-45 Sev1I.....92
Foto 5-46 Sev2I.....95
Foto 5-47 Sev3I.....98
Foto 5-48 Sev4I.....101
Foto 5-49 Sev5I.....104
Foto 5-50 Sev6I.....107
Foto 5-51 Sev7I.....111
Foto 5-52 Sev8I.....114
Foto 5-53 Sev1D 118
Foto 5-54 Sev2D 120
Foto 5-55 Sev3D 123
Foto 5-56 Sev4D 125
Foto 5-57 Sev5D 128
Foto 5-58 Sev6D 130
Foto 5-59 Sev7D 133
Foto 5-60 Sev8D 135
Foto 5-61 Vista panorámica de captación. 165
Foto 5-62 Vista de depósito de vertiente vía de acceso a captación. 170
Foto 5-63 Vista zonas estables conducción 183
Foto 5-64 Vista zonas estables conducción 183
Foto 5-65 Vista zonas estables conducción 184
Foto 5-66 Vista terrazas estables conducción 184
Foto 5-67 Vista terrazas estables conducción 185
Foto 5-68 Vista organales margen derecha.....185
Foto 5-69 Vista socavación lateral de orillas.....186
Foto 5-70 Vista terraza casa de máquinas. 195
Foto 5-71 Apique 1D (AP1D).....205
Foto 5-72 Apique 2D (AP2D).....206
Foto 5-73 Apique 3D (AP3D).....206
Foto 5-74 Apique 4D (AP4D).....207
Foto 5-75 Apique 5D (AP5D).....207
Foto 5-76 Apique 6D (AP6D).....208
Foto 5-77 Apique 7D (AP7D).....209

Foto 5-78 Apique 8D (AP8D).....210
Foto 5-79 Apique 9D (AP9D).....211
Foto 5-80 Apique 10D (AP10D).....212
Foto 5-81 Apique 11D (AP11D).....213
Foto 5-82 Apique 12D (AP12D).....214
Foto 5-83 Apique 13D (AP13D).....215
Foto 5-84 Apique 14D (AP14D).....216
Foto 5-85 Apique 1I (AP1I).....217
Foto 5-86 Apique 2I (AP2I).....218
Foto 5-87 Apique 3I (AP3I).....220
Foto 5-88 Apique 4I (AP4I).....221
Foto 5-89 Apique 5I (AP5I).....222
Foto 5-90 Apique 5I (AP5I).....223
Foto 5-91 Apique 6I (AP6I).....224
Foto 5-92 Apique 6I (AP6I).....225
Foto 5-93 Apique 6I (AP6I).....226
Foto 5-94 Apique 7I (AP7I).....227
Foto 5-95 Apique 7I (AP7I).....228
Foto 5-96 Apique 8I (AP8I).....229
Foto 5-97 Apique 8I (AP8I).....230
Foto 5-98 Apique 9I (AP9I).....231
Foto 5-99 Apique 9I (AP9I).....232
Foto 5-100 Apique 10I (AP10I).....233
Foto 5-101 Apique 11I (AP11I).....234
Foto 5-102 Apique 11I (AP11I).....235
Foto 5-103 Apique 12I (AP12I).....236
Foto 5-104 Apique 12I (AP12I).....237
Foto 5-105 Equipo de perforaciones 239
Foto 5-106 Piezómetros instalados en las perforaciones P1, P2, P3.....240

LISTADO DE ANEXOS

Anexo 5.1.1. Geología, geotecnia, hidrogeología

5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 Medio abiótico

5.1.1 Geología

5.1.1.1 Geología Regional

Unidades geológicas regionales.

La zona de estudio se localiza la parte central del Departamento de Antioquia, entre el suroriente de la plancha 147 Medellín Oriental, el occidente de la plancha 148 San Carlos, el noroccidente de la plancha 168 Argelia y el nororiente de la plancha 167 Sonsón (Ver Figura 5-1); el área se ubica en la vertiente oriental de la Cordillera Central donde afloran rocas metamórficas del Paleozoico de grado medio y alto de metamorfismo junto con rocas ígneas intrusivas del Cretáceo, así como depósitos aluviales recientes. Estas unidades se encuentran afectadas por estructuras regionales asociadas, a las fallas Caldera y Miraflores (Servicio Geológico Colombiano, 2014d).

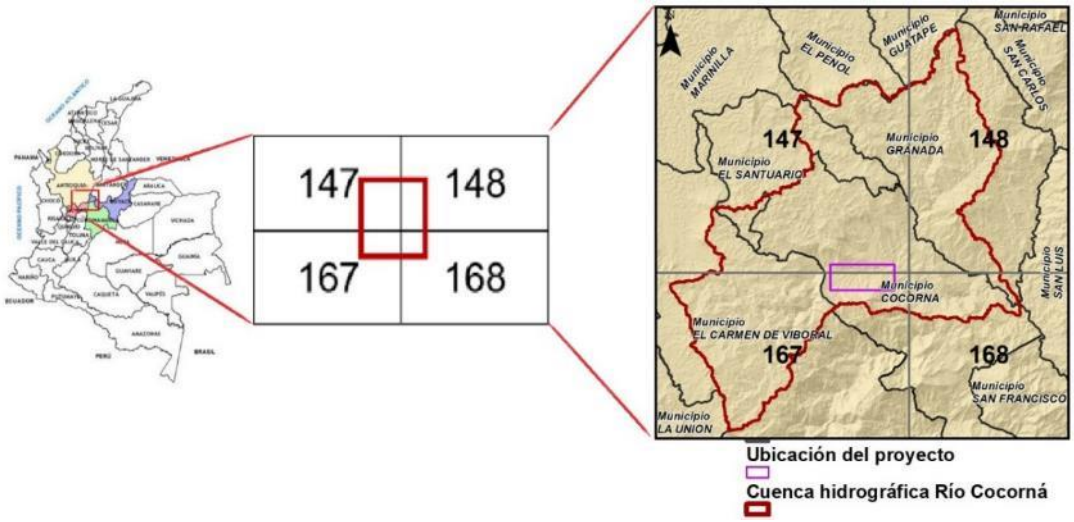


Figura 5-1 Ubicación del área de estudio según el índice de localización.

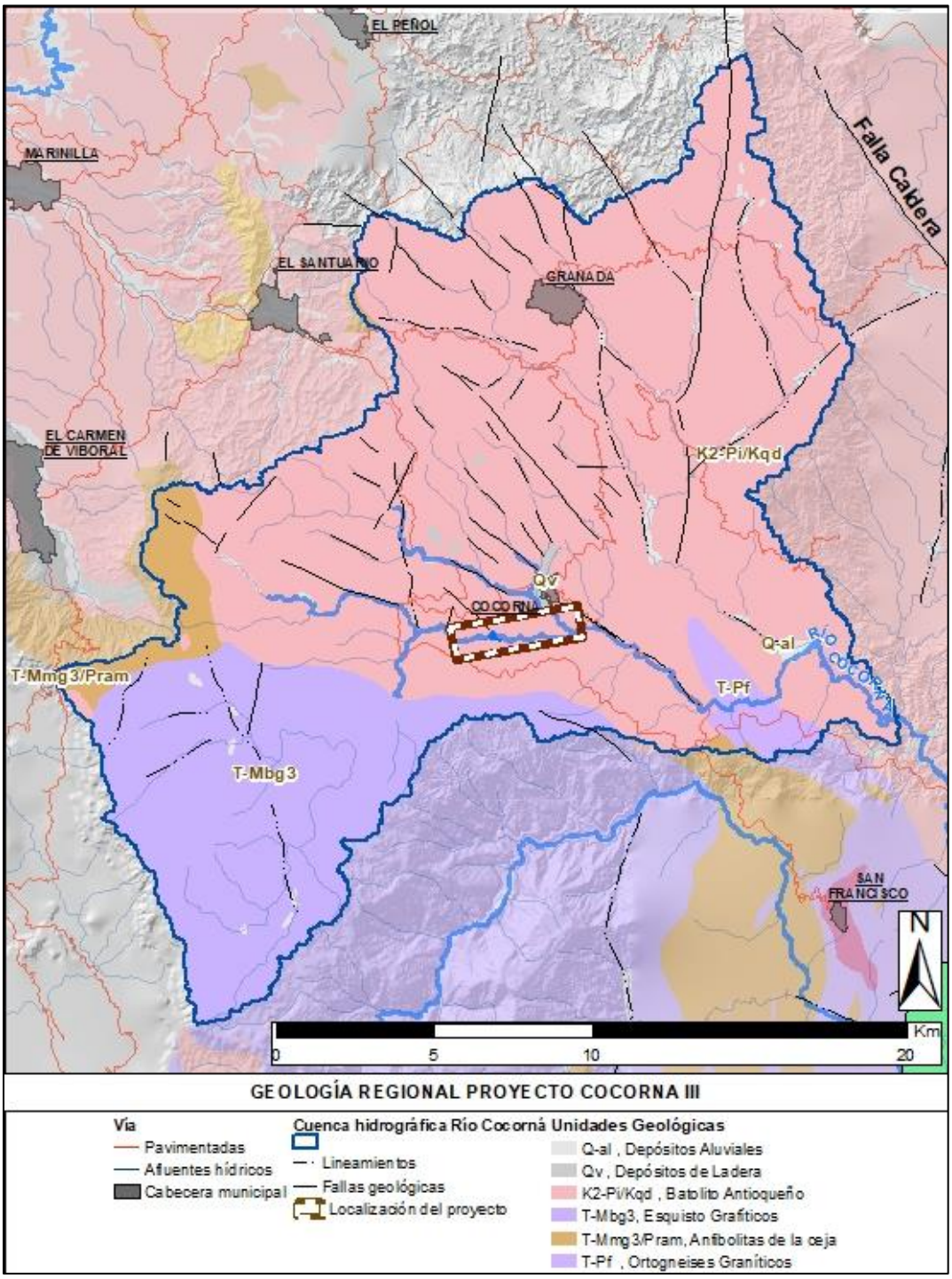


Figura 5-2 Mapa geológico regional de la Cuenca del Río Cocorná

5.1.1.1.1 Paleozoico

Está conformado exclusivamente por rocas metamórficas, estas se agrupan en dos unidades: el Complejo El Retiro y el Complejo Cajamarca, la presencia de estas rocas se debe a la evolución geológica del sector septentrional de la Cordillera Central, las Anfibolitas de Medellín del Complejo El Retiro tienen una edad de separación del manto del protolito ígneo que define el límite superior para el primer evento metamórfico y así tanto el magmatismo como el metamorfismo inicial podrían asociarse cronológicamente como máximo a la orogenia Greenville (1.000 -1.200 Ma). A finales del Paleozoico la proto – Cordillera Central fue afectada por un evento dinamo-térmico de extensión regional que afectó las rocas del basamento preexistente, Complejos El Retiro y Cajamarca (Servicio Geológico Colombiano, 2005).

5.1.1.1.1.1 Complejo Retiro, Anfibolita de La Ceja (PRam/T-Mmg3)

Esta es la unidad más antigua de la zona de estudio y agrupa las rocas metamórficas de medio a alto grado en condiciones de media a baja presión con paragénesis típica de eventos dinamo térmicos regionales, afectados localmente por eventos térmicos producidos por la intrusión del Batolito Antioqueño y por fallas dúctiles (Rodríguez, González, & Zapata, 2007).

Complejo El Retiro está constituido por el Neis milonítico de Sajonia, el Granofels de Normandía, el Neis de la Ceja, las Migmatitas de Puente Peláez, las Anfibolitas de Medellín dentro de las cuales se encuentra la Anfibolita de la Ceja (Servicio Geológico Colombiano, 2005). La edad del Complejo El Retiro se asigna al Proterozoico-Paleozoico (?) según (Rodríguez et al., 2007) basado en el mayor grado de metamorfismo con respecto al Complejo Cajamarca, considerado por relaciones de campo al menos del Devónico (?) y su posición estratigráfica respecto a cuarcitas de más bajo grado de este mismo complejo.

- Anfibolitas de La Ceja (PRam/T-Mmg3): Afloran hacia el límite occidental de la Cuenca del Río Cocorná, en los alrededores del casco urbano del Carmen de Viboral, entre las planchas 147 Medellín Oriental y la plancha 167 Sonsón (Ver Figura 5-2).

5.1.1.1.1.2 Complejo Cajamarca (Pes-Pev-Pei/Tmbg3)

Comprende las rocas metamórficas de bajo grado de edad Paleozoica que conforman el núcleo de la Cordillera Central, estas se ubican principalmente en sur de la zona de estudio, entre la plancha 168 Argelia y el norte de la plancha 167 Sonsón para el área que enmarca la Cuenca del Río Cocorná, esta unidad corresponde a una zona de intercalaciones de esquistos cuarzo- sericíticos y esquistos verdes (Pei), esquistos verdes con alto contenido de calcita (Pevc), esquistos cuarzo-sericíticos, esquistos micáceos, filitas y algunas pizarras, con presencia de grafito, de color gris a negro (Pes/Tmbg3), esquistos cloríticos de coloración verdosa en tonos claros y oscuros, los constituyentes esenciales son clorita, epidota, anfíbol fibroso y plagioclasa sódica

con cantidades menores de cuarzo, calcita, esfena, opacos y ocasionalmente mica blanca (Pev), Cuarcitas y cuarcitas biotítico-feldespáticas con transiciones de esquisto y neis cuarzo feldespático (Pnq), Lentes de mármol, localmente rocas con silicatos de calcio (Pm), Rocas de muy bajo a bajo grado de metamorfismo que conservan en gran parte la textura clástica del sedimento original (Pbsd). Las edades radiométricas disponibles en rocas del Complejo Cajamarca están comprendidas entre 345 y 55 Ma (Servicio Geológico Colombiano, 2014b). En el área de interés (Cuenca de Río Cocorná) afloran esquistos verdes (Pev), intercalaciones de esquistos cuarzo- sericíticos y esquistos verdes (Pei) y esquistos cuarzo-sericíticos variando a grafíticos (Pes/Tmbg3) Figura 5-2.

5.1.1.1.1.3 Ortogneis Granítico/Neis Intrusivo (Tpf/ni)

Este cuerpo tiene composición granitoide y estructura néisica, se encuentra intruyendo las rocas metamórficas del flanco este de la Cordillera Central. En la plancha 168 Argelia, se encuentra hacia la zona central en una franja con dirección Norte – Sur y hacia el costado occidental entre los municipios de Sonsón y Cocorná (Servicio Geológico Colombiano, 2014c). Su edad no se conoce con certeza; son más jóvenes que las rocas metamórficas de la Cordillera Central, pero más antiguas que el Batolito Antioqueño (Servicio Geológico Colombiano, 2014a)

5.1.1.1.2 Cretácico

Durante el Jurásico Superior – Cretácico Inferior se registra en la proto Cordillera Central un ciclo de actividad magmática que se extiende hasta el Cretácico Superior y que está inicialmente representado por pequeños plutones de composición básica a intermedia y termina con el emplazamiento de grandes batolitos como el Antioqueño.

5.1.1.1.2.1 Batolito Antioqueño (Kcda/K2Pi/K2ta)

El nombre de esta unidad proviene del departamento de Antioquia (Botero, 1942), es uno de los cuerpos plutónicos de mayor extensión en la Cordillera Central de Colombia donde aflora sobre su parte axial, cubriendo un área aproximada de 7.800 km^2, sin incluir los cuerpos satélites, separados del cuerpo principal por rocas metamórficas.

En la plancha 147 Medellín Oriental, de este cuerpo afloran 1.100 km^2, un 14% de la extensión total; hacia la parte oriental y aunque en gran parte presenta una meteorización profunda, su composición consiste en variaciones de tonalita y granitoídes Tabla 5-1, presentando facies félsicas y gabroide, aflorando entre los municipios de Cocorná y San Luis, al noroeste de la plancha 147 Medellín Oriental y el occidente de la plancha 148 San Carlos. Se reportan edades que varían en cuatro pulsos identificados como 65, 75, 85 y 95 Ma (Carlos et al., 1970)

Tabla 5-1 Composición mineralógica promedio del Batolito Antioqueño.

Mineral	Volumen (%)
Cuarzo	23,9
Plagioclasa	48,4
Horblenda	9,3
Biotita	9,3
Feldespato potásico	6,7
Clorita	1,6
Accesorios	0,8

Fuente: (Garcia & Hermelin, 2004)

5.1.1.1.3 Holoceno

Durante el Holoceno, variaciones climáticas y neotectónicas contribuyeron a la formación de los depósitos de terrazas y aluviones que hoy se encuentran a lo largo de algunos ríos y quebradas en las zonas de relieve bajo y drenaje menos desarrollado. La erosión que dio a la región su configuración geomorfológica actual como producto de la degradación de unidades metamórficas e ígneas emplazadas en superficie ha sido acelerada por el levantamiento regional a través del Cuaternario y hoy en día por la actividad antrópica (Servicio Geológico Colombiano, 2014d).

5.1.1.1.3.1 Depósitos Aluviales (Qal).

Los depósitos aluviales se componen de gravas, arenas, limos y arcillas no litificadas en las llanuras de inundación de ríos y quebradas, sujetas a inundaciones periódicas (Servicio Geológico Colombiano, 2014d)

5.1.1.1.3.2 Depósitos de Vertiente (Qv).

Son acumulaciones detríticas heterogéneas no diferenciadas en la base de zonas con pendientes altas producidas por diferentes procesos erosivos o tectónicos. Incluye flujos de escombros, de talud (caída de rocas), de tierra y rocas y localmente conos antiguos y coluviones(Rodríguez, González, & Zapata, 2005).

5.1.1.2 Geología estructural regional

En el área de la Cuenca del Río Cocorná es común encontrar sistema de fallas y lineamientos de dirección N-W que afectan principalmente el Batolito Antioqueño (K2-Pi/Kqd), corresponde a lineamientos, fallas y fajas delgadas de rocas metamórficas incluidas dentro del batolito como remanentes con tendencia general N25º a 60ºW. Afecta un amplio sector del Batolito Antioqueño, se caracterizan por alinear ríos y quebradas.(Servicio Geológico Colombiano, 2014b) Las fallas más jóvenes están

orientadas NW - SE y se les identifica principalmente como lineamientos, fuertes y regionales, ampliamente determinados por fotogeología.

El diaclasamiento afecta todas las unidades que afloran en la plancha 147 Medellín - Oriental, especialmente las rocas cristalinas como el Batolito Antioqueño y el Complejo El Retiro. El diaclasamiento ortogonal en el Batolito Antioqueño ha facilitado la alteración esferoidal profunda, la cual ha genera discontinuidades subesféricas que borran las estructuras de diaclasamiento y solo localmente en zonas poco alteradas se conservan las diaclasas (Servicio Geológico Colombiano, 2014d)

5.1.1.2.1 Falla Caldera

Se ubica al nororiente de la zona de estudio, cuenta con una dirección N 40° W y una longitud de 34 kilómetros; la falta de evidencia de tectónica cuaternaria en los depósitos de flujo de lodo y aluviones sugiere la poca o nula actividad de la misma.(Servicio Geológico Colombiano, 2014a)

5.1.1.2.2 Falla Miraflores

Con una dirección N-S se ubica en el noreste de la Cuenca del Río Cocorná, los sismos en los municipios de Granada y Guatapé, se relacionan con los sismos con magnitudes promedio de 2, muchos de los cuales coinciden con zonas de alta inestabilidad y procesos de remoción(Rendón-Rivera et al., 2015).

5.1.1.3 Geología del área de influencia

Caracterización litológica

La zona oriental del departamento de Antioquia, particularmente la zona de estudio se encuentra en la intersección entre la base cartográfica dispuesta por el IGAC de la plancha 147 Medellín Oriental y 167 Sonsón; en la cual se encuentra el río Cocorná, afluente de interés, el área está compuesta por tres unidades, el Batolito Antioqueño (K2-Pi/Kqd) y su suelo residual derivado, los depósitos de ladera (Qv) ubicados sobre el Batolito Antioqueño y aluvio-torrenciales (Qal) asociados a la dinámica del río Cocorná y de la quebrada La Chorrera.

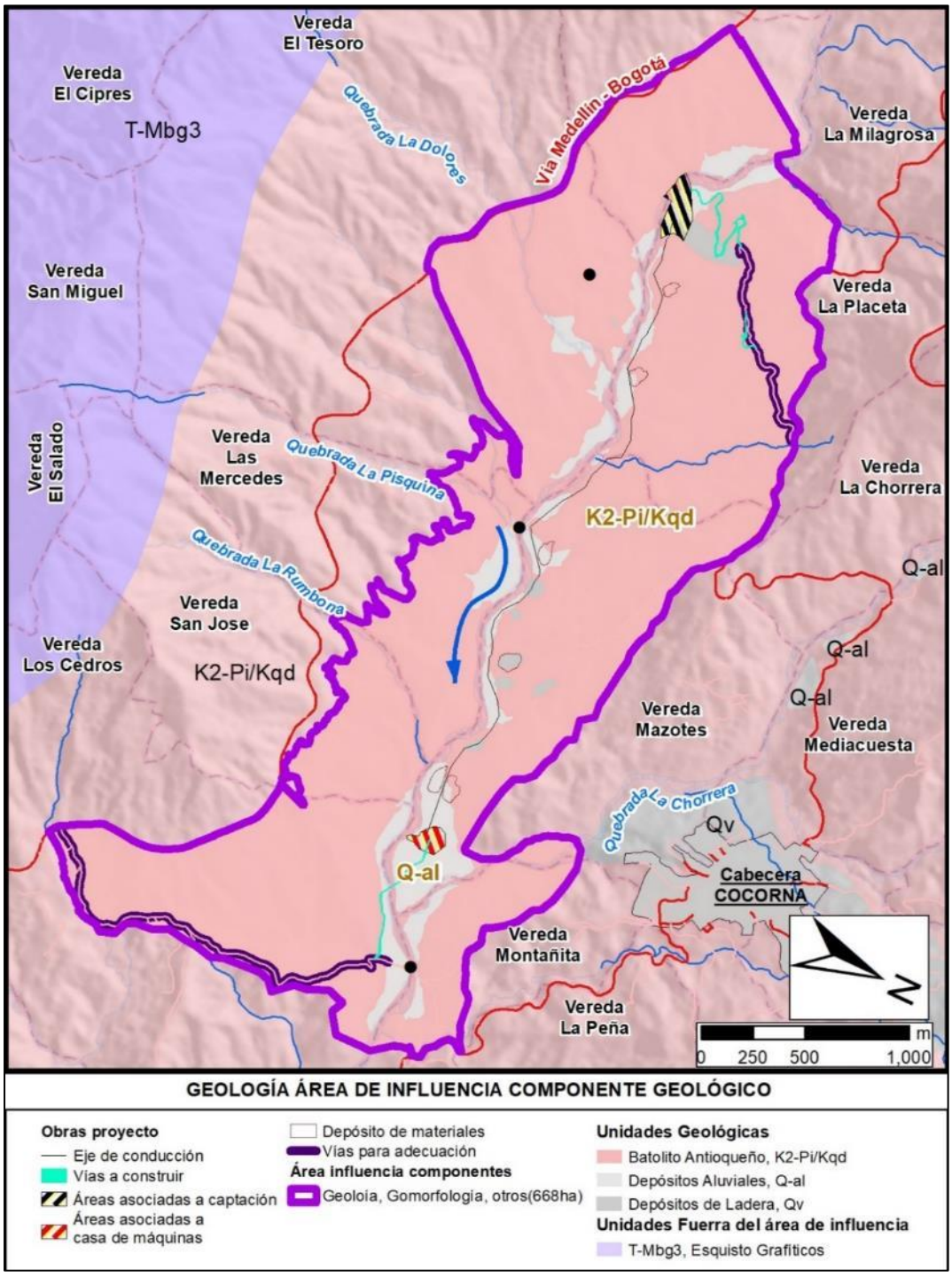


Figura 5-3 Mapa de geología local.

5.1.1.3.1 Batolito Antioqueño (Kcda/K2Pi)

En el área de influencia el cuerpo de mayor extensión es el Batolito Antioqueño, su composición varia localmente de granitoídes a tonalita; la mayor parte del área donde aflora esta unidad se encuentra cubierta por un perfil de suelo arcilloso y saprolito arenoso, formados por procesos de meteorización física y química bajo la influencia del clima, la vegetación y la acción antrópica (Londoño, 1998). La baja resistencia a la alteración de las rocas de Batolito Antioqueño origina un perfil de meteorización muy profundo, 10 a 50 m, donde es común encontrar bloques esféricos residuales (ver Foto 5-1) parcialmente meteorizados. (Rodríguez et al., 2005). El mayor porcentaje de bloques que afloran en el área de interés corresponden a bloques heterométricos que oscilan entre 1 y 10 m, de esfericidad media alta, de redondez media producto de la meteorización “in situ” o esferoidal típica de estas rocas Foto 5-1.

Foto 5-1 Bloques residuales Batolito Antioqueño, Hacienda El Tesoro.

Uno de los procesos más notorios en la meteorización del Batolito Antioqueño es dicha meteorización esferoidal o disyunción, sus formas esféricas a elipsoidales embebidas en una matriz de suelo o saprolito derivado de la meteorización del cuerpo ígneo fracturado donde la erosión ha actuado más intensamente que la meteorización, este proceso es facilitado por el diaclasamiento ortogonal que caracteriza gran parte de esta unidad, ya que facilita el ataque químico de las aguas lluvias y otros agentes externos que arrastran al material meteorizado y ensanchan las diaclasas por donde luego actúan los agentes de meteorización; los vértices y aristas del paralelepípedo limitando por el conjunto de diaclasas, presentan una mayor superficie expuesta a la meteorización y por lo tanto esta es más intensa y los bloques se van redondeando. Este proceso es continuo y reiterativo notándose una

mayor esfericidad hacia el centro conformando bloques con forma de cebolla de huevo ver Foto 5-2 y Figura 5-4.

Foto 5-2. Meteorización esferoidal del Batolito Antioqueño, Km 22+200 Autopista Medellín-Bogotá.

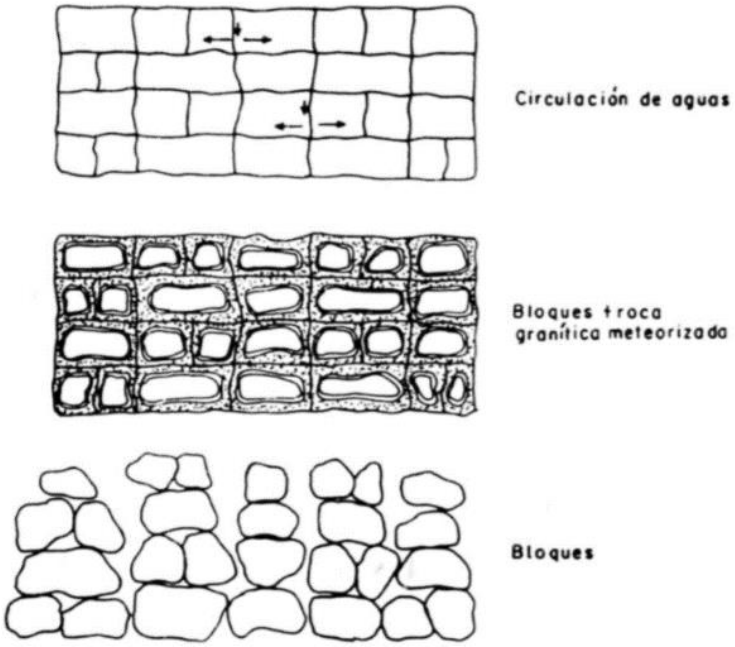


Figura 5-4. Proceso de formación de bloques por meteorización esferoidal.

Fuente: (Londoño, 1998)

- Perfil de meteorización

El perfil de meteorización actual que cubre gran parte de los afloramientos del Batolito Antioqueño, a pesar de su avanzado estado de meteorización, conserva en gran parte, la estructura ígnea fanerítica granular de la roca original con el típico patrón de meteorización de una roca granítica localizada en el trópico, cuyo proceso es causado en mayor medida por la hidrólisis y oxidación de sus minerales primarios (Garcia & Hermelin, 2004).

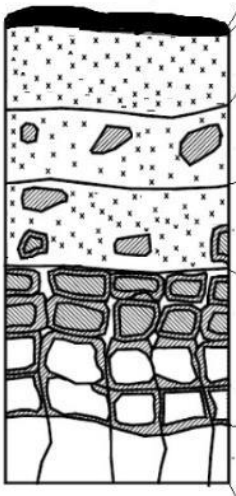
El proceso inicial de meteorización del Batolito Antioqueño es favorecido por el fracturamiento del macizo rocoso a partir de los mismos mecanisos de enfriamiento, que a su vez generan grietas y facilitan la circulación de agentes meteóricos.(Londoño, 1998). Para la clasificación de dicho perfil este trabajo se basa en la propuesta de (Dearman, 1991) que se presenta en la Figura 5-5.

La primera etapa consiste en la alteración de la biotita por la liberación de Fe^{+2} reaccionando con agua para formar hidróxidos insolubles que se depositan alrededor del mineral como halos de tonalidades oxidadas Foto 5-3. Los feldespatos mientras tanto se sericitizan, tomando un color blanco.

Foto 5-3 Bloque de granitoídes con halos de hidróxidos, Hacienda El Tesoro.

En la etapa siguiente se genera el saprolito, con feldespatos caolinizados, laminas finas de mica y cuarzo sacaroidal. Las variaciones en tonalidades amarilla-rojizas se deben a la acumulación diferencial de óxidos e hidróxidos de hierro. El saprolito resultante es profundo con poca alteración del cuarzo en las fracciones gruesas y la transformación de plagioclasa en caolinita.

Foto 5-4 Transformación de plagioclasa en caolinita, Hacienda El Tesoro.



Deere y Patton	Dearman		Descripción
Horizonte	Zona	Grado	
IA (Capa vegetal)	Suelo residual	VI	Las capas superiores son ricas en materia orgánica. Todo el material rocoso es ahora suelo. Es un suelo sin características heredadas, característicamente arcillo-limoso
IB			
IC (Saprolito)	Roca completamente meteorizada	V	EL macizo rocoso está completamente descompuesto y la roca ahora está decolorada. Aún se aprecian estructuras (discontinuidades) heredadas. Se encuentran fragmentos de entre el 10% y 35% del volumen pero fácilmente desmenuzables. Hay escasos núcleos de roca pero es posible encontrarlos.
IIA (Transición de saprolito a roca)	Roca altamente meteorizada	IV	EL macizo rocoso esta decolorado y altamente alterado. Más del 50% del material rocoso está descompuesto o desintegrado. Se mantienen las estructuras heredadas. Entre el 35% y el 70% del volumen son fragmentos de roca sin meteorizar.
IIB (Roca parcialmente meteorizada)	Roca moderadamente meteorizada	III	El macizo rocoso está altamente decolorado. Menos del 50% de material rocoso está descompuesto o desintegrado. Las discontinuidades pueden estar oxidadas o abiertas. Bloques de roca.
III (Roca intacta)	Roca débilmente meteorizada	II	El macizo rocoso está débilmente decolorado. Las discontinuidades pueden estar abiertas y oxidadas. La roca es dura y resistente a excavaciones.
	Roca no meteorizada	I	El macizo rocoso no da signos visibles de meteorización. Las discontinuidades puede eventualmente presentar oxidación y decoloración pero en un grado

Figura 5-5. Comparación entre los perfiles de meteorización de Deere y Patton (1971) y Dearman (1974).

Fuente: Adaptado de (Suárez, 2009) y (Little, 1969)

Tabla 5-2 Perfil de meteorización según (Dearman, 1991)

Grado	Zona	Descripción	
VI	Suelo Residual	Color que varía anaranjado a crema a pardo. Compuesto por arcilla y limos arcillosos muy plásticos, parcialmente orgánicos, sin estructuras originales de la roca, equivalente a un suelo residual maduro de limos de baja permeabilidad ha sufrido bioturbación, proceso que ha destruido su estructura original.	Foto 5-5. Perfil de meteorización IV Zonas de color ocre oscuro - negro

Foto 5-6 Perfil de meteorización IV zonas de color claro

Foto 5-7 Perfil de meteorización IV zonas con algunos bloques meteorizados

			 Figura 5-6 Suelo de color rojizo de apariencia moteada con similitudes con la textura original
V	Saprolito	Compuesta de limos arenosos y arenas limosas oxidadas, donde la textura original de la roca se conserva, presenta núcleos residuales de roca fresca	 Foto 5-8. Perfil de meteorización grado V

IV	Transición saprolito-roca (gruss)	Roca decolorada compuesta por arena limosa mal gradada y fácilmente disgregable, con la estructura original y textura de la roca fresca bien conservadas y núcleos de roca fresca más grandes y más abundantes que en la zona saprolítica. Las discontinuidades pueden estar abiertas y tener decoloradas las paredes, la estructura original cerca de las discontinuidades puede estar alterada, menos del 50% del material es roca. y el RQD varía entre el 10% y 30%. La roca fresca se encuentra inmediatamente debajo de la zona de gruss	 Foto 5-9. Perfil de meteorización en transición IV-III gruss
III	Relación Suelo/Roca 50/50	La roca está decolorada, las discontinuidades pueden estar abiertas y las superficies decoloradas. El porcentaje de roca varía entre 50% y 90%, el RQD varía entre 30% y 90%.	 Foto 5-10 Perfil de meteorización grado III

II	Roca débilmente meteorizada	La roca está ligeramente decolorada cerca de las discontinuidades, más del 90% es roca, RQD de casi 90%.	Foto 5-11 Perfil de meteorización grado II
I	Roca fresca	La roca no presenta decoloración, hay recuperación de casi 100%, RQD de 95%.	Foto 5-12 Perfil de meteorización grado I

Las diferencias en la coloración del regolito obedecen a:

Zonas de color claro, blanco a amarillo claro, corresponden a rocas más ricas en feldespatos, cuarzo y menor proporción de ferro-magnesianos donde predomina el proceso de caolinización de los feldespatos (Foto 5-6) y con presencia de raíces.

- Zonas de color rojizo con abundantes fracciones gruesas de cuarzo: se configura como limo-arenosas aunque en algunos casos se perciben zonas arcillo-limosa con variaciones de color café rojizo (Foto 5-7).

- Zonas de color ocre oscuro – negro, mayor abundancia de minerales ferro-magnesianos transformados a óxidos e hidróxidos de hierro, generando películas que manchan o cubren el resto de los minerales, estas zonas son por lo general más arcillosas y contiene menor o nula cantidad de cuarzo residual. (Foto 5-5).

5.1.1.3.2 Cuerpos cuaternarios

Las unidades geológicas superficiales como los depósitos de vertiente, aluviales, aluviotorrenciales y el Batolito Antioqueño, presentan perfiles de meteorización, donde se desarrollan suelos residuales de variado espesor con características propias, los cuales son fundamentales para la información que se presenta en este estudio.Figura 5-7.

5.1.1.3.2.1 Depósitos de Vertiente

Son acumulaciones de material transportado y depositado por la acción predominante de la gravedad como producto final de un movimiento en masa (ver Foto 5-14 B).(Patiño, 2009); Se acumulan en las ladera de la zona de estudio como materiales detríticos mal seleccionados con bloques heterométricos y de litologías heterogéneas en la base de zonas con pendientes altas (Servicio Geológico Colombiano, 2014a) Incluyen flujos de escombros, de talud (caída de rocas), de tierra y rocas, de tierra y localmente conos antiguos y coluviones.

La mayor parte están directamente relacionados con la unidad de mayor representatividad en la zona, que es el Batolito Antioqueño intercalados con bloques de rocas metamórficas, como neises y esquistos del Complejo Cajamarca (Pes, Pev, Pei) (Ver Foto 5-13) donde predominan los suelos arcillosos residuales; los bloques de esta unidad conforman depósitos de vertiente y material meteorizado, los cuales dan suelos residuales de tonalidades amarillenta claras (en función del aluminio de los minerales que lo constituyen) y tonalidades rojizas a causa de los minerales de hierro que predominan sobre esta unidad litológica.

El perfil de meteorización de estos materiales transportados indica que se trata de suelos evolucionados, los cuales pueden ser técnicamente diferenciados debido a la presencia de bloques de roca ígnea que tienden a meteorizarse en fragmentos tipo “gruss”, conservando las características de textura y estructura del material parental.

Foto 5-13 Suelo residual a partir de depósitos de vertiente con bloques ígneos y metamórficos.

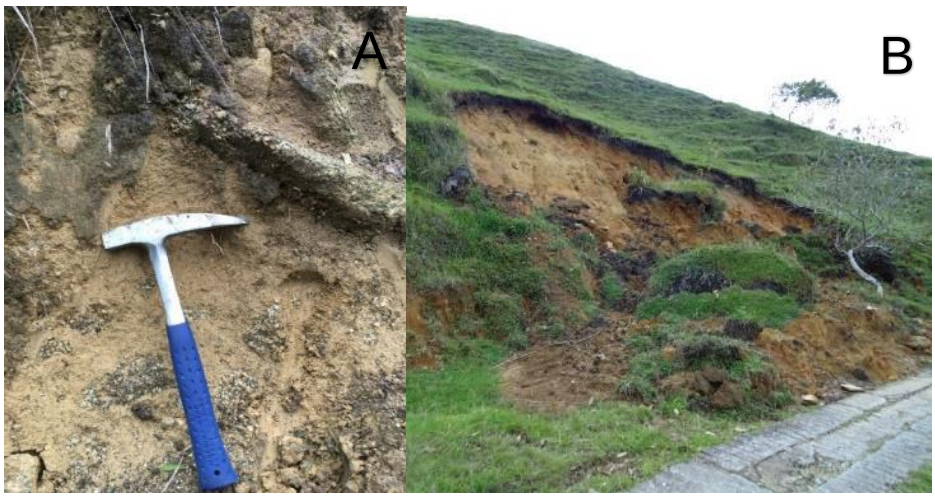


Foto 5-14. Suelo residual a partir de depósitos de vertiente.

A Bloques de granitoídes del Batolito Antioqueño.

B Deslizamiento rotacional, vía de acceso Hacienda El Tesoro.

El principal depósito de vertiente cartografiado en el área de estudio, corresponde al cuerpo ubicad en la vereda la placeta, que cortaría la vía de acceso a captación, allí se realizaron apiques y sondeos eléctricos verticales para determinar la magnitud y profundidad del depósito, se encontró que en los resultados del sondeo eléctrico la señal continua por lo menos por 50 m de profundidad.

Morfométricamente, por su alta pendiente y su morfología lobular e irregular se delimitó el cuerpo a partir de observaciones de campo y fotointerpretación. A una altura de 1.406 m.s.n.m. a 300 m del río Cocorná.

Cerca al apique 7 (Ap7) (Ver Geotecnia), con clasificación S.C.U.S. SM-SC, arena limosa -arena arcillosa, de baja plasticidad. Suelo gris azuloso. Cobertura que corresponde a pastos limpios, con uso de ganadería intensiva, con marcada erosión en terracetas. (Ver Anexo 5.1.1. Geología, geotecnia, Hidrogeología).

5.1.1.3.2.2 Depósitos aluvio-torrenciales

Las avenidas torrenciales son un tipo de movimiento en masa que se desplaza generalmente por los cauces de las quebradas, llegando a transportar volúmenes importantes de sedimentos y escombros. Estos eventos producen la acumulación desordenada de sedimentos gruesos cuyo tamaño comprende desde arena hasta bloques de varios metros de diámetro (Patiño, 2009). La acumulación de estos materiales origina geoformas aterrazadas de morfología plana a ligeramente inclinada en la misma dirección del flujo que las depositó; comúnmente se encuentran incisadas

por efecto de la socavación fluvial, originando escarpes de terrazas aluvio-torrenciales.

Los depósitos aluvio torrenciales se encuentran confinados a lo largo del cauce del Río Cocorná por las laderas que encañonan el paisaje fluvial en la zona, se caracterizan por ser de tendencia clasto soportada, con bajos contenidos de matriz en su mayoría limo – arenosa, la relación matriz – bloques se ubican en promedio en 20/80, con bloques redondeados de origen ígneo y metamórfico, se intercalan con algunas capas de arenas medias y pueden albergar bloques de hasta 2 m de diámetro, dando cuenta de la capacidad de arrastre y de la energía del río.

Foto 5-15 Terrazas aluvio-torrenciales en la margen derecha de la quebrada La Dolores.

Foto 5-16 Depósito aluvio-torrencial, margen izquierdo del río, puente Las Arenosas.

Foto 5-17 Depósito aluvio-torrencial Puente ubicado en la Vereda Mazotes.

9Foto 5-18 Depósito aluvio-torrencial margen derecha del río Cocorná

Foto 5-19 Horizontes de suelo orgánicos desarrollados a partir de aluviones, abanico entre la quebrada La Chorrera y el Río Cocorná

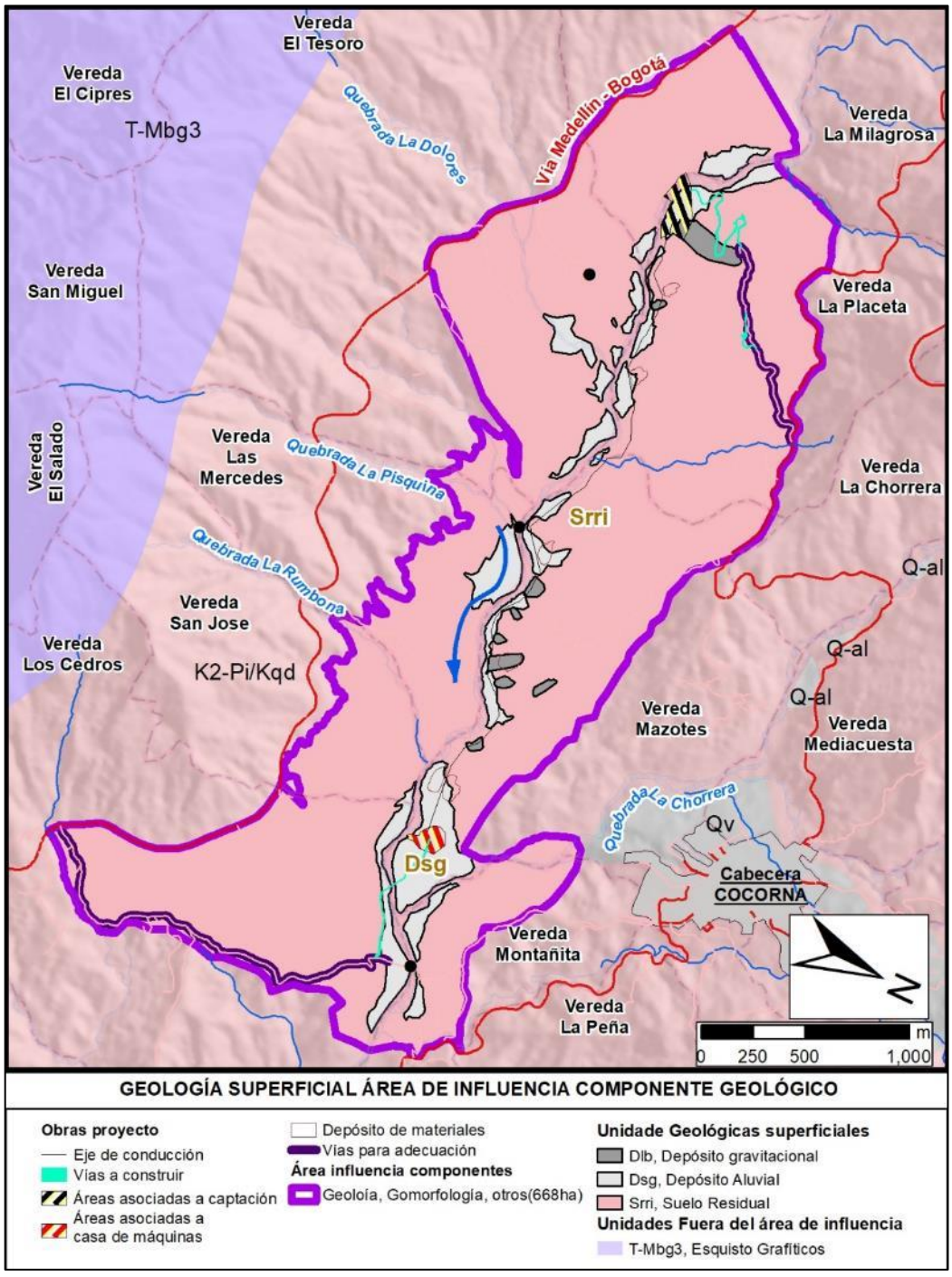


Figura 5-7 Mapa geología superficial

5.1.1.4 Geología estructural local

En el área de influencia del proyecto en general presenta un ambiente tectónico se estable, con prevalencia de los procesos de meteorización, erosión y depositación como principales agentes modeladores del paisaje por encima de los estructurales, sin embargo, se cartografiaron algunos elementos estructurales, entre ellos un lineamiento fotogeológico en la margen derecha del río Cocorná aproximadamente a media ladera. (Figura 5-8).

Foto 5-20 Lineamiento cartografiado sobre media ladera, margen derecho río Cocorná.

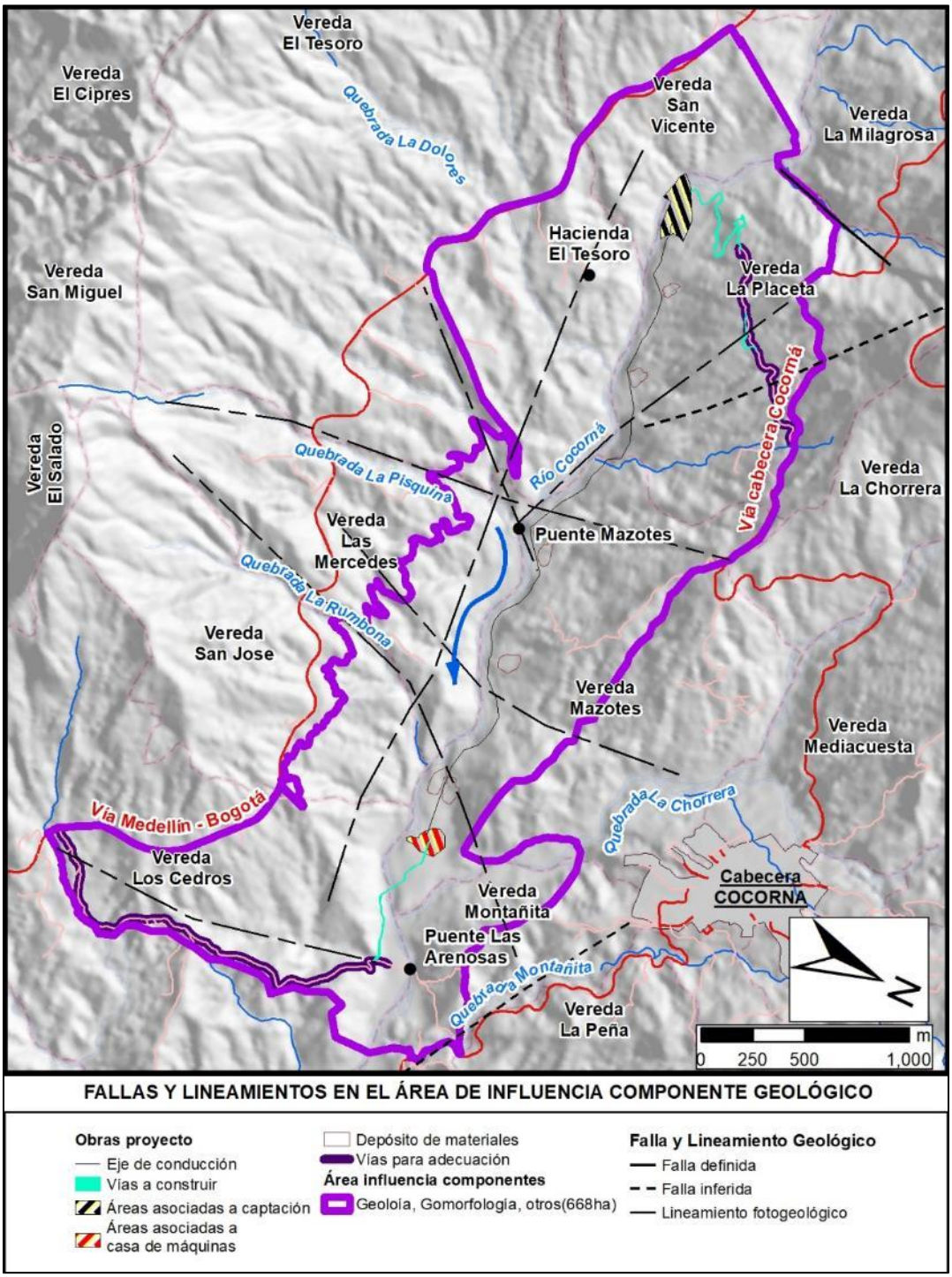


Figura 5-8 Fallas y lineamientos en el área de influencia

Tabla 5-3 Tipos de estructuras en el área de influencia

Tipo de estructura	Longitud (m)
Falla definida	802
Falla inferida	2.041
Falla inferida	2.201
Falla definida	707
Falla inferida	2.041
Falla inferida	2.201
Lineamiento fotogeológico	3.916
Lineamiento fotogeológico	1.466
Lineamiento fotogeológico	2.115
Lineamiento fotogeológico	2.985
Lineamiento fotogeológico	1.643
Lineamiento fotogeológico	2.825
Lineamiento fotogeológico	1.734

En el área de influencia se encontraron tres tipos de estructuras, fallas inferidas, fallas definidas y lineamientos fotogeológicos (Figura 5-8). La falla definida no se encuentra considerada como activa y carece de nombre.

5.1.1.5 Sismicidad

La región occidental suramericana se encuentra dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico una de las zonas tectónicamente más activas del planeta, por su ubicación en la margen noroccidental de Suramérica, Colombia se encuentra dentro del efecto de la convergencia de tres placas tectónicas, la placa Caribe, al norte, Nazca al oeste y la placa suramericana ubicada al este, las dos primeras de afinidad oceánica y esta última de origen continental.

La sismicidad o actividad tectónica según la (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), 2009) es la liberación repentina de energía acumulada en la litosfera de la tierra que trae como consecuencia un sismo. Según la (Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010) la mayor parte de Antioquia corresponde a una zona de amenaza sísmica intermedia, como se observa en la Figura 5-9.

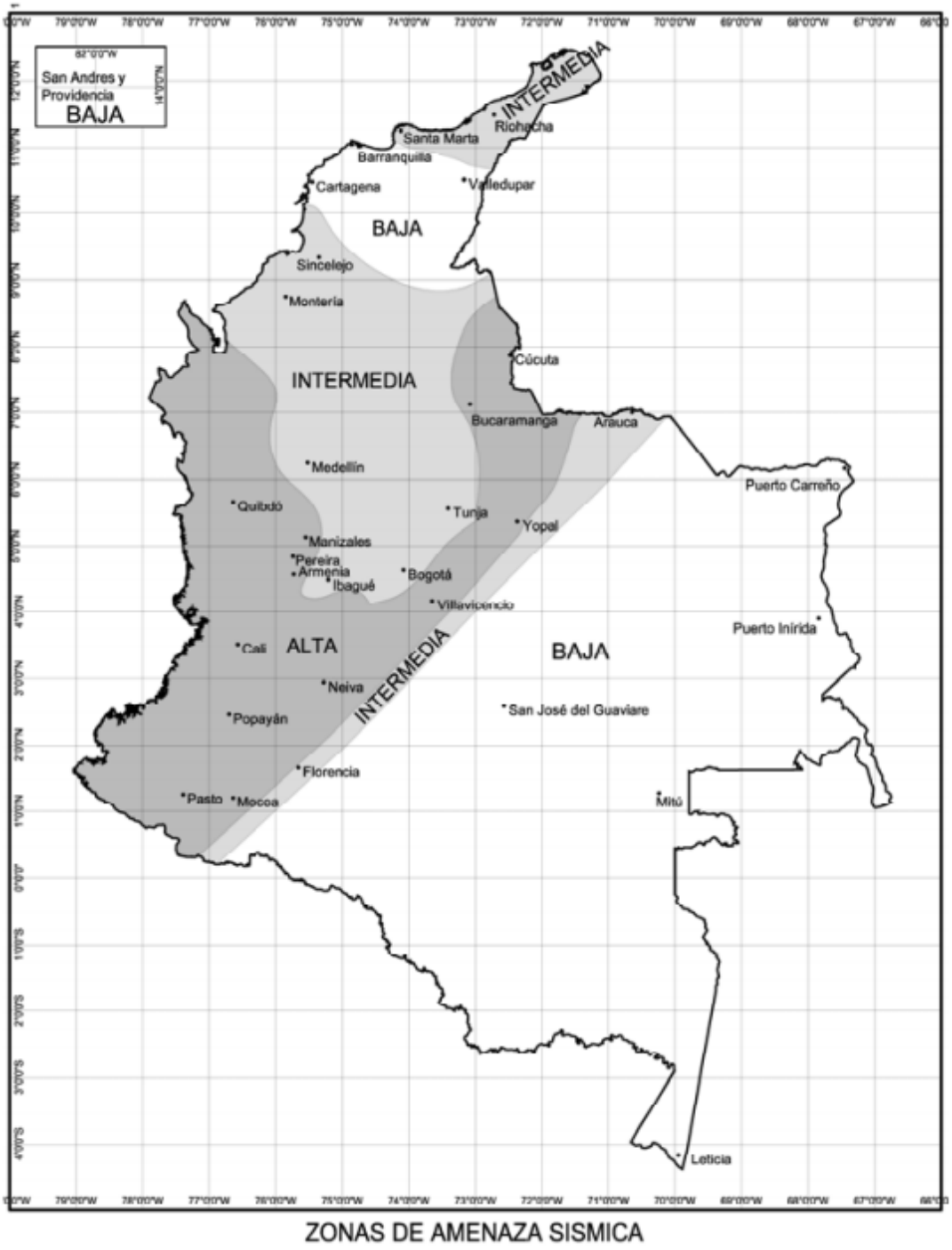


Figura 5-9 Mapa de zonificación sísmica de Colombia

Fuente: (Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010)

El análisis sismológico para proyecto Cocorná se realiza a partir de información sobre sistemas de fallamiento activo intraplaca incluyendo tanto de eventos sísmicos históricos en el registro existente en el catálogo de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) como la información relacionada con fallas activas a una distancia de 25 km alrededor del área del proyecto Figura 5-10, de acuerdo con lo establecido por la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente de 2010 (NSR-10) una falla se considera activa cuando cuenta con actividad comprobada durante el cuaternario, para este radio de análisis solo se encontraron dos fallas definidas, la falla Miraflores y la falla Caldera, ambas ubicadas al noreste de la zona estudiada, tal como se describió en el numeral 5.1.1.2.1 la falla Caldera no es reportada como activa, mientras que la falla Miraflores reporta actividad sísmica de magnitudes aproximadas de 2, relacionadas con zonas de alta inestabilidad y procesos de remoción (ver numeral 5.1.1.2.2). (Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010)

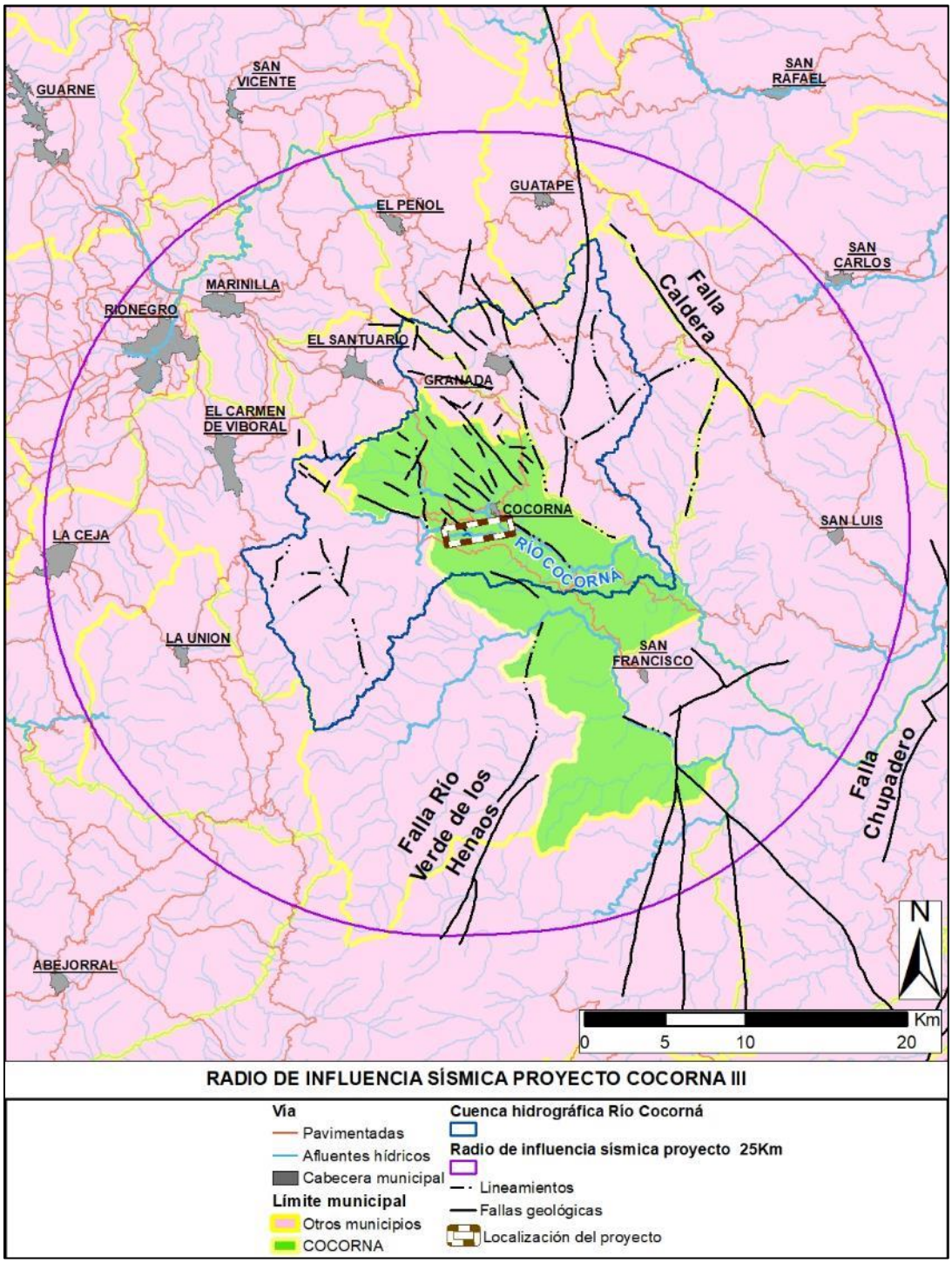


Figura 5-10 Mapa radio de influencia para el análisis sísmico del proyecto.

Tabla 5-4 Sismicidad historia en el municipio de Cocorná

Historia sísmica del municipio Cocorná, Antioquia											
No	**Fecha**	**Latitud**	**Longitud**	**Área epicentral**	**Magnitud**	**Tipo magnitud**	**Profundidad (km)**	**Int. Sitio (EMS-98)**	**Intensidad Máxima EMS-98**	**Int. Sitio (MM)**	**Intensidad Máxima MM**
1	1961/12/20	4.49	-75.5	Eje Cafetero, Colombia	6.8	MS	163	7	8	7	9
2	1962/07/30	5.17	-76.35	Eje Cafetero, Colombia	6.5	MW	64	6	8	7	9
3	1967/07/29	6.747	-73.03	Betulia, Santander	6.8	MW	161	7	8	8	9

Fuente: (Servicio Geologico Colombiano, 2019)

Según Alcaldía Municipal de Cocorná Antioquia (2008) el INGEOMINAS en el año 1993 realiza la primera aproximación a la amenaza sísmica de la región, al realizar los estudios de amenazas de los principales centros poblados; en este estudio, se efectúa un inventario de los principales sismos sentidos, se mencionan los agrietamientos parciales o caída de parte de la cúpula de la iglesia de Cocorná.

Aun cuando no hay casos reportados en el municipio es común el desarrollo de deslizamientos, flujos torrenciales, o en general con procesos denudativos o de transporte de masas a raíz de eventos sísmicos; estos pueden producir agrietamientos especialmente en los materiales rígidos y frágiles. Los agrietamientos cosísmicos debilitan la masa de talud y generan superficies preferenciales de falla. El agrietamiento cosísmico es menor cuando existe buen refuerzo subsuperficial con raíces de la cobertura vegetal.

Según el POT (Alcaldía Municipal de Cocorná Antioquia, 2008) las sismofuentes son áreas donde se producen sismos; cerca de la zona de estudio se encuentran las siguientes:

5.1.1.5.1 Sismofuente del viejo Caldas.

Localizada principalmente entre Caldas, Risaralda y Quindío; en esta zona, ocurren sismos a profundidades que abarcan los 0 kilómetros hasta los 30 kilómetros; se atribuyen sismos como el de Mistrató el 23 de noviembre de 1979, que ocasionó graves daños no solo en el viejo Caldas sino en Sonsón y algunos menores en Medellín y otros municipios del departamento de Antioquia, a esta zona se le atribuye el sismo del 25 de enero de 1999, que ocasionó grandes pérdidas en los departamentos de Caldas, Risaralda, Quindío y el norte del Valle.

Esta sismofuente por sus características representa la mayor amenaza para el municipio de Cocorná, por la cercanía y la forma en que libera su energía (Pocos sismos pero de gran energía), es la más importante de estudiar a la hora de determinar el área productora de sismos amenazantes.(Alcaldía Municipal de Cocorná Antioquia, 2008). En la Tabla 5-4 se observa que se reportaron dos sismos en los años 1961 y 1962 con esta sismofuente como área epicentral, con una magnitud de 6,8 y 6,5 respectivamente.

5.1.1.5.2 Sismofuente Nido de Bucaramanga

Otra sismofuente importante para el municipio, donde se producen sismos a unos 150 Km de profundidad, por debajo del departamento de Santander. Aunque esta sismofuente ha producido sismos que se han sentido en la región, como el del 31 de diciembre de 1996, no se han registrado daños aún. En la Tabla 5-4 se observa que se reportó un sismo en el año 1967 con esta sismofuente como área epicentral, con una magnitud de 6,8.

5.1.1.5.3 Sismofuentes de Murindó y Frontino

Localizadas al occidente del departamento de Antioquia, han producido actividad sísmica registrada en todo el departamento, en especial los sismos ocurridos los días 17 y 18 de octubre de 1992, donde se describen algunas grietas en viviendas de Cocorná, producidas posiblemente por esta actividad sísmica.

5.1.2 Geomorfología

El propósito de la cartografía geomorfológica, es proporcionar información concisa y sistemática sobre las formas del terreno, su origen, los tipos de materiales involucrados y los procesos naturales tanto antiguos como activos que los afectan, con el fin de proporcionar la reconstrucción relieve de una zona específico.

Se desarrolla mediante la identificación y descripción de las diferentes características geomorfológicas que conforman los paisajes de la superficie terrestre, así como su evolución e interpretación de la interacción de los diferentes procesos endógenos y exógenos.

La caracterización geomorfológica se realiza a partir de levantamiento de campo y fotografías aéreas de la zona, siguiendo la metodología planteada por la guía de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia, elaborada por el SGC, la escala 1:100.000 ver Figura 5-11 y en el glosario de unidades geomorfológicas (Carvajal, 2011).

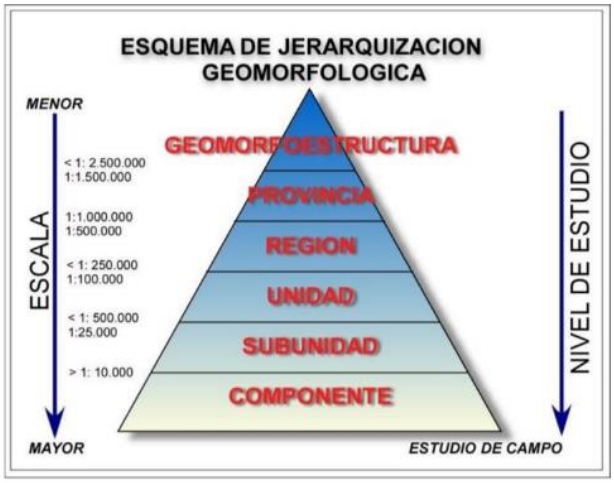


Figura 5-11. Esquema de jerarquización geomorfológica

Fuente: (Carvajal, 2011)

Esta metodología se basa en el análisis geomorfológico siguiendo un proceso analítico del terreno desde lo regional hasta lo local, relacionando la escala aplicada con las jerarquías geomorfológicas, donde la base regional está fundamentada en la génesis geológica de las geoformas y los ambientes morfogenéticos, y el detalle basado en la expresión morfológica y su relación con los materiales litológicos y depósitos recientes. Adicionalmente dichas geoformas contienen una descripción cualitativa de su morfometría: pendiente, longitud y forma de las laderas.

La zona de estudio se enmarca dentro de los ambientes morfogenéticos y geológico influenciados por procesos del ambiente denudacional principalmente asociados a las geoformas degradacionales generadas a partir de las rocas del Batolito Antioqueño (Kqd) en menor proporción las geoformas fluviales asociadas a la dinámica del río Cocorná y por último la menor parte del área de análisis corresponde al ambiente estructural en el área correspondiente al este de la falla Miraflores.

5.1.2.1 Morfogénesis

La morfogénesis hace referencia al ambiente de formación, y agrupa por ambientes las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se formaron las geoformas. Se determina con base en la expresión e interpretación de los procesos geomorfológicos registrados en el terreno, que dieron lugar a la formación, evolución y modificación de las geoformas. Los ambientes morfogenéticos son: estructural, volcánico, denudacional, fluvial – lagunar, marino y costero, glaciar, eólico, kárstico y antropogénico (Universidad Eafit, 2014).

5.1.2.1.1 Geomorfoestructura

Área geográfica mayor caracterizada y definida por un conjunto de terrenos geológicos, cada uno de ellos sometido a eventos comunes de intrusiones ígneas y vulcanismo, sedimentación y metamorfismo, deformación y basculamiento; corresponden a estructuras geológicas y topográficas regionales. Se manejan a escalas de trabajo menores de 1:2.500.000 (Carvajal, 2011).; el área corresponde a una geomorfoestructura del sistema orogénico de los Andes.

5.1.2.1.2 Provincia geomorfológica

Área geográfica extensa definida por un macro relieve y una génesis geológica común; corresponde a una región natural que usualmente coincide con un terreno geológico demarcado por suturas y megafracturas. Están establecidas para escalas entre 1:1.000.000 – 1.500.000 (Carvajal, 2011).. La totalidad de la Cuenca del Río Cocorná se encuentra en la provincia geomorfológica de la Cordillera Central Colombiana, específicamente en la vertiente occidental.

5.1.2.1.3 Región geomorfológica

Amplia extensión de terreno donde se encuentra una agrupación de unidades geomorfológicas y geoformas relacionadas genéticamente, definidas por los

ambientes geológicos, climáticos y morfogenéticos comunes (Carvajal, 2011). La escala de trabajo está definida entre 1: 250.000 y 1: 500.000.

En la zona del proyecto corresponde al frente erosivo del Magdalena, en la zona oriental de la cordillera central, producto de la degradación de las rocas pertenecientes al Batolito Antioqueño donde priman los procesos denudacionales. Según (Universidad Eafit, 2014) los frentes erosivos son superficies donde se da la mayor concentración de procesos denudativos; presentan un relieve montañoso típico del proceso remontante de la erosión a través de numerosas fuentes hídricas y separa una zona alta de una más baja y sus Unidades denudacionales más representativas son los lomos denudados.

5.1.2.1.4 Unidades geomorfológicas

Las unidades geomorfológicas están definidas con criterio genético, morfológico y geométrico, en el área de influencia del proyecto se encuentran cartografiadas unidades principalmente pertenecientes al ambiente denudativo, generadas a partir de procesos de erosión, transporte y acumulación También son notorios los flujos torrenciales en la forma de terrazas y depósitos de vertiente.

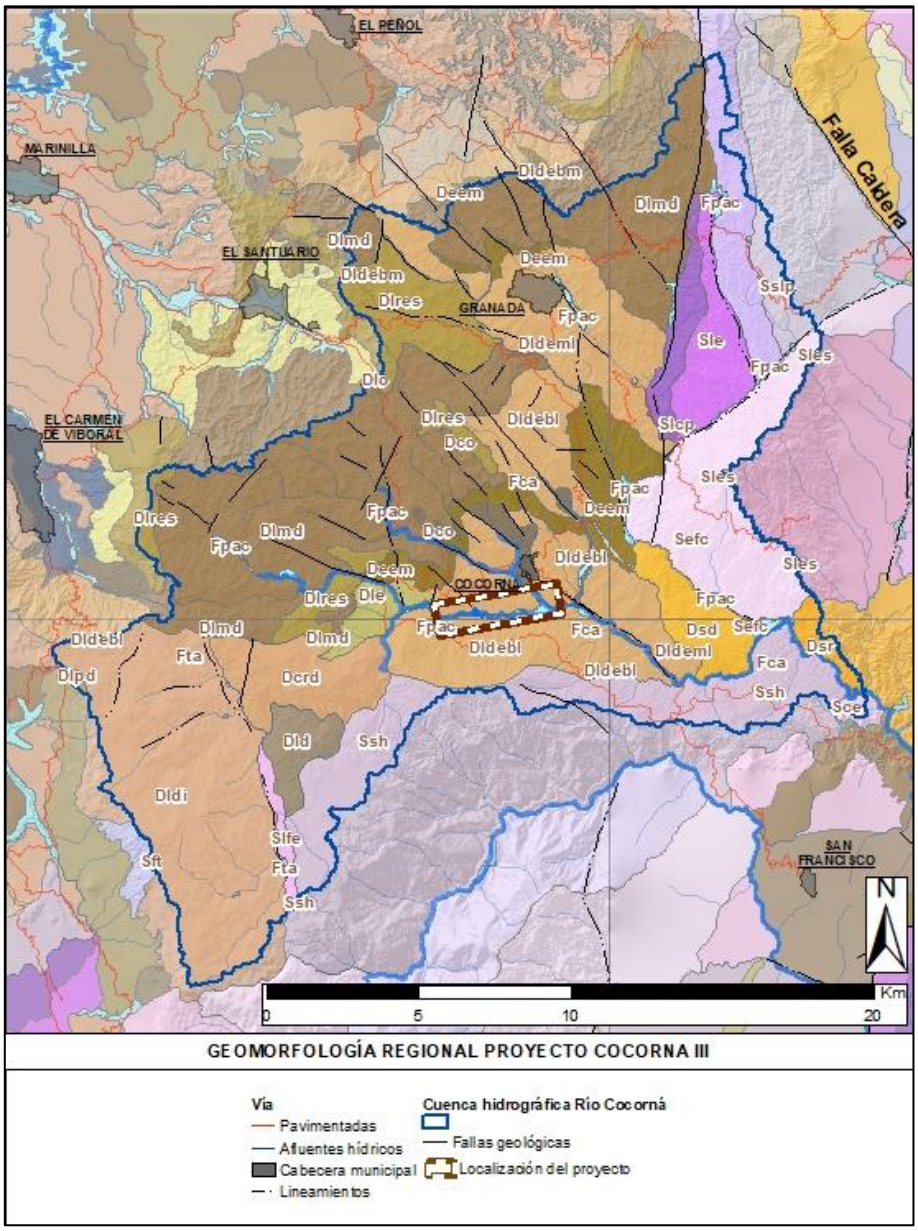


Figura 5-12 Mapa Geomorfológico de la Cuenca del Río Cocorná.

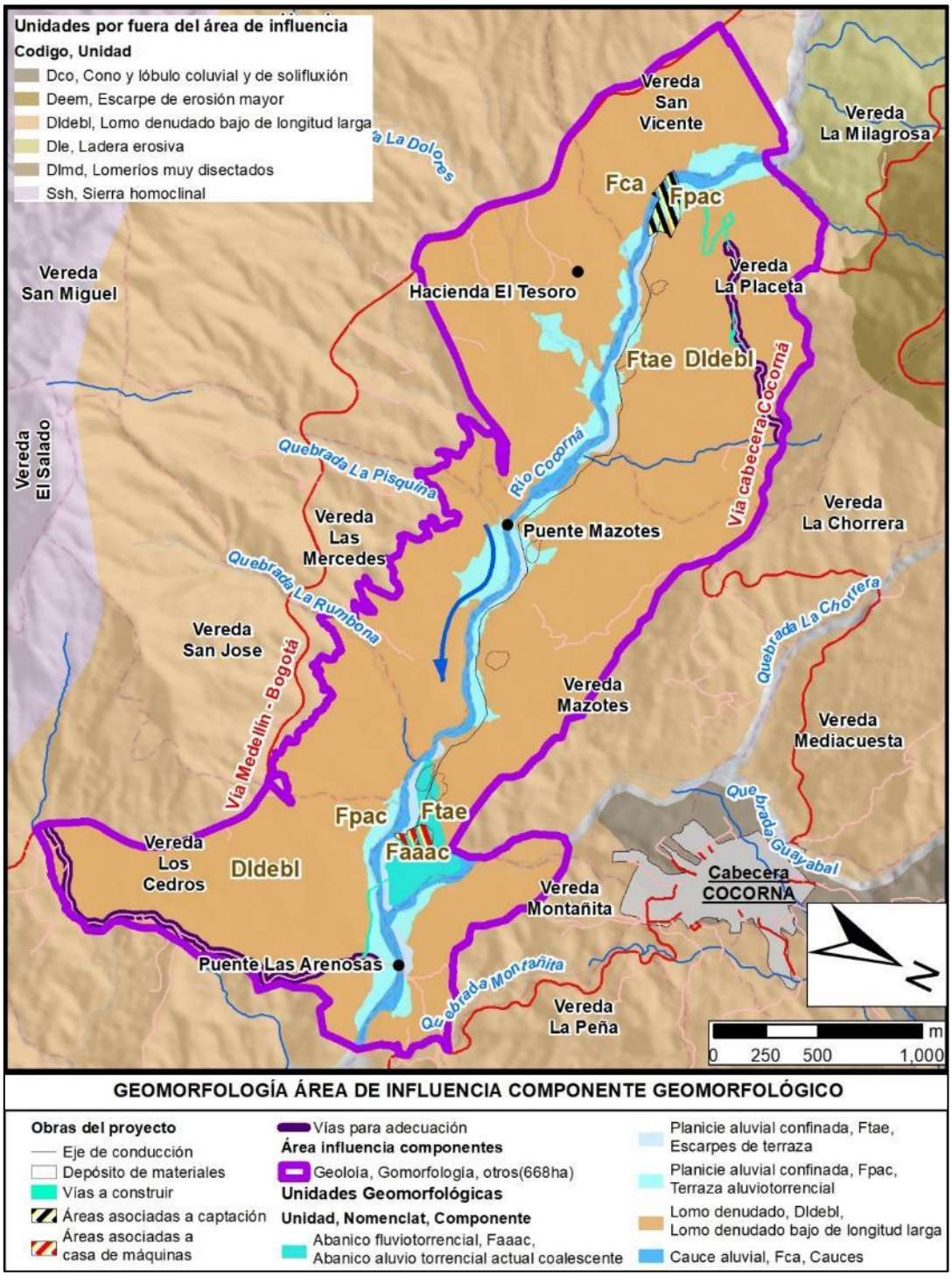


Figura 5-13 Mapa Geomorfológico del Área de Influencia.

5.1.2.1.4.1 Ambiente denudacional

Está definido exclusivamente por los procesos exógenos degradacionales y a la acción combinada de procesos de lluvia-escorrentía, meteorización, erosión y transporte de origen tanto gravitacional como pluvial que han remodelado y dejado remanentes de las geoformas morfoestructurales preexistentes y además crean nuevas geoformas por acumulación de sedimentos; en el área de influencia del proyecto priman las unidades del ambiente denudacional sobre las rocas ígneas del Batolito Antioqueño, las principales unidades geomorfológicas desarrolladas tienen un nivel relativo de relieve bajo y están representados por los lomos denudados (Dlde).

5.1.2.1.4.1.1 Lomo denudado (Dlde):

Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; se presentan como formas alargadas en dirección perpendicular al Río Cocorná, que corresponde en este caso al drenaje principal de la zona. El tope o la parte superior puede tener diferentes formas dependiendo del grado de incisión del drenaje. El tipo de saprolito que ha desarrollado que para la zona corresponde al de la roca dominante (Batolito Antioqueño) y presenta procesos erosivos diversos.

La orientación del eje de los lomos corresponde generalmente a una dirección N-S, respecto a la erosión del río principal se percibe el aumento en el grado de incisión en el paisaje. Esta unidad se caracteriza por presentar una morfología alomada y elongada con laderas cóncavas y pendientes muy inclinadas, presenta hasta 4 m de suelos residuales del Batolito Antioqueño e incluye depósitos de vertiente, es la unidad predominante del área de influencia y se ubica entre el Río Cocorná al norte y la autopista Medellín Bogotá al sur. La mayor parte de esta unidad se encuentra como la subunidad Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl) diferenciadas por su índice de relieve relativo menor de 250 m y la longitud de su eje principal mayor que 1.000 m. (Ver Foto 5-21).

Foto 5-21. Lomas denudadas.

5.1.2.1.4.1.2 Subunidades del ambiente denudacional

5.1.2.1.4.1.2.1 Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt):

Corona con forma de media-luna y estructura frontal lobular, con morfología alomada baja, de longitud muy corta, irregular localmente escalonada, con el escarpe principal descubierto casi vertical y hacia el deslizamiento cóncavo, muestra estrías y surcos en la superficie del cuerpo del movimiento, presenta pendientes en forma degradada o escalonada, el cuerpo del movimiento puede presentar ondulaciones o montículos, así como huecos rellenos con detritos lavados y material orgánico del mismo cuerpo del movimiento, los flancos conforman escarpes altos que decrecen hacia el pie y presentan estrías casi verticales cerca del escarpe principal y sub-horizontales cerca del pie (Servicio Geológico Colombiano-Dirección de Geoamenazas, 2017). Esta unidad está compuesta de material suelto y bloques, en la Foto 5-22 se aprecia un movimiento en masa rotacional localizado sobre la vía de acceso después la entrada a la Hacienda El Tesoro.

Foto 5-22. Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt) vía privada de ingreso a la Hacienda El Tesoro.

5.1.2.1.4.1.2.2 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft):

Área de origen grande que forma un relieve ancho, el cuerpo despliega estructuras de flujo con una parte frontal lobulada y convexa que presenta grietas transversales y radiales en el cuerpo, muestra un drenaje trastornado, desviado por el lóbulo frontal. El patrón de la vegetación resalta la morfología de los escarpes y los bloques en el área de origen; se presenta inclinación de los árboles en el sentido de la pendiente, como resultado de movimientos de tipo flujo. Su origen es relacionado a lluvias torrenciales (Servicio Geológico Colombiano-Dirección de Geoamenazas, 2017); En el proyecto esta unidad está ubicada en la margen izquierda aguas debajo del Río Cocorná, su unidad geológica correspondiente fue clasificada como un depósito de vertiente y está constituido por bloques angulares a subredondeados de tamaños métricos (ver Foto 5-23).

Foto 5-23 Cono o lóbulo de flujo indiferenciado (Dft), vereda La Placeta.

5.1.2.1.4.2 Ambiente fluvial

Las unidades de origen fluvial se asocian a la dinámica depositacional del río Cocorná y corresponden principalmente a el cauce aluvial, las planicies aluviales confinadas, y los abanicos aluviales.

5.1.2.1.4.2.1 Cauce aluvial (Fca):

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes sobre macizos rocos o sedimentos aluviales, dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal. El río Cocorná en el área de influencia del proyecto se presenta como un cauce recto restringido a un valle estrecho en forma de V. En la Foto 5-24 a y b se observa el cauce aluvial sobre lecho rocoso donde se encuentra un salto (cascada) en cercanías a donde está proyectada la captación y a 400 m de la descarga respectivamente. En c y d, el cauce aluvial sobre sedimentos aluviales en el tramo medio de la conducción y en la descarga respectivamente.

Foto 5-24 Cauce aluvial (Fca)

5.1.2.1.4.2.2 Planicie aluvial confinada (Fpac):

Franja de terreno de morfología plana, muy angosta eventualmente inundable, limitada por otras geoformas de morfología colinada o alomada que bordean los cauces fluviales, está constituida por material aluvial (arenas, limos y arcillas). En las Foto 5-25 observa esta unidad ubicada en la margen derecha del río Cocorná, en cercanias al puente Las Arenosas, la Foto 5-26 se ubica en la margen izquierda, en la vereda Mazotes, la Foto 5-27 se encuentra a 200 m de casa de máquinas, en la margen izquierda del río Cocorná y en la Foto 5-28 se encuentra la terraza en frente de la zona escogida para la captación del proyecto.

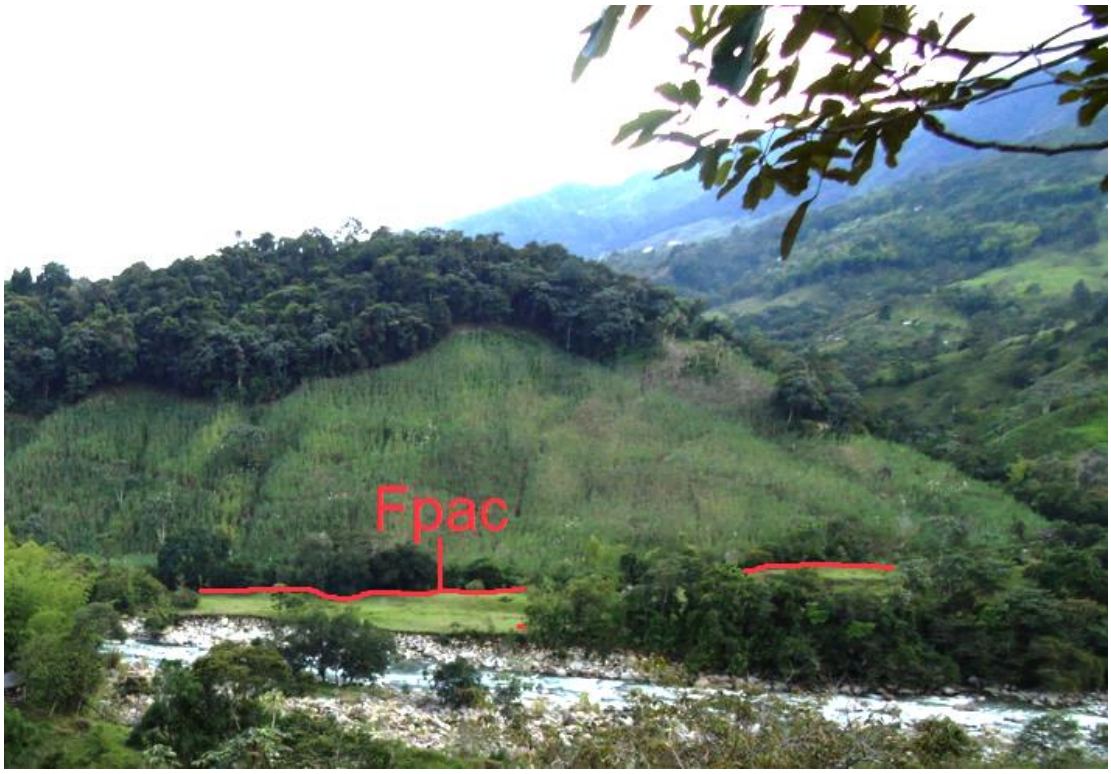


Foto 5-25 Planicie aluvial confinada (Fpac)

Foto 5-26 Planicie aluvial confinada (Fpac)

Foto 5-27 Planicie aluvial confinada (Fpac)

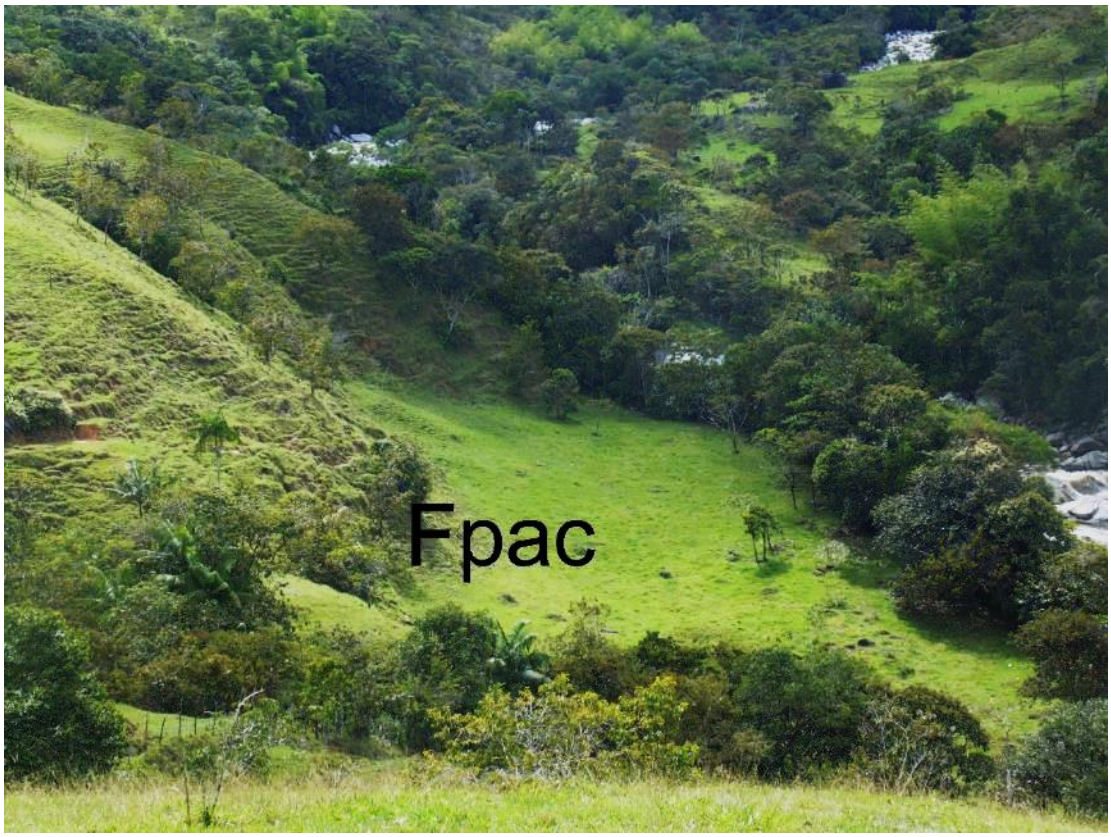


Foto 5-28. Planicie aluvial confinada (Fpac)

Se encontraron algunas terrazas sobre elevadas con diferencias de hasta 2 metros entre sí, estas se identificaron en la margen izquierda del río, y se caracterizan por tener morfología plana a ligeramente ondulada. (Foto 5-29)

Foto 5-29 Vista de terrazas sobre elevadas, margen izquierdo.

5.1.2.1.4.2.3 Abanico Fluviotorrencial

Se encuentra entre la desembocadura de la quebrada La Chorrera y el río Cocorná, es un cuerpo de considerable extensión, con unas 11,44 ha, se caracteriza por presentar prominentes bloques aflorando en superficie, estos bloques se asocian a la litología predominante de la región (rocas ígneas intrusivas), asociadas posiblemente al Batolito Antioqueño, este depósito se caracteriza por el desarrollo de profundos horizontes de suelo, se encontraron varios horizontes de paleosuelos, en este lugar se realiza un apique complementario de 2 m de profundidad (Ap6). En la clasificación S.C.U.S. es un SC, un suelo areno arcilloso, de alta plasticidad. (ver Anexo 5.1.1. Geología, geotecnia, hidrogeología).

Foto 5-30 Terraza fluvio torrencial

5.1.2.1.4.2.4 Subunidades del ambiente fluvial

5.1.2.1.4.2.4.1 Barra puntual (Fbp):

Cuerpo en forma de medialuna localizado en la parte cóncava de los meandros del Río Cocorná, está constituido por bloques subredondeados, heterométricos de gran tamaño, indicando el carácter torrencial y de alta energía del río (ver Foto 5-31).

Foto 5-31. Barra Puntual, cerca de la desembocadura de la quebrada La Chorrera en el río Cocorná

5.1.2.1.4.2.4.2 Divagación de cause activo (Fdc):

Ubicada en la llanura aluvial baja del Río Cocorná, sobre la margen derecha aguas abajo, donde el río transporta, acumula y re-moviliza material de arrastre, se caracteriza por presentar marcado socavamiento lateral y encontrarse sobre un lecho de roca intacta. (Ver Foto 5-32).

Foto 5-32 Divagación de cause activo (Fdc) margen derecha río Cocorná a la altura del puente de la vereda Mazotes.

5.1.2.1.4.2.4.3 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae):

Plano vertical a subvertical, escalonado, excavado en sedimentos aluviales que bordean las terrazas de acumulación. Su origen es relacionado a la incisión y profundización del cauce. La altura de los escarpes puede alcanzar alturas variadas, la mayor se muestra en la Foto 5-33 donde alcanza hasta 6 m, en las Foto 5-34 y Foto 5-35 se observa una gradación normal.

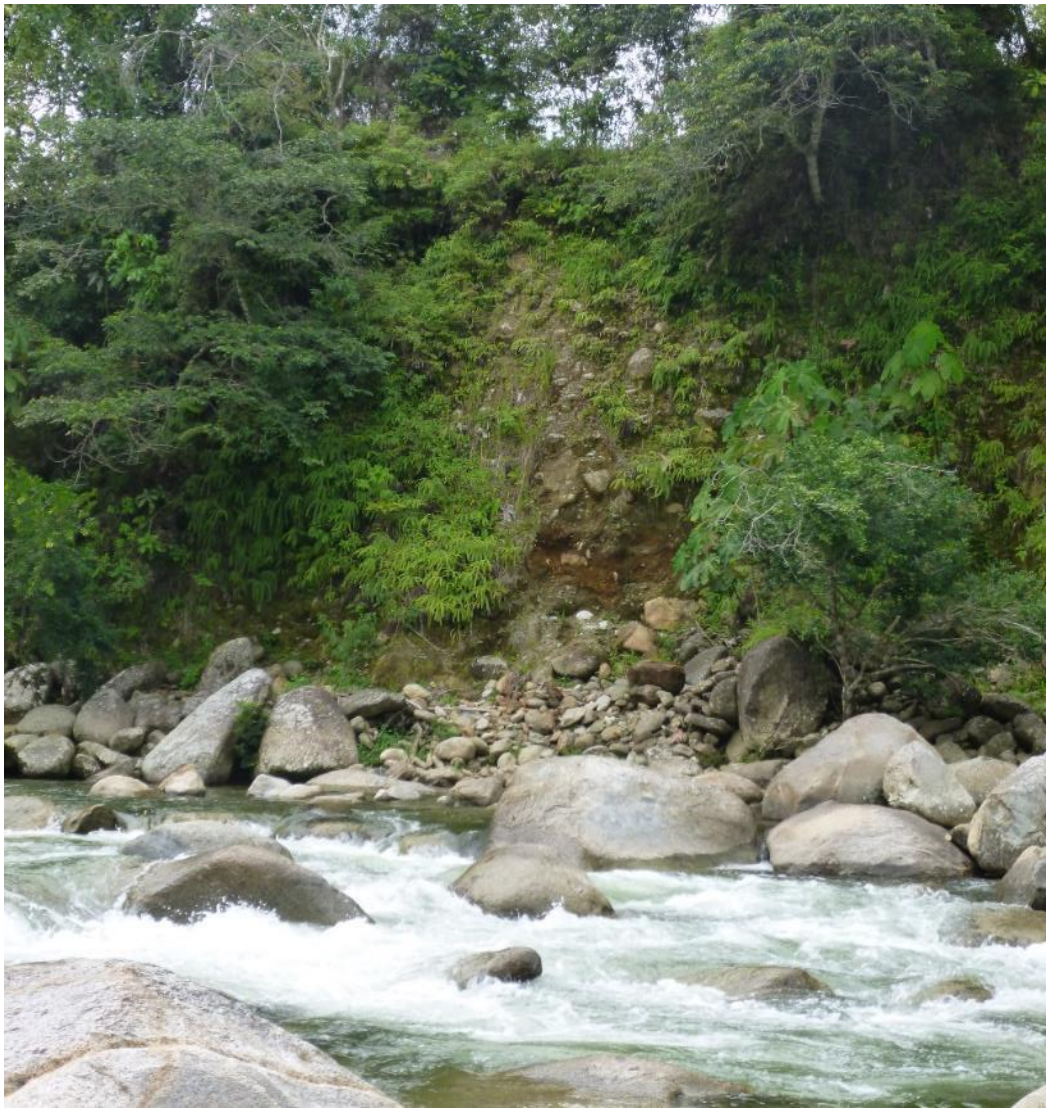


Foto 5-33 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)

Foto 5-34 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae) 20 metros aguas abajo del puente Las Arenosas, margen derecha

Foto 5-35 Escarpe de terraza de acumulación 5 metros aguas abajo del puente Las Arenosas, margen izquierda.

5.1.2.2 Morfometría

La morfometría se dedica al análisis cuantitativo de la superficie del terreno en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente, esta analiza los rasgos discretos de la superficie del terreno y los rasgos continuos mediante la caracterización y el análisis digital de las superficies topográficas; por medio los DEM se produce la medición y extracción de atributos que describen los rasgos topográficos del paisaje. Los parámetros más frecuentemente medidos incluyen: pendiente relieve relativo, patrón de drenaje, entre otros. La distribución espacial de estos parámetros permite inferir la variabilidad de procesos hidrológicos y geomorfológicos en el paisaje. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

5.1.2.2.1 Pendientes

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor se expresa en grados de 0 a 90° o en porcentaje (ver Figura 5-16) siendo una pendiente del 100% el equivalente a 45°. La pendiente se puede considerar como el mejor indicador para realizar subdivisiones del relieve, este es un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la medida en que se relaciona directamente con las tensiones de corte tangenciales y normales en los materiales superficiales, e influye también en la distribución de agua en la ladera. La pendiente es el principal factor geométrico a tener en cuenta en análisis de estabilidad

de taludes y puede obtenerse como una variable cuantitativa continua que se deriva del DEM. (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Los aspectos morfométricos derivan de los atributos intrínsecos de las formaciones geológicas y los ambientes geomorfológicos (como una combinación del origen y la evolución de las geoformas) apoyados de los efectos hidrometeorológicos. La pendiente media de la zona es aproximadamente de 31% (20°), el equivalente a una pendiente abrupta, con procesos denudacionales intensos de diferentes tipos y alta predisposición al desarrollo de procesos erosivos, la susceptibilidad por movimientos en masa de esta pendiente corresponde a la categoría de alta según (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Dicha pendiente tiene como características generales la presencia de terrenos con depósitos coluviales gruesos y sustratos arcillo-limosos, para el área de influencia la pendiente máxima es de 110% asociada a laderas rocosas y la mínima de 0% asociada a llanuras de inundación del río Cocorná; cada unidad sea geomorfológica o geológica superficial tiene particularidades morfométricas, entre esas pendientes que reflejan las condiciones de evolución de estos cuerpos. Respecto a la distribución de los rangos de pendientes observados en la Tabla 5-5 el 42% (286 ha) del área de influencia está en el rango de 30-50% o de (16-26° aproximadamente), el siguiente rango que predomina en el área de influencia y que corresponde al 23% de la zona (152,93 ha) es el de 15-30% (8-16° aproximadamente), seguido del rango de 50-100% (26-45° aproximadamente) que ocupa un 22% del área de influencia, el equivalente a 148,04 ha. El 12% del área, 81,48 ha se ubica en un rango de 0-15% (0-8° aproximadamente), por último, el menor porcentaje del área de influencia 0,01 ha tienen pendientes superiores al 100% (>45°).

Tabla 5-5 Rangos de pendiente para el área de influencia del proyecto

Rangos Pendientes (%)	Área (ha)	Área (%)
0-15%	81,48	12,20%
15-30%	152,93	22,90%
30-50%	285,46	42,74%
50-100%	148,04	22,16%
>100%	0,01	0,00%
Total	**667,92**	**100%**

Para el caso de la zona de estudio las formaciones geológicas superficiales ver (Figura 5-14 y Figura 5-7) se distribuyen en los suelos residuales del Batolito Antioqueño (Srr) con una pendiente promedio de 38%, aproximadamente 21,5°, el equivalente a una pendiente abrupta, con alta propensión al desarrollo de procesos denudacionales intensos y una susceptibilidad alta a movimientos en masa, según

(Servicio Geológico Colombiano, 2017), esta unidad alcanza pendientes de hasta el 100% (equivalente a 45°) principalmente asociadas a la incisión vertical que producen los cauces aluviales de las quebradas que cortan esta unidad, las pendientes más suavizadas, cercanas a 0% se encuentran en los topes planos de los lomos que conforman esta unidad, geomorfológicamente esta unidad geológica superficial está conformada por lomos denudados bajos de longitud larga (Dldebl) con pendientes medias de 39 % (ver Figura 5-15).

Los depósitos de vertiente o depósitos gravitacionales (Dlb), cuentan con una pendiente promedio de 34%, el equivalente a 19°, el correspondiente a una pendiente abrupta, con alta propensión al desarrollo de procesos denudacionales intensos y una susceptibilidad alta a movimientos en masa, según (Servicio Geológico Colombiano, 2017), esta unidad presenta pendientes máximas de 76% (37°) asociada a los escarpes de las coronas de deslizamientos que se evidencian en la morfología del terreno, las pendientes mínimas de esta unidad corresponden a valores cercanos al 5% (3°) asociados a las lenguas de los deslizamientos ya denudadas y esculpidas por la escorrentía superficial, la geomorfología característica de esta unidad geológica superficial corresponde a las subunidades geomorfológicas Conos o lóbulos de deslizamiento rotacional (Ddrt), conos o lóbulos de flujos indiferenciados con pendientes medias y conos o lóbulos de flujos de lodo (Dlfl) con pendientes medias de 46% (ver Figura 5-15).

Por último, los depósitos aluviales (Dsg) y aluvio-torrenciales, tienen una pendiente media de 20% (11,3°), el equivalente a una pendiente inclinada, con alta susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos, especialmente erosión laminar y en surcos, estas pendientes corresponden esencialmente a terrenos asociados con depósitos aluviales clasto-soportados, la susceptibilidad a movimientos en masa es clasificada como baja y se limita eventualmente a movimientos en masa de baja velocidad. (Ver Figura 5-15).

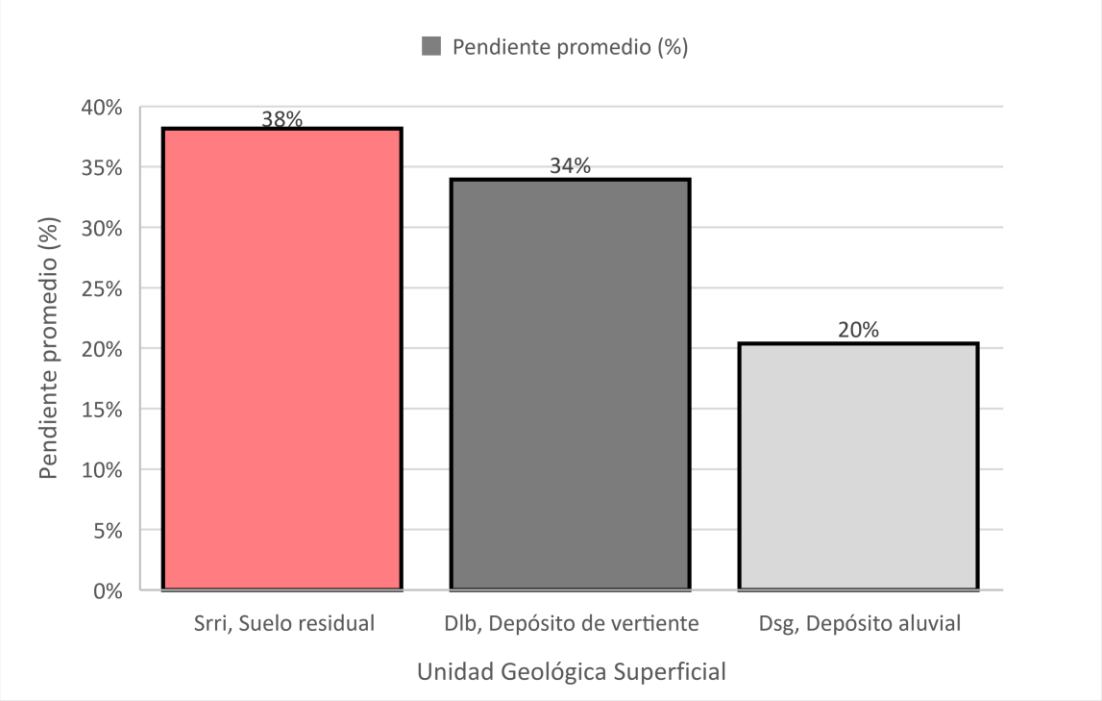


Figura 5-14 Pendiente promedio por unidad geológica superficial

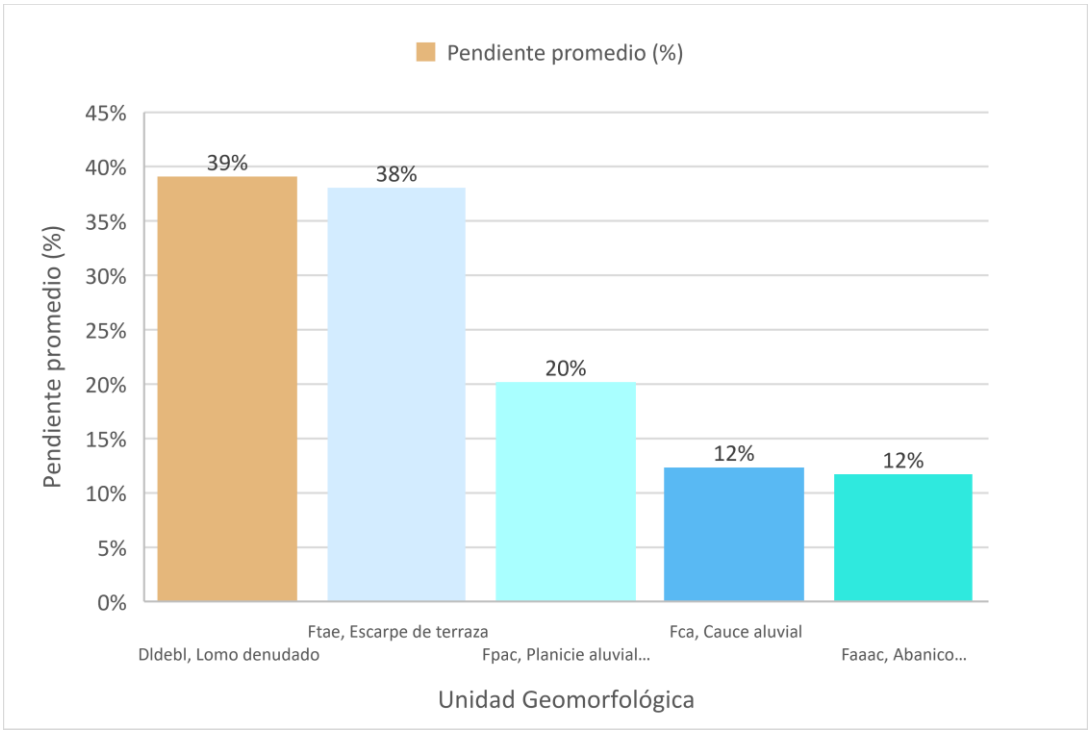


Figura 5-15 Pendiente media por unidad geomorfológica.

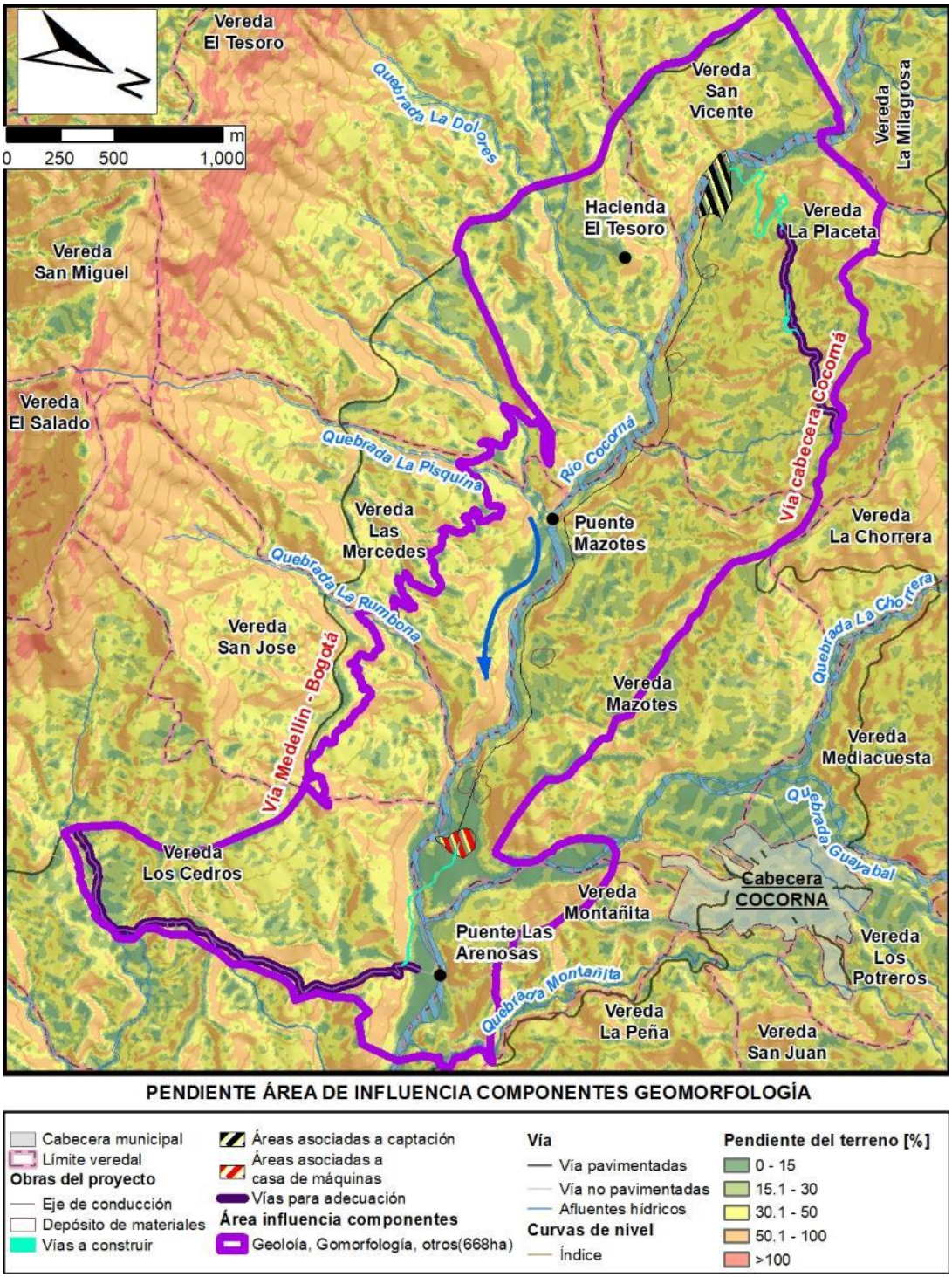


Figura 5-16 Mapa de pendientes.

5.1.2.2.2 Patrón y densidad de drenajes

El patrón de drenajes es la distribución de todos los canales de drenajes superficiales en un área que esté ocupada o no por aguas permanentes. Está controlado por la pendiente del terreno, el tipo y estructura geológica de la roca subyacente, la densidad de vegetación y las condiciones climáticas. Para el caso del área de estudio el patrón fue clasificado como dendrítico (Ver Figura 5-17) y obedece al desarrollo típico de los drenajes de cuerpos ígneos plutónicos por su composición homogénea, este constituye uno de los patrones más comunes en el oriente antioqueño. Se caracteriza por presentar ramificaciones formando ángulos agudos. El orden de la cuenca de drenaje está dado por el curso de orden mayor; para el caso de la red de drenaje del río Cocorná hasta el punto de captación, se encuentra que es de Orden 5. El cauce se encuentra enmarcado en un valle en “V” y tener un alto gradiente longitudinal.

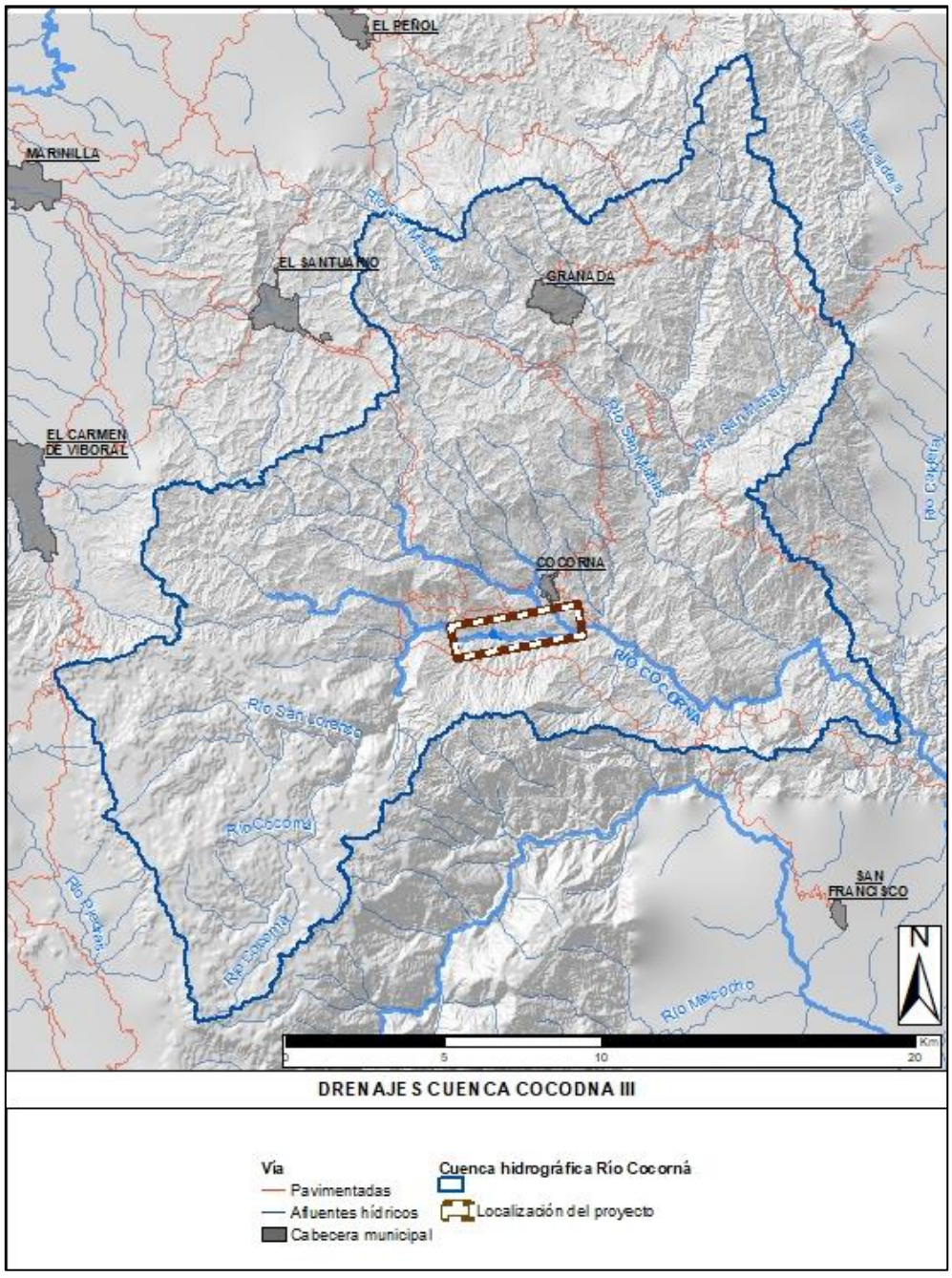


Figura 5-17 Patrón de Drenaje

5.1.2.3 Morfodinámica

Estudia los procesos superficiales que afectan a una geoforma y que han ocurrido tanto en el pasado, como los que se encuentran activos en el presente o aquellos que se puedan activar en el futuro (Servicio Geológico Colombiano-Dirección de

Geoamenazas, 2017). Se refiere a la dinámica exógena relacionada con la actividad de agentes como el viento, agua, hielo y la acción de la gravedad terrestre, que modifica las geoformas preexistentes. Estos agentes, específicos, afectan y modelan la superficie terrestre con diferentes grados de intensidad, imprimiéndole al terreno características propias de cada ambiente

La morfodinámica permite identificar y definir la evolución de los procesos denudacionales (procesos erosivos y movimientos en masa) que han ocurrido en un área determinada. Así mismo, el tipo de proceso y su intensidad, que contribuyen de manera importante en la evolución del paisaje. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Según (Universidad Eafit, 2014) en la cuenca del río Cocorná, existen unidades de índice de relativo bajo a muy bajo con movimientos en masa asociados a los espesores muy altos de suelo residual de una zona climática húmeda, a la alta complejidad edafológica y pedogenética, que determinan diferentes tipos de erosión y que finalizan en el desencadenamiento de movimientos en masa, acelerados por la alta intervención antrópica de la zona.

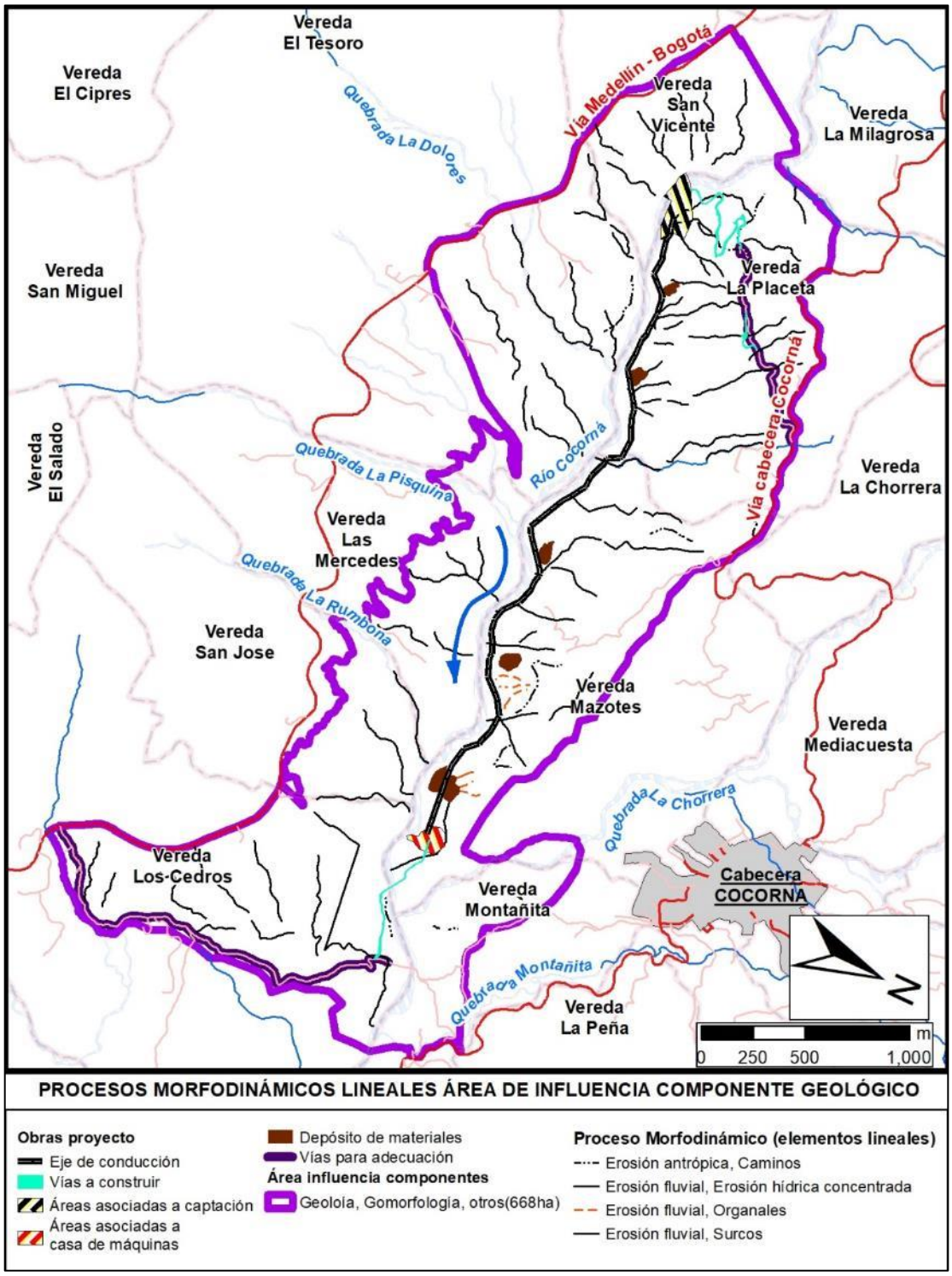


Figura 5-18. Mapa de procesos morfodinámicos lineales

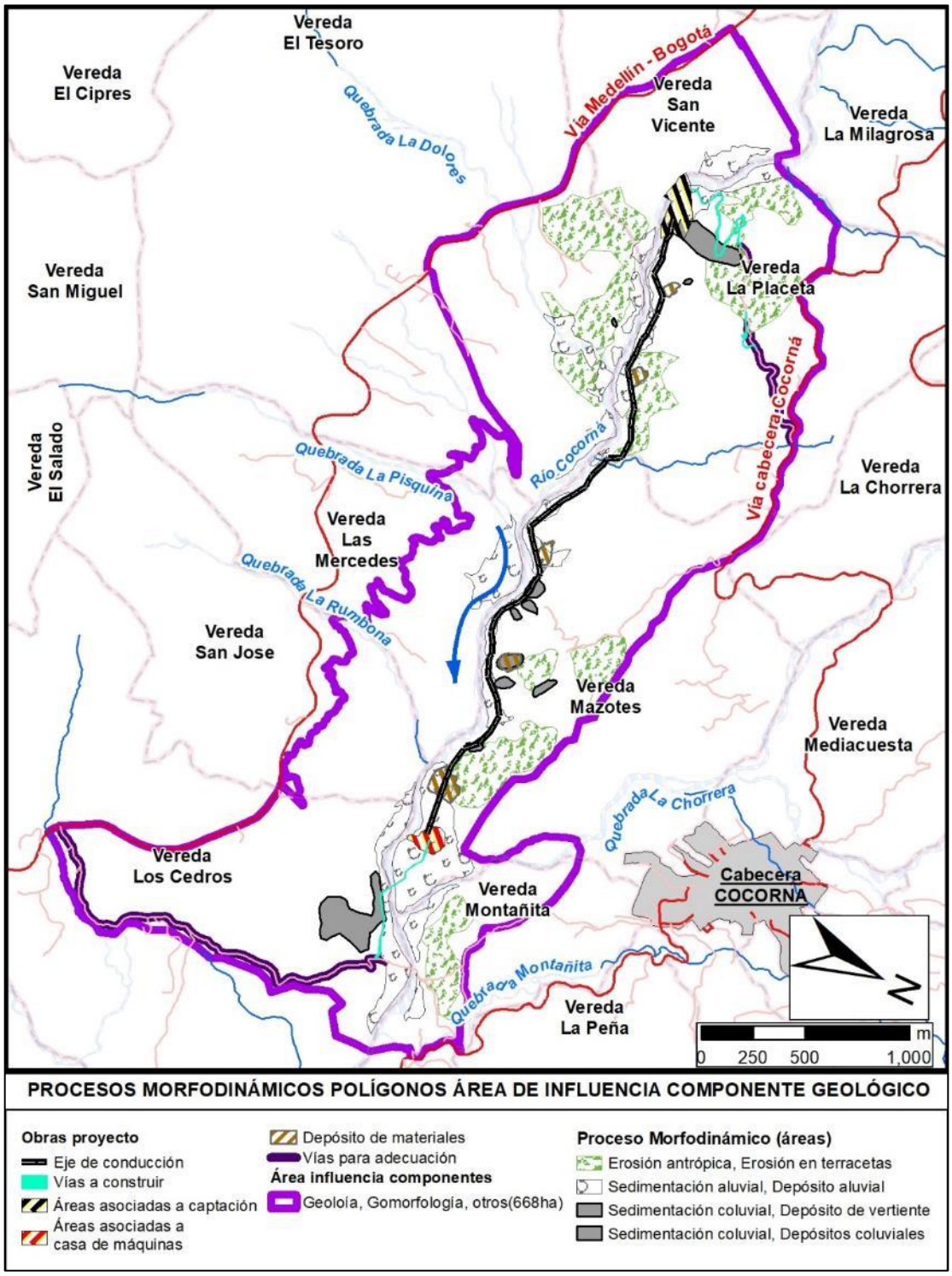


Figura 5-19. Mapa de procesos morfodinámicos poligonales.

Tabla 5-6 Relación espacial entre procesos morfodinámicos y el área de influencia

Proceso	Área (ha)	%
Erosión antrópica-Erosión en terracetas	71,33	10,7%
Sedimentación aluvial-Depósito aluvial	56,23	8,4%
Sedimentación coluvial-Depósito de vertiente	0,36	0,1%
Sedimentación coluvial-Depósitos coluviales	11,73	1,8%

El proceso de mayor extensión en el área de influencia corresponde al de erosión antrópica-erosión en terracetas, que ocupa una extensión de 71,33 ha, representando el 10,7% del área de influencia, se debe al uso ganadero de la zona, asociado a las coberturas de pastos limpios que abundan en el sector. El siguiente proceso corresponde a la dinámica depositacional del río Cocorná y sus afluentes, la sedimentación aluvial, esta ocupa unas 56,23 ha, representadas en el 8,4% del área total. Los depósitos coluviales son los siguientes procesos en relación de área, estos ocupan 11,73 ha y representan el 1,8% del área de influencia.

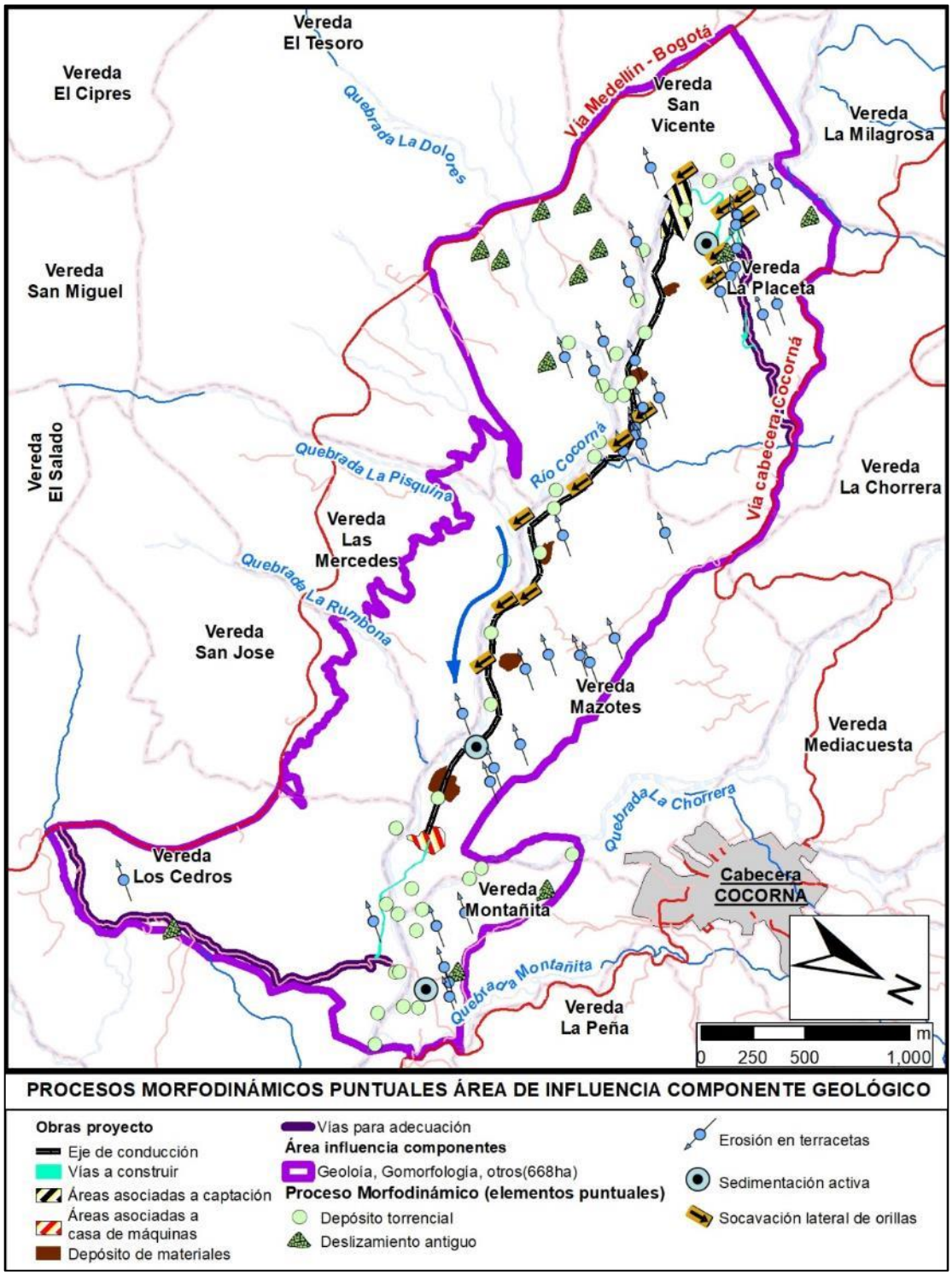


Figura 5-20. Mapa de procesos morfodinámicos puntuales

La morfodinámica es la parte de la geomorfología que trata de los procesos geodinámicos externos (principalmente denudativos), tanto antiguos como recientes que han modelado y continúan modelando el relieve y son los responsables del estado actual de las geoformas. La caracterización morfodinámica permite identificar y definir la evolución de los procesos denudativos (erosión y movimientos en masa), que han ocurrido en un área determinada y permiten dilucidar el futuro, particularmente en términos de estabilidad de un terreno.

5.1.2.3.1.1 Áreas de erosión activa

La erosión en el área de influencia se concentra principalmente en los procesos asociados a la perdida de material por efecto de los cauces activos o erosión fluvial (ver Foto 5-36), esta se produce por la socavación lateral de las orillas de los ríos tanto en materiales aluviales como en lechos de roca, según sea el caso. Se presenta sobre ambas márgenes del río Cocorná, en zonas donde la dinámica fluvial actúa erosionando lateralmente las orillas exponiendo así grandes espesores de material aluvial de carácter aluvio-torrencial, principalmente y produce escarpes rocosos en menor proporción. Estos puntos de erosión lateral coinciden con la curvatura cóncava del río, en la cual se presenta la mayor incidencia de las aguas sobre el terreno.

Foto 5-36 Socavación lateral de cauces aluviales margen derecho quebrada La Dolores, vereda El Tesoro.

También se presenta sobre el área de estudio erosión hídrica concentrada, se registra carcavamiento sobre los depósitos de vertiente y los suelos residuales del Batolito

Antioqueño, en la vereda El Tesoro (ver Foto 5-37) se presenta este fenómeno en las laderas continuas a la vertiente derecha del río Cocorná.

Foto 5-37 Cárcavas sobre suelo Residual Batolito Antioqueño.

El área de estudio presenta baja insidencia de fenómenos erosivos siendo el terraceo relativamente abundante debido a la presencia de ganadería, aunque sigue siendo esta actividad económica poco representativa en la zona y caracterizada por por la falta de tecnificación, su extención es puntual (asociada a minifundio y mediana propiedad).

Sobre las laderas se presenta erosíon laminar como procesos de escorrentia, estos no son drenados bajo profundas insciones sino como delgadas capas continuas sobre el terreno, conduciendo sobre los lomos hacia las cañadas y quebradas que en el área se caracterizan por su patron subparalelo y baja densidad.

Foto 5-38 Organales encontrados en la margen derecha del río Cocorná

Otro proceso que impera en el área corresponde a la erosión hídrica que forma organales, o sumideros, antiguos cauces con bloques de roca que se ven parcialmente cubiertos por suelo, pero que sin embargo conservan la estructura tubular de un cauce o corriente, estos pueden o no constituir un cauce activo o un drenaje no permanente, se realizaron sondeos eléctricos verticales para determinar su posible extensión y profundidad (ver hidrogeología). Esos procesos priman en los pies de laderas de la margen izquierda del río Cocorná.

5.1.2.3.1.2 Áreas de sedimentación activa

Las áreas de sedimentación activa se ubican principalmente en las bermas de los cauces fluviales, corresponden a las zonas donde la reducción en la capacidad de carga del río induce la depositación de material de arrastre, en el área de influencia corresponde a las terrazas aluviotorrenciales cartografiadas en la Figura 5-18 y observada en la Foto 5-41. La sedimentación que corresponde al cauce aluvial propiamente se visualiza en las fotos Foto 5-39, Foto 5-40, Foto 5-42, Foto 5-41, Foto 5-42.

Foto 5-39, Sedimentación aluvial cerca al puente Las Arenosas, margén derecha río Cocorná

Foto 5-40 Sedimentación aluvial cerca, cerca al puente de la vereda Mazotes

Foto 5-41 Sedimentación en terrazas aluviotorrenciales (av)

Foto 5-42 Sedimentación aluvial sobre el cauce del río Cocorná.

5.1.2.3.2 Susceptibilidad de procesos de remoción en masa.

Según (Servicio Geológico Colombiano, 2013) la Cuenca del Río Cocorná se encuentra en un grado de susceptibilidad Alta por movimientos en masa, asociado a

los suelos residuales del Batolito Antioqueño, donde las pendientes se clasifican entre abruptas y escarpadas, con asociaciones de mosaicos de pastos y cultivos y pastos limpios. Según (Servicio Geológico Colombiano, 2012) la vereda El Tesoro se encuentra en un grado de susceptibilidad media (ver Foto 5-43 y Foto 5-44), desarrollado principalmente en unidades del ambiente denudacional, con pendientes de inclinadas a muy inclinadas; principalmente sobre lomos denudados (Dld). Asociada a esta clase de susceptibilidad y paisaje se encuentran suelos Andisoles, Entisoles e Inceptisoles, de textura arcillosa y franco arcillosa y franco arcillosa-arenosa, con buen drenaje natural, profundos y muy profundos, la cobertura que prevalece en esta categoría de susceptibilidad corresponde a pastos limpios, mosaico de cultivos y pastos y bosque alto de tierra firme, estas zonas presentan una intervención antrópica moderada lo cual puede favorecer el desarrollo de movimientos en masa, ver Figura 5-18.

Según (Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, 2017) las avenidas torrenciales y los movimientos en masa son los eventos de mayor ocurrencia del municipio de Cocorná, los registros señalas 10 inundaciones, 14 avenidas torrenciales datadas y 122 movimientos en masa identificados, el principal detonante de estos eventos corresponde a la lluvia.

Según (Convenio Cornare-Gobernación de Antioquia, 2011) el área de influencia del proyecto se encuentra clasificada con riesgo medio.

Foto 5-43. Movimiento en masa rotacional, vereda El Tesoro.

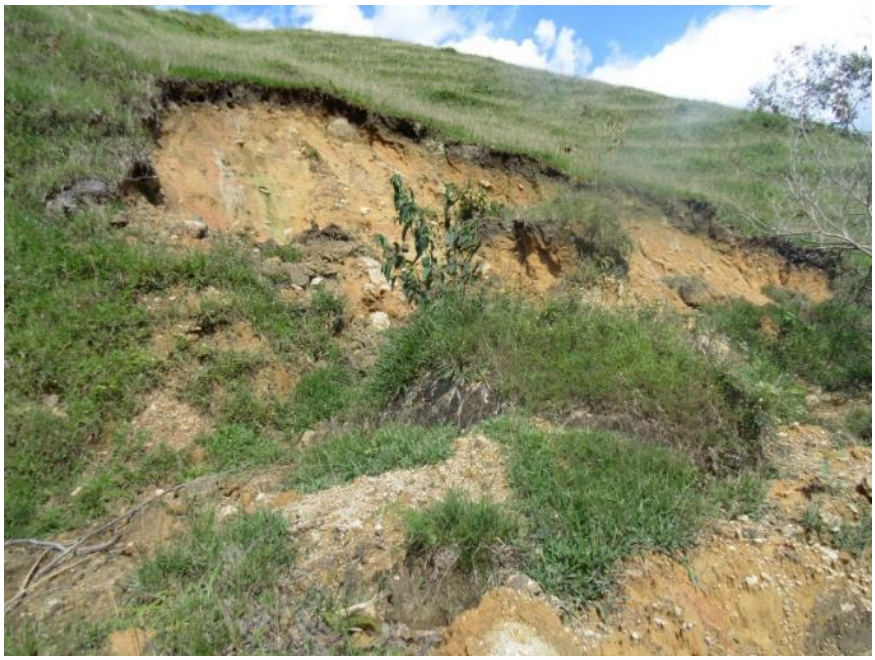


Foto 5-44 Movimiento en masa rotacional, vía de acceso hacienda El Tesoro.

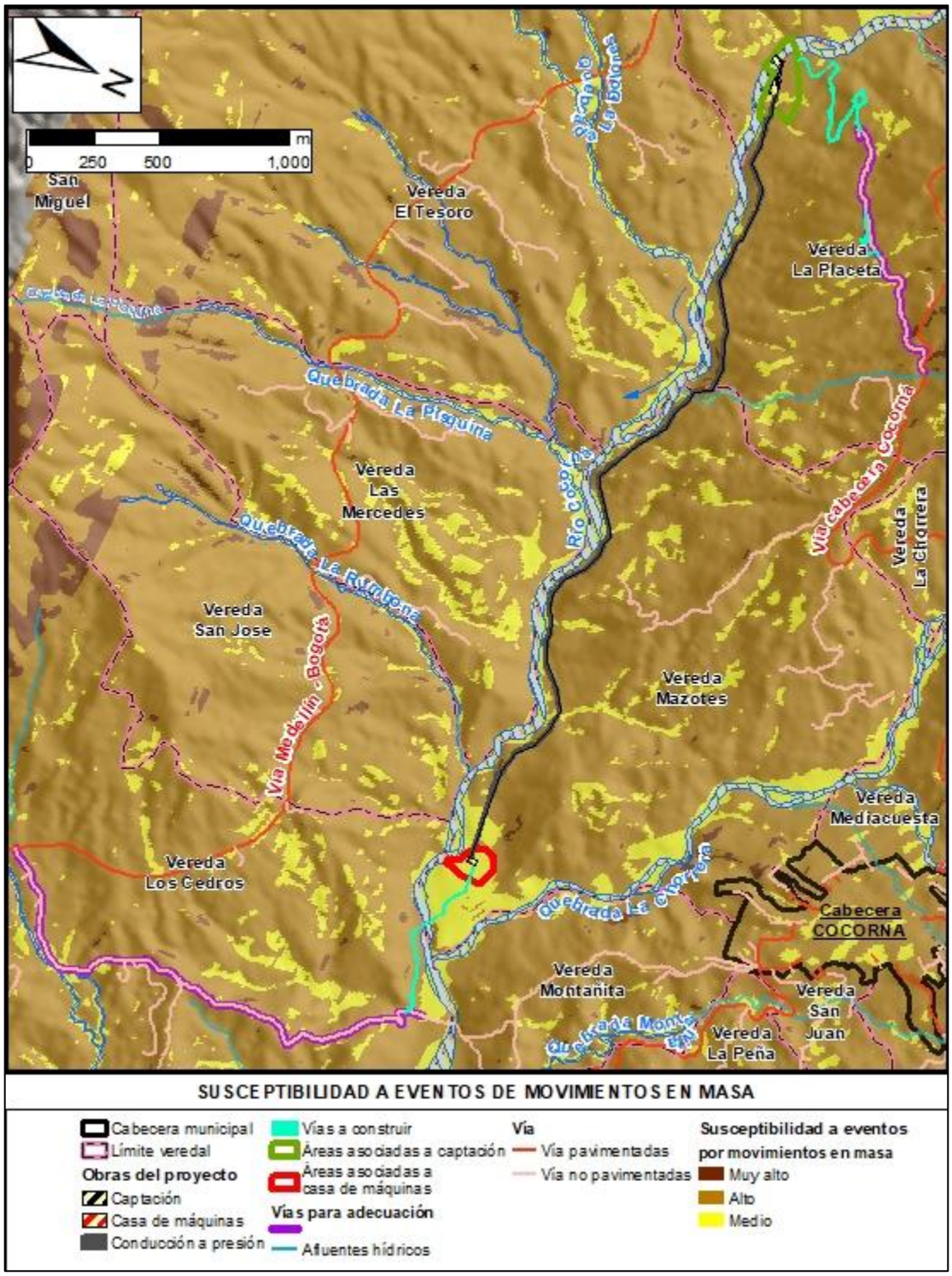


Figura 5-21 Susceptibilidad por movimiento en masa

Respecto a la distribución de las categorías de susceptibilidad se encuentra que el 54% del área de influencia se encuentra en alta, el 38% en media y el 7% en baja (Tabla 5-7).

Tabla 5-7. Susceptibilidad a los movimientos en masa en el área de influencia

Susceptibilidad	Área (ha)	Área (%)
Alta	216,8	54,6%
Baja	27,9	7%
Media	151,6	38,2%
Total	**396,4**	**100%**

5.1.3 Hidrogeología

Este capítulo está dedicado a la evaluación de las condiciones hidrogeológicas del área de influencia con el objeto de identificar las condiciones actuales de las aguas superficiales y subterráneas.

Para el área de influencia se busca definir el modelo hidrogeológico que represente de la mejor manera el comportamiento actual del terreno, las condiciones existentes a la fecha y las condiciones futuras, en relación con el régimen de aguas subterráneas de la zona del proyecto.

Como objetivo secundario tenemos el de determinar la incidencia de la construcción de las obras de ingeniería en relación con el agua subterránea y el nivel freático presente en el área, en especial sobre áreas de recarga de las corrientes existentes y de sus afluentes a lo largo del alineamiento de la tubería, captación, casa de máquinas y vías de acceso.

Dentro del alcance dado al estudio hidrogeológico, se tiene como principal ítem llevar a cabo el análisis de las características geotécnicas, geomecánicas y estructurales del macizo rocoso a partir de las exploraciones realizadas en la zona, de la cartografía geológica y de la modelación matemática, la cual definirá el modelo conceptual de la dinámica de las aguas subterráneas y su interacción con las obras de ingeniería para la zona de estudio.

La conducción es superficial, con excavaciones entre 4 – 5 metros, que, en algunos casos, estas obras se consideran como una condición de frontera que impide el flujo y conexión entre el sistema acuífero, pero, sin impactos significativos en el sistema hidrogeológico presente.

La modificación más importante consistirá en las excavaciones superficiales, como el desarenador, tanque de carga y casa de máquinas. Estas obras generan al interior del suelo, una zona en la que dará lugar a cambios locales en el flujo del agua

subterránea hacia dichas obras, reflejando cambios del nivel freático en el sistema hidrogeológico.

El aspecto más destacado de esta evaluación es el hecho que las condiciones geológicas del Cañón del Río Cocorná no albergan la posibilidad de que en él se encuentre un acuífero sensu stricto, es decir una formación rocosa cuya permeabilidad permite el flujo de agua en cantidad suficiente, que pueda ser aprovechada económicamente (Bates & Jackson, 1980). Sin embargo, ha sido identificada la presencia de depósitos aluviales, lo que permite inferir un flujo de agua subterránea en bloques de roca con gravas y matriz arenosa, así mismo en el regolito de la roca granítica, que amerita una investigación más detalladas en etapas posteriores del proyecto, que incluya sondeos geofísicos adicionales y perforaciones.

Diferentes aspectos de la hidrogeología en los Andes Colombianos, pertinentes a la evaluación hidrogeológica y, en particular del sector donde se encuentra el proyecto, han sido tratados previamente. La geología y la hidrología han sido examinadas a escala regional como insumos necesarios y complementados con información en condiciones análogas a las de este proyecto para refinar los elementos de juicio y los argumentos en que se fundamenta el modelo hidrogeológico.

En el área del proyecto, las aguas subterráneas proceden de la precipitación local. El agua subterránea fluye desde las zonas de recarga y es descargada por la red de drenaje de la margen izquierda y derecha del río Cocorná entre la captación y la casa de máquinas. El hecho de que no haya transferencias desde otras cuencas al sistema hidrogeológico que analizamos simplifica en gran medida la evaluación presentada en este informe.

La tubería de conducción cruzará zonas de acumulación aluvial cuya existencia fue planteada a partir del examen de imágenes aéreas de la zona de estudio del proyecto recorridos de exploración de campo, y que coincide con el cauce del río Cocorná y sus afluentes.

Teniendo en cuenta las formaciones superficiales, unidades geológicas presentadas en el componente geología el área donde se desarrollará el proyecto hidroeléctrico, se localiza sobre rocas ígneas pertenecientes a edades Cretácicas, rocas del Batolito Antioqueño las cuales han sido afectadas tectónicamente por la Falla Caldera, falla Miraflores, que presentan grandes expresiones geomorfológicas y fisiográficas como lineamientos y contactos fallados.

De acuerdo con las características geológicas (litología, granulometría, estructuras) de las diferentes unidades litológicas (Batolito Antioqueño y depósitos cuaternarios) correspondientes a la zona del proyecto y complementando con los datos que definen su distribución espacial y en superficie se propone la clasificación de las Unidades Hidroestratigráficas.

La anterior clasificación hidrogeológica significa que la zona reposa sobre rocas ígneas que presentan baja productividad dentro de la Cordillera Central con

ambientes ígneos de posibilidades hidrogeológicas desconocidas y restringidas. A nivel local se evidencian unidades hidrogeológicas particulares, como zonas de acumulación aluviales confinadas, suelo producto de agentes meteóricos, sin embargo, debido a que el proyecto está conformado por obras con excavaciones poco profundas, el subsuelo no va a verse afectado hidrogeológicamente por la construcción del proyecto.

5.1.3.1 Hidrogeología regional

Entendiendo la hidrogeología como el área encargada del estudio de las aguas subterráneas, la dinámica que involucra una infiltración y direccionamiento hacia unidades como acuíferos, que son los encargados de almacenar las aguas, debido sus propiedades espaciales de conductividad hidráulica, transmisividad, permeabilidad intrínseca, porosidad, entre otras, estudia además factores como la calidad de estas aguas (buena, regular y mala), y todo lo que involucra la circulación, reserva y métodos de extracción determinado así su potencial y utilización en áreas de consumo, agrícola e industria.

Se define una serie de unidades hidrogeológicas según sus características, y su interacción con las obras de ingeniería, se clasifican acuíferos confinados, acuitardos, y acuíferos libres.

En el departamento de Antioquia se encuentran distribuidas a lo largo de toda su área una serie de unidades hidrogeológicas, las cuales son divididas según geoformas regionales y su génesis. Hacia al occidente, se tienen las unidades formadas por los sedimentos en especial del Río Cauca, las cuales conforman una extensión regional de su valle, con materiales gruesos que hace parte de una gran unidad hidrogeológica de comportamiento de acuífero de tipo libre, con aguas de baja calidad química con relación directa con las aguas de precipitación y escorrentía superficial. Otros lugares como el río Atrato y vertientes del río Magdalena en el costado oriental de la Cordillera Central, donde se encuentran a lo largo de sus valles sedimentos recientes y Terciarios que se comportan como acuíferos libres. En las partes hacia el sur del departamento, se tiene algunos acuíferos continuos, sobre rocas sedimentarias cretácicas, con buena calidad de las aguas (IGAC, 2007).

Algunos acuíferos locales ubicados hacia el norte de Antioquia de calidad media sobre sedimentos terciarios, al igual que sobre las unidades hidrogeológicas formadas por los sedimentos recientes acumulados en los valles de Santa Fe de Antioquia, La Ceja y Rionegro. Además de algunos sedimentos no cementados sobre la parte sobre valle del río Cauca hacia el sur del departamento. Otros acuíferos locales de extensión variable se presentan sobre las unidades hidrogeológicas compuestas por los sedimentos recientes en el Urabá localizado sobre la zona costera del noreste del departamento (IGAC, 2007).

En resumen, para el área de estudio se tiene una localización dentro de la unidad que corresponde a las rocas metamórficas e ígneas, además de algunos bordes en la unidad de Rocas ígneas intrusivas, unidades que desarrolla suelos en superficie de diferentes espesores, con una importancia hidrogeológica de media a baja

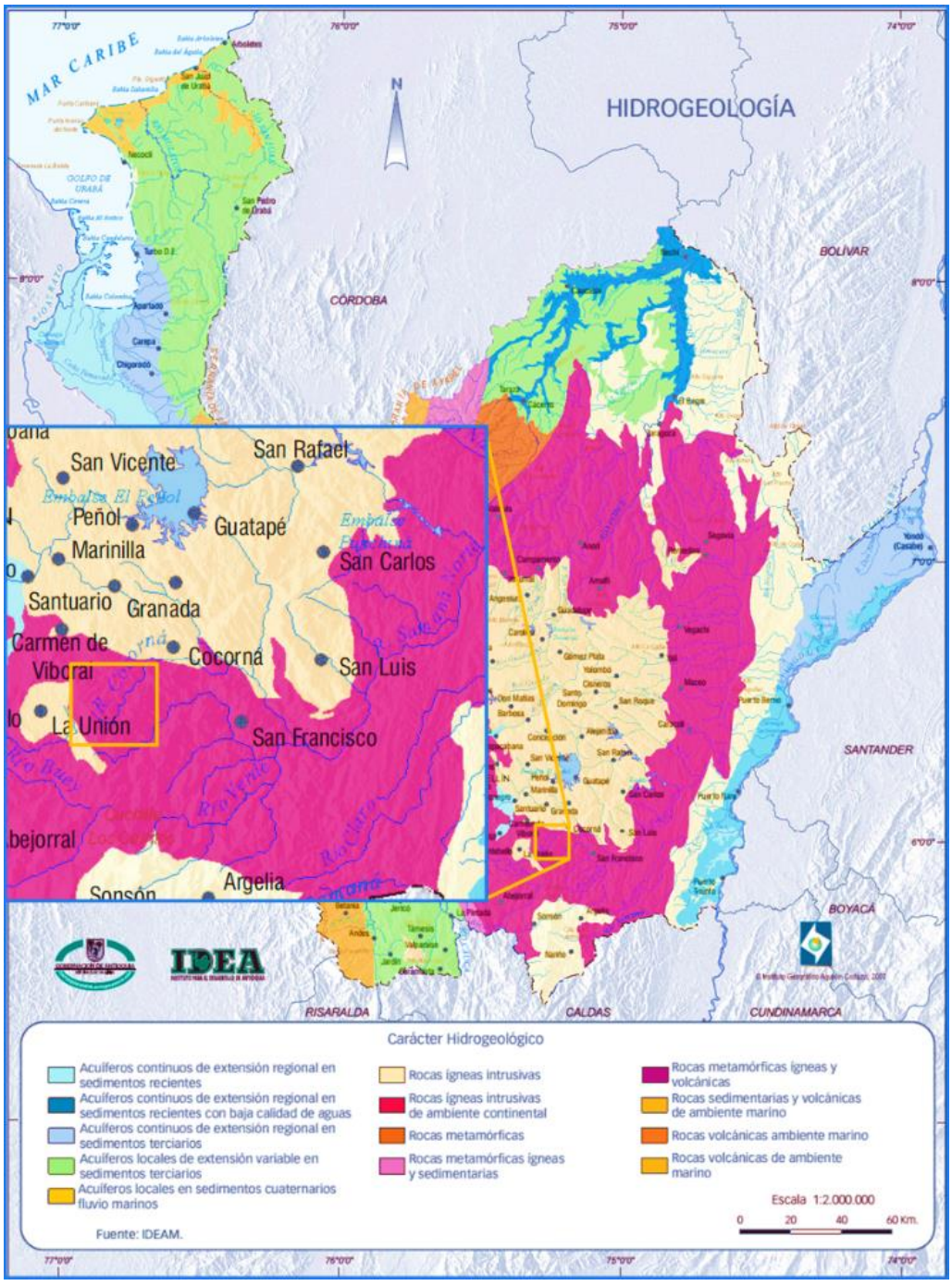


Figura 5-22. Mapa hidrogeológico del Departamento de Antioquia y localización del área de estudio.

Fuente: (IGAC, 2007).

5.1.3.2 Exploración de campo

En desarrollo de la exploración de campo fueron ejecutados 16 sondeos eléctricos verticales (SEV), 47 muestras de suelo por medio de 26 apiques (Ap), 3 perforaciones con análisis de 21 muestras, con el objeto de contar con información confiable sobre las condiciones generales del subsuelo, y validar la existencia del basamento rocoso, donde la conducción de la tubería implique cortes de taludes en roca. La localización de los sondeos se encuentra en la Figura 5-23, Figura 5-24, Figura 5-25 y Tabla 5-9. Los resultados de los análisis de laboratorio se encuentran en el Anexo 5.1.1. Geología, geotecnia, hidrogeología. Una síntesis de los resultados de los sondeos eléctricos verticales se encuentra a continuación.

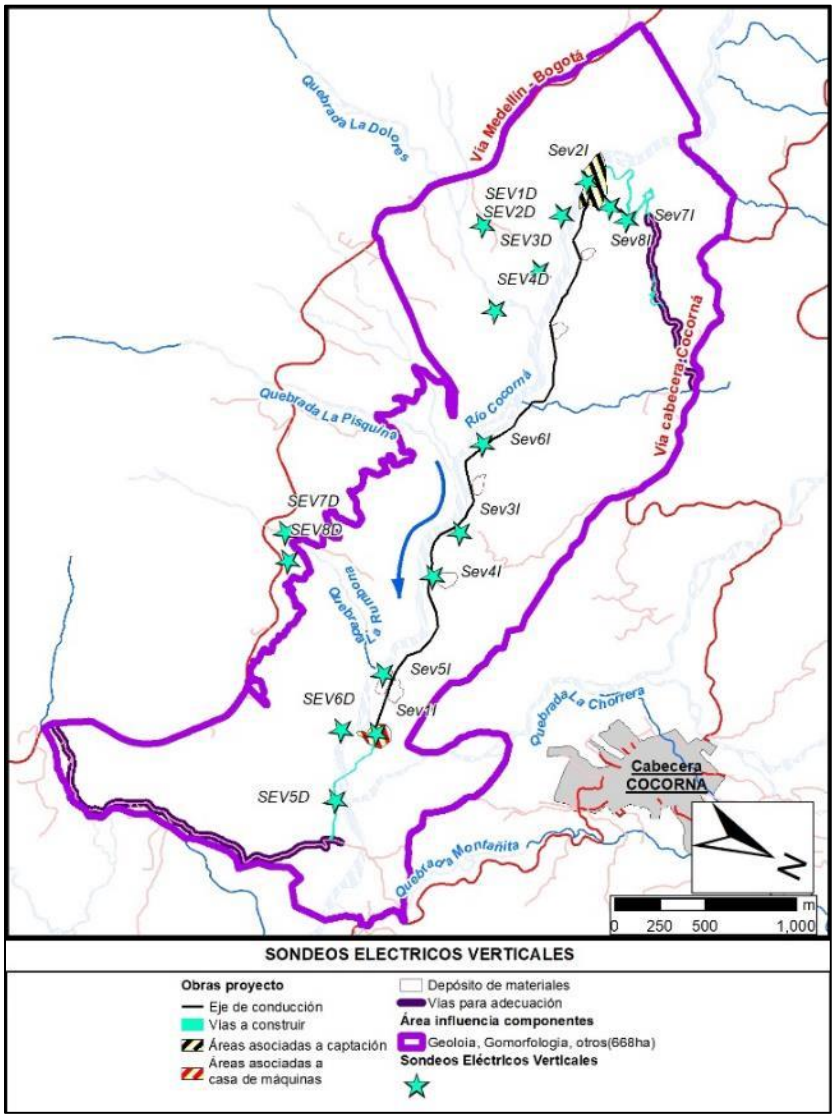


Figura 5-23. Ubicación de Sev realizados en el área de estudio.

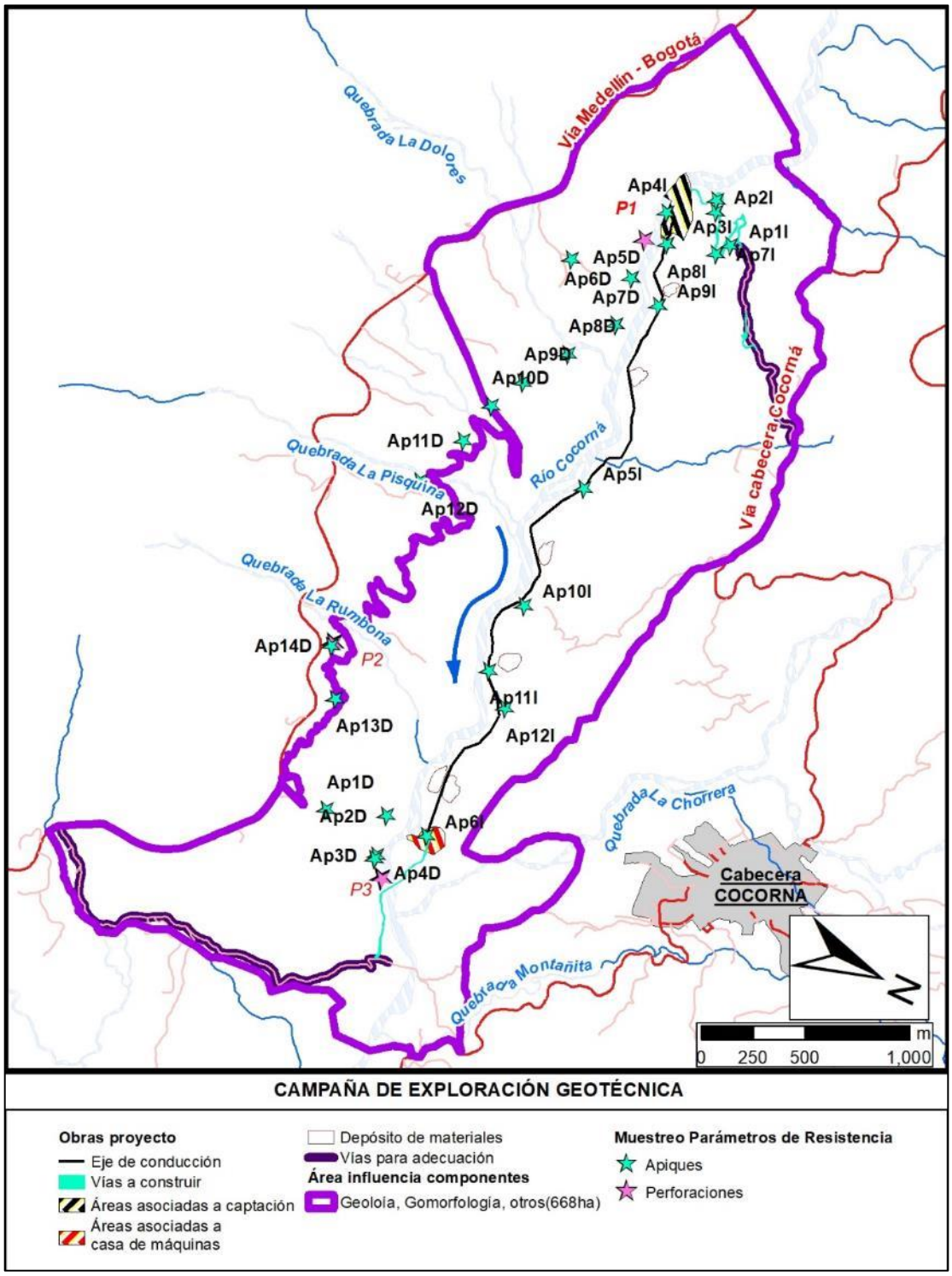


Figura 5-24. Ubicación de apiques realizados en el área de estudio.

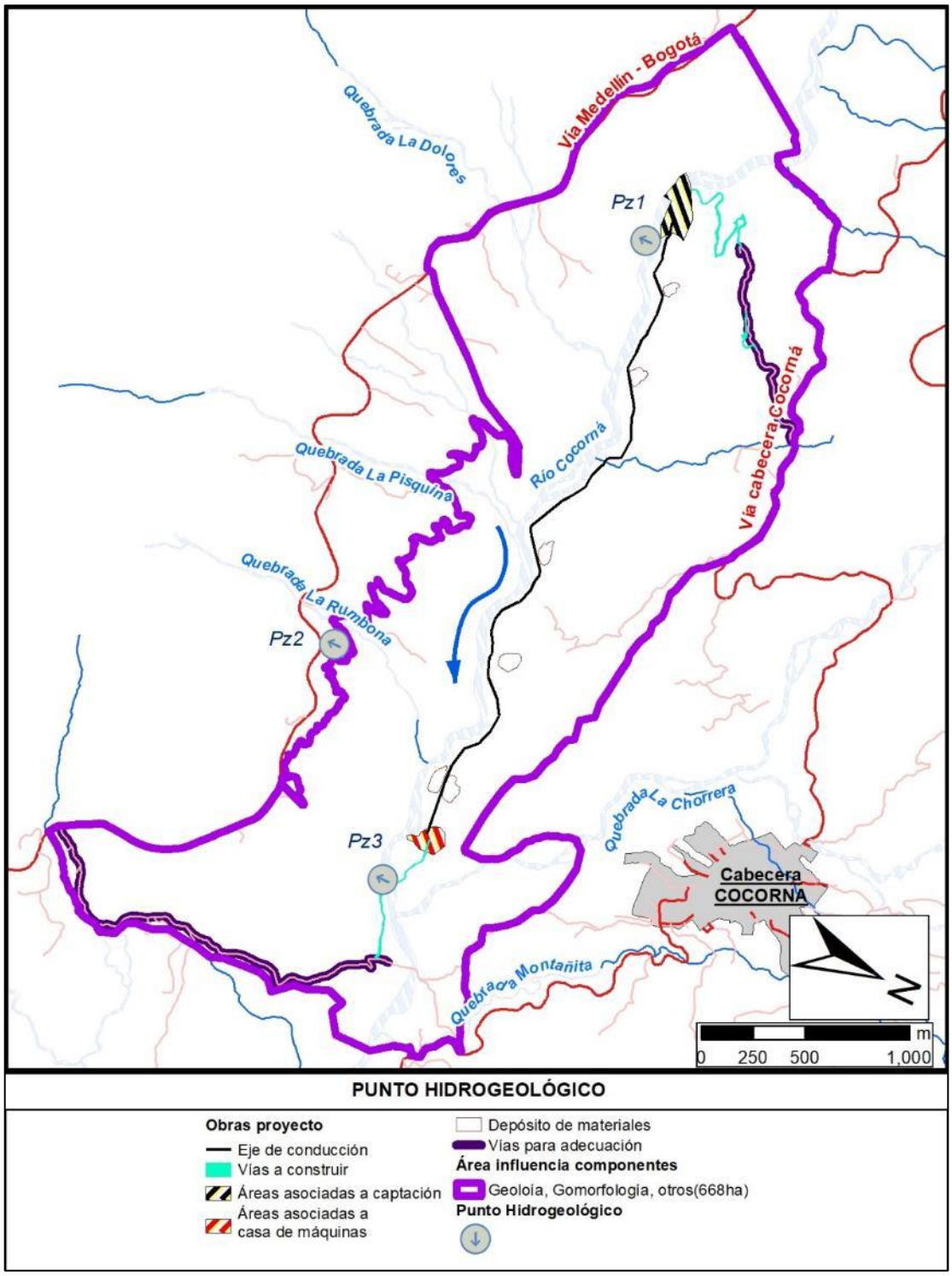


Figura 5-25. Ubicación de perforaciones realizados en el área de estudio.

Tabla 5-8 Puntos hidrogeológicos

Vereda	Nombre	ID	Geología	Ubicación	Profundidad (m)	Nivel piezométrico (m.s.n.m)	Condición	Propósito	Cota
Los Cedros	Piezómetro 1	Pz3	Depósito Aluvial	Trapiche Las Arenosas	2	1110	Inactivo	Exploratorio	1.112
San José	Piezómetro 2	Pz2	Suelo residual de Batolito Antioqueño	Potrero cerca de la Autopista Medellín-Bogotá	11,45	1351	Inactivo	Exploratorio	1.362
El Tesoro	Piezómetro 1	Pz1	Depósito Aluvial	Potrero cerca del río Cocorná, Hacienda el Tesoro	6,27	1325	Inactivo	Exploratorio	1.332

Tabla 5-9. Coordenadas de los puntos de muestreo realizado.

Tipo de ensayo	ID	X	Y
Apique	Ap1D	8.778.103.103	11.597.899.944
	Ap2D	8.777.130.925	11.600.646.037
	Ap3D	8.779.045.051	11.601.025.974
	Ap4D	8.779.235.437	11.600.996.848
	Ap5D	8.749.149.237	11.597.415.121
	Ap6D	8.748.772.298	11.600.393.495
	Ap7D	8.751.115.796	11.600.637.468
	Ap8D	8.753.341.682	11.599.168.402
	Ap9D	8.755.488.038	11.597.788.048
	Ap10D	8.757.155.941	1.159.689.199
	Ap11D	8.759.238.744	1.159.637.223
	Ap12D	8.761.886.343	11.595.330.378
	Ap13D	877.307.674	11.596.044.179
	Ap14D	877.084.086	11.594.819.861
	Ap1I	8.745.334.546	11.604.035.773

Tipo de ensayo	ID	X	Y
	Ap2I	8.744.169.812	11.602.701.605
	Ap3I	8.743.621.357	11.602.514.135
	Ap4I	8.745.201.372	1.160.059.479
	Ap5I	8.758.884.033	11.602.591.342
	Ap6I	8.777.204.375	11.602.791.801
	Ap7I	8.746.002.435	11.603.567.514
	Ap8I	8.746.564.827	11.601.241.961
	Ap9I	8.749.415.366	11.602.121.479
	Ap10I	876.519.571	11.602.375.177
	Ap11I	8.768.731.153	11.602.160.025
	Ap12I	8.770.032.078	11.603.637.996
Perforación	P2-2D	8.770.732.503	11.594.887.575
	P1-6D	8.746.831.992	11.600.207.284
	P2-4D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-6D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-8D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-10D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-12D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-15D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P1-10D	8.779.983.197	11.601.728.669
	P3-7D	8.779.998.674	11.601.717.512
	P3-8D	8.779.998.674	11.601.717.512
	P3-9D	8.779.998.674	11.601.717.512
	P1-1D	8.779.983.197	11.601.728.669
	P1-2D	8.779.983.197	11.601.728.669
	P1-3D	8.779.983.197	11.601.728.669

5.1.3.2.1 Ensayos de laboratorio

La siguiente tabla presenta el resumen de los ensayos de clasificación efectuados sobre las muestras recuperadas de los apiques y perforaciones. Las muestras

extraídas corresponden a material de depósitos de vertiente, regolito de Batolito Antioqueño (Kcda) y depósitos aluviales.

.

Tabla 5-10. Características y propiedades de los suelos de las formaciones superficiales en el área de estudio para el proyecto hidroeléctrico.

Tipo de ensayo	ID	w (%)	GS	LL	LP	IP	LC	R	CV	CV	C(kPa)	ϕ°	γh(kN/m3)	γd(kN/m3)	qu (kPa)	E (MPa)	N°200	S.C.U.S
Apique	AP1I	38	2.725	51	37,7	13,3	33	1,4	30	8	9,5	31	-	-	-	-	42	SC
	AP2I	42	2.709	53	35,7	17,3	30	1,5	35	10			16,57	11,47	18,23	0,32	47	SC
	AP3I	32	2.727	43	32,7	10,3	31	1,5	19	6	16	32,2	17,44	13,19	43,48	1,13	40	SC
	AP4I	25	-	33	31,4	1,6	24	1,5	17	5	-	-	-	-	-	-	16	SM
	AP5I	36	2.755	53	40,3	12,7	34	1,4	31	9	15,5	33,8	16,93	12,03	44,09	1,23	46	SC
	AP6I	52	2.683	63	43,7	19,3	37	1,3	39	10	11,2	31,4	15,23	9,87	18,87	0,65	18	SC
	AP7I	33	2.740	42	36	6	30	1,5	19	6	24,5	32,2	17,09	12,39	13,09	0,42	40	SM-SC
	AP8I	27	2.743	41	31,9	9,1	31	1,5	19	6	-	-	17,1	13,78	7,98	0,2	12	SC
	AP9I	35	2.732	47	38,2	8,8	33	1,5	24	7	-	-	17,89	13,16	38,4	0,85	38	SC
	AP10I	31	-	49	28,4	20,6	37	1,5	20	6	-	-	-	-	-	-	10	SC
	AP11I	47	2.746	61	46,8	14,2	48	1,2	18	5	9,9	36,6	17,56	11,89	39,85	1,17	25	SC
	AP12I	46	2.723	67	43,2	23,8	33	1,4	54	13	10,9	30	17,76	11,9	58,67	0,6	34	SC
	AP1D	32	-	44	41,2	2,8	-	-	-	-	36,2	27,2	14,99	11,38	-	-	24	SM
	AP2D	62	-	89	54,9	34,2	-	-	-	-	8,3	30,4	16,49	11,56	-	-	37	SM
	AP3D	37	-	51	36,4	14,3	-	-	-	-	9,6	32,2	17,24	13,44	-	-	22	SM
	AP4D	11	-	24	21,5	2,4	-	-	-	-	4,6	42,7	16,98	15,29	-	-	7	SW-SM
	AP5D	34	-	47	38,2	8,8	-	-	-	-	15,1	34	16,9	12,66	-	-	38	SM
	AP6D	42	-	55	37,8	17,1	-	-	-	-	5,3	37,3	17,78	12,61	-	-	33	SM
	AP7D	24	-	39	35	3,5	-	-	-	-	5,2	28	16,34	13,24	-	-	23	SM

Tipo de ensayo	ID	w (%)	GS	LL	LP	IP	LC	R	CV	CV	C(kPa)	ϕ°	γh(kN/m3)	γd(kN/m3)	qu (kPa)	E (MPa)	N°200	S.C.U.S
	AP8D	30	-	46	39,9	5,9	-	-	-	-	6,2	35,9	16,89	13,05	-	-	35	SM
	AP9D	23	-	38	30,8	6,8	-	-	-	-	15,1	34,3	15,99	13,03	-	-	24	SM
	AP10D	36	-	54	47,2	7,3	-	-	-	-	29	24,1	16,06	11,73	-	-	34	SM
	AP11D	32	-	50	41,2	8,6	-	-	-	-	17,4	33,4	13,82	10,43	-	-	25	SM
	AP12D	28	-	41	36,5	4,7	-	-	-	-	15,6	33,1	16,01	12,49	-	-	28	SM
	AP13D	33	-	55	42,7	12,4	-	-	-	-	13,9	30,4	13,14	9,91	-	-	21	SM
	AP14D	35	-	53	43,7	9,2	-	-	-	-	13,1	32,6	14,72	10,9	-	-	33	SM
Perforación	P1.1	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P1.2	35,5	-	40	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,1	SM
	P1.3	41,9	-	36	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,9	SM
	P1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,12	-	13.430	-	-	-
	P1.10	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	26,27	-	12.940	-	-	-
	P2	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	35,4	-	50	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,2	SM
	P2	30,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	33,6	-	45	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43	SM
	P2	30,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	31	-	43	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,8	SM
	P2	28,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29,8	-	44	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,5	SM
	P2	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tipo de ensayo	ID	w (%)	GS	LL	LP	IP	LC	R	CV	CV	C(kPa)	ϕ°	γh(kN/m3)	γd(kN/m3)	qu (kPa)	E (MPa)	N°200	S.C.U.S
	P2	29	-	41	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48,2	SM
	P2	33,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	33	-	44	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43,1	SM
	P2	27,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29,5	-	43	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,2	SM
	P3.7	6	-	25	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,7	SM
	P3.8	5	-	26	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,5	SM
	P3.9	6	-	NL	-	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,1	SM

5.1.3.2.2 Ensayos geofísicos

La localización de las líneas geofísicas realizadas en la zona del proyecto se observa en la Figura 5-23 y las coordenadas se muestran en la Tabla 5-9.

Los ensayos de geofísica han demarcado límites existentes en los depósitos de vertiente. El estrato superior presenta resistividades de 300 ohm*m que corresponden a gravas clasto soportadas de depósitos aluvio-torrenciales, el estrato inferior presenta resistividades menores de 80 ohm*m y corresponde a gravas clasto soportadas saturadas. Los espesores alcanzados fueron hasta los 30 metros en las líneas realizadas, el primer estrato presenta niveles hasta los 2m, las gravas en este nivel son clasto soportados y no saturadas, seguido a este nivel el estrato inferior son gravas clasto soportadas saturadas.

Lo ensayos realizados en regolito de cuarzodiorita han demarcado límite existente entre regolito y roca. El estrato de regolito presenta resistividades bajas entre 40 - 80 ohm*m y corresponden a suelos limo arcillosos. Los espesores alcanzados fueron hasta 30 metros en las líneas realizadas, el primer estrato presenta niveles hasta los 20m, en este nivel se encuentran suelos saturados con resistividades bajas. El límite entre regolito y roca se encuentra entre los 10 y 50 metros para la cuarzodiorita.

5.1.3.2.2.1 Sondeos eléctricos verticales

El método de investigación geoeléctrico consiste en reconstruir la distribución de la resistividad real del subsuelo a través de introducción de corriente eléctrica y medición de la diferencia de potencial en una serie de electrodos situados sobre la sección a indagar.

Las características de resistividad eléctrica están estrechamente correlacionadas a las características químico-físicas del medio atravesado y, por tal motivo, la sección geoeléctrica provee una visión del subsuelo muy preciso ya sea por lo que concierne la tipología de terrenos como a la profundidad. El suelo tiene una naturaleza heterogénea, este varía por su composición y según las condiciones del medio.

Aunque se pueden clasificar de diversas formas los suelos, por ejemplo, en arcilloso, arenoso y rocoso, no se puede atribuir una resistividad específica a un tipo de suelo, y si se realizan mediciones se pueden encontrar diversos valores de resistividad.

Se puede definir la resistividad del suelo ρ como la resistencia eléctrica entre las caras opuestas de un cubo de dimensiones unitarias (aristas = 1 m) llenado con este suelo. Sus unidades serán Ωm. Varios factores influencian la resistividad del suelo. Entre ellos podemos destacar:

• Tipo de suelo.

• Mezcla de diversos tipos de suelos.

• Suelos con capas estratificadas a profundidades y materiales diferentes.

• Contenido de humedad.

• Temperatura.

• Compactación y presión.

• Composición y concentración de sales disueltas.

La combinación de los anteriores factores da como resultado suelos con características diferentes y consecuentemente, con valores de resistividad distinta.

La resistividad del suelo representa la resistencia específica del suelo a cierta profundidad y se obtiene indirectamente al procesar un grupo de medidas de campo, su magnitud se expresa en (Ωm) y es inversa a la conductividad.

Un sondeo eléctrico vertical no mide directamente la resistividad del suelo, sino que mide la resistividad aparente, que es la resistividad obtenida con una medida directa en el suelo natural, bajo el esquema geométrico especificado por l método de cuatro (4) electrodos, aplicado con circuitos independientes de corriente y potencial, este es representativo para un punto de la característica del suelo estratificado.

- Métodos para la medición de la resistividad del suelo

Las estimaciones basadas en la clasificación del suelo conducen sólo a valores gruesamente aproximados de la resistividad. Por tanto, es necesario tomar mediciones directamente en el sitio donde quedará ubicada la puesta a tierra.

Las técnicas para medir la resistividad del suelo son esencialmente las mismas cualquiera sea el propósito de la medida. Sin embargo, la interpretación de los datos recolectados puede variar considerablemente y especialmente donde se encuentren suelos con resistividades no uniformes.

Típicamente, los suelos poseen varias capas horizontales superpuestas, cada una teniendo diferente resistividad. A menudo se presentan también cambios laterales de resistividad, pero más graduales a menos que se configuren fallas geológicas. Por tanto, las mediciones de resistividad deben ser realizadas para determinar si hay alguna variación importante de la resistividad con la profundidad.

- Método de Schlumberger

El método de los cuatro puntos de Schlumberger obtiene la resistividad del suelo para capas profundas. El método consiste en enterrar pequeños electrodos tipo varilla, en cuatro huecos en el suelo y espaciados (en línea recta) una distancia fija de MN, en este caso 0,5 m para los electrodos de potencial M y N, y una distancia AB en los electrodos de corriente A y B, como se ilustra en la Figura 5-26. Las mediciones se realizan variando la distancia AB en función de múltiplos de MN (nMN), en este caso

0,5 m, (n 0,5m), para este ensayo se usa una nomenclatura en distancia AB/2, como se observa en la Tabla 5-11.

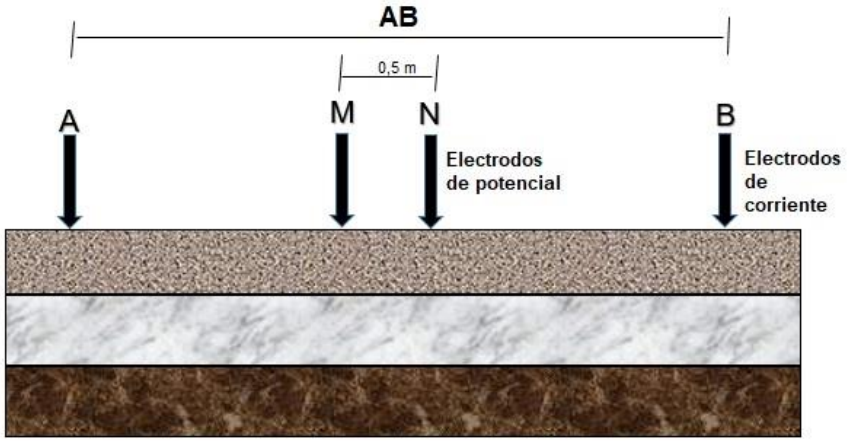


Figura 5-26 Arreglo del muestreo tipo Schlumberger

Tabla 5-11 Relación de distancia entre electrodos de potencial y electrodos de corriente en método de Schlumberger.

AB/2 (m)	MN (m)
1	0,5
2	
5	
10	
20	
30	
50	

Estas medidas se realizan a través de un equipo llamado Ministing Figura 5-27.

Figura 5-27 Ministing, equipo de medición de la resistividad

Fuente: (Advanced Geosciences Inc., 2020)

5.1.3.2.3 Mediciones en campo

Se realizaron en total 16 sondeos eléctricos verticales, ubicados en ambas márgenes del río Cocorná, las veredas, San Vicente, San José, Mazotes, Los Cedros, Las Mercedes, La Placeta y El Tesoro. Estos fueron ubicados en las coordenadas que muestra la Tabla 5-12.

Tabla 5-12 Coordenadas sondeos eléctricos verticales

Ensayo	ID	ID#	X	Y
Sondeo eléctrico vertical	Sev	Sev1I	877726.4	1160297.5
		Sev2I	874487.3	1160066.7
		Sev3I	876532.1	1160247.2
		Sev4I	876811.7	1160214.3
		Sev5I	877414.2	1160191.9
		Sev6I	876038.3	1160154.7
		Sev7I	874590.5	1160349.5
		Sev8I	874561.4	1160233.9
		Sev1D	874948.1	1159648.3

Ensayo	ID	ID#	X	Y
		Sev2D	874716.9	1160015.5
		Sev3D	875049.6	1160031
		Sev4D	875343.9	1159904.9
		Sev5D	878152.3	1160249.1
		Sev6D	877789.6	1160113.9
		Sev7D	876935.3	1159378.3
		Sev8D	877072.2	1159457.5
Total sondeos				**16**

5.1.3.2.3.1 Campaña de sondeos eléctricos realizada

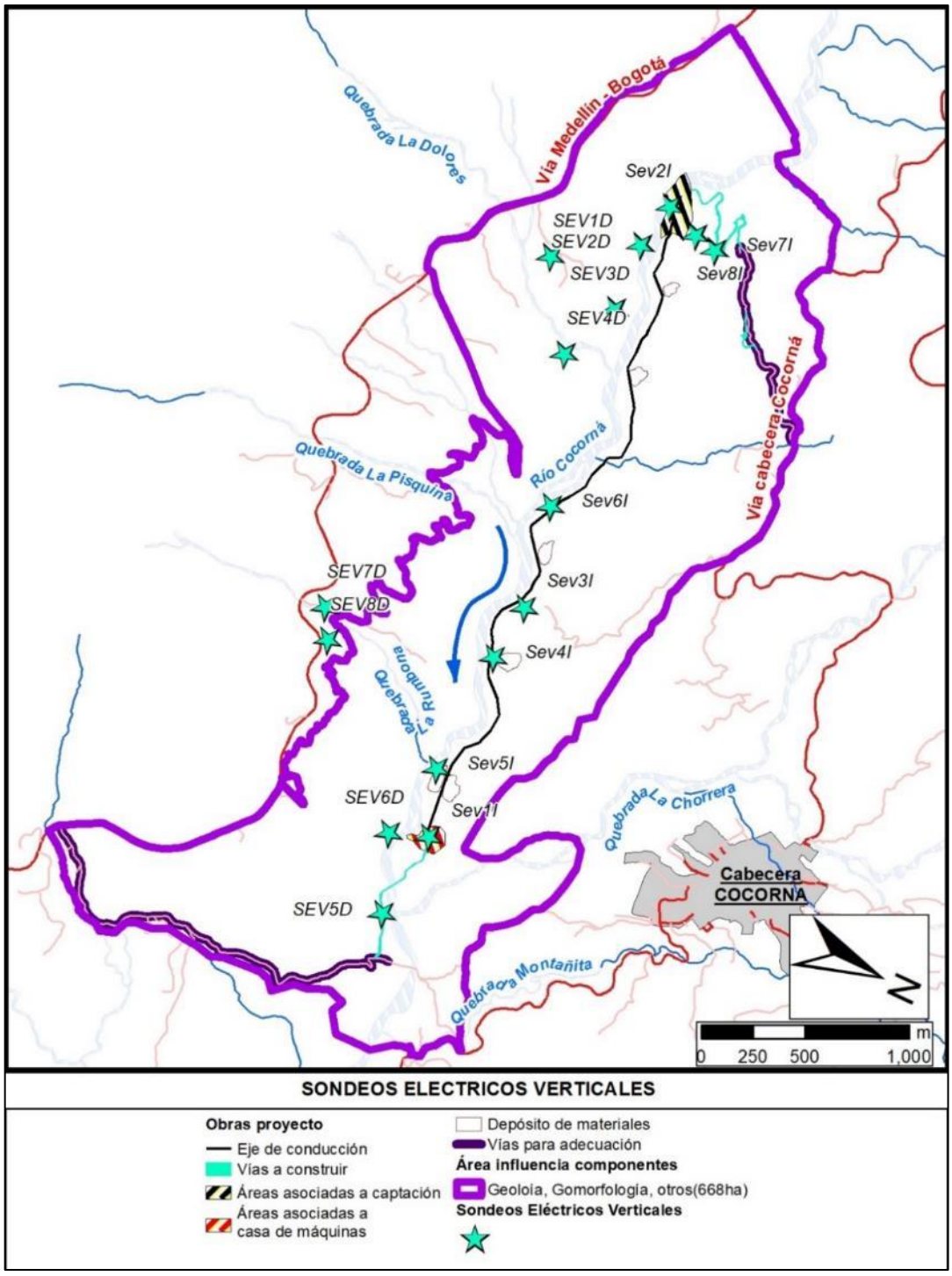


Figura 5-28 Campaña de sondeos eléctricos verticales

5.1.3.2.3.1.1 Sev1. Sondeo eléctrico vertical 1I

Sobre posible depósito aluviotorrencial, a unos 60 m del río Cocorná, ubicado en un posible abanico superpuesto entre la quebrada La Chorrera y el río Cocorná. El punto se encuentra a unos 1.119 m.s.n.m. a 6 m de la conducción y 300 m de casa de máquinas.

Se realiza en la vereda Mazotes, y se caracteriza por presentar prominentes bloques aflorando en superficie, estos bloques se asocian a la litología predominante de la región (rocas ígneas intrusivas), asociadas posiblemente al Batolito Antioqueño, este depósito se caracteriza por el desarrollo de profundos horizontes de suelo, se encontraron varios horizontes de paleosuelos, en este lugar se realiza un apique complementario de 2 m de profundidad (Ap6). En la clasificación S.C.U.S. es un SC, un suelo areno arcilloso, de alta plasticidad.

Son suelos *Fulvaquentic Dystrudepts* o bien *Aquic Humic Dystrudepts,* de baja fertilidad, ácidos con alto contenido de aluminio, su uso se divide entre ganadería y faja forestal protectora, su conductividad eléctrica varía en estos intervalos en los primeros 70 cm:

- 20cm - 0.03 dS/m
- 40cm - 0.03 dS/m
- 70cm - 0.02 dS/m

Se determinó como libre de sales con drenaje interno moderado y externo moderado a lento.

Adicionalmente se encontraron materiales de posible relación arqueológica, fragmentos cerámicos específicamente.

Durante el muestreo no se presentaron lluvias en la zona.

Foto 5-45 Sev1I

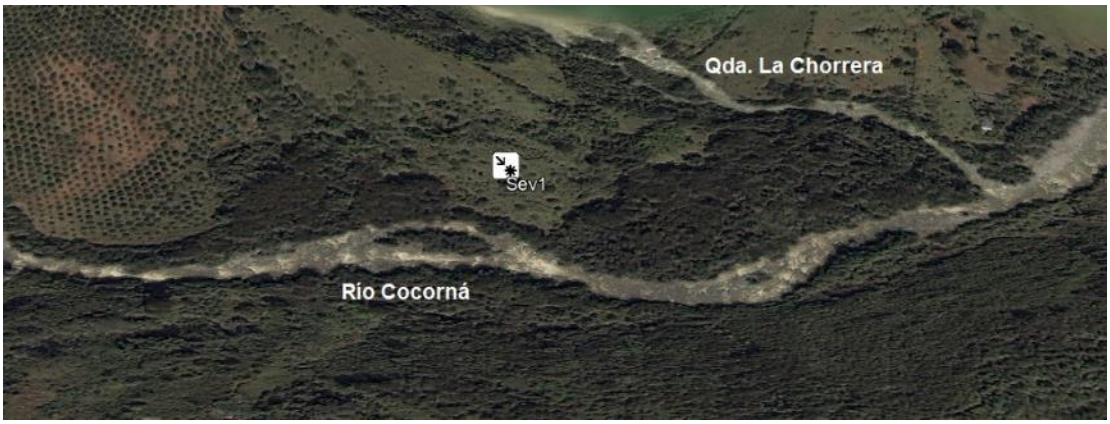


Figura 5-29 Vista de referencia Sev1I

Fuente: (Google Earth, 2005)

Tabla 5-13 Resistividad aparente Sev1I

Sev	1I	CIII_P	
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	Observación
1	2.047	1,9	KΩm
2	2.814	9,1	KΩm
5	2.280	4,3	KΩm
10	1.996	2,1	KΩm
20	1.995	130	KΩm
30	1.804	190	KΩm
50	32	----	

De 0 a 50 m depósito aluvio-torrencial, una sola litología (1 capa). Nivel freático se encuentra entre 6 m y 10 m.

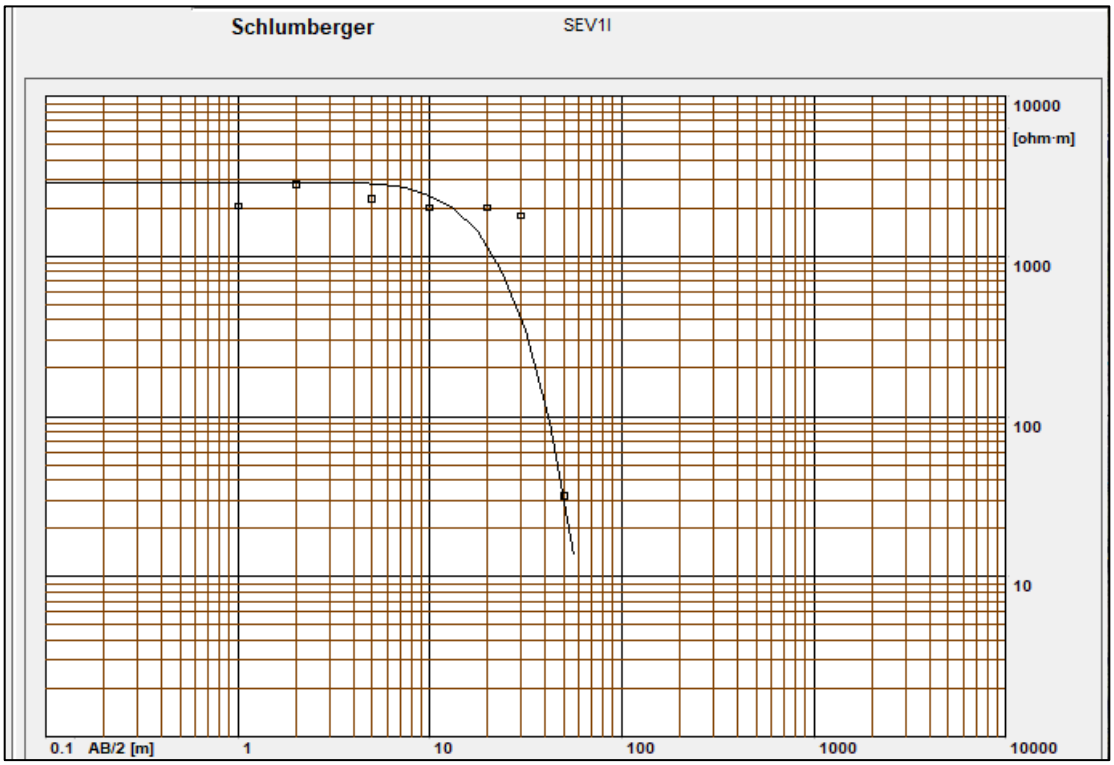


Figura 5-30 modelo Sev1I

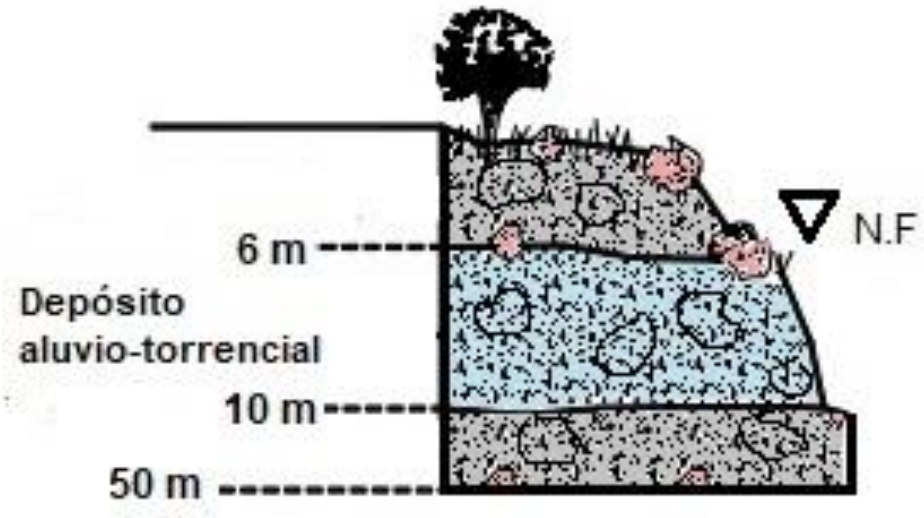


Figura 5-31 Interpretación Sev1I

5.1.3.2.3.1.2 Sev2. Sondeo eléctrico vertical 2l

Localizado en la vereda La Placeta, sobre posible depósito aluviotorrencial, en margen izquierda del río Cocorná, a unos 12 m del cauce aluvial, el punto se ubica a 1.340 m.s.n.m. Punto ubicado sobre desarenadores. Se caracteriza por presentar prominentes bloques aflorando en superficie, estos bloques se asocian a la litología predominante de la región (rocas ígneas intrusivas), asociadas posiblemente al Batolito Antioqueño, la morfología es plana ligeramente ondulada.

Se realiza en cercanías apique (Ap4) sobre escarpe de terraza erodado por socavación lateral de orillas, el suelo en la clasificación S.C.U.S. es un SM, un suelo areno limoso, de baja plasticidad, parcialmente cohesivo.

Foto 5-46 Sev2l

Figura 5-32 Vista de Sev2I

Fuente: (Google Earth, 2005)

Tabla 5-14 Resistividad aparente Sev2I

Sev	2I	CIII_P	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	3.364	0,3	KΩm
2	4.621	0,6	KΩm
5	3.351	0,1	KΩm
10	1.125	16	KΩm
20	821,6	1,8	
30	498	0,9	
50	4.649	13	KΩm

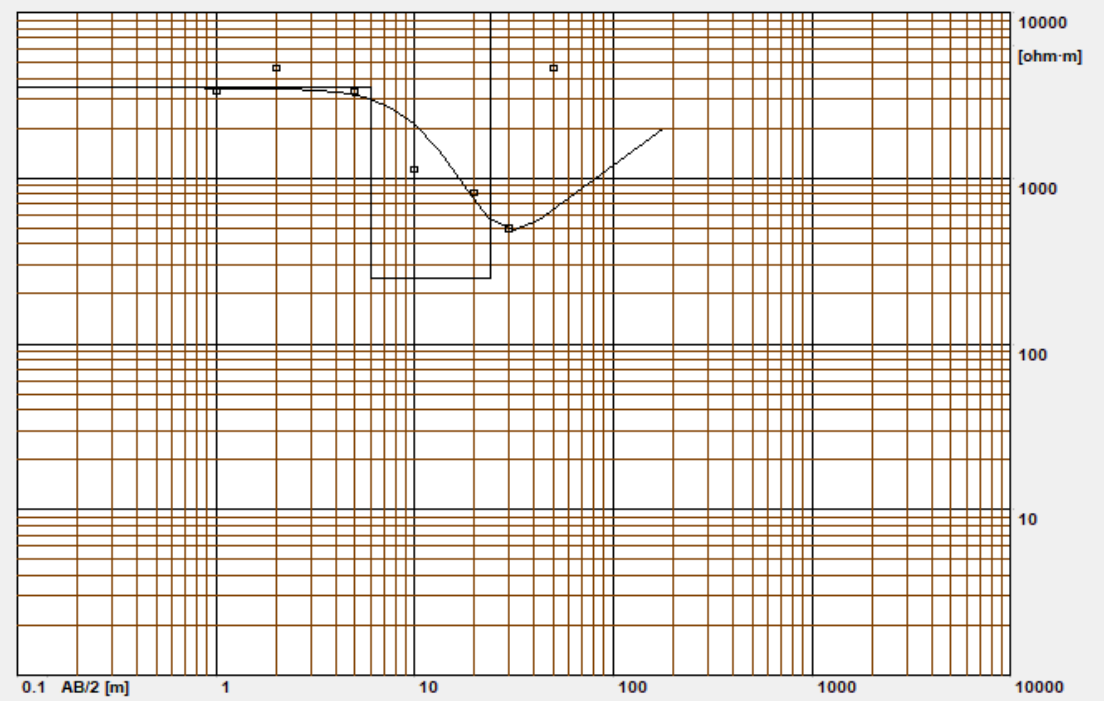


Figura 5-33 Modelo Sev2I

Depósito aluvio-torrencial de 0-24 m, basamento rocoso a partir de 24 m (roca granodiorítica asociada al Batolito Antioqueño), saturado a partir de los 6 –m.

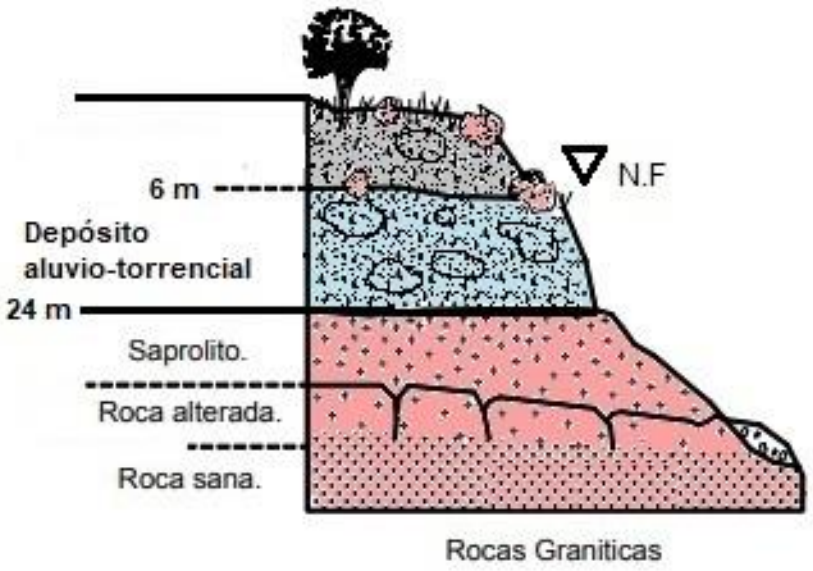


Figura 5-34 Interpretación Sev2I

5.1.3.2.3.1.3 Sev3. Sondeo eléctrico vertical 3l

Ubicado en la vereda Mazotes, aproximadamente a media ladera en la margen izquierda del río Cocorná, sobre posible depósito de vertiente, ladea de pendientes moderada a empinada, de morfología lobulada irregular, con numerosos bloques heterométricos subangulosos de esquisto y granitoídes en relación bloques matriz 70/30, la matriz se caracteriza por ser en la clasificación S.C.U.S. SC, arena arcillosa, en cercanías a apique (Ap10), plasticidad media.

La cobertura principal son pastos limpios para ganadería

El ensayo se realiza a unos 1.215 m.s.n.m. A unos 70 m de río Cocorná y a 40 m de la conducción.

Foto 5-47 Sev3l

Figura 5-35 Vista del Sev3I

Fuente: (Google Earth, 2005)

Tabla 5-15 Resistividad aparente Sev3I

Sev	3I	CIII_P	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	1.008	9,9	KΩm
2	1.087	23	KΩm
5	1.297	0.2	KΩm
10	249.7	88	
20	204.8	40	
30	1.603	47	KΩm
50	3.524	54	KΩm

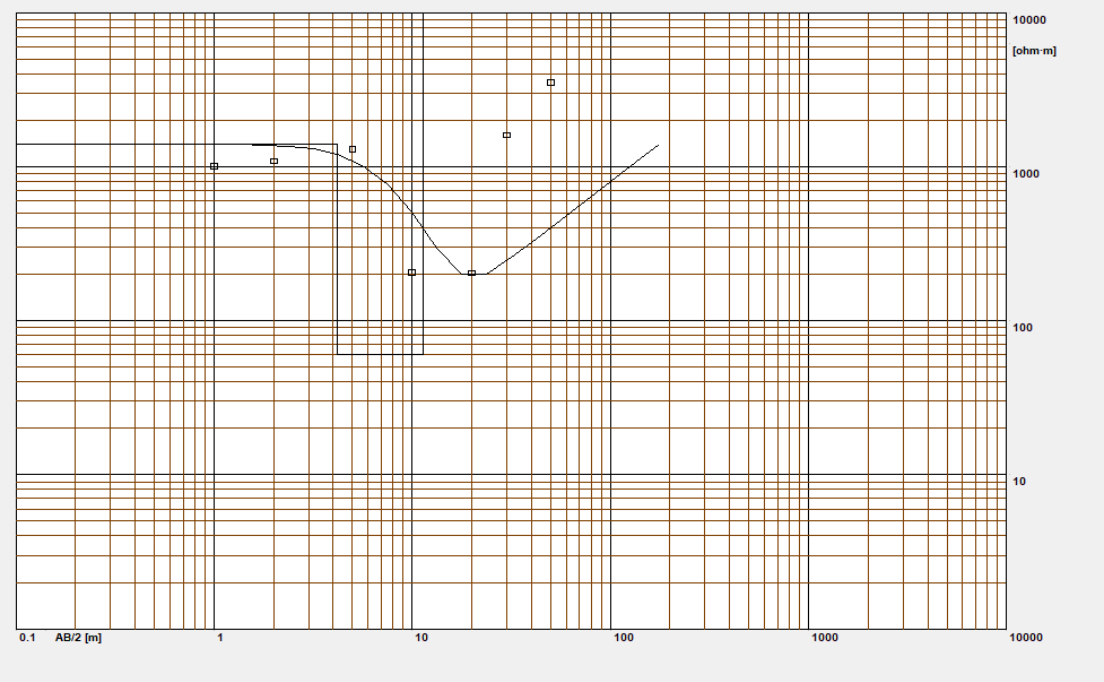


Figura 5-36 Modelo Sev3I

Se encuentra depósito de vertiente hasta los 25 m, el nivel freático se encuentra a partir de los 4 m, hasta los 25 m. El basamento rocoso de granitoídes del Batolito Antioqueño.se encuentra a los 25 m aproximadamente. Es un modelo bicapa (2 capas).

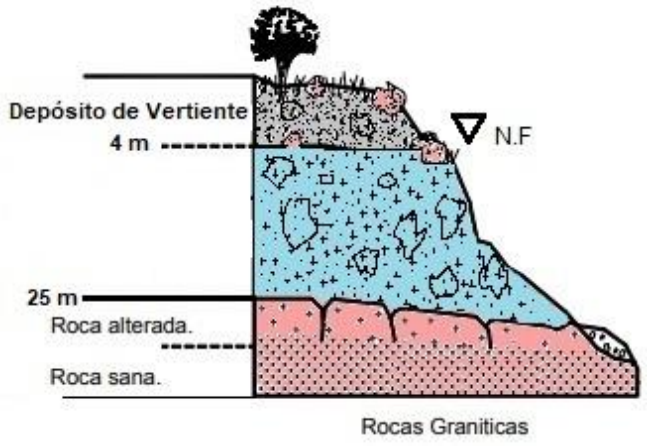


Figura 5-37 Interpretación Sev3I

5.1.3.2.3.1.4 Sev4. Sondeo eléctrico vertical 4l

Ubicado en la vereda Mazotes, en ladera de margen izquierda, a unos 50 m del río Cocorná, a unos 1.184 m.s.n.m. Punto a 20 m de la conducción. Posible suelo depositado de origen aluvial, sobre terraza plana, con algunos bloques redondeados aflorando en superficie, de origen ígneo, posiblemente relacionados al Batolito Antioqueño, se observa presencia de organales en el área cercana. Punto cercano al Ap11, los resultados de los análisis corresponden a un suelo con clasificación S.C.U.S. SC, arena arcillosa, de baja plasticidad, desarrollo de suelo orgánico profundo.

La cobertura predominante corresponde a pastos limpios con uso para ganadería.

Foto 5-48 Sev4l

Tabla 5-16 Resistividad aparente Sev4l

Sev	4l	CIII_P	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	1.723	1,7	KΩm
2	2.338	2,5	KΩm
5	1.439	4.9	KΩm
10	622,5	0,2	
20	297,4	31	
30	432	47	
50	12,38	4,6	KΩm

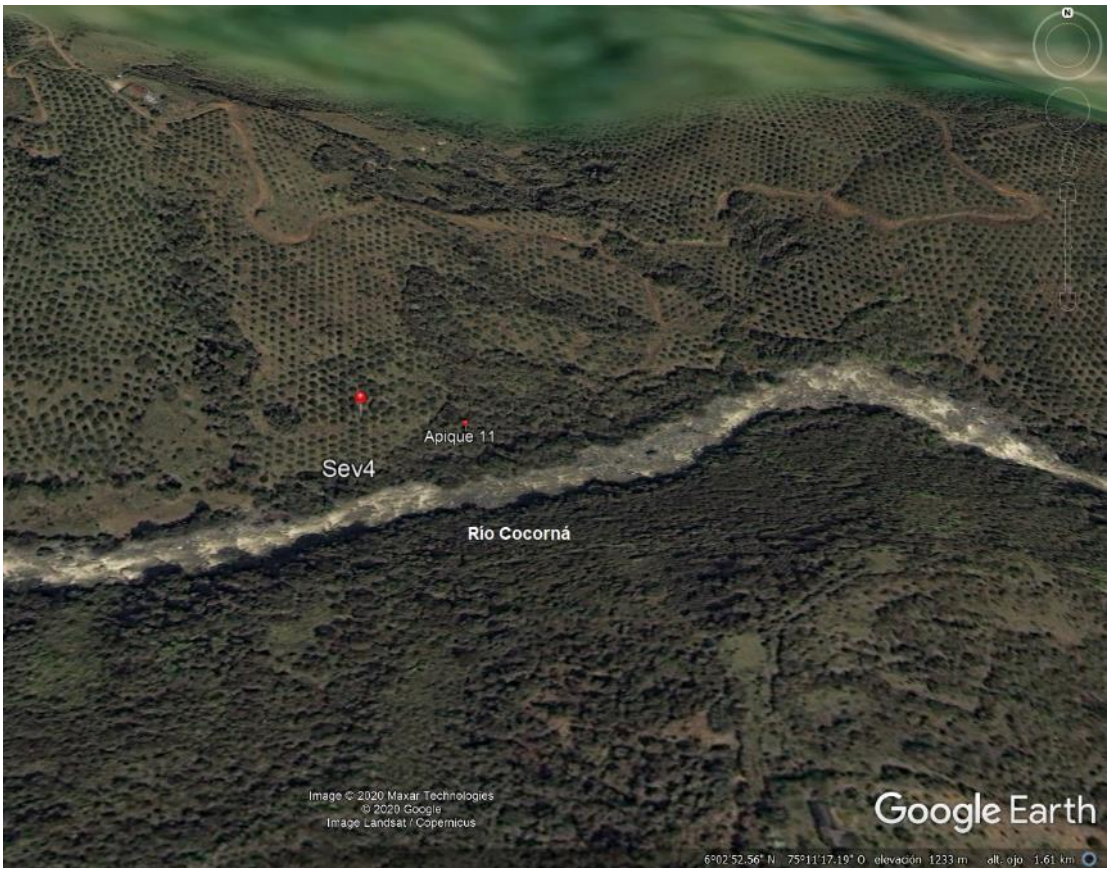


Figura 5-38 Vista del Sev4I

Fuente: (Google Earth, 2005)

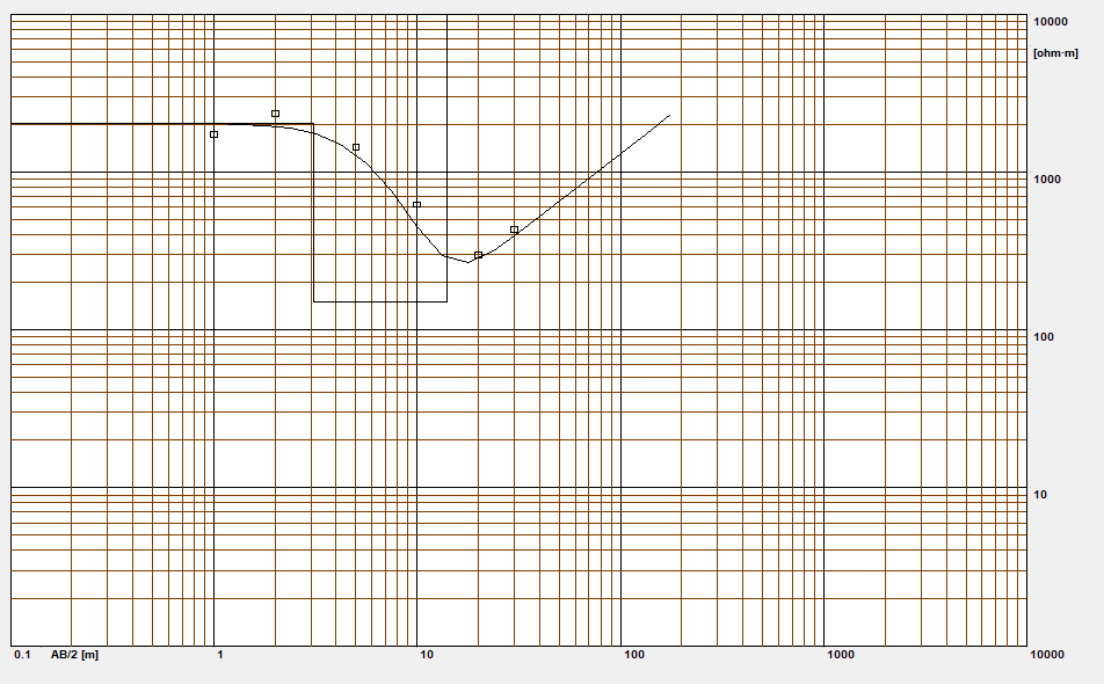


Figura 5-39 Modelo Sev4l

Depósito aluvio-torrencial entre 0 – 14 m, saturado desde los 3 m hasta el basamento rocoso ubicado a partir de los 14 m.

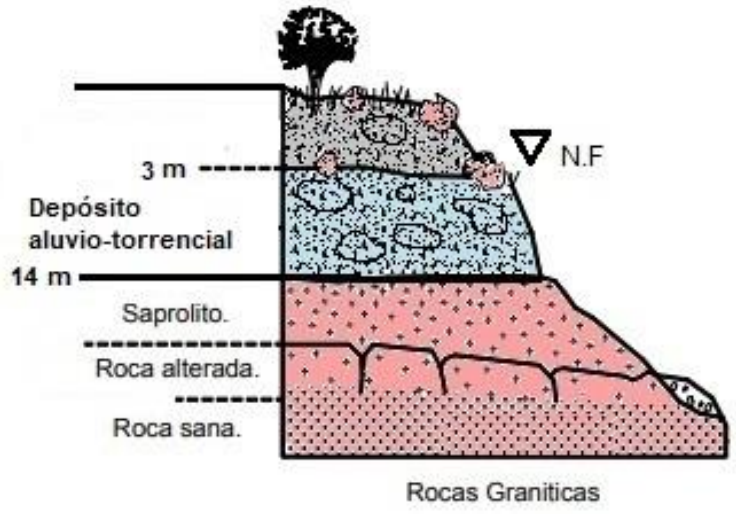


Figura 5-40 Interpretación Sev4l

5.1.3.2.3.1.5 Sev5. Sondeo eléctrico vertical 5l

Ubicado en la vereda Mazotes, sobre posible terraza aluvio torrencial del río Cocorná (margen izquierda), a 40 m del río, a una altura de 1.141 m.s.n.m. A unos 46 m de la conducción, se encuentran al menos dos niveles de terrazas, el más elevado tiene menos bloques aflorando en superficie, la diferencia altitudinal ronda los 5 m.

Cobertura predominante de pastos limpios, con uso para ganadería.

Foto 5-49 Sev5l

Figura 5-41 Vista Sev5I

Fuente: (Google Earth, 2005)

Tabla 5-17 Resistividad aparente Sev5I

Sev	5I	CIII_P	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	1.833	0,6	KΩm
2	3.181	0,2	KΩm
5	4.608	2,7	KΩm
10	1.188	23	KΩm
20	3.235	0	KΩm
30	1.851	50	KΩm
50	8.582	5,7	KΩm

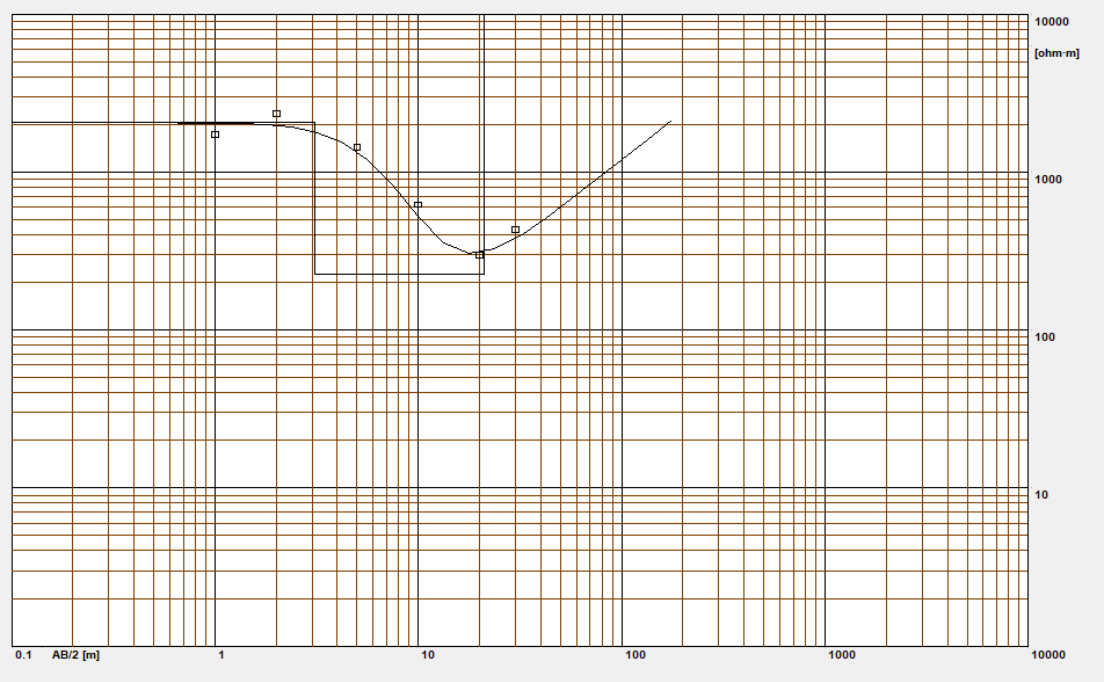


Figura 5-42 Modelo Sev5I

Se encuentra depósito aluvio-torrencial de 0 – 21 m, saturado entre 3 – 21 m, luego basamento rocoso de granitoides asociados a Batolito Antioqueño.

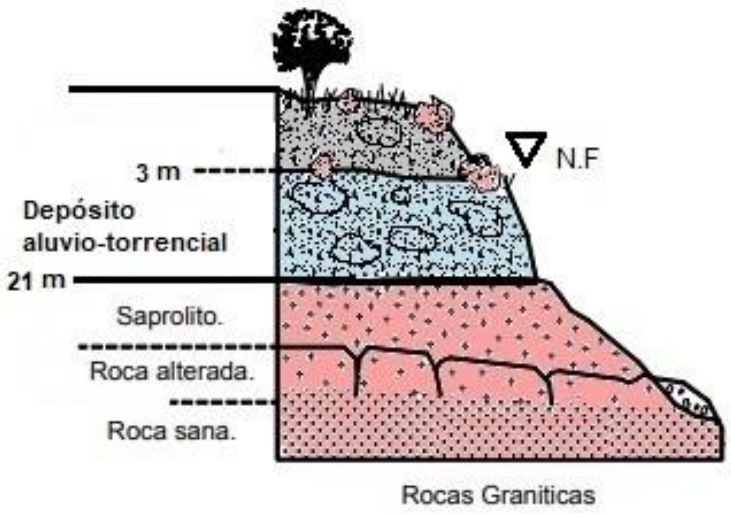


Figura 5-43 Interpretación Sev5I

5.1.3.2.3.1.6 Sev6. Sondeo eléctrico vertical 6l

Localizado en la vereda Mazotes, posible depósito aluvio-torrencial elevado, planicie ligeramente ondulada con mucha humedad. Punto sobre la conducción a 35 m del río Cocorná sobre su margen izquierda. A una altura de 1.234 m.s.n.m. Cobertura predominante de pastos limpios con uso ganadero.

Foto 5-50 Sev6l

Figura 5-44 Vista Sev6I

Tabla 5-18 Resistividad aparente Sev6I

Sev	6I	CIII_P	
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	Observación
1	940	4,1	
2	639	8,9	
5	594	4,7	
10	461	9,4	
20	715	72	
30	1.851	50	KΩm
50	1.386	44	KΩm

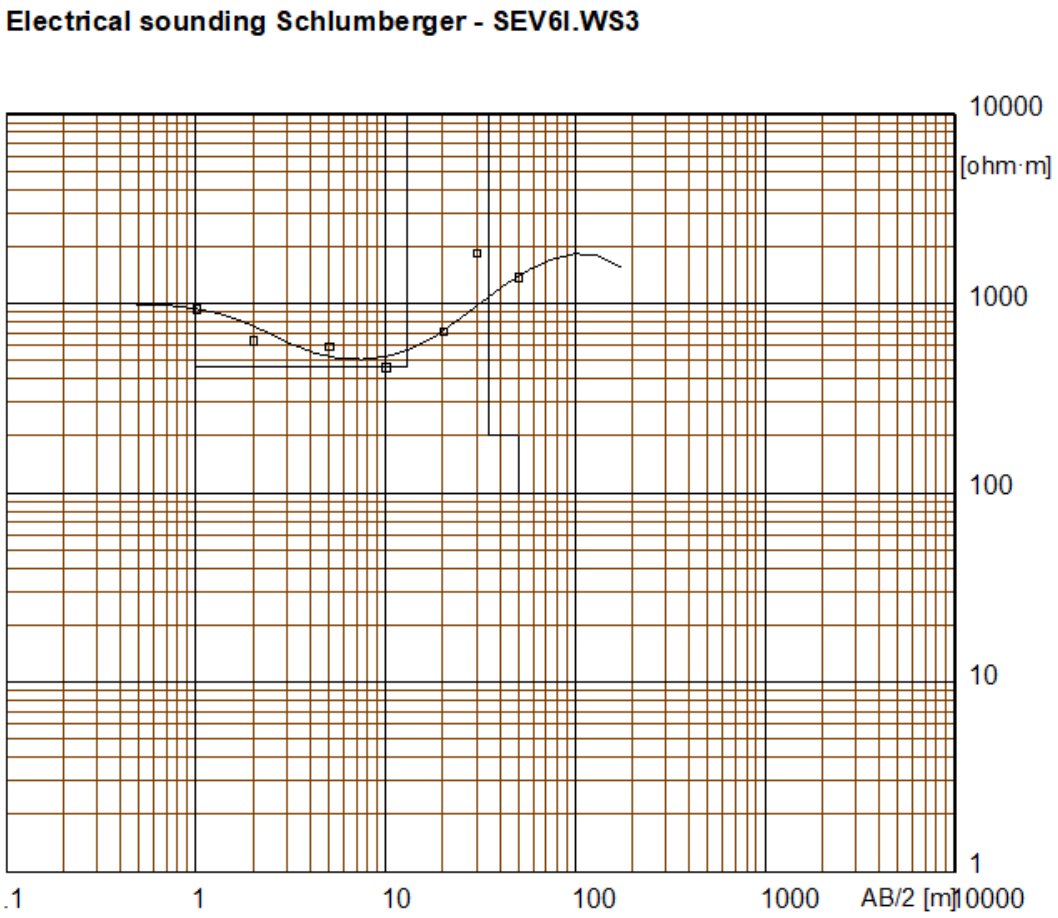


Figura 5-45 Modelo Sev6I

Depósito de terraza aluvio – torrencial, de 0 – 13m, saturado a partir de 1 m; basamento rocoso fracturado de granitoide de Batolito Antioqueño a partir de los 13 m, posiblemente acuífero salado a los 35 m.

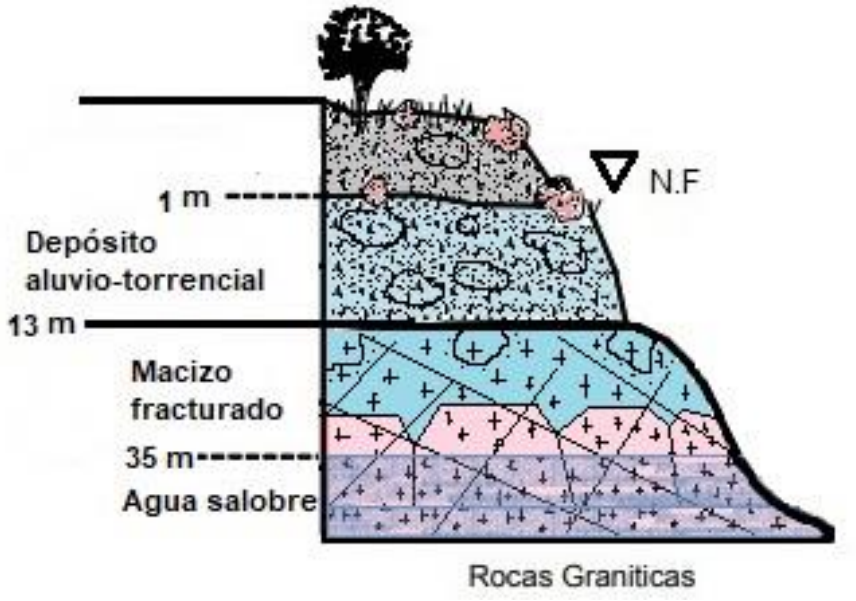


Figura 5-46 Modelo Sev6I

5.1.3.2.3.1.7 Sev7. Sondeo eléctrico vertical 7I

Ubicado en la vereda La Placeta, a media ladera sobre la margen izquierda del río Cocorná, sobre vía de acceso a captación. Posible depósito de vertiente, por alta pendiente, morfología lobular. A una altura de 1.406 m.s.n.m. a 300 m del río Cocorná.

Cera al apique 7 (Ap7), con clasificación S.C.U.S. SM-SC, arena limosa -arena arcillosa, de baja plasticidad. Suelo gris azuloso. Cobertura que corresponde a pastos limpios, con uso de ganadería intensiva, con marcada erosión en terracetas.

Foto 5-51 Sev7I

Figura 5-47 Vista Sev7I

Fuente: (Google Earth, 2005)

Tabla 5-19 Resistividad aparente Sev7I

Sev	7I	CIII_P	
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	Observación
1	617	3,3	
2	949	0,8	
5	1.294	0	KΩm
10	1.532	0,2	KΩm
20	1.755	1,5	KΩm
30	1.838	34	KΩm
50	1.777	56	KΩm

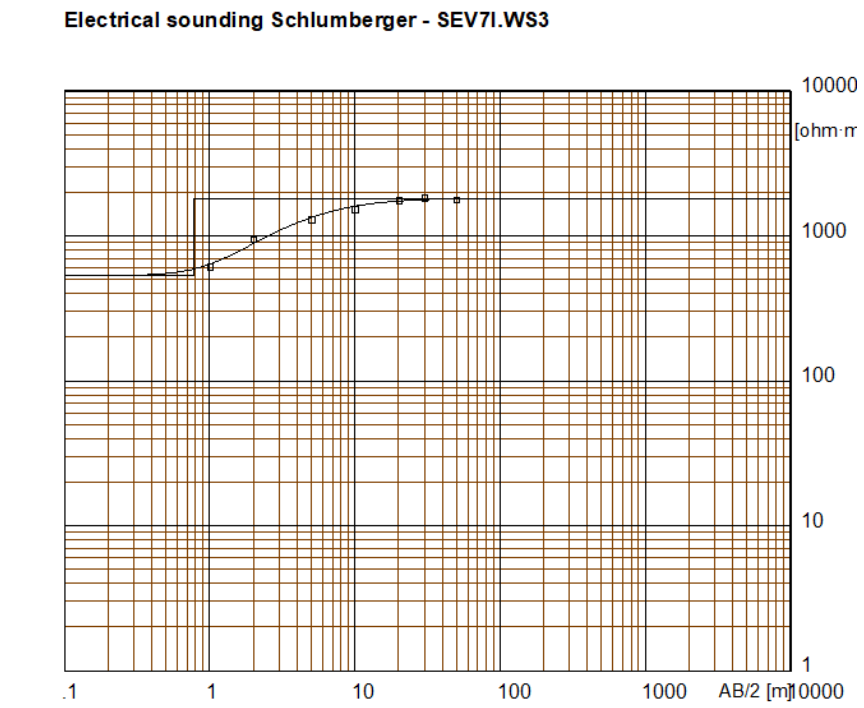


Figura 5-48 Modelo Sev7I

Depósito de vertiente hasta los 50 m. Modelo de una sola capa.

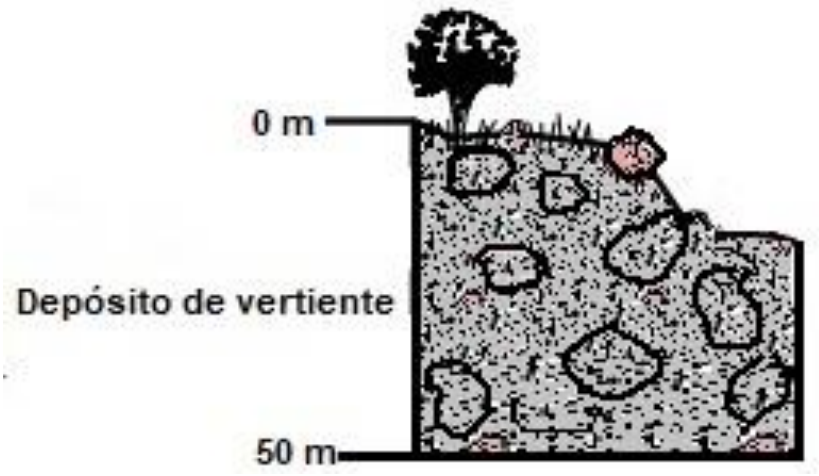


Figura 5-49 Interpretación Sev7I

5.1.3.2.3.1.8 Sev8. Sondeo eléctrico vertical 8I

Ubicado en la vereda La Placeta, a media ladera sobre la margen derecha del río Cocorná a 170 m del cauce, a una altura de 1.371 m.s.n.m., este punto se localiza a 155 m de la vía de acceso a captación y a unos 137 m de los desarenadores, sobre posible depósito gravitacional de ladera.

Cobertura de pastos limpios de uso ganadero principalmente.

Foto 5-52 Sev8I

Figura 5-50 Vista Sev8I
Fuente: (Google Earth, 2005)

Tabla 5-20 Resistividad aparente Sev8I

Sev	8I	CIII_P	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	542	1,3	
2	797	4,3	
5	126	54	
10	351	2,6	
20	35	80	
30	57,93	142	
50	132	200	

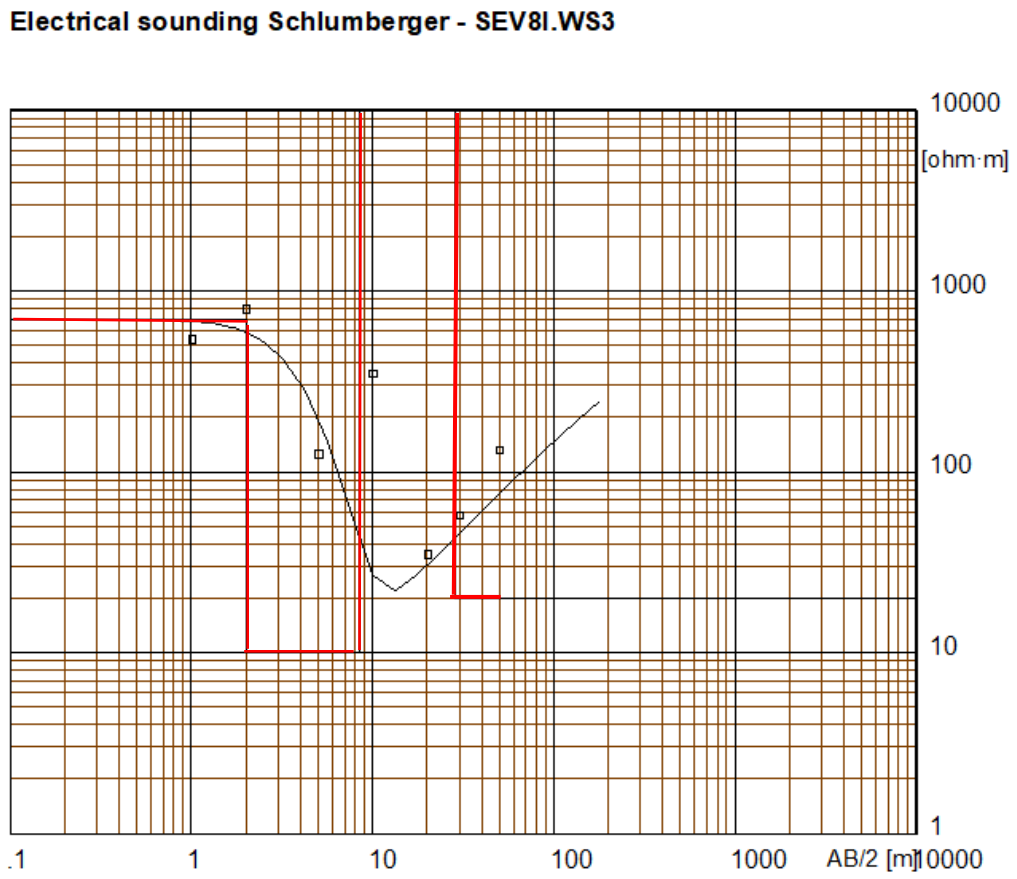


Figura 5-51 Modelo Sev8I

Los primeros 8,5 m pertenecen a un depósito de vertiente, probablemente saturado desde los 2 m, que sobreyacen al basamento rocoso fracturado.

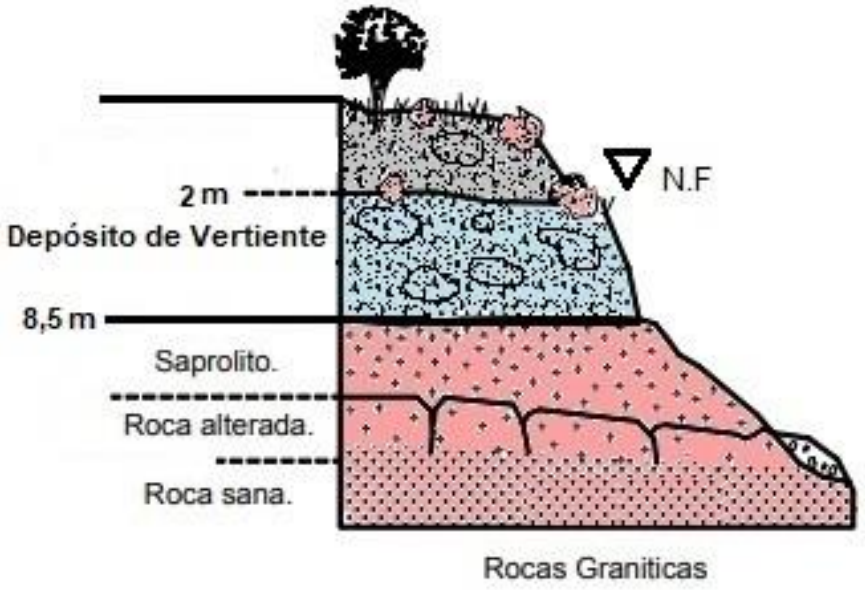


Figura 5-52 Interpretación del Sev8

5.1.3.2.3.1.9 Sev 1D. Sondeo eléctrico vertical 1D

Ensayo realizado en la Hacienda El tesoro, en cercanías a la casa principal de dicho predio, el terreno se encuentra en la margen derecha de la quebrada La Dolores o La Gloria, dicha zona presenta una morfología plana a ondulada, con grandes bloques de roca aflorando en superficie, propios de la meteorización esferoidal del batolito Antioqueño. A una altura de 1.400 m.s.n.m. A unos 400 m del río Cocorná, sobre la margen derecha. Cerca de un apique (Ap5D) que correlaciona los resultados del sondeo, este se realiza a 100 m del Sev1D, los resultados de la caracterización granulométrica según S.C.U.S. es SM, arena limosa, se considera suelo residual a partir de rocas ígneas intrusivas, posiblemente asociado a la unidad predominante de la zona, Batolito Antioqueño.

Cobertura principal de pastos limpios, para uso ganadero.

Foto 5-53 Sev1D

Tabla 5-21 Resistividad aparente Sev1D

Sev	1D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	1.895	1.4	KΩm
2	1.899	4.4	KΩm
5	248	19	
10	357,4	6,2	
20	58,55	14	
30	1.304	190	KΩm
50	1.457	6,9	KΩm

Figura 5-53 Vista Sev1D

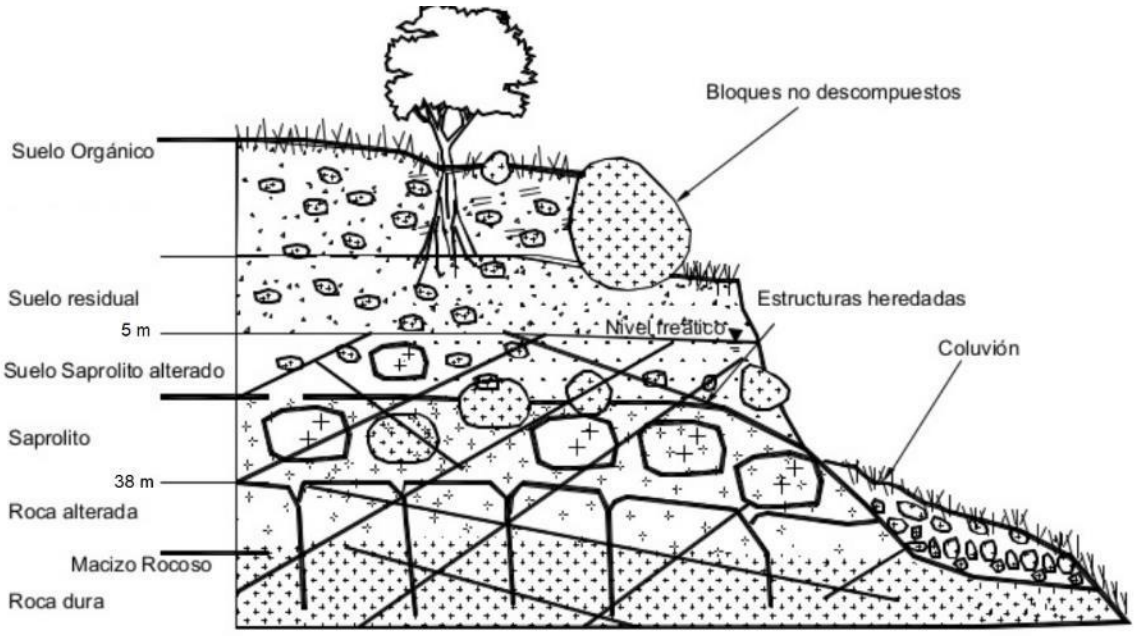


Figura 5-54 Interpretación Sev1D

Modelo bicapa, con el nivel freático a 5 m de profundidad, se encuentran variaciones entre suelo residual y saprolito hasta los 38 m donde comienza el basamento rocoso.

5.1.3.2.3.1.10 Sev 2D. Sondeo eléctrico vertical 2D

Ensayo realizado en la vereda San Vicente, entro del predio de la Hacienda El tesoro, a 37 m del río Cocorná, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, dicha zona presenta una morfología plana, posiblemente se trate de una terraza aluvial o aluviotorrencial. El punto se encuentra a una altura de 1.328 m.s.n.m.

Cerca de una perforación (P1-6D), los resultados de la caracterización granulométrica según S.C.U.S. es SM, arena limosa, se considera suelo depositado con matriz areno limosa con gravas y bloques a partir de rocas ígneas intrusivas, posiblemente asociado a la unidad de depósito aluviotorrencial.

Cobertura principal de pastos limpios, para uso ganadero.

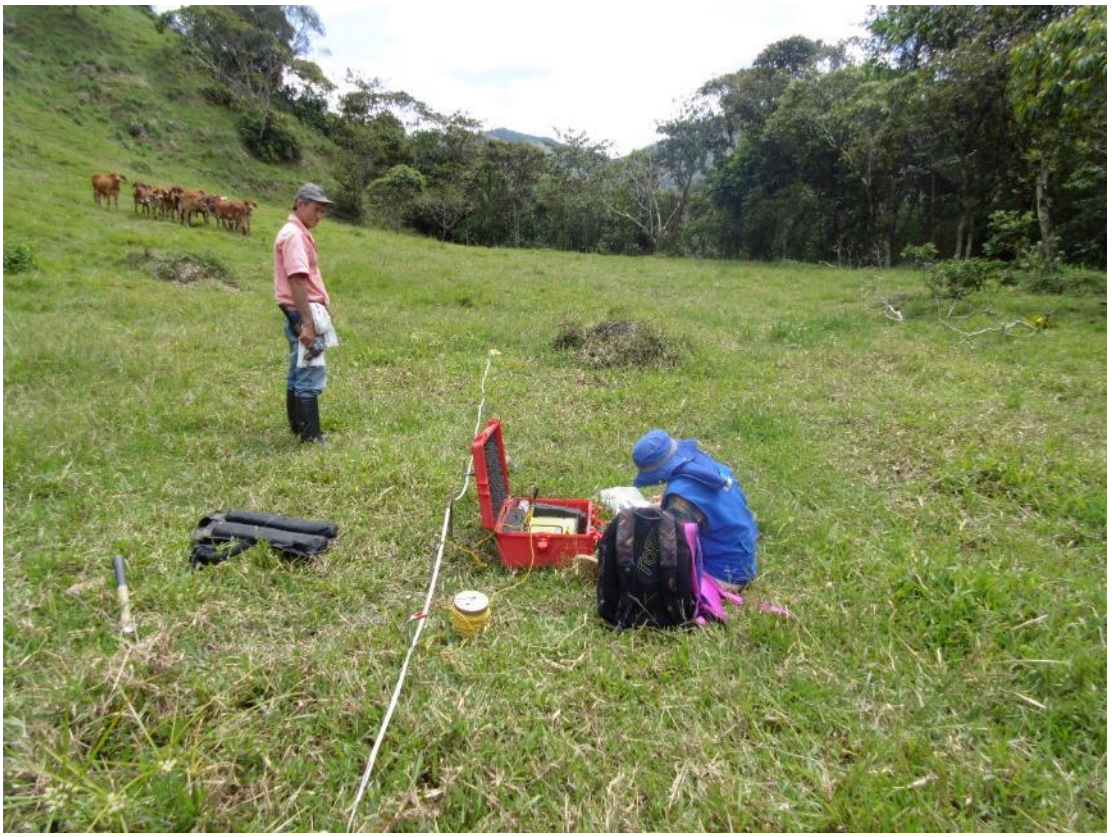


Foto 5-54 Sev2D

Tabla 5-22 Resistividad aparente Sev2D

Sev	1D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	287	13	
2	1.105	4,2	KΩm
5	674	6,8	
10	1.774	11	KΩm
20	31,22	36	
30	1.709	15	KΩm
50	1.422	15	KΩm

Figura 5-55 Vista Sev2D

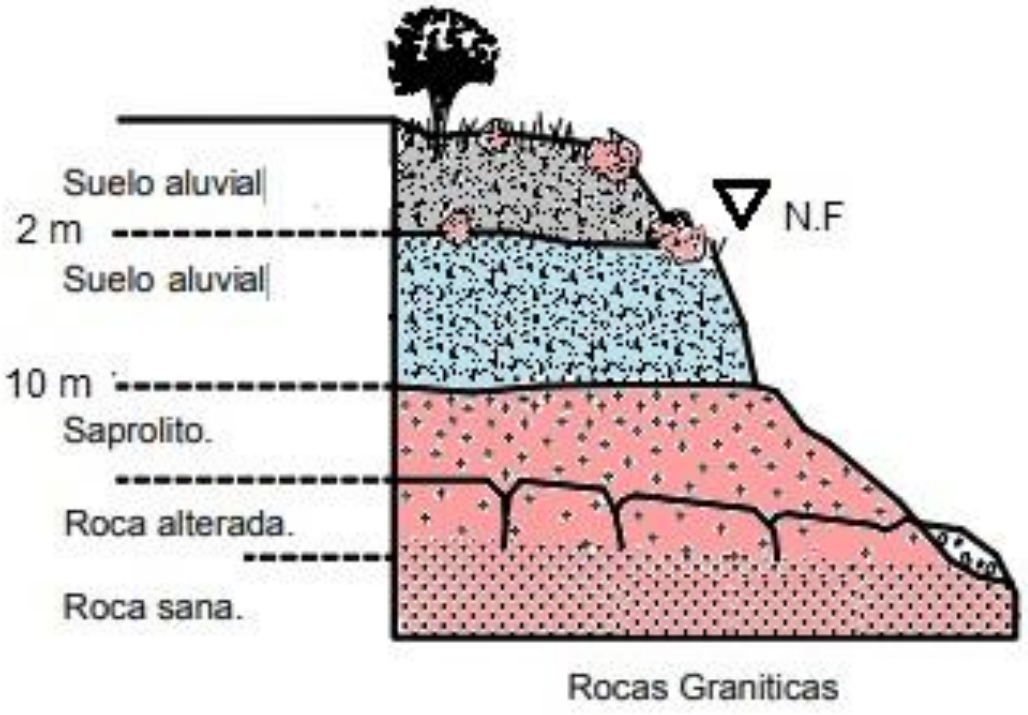


Figura 5-56 Interpretación Sev2D

Depósito aluvial seco hasta los 2 m donde se cruza el nivel freático, se encuentra aluvión saturado hasta los 10 m donde comienza el saprolito y la roca fresca, correspondiente a la unidad Batolito Antioqueño.

5.1.3.2.3.1.11 Sev 3D. Sondeo eléctrico vertical 3D

Ensayo realizado en la vereda El Tesoro, entro del predio de la Hacienda El tesoro, a 100 m del río Cocorná, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, dicha zona presenta una morfología colinada, con una incisión importante por parte de las corrientes hídricas, posiblemente se trate de suelo residual a partir de rocas ígneas intrusivas, seguramente de la unidad de mayor expresión en la zona, Batolito Antioqueño. El punto se encuentra a una altura de 1.340 m.s.n.m.

Cerca de apique (Ap7D), los resultados de la caracterización granulométrica según S.C.U.S. es SM, arena limosa.

Cobertura principal de pastos limpios, para uso ganadero, con un marcado desarrollo de terraceo o erosión por pata de vaca.

Foto 5-55 Sev3D

Tabla 5-23 Resistividad aparente Sev3D

Sev	3D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	350	24	
2	365	8,2	
5	212	36	
10	687,2	38	
20	123	137	
30	33	39	
50	3.019	40	KΩm

Figura 5-57 Vista Sev3D

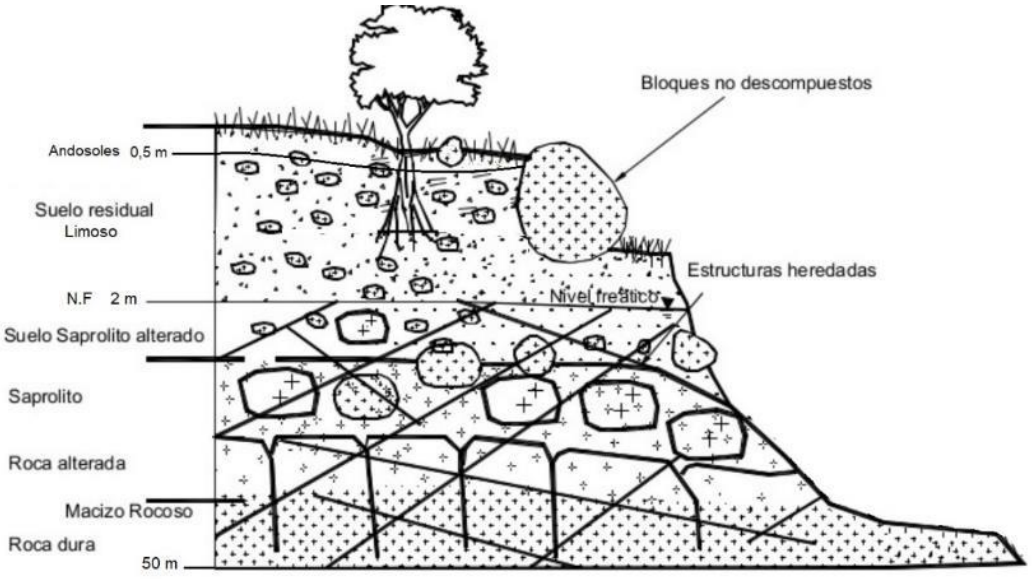


Figura 5-58 Interpretación SEV3D

Se encuentran andosoles hasta los 0,5 m de profundidad, seguidos de suelo residual dominado por fracción limosa, el nivel freático se encuentra a los 2 m, de ahí en adelante comienza la roca, hasta los 50 m.

5.1.3.2.3.1.12 Sev 4D. Sondeo eléctrico vertical 4D

Ensayo realizado en la vereda El Tesoro, entro del predio de la Hacienda El tesoro, a 260 m del río Cocorná, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, dicha zona presenta una morfología colinada a alomada, con una incisión importante por parte de las corrientes hídricas, posiblemente se trate de suelo residual a partir de rocas ígneas intrusivas, seguramente de la unidad de mayor expresión en la zona, Batolito Antioqueño. El punto se encuentra a una altura de 1.333 m.s.n.m.

Cerca de apique (Ap8D), los resultados de la caracterización granulométrica según S.C.U.S. es SM, arena limosa.

Cobertura principal de pastos limpios, para uso ganadero, con un marcado desarrollo de terraceo o erosión por pata de vaca.

Foto 5-56 Sev4D

Tabla 5-24 Resistividad aparente Sev4D

Sev	4D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	210	18	
2	901	1,6	
5	4,6	28	
10	80	39	
20	134	6,5	
30	84,8	185	
50	1.463	12	KΩm

Figura 5-59 Vista Sev4D

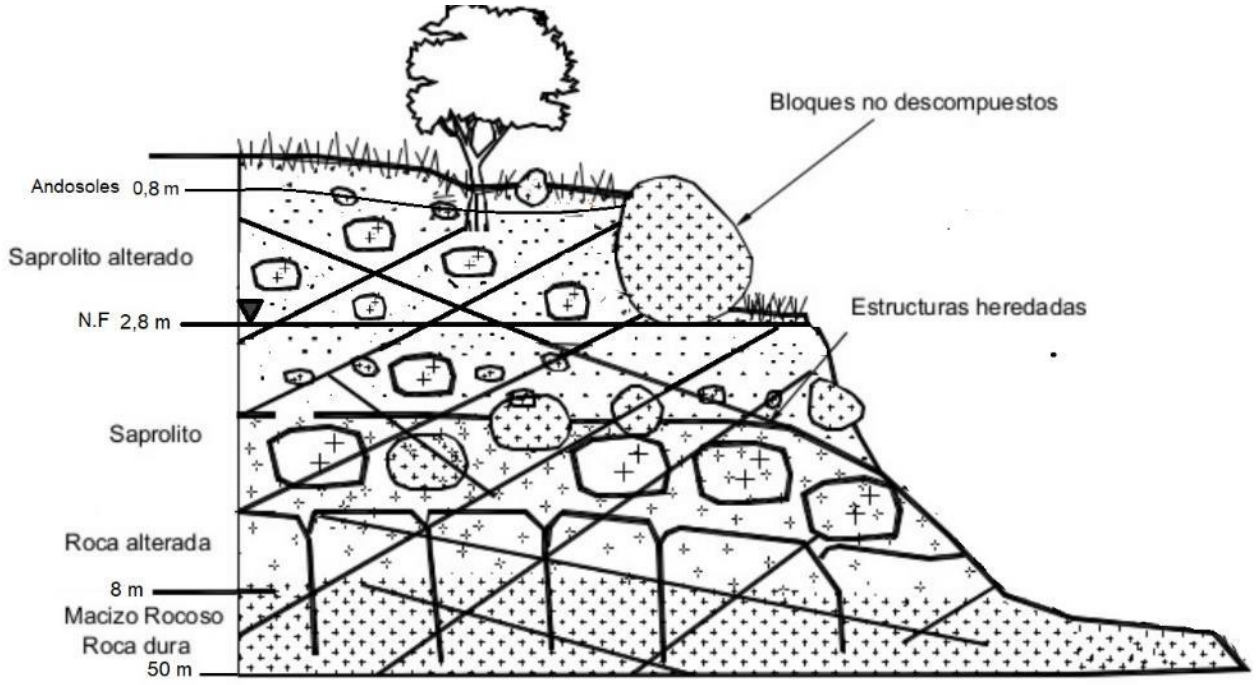


Figura 5-60 Interpretación Sev4D

Se encuentran andosoles en los primeros 0,8 m, seguidos de saprolito con bloques hasta los 2,8 m donde se encuentra el nivel freático y a partir de los 8m se encuentra basamento rocoso.

5.1.3.2.3.1.13 Sev 5D. Sondeo eléctrico vertical 5D

Ensayo realizado en la vereda Los Cedros, sobre vía de acceso a casa de máquinas, a 38 m del río Cocorná, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, dicha zona presenta una morfología plana, posiblemente se trate de terrazas aluviotorrenciales con bloques a partir de rocas ígneas intrusivas, seguramente de la unidad de mayor expresión en la zona, Batolito Antioqueño. El punto se encuentra a una altura de 1.109 m.s.n.m. Cerca al Trapiche Las Arenosas

Cerca de perforación (P3-7D), los resultados de la caracterización granulométrica según S.C.U.S. es SM, arena limosa, suelo depositado de material con gravas y bloques.

Cobertura principal de pastos limpios, para uso ganadero, con un marcado desarrollo de terraceo o erosión por pata de vaca.

Foto 5-57 Sev5D

Tabla 5-25 Resistividad aparente Sev5D

Sev	5D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	615	0	
2	667	0,1	
5	650	0,1	
10	117	21	
20	641	29	
30	1.554	0,1	KΩm
50	1.343	1	KΩm

Figura 5-61 Vista Sev5D

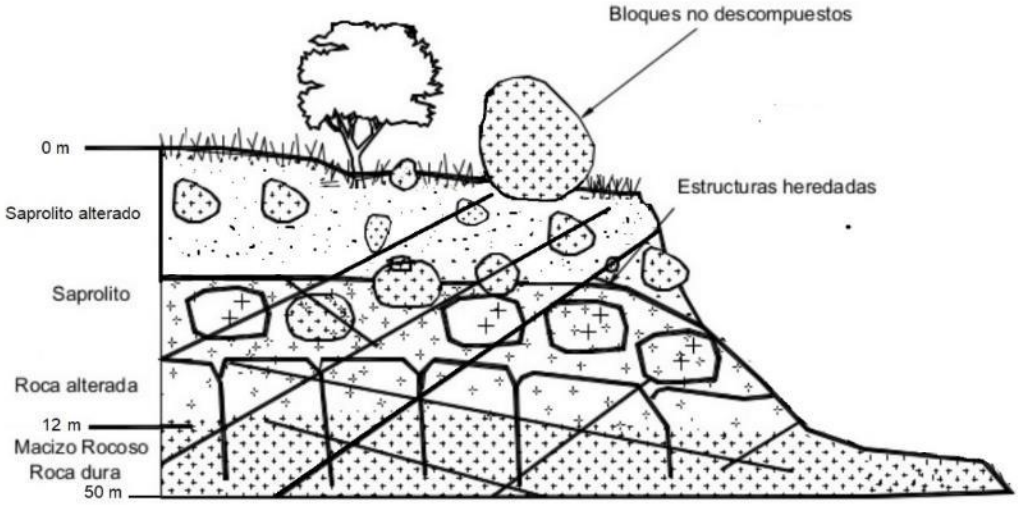


Figura 5-62 Interpretación Sev5D

Se encuentra sobre proceso cartografiado de tubificación, hasta los 12 m limos no saturados correspondientes a los horizontes saprolíticos, a partir de los 12 m basamento rocoso, asociado al Batolito Antioqueño. Sin evidencia de nivel freático.

5.1.3.2.3.1.14 Sev 6D. Sondeo eléctrico vertical 6D

Ensayo realizado en la vereda Los Cedros, a 28 m del río Cocorná, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, dicha zona presenta una morfología plana, posiblemente se trate de terrazas aluviotorrenciales con bloques a partir de rocas ígneas intrusivas, seguramente de la unidad de mayor expresión en la zona, Batolito Antioqueño. El punto se encuentra a una altura de 1.113 m.s.n.m.

Cobertura principal de cultivo de caña, para uso agrícola.

Foto 5-58 Sev6D

Tabla 5-26 Resistividad aparente Sev6D

Sev	6D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	1.396	1,1	KΩm
2	2.174	5,1	KΩm
5	3.776	6,7	KΩm
10	1,629	3,1	
20	592	24	
30	139	48	
50	1.163	0,2	KΩm

Figura 5-63 Vista Sev6D

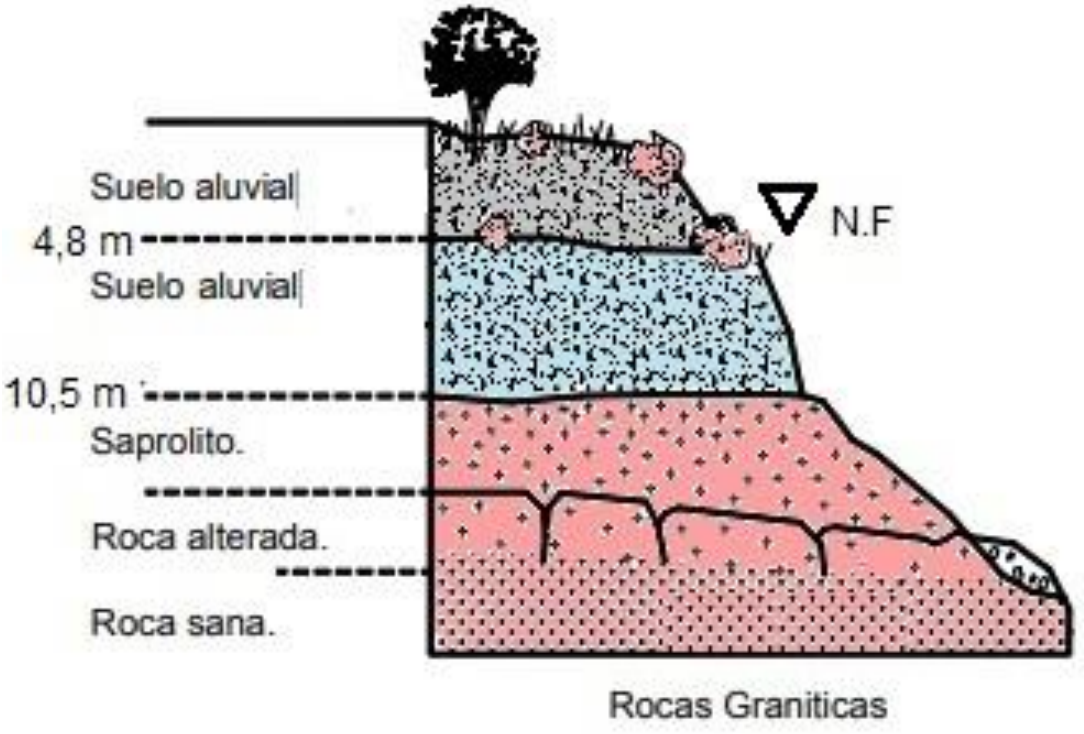


Figura 5-64 Interpretación SEV6D

Aluvión no saturado hasta los 4,6m donde corta el nivel freático, basamento rocoso desde los 10,5 m.

5.1.3.2.3.1.15 Sev 7D. Sondeo eléctrico vertical 7D

Ensayo realizado en la vereda Las Mercedes, a 110 m de la Autopista Medellín - Bogotá, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, en la margen derecha de la quebrada La Rumbona, posiblemente se trate suelo residual de Batolito Antioqueño. El punto se encuentra a una altura de 1.332 m.s.n.m.

Cobertura principal vía.

Foto 5-59 Sev7D

Tabla 5-27 Resistividad aparente Sev7D

Sev	7D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	42	35	
2	553	6,7	
5	2.585	38	KΩm
10	223	44	
20	4.902	29	KΩm
30	11,18	22	KΩm
50	5.963	56	KΩm

Figura 5-65 Vista Sev7D

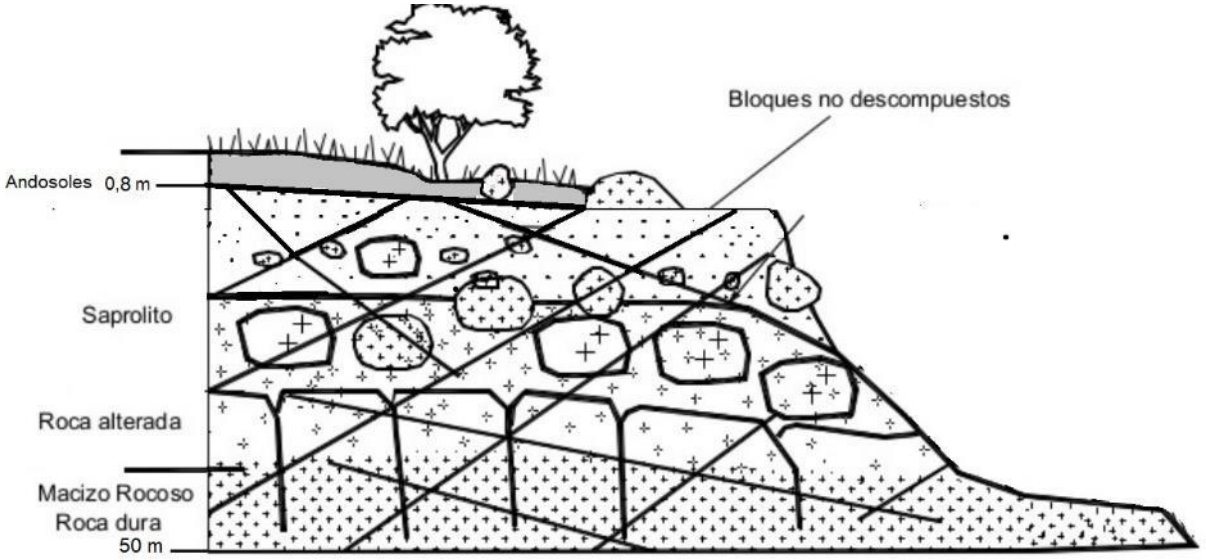


Figura 5-66 Interpretación SEV7

Se encuentra 0,8 m de andosoles, seguidos de macizo rocoso fracturado hasta los 50 m.

5.1.3.2.3.1.16 Sev 8D. Sondeo eléctrico vertical 8D

Ensayo realizado en la vereda San José, a 34 m de la Autopista Medellín - Bogotá, el terreno se encuentra en la margen derecha del río, dicha zona presenta una morfología plana, posiblemente se trate de un lleno antrópico de la autopista, con basamento de Batolito Antioqueño. El punto se encuentra a una altura de 1.339 m.s.n.m. El terreno no presenta señales de erosión ni bloques aflorando en superficie.

Cerca de una perforación (P2-2D), los resultados de la caracterización granulométrica según S.C.U.S. es SM, arena limosa, suelo residual no consolidado, con nivel freático a 11,45 m, medidos por piezómetro.

Cobertura principal pastos limpios para uso ganadero.

Foto 5-60 Sev8D

Tabla 5-28 Resistividad aparente Sev8D

Sev	8D	CIII_D	Observación
AB/2	Resistividad aparente Ωm	σ (%)	
1	373	24	
2	799	6,1	
5	1.462	11	KΩm
10	1.650	17	KΩm
20	861	4,7	
30	22	47	
50	4.634	84	KΩm

Figura 5-67 Vista Sev8D

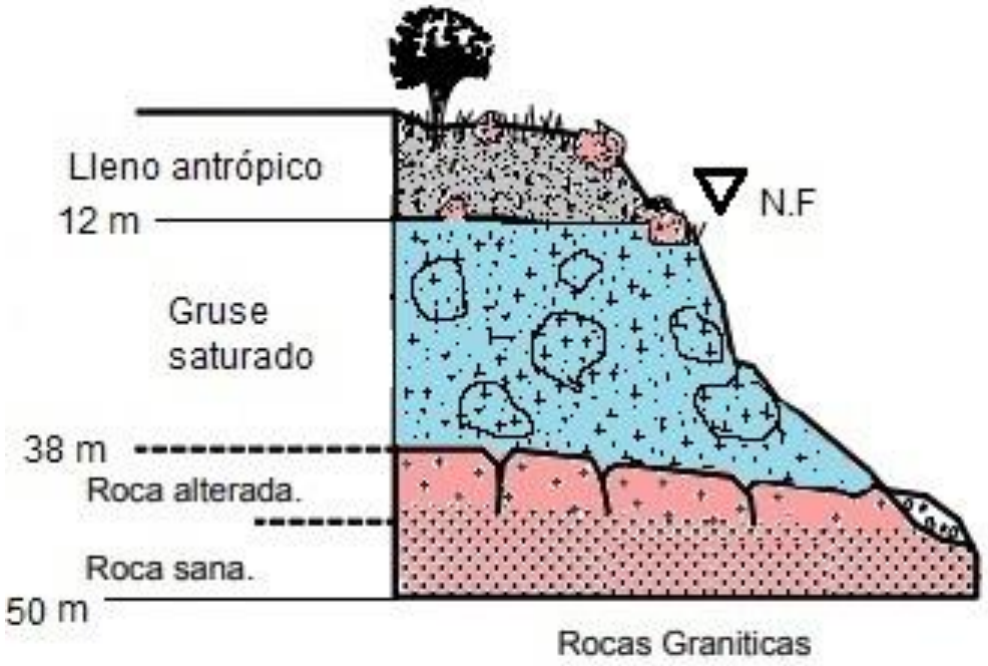


Figura 5-68 Interpretación SEV8D

Lleno antrópico compactado, con nivel freático los 12 m corroborado por datos de perforación (P2), gruss saturado de 12 a los 38 m, basamento rocoso de 30 a 50 m.

5.1.3.3 Hidrogeología local

El modelo hidrogeológico local permite entender la recarga y circulación del agua subterránea en el área de influencia del proyecto.

Para efectos de la evaluación local se consideró como límite oeste corresponde al cambio morfológico del cauce del río Cocorná, formando una zona de acumulación aluvial, el cauce del río Cocorná entre los sitios de captación y casa de máquina, el límite Este la desembocadura de la quebrada la chorrera y el río Cocorná, el extremo sur corresponde a la parte inferior de la autopista Medellín – Bogotá hasta la quebrada la Pisquina, y el norte como la divisorias de agua que corresponde a una expresión geomorfológica. En la imagen de la Figura 5-69 se encuentra la ubicación de la zona investigada en la evaluación hidrogeológica del proyecto.

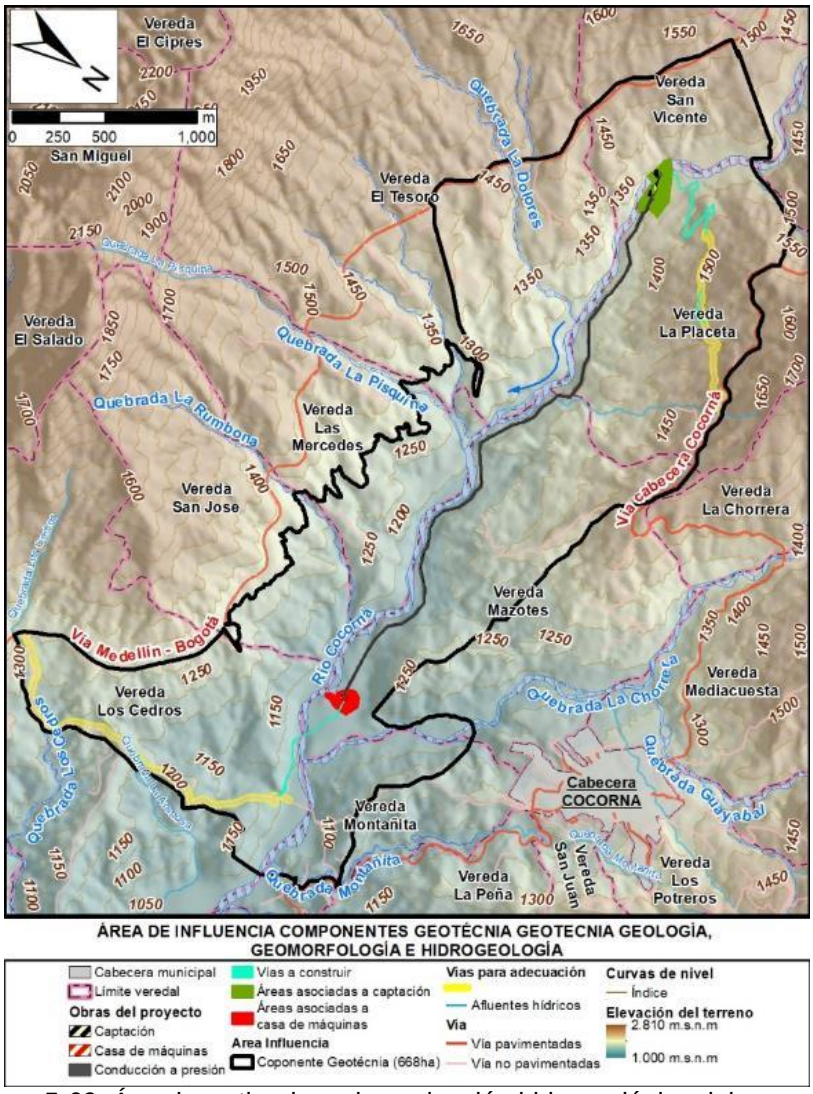


Figura 5-69. Área investigada en la evaluación hidrogeológica del proyecto.

El área de recarga de este sistema hidrogeológico local se encuentra en las zonas altas de la cuenca del río Cocorná, sin aporte de otras cuencas. El flujo del agua subterránea tiene lugar por la infiltración local del agua lluvia que circula en la parte superior del regolito. La descarga del sistema hidrogeológico local tiene lugar en su totalidad por el sistema de drenaje de la margen izquierda y derecha del río Cocorná entre la captación y la casa de máquinas.

La construcción de las obras del proyecto no modificará localmente las condiciones de presión y las direcciones de flujo en el subsuelo; una parte del agua fluirá hacia las obras, por tanto, puede ser considerado para efectos del análisis como una condición de frontera, que no afecta el sistema hidrogeológico entre los puntos extremos del mismo.

Un aspecto importante de la formulación del modelo hidrogeológico es la cuantificación de un intervalo plausible de gradientes hidráulicos. La información disponible permite proponer que, en condiciones de alta montaña, el agua subterránea fluye bajo un intervalo de gradientes entre 1% y 3%.

Las características y la posición de las unidades geomorfológicas regionales permiten postular que cada una de las superficies elevadas de la Cordillera Central entre el oriente antioqueño y el río Magdalena constituyen áreas de recarga del agua subterránea que fluye en el subsuelo hasta ser descargada en los manantiales, quebradas y ríos. En el área de estudio, la mayor parte de la recarga procede de las zonas aledañas a la cuenca del río Cocorná.

5.1.3.3.1 Unidades hidrogeológicas

Teniendo en cuenta la variabilidad espacial de las unidades litológicas presentes en el área de estudio, ésta se ha dividido en 4 zonas homogéneas o unidades hidrogeológicas (UHG). Las unidades hidrogeológicas presentan una relación directa con la unidad litológica; en la zona de influencia, las rocas presentes son derivadas principalmente de rocas ígneas; en superficie se encuentran depósitos no consolidados de aluviones recientes y depósitos de ladera.

De acuerdo con las características geológicas de las diferentes unidades, Batolito Antioqueño, depósitos aluviales y depósitos de ladera, debe anotarse que el potencial acuífero en el área de influencia es limitado a los depósitos aluviales y terrazas, ya que corresponden a bloques con diámetros de hasta 1 metro embebidos en matriz arenosa, con relación fragmento matriz (60/40), con espesores observados en campo de hasta 10 m respecto al nivel medio del cauce del río Cocorná, y restringido o de bajo potencial hidrogeológico los depósitos de ladera, regolito y rocas fracturadas (Figura 5-70).

Las unidades hidrogeológicas correspondientes a la zona del proyecto hidroeléctrico Cocorná III pueden clasificarse en cuatro categorías.

- Acuíferos libres en depósitos aluviales (UHG1)

- Acuitardo en depósitos de ladera (UHG2)
- Acuitardo en regolito (UHG3)
- Acuitardo en roca fracturada (UHG4)

Debe considerarse que, dentro de las unidades geológicas de la zona del proyecto, constituye un acuífero como masa de suelo las zonas de acumulación aluvial (unidad acuífera) suficientemente permeable para permitir flujo de agua. Estrictamente debe considerarse que las demás unidades litológicas existentes en el área de estudio no constituyen un acuífero (unidad no acuífera) como masa de roca o suelo suficientemente permeable para permitir el flujo de agua o su extracción económica.

Las rocas del basamento tienen una conductividad hidráulica baja, salvo en las zonas de falla; el regolito es de baja permeabilidad al flujo gravitatorio (10-6 a 10-7 cm/s) y al flujo forzado por formas de energía diferentes a la gravitatoria. Los depósitos de ladera presentan espesores de hasta 2 metros en algunos sectores. Estos se clasifican como de bajo interés hidrogeológico.

5.1.3.3.1.1 Unidades acuíferas

5.1.3.3.1.1.1 Acuíferos libres en depósitos aluviales (UHG1)

Depósitos someros de aluviones con capacidad de producción de agua. En el área correspondiente al proyecto se reducen a las zonas de acumulación aluvial del río Cocorná. Los depósitos aluviales constituyen acuíferos libres, con flujo intergranular. Este tipo de acuífero se ubica en los bordes del cauce del río Cocorná, los cuales presentan amplitud y extensión para considerarse un acuífero según el (Cornare, Corantioquia, & Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, 2017) del río Cocorná. El espesor de este alcanza los 10 metros en relación con el cauce medio del río.

5.1.3.3.1.2 Unidades no acuíferas

5.1.3.3.1.2.1 Acuitardo en depósitos de ladera (UGH2)

Puede considerarse que en la extensión del área de estudio existen acuitardos en los depósitos de ladera. Estos depósitos cubren la superficie del terreno en algunos sectores, y son de baja permeabilidad. La circulación del agua en estas formaciones es muy lenta por su baja permeabilidad intrínseca, y cuando se produce el flujo lento del agua se realiza a lo largo de discontinuidades.

El espesor de estos depósitos es variable, y se infiere menor de 4 m en algunos sectores. Se clasifican como de bajo interés hidrogeológico.

5.1.3.3.1.2.2 Acuitardos en regolito (UHG3)

Puede considerarse que existen acuitardos libres en los suelos residuales cuya recarga tiene lugar parcialmente por infiltración de la precipitación local y parcialmente

por infiltración a escala regional. La circulación del agua en estas formaciones con baja permeabilidad tiene lugar a lo largo de las discontinuidades litológicas o estructurales.

En la preparación del modelo hidrogeológico es de importancia básica contar con los valores de conductividad hidráulica del terreno, tanto en superficie como en el subsuelo. La distribución vertical de la permeabilidad del regolito y del macizo rocoso comprende de manera general:

Un suelo residual maduro compuesto de limos de baja permeabilidad, que normalmente tiene pocos metros de espesor y una permeabilidad de 10-7 a 10-8 cm/s.

Una zona saprolítica de espesor variable que puede alcanzar pocos metros de limos arenosos y arenas limosas oxidadas, con permeabilidad del orden de 10-6 a 10-7 cm/s.

Por debajo del saprolito se encuentra una zona de transición entre el suelo y la roca que puede tener hasta varias decenas de metros de espesor y un coeficiente de permeabilidad del orden de 10-6 cm/s.

Los valores presentados en el párrafo anterior se refieren a la conductividad hidráulica de los diferentes horizontes de los materiales de la masa del regolito.

5.1.3.3.1.2.3 Acuitardo en basamento rocoso (UHG4)

En el macizo rocoso se identifican rocas que se clasifican como acuitardos, pero cuando existe flujo de agua en estas rocas, este depende principalmente de la intensidad y del patrón de fracturación de la roca. En ocasiones, el flujo del agua es de tal magnitud que puede constituir un sistema acuífero. La combinación de intensidad de fracturamiento de la roca y la abertura media de las discontinuidades permiten estimar el coeficiente de permeabilidad media de este macizo en 4*10-6 cm/s en su parte superior y del orden de 10-6 a 10-7 cm/s en profundidad; en las zonas de falla este valor puede ser mayor. Se clasifican como de muy bajo interés hidrogeológico

La ocurrencia de acuitardos depende principalmente de la intensidad y del patrón de fracturación de la roca. La combinación de intensidad de fracturamiento de la roca y la abertura media de las discontinuidades, permiten la circulación del agua en estas estructuras con muy baja permeabilidad. En las zonas de falla la conductividad hidráulica puede ser mayor.

La anterior clasificación hidrogeológica significa que la zona reposa sobre unidades litológicas que presentan baja productividad dentro de la Cordillera Central con bajo interés hidrogeológico.

La densidad del fracturamiento y la abertura modal de las discontinuidades controla la permeabilidad secundaria en el macizo rocoso, de acuerdo con la expresión propuesta por (Louis, 1967) citado por Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño (2018), las aberturas de las diaclasas en profundidad pueden ser menores a las que se observa en superficie, debido a la presión litostática que da lugar a una disminución de la abertura de las diaclasas.

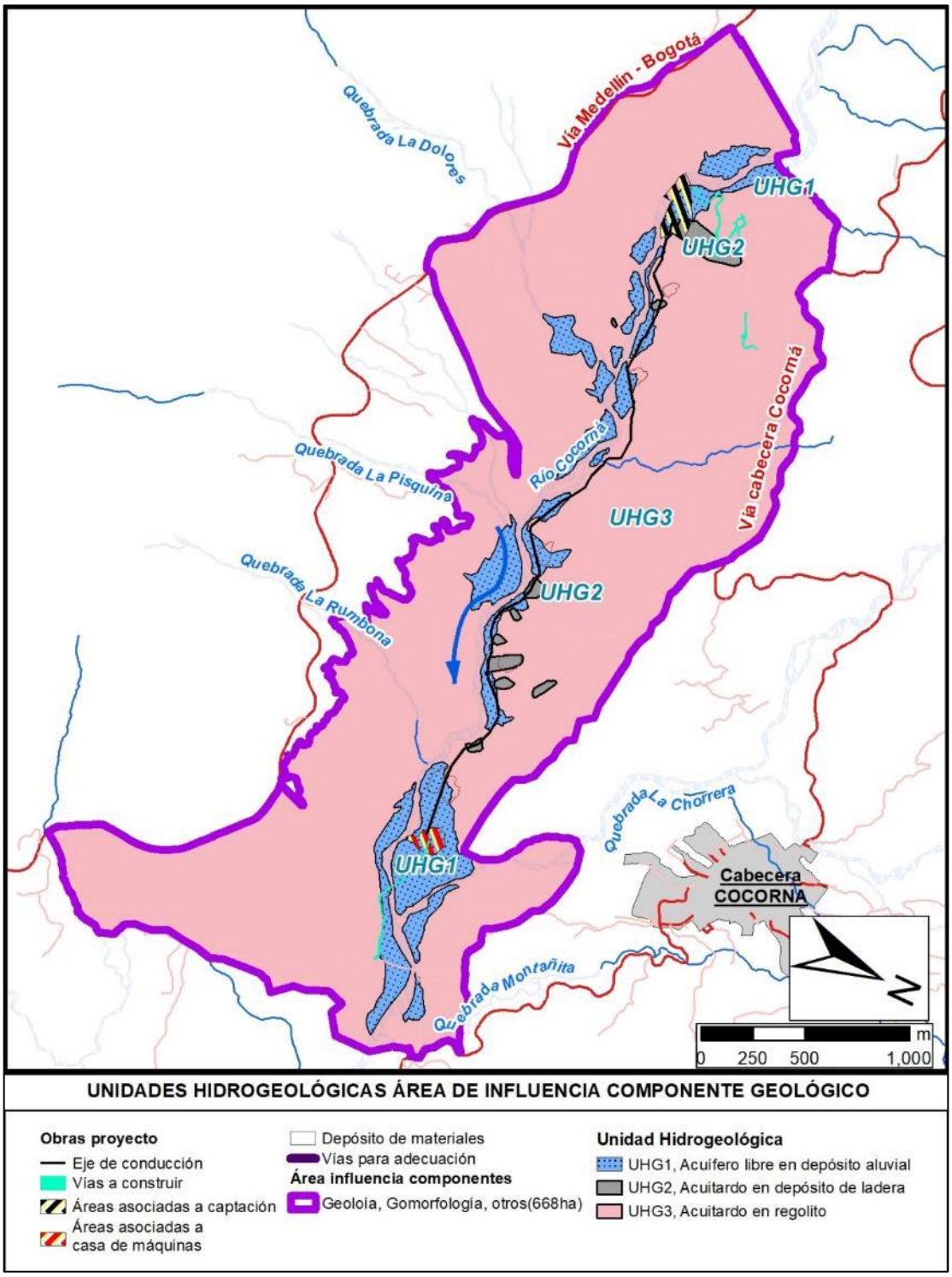


Figura 5-70. Unidades hidrogeológicas en la zona del proyecto

5.1.3.3.2 Condiciones de infiltración y flujo del agua subterránea

La infiltración del agua en el suelo y la circulación posterior en el subsuelo es un proceso complejo que depende al menos de tres conjuntos de factores:

1. Las características topográficas, estructurales y texturales del terreno. El relieve local bajo de los parajes donde predomina la topografía plana u ondulada facilita la acumulación de materiales relativamente sueltos. La topografía suave con abundantes elementos de micro relieve, y la mayor capacidad de infiltración de la parte superior del regolito permiten una alta tasa de infiltración. En contraste en laderas de alta pendiente predominan los escarpes rocosos o los suelos cohesivos de baja permeabilidad donde la tasa de infiltración es muy baja y está limitada sólo a la parte más superficial del terreno. A escala regional es preciso discriminar el papel de la topografía en el flujo del agua subterránea.

El flujo del agua subterránea está controlado en gran medida por los gradientes locales y regionales y cada una de estas categorías determina la escala del flujo del agua subterránea (Freeze & Cherry, 1979)En las regiones donde son comunes los valles pequeños y medianos puede definirse un sistema de flujo local cuyo nivel de base está dado por las vaguadas de los valles. A su vez las divisiones fisiográficas mayores dan lugar a un flujo a escala regional que circula por debajo de las celdas locales que en este caso corresponde al flujo que se establece entre el Altiplano del Oriente Antioqueño y las cuencas que drenan hacia el río Magdalena, en este caso, el río Cocorná. Este sistema complejo de flujos subterráneos locales, y regional, tiene interés en la medida en que permite introducir un criterio de discriminación en el flujo de agua subterránea.

Por debajo de la superficie el flujo del agua procede a lo largo de las discontinuidades del regolito limoso y de la masa de regolito arenoso del horizonte IV, hasta alcanzar el basamento rocoso donde fluye a lo largo de todo tipo de discontinuidades (macro poros, diaclasas, planos de estratificación, zonas de falla). Tales discontinuidades, particularmente las zonas donde el fracturamiento es intenso asociadas a las fallas funcionan como verdaderos conductos hidráulicos, y el macizo rocoso llega a ser un acuífero en el sentido estricto del término.

2. La conductividad hidráulica del medio en que fluye el agua subterránea

3. Las condiciones ambientales: temperatura, humedad relativa, régimen de vientos y cobertura vegetal. Estas condiciones controlan, en conjunto, el proceso de evapotranspiración cuyo efecto neto consiste en la intercepción evaporación, y transpiración a través de la vegetación, del agua tanto de la atmósfera como del suelo. Este proceso puede afectar hasta varios metros del suelo, particularmente donde existe vegetación con raíces profundas, que accede a las fuentes de agua bajo tierra.

4. La precipitación acumulada y duración e intensidad de cada evento de lluvia. En la evaluación de los sistemas hidrogeológicos no son los sistemas aislados los que

determinan las variaciones de interés, sino la distribución de la precipitación acumulada durante períodos relativamente extensos y sobre áreas amplias.

5.1.3.3.2.1 Topografía.

La topografía propia en esta zona, está caracterizado por un conjunto de laderas estructurales, laderas de contrapendientes, laderas colinadas, y superficies de acumulación aluvial con vaguadas estrechas y elementos de micro relieve que facilitan la infiltración, cortadas por el cañón del río Cocorná.

5.1.3.3.2.2 Infiltración

En las evaluaciones hidrogeológicas debe considerarse la capacidad de infiltración del regolito. Estudios realizados con infiltrómetro, (Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, 2018), en diferentes formaciones superficiales, dan como resultado tasas de infiltración medias entre 1,2 cm/h y 13 cm/h, con valores extremos entre 1,6 cm/h y 60 cm/h. En la Tabla 5-29 se encuentran los resultados de las mediciones citadas.

Tabla 5-29. Tasas de infiltración en regolitos de la Cordillera Central

Formación superficial	Tasa de infiltración cm/h		
	Valor medio	Valor mínimo	Valor máximo
Ceniza Volcánica	4,8	1,2	6
Regolito residual saprolítico	1,2	0,8	1,6
Regolito residual gruss	2,8	1,6	3,2

De estos resultados cabe destacar:

- La capacidad de infiltración medida de cenizas volcánicas, es del mismo orden de la medida en suelos residuales maduros y depósitos aluviales. Los andosoles son los horizontes predominantes en el primer metro de profundidad, que reposan sobre la cuarzodiorita.
- Los valores bajos de infiltración en los depósitos aluviales están asociados a la presencia de limos en ellos.
- Los mayores valores de capacidad de infiltración se encuentran en las terrazas aluviales, que pueden ser fácilmente reconocidos por su textura de grava gruesa y arena de tonalidad café.
- Los valores de esta tabla corresponden a ensayos bajo condiciones controladas. En condiciones reales la tasa de infiltración en el terreno está controlada predominantemente por la topografía y la cubierta del terreno.

- Es preferible calcular la infiltración en la cuenca con base en el balance hidrológico en el que la precipitación puede ser calculada a partir de los datos de los pluviómetros (ver capítulo de hidrología); la evapotranspiración puede ser calculada con las ecuaciones presentadas en el numeral anterior y corroborada con datos de lisímetros y tanques de evaporación; la escorrentía es calculable a partir de los datos de caudales medios y mínimos; y la infiltración resulta del balance hidrogeológico en el que se consideran los aportes desde otras cuencas y el aporte a otras cuencas.

5.1.3.3.2.3 Conductividad hidráulica en el subsuelo.

5.1.3.3.2.3.1 Conductividad hidráulica en el regolito

En la preparación del modelo hidrogeológico es de importancia básica contar con los valores de conductividad hidráulica del terreno tanto en superficie como en el subsuelo. La gráfica (Figura 5-71) ilustra la relación entre el coeficiente de permeabilidad y el Límite Líquido de suelos cohesivos. El límite liquido de los limos del regolito se encuentra en el intervalo 40-50, lo que implica que su conductividad hidráulica se encuentra en el intervalo 10-6 - 10-8 cm/s

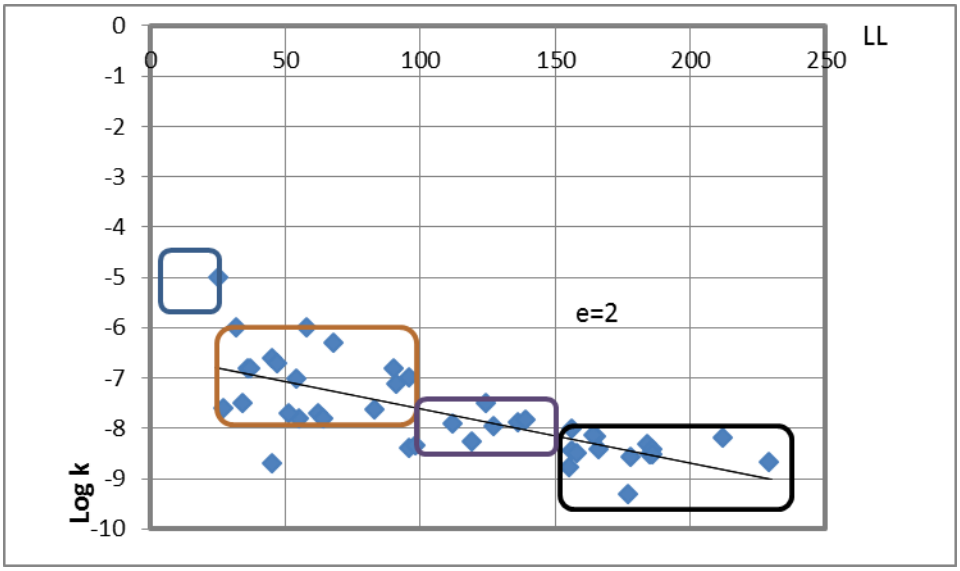


Figura 5-71. Relación entre límite líquido y permeabilidad calculada a partir de resultados de ensayos de consolidación.

Fuente: (Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, 2018)

Así mismo las rocas del basamento tienen una conductividad hidráulica baja, salvo en las zonas de falla.

La distribución vertical de la permeabilidad del regolito y del macizo rocoso comprende de manera general:

- Un suelo residual maduro compuesto de limos de baja permeabilidad, que normalmente tiene varios metros de espesor y una permeabilidad de 10-6 a 10-8 cm/s. El flujo de agua en este horizonte tiene lugar a lo largo de las discontinuidades del terreno, sean ellas discontinuidades heredadas o producto de bioturbación, que hace la permeabilidad secundaria del terreno mayor que la permeabilidad del limo que lo conforma.
- Una zona saprolítica de espesor variable que puede alcanzar varias decenas de metros de limos arenosos y arenas limosas oxidadas con permeabilidad del orden de 10-5 a 10-6 cm/s.-En el saprolito ocurre también la circulación a lo largo de discontinuidades.
- Por debajo del saprolito se encuentra el horizonte IV, transición suelo roca, formada por arenas limosas, que puede tener hasta varias decenas de metros de espesor y un coeficiente de permeabilidad del orden de 10-4 cm/s.

Los valores presentados en el párrafo anterior se refieren a la conductividad hidráulica de los materiales en los diferentes horizontes de la masa del regolito. En la masa del regolito esta conductividad esta modificada por la ocurrencia de discontinuidades litológicas o estructurales a lo largo de las cuales ocurre una parte importante del flujo en los suelos cohesivos. Esta distribución general está modificada localmente por las características propias del terreno donde puede faltar uno o más de los elementos superiores, por la presencia de discontinuidades y canales subterráneos.

5.1.3.3.2.4 Conductividad hidráulica en el macizo rocoso

La conductividad hidráulica del macizo rocoso depende de la ocurrencia y de las condiciones de las discontinuidades sean ellas diaclasas o zonas de falla. Conductividad de macizos rocosos en la Cordillera Central puede ser estimada en 5*10-4-10-5 cm/s, a partir de la correlación entre el caudal mínimo y el área de cuencas en rocas cristalinas de la Cordillera Central, y un gradiente hidráulico medio de 0,03 obtenido a partir de información isotópica, el valor de la conductividad hidráulica en las zonas es del orden de 10-4-5*10-3 cm/s, con base en información secundaria de túneles excavados en rocas cristalinas (Hoyos, 2012).

Estos valores son coherentes con los valores calculados con la ecuación racional propuesta por Louis (1967) en (Hoyos, 2012), a partir de la densidad del fracturamiento y la abertura modal de las discontinuidades cuya solución gráfica está ilustrada en la Figura 5-72. La abertura de diaclasas medida en superficie debe considerarse como un valor máximo para efecto de los cálculos de permeabilidad secundaria del macizo rocoso.

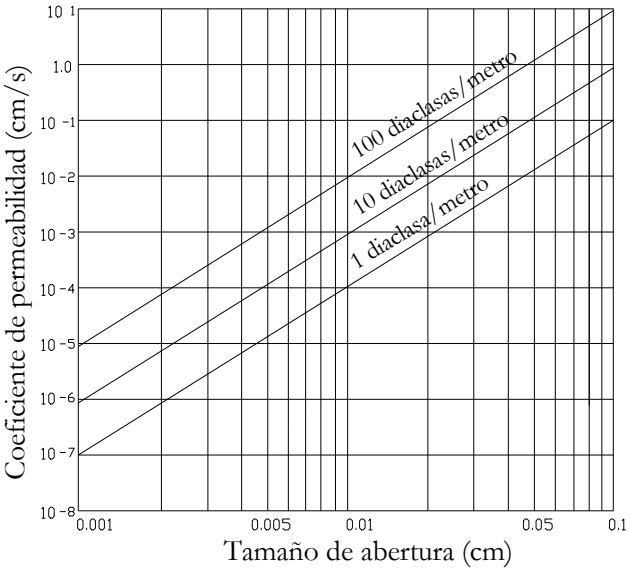


Figura 5-72. Nomograma para la evaluación de la permeabilidad en macizos rocosos

Fuente: Louis (1967) en (Hoyos, 2012).

Las aberturas de las diaclasas en profundidad pueden ser menores a las que se observa en superficie debido a la presión litostática que da lugar a una disminución de la abertura de las diaclasas; por otra parte, el agua cargada de iones deposita sales en ellas y forma rellenos que disminuyen sustancialmente la conductividad hidráulica del macizo rocoso.

A modo de ilustración puede compararse la conductividad hidráulica resultante de un espaciamiento entre diaclasas igual a 0.3 m con una abertura modal de 0.01 cm, y la conductividad hidráulica resultante si la abertura de las diaclasas se reduce a la mitad. La permeabilidad del macizo rocoso en el primer caso es del orden de 5*10-4 cm/s, y en el segundo de 5*10-5 cm/s. Estos valores han sido validados con la información disponible del caudal infiltrado durante la construcción de túneles en rocas cristalinas.

Las zonas de falla pueden constituir conductos hidráulicos entre los acuíferos libres, sea que éstos se encuentren en regolito o en roca fracturada, y los acuíferos confinados en el basamento rocoso. Las condiciones de fracturamiento de las zonas de falla pueden dan lugar a una conductividad hidráulica en ellas superior a 10-4 cm/s.

5.1.3.4 Implicaciones geotécnicas

Como resultado de los trabajos ejecutados, entre recorridos de campo y exploraciones directas (apiques, SEV, Perforaciones) en esta etapa del estudio, se encuentra que el sector transcurre, en términos generales, sobre depósitos de vertientes de espesor variable, suelo residual y depósitos aluviales sobre los cuales se proyectan las obras del proyecto; entre terrenos dedicados a ganadería principalmente.

Dado que, hacia la parte más alta de la ladera, la pendiente aumenta de valor, es de esperarse que, favorecido por las discontinuidades, aflore en superficie, como niveles de agua “colgado” que en épocas de lluvias se forma, incrementando el contenido de humedad de los depósitos y reduciendo por esta vía, la resistencia de los geomateriales no consolidados, incrementando su potencial inestabilidad.

Las condiciones de estabilidad de estas zonas son de pendientes medias y el relieve asociado en algunos puntos facilita la acumulación e infiltración del agua, en esencia topográficamente favorece el efecto de concentración de la escorrentía superficial.

5.1.3.4.1 Diagnóstico hidrogeológico para el macizo rocoso en el área de desarrollo del proyecto

El volumen de control establecido para la dinámica del flujo de agua a través del medio poroso afectado por la construcción del proyecto como se describió anteriormente, básicamente está formado por una capa heterogénea de material meteorizado, transportado o residual, con diferentes espesores susceptible a diferentes conductividades hidráulicas del medio poroso.

Subyaciendo este material, se encuentra unidades de roca de origen ígneo, el cual muestra un patrón de fracturamiento sistemático con tendencia NW o diaclasamiento de características moderada, cuyas discontinuidades presentan comportamiento regular, de abertura cerrada, sin rellenos, con señales menores de oxidación en las paredes de la roca, fruto de la acción del agua en la disolución de minerales de hierro y de la tectónica en la zona y como respuesta a la fragilidad de la roca, las cuales constituyen una vía para el movimiento del agua.

A mayor profundidad se espera un macizo rocoso en condiciones de menor grado de fracturamiento, exhibiendo una roca más fresca debido al patrón tradicional del perfil de meteorización de la roca presente en el área de estudio.

En estas condiciones, podemos suponer para cada tipo de material lo siguiente:

Los depósitos heterogéneos de superficie, corresponden a un material granular en matriz limo arenoso, con un contenido apreciable de clastos de mayor tamaño, con algún grado de meteorización superficial, de formas regulares producto de la meteorización, caras relativamente lisas y aristas agudas por la tendencia de

meteorización, que siguen planos de debilidad de la roca inducidos por la génesis del material parental.

Para efectos de la modelación, se supone que la roca corresponde a líneas equipotenciales en las cuales se presenta la condición de presión manométrica máxima (presión interna) y en principio se realiza la modelación numérica, sin afectar la conductividad hidráulica del medio poroso.

Se puede incluir en el modelo numérico una delgada capa de material (representando el revestimiento y tratamiento constructivo definitivo que se dé a las paredes durante la construcción), el cual habrá de tener una conductividad muy baja, a fin de que represente en el modelo numérico el propósito que se dará en la obra. Hechas estas consideraciones, se puede modelar por diferencias finitas y esperar el comportamiento del agua y su interacción con las obras de ingeniería a construir.

Las aguas provenientes de precipitaciones, parte queda atrapada en la capa superior de la superficie retenida por la vegetación. Para luego entrar a formar parte del volumen evapotranspirado de nuevo a la atmosfera. Otra parte satura la capa más superficial de suelo y se inicia el proceso de escorrentía superficial directa, favorecido por el gradiente topográfico de la superficie del terreno, siguiendo las líneas de mayor pendiente e irremediablemente va a llegar a alimentar el flujo de las corrientes que en este caso son afluentes del río Cocorná (Figura 5-73).

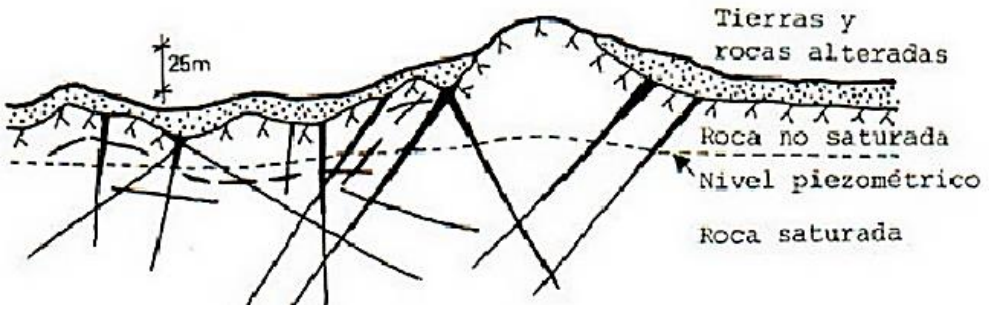


Figura 5-73. Zonas típicas de acuíferos por fractura en rocas duras

Fuente: (Hoyos, 2012).

Otra componente inicia su viaje a través del medio poroso constituido por los depósitos superficiales, como ya hemos dicho; estos depósitos heterogéneos presentan una porosidad relativamente alta, por lo que tienen la capacidad de almacenar moderados volúmenes de agua.

Es de esperarse, que tomando en consideración las altas pendientes de la superficie del terreno, estos acuíferos, viajen a través del subsuelo siguiendo líneas de corriente aproximadamente paralelas a la estratigrafía, hasta interceptar la superficie del terreno a una cota topográfica, más baja que el punto inicial de su recorrido, como se observa el modelo esquemático de la Figura 5-74.

Una vez aflora en la superficie, entra a contribuir con el caudal de los afluentes al río Cocorná e incluso formar acuíferos libres que se presentan como puntos por donde brota agua desde el suelo a la superficie a media ladera. Estos puntos constituyen la descarga de estos acuíferos libres, que en tiempos de estiaje podrían comportarse de manera efímera, tal que, en periodos secos prolongados, se logre descargar la mayor parte del agua que se había almacenado en el depósito con anterioridad y durante la época de lluvias. Sin que se logre afectar el agua acumulada en el macizo rocoso a mayor profundidad.

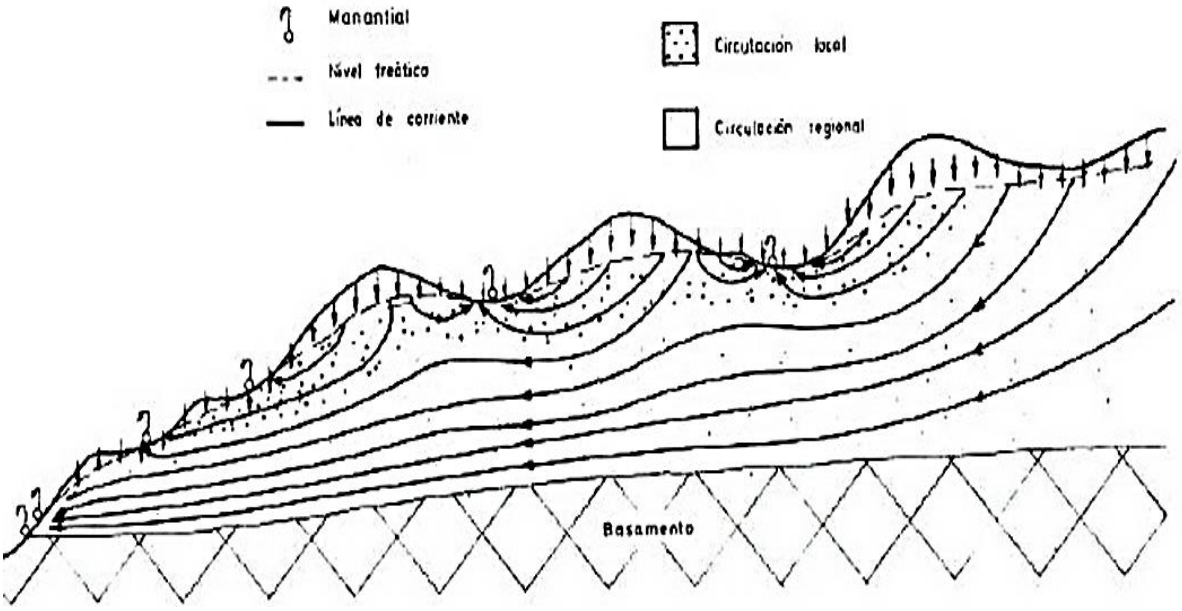


Figura 5-74. Esquema de la circulación del agua en un conjunto de terrenos permeables recargados por la lluvia en los que se establece flujo local y flujo regional

Fuente: (Custodio & Llamas, 1983)

La parte de la recarga aportada por la precipitación que logra infiltrarse a niveles más profundos, tiene 2 posibilidades de avanzar en su movimiento, penetrar en la formación geológica ígnea que está subyaciendo los depósitos de suelo y coluviones, o aprovechar las aberturas presentes que forman las discontinuidades de esta capa de material fracturado y/o diaclasado.

A continuación, se analiza cada una de estas 2 posibilidades:

La permeabilidad de las capas de este material ígneo, puesto de manifiesto en el alto grado de cementación y consolidación que ha alcanzado. Esta transformación induce una reducción en la conductividad hidráulica por lo que, en volumen, la cantidad de agua que puede seguir esta vía menor. Dicho de otra forma, desde el punto de vista

de transmisividad, el agua a través de estas tabletas de material cementado es muy poca y para efectos prácticos es de esperarse que se comporte como un “acuitardo”, llegando en caso de ser roca fresca sin fracturas a un “acuifugo”.

Tomando en consideración que las rocas presentan discontinuidades teniendo una disposición de subhorizontal – altamente inclinadas, resulta lógico pensar que el agua que logra penetrar hasta estas profundidades, una vez encuentra una discontinuidad seudo horizontal modifique su patrón de movimiento siguiendo trayectorias paralelas a estos planos con lo que la conductividad hidráulica a lo largo de estos planos, pueda ser considerada como isotrópica es decir Kx=Ky. La evidencia recolectada en la prospección geología, muestra que estas discontinuidades, son relativamente lisas, y se presentan cerradas, que a nivel hidráulico corresponde a un flujo a través del espacio existente entre 2 placas planas paralelas, con una separación muy pequeña.

De otro lado, existe otra(s) familias de discontinuidades, aproximadamente perpendiculares a los planos de fractura menores, discontinuidades que pueden atribuirse a la actividad tectónica que ha prevalecido desde tiempos remotos en la génesis misma de la formación geológica en consideración. Estas discontinuidades, se abren como la posibilidad de que el agua presente en la primera familia discurra ahora también verticalmente avanzando en el proceso de infiltración profunda (Figura 5-75). Esta cantidad de agua, es función del grado de fracturación secundario, que como ya hemos dicho, disminuye con la profundidad.

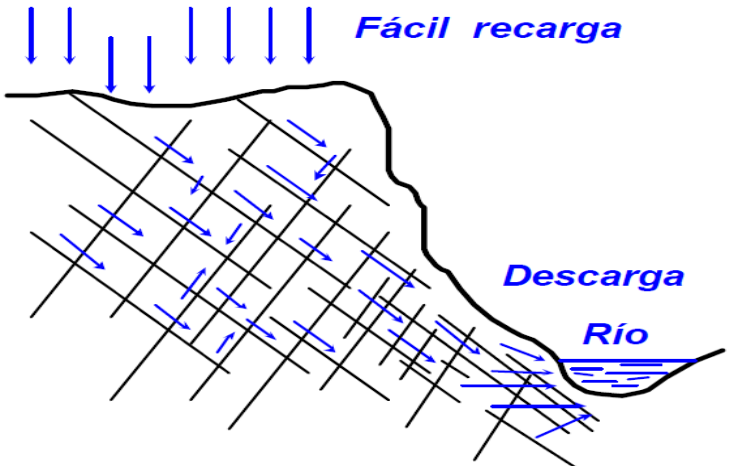


Figura 5-75. Sistema de fracturas favorables a la recarga y a la circulación del agua subterránea.

Fuente: (Custodio & Llamas, 1983)

Los modelos teóricos de flujo a través de medio poroso, parten de la valides y limitaciones impuestas por la ecuación de Darcy, que implica un flujo rectilíneo y paralelo en el cual la relación de fuerzas de origen viscoso, priman sobre las fuerzas

de inercia (caracterizado adimensional por flujos con bajos números de Reynolds - Flujo Laminar). En estas condiciones, el problema presenta dificultades a nivel teórico de poder modelarse numéricamente, en vista de la incertidumbre y aleatoriedad de la geometría y características geométricas de las discontinuidades; sin embargo, para efectos prácticos, es viable abstraer el comportamiento micro a un campo macro al cual se le asignan propiedades promedio representativas de las condiciones existentes.

Para efectos prácticos, consideramos que la conductividad en términos de órdenes de magnitud en este material se comporta tal que la conductividad a lo largo de planos horizontales es isotrópica (Kx=Ky), cuyo valor se toma a partir de los resultados de la experiencia de campo durante la perforación de sondeos profundos en este material, y la permeabilidad vertical es un orden de magnitud expresado en potencia de 10 tal como se ilustra en la Figura 5-76, para algunos tipos de rocas (ígneas para el caso de este estudio).

Tipo de roca	m (%)	k (m/día)
Rocas plutónicas		
Granito fresco	0 a 3	10^{-5}
Granito meteorizado	2 a 10	$8.35x10^{-1}$ a 1.66
Rocas volcánicas		
Basaltos densos	0.1 a 1	10^{-11} a 10^{-8}
Basaltos residuales	5	10^{-9} a 10^{-8}
Basaltos fracturados y/o meteorizados	10	10^{-9} a 10^{-5}
Tobas interestratificadas	39	$3x10^{-5}$
parcialmente zeolitizadas	40	$9,6x10^{-3}$
Tobas estratificadas	14	$3x10^{-4}$
Tobas soldadas		
Rocas metamórficas		
Mármol	0.4	14
Micaesquistos meteorizados	20.6	$2.75x10^{-2}$
Cuarcitas	-	$1.60x10^{-6}$
Pizarras	3.4	$1.08x10^{-6}$
Gneiss	0.1	-
Esquistos	3	1.16
Gneis meteorizados y/o descomprimidos	0.1 a 2	$2.50x10^{-1}$ a $8.34x10^{-3}$
Rocas sedimentarias		
Aluviones de río	5 a 25	10 a 500
Sedimentos lacustres	15 a 35	0.1 a 100
Calcarenitas	20	$31.5x10^{-3}$
Calizas recifales	20	$6.4x10^{-3}$
Arenas de delta	15 a 40	0.1 a 200

Figura 5-76 Rangos de porosidad y conductividad hidráulica de algunos sedimentos y rocas

Fuente: (Benítez, 1972)

Un comportamiento análogo, se considera lógico que pueda presentarse en el material, que subyace, el cual presenta características similares al que ya se ha descrito y difiere en las propiedades petrológicas, pero conserva su esencia ígnea. Solo que los espesores de las capas son mayores y en general presentan un menor grado de fracturación, por lo que es razonable adjudicar unos menores valores de conductividad hidráulica.

Como soporte teórico, a las hipótesis en que se fundamenta en modelo conceptual (Figura 5-77), aportamos una figura en la que se describe cualitativamente la relación entre la porosidad y la conductividad de diferentes materiales, aportada por la clasificación de Meinzer (1942).

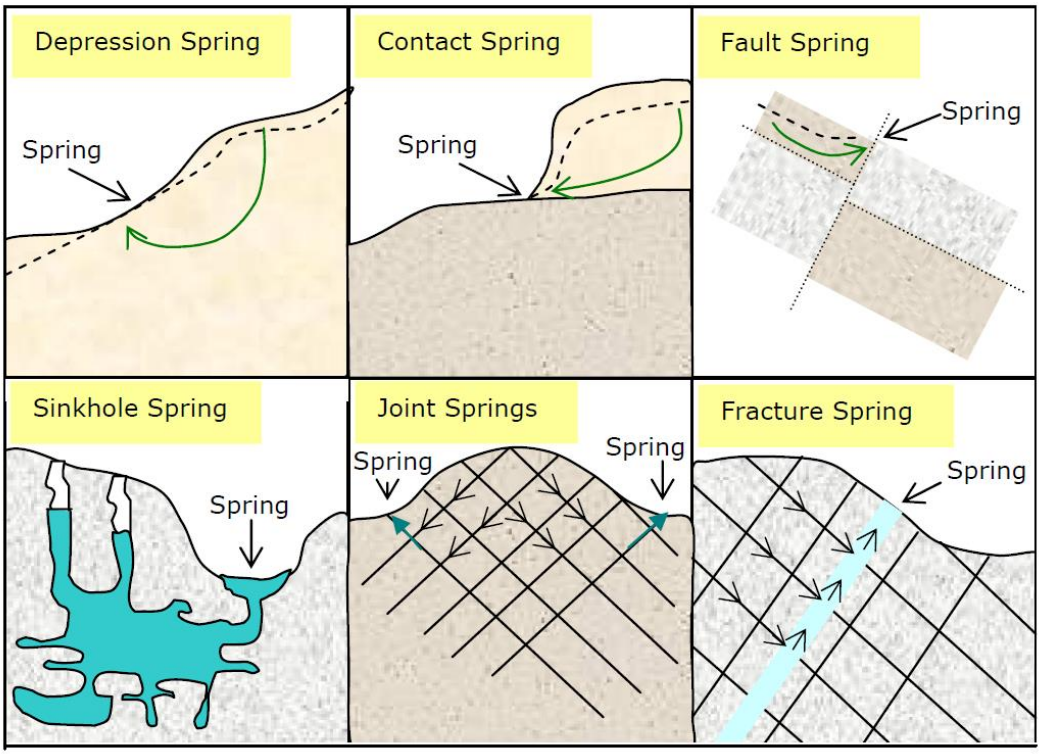


Figura 5-77. Captación de aguas subterráneas.

Fuente: (Benítez, 1972)

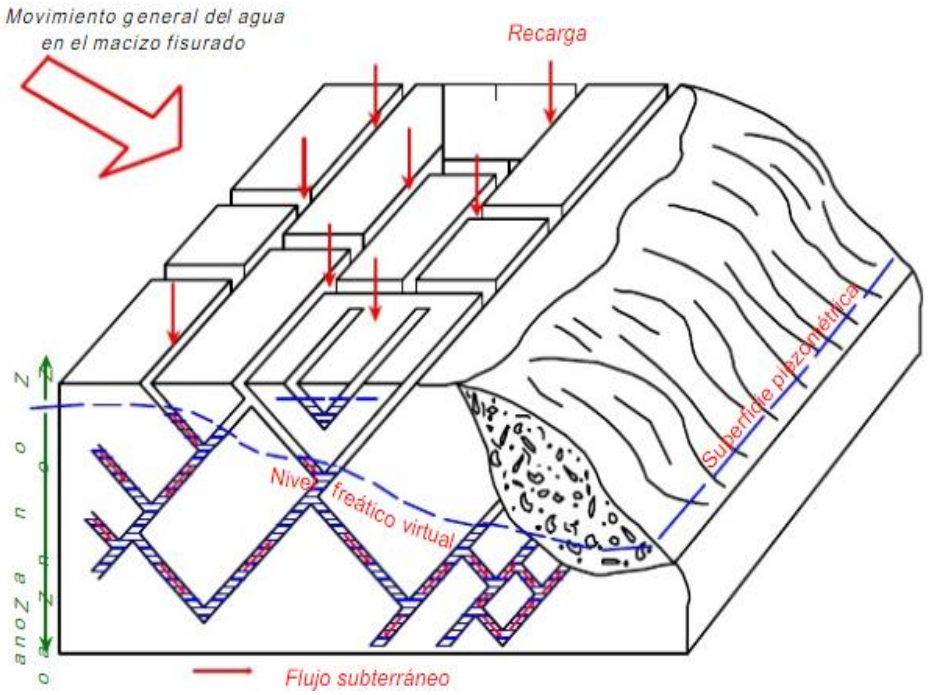


Figura 5-78. Efecto de las fracturas y discontinuidades en la dinámica del movimiento del agua subterránea en macizos afectados por discontinuidades, independientemente del origen de las discontinuidades.

Fuente: (Benítez, 1972)

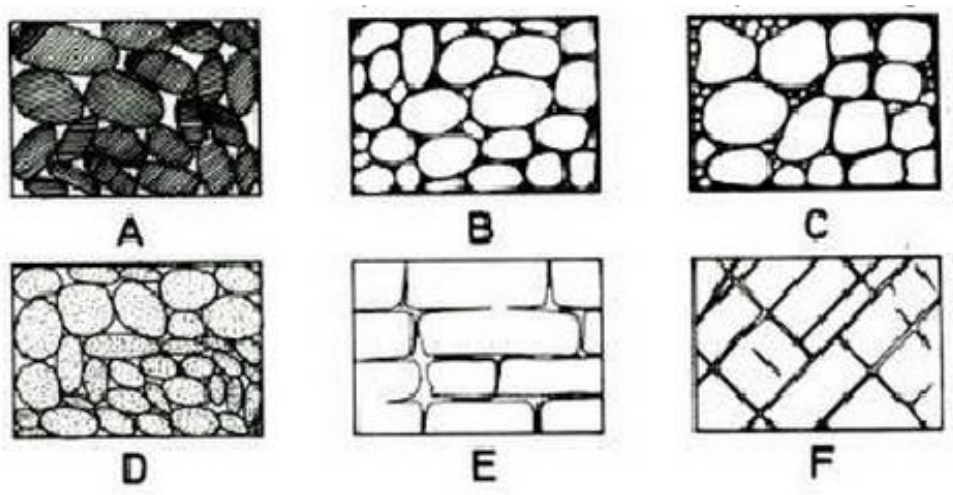


Figura 5-79. Representación esquemática de distintos tipos de rocas indicando la relación entre su textura y porosidad.

Fuente: (Meinzer, 1942)

En la Figura 5-79 A) Depósito sedimentario de granulometría homogénea y gran porosidad. B) Depósito sedimentario de granulometría homogénea cuya porosidad ha disminuido por cementación de sus intersticios con materias minerales. C) Depósitos sedimentarios de granulometría heterogénea y escasa porosidad. D) Depósito sedimentario de granulometría homogénea, formado por elementos que a su vez son porosos, por lo tanto, la porosidad es muy elevada. E) Roca porosa por disolución. F) Roca porosa por fragmentación.

5.1.3.4.2 Movimiento de agua en medios fracturados

Las discontinuidades interconectadas en las rocas fracturadas se consideran el canal principal del flujo de aguas subterráneas, si se entiende como un macizo rocoso compuesto por bloques de roca prácticamente impermeable. A esta aproximación se le llama discontinua o discreta. Pero también es posible una aproximación de tipo continua que considera la masa de roca como un medio equivalente hidráulicamente a un medio poroso; no obstante, tratar los bloques de roca de esta manera debe cumplir con los parámetros que obedezcan la ley de Darcy; en caso contrario, debe ser descrito en relación a fracturas individuales o grupos de fracturas (Domenico & Schwartz, 1998).

Debido a que la zona de estudio es tectónicamente inactiva, la permeabilidad secundaria, que se presenta por las discontinuidades es generada por fracturas, y diaclasas, tal y como se observa en el esquema de la Figura 5-80. Estas estructuras aparecen desde la superficie hasta algunas decenas de metros de profundidad o, en algunos, casos hasta unos pocos cientos de metros bajo la superficie (Freeze & Cherry, 1979).

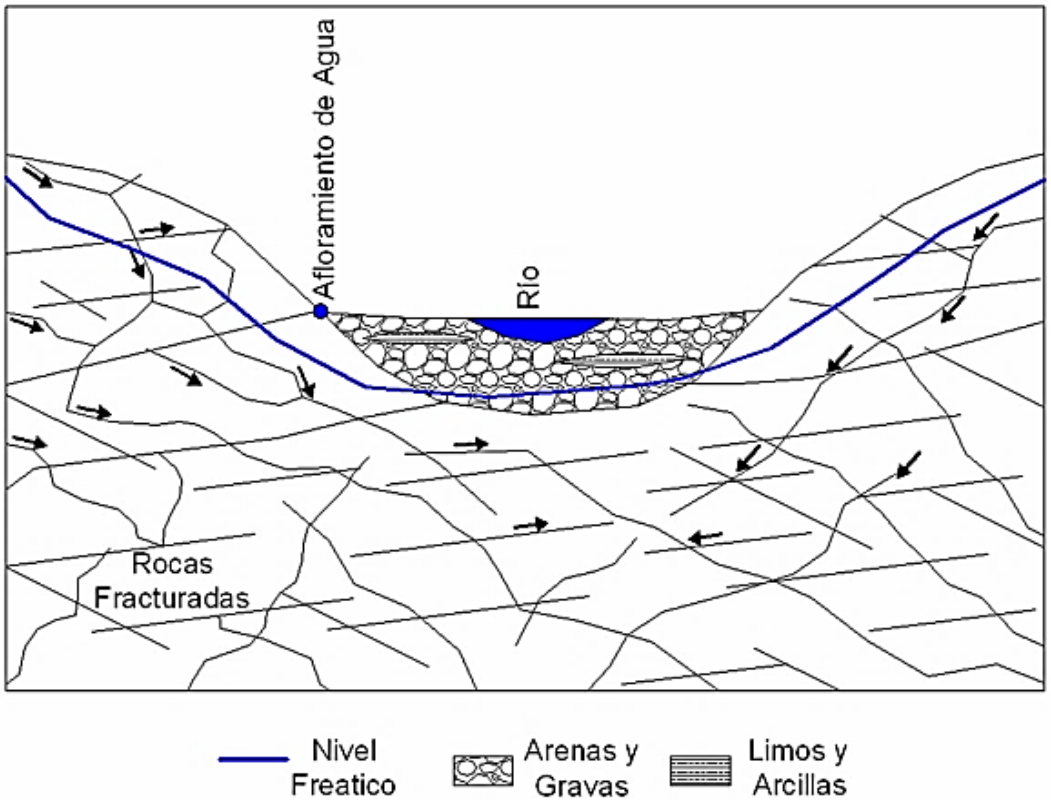


Figura 5-80. Esquema de movimiento del agua en medios fracturados.

Fuente: (Benítez, 1972)

La permeabilidad debida al fracturamiento de rocas no alteradas en general oscila entre 0,001 y 10 m/día. Un mismo tipo de roca puede proporcionar caudales diferentes, aun en la misma unidad geológica. Se obtienen por lo general mayores caudales en climas húmedos que en climas secos por razones obvias de recarga. En general en casi todos los pozos excavados en rocas plutónicas, los caudales de explotación son bajos, comprendidos entre 0,5 – 1,5 l/s. (Freeze & Cherry, 1979)

5.1.3.4.3 Movimiento de agua en medios porosos (suelos)

Un aspecto fundamental que permite la infiltración de agua al medio fracturado es la presencia de perfiles de meteorización de suelos. Estos depósitos se comportan como una unidad hidrogeológica que transmite agua lentamente hacia los niveles más profundos, que se encuentran menos meteorizados. Estos últimos pueden llegar a comportarse como una unidad que almacena agua, cuyos poros pueden estar llenos parcialmente o pueden estar secos en temporadas sin lluvias (Meinzer, 1942)

5.1.3.4.4 Proceso de recarga

En términos generales se denomina recarga al proceso por el que se incorpora agua procedente del exterior a una unidad hidrogeológica. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otra unidad. (Custodio & Llamas, 1983).

Actualmente se conocen por lo menos cuatro maneras diferentes para recargar una unidad hidrogeológica (Custodio & Llamas, 1983). La producida por la lluvia (directa o difusa), por cuerpos de agua superficial (ríos, arroyos, quebradas, etc.), por transferencia desde otras unidades hidrogeológicas y la generada a partir de acciones antrópicas (sobre-riego, fugas de redes de abastecimiento, saneamiento y regadío e infiltraciones desde embalses y depósitos).

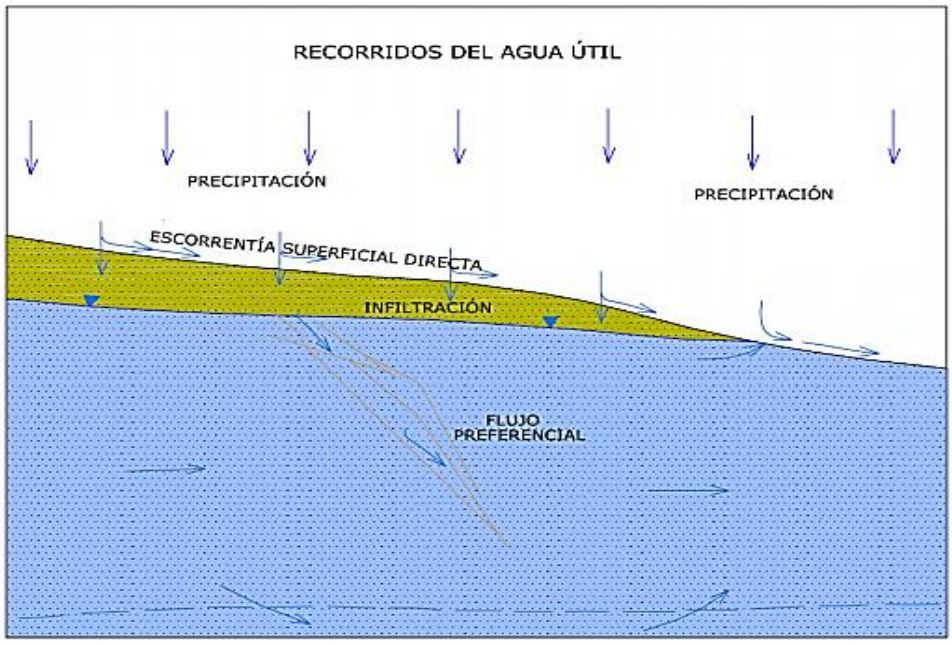


Figura 5-81. Esquema de recarga por precipitación

Fuente: Tomada y modificada de Custodio & Llamas (1983).

En medios fracturados, la recarga está en función de las condiciones hidrogeológicas del subsuelo, especialmente por la distribución de los suelos supra-yacentes y del patrón de fracturamiento de la roca (Gleeson, Novakowski, & Kyser, 2009), Figura 5-81.

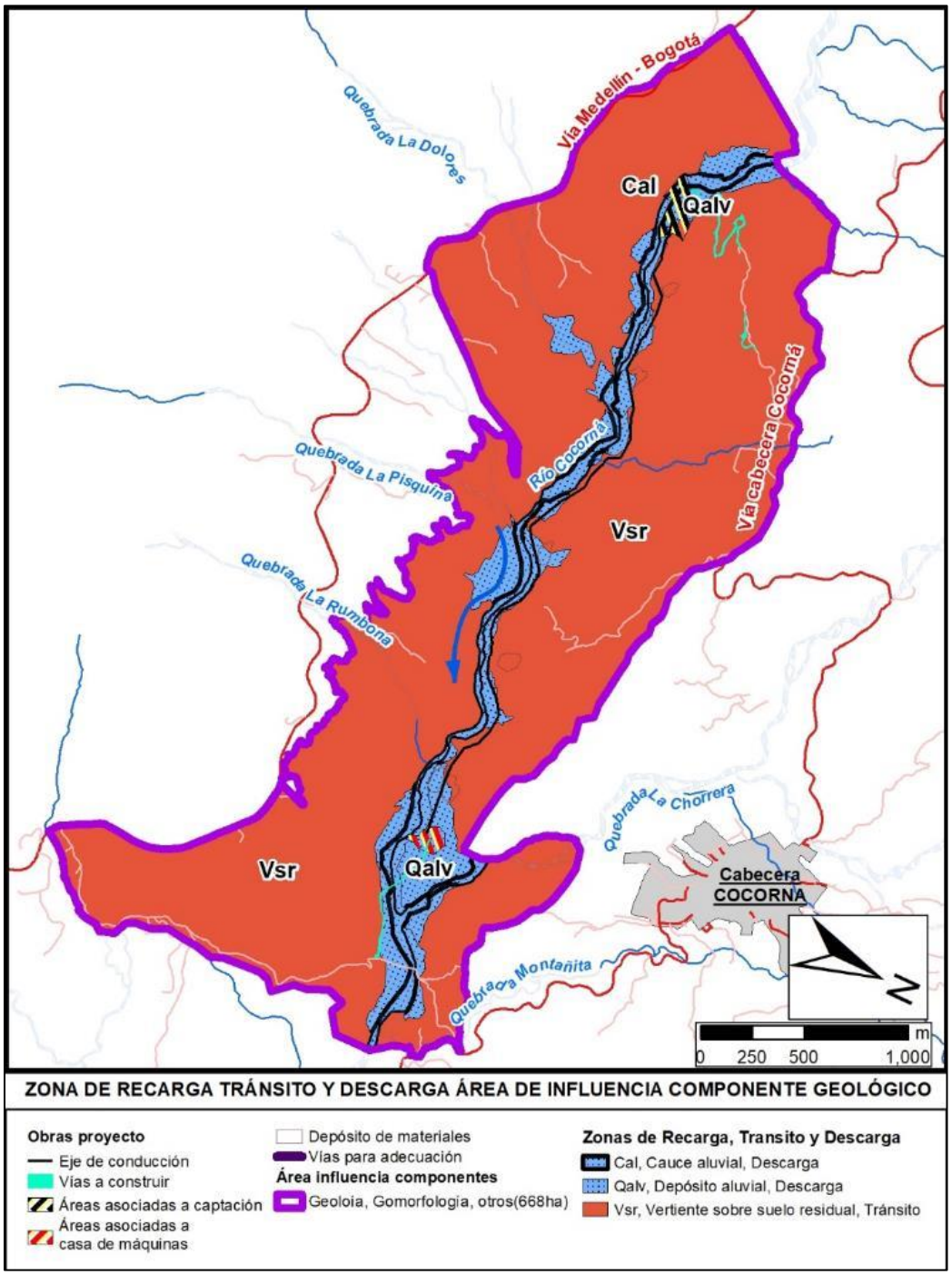


Figura 5-82. Zonas de recarga en la zona de estudio del proyecto hidroeléctrico.

El proyecto está ubicado en la cuenca del río Cocorná. Sus obras se desarrollan en el cañón del río, iniciando por la captación y obras de derivación en su margen izquierda, en zonas de acumulación aluvial, encañonado por las rocas ígneas del Batolito Antioqueño(Kcda). La importancia hidrogeológica de estas zonas en relación con los acuíferos libres, indican zonas de recarga en la parte alta de la cuenca del río Cocorná, ya que la configuración estructural de la roca, sus fracturas permiten el flujo de agua hacia el medio poroso en la parte baja de la cuenca, y las zonas de acumulación aluvial.

Las obras de conducción, 3,5 km, por la margen izquierda cruza por regolito de cuarzodiorita (Kcda), depósitos de ladera, y depósitos aluviales, dichas obras superficiales cruzan algunos corrientes de agua, que se deben tener en cuenta desde el punto de vista constructivo del proyecto.

La casa de máquinas se desarrollará en zonas de acumulación aluvial, con excavación aproximada de 8 metros, la interacción entre el medio poroso y los flujos de agua alrededor de la obra debe ser analizada a detalle para el diseño definitivo del proyecto. Cabe resaltar, que las obras de superficie tienen un menor impacto en el acuífero, sin embargo, el análisis a escala de obra dará soluciones ambientales para el manejo adecuado de la obra - acuífero, y así, disminuir los impactos y llevar a una estabilidad los sistemas que rodean la obra.

Se deben resaltar la relación del sistema acuífero del área de influencia del proyecto con las formaciones geológicas en mención, ya que, de acuerdo con la información recolectada los de depósitos aluviales es la unidad de mayor extensión, comportándose como acuífero libre. Al contrario, las formaciones con limitados recursos de agua subterránea, acuitardo en regolito, acuitardo en depósitos de ladera, que corresponde aproximadamente al 80% del área de estudio donde se desarrollarán algunas obras de ingeniería (adecuación de taludes para vía de acceso y tramos cortos de las obras de derivación).

5.1.4 Geotecnia

5.1.4.1 Caracterización geología - geomorfológica y su relación con el proyecto

Los principales aspectos a tener en cuenta reposan en el carácter torrencial de la cuenca del río Cocorná evidenciado en las numerosas terrazas aluvio-torrenciales de carácter confinado que se encuentran en el área, en estas se ubican las principales obras del proyecto, la captación (Foto 5-61), gran parte de la conducción y la casa de máquinas (Foto 5-70), las secciones de tubería antes mencionadas deberán procurar conservarse sub-superficiales para evitar posibles daños asociados a crecientes súbitas. Esta condición, sin embargo, no representa el total de las terrazas, sino que ocupa solo aquellas cuya diferencia de altura respecto al río es inferior a 10 m. Además, se deben considerar las zonas con socavación lateral de orillas como de especial cuidado, para evitar el desprendimiento del suelo base que alberga las obras. (Foto 5-69).

Respecto a las vías de acceso, en la margen izquierda del río Cocorná, en la vereda La Placeta se localiza la vía de acceso a captación, esta transcurre en parte por un depósito de vertiente de profundidad aproximadamente superior a los 50 m, este depósito por sus características geotécnicas deberá ser atendido con especial cuidado en términos de estabilidad de taludes, los diseños de la vía de acceso deberán acudir a diseños conservadores en términos de factores de seguridad. (Foto 5-62)

En general la geología del proyecto es estable (Foto 5-63, Foto 5-64, Foto 5-65, Foto 5-67), con buena capacidad para albergar obras y sin rasgos tectónicos ni sísmicos que puedan interferir con el proceso constructivo. Se sugiere también, tener en consideración los organales localizados en la margen izquierda para evitar su interferencia con la tubería, estos fueron localizados y caracterizados por medio de sondeos eléctricos

Se realiza el análisis a partir de perfiles geológicos para la comprensión de las secciones que presentan mayor sensibilidad a factores geológicos y geomorfológicos (Figura 5-83).

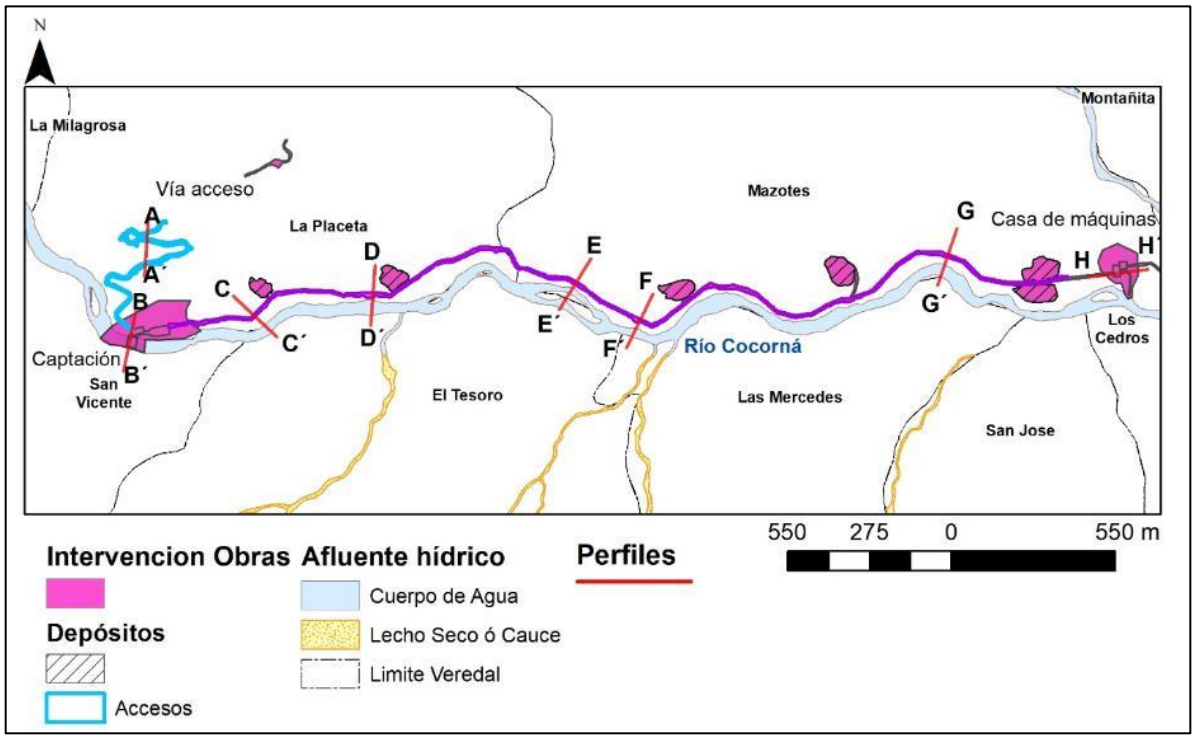


Figura 5-83 Ubicación en planta de los perfiles geológicos

5.1.4.1.1 Captación y vía de acceso

La captación se ubica geológicamente dentro de los depósitos aluvio torrenciales del río Cocorná, geomorfológicamente corresponde una planicie aluvial confinada de 4,7 ha, es decir una terraza de acumulación que limita con las laderas aledañas caracterizadas por presentar un relieve relativo contrastante.

Dicha planicie o terraza se ubica a una altura de dos metros respecto al río, esta diferencia puede significar que el terreno sea propenso a inundaciones y a avenidas torrenciales, sin embargo, su localización en la margen pasiva del río, es decir en la concavidad donde se depositan los sedimentos actualmente dentro de la dinámica fluvial, implica que no se presentan procesos de socavación lateral de orillas de manera activa.

El depósito cuenta con una profundidad de 24 m, con el nivel freático aproximadamente a los 6 m, en caso de que se requiera se debe tener en cuenta dicha condición para la realización de drenes y bombeos que permitan un óptimo proceso constructivo.

En general se trata de un sector geológicamente estable, con buena capacidad para albergar estructuras como los desarenadores, morfológicamente tiene pendientes

suaves y como depósito tiene poca cementación, lo que facilita los procesos de excavación, el suelo en la clasificación S.C.U.S. es un SM, un suelo areno limoso, de baja plasticidad, parcialmente cohesivo. (Figura 5-83, Figura 5-84 y Figura 5-85).

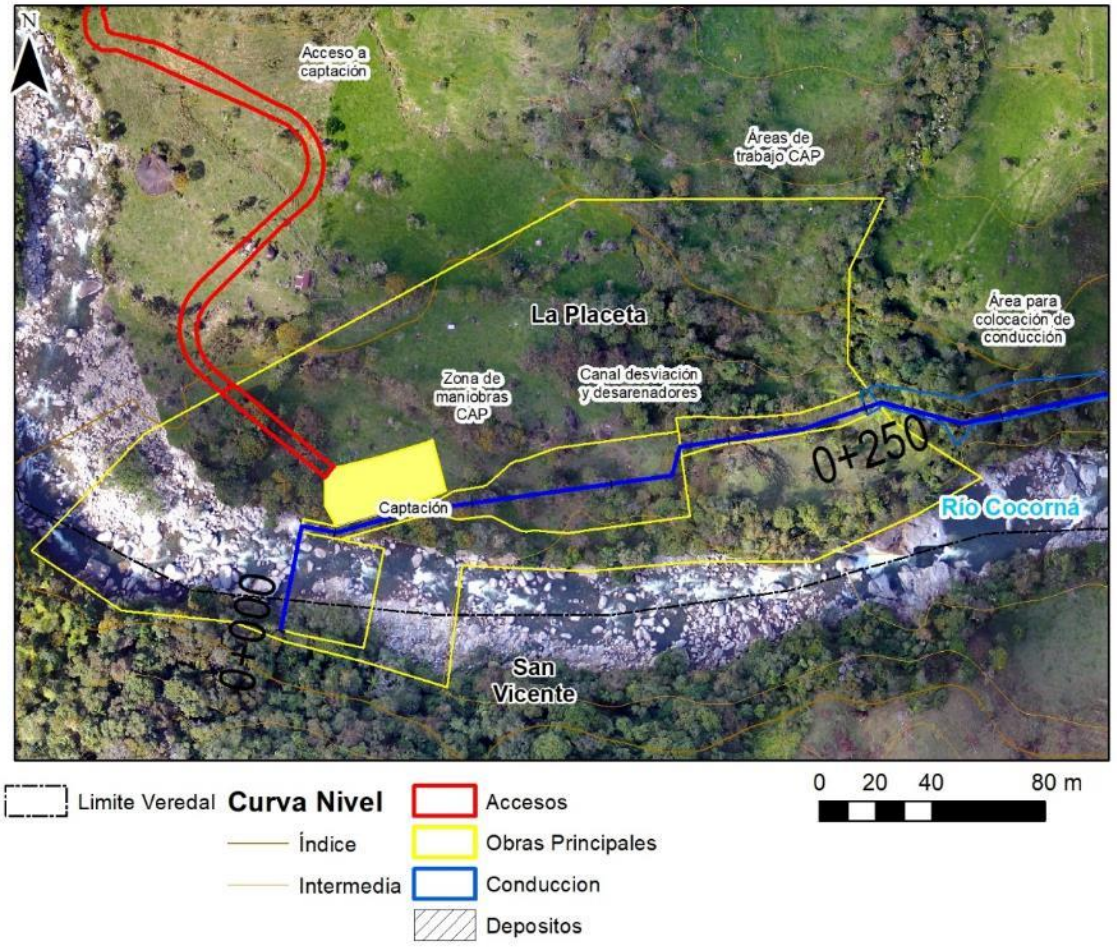


Figura 5-84 Captación y desarenadores

Foto 5-61 Vista panorámica de captación.

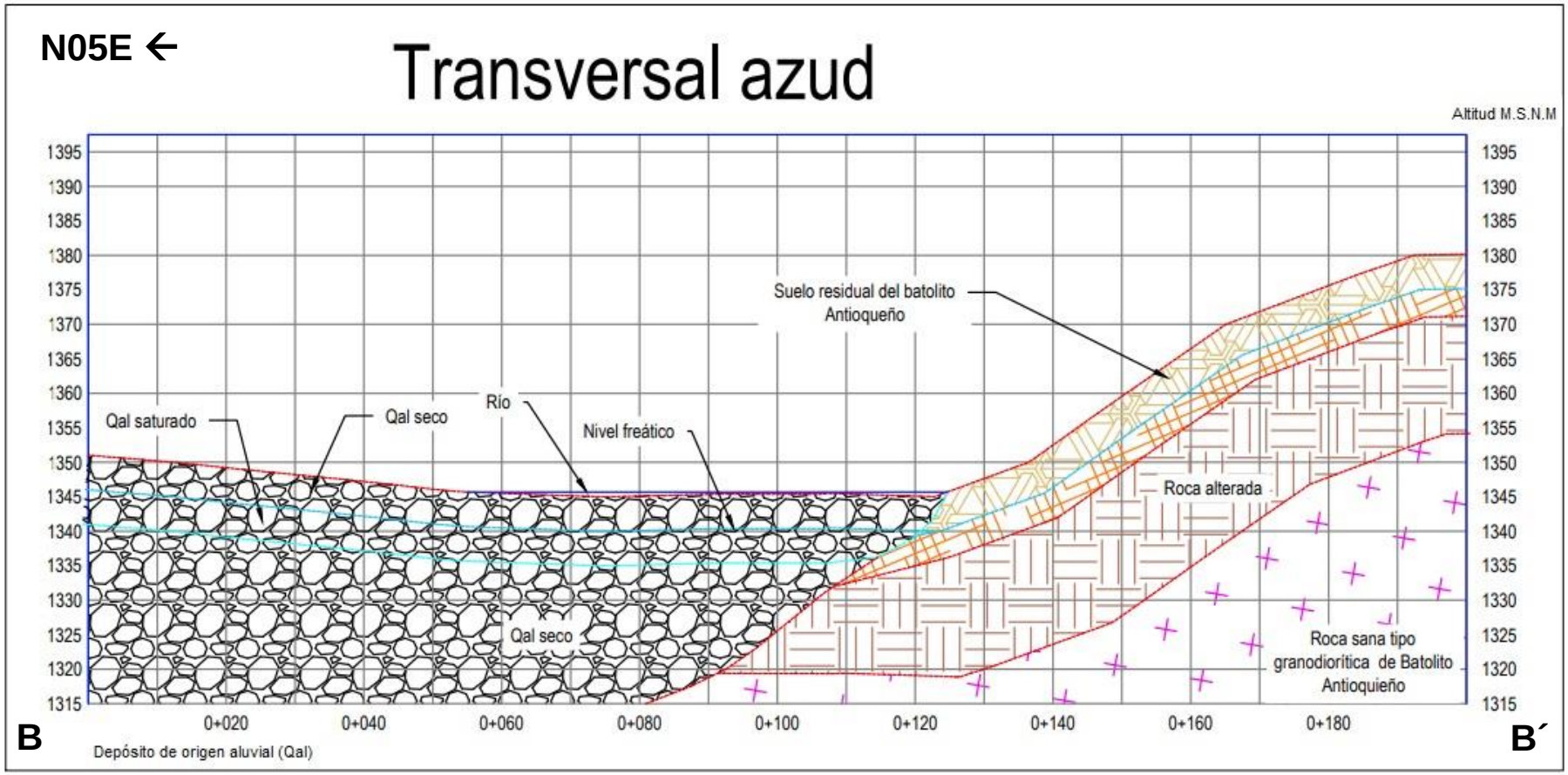


Figura 5-85 Perfil transversal al azud B-B´

- Vía de acceso a captación

La vía de acceso cuenta con una longitud total de 975,33 m, de los cuales aproximadamente 130 m se conducen sobre depósitos de vertiente (0+300 0+500), siendo esta la sección más susceptible de presentar movimientos en masa asociados a cortes de taludes por los escenarios asociados. El muestreo da como resultado la clasificación S.C.U.S. SM-SC, arena limosa -arena arcillosa, de baja plasticidad.

Un tramo de 183 m dentro de la vía proyectada transcurre sobre depósitos aluvio-torrenciales estables geotécnicamente (0+900 – 0+975), el resto (662,33 m) van sobre dos secciones de suelo residual de roca granítica (0+000 – 0+300 y 0+500 - 0+900) con buenas condiciones relativas y con un horizonte saprolítico cercano (5 m) (Figura 5-83, Figura 5-86, Figura 5-87 y Figura 5-88).

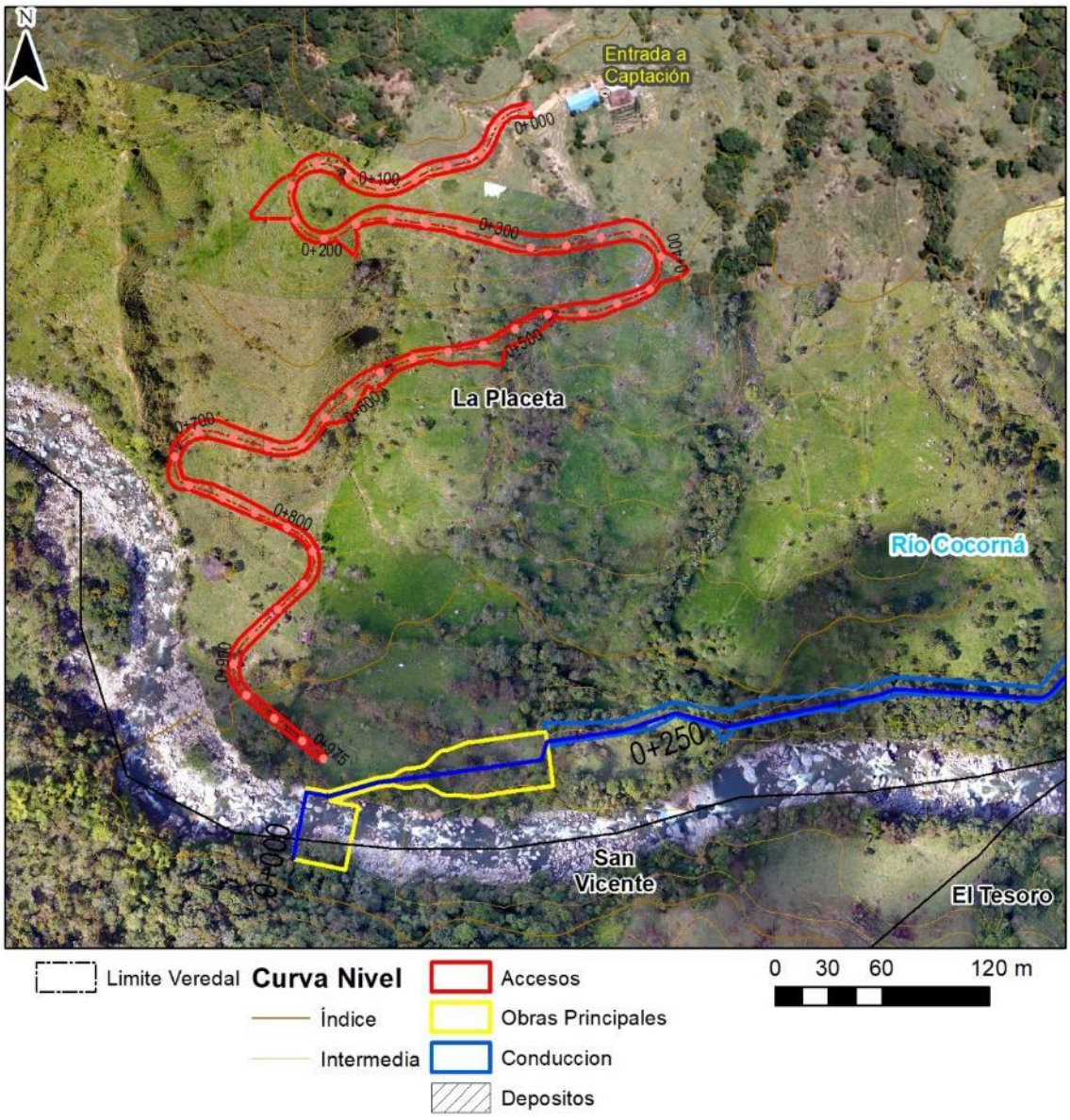


Figura 5-86 Vía de acceso a captación

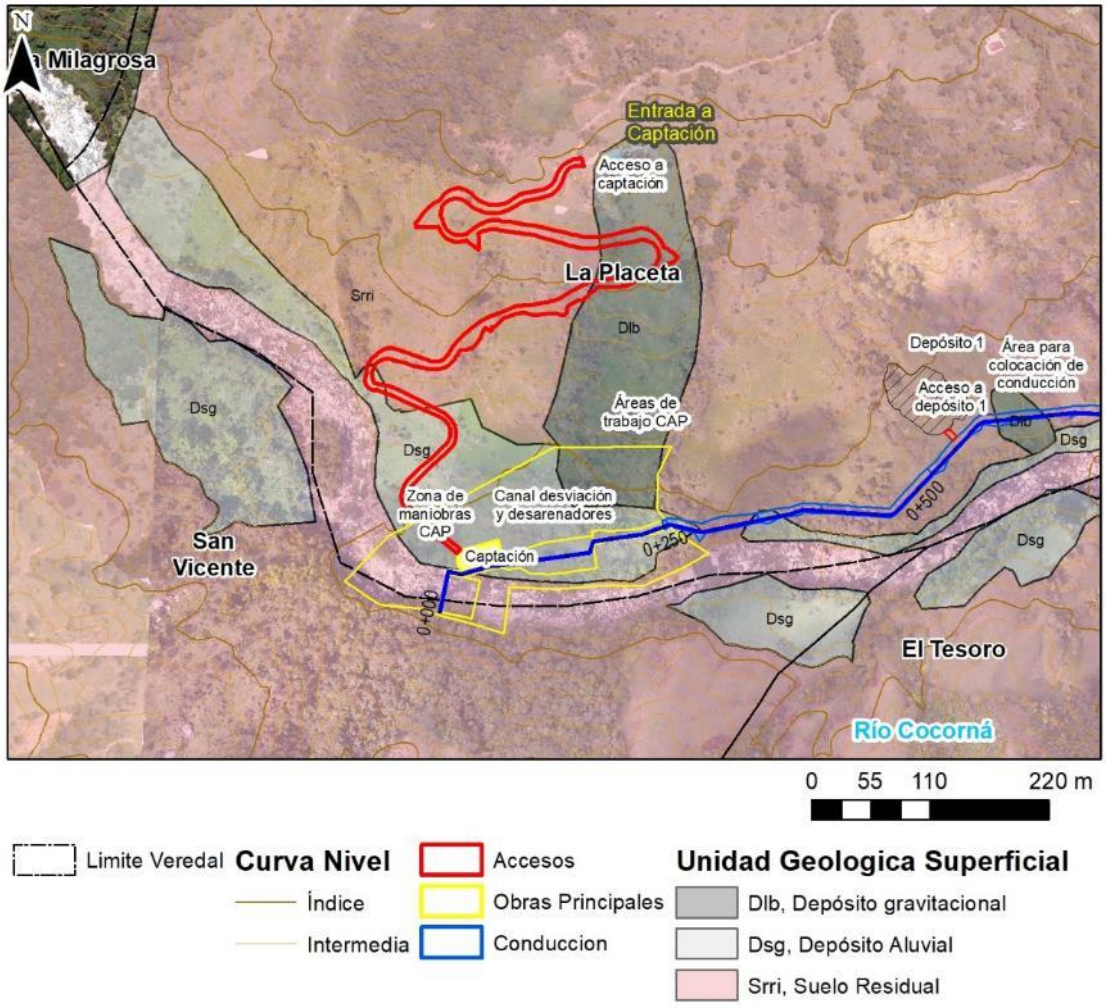


Figura 5-87 Geología de la vía de acceso a captación

Foto 5-62 Vista de depósito de vertiente vía de acceso a captación.

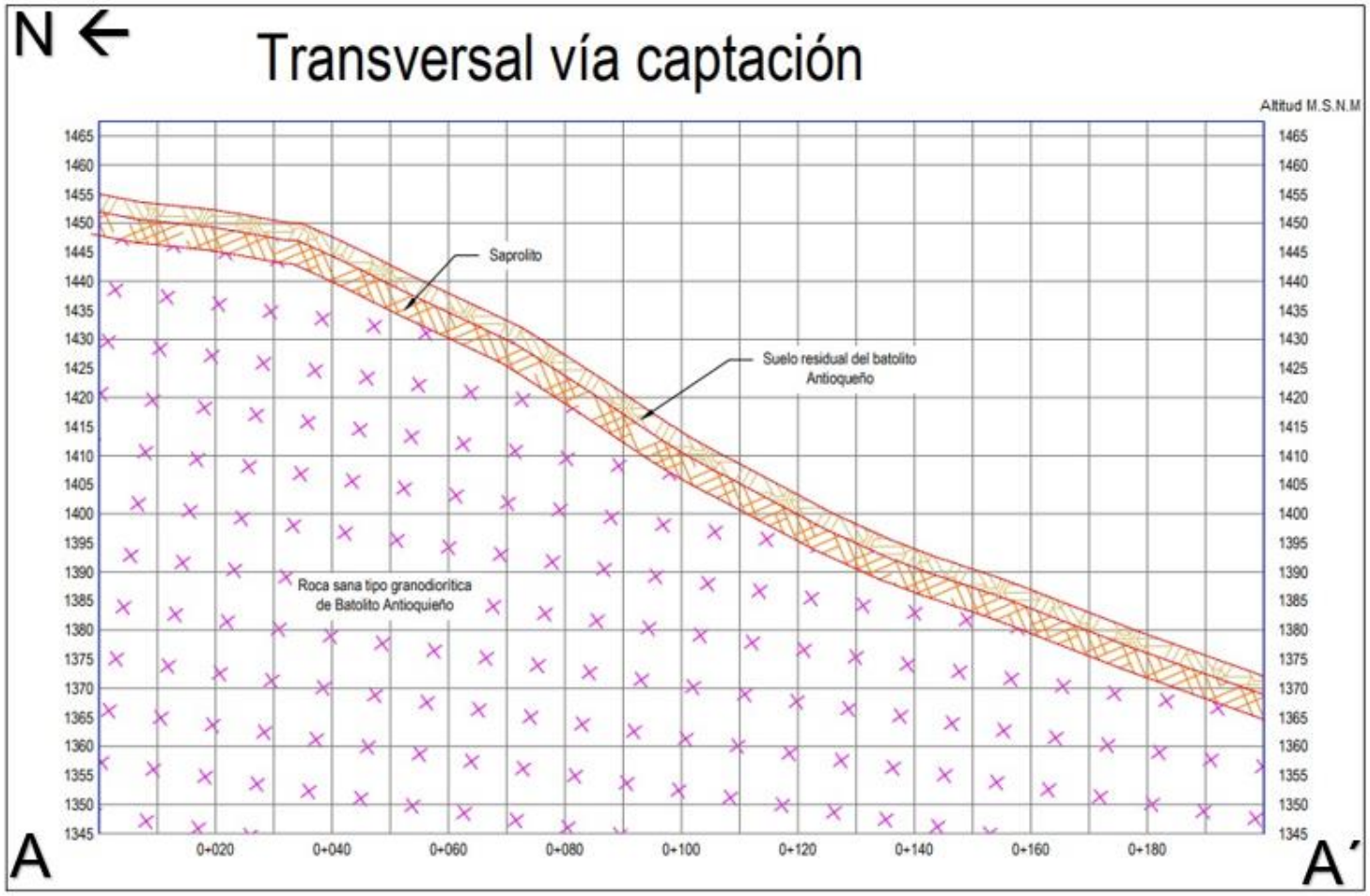


Figura 5-88 Vía de acceso a captación A-A´

5.1.4.1.2 Conducción

La conducción se conduce por zonas relativamente estables, las secciones donde se sugiere especial cuidado se describen a continuación.

Tramo: 0+250 – 0+500: En las secciones más críticas de este tramo la conducción se encuentra a menos de 10 m del río, en la sección entre 0+250 y 0+500 se encuentra un proceso de socavación lateral de orillas activo, se sugiere especial cuidado con el avance de dicho proceso (Foto 5-69). La mayor parte de esta sección transcurre entre suelo residual de Batolito Antioqueño, geotécnicamente estable, sin embargo, en la abscisa 0+600 se encuentra un depósito de vertiente, se sugiere buscar el suelo residual para el anclaje de la tubería, ya que en esta sección el depósito es poco profundo (3 m).

Ente 0+300 y 0+350 se encuentra el tramo más crítico, en esta sección la tubería se encuentra enterrada en los 2 m y los 4 m y estaría localizada a un nivel de 6 m respecto al nivel base del lecho del río. Esta sección se encuentra al frente del charco del Diablo.

Se sugiere el uso de pilas para reforzar la base de la tubería en esta sección (Figura 5-83, Figura 5-89 y Figura 5-90).

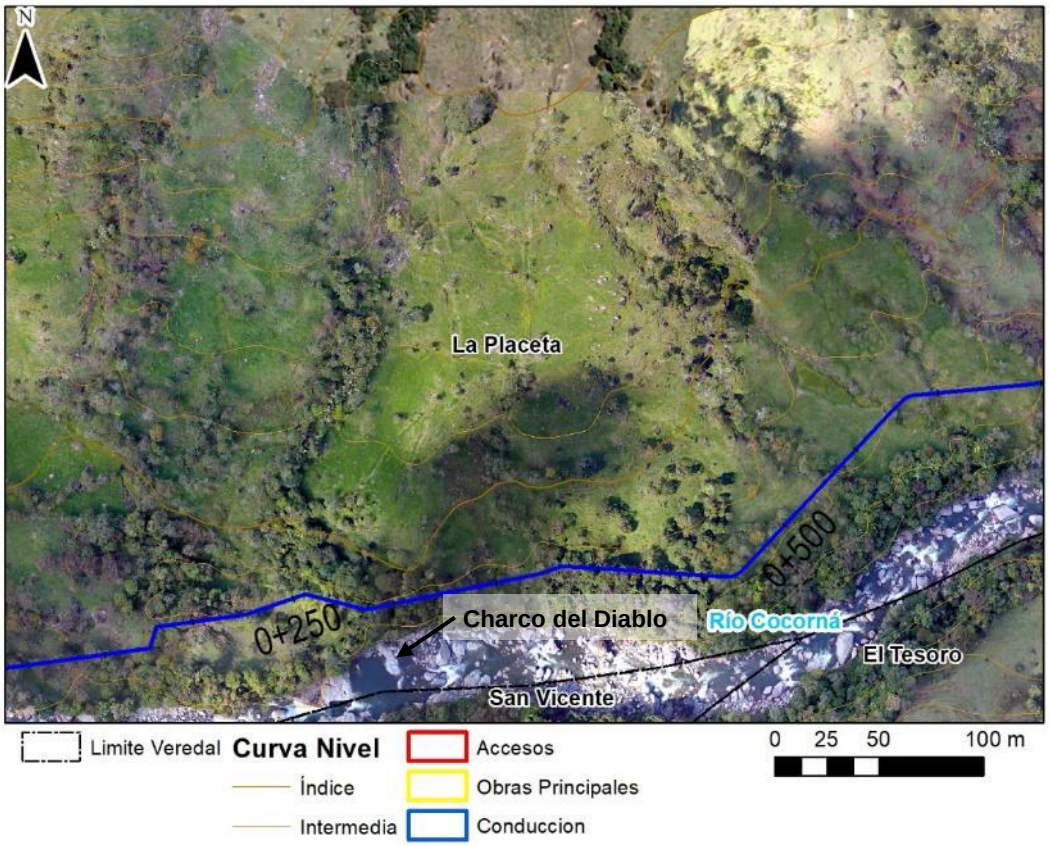


Figura 5-89 Conducción 0+250 - 0+500

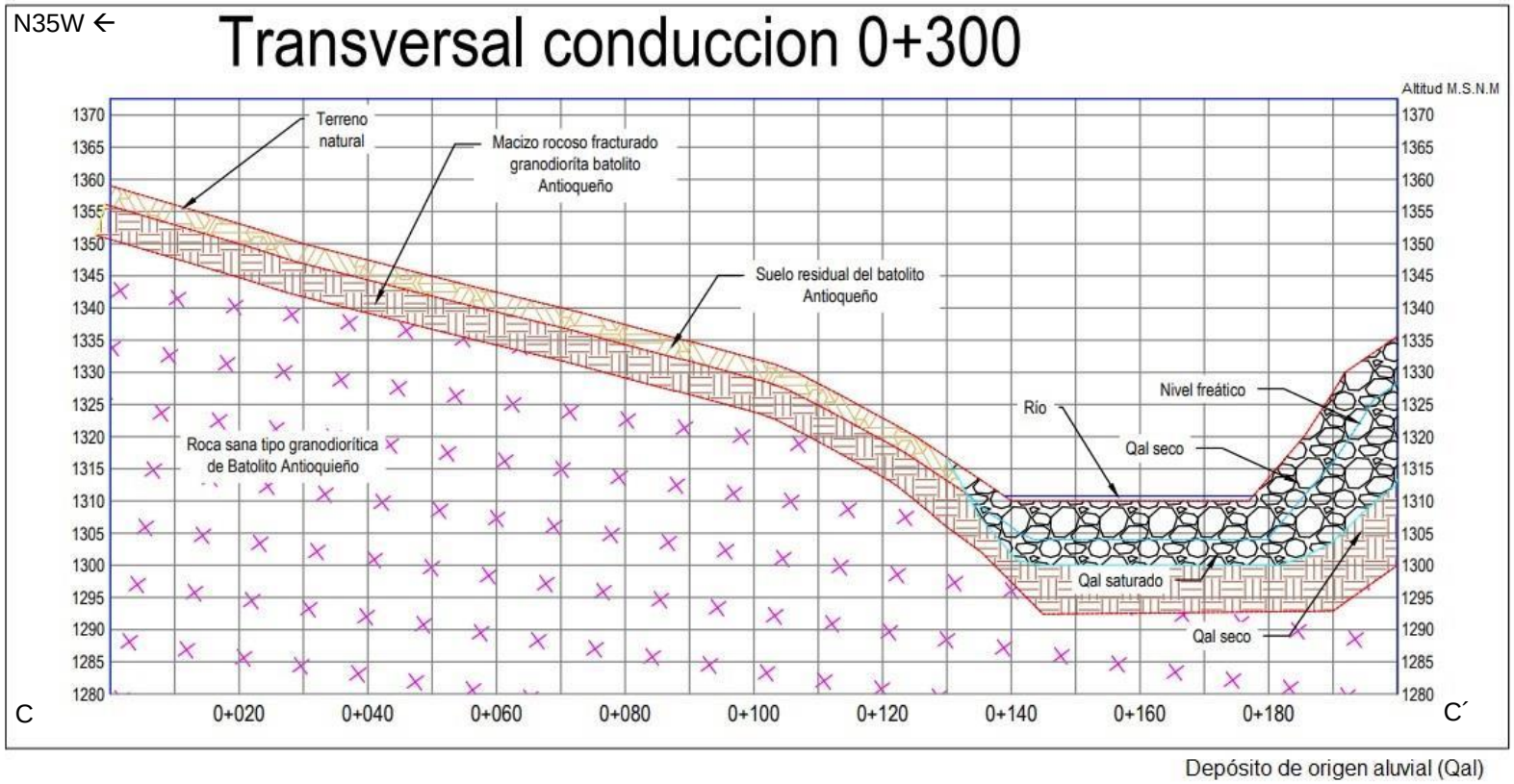


Figura 5-90 Perfil transversal a la conducción abscisa 0+ 300 C-C´

Tramo: 0+730 – 1+000: En este tramo la conducción se encuentra en su mayoría sobre depósitos aluvio-torrenciales geotécnicamente estables, con un área de 3,3 ha; esta terraza aluvial se encuentra elevada a unos 10 m del río, disminuyendo la susceptibilidad ante avenidas torrenciales e inundaciones, no se encuentran evidencias de socavación de orillas, cerca de la abscisa 1+000 se encuentra una saliente o "nariz" de suelo residual de Batolito Antioqueño que cruza 60 m la conducción. Se considera una sección estable.

La sección más crítica de este tramo está en la abscisa 0+900, donde la línea de chaflanes de los taludes de corte se encuentra a menos de 2 m del cauce, allí se hace necesaria la implementación de un muro pantalla para proteger la tubería y las excavaciones del efecto erosivo del rio. En esta sección la tubería está enterrada a menos de un metro de la superficie (Figura 5-83, Figura 5-91 y Figura 5-92).

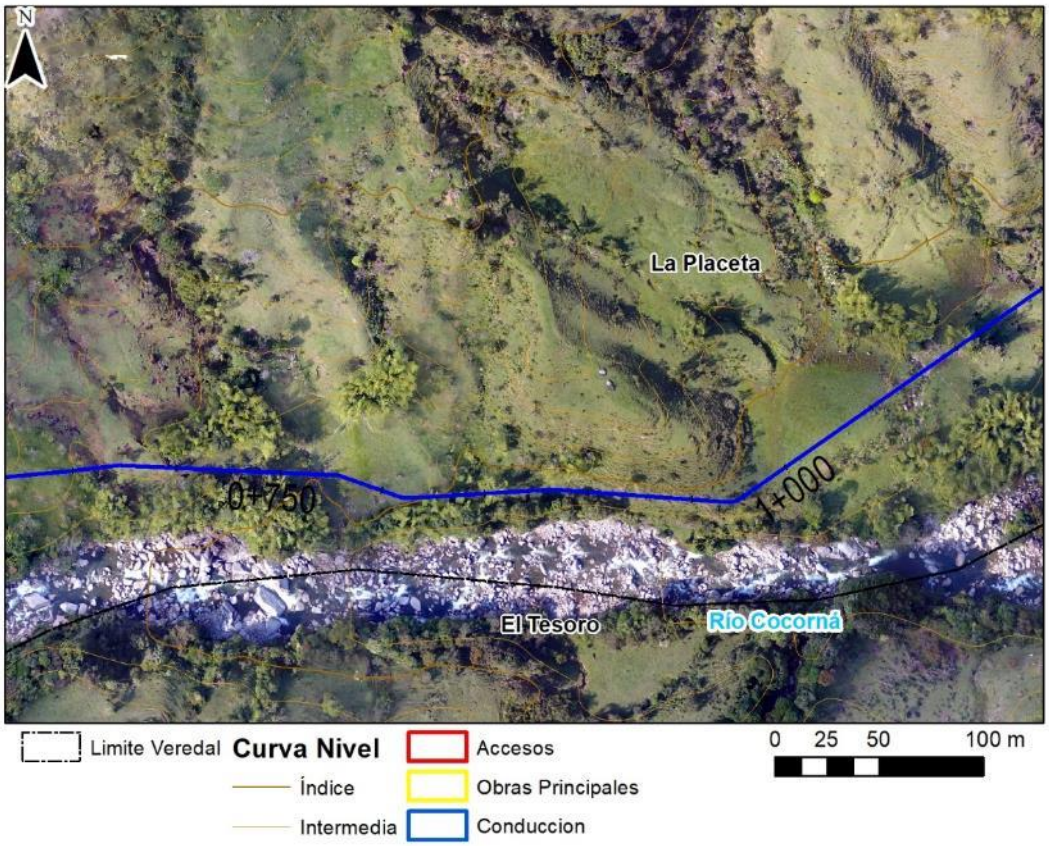


Figura 5-91 Conducción 0+730 - 1+000

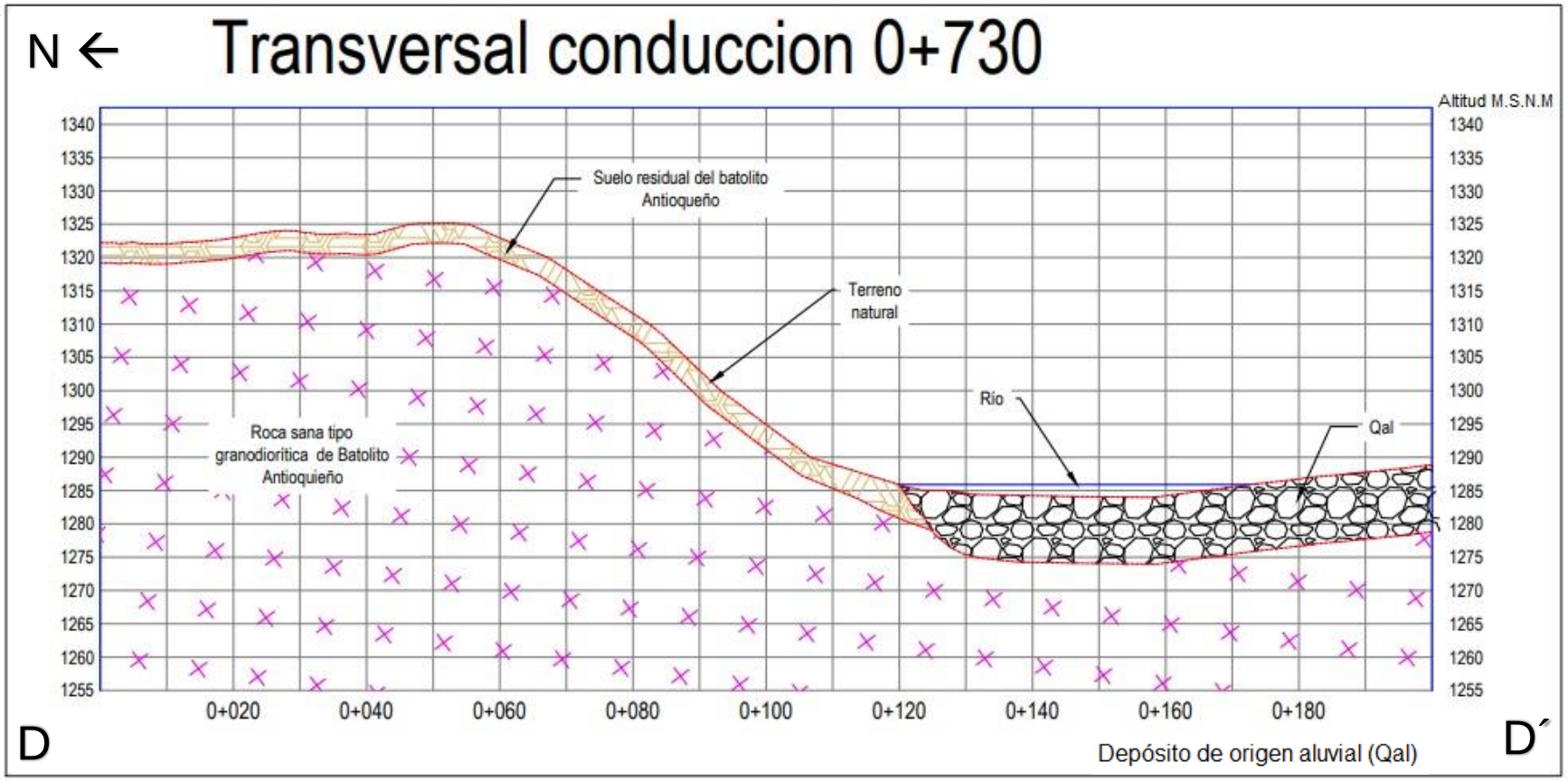


Figura 5-92 Perfil transversal a conducción abscisa 0+730 D-D´

Tramo: 1+250 – 1+500: En este tramo la conducción se encuentra en su mayoría sobre suelo residual de Batolito geotécnicamente estable, sin embargo, se debe tener precaución con el factor pendiente que puede ser moderado a pronunciado en esta sección, la altura respecto al río supera los 30 m, disminuyendo la susceptibilidad ante avenidas torrenciales, esta sección se encuentra en un quiebre del río que funciona como zona de erosión activa, facilitando la socavación lateral de orillas, se debe tener precaución con el efecto remontante de este proceso y los deslizamientos que puedan derivarse del comportamiento con efecto de abrasión hidráulica del cauce en esta sección (Figura 5-83, Figura 5-93 y Figura 5-94).

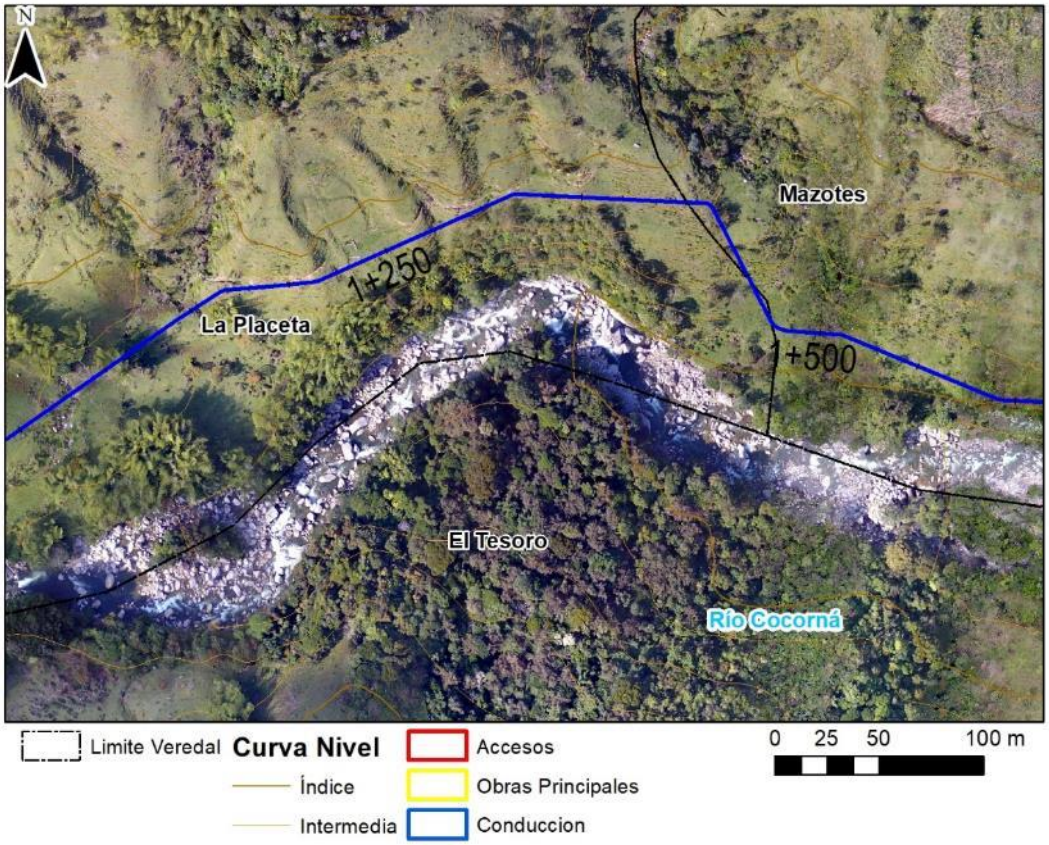


Figura 5-93 Conducción 1+250 – 1+500

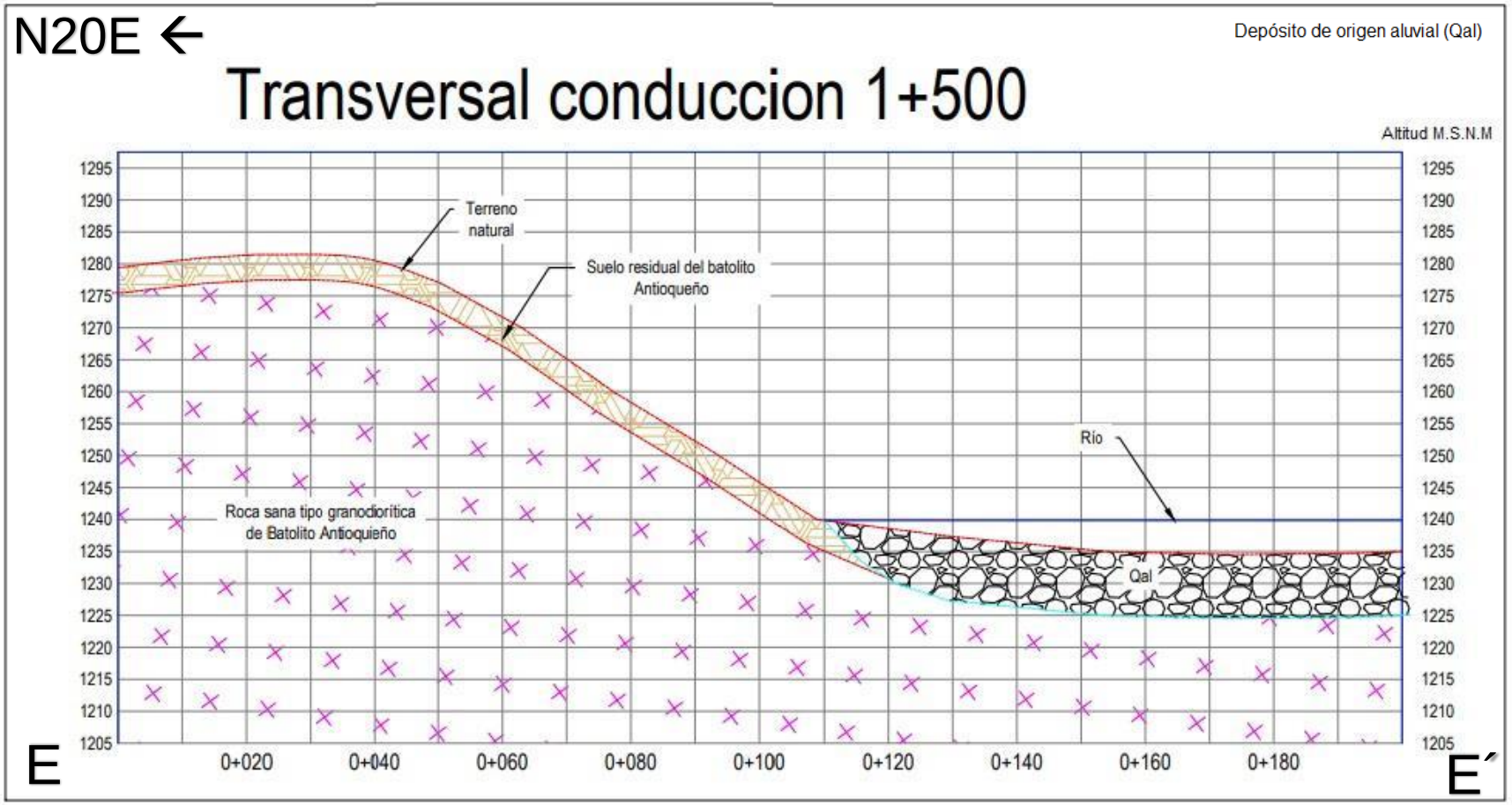


Figura 5-94 Perfil transversal a conducción abscisa 1+500 E-E´

Tramo: 1+600 – 2+000: En este tramo la conducción corresponde a la zona cercana al puente de la Vereda Mazotes, se encuentra entre suelo residual de Batolito Antioqueño y depósitos aluvio-torrenciales, geotécnicamente estables, sin embargo, se debe tener precaución entre la abscisa 1+500 y la 1+750 con la cercanía de la tubería al escarpe de erosión que forma el río y que hace parte de la dinámica de erosión activa del mismo, la altura respecto al río en su tramo más cercano tiene aproximadamente 7 m, lo que mitiga ligeramente la susceptibilidad ante avenidas torrenciales.

En este tramo la sección crítica corresponde a la abscisa 1+600 donde la tubería va en terrada entre unos 2 m y 3 m del río, allí se encuentra a menos de 1 m en medidos en la horizontal del río (Figura 5-83, Figura 5-95 y Figura 5-96).

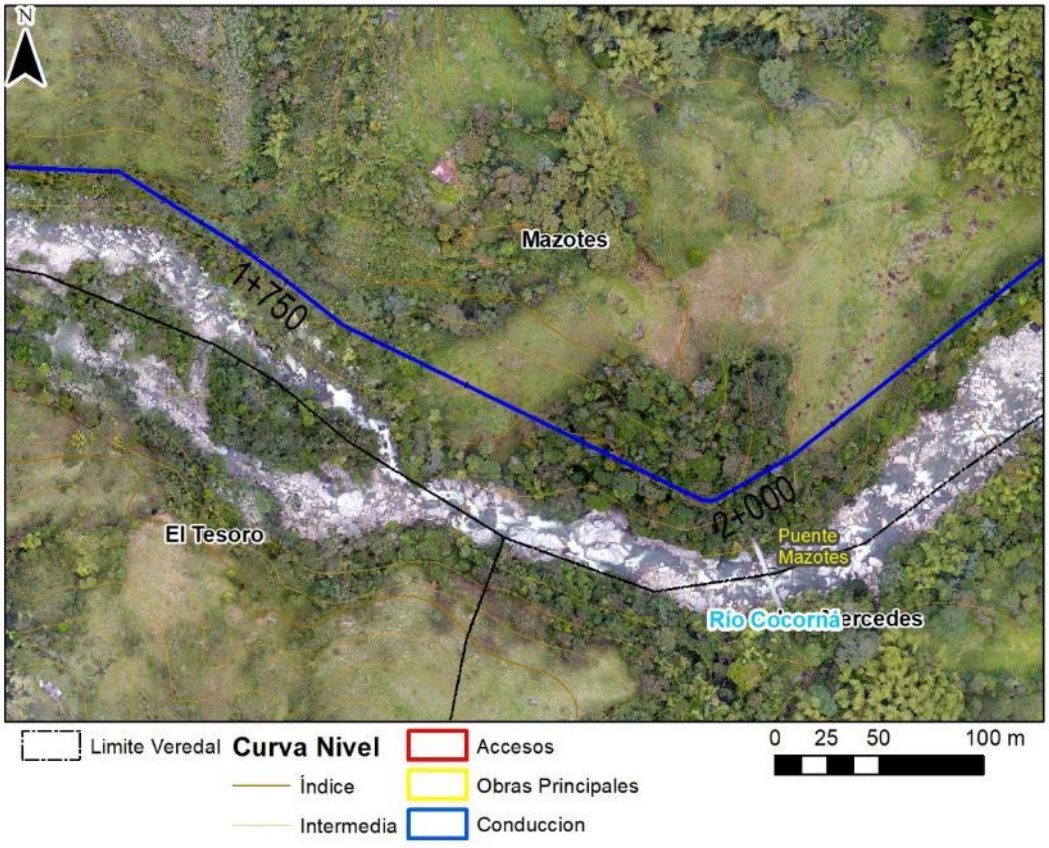


Figura 5-95 Conducción 1+650 - 2+200

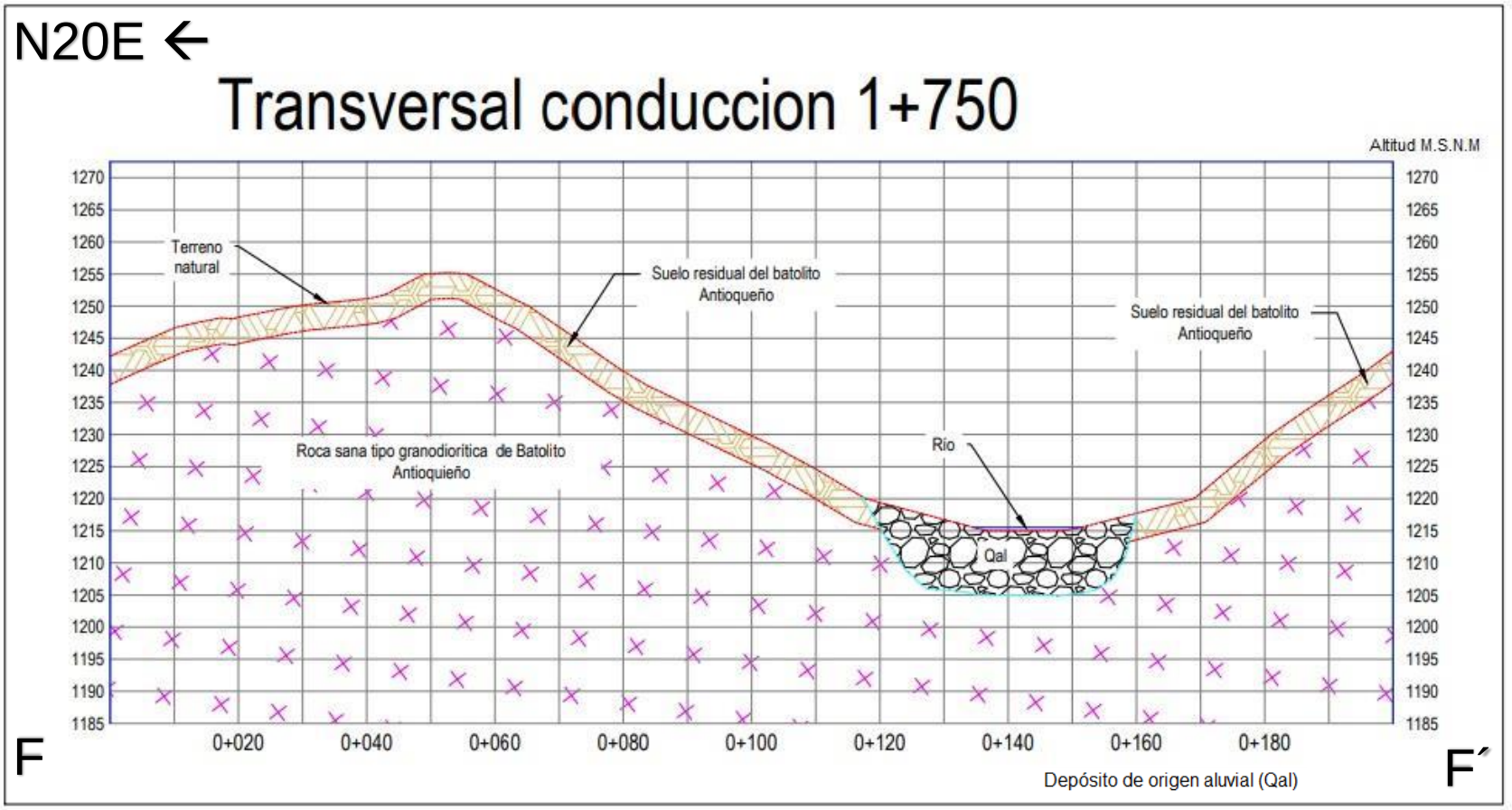


Figura 5-96 Perfil transversal a conducción abscisa 1+750 F-F´

Tramo: 2+750 – 3+250: En este tramo la conducción va en su mayoría por depósitos aluvio-torrenciales, geotécnicamente estables, se aleja de los organales que transcurren a media ladera lo que facilita la estabilidad de la sección. sin embargo, se debe tener precaución entre la abscisa 3+000 y la 3+250 por la cercanía de la tubería al meandro que forma el río y que hace parte de la dinámica de erosión activa del mismo, se identificaron procesos de socavación lateral de orillas y movimientos en masa originados por esta dinámica en esta sección. Esa esta sección la tubería se encuentra enterrada unos 3 m (Figura 5-83, Figura 5-97 y Figura 5-98).

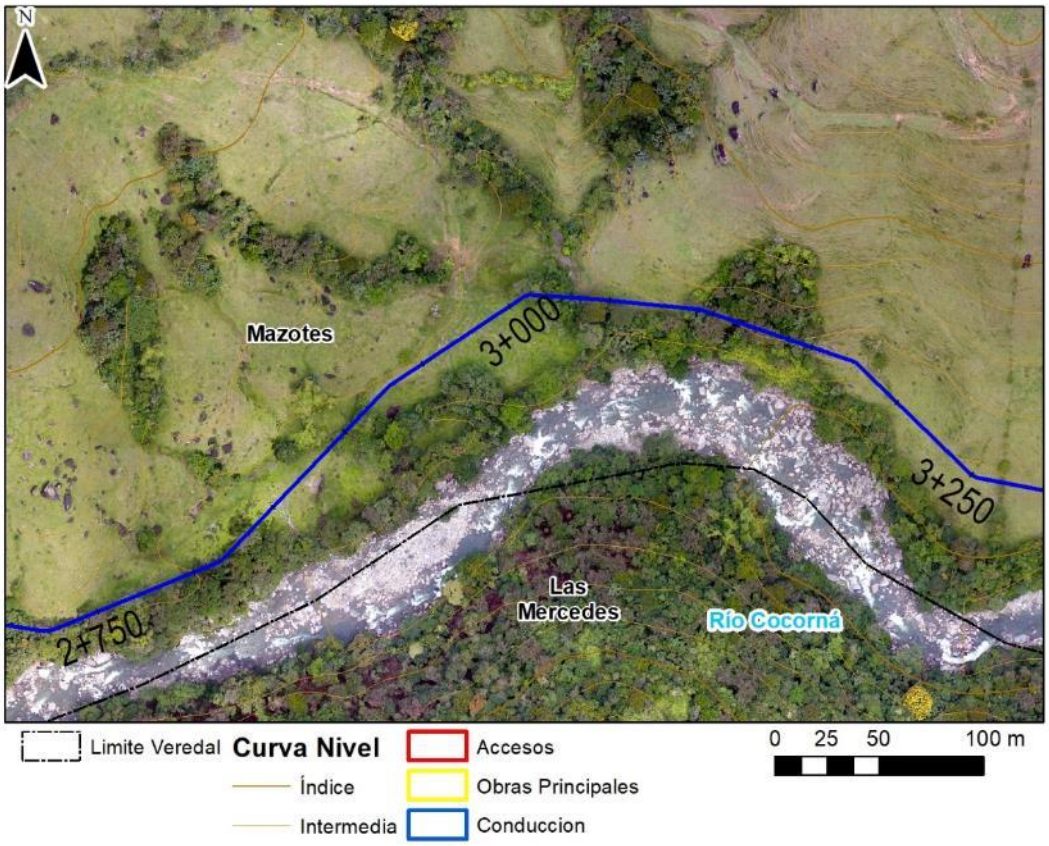


Figura 5-97 Conducción 2+750-3+250

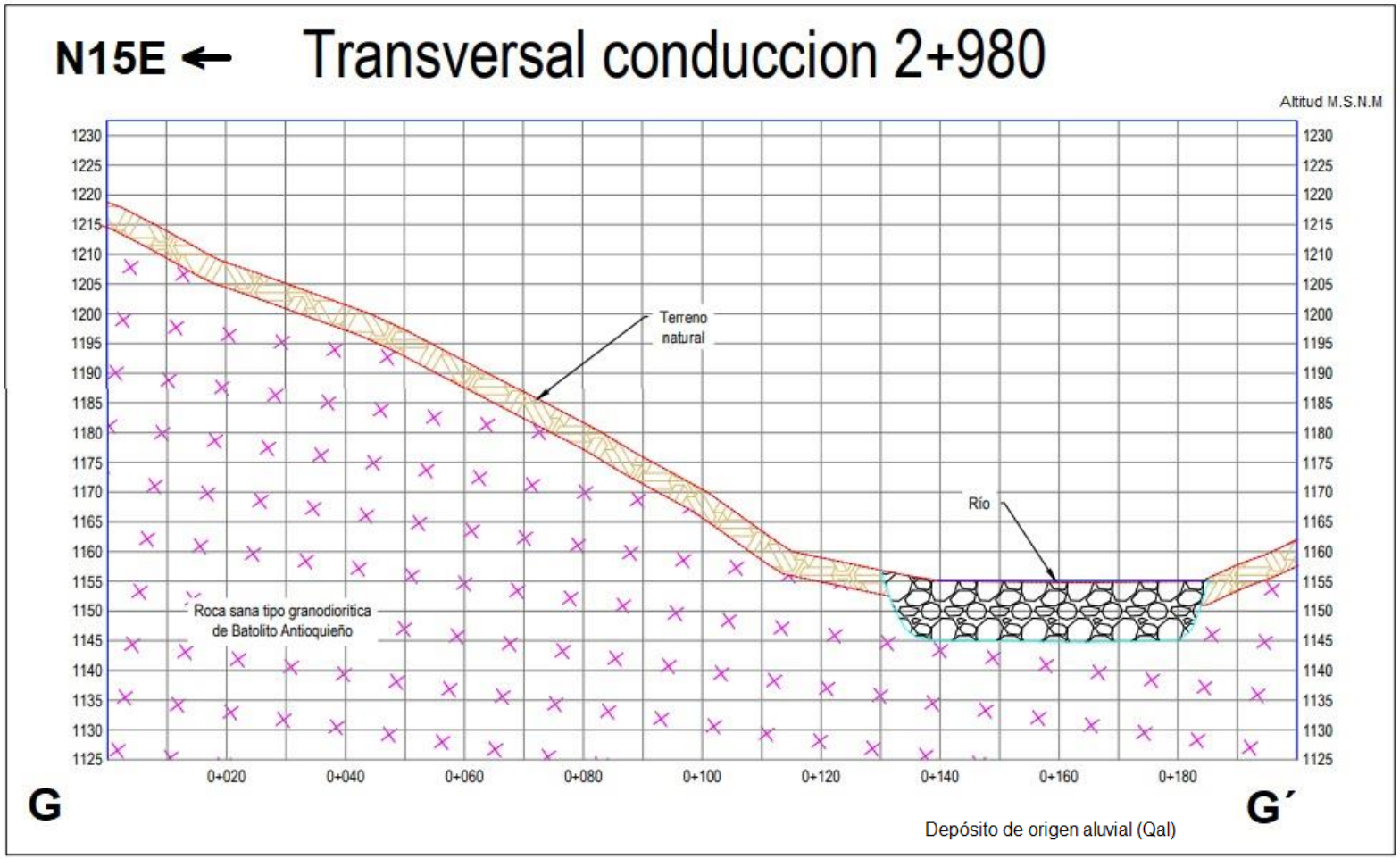


Figura 5-98 Perfil transversal a la conducción abscisa 2+980 G-G´

Foto 5-63 Vista zonas estables conducción

Foto 5-64 Vista zonas estables conducción

Foto 5-65 Vista zonas estables conducción

Foto 5-66 Vista terrazas estables conducción

Foto 5-67 Vista terrazas estables conducción

Foto 5-68 Vista organales margen derecha

Foto 5-69 Vista socavación lateral de orillas

5.1.4.1.3 ZODMES

El depósito 1 se localiza sobre suelo residual de Batolito Antioqueño, en una ladera de pendiente moderada con baja incisión, estable y con topografía adecuada para albergar material (Figura 5-99). De igual manera el depósito 2 se encuentra ente el suelo residual del Batolito Antioqueño y la terraza aluvio-torrencial contigua, presenta topografía adecuada y es geotécnicamente estable (Figura 5-100).

El depósito 3 se encuentra en parte sobre suelo residual y en su mayoría se localiza sobre una terraza aluvio-torrencial elevada estable y apropiada para la disposición de materiales. El depósito 4 se localiza sobre la lengua o lóbulo de un depósito de vertiente que suaviza la morfología aledaña, se sugiere especial cuidado debido a la capacidad de soporte de este material removido, que puede ser inferior a la de la original del suelo (Figura 5-102).

Respecto a los depósitos 5 y 6 estos se encuentran sobre depósitos de terraza de carácter aluvio-torrencial, amplios y con buenas características para el acopio y disposición de materiales (Figura 5-103).

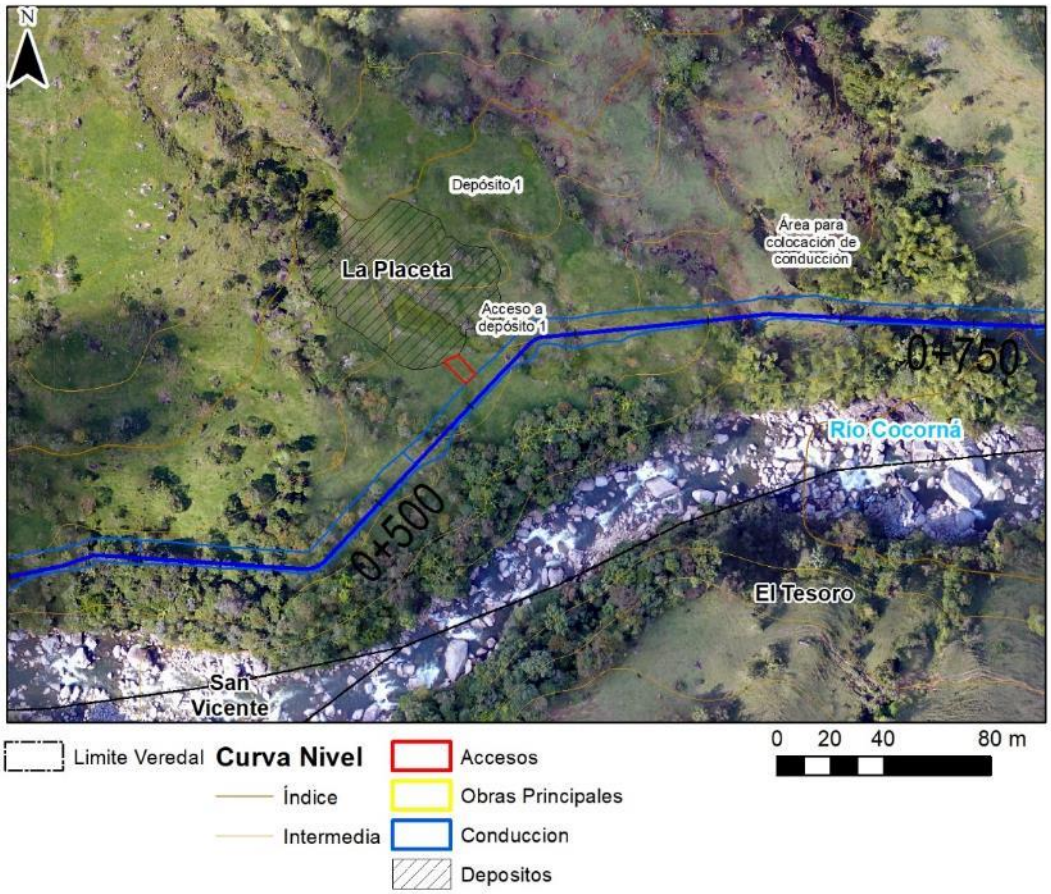


Figura 5-99 Depósito 1.

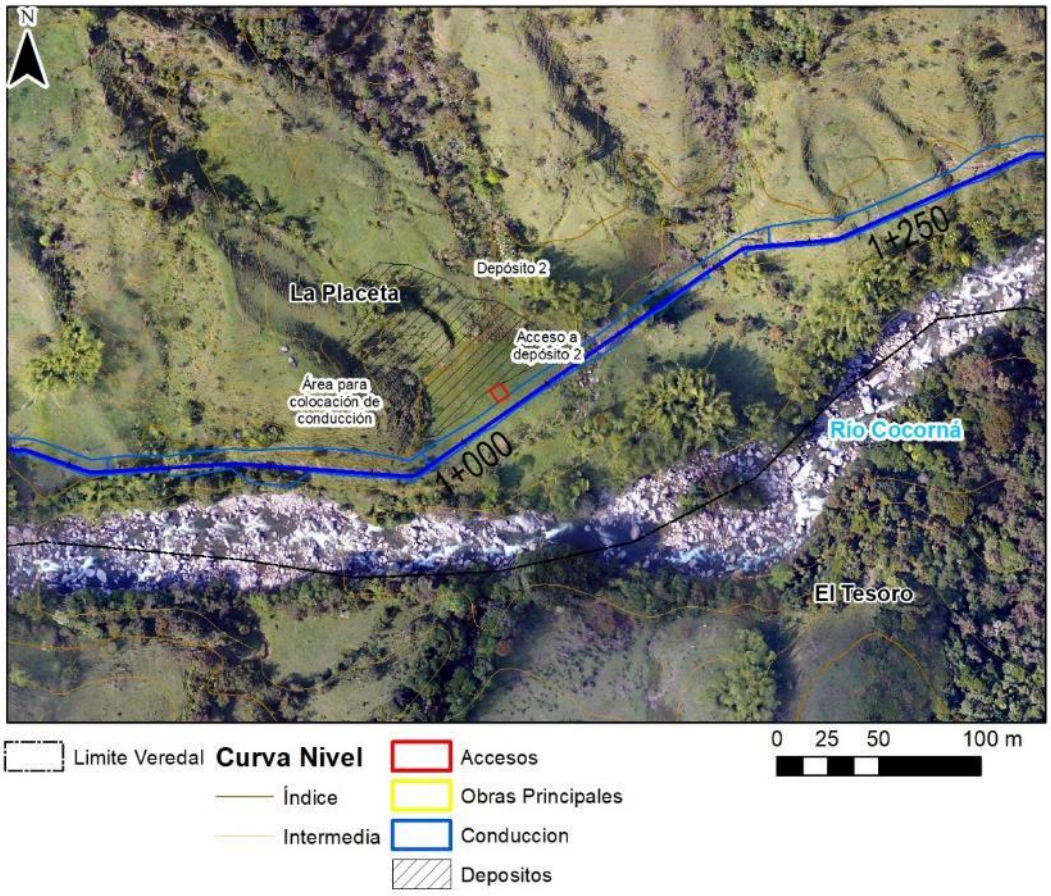


Figura 5-100 Depósito 2.

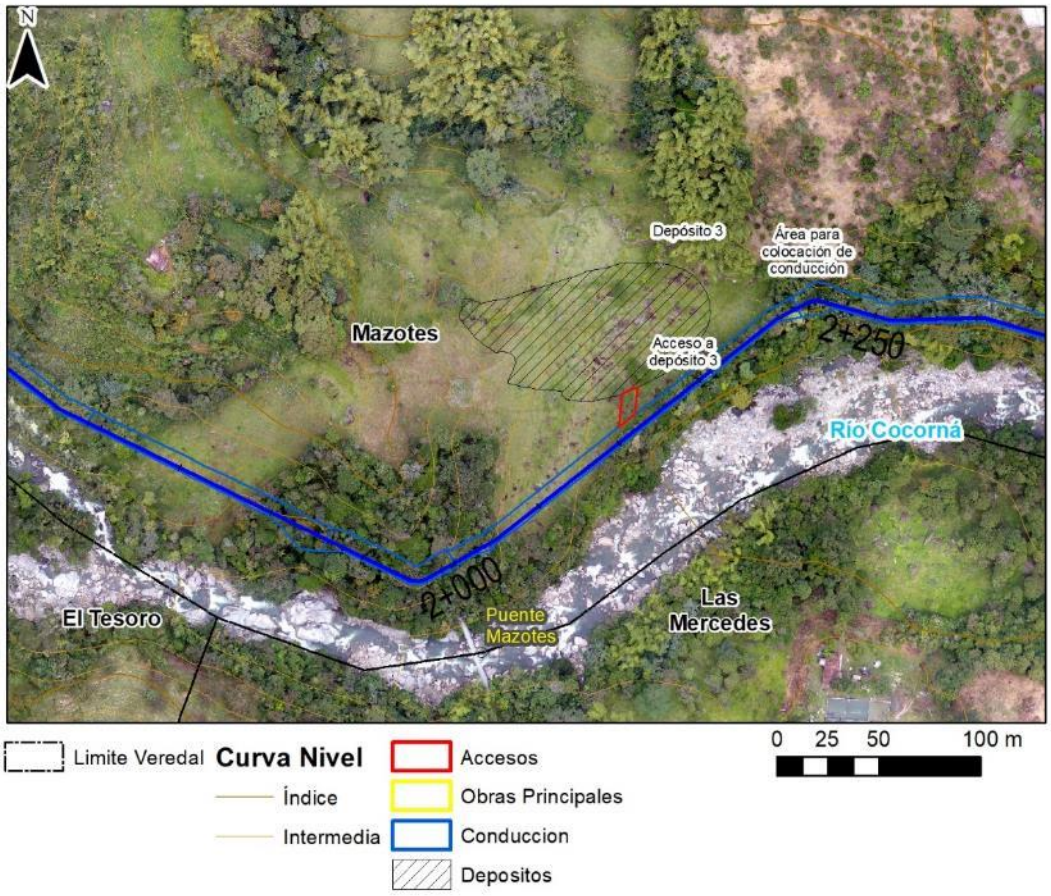


Figura 5-101 Depósito 3.

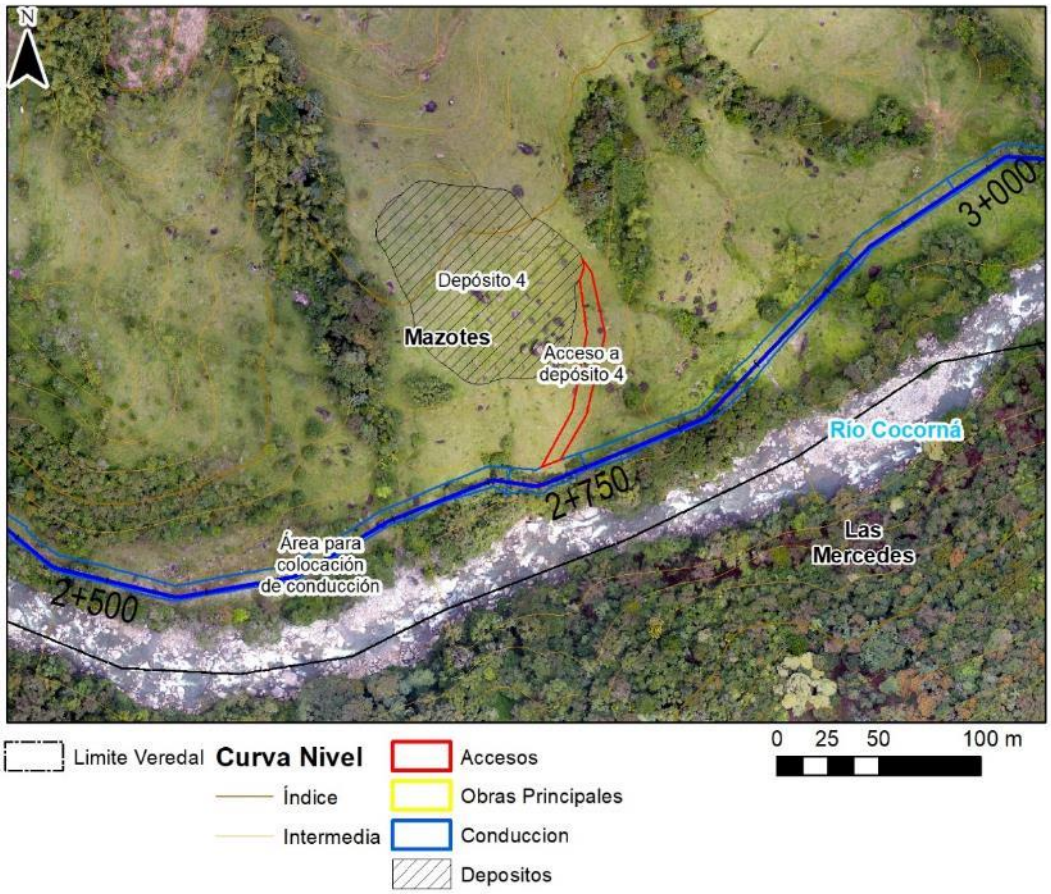


Figura 5-102 Depósito 4.

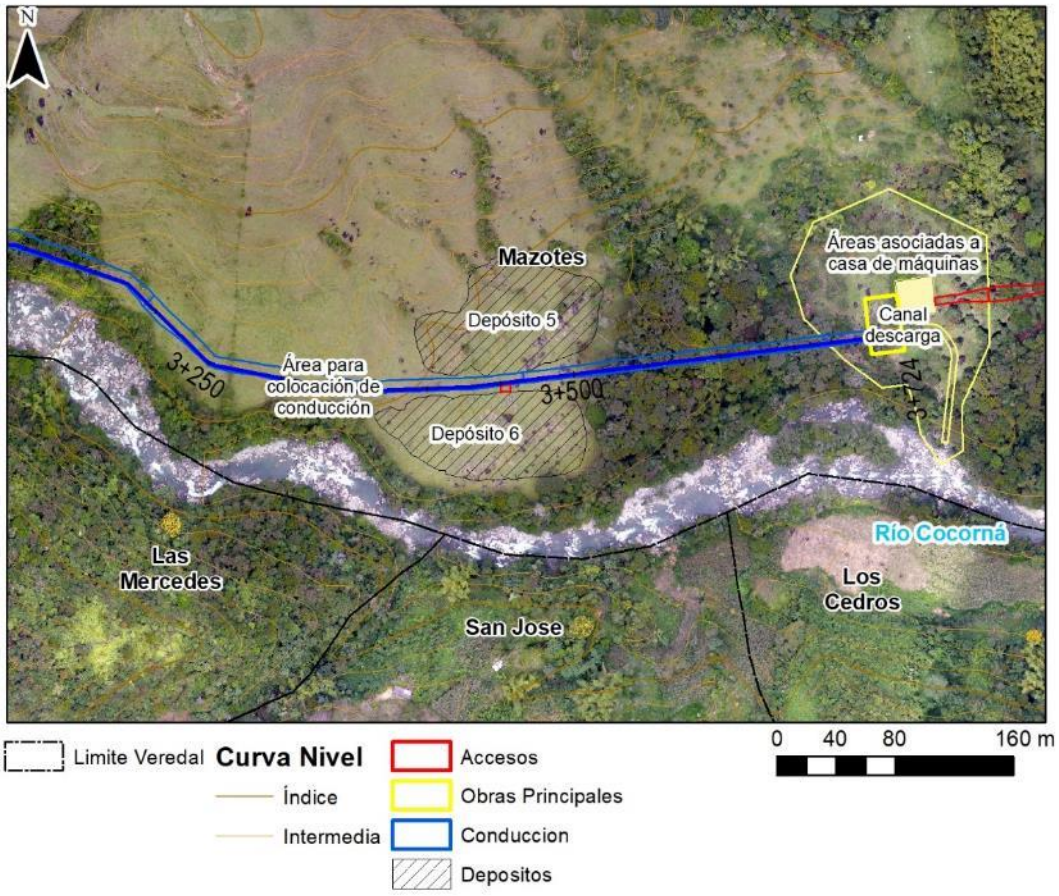


Figura 5-103 Depósitos 5 y 6 .

5.1.4.1.4 Casa de máquinas y vía de acceso

Tanto la casa de máquinas como la vía de acceso se encuentra sobre las planicies aluviales que forman los depósitos torrenciales del río Cocorná, sus características geológicas y geomorfológicas son estables y con buenas capacidades para albergar obras, se encuentra un cruce del río Cocorná a los 1.100 m.s.n.m que se sugiere realizar con la altura suficiente para evitar daños debido al carácter torrencial del río (Figura 5-83, Figura 5-104, Figura 5-105 y Figura 5-106).

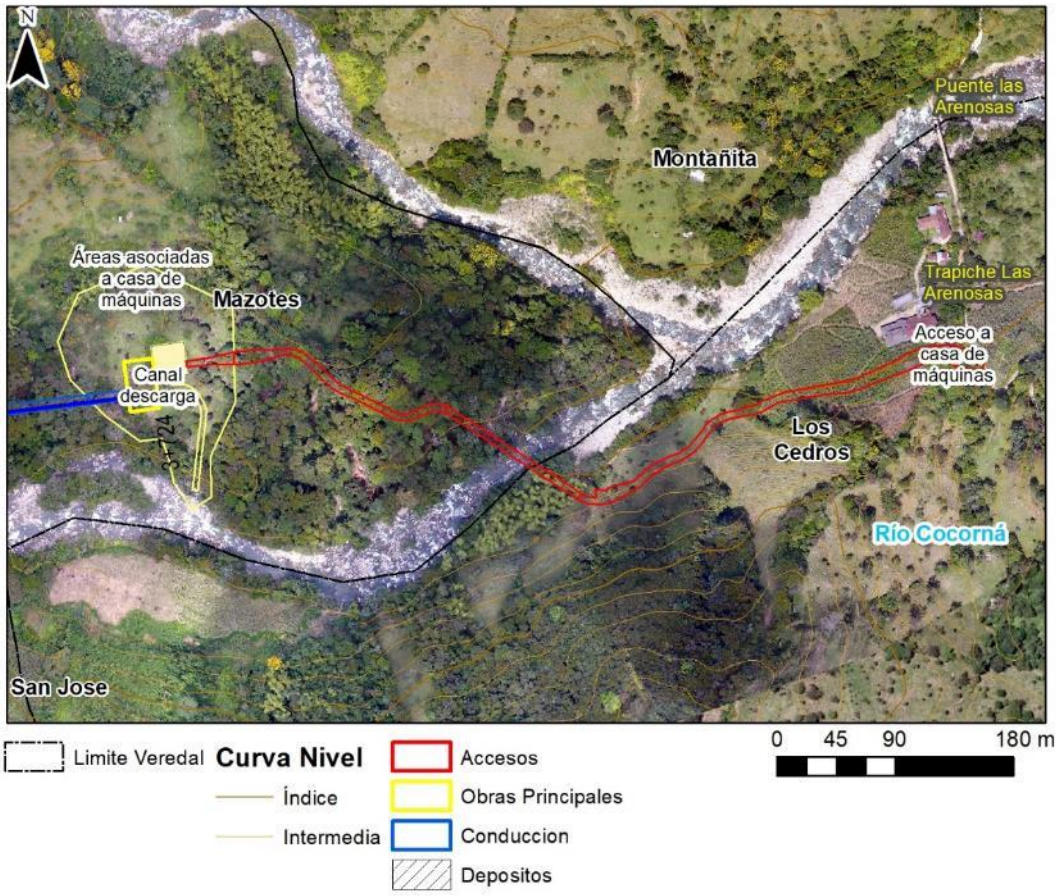


Figura 5-104 Casa de máquinas y vía de acceso

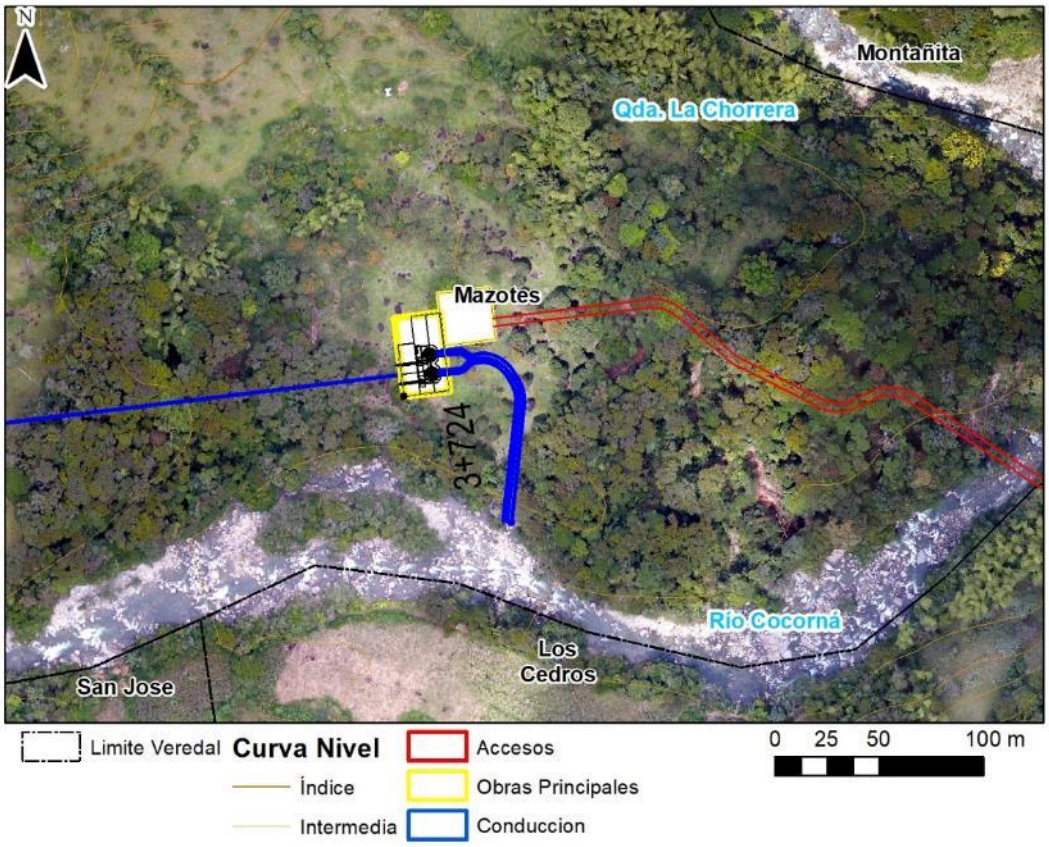


Figura 5-105 Vista de casa de máquinas y canal de descarga

Foto 5-70 Vista terraza casa de máquinas.

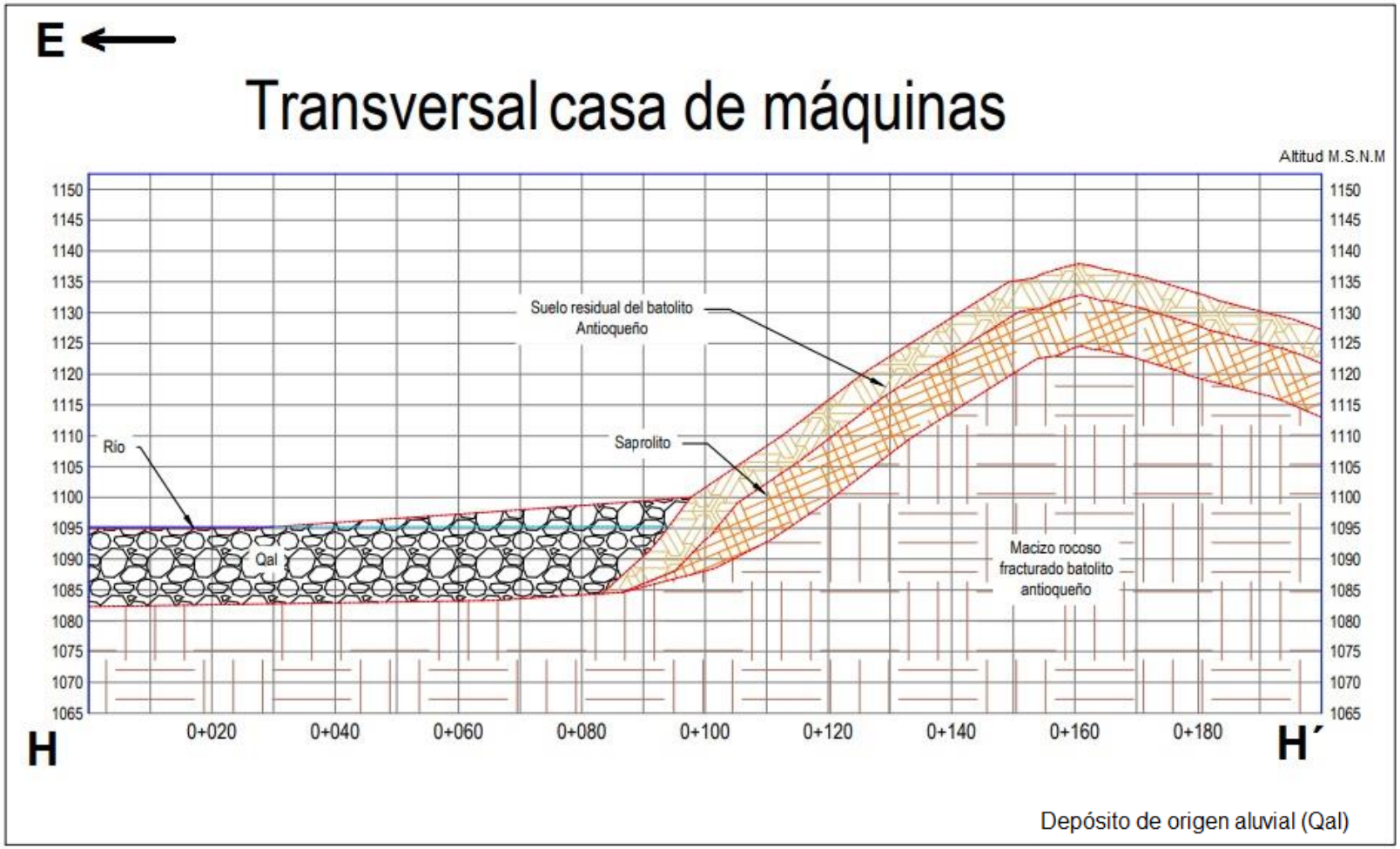


Figura 5-106 Perfil transversal casa de máquinas H-H

5.1.4.2 Campaña de exploración geotécnica.

Para la prospección del suelo se consideraron apiques, sondeos eléctricos verticales (Ver Caracterización Hidrogeología apartado 5.3.2) y perforaciones con penetración estándar, los apiques permiten un examen visual de los estratos, las condiciones del nivel freático, la interface suelo-roca, las discontinuidades y superficies de ruptura, mientras que el ensayo de penetración estándar (SPT) por sus siglas en inglés, es un método rápido y eficiente de determinar la resistencia de los materiales y al mismo tiempo recuperar las muestras, este consisten la ejecución de un sondeo de simple reconocimiento con una medida de resistencia mecánica a lo largo de la profundidad.

Se realizaron ensayos de laboratorio a 47 muestra de geomaterial proveniente de ambas márgenes del río Cocorná dentro del contexto del proyecto Cocorná III, la exploración geotécnica consistió en 26 apiques y 3 perforaciones con recuperación de 21 muestras para ser analizadas (Figura 5-107, Tabla 5-30, Tabla 5-31 y Anexo 5.1.1. Geología, geotecnia, hidrogeología).

Tabla 5-30. Resumen de ensayos

Tipo de ensayo	N° Ensayos
Corte Directo	21
Granulometría	38
Límite de Atterberg (plasticidad en suelos)	38
Humedad natural en suelos	47
Compresión simple en roca	2
Compresión inconfinada	9
Total	**155**

Tabla 5-31 Coordenadas puntos de muestro

Tipo de ensayo	ID	X	Y
Apique	Ap1D	8.778.103.103	11.597.899.944
	Ap2D	8.777.130.925	11.600.646.037
	Ap3D	8.779.045.051	11.601.025.974
	Ap4D	8.779.235.437	11.600.996.848
	Ap5D	8.749.149.237	11.597.415.121
	Ap6D	8.748.772.298	11.600.393.495
	Ap7D	8.751.115.796	11.600.637.468
	Ap8D	8.753.341.682	11.599.168.402

Tipo de ensayo	ID	X	Y
	Ap9D	8.755.488.038	11.597.788.048
	Ap10D	8.757.155.941	1.159.689.199
	Ap11D	8.759.238.744	1.159.637.223
	Ap12D	8.761.886.343	11.595.330.378
	Ap13D	877.307.674	11.596.044.179
	Ap14D	877.084.086	11.594.819.861
	Ap1I	8.745.334.546	11.604.035.773
	Ap2I	8.744.169.812	11.602.701.605
	Ap3I	8.743.621.357	11.602.514.135
	Ap4I	8.745.201.372	1.160.059.479
	Ap5I	8.758.884.033	11.602.591.342
	Ap6I	8.777.204.375	11.602.791.801
	Ap7I	8.746.002.435	11.603.567.514
	Ap8I	8.746.564.827	11.601.241.961
	Ap9I	8.749.415.366	11.602.121.479
	Ap10I	876.519.571	11.602.375.177
	Ap11I	8.768.731.153	11.602.160.025
	Ap12I	8.770.032.078	11.603.637.996
Perforación	P2-2D	8.770.732.503	11.594.887.575
	P1-6D	8.746.831.992	11.600.207.284
	P2-4D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-6D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-8D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-10D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-12D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P2-15D	8.770.726.969	11.594.858.846
	P1-10D	8.779.983.197	11.601.728.669
	P3-7D	8.779.998.674	11.601.717.512
	P3-8D	8.779.998.674	11.601.717.512
	P3-9D	8.779.998.674	11.601.717.512
	P1-1D	8.779.983.197	11.601.728.669

Tipo de ensayo	ID	X	Y
	P1-2D	8.779.983.197	11.601.728.669
	P1-3D	8.779.983.197	11.601.728.669

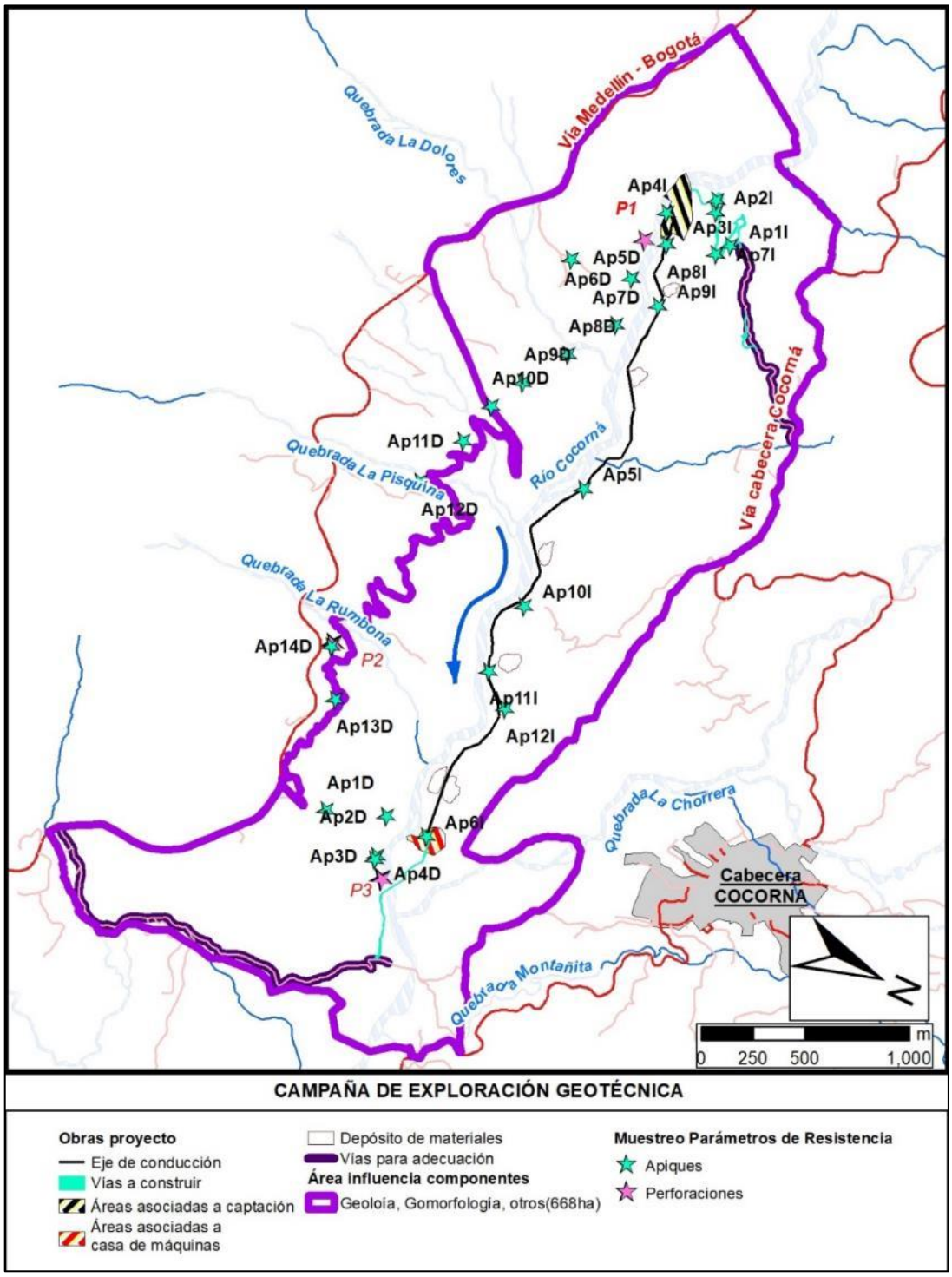


Figura 5-107 Exploración Geotécnica

La siguiente tabla presenta el resumen de los ensayos de clasificación efectuados sobre las muestras alteras e inalteradas recuperadas de los apiques. Las muestras extraídas corresponden a suelos residuales del Batolito Antioqueño, también se presentan los resultados del ensayo de penetración estándar Nspt de las perforaciones P1 y P2. Se puede observar que para la perforación P1 se presentó rechazo a 3.45 m dado que este sondeo se encontraba muy cercano al río Cocorná, encontrando rápidamente el material aluvial. Para la perforación P2 el sondeo se realizó sobre el suelo residual y saprolítico del batolito Antioqueño y alcanzo una profundidad de 15 m mediante el ensayo del SPT.

En general, los resultados de los ensayos de campo, mostraron valores de Nspt tienden aumentar con la profundidad, encontrándose rápidamente en la P1 el material aluvial. La perforación P3 correspondiente a la casa de máquinas se ejecutó con el equipo de rotación. Para los núcleos de roca extraídas se ejecutaron 2 ensayos de compresión simple sobre los núcleos recuperados de la P1.

Tabla 5-32 Resumen de resultados de ensayos

Tipo de ensayo	ID	w (%)	GS	LL	LP	IP	LC	R	CV	CV	C(kPa)	ϕ°	γh(kN/m3)	γd(kN/m3)	qu (kPa)	E (MPa)	N°200	S.C.U.S
Apique	AP1I	38	2.725	51	37,7	13,3	33	1,4	30	8	9,5	31	-	-	-	-	42	SC
	AP2I	42	2.709	53	35,7	17,3	30	1,5	35	10			16,57	11,47	18,23	0,32	47	SC
	AP3I	32	2.727	43	32,7	10,3	31	1,5	19	6	16	32,2	17,44	13,19	43,48	1,13	40	SC
	AP4I	25	-	33	31,4	1,6	24	1,5	17	5	-	-	-	-	-	-	16	SM
	AP5I	36	2.755	53	40,3	12,7	34	1,4	31	9	15,5	33,8	16,93	12,03	44,09	1,23	46	SC
	AP6I	52	2.683	63	43,7	19,3	37	1,3	39	10	11,2	31,4	15,23	9,87	18,87	0,65	18	SC
	AP7I	33	2.740	42	36	6	30	1,5	19	6	24,5	32,2	17,09	12,39	13,09	0,42	40	SM-SC
	AP8I	27	2.743	41	31,9	9,1	31	1,5	19	6	-	-	17,1	13,78	7,98	0,2	12	SC
	AP9I	35	2.732	47	38,2	8,8	33	1,5	24	7	-	-	17,89	13,16	38,4	0,85	38	SC
	AP10I	31	-	49	28,4	20,6	37	1,5	20	6	-	-	-	-	-	-	10	SC
	AP11I	47	2.746	61	46,8	14,2	48	1,2	18	5	9,9	36,6	17,56	11,89	39,85	1,17	25	SC
	AP12I	46	2.723	67	43,2	23,8	33	1,4	54	13	10,9	30	17,76	11,9	58,67	0,6	34	SC
	AP1D	32	-	44	41,2	2,8	-	-	-	-	36,2	27,2	14,99	11,38	-	-	24	SM
	AP2D	62	-	89	54,9	34,2	-	-	-	-	8,3	30,4	16,49	11,56	-	-	37	SM
	AP3D	37	-	51	36,4	14,3	-	-	-	-	9,6	32,2	17,24	13,44	-	-	22	SM
	AP4D	11	-	24	21,5	2,4	-	-	-	-	4,6	42,7	16,98	15,29	-	-	7	SW-SM
	AP5D	34	-	47	38,2	8,8	-	-	-	-	15,1	34	16,9	12,66	-	-	38	SM
	AP6D	42	-	55	37,8	17,1	-	-	-	-	5,3	37,3	17,78	12,61	-	-	33	SM
	AP7D	24	-	39	35	3,5	-	-	-	-	5,2	28	16,34	13,24	-	-	23	SM
	AP8D	30	-	46	39,9	5,9	-	-	-	-	6,2	35,9	16,89	13,05	-	-	35	SM

Tipo de ensayo	ID	w (%)	GS	LL	LP	IP	LC	R	CV	CV	C(kPa)	ϕ°	γh(kN/m3)	γd(kN/m3)	qu (kPa)	E (MPa)	N°200	S.C.U.S
	AP9D	23	-	38	30,8	6,8	-	-	-	-	15,1	34,3	15,99	13,03	-	-	24	SM
	AP10D	36	-	54	47,2	7,3	-	-	-	-	29	24,1	16,06	11,73	-	-	34	SM
	AP11D	32	-	50	41,2	8,6	-	-	-	-	17,4	33,4	13,82	10,43	-	-	25	SM
	AP12D	28	-	41	36,5	4,7	-	-	-	-	15,6	33,1	16,01	12,49	-	-	28	SM
	AP13D	33	-	55	42,7	12,4	-	-	-	-	13,9	30,4	13,14	9,91	-	-	21	SM
	AP14D	35	-	53	43,7	9,2	-	-	-	-	13,1	32,6	14,72	10,9	-	-	33	SM
Perforación	P1.1	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P1.2	35,5	-	40	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,1	SM
	P1.3	41,9	-	36	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,9	SM
	P1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27,12	-	13.430	-	-	-
	P1.10	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	26,27	-	12.940	-	-	-
	P2	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	35,4	-	50	-	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,2	SM
	P2	30,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	33,6	-	45	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43	SM
	P2	30,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	31	-	43	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45,8	SM
	P2	28,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29,8	-	44	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40,5	SM
	P2	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29	-	41	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48,2	SM

Tipo de ensayo	ID	w (%)	GS	LL	LP	IP	LC	R	CV	CV	C(kPa)	ϕ°	γh(kN/m3)	γd(kN/m3)	qu (kPa)	E (MPa)	N°200	S.C.U.S
	P2	33,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	33	-	44	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43,1	SM
	P2	27,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	P2	29,5	-	43	-	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30,2	SM
	P3.7	6	-	25	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	26,7	SM
	P3.8	5	-	26	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,5	SM
	P3.9	6	-	NL	-	NP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	23,1	SM

5.1.4.2.1 Apiques

Se realizaron dos campañas de apiques para ampliar la exploración geotécnica, una por margen derecha y otra por margen izquierda del río Cocorná para un total de 26 apiques, esto con el fin de determinar los parámetros geomecánicos de los materiales encontrados y posteriormente realizar los respectivos análisis de estabilidad tanto en condiciones naturales como proyectadas.

5.1.4.2.1.1 Campaña margen derecha

Campaña que se realiza sobre la margen derecha del río Cocorná donde se realizan 14 apiques y ensayos de laboratorio a catorce (14) muestras de geomaterial (Tabla 5-30, Tabla 5-31 y Figura 5-107).

5.1.4.2.1.1.1 Apique 1D (AP1D)

Localizado en el límite entre la vereda San José y Los Cedros, se clasifica como suelo residual del Batolito Antioqueño, limo con arena, de plasticidad media a alta, consistencia mediana, de color rojo. Profundidad de la muestra es de 2 m. Se encontraron bloques de roca muy meteorizada. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-71 Apique 1D (AP1D)

5.1.4.2.1.1.2 Apique 2D (AP2D)

Se ubica en el límite entre las veredas San José y los Cedros, después del trapiche Las Arenosas, en cercanías a Casa de Máquinas, es un depósito de vertiente, conformado por limo, con arena y grava, de plasticidad media, consistencia mediana, de color rojizo con motas amarillas. Profundidad de la muestra es de 2 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-72 Apique 2D (AP2D)

5.1.4.2.1.1.3 Apique 3D (AP3D)

Se ubica en la vía de acceso a casa de máquinas, depósito de vertiente conformado por limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 1”, de plasticidad media a alta, consistencia blanda, de color amarillo oscuro. Profundidad de la muestra es de 2 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-73 Apique 3D (AP3D)

5.1.4.2.1.1.4 Apique 4D (AP4D)

Vía de acceso a casa de máquinas, vereda Los Cedros, grusse de arena y limo con algunas gravas de tamaño máximo de 3/”, plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 2 m. Con clasificación en S.C.U.S de SW-SM Arena bien gradada –Arena limosa.

Foto 5-74 Apique 4D (AP4D)

5.1.4.2.1.1.5 Apique 5D (AP5D)

Ubicado en la vía de acceso a la Hacienda El Tesoro, vereda El Tesoro, suelo residual de Limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo, abundantes micas. Profundidad de la muestra es de 1,62 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-75 Apique 5D (AP5D)

5.1.4.2.1.1.6 Apique 6D (AP6D)

Ubicado en la Hacienda El Tesoro sobre el trazado de la conducción, suelo residual de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 1,3 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-76 Apique 6D (AP6D)

5.1.4.2.1.1.7 Apique 7D (AP7D)

En la Hacienda El Tesoro sobre el trazado de la conducción, suelo residual de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo con escasos núcleos de roca. Profundidad de la muestra es de 2 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-77 Apique 7D (AP7D)

5.1.4.2.1.1.8 Apique 8D (AP8D)

Ubicado en la vereda El Tesoro, suelo residual compactado de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 1 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-78 Apique 8D (AP8D)

5.1.4.2.1.1.9 Apique 9D (AP9D)

Ubicado en la vereda El Tesoro, saprolito de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 4 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-79 Apique 9D (AP9D)

5.1.4.2.1.1.10 Apique 10D (AP10D)

Ubicado en cercanías a la escuela El Tesoro, saprolito de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 2 m. Con clasificación en S.C.U.S de SC Arena limosa.

Foto 5-80 Apique 10D (AP10D)

5.1.4.2.1.1.11 Apique 11D (AP11D)

Localizado en la vereda El Tesoro, Suelo residual de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 4 m. Con clasificación en S.C.U.S de SC Arena limosa.

Foto 5-81 Apique 11D (AP11D)

5.1.4.2.1.1.12 Apique 12D (AP12D)

Ubicado en la vereda Las Mercedes, saprolito de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 7 m. Con clasificación en S.C.U.S de SC Arena limosa.

Foto 5-82 Apique 12D (AP12D)

5.1.4.2.1.1.13 Apique 13D (AP13D)

Ubicado en la vereda San José, saprolito de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 3 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-83 Apique 13D (AP13D)

5.1.4.2.1.1.14 Apique 14D (AP14D)

Ubicado en la vereda San José, suelo residual de limo con arena y algunas gravas de tamaño máximo de 3/", plasticidad media alta, consistencia mediana, color café rojizo. Profundidad de la muestra es de 2 m. Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

Foto 5-84 Apique 14D (AP14D)

5.1.4.2.1.2 Campaña margen izquierda

Campaña que se realiza sobre la margen izquierda del río Cocorná donde se realizan 12 apiques y ensayos de laboratorio a catorce (14) muestras de geomaterial (Tabla 5-30, Tabla 5-31 y Figura 5-107). Con clasificación en S.C.U.S de SM Arena limosa.

5.1.4.2.1.2.1 Apique 1I (AP1I)

Localizado en la vereda La Placeta, se clasifica como suelo residual del Batolito Antioqueño. Profundidad de la muestra es de 2 m, ubicado a 1431 m.s.n.m. se encuentra a 300 m del río Cocorná sobre la margen izquierda. En la clasificación S.C.U.S. es un SC, un suelo areno arcilloso de plasticidad media a alta, consistencia mediana, de color crema.

Foto 5-85 Apique 1I (AP1I)

5.1.4.2.1.2.2 Apique 2I (AP2I)

Localizado en la vereda La Placeta, se clasifica como suelo residual de Batolito Antioqueño. Profundidad de la muestra es de 2 m, ubicado a 1347 m.s.n.m. se encuentra a 3 m del río Cocorná sobre la margen izquierda. En la clasificación S.C.U.S. es un SC, un suelo areno arcilloso de plasticidad media a alta, consistencia mediana, de color crema.

Foto 5-86 Apique 2I (AP2I)

5.1.4.2.1.2.3 Apique 3I (AP3I)

Se ubica en la vereda La Placeta, cerca de la vía de acceso a captación, suelo residual de Batolito Antioqueño conformado por arena arcillosa en la clasificación S.C.U.S es SC de plasticidad media a alta, consistencia blanda, de color claro. Profundidad de la muestra es de 2 m. A una altura de 1379 m.s.n.m. y a 50 m del río Cocorná.

Foto 5-87 Apique 3I (AP3I)

5.1.4.2.1.2.4 Apique 4I (AP4I)

Localizado en la vereda La Placeta, sobre posible depósito aluviotorrencial, en margen izquierda del río Cocorná, a unos 12 m del cauce aluvial, el punto se ubica a 1.340 m.s.n.m. Punto ubicado sobre desarenadores. Se caracteriza por presentar prominentes bloques aflorando en superficie, estos bloques se asocian a la litología predominante de la región (rocas ígneas intrusivas), asociadas posiblemente al Batolito Antioqueño, la morfología es plana ligeramente ondulada.

Se realiza sobre escarpe de terraza erodado por socavación lateral de orillas, el suelo en la clasificación S.C.U.S. es un SM, un suelo areno limoso, de baja plasticidad, parcialmente cohesivo.

Foto 5-88 Apique 4I (AP4I)

5.1.4.2.1.2.5 Apique 5I (AP5I)

Ubicado en la vereda Mazotes, suelo residual de Batolito Antioqueño conformado por arena limosa en la clasificación S.C.U.S es SC de plasticidad media a alta, de color claro. Profundidad de la muestra es de 2 m. A 34 m del río Cocorná.

Foto 5-89 Apique 5I (AP5I)

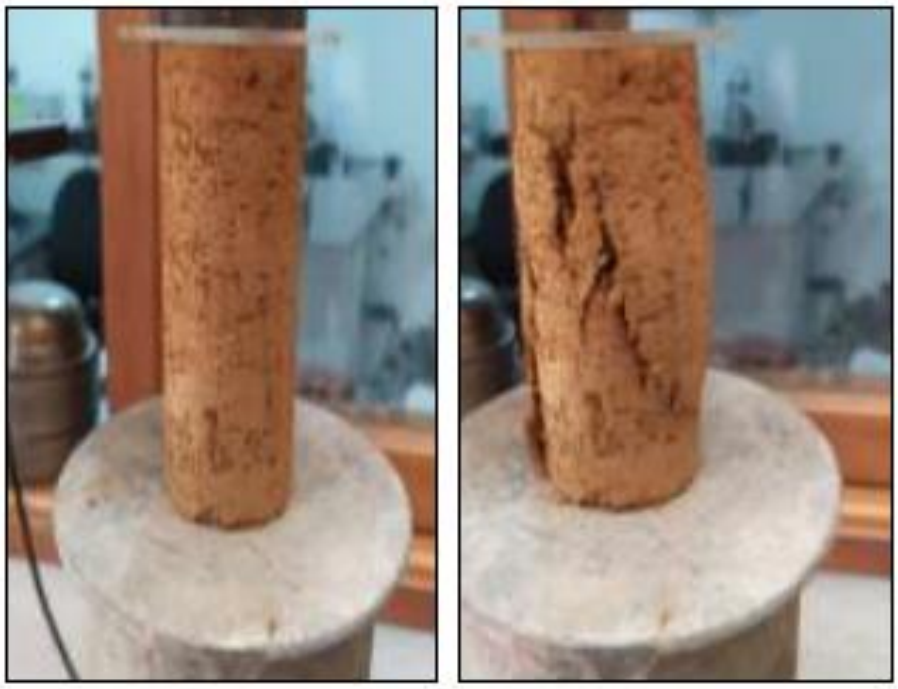


Foto 5-90 Apique 5I (AP5I)

5.1.4.2.1.2.6 Apique 6I (AP6I)

Sobre posible depósito aluviotorrencial, a unos 60 m del río Cocorná, ubicado en un posible abanico superpuesto entre la quebrada La Chorrera y el río Cocorná. El punto se encuentra a unos 1.119 m.s.n.m. a 6 m de la conducción y 300 m de casa de máquinas.

Se realiza en la vereda Mazotes, y se caracteriza por presentar prominentes bloques aflorando en superficie, estos bloques se asocian a la litología predominante de la región (rocas ígneas intrusivas), asociadas posiblemente al Batolito Antioqueño, este depósito se caracteriza por el desarrollo de profundos horizontes de suelo, se encontraron varios horizontes de paleosuelos, en este lugar se realiza un apique de 2 m de profundidad. En la clasificación S.C.U.S. es un SC, un suelo areno arcilloso, de alta plasticidad.

Foto 5-91 Apique 6I (AP6I)

Foto 5-92 Apique 6I (AP6I)

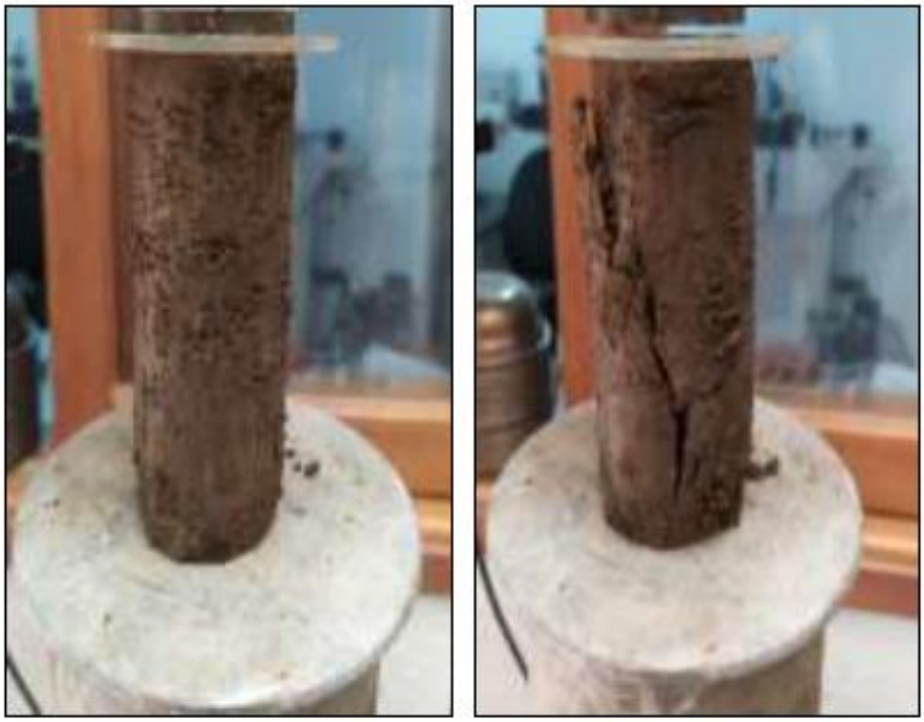


Foto 5-93 Apique 6I (AP6I)

5.1.4.2.1.2.7 Apique 7I (AP7I)

Ubicado en la vereda La Placeta, a media ladera sobre la margen izquierda del río Cocorná, sobre vía de acceso a captación. Posible depósito de vertiente, por alta pendiente, morfología lobular. A una altura de 1.406 m.s.n.m. a 300 m del río Cocorná.

Con clasificación S.C.U.S. SM-SC, arena limosa -arena arcillosa, de baja plasticidad. Suelo gris azuloso. Cobertura que corresponde a pastos limpios, con uso de ganadería intensiva, con marcada erosión en terracetas.

Foto 5-94 Apique 7I (AP7I)

Foto 5-95 Apique 7I (AP7I)

5.1.4.2.1.2.8 Apique 8I (AP8I)

Se ubica en la vereda La Placera, en el sector de inicio de la conducción, se encuentra suelo residual de Batolito Antioqueño conformado por arena arcillosa en la clasificación S.C.U.S es SC de plasticidad media a alta, consistencia blanda, de color claro. Profundidad de la muestra es de 2 m. El muestro se realiza a 27 m del río Cocorná.

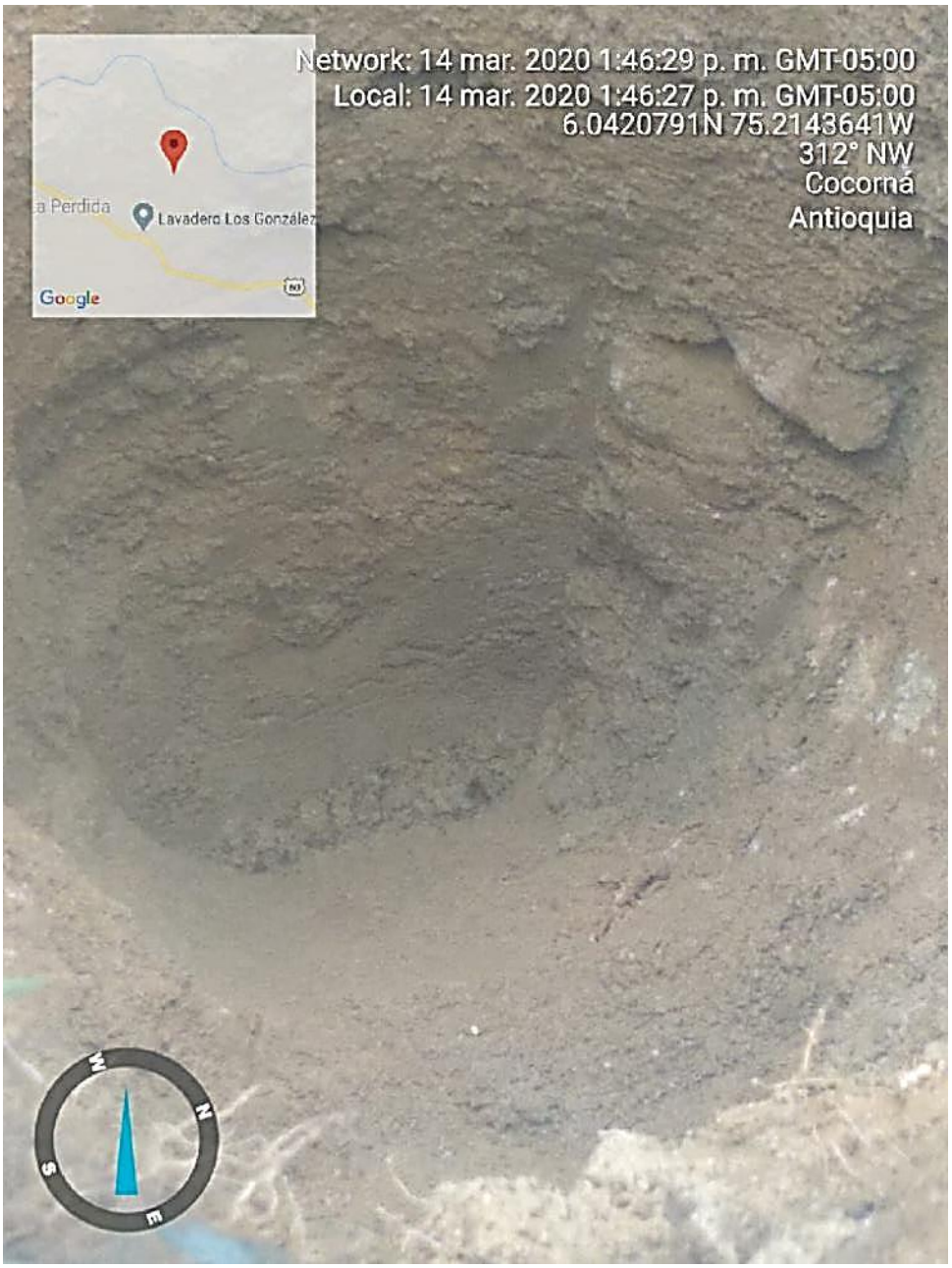


Foto 5-96 Apique 8I (AP8I)

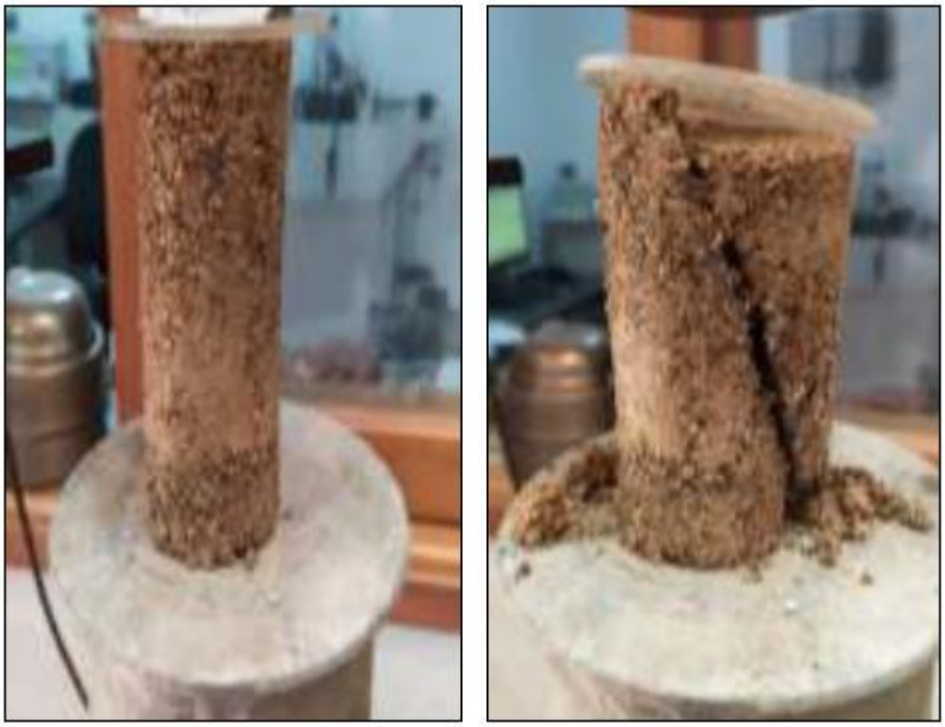


Foto 5-97 Apique 8I (AP8I)

5.1.4.2.1.2.9 Apique 9I (AP9I)

Se ubica en la vereda La Placera, se encuentra suelo residual de Batolito Antioqueño conformado por arena arcillosa en la clasificación S.C.U.S es SC de plasticidad media a alta, consistencia blanda, de color claro. Profundidad de la muestra es de 2 m. El muestro se realiza a 41 m del río Cocorná.

Foto 5-98 Apique 9I (AP9I)

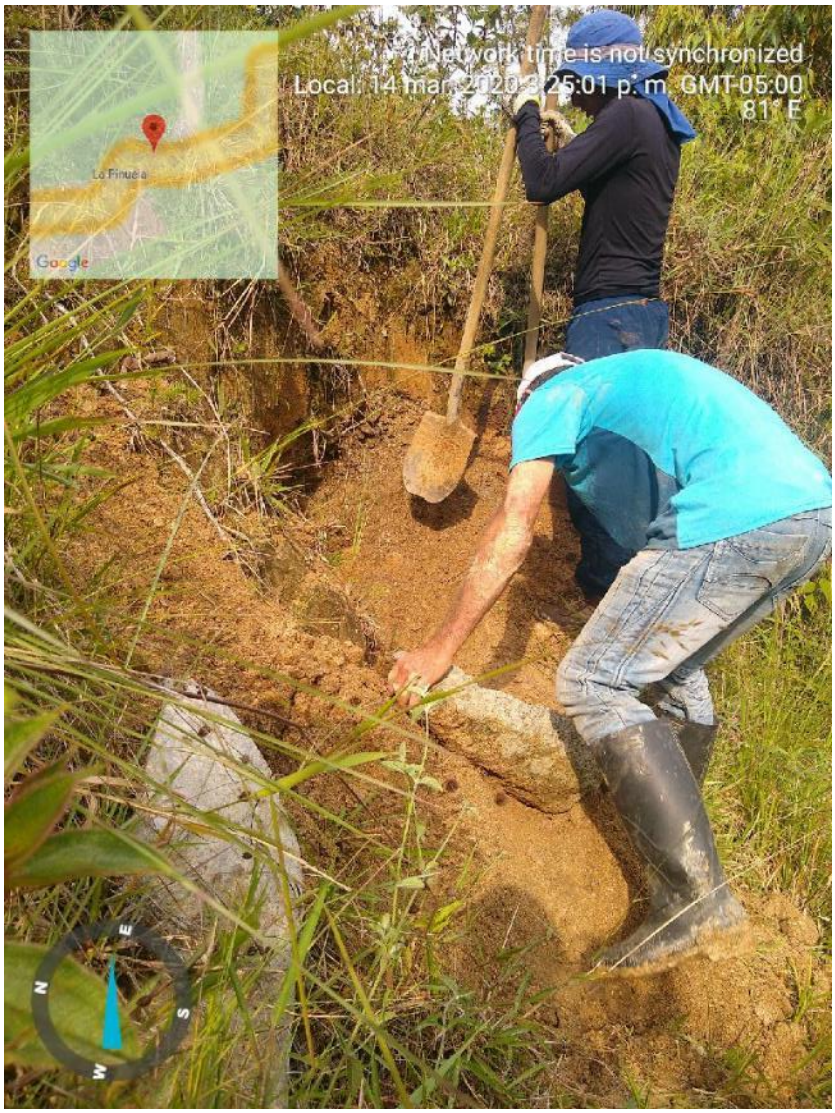


Foto 5-99 Apique 9I (AP9I)

5.1.4.2.1.2.10 Apique 10I (AP10I)

Ubicado en la vereda Mazotes, aproximadamente a media ladera en la margen izquierda del río Cocorná, sobre posible depósito de vertiente, ladea de pendientes moderada a empinada, de morfología lobulada irregular, con numerosos bloques heterométricos subangulosos de esquisto y granitoídes en relación bloques matriz 70/30, la matriz se caracteriza por ser en la clasificación S.C.U.S. SC, arena arcillosa, plasticidad media.

La cobertura principal son pastos limpios para ganadería

El ensayo se realiza a unos 1.215 m.s.n.m. A unos 70 m de río Cocorná y a 40 m de la conducción.

Foto 5-100 Apique 10I (AP10I)

5.1.4.2.1.2.11 Apique 11I (AP11I)

Ubicado en la vereda Mazotes, en ladera de margen izquierda, a unos 50 m del río Cocorná, a unos 1.184 m.s.n.m. Punto a 20 m de la conducción. Posible suelo depositado de origen aluvial, sobre terraza plana, con algunos bloques redondeados aflorando en superficie, de origen ígneo, posiblemente relacionados al Batolito Antioqueño, se observa presencia de organales en el área cercana. Los resultados de los análisis corresponden a un suelo con clasificación S.C.U.S. SC, arena arcillosa, de baja plasticidad, desarrollo de suelo orgánico profundo.

La cobertura predominante corresponde a pastos limpios con uso para ganadería.

Foto 5-101 Apique 11I (AP11I)

Foto 5-102 Apique 11I (AP11I)

5.1.4.2.1.2.12 Apique 12I (AP12I)

Ubicado en la vereda Mazotes, sobre suelo residual de Batolito Antioqueña, al pie de la ladera margen izquierda río Cocorná, a unos 100 m del río Cocorná. Punto a 30 m de la conducción. Se observa presencia de organales en el área cercana. Los resultados de los análisis corresponden a un suelo con clasificación S.C.U.S. SC, arena arcillosa, de baja plasticidad, desarrollo de suelo profundo.

La cobertura predominante corresponde a pastos limpios con uso para ganadería.

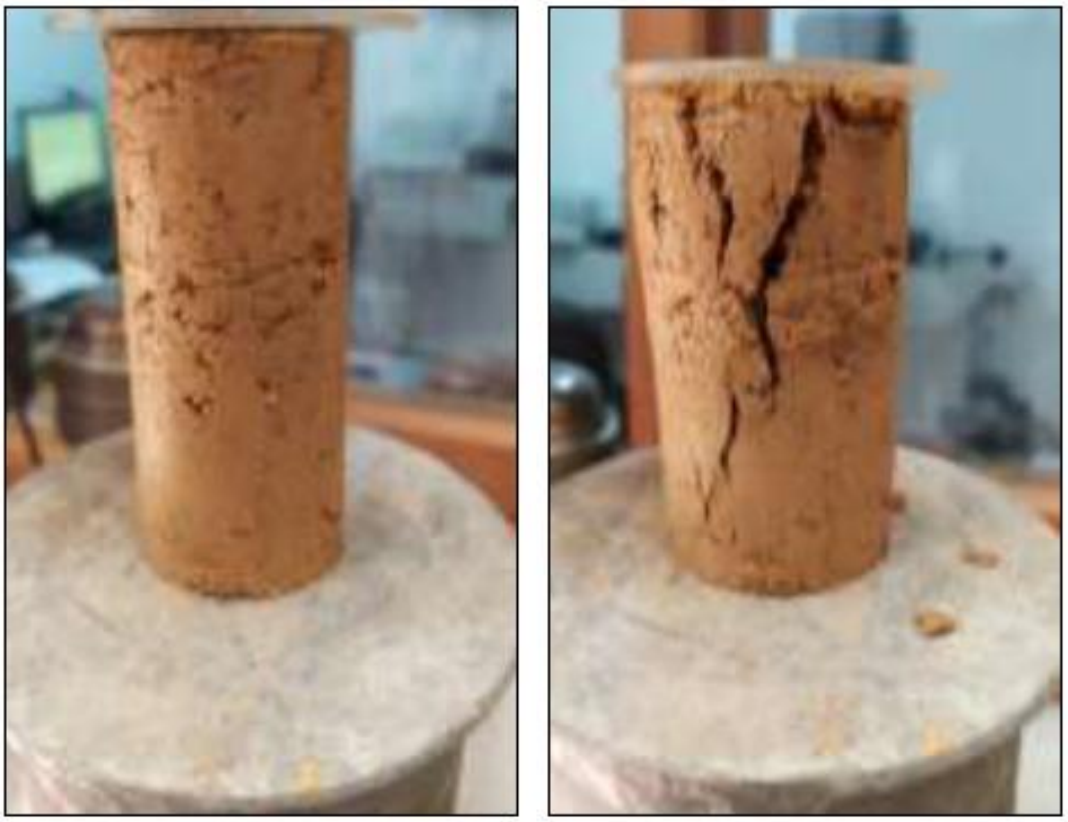


Foto 5-103 Apique 12I (AP12I)

Foto 5-104 Apique 12I (AP12I)

5.1.4.2.2 Perforaciones

La siguiente tabla presenta el resumen de los ensayos de clasificación efectuados sobre las muestras alteras e inalteradas recuperadas de los apiques. Las muestras extraídas corresponden a suelos residuales del Batolito Antioqueño, también se presentan los resultados del ensayo de penetración estándar Nspt de las perforaciones P1 y P2. Se puede observar que para la perforación P1 se presentó rechazo a 3.45 m dado que este sondeo se encontraba muy cercano al río Cocorná, encontrando rápidamente el material aluvial. Para la perforación P2 el sondeo se realizó sobre el suelo residual y saprolítico del batolito Antioqueño y alcanzo una profundidad de 15 m mediante el ensayo del SPT.

En general, los resultados de los ensayos de campo, mostraron valores de Nspt tienden aumentar con la profundidad, encontrándose rápidamente en la P1 el material aluvial. La perforación P3 correspondiente a la casa de máquinas se ejecutó con el equipo de rotación. Para los núcleos de roca extraídas se ejecutaron 2 ensayos de compresión simple sobre los núcleos recuperados de la P1 (ANEXO 5.1.1. Geología, geotecnia, hidrogeología).

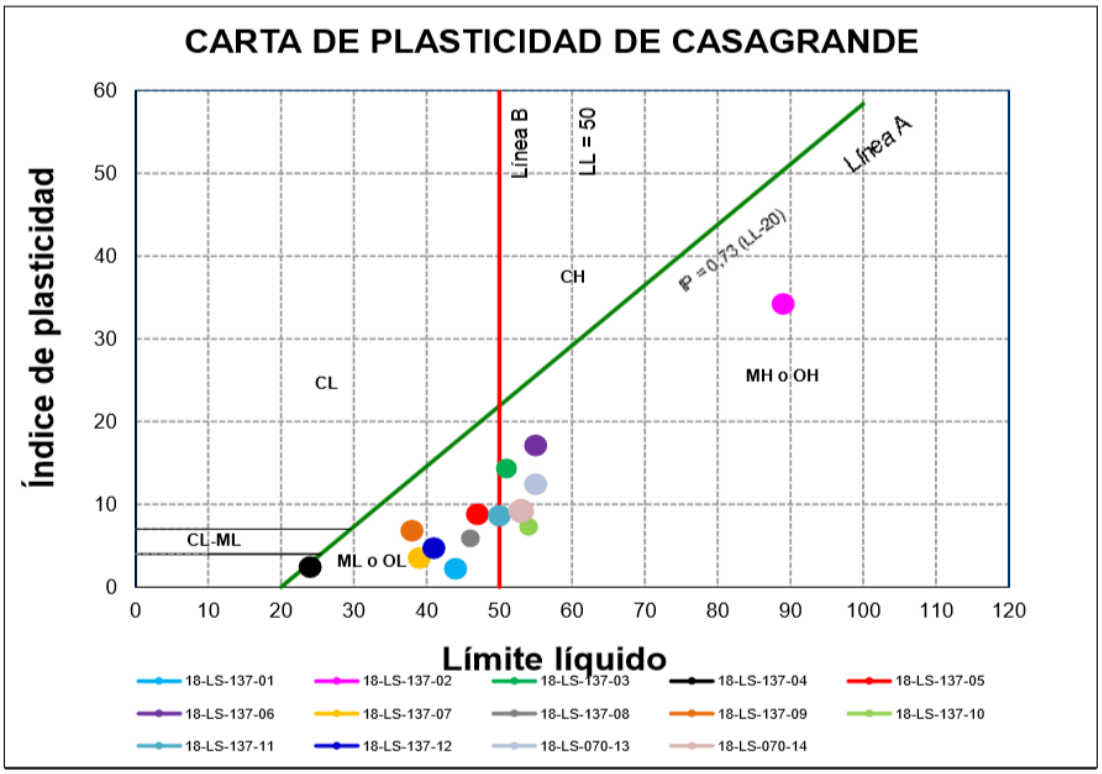


Figura 5-108 Resultados de plasticidad en perforaciones

La mayor parte de los resultados clasifican los suelos de la Figura 5-86 como SM, es decir Arenas Limosas de baja plasticidad.

Tabla 5-33 Caracterización de los suelos en las perforaciones

Grupo		Sigla	Descripción	Para terraplenes	Como fundación	Capacidad de soporte	Permeabilidad
Grueso granulares	Arenas	SM	Arena limosa	Regularmente estable	Aceptable a Buena	Buena a deficiente	Semi-permeable a impermeable

La campaña de exploración a partir de perforaciones consistió de una perforación a roto-percusión en la zona de Captación, precisamente en el área del desarenador; tanque de carga y casa de máquinas. Se ejecutaron exploraciones directas mediante 3 perforaciones, las cuales tuvieron una profundidad de 15 m cada una.

Durante los trabajos de exploración, se recuperaron 35 muestras alteradas para la ejecución de ensayos de caracterización geotécnica. Además, se recuperaron núcleos de roca para los respectivos ensayos de compresión simple en roca intacta.

Foto 5-105 Equipo de perforaciones

Tabla 5-34. Perforaciones ejecutadas.

Sondeo	Ubicación	Profundidad (m)	Profundidad del NF*	SPT Final**
P1	Captación	15	3,20	Rotación
P2	Tanque de carga	15,45	Superficial	55
P3	Casa de máquinas	15	1	Rotación

*Nivel de altura freática (Profundidad nivel freático)
**Ensayo de penetración estándar

Foto 5-106 Piezómetros instalados en las perforaciones P1, P2, P3.

Los resultados de la perforación 1 (P1) a la compresión simple se encuentran 13,43 Mpa para la muestra (M6) y 12,94 para (M10), estos valores corresponden a roca blanda.

Tabla 5-35 Perforaciones

Vereda	Nombre	ID	Geología	Ubicación	Profundidad (m)	Nivel piezométrico (m.s.n.m)	Condición	Propósito	Cota
Los Cedros	Piezómetro 1	Pz3	Depósito Aluvial	Trapiche Las Arenosas	2	1110	Inactivo	Exploratorio	1.112
San José	Piezómetro 2	Pz2	Suelo residual de Batolito Antioqueño	Potrero cerca de la Autopista Medellín-Bogotá	11,45	1351	Inactivo	Exploratorio	1.362
El Tesoro	Piezómetro 1	Pz1	Depósito Aluvial	Potrero cerca del río Cocorná, Hacienda el Tesoro	6,27	1325	Inactivo	Exploratorio	1.332

5.1.4.3 Zonificación geotécnica

Las condiciones geológicas, hidrológicas, geomorfológicas y la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad, dan como resultados procesos de inestabilidad.

La zonificación geotécnica tiene como finalidad generar un mapa de susceptibilidad de procesos de inestabilidad morfodinámicos e hidrodinámicos para el área de influencia del proyecto, a partir de las consideraciones geológicas, geomorfológicas, de pendientes, hidrogeológicas, hidrológicas, climatológicas, usos del suelo, sismológicas, e identificación de procesos morfodinámicos actuantes. La susceptibilidad, generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno.

Las variables evaluadas se establecieron a partir de las observaciones y descripciones de campo, y del análisis de información secundaria. La sismicidad y precipitación son factores detonantes preponderantes, sin embargo, no se incluyen dentro del análisis ya que, para toda el área evaluada, corresponden a un solo dato, que no aporta peso al resultado.

La evaluación se realizó para la condición actual del área en estudio, mediante un análisis relativo que presenta la posibilidad diferencial de ocurrencia de deslizamientos sin dar valores exactos. La susceptibilidad, generalmente, expresa la facilidad con que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno. La susceptibilidad es una propiedad del terreno que indica qué tan favorables o desfavorables son las condiciones de éste, para que puedan ocurrir deslizamientos.

5.1.4.3.1 Metodología

La zonificación geotécnica consiste en un proceso de sectorización de un área compleja en unidades relativamente homogéneas, estas unidades se caracterizan con base en factores que interfieren en la estabilidad del terreno.

Dicha zonificación se basa en el análisis de la caracterización física del área de estudio, lo cual permite obtener una visión espacial global de las condiciones de estabilidad, y del grado de susceptibilidad de las unidades terrestres frente a su intervención. A continuación, se describe la metodología utilizada para el presente estudio.

5.1.4.3.1.1 Recolección de Información

Para la obtención de la información se realizó la caracterización del área a ser evaluada a partir de recorridos de campo en la zona de influencia del proyecto, en función de diferentes variables que intervienen o controlan la susceptibilidad de generar procesos de inestabilidad.

La geología, la geomorfología, la identificación de procesos inestables, el uso del suelo, fueron variables que se obtuvieron con una metodología de mapeo directo con base en la experiencia. Las demás variables se obtienen a partir del procesamiento de información primaria.

5.1.4.3.1.2 Procesamiento de la Información

La metodología planteada propone dos aspectos principales que deben considerarse en la zonificación y corresponden a la selección de variables y la valoración de los factores.

La selección de variables se realizó a partir de estudios previos disponibles que permiten un diagnóstico de las variables físicas (pendientes, geomorfología, geología, precipitación, usos del suelo, procesos actuantes, hidrogeología e hidrología).

Posterior a la caracterización de las variables mediante la generación de mapas, se procedió a la valoración cualitativa de los factores espacializados (capas o mapas temáticos), para su posterior combinación por medio de algebra de capas temáticas. Esta valoración se basa en la susceptibilidad de dichas variables asociada al desarrollo del proyecto o actividad que se está evaluando.

Las escalas de susceptibilidad para las variables son numéricas y se dan en razón de términos de preferencia, importancia o probabilidad.

Para la realización de la zonificación se utilizó el programa Arcgis 10.2, en el cual se espacializan las variables ocupando la misma área, de tal manera que los mapas puedan ser combinados.

5.1.4.3.2 Análisis de la información

Se describen las variables con sus respectivos pesos, y se presenta el resultado de la zonificación definiendo la susceptibilidad a generar procesos de inestabilidad, en las áreas donde se tienen proyectadas las obras, siendo un punto de referencia para adoptar medidas de manejo geotécnico.

El resultado obtenido fue clasificado mediante la asignación de valores cuantitativos o rangos, delimitando y/o ajustando las zonas que representan los diferentes grados de susceptibilidad ad a los movimientos en masa. Lo anterior siempre en función del criterio del especialista que realizó el trabajo de campo.

Los resultados se expresan utilizando una terminología en función de la estabilidad que define características cualitativas. Las propiedades geomecánicas de los suelos están intrínsecas en los factores de seguridad obtenidos para el área considerando el proyecto, donde se evaluó tanto la estabilidad geotécnica de las laderas naturales como de los cortes generados para la implantación de las obras.

El mapa de susceptibilidad clasifica la estabilidad relativa de un área, en categorías que van de estable a inestable. El mapa de susceptibilidad muestra donde hay o no, condiciones para que puedan ocurrir deslizamientos. La probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad.

Tabla 5-36 Calificación cualitativa del resultado del algebra de mapas

Susceptibilidad a generar procesos inestables	
Muy alta	15
Alta	9
Media	5
Baja	3
Muy baja	1

5.1.4.3.2.1 Descripción de variables

En la Tabla 5-37, se observan las variables con sus respectivos pesos dentro de la zonificación. Los procesos actuantes definen zonas dentro del área del proyecto, que presentan o han presentado inestabilidad, por tanto, esta variable se define como la de mayor peso. La pendiente y la geología son factores que condicionan las geoformas, y que controlan en mayor medida la ocurrencia de procesos inestables. El uso que se le da al suelo propicia que se genere inestabilidad sumado a los factores ya descritos.

Tabla 5-37 Variables geotécnicas adoptadas con sus respectivos pesos.

Variable	Peso variable
Procesos	25%
Pendientes	20%
Geomorfología	20%
Geología	15%
usos del suelo	10%
Hidrología	5%
Hidrogeología	5%
Suma peso variables	**100**

A continuación, se describen las variables evaluadas, con la valoración de los diferentes factores que los componen.

5.1.4.3.2.1.1 Procesos morfodinámicos

Las zonas donde se identificaron deslizamientos activos, son consideradas inestables en su condición actual. Las zonas donde se reportaron cicatrices de movimientos, incluso con revegetalización en los escarpes, son susceptibles a reactivarse, ya sea por factores detonantes naturales o antrópicos, pero de probabilidad de ocurrencia baja.

Los surcos son procesos erosivos avanzados, que pueden remontar a cárcavas y a procesos más complejos de afectación sobre la ladera, dentro de un área expuesta significativa, por tanto, la susceptibilidad a generar inestabilidad es considerada como alta.

Se debe considerar la dinámica del río Cocorná a lo largo del tiempo, donde los procesos ya existentes se pueden intensificar, o se pueden presentar nuevos procesos a lo largo de las márgenes donde el flujo se concentra con mayor velocidad.

La erosión en terracetas definida como una erosión superficial asociada al uso del suelo, puede desencadenar a largo plazo, procesos que comprometan el sustrato a mayor profundidad generando afectaciones en área mayores.

Tabla 5-38 Calificación procesos morfodinámicos

Procesos morfodinámicos	Susceptibilidad
Deslizamiento activo	15
Surcos	9
Erosión en terracetas	9
Deslizamiento inactivo	3
Sedimentación activa	1
Depósito aluvial	1
Depósito coluvial	15

5.1.4.3.2.1.2 Pendientes

Para esta variable se estableció asignar el valor más alto, a aquellas áreas con pendientes mayores al 24%°, siendo las zonas más susceptibles a presentar procesos de inestabilidad, con base en las observaciones de campo, caracterizados por la presencia de suelos residuales altamente meteorizados que han perdido la estructura de la roca original y depósitos no consolidados. Pendientes mayores se encuentran labradas en materiales más competentes tipo roca levemente meteorizada o fresca, disminuyendo la susceptibilidad a inestabilidad. Pendientes menores hacen parte de colinas, suelos residuales saprolíticos estables y zonas bajas de depósitos del rio adyacentes al cauce principal.

Tabla 5-39 Calificación de pendientes

Pendientes	Descripción	Susceptibilidad
> 90%	Abrupta	15
42%-90%	Escarpada	9
24%-42%	Muy inclinada	5
15%-24%	Inclinada	3
0-15%	Plana a suavemente inclinada	1

5.1.4.3.2.1.3 Geomorfología

Las geoformas asociadas a una génesis tectónica y gravitacional, son las que presentan mayor susceptibilidad a presentar procesos de inestabilidad. Las geoformas conformadas en suelos residuales saprolíticos, y aquellas que se originan pro procesos agradacionales, asociadas a la dinámica del rio, son menos susceptibles a presentar movimientos en masa.

Tabla 5-40 Calificación de unidades geomorfológicas

Geomorfología	Descripción	Susceptibilidad
Cauce aluvial	Canal de forma irregular de tendencia recta, de baja sinuosidad	1
Lomo denudado	Sistemas filos ubicados a diferentes alturas, se presentan como formas alargadas en dirección perpendicular al río	9
Planicie aluvial confinada	Franja de terreno de morfología plana, muy angosta eventualmente inundable, constituida por material aluvial	1
Abanico Fluviotorrencial	Presenta prominentes bloques aflorando en superficie, con desarrollo de profundos horizontes de suelo	1

5.1.4.3.2.1.4 Geología

Se asignó el mayor peso a las unidades geológicas que exponen en superficie el perfil de meteorización más superficial, conformado en suelos maduros y saprolitos, así como los depósitos gravitacionales inconsolidados, donde fueron identificados la mayoría de los procesos activos que afectan el área en estudio. Las unidades geológicas asociadas a formaciones rocosas levemente meteorizadas a frescas, así como los depósitos del rio que generan planicies, son las formaciones de menor susceptibilidad a generar inestabilidad.

Tabla 5-41 Calificación de unidades geológicas

Geología	Descripción	Susceptibilidad
SRRI	Suelos residuales maduros y saproliticos derivados de esquistos, de textura areno limosa.	9
DLB	Depósitos de hasta 4 m de espesor, grueso granular con una matriz limo arenosa que rodea los cantos y bloques de roca.	15
DSG	Depósitos aluviales limo arenosos con grava.	1

5.1.4.3.2.1.5 Usos del suelo

En la zona se observan un conjunto de técnicas de uso de la tierra que implican la asociación de ganadería y cultivos, favoreciendo el desgaste del suelo, traducido en procesos erosivos superficiales incipientes que a largo plazo y en ciertas condiciones geodinámicas, pueden generar procesos de inestabilidad a escala mayor.

Tabla 5-42 Calificación de usos del suelo

Uso del suelo	Descripción	Susceptibilidad
AGS	Sistema agrosilvicolas	9
ASP	Sistema agrosilvopastoriles	9
TR	Transporte	5
CAN	Cuerpos de aguas naturales	3
FPR	Protección	1
MIN	Materiales de construcción	1

5.1.4.3.2.1.6 Hidrología

Las zonas de nacimiento de los drenajes tributarios, se encuentran protegidas por una densa cobertura vegetal, donde no se observa inestabilidad acentuada. Los procesos a lo largo de drenajes principales se encuentran asociados a la dinámica de los ríos como la socavación de orillas.

Tabla 5-43 Calificación de hidrología

Hidrología	Descripción	Susceptibilidad
ADP	Áreas adyacentes a drenajes principales	9
ADT	Áreas adyacentes a drenajes tributarios	5
AND	Áreas adyacentes a nacientes de drenajes	3

5.1.4.3.2.1.7 Hidrogeología

La saturación del regolito por efecto de agua de escorrentía y de infiltración genera inestabilidad, situación que fue identificada en campo. La inestabilidad generada por agua subsuperficial asociada a un regolito, estaría condicionada por el espesor del mismo y por la textura del material y la presencia de estructuras heredadas persistente, que genere interconexión de los flujos, situación que no se encuentra demostrada, por tanto, se le asigna una susceptibilidad a generar inestabilidad media.

Los depósitos de ladera identificados en la zona son de bajo espesor, por tanto, se desconsidera que en ellos se genere un acuífero que incida en la estabilidad del terreno. La saturación del coluvión por efecto de aguas lluvias y aguas subsuperficiales infiltradas en época de precipitación intensa, pueden generar pérdida de resistencia de los depósitos inconsolidados con la subsecuente inestabilidad. De lo anterior, se asigna una susceptibilidad baja a inestabilidad por efecto de un acuitardo asociado a depósitos de la ladera.

La unidad acuífera asociada a depósitos aluviales no genera inestabilidad debido a las condiciones morfométricas.

Tabla 5-44 Calificación de unidades hidrogeológicas

Hidrogeología	Nomenclatura	Susceptibilidad
Acuitardo en regolito	UHG3	5
Acuitardo en rocas fracturadas	UHG4	3
Acuitardo en depósitos de ladera	UHG2	3
Acuífero libre en depósitos aluviales	UHG1	1

5.1.4.3.2.2 Resultados

5.1.4.3.2.2.1 Zonificación geotécnica sin proyecto

En la ecuación 1 se observa la sumatoria algebraica de los mapas temáticos, a partir de la cual se obtuvo el mapa de zonificación en función de la susceptibilidad de las áreas a presentar procesos de inestabilidad (ver Tabla 5-45).

$$\sum[(PROCESOS * 25\%) + (PENDIENTE * 20\%) + (GEOMORFOLOGIA * 20\%) + (GEOLOGIA * 15\%)$$

$$+(USO\ DEL\ SUELO * 10\%) + (HIDROGEOLOGIA * 5\%) + (HIDROLOGIA * 5\%)]$$

Tabla 5-45 Reclasificación por rangos de las variables geotécnicas

Rango	Valor	Susceptibilidad
1 a 3	1	Muy baja
3,1 a 5	2	Baja
5,1 a 9	3	Media
9,1 a 15	4	Alta
> 15,1	5	Muy alta

En la Figura 5-109 se presenta el mapa de zonificación geotécnica del área en estudio para la condición actual (sin considerar las excavaciones del proyecto), donde se observa que el área, mayoritariamente presenta susceptibilidad a inestabilidad entre media y muy baja. Puntualmente se observan zonas con susceptibilidad alta, en zonas donde se encuentran procesos morfodinámicos como depósitos aluviales.

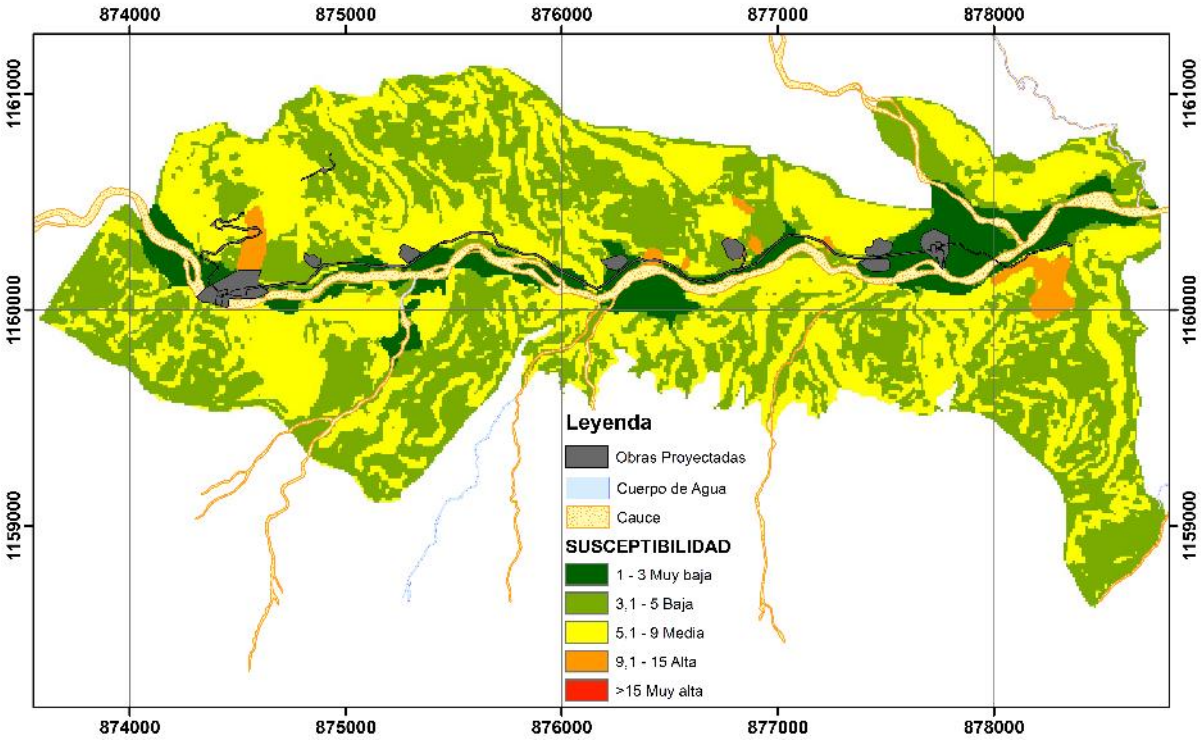


Figura 5-109 Mapa de zonificación geotécnica condición actual escala de trabajo 1:20.000.

En la Figura 5-110 se presenta el mapa de amenaza por procesos de inestabilidad, donde se diferencian cinco categorías en función del rango de factores de seguridad.

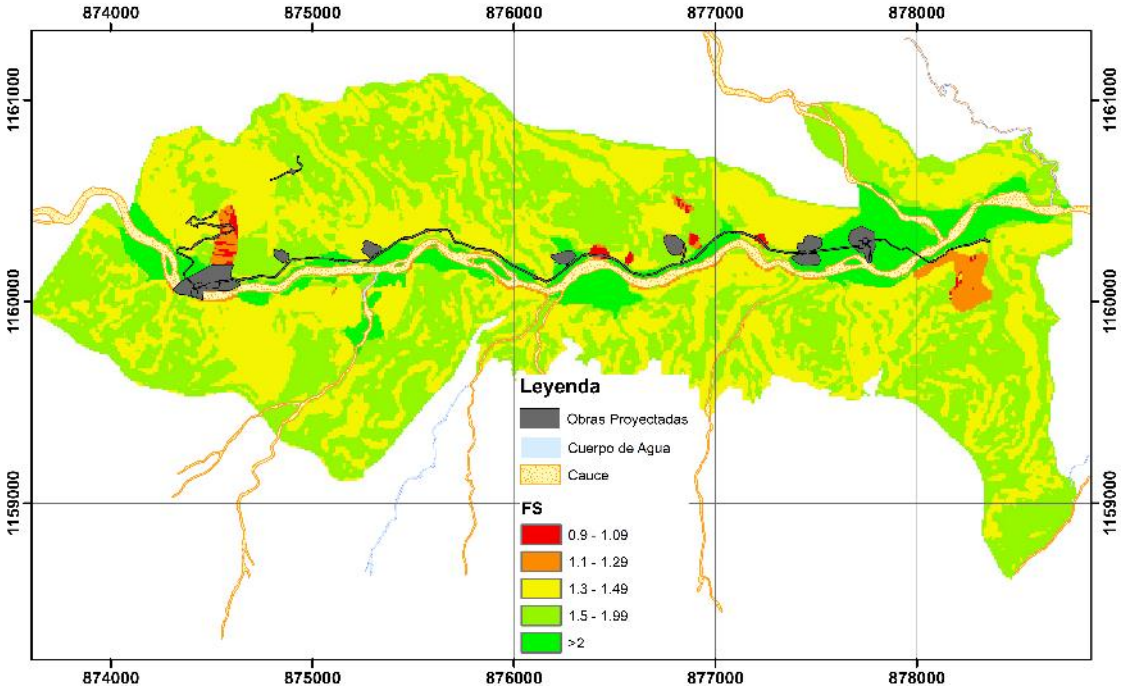


Figura 5-110 Mapa de amenaza por procesos de inestabilidad escala de trabajo 1:20.000.

5.1.4.4 Diseño Geotécnico

A continuación, se describe la metodología, los modelos geotécnicos asumidos por tipos de obra, los análisis para el diseño de taludes de excavación, los análisis de flujo y capacidad portante en las obras que lo requieran. Se incluyen, además, recomendaciones de cimentación para la zona de captación, desarenadores y casa.

5.1.4.4.1 Metodología de análisis

5.1.4.4.1.1 Estabilidad de los taludes de corte

Las obras principales para su implantación generan taludes de corte, dentro de las que se destacan la zona de captación, desarenador, casa de máquinas, canal de aducción y de conducción, además, de las vías de acceso al proyecto. Las secciones de análisis corresponden con las de mayor altura con inclinaciones típicas para este tipo de proyectos.

La evaluación de la estabilidad de los taludes de corte, se realiza mediante el análisis numérico para el talud proyectado, en función del factor de seguridad, mediante el programa Slide V6.0, que permite modelar diferentes estratos de suelo mediante diferentes métodos de análisis para determinar rangos de factores de seguridad destacando la superficie de falla de menor factor y realizando adicionalmente análisis seudo estático para tener en cuenta el sismo.

Para este caso se usó el método de Morgenstern and Price, el cual plantea un equilibrio límite de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Cada bloque o dovela interactúa con la adyacente considerando tensiones de contacto tanto horizontales como verticales. En la práctica profesional se considera este método como aceptable para el análisis de estabilidad en taludes. Para este proyecto en específico se usó un generador automático de fallas no circulares y optimización de la superficie encontrada de tal forma que se garantice la superficie de falla no circular más desfavorable.

La evaluación seudo-estática tuvo en cuenta lo indicado en el Mapa de Amenaza Sísmica de Colombia (Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010). La zona en estudio se encuentra en nivel de amenaza sísmica Intermedia, en donde se contempla un coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva $A_a = 0.15$. Para hallar la aceleración vertical a_v y horizontal a_h que se insiere en el modelo; se afecta el coeficiente A_a (aceleración pico efectiva) por unos factores según el caso, como se indica en el Numeral H.5.2.5 de la NSR-10 (Valores de K_{st}/a_{max} minimos para análisis seudoestático en taludes) (Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010), para material tipo suelo, enrocado y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%), como se presenta a continuación

$$a_v = 0.50A_a$$
$$a_h = 0.80A_a$$

Los factores de seguridad obtenidos en los modelos deben cumplir con lo presentado en la tabla H.2.4-1 de la NSR-10 (Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, 2010) para el caso de etapa de construcción. En la Tabla 5-46 se presentan los factores de seguridad que se deben garantizar para los taludes analizados.

Tabla 5-46. Factores de seguridad adoptados para los análisis de estabilidad.

Condición	FS	
	Diseño	Construcción
Taludes - Condición estática y agua subterránea normal.	1.50	1.25
Taludes - Condición seudo-estática con agua subterránea normal y coeficiente sísmico de diseño.	1.05	1.00

5.1.4.4.2 Capacidad portante en suelos

A continuación, se describe la base teórica de la metodología empleada para el cálculo de la capacidad portante de las estructuras.

5.1.4.4.2.1 Resistencia a la compresión

La capacidad a la compresión de zapatas ha sido estudiada por diferentes autores a mediados del siglo XX. Para el proyecto en estudio se utilizará la ecuación generalizada recomendada por (Kulhawy & Hirany, 1989) en el reporte EL-2870 preparado para la EPRI por la Universidad de Cornell.

La ecuación generalizada propuesta allí utiliza el formato presentado inicialmente por Terzagui con los factores generalizados propuestos por Vesic (1972).

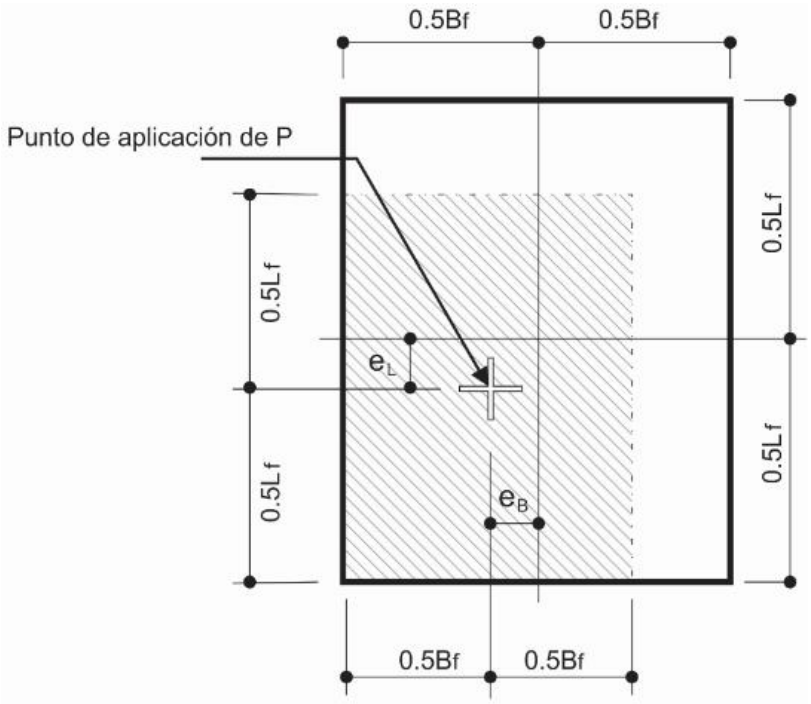


Figura 5-111 Esquema de zapata sometida a carga excéntrica.

$$q_u = \frac{Q_u}{B'L'} = c'^{N_c} \prod \zeta_{ci} + {}'_v N_q \prod \zeta_{qi} + \frac{1}{2} B\gamma N_\gamma \prod \zeta_{\gamma i}$$

Donde:

$B'L'$: Es el área apoyada de la zapata por efecto de la excentricidad y se calcula de la siguiente forma:

$$B' = B - 2e_B$$
$$L' = L - 2e_L$$

N_c, N_q, N_γ: Son factores de resistencia asociados a la cohesión, a la fricción y al peso del suelo por encima de la profundidad de desplante respetivamente. (Kulhawy &

Hirany, 1989) propone utilizar las ecuaciones de Vesic (1972) para el cálculo de los factores de resistencia:

$$N_c = (N_q - 1)cot\phi$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1)tan\phi$$

$$N_q = e^{\pi tan\phi} tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right)$$

$\sum \zeta_i$: Corresponde a los diferentes tipos de factores que influencian la resistencia a la compresión en zapatas, los cuales se listan a continuación:

- Factores de Forma. $\zeta_{cs}, \zeta_{qs}, \zeta_{\gamma s}$
- Factores de inclinación de la carga aplicada. $\zeta_{ci}, \zeta_{qi}, \zeta_{\gamma i}$
- Factores de inclinación de la superficie de desplante $\zeta_{ct}, \zeta_{qt}, \zeta_{\gamma t}$
- Factores de inclinación del talud adyacente $\zeta_{cg}, \zeta_{qg}, \zeta_{\gamma g}$
- Factores de Profundidad $\zeta_{cd}, \zeta_{qd}, \zeta_{\gamma d}$

Los Factores de forma se calculan de la siguiente manera:

$$\zeta_{cs} = 1 + \frac{N_q}{N_\gamma}\frac{B}{L}$$

$$\zeta_{qs} = 1 + \frac{B}{L}tan\phi$$

$$\zeta_{\gamma s} = 1 + 0{,}4\frac{B}{L}$$

Para zapatas corridas $L \to \infty$ y para circulares o cuadradas $\frac{B}{L} = 1$

Factores de Inclinación de la carga se calculan de la siguiente manera:

$$\zeta_{ci} = \begin{bmatrix} 1 - \dfrac{1 - \zeta_{qi}}{N_c tan\phi'} & si\ \phi > 0 \\ 0{,}5 + 0{,}5\sqrt{1 - \dfrac{H}{c'B'L'}} & si\ \phi = 0 \end{bmatrix}$$

$$\zeta_{\gamma i} = \left(1 - \frac{H}{P + B'L'c'cot\phi}\right)^{m_i+1} = \zeta_{qi}^{\frac{m_i+1}{m_i}}$$

$$\zeta_{qi} = \left(1 - \frac{H}{P + B'L'c'cot\phi}\right)^{m_i}$$

H es la carga horizontal y c' es la cohesión efectiva

$$m_{iB} = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L}} \quad En\ dirección\ de\ B$$

$$m_{iL} = \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B}} \quad En\ dirección\ de\ L$$

$$m_i = m_{iL}cos^2\theta + m_{iB}sen^2\theta$$

θ Representa el ángulo que forma la resultante horizontal con la dirección L como se muestra en la Figura 5-112.

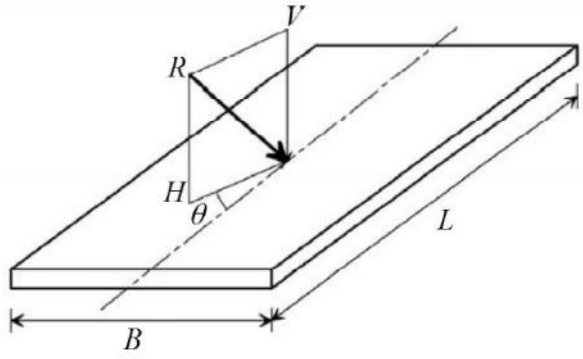


Figura 5-112 Representación del ángulo θ.

5.1.4.4.2.2 Resistencia por asentamiento

Diversos autores han presentado diferentes tipos de métodos para el cálculo de asentamientos elásticos inmediatos. Sin embargo, para efectos del proyecto se tomará como referencia el método propuesto por Mayne & Poulos (1999) los cuales utilizan la teoría de la elasticidad y factores de desplazamiento a partir de ecuaciones aproximadas de fácil programación. La ecuación para el cálculo de asentamiento se presenta a continuación:

$$\rho_E = \frac{qB'_e}{E_0}(1-\nu^2)I_G I_F I_E$$

Con:

$$B'_e = \sqrt{\frac{4B'L'}{\pi}}$$

Donde:

q Es la carga de servicio.

ν Es la relación de Poisson del suelo.

E_0 Es el módulo de elasticidad del suelo a nivel superficial.

I_G El factor de influencia por el aumento del módulo de elasticidad con la profundidad.

I_F Factor de influencia de la rigidez de la zapata.

I_E Es la influencia de la profundidad de desplante.

Mayne & Poulos (1999) proponen las siguientes ecuaciones aproximadas para el cálculo de los factores de influencia:

Para el caso de corrección por módulo de elasticidad se usa la siguiente ecuación:

$$I_G = \frac{1}{1{,}27 + \frac{0{,}75}{\left(\frac{E_0}{k_E B'_e}\right)^{0{,}8}}}$$

Con k_E como la pendiente del aumento lineal de la rigidez con la profundidad (Figura 5-113)

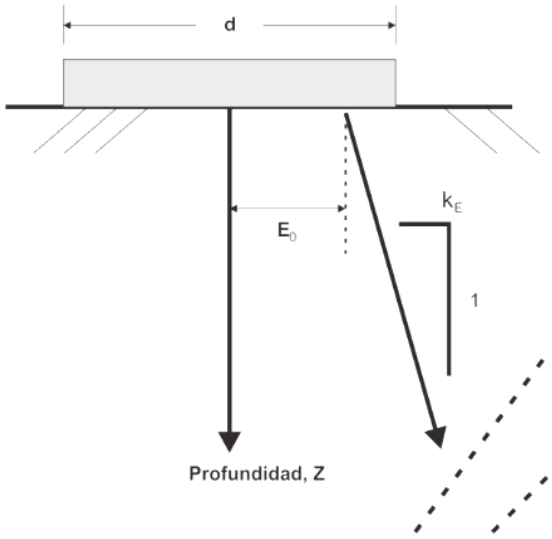


Figura 5-113 Esquema de variación lineal de la rigidez del suelo en función de la profundidad

La influencia de la rigidez de la zapata se puede calcular como se muestra en la siguiente ecuación:

$$I_F = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{4{,}6 + 10K_F}$$

Donde:

$$K_F \approx \frac{E_C}{E_{sb}}\left(\frac{2t}{B_e'}\right)^3$$

$$E_{sb} = E_0 + k_E D_f$$

E_C Módulo de elasticidad del concreto.

t Espesor de la zapata.

La influencia de la profundidad de desplante es uno de los factores más importantes en el cálculo de asentamientos en zapatas, Mayne & Poulos (1999) proponen la siguiente ecuación aproximada para dicho cálculo:

$$I_E \approx 1 - \frac{1}{3{,}5e^{1{,}22\nu - 0{,}4}\left(B_e'/D_f + 1{,}6\right)}$$

Los coeficientes anteriores están dados para un material homogéneo. En el caso de materiales heterogéneos se usará un método aproximado para el cálculo de los asentamientos basado en el método de diferencias finitas.

En este caso el asentamiento estará dado por:

$$\rho_E = \int_0^H \varepsilon_z \, dz$$

Utilizando el método de diferencias finitas y dividiendo el perfil geotécnico en capas de espesor reducido se tiene:

$$\rho_E = \sum_{i+1}^{n} \varepsilon_{zi} \Delta H_i$$

Donde ε_{zi} es la deformación en cada sub-capa y ΔH_i es el espesor de cada sub-capa.

Para calcular ε_{zi} se utiliza la teoría de la elasticidad, obteniendo:

$$\varepsilon_{zi} = \frac{\Delta\sigma_{zi}}{E_i} - \frac{\nu}{E_i}\left(\Delta\sigma_{xi} + \Delta\sigma_{yi}\right)$$

Los incrementos de tensiones se calculan en función de la profundidad z de la siguiente forma:

$$\sigma_{zi} = q\left\{1 - \frac{1}{[1 + (a/z_i)^2]^{3/2}}\right\}$$

$$\sigma_{xi} = \sigma_{yi} = q\left\{\frac{1}{2} + \upsilon - \frac{1+\upsilon}{[(a/z)^2 + 1]^{1/2}} + \frac{1}{2[(a/z)^2 + 1]^{3/2}}\right\}$$

Las ecuaciones anteriores se programan en una hoja de Excel para obtener los incrementos de asentamiento. El asentamiento final sería la sumatoria de cada incremento de asentamiento en la capa i.

5.1.4.4.3 Captación y canal de aducción

5.1.4.4.3.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras de captación y canal de aducción se excavarán en depósitos aluviales (Qal). En la Figura 5-119 se observa la localización en planta de los perfiles sobre los cuales se elaboró la estratigrafía de la zona del azud, canal de aducción y desarenador.

5.1.4.4.3.2 Capacidad portante

Se analiza la capacidad portante para el sitio de captación, específicamente este análisis se realiza para el sitio donde se ubica el azud en la condición de funcionamiento, a una profundidad de desplante promedio, teniendo en cuenta que la cimentación de la estructura en su eje longitudinal es inclinada. El análisis se realizó asumiendo cada contacto estructura-material como una zapata cuadrada de dimensiones 1,0m x 1,0m.

De la Figura 5-114 se presentan las curvas de capacidad y asentamiento, considerando la estructura dispuesta directamente sobre la grava arenosa del depósito aluvial, para la profundidad de desplante representativa.

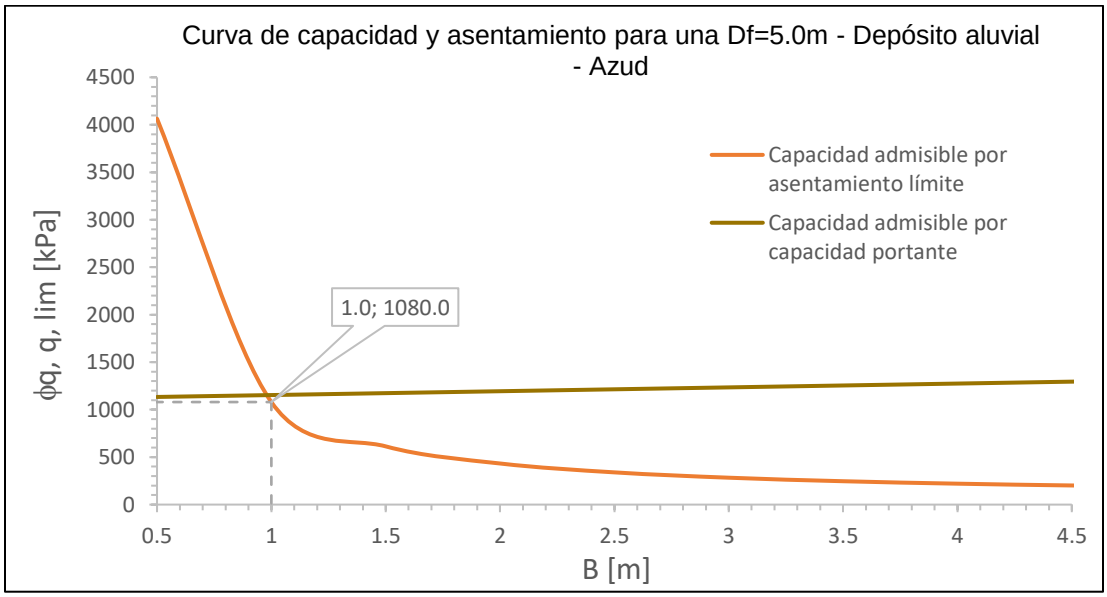


Figura 5-114 Ábaco de capacidad y asentamiento zapata cuadrada – Df = 5,0m – Depósito aluvial.

Se observa que la capacidad de carga límite del suelo es de 1.080 KPa, se recomienda verificar el valor de la carga transmitida por la estructura del azud con el resultado anteriormente mencionado.

5.1.4.4.3.3 Flujo sub-superficial

Las obras de derivación consisten en un vertedero de crecientes/azud con sus muros de cierre, captación y obras complementarias. Las estructuras complementarias incluyen descarga de fondo, tanque de aquietamiento, vertedero de excesos, descarga del caudal ecológico, desarenador y canal de conducción.

El azud dará lugar a un pequeño represamiento del río debido a la altura de la estructura. La estabilidad de las obras se encuentra asociadas al control de erosión

hidráulica o tubificación tanto bajo la estructura como por los estribos, y a garantizar una apropiada capacidad portante del terreno. A continuación, se presentan estos aspectos.

5.1.4.4.3.3.1 Estudio y diseño para la condición de flujo del azud

En la zona donde se cimentarán las estructuras de derivación y captación se presenta un depósito aluvial. El perfil estratigráfico se puede observar localizado en planta en la Figura 5-119.

La estabilidad de estas estructuras está definida por dos aspectos: estabilidad ante erosión por flujo de agua bajo la estructura y estabilidad global. Esta última es controlada por la geometría de la sección, la cual es definida por los responsables del diseño hidráulico.

El análisis de flujo bajo la estructura se realiza teniendo en cuenta las condiciones de trabajo, es decir, el gradiente impuesto por la columna de agua en la cara de aguas arriba y la columna de agua en la cara de aguas abajo, y la geometría de la cimentación. Se utilizó el programa Phase 2 V8.0 de la firma RocScience para evaluar el flujo bajo la estructura, con las condiciones arriba citadas.

El análisis genera como resultado el caudal que pasa bajo la estructura y los gradientes que se presentan en diferentes partes de la cimentación. Los caudales infiltrados se evalúan con base en el valor de la permeabilidad asignado a la cimentación, mientras que la estabilidad por tubificación se establece comparando los gradientes calculados para las condiciones de trabajo con los gradientes considerados permisibles para el material de cimentación. Con base en valores permisibles de gradiente utilizado en otros proyectos y/o publicados por diferentes entidades internacionales, se evaluó el potencial de tubificación en la cimentación del azud.

Se realizaron los análisis considerando la estructura de cimentación con llaves de tres (3) metros en la zona de aguas arriba y aguas abajo, aumentando así el empotramiento de la estructura con respecto al nivel del terreno, lo que disminuiría la probabilidad de que esta sea arrastrada durante una creciente. Dentro del análisis se evaluó la estabilidad de la cimentación considerando la presencia o no, de la losa de concreto ubicadas aguas abajo de la estructura de azud, en función de las subpresiones. Posteriormente se propone una geometría con base en los resultados obtenidos que se considera más adecuada para el caso de estudio.

El gradiente que se genera y las subpresiones bajo la losa de cimentación del azud, van a depender de la columna de agua aguas arriba y aguas abajo, en relación a la geometría de la cimentación, independiente de la permeabilidad del estrato subyacente.

El análisis de flujo se realizó para una lámina de agua en condiciones normales de operación, considerando una permeabilidad de 10^{-4}m/seg para el estrato en donde se

cimentará la presa y una permeabilidad de $5x10^{-6}$m/seg para un material correspondiente con grava arenosa compactada que recubre la zona de las llaves, encontrándose que los gradientes obtenidos garantizan la estabilidad por tubificación en la cimentación.

En el anexo 5.1.1. geología, geotecnia, hidrogeología y en la Figura 5-115, Figura 5-116, Figura 5-117 y Figura 5-118 se presenta la distribución de cabeza total, cabeza de presión y gradiente hidráulico en el estrato de suelo de cimentación.

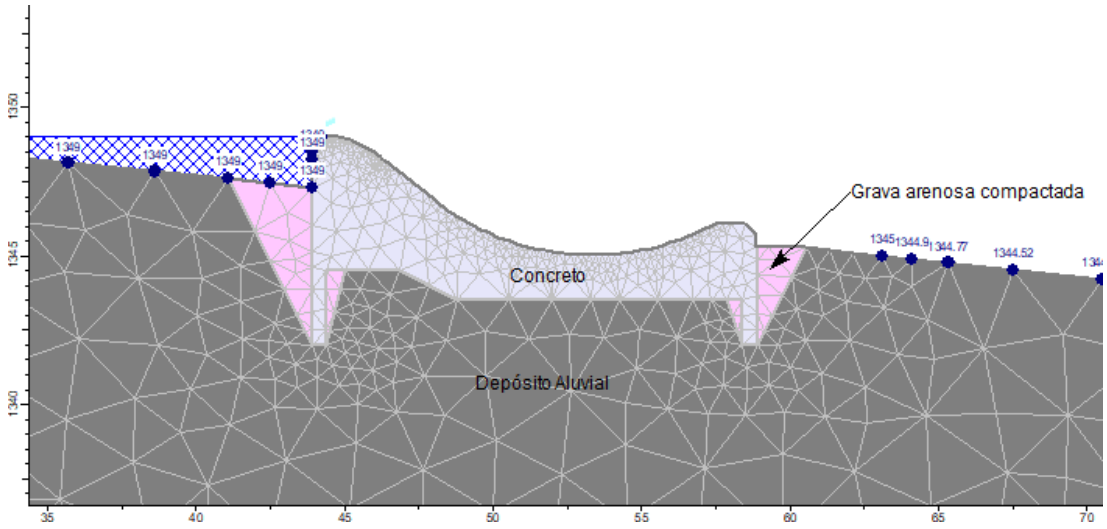


Figura 5-115 Modelo considerando lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A'

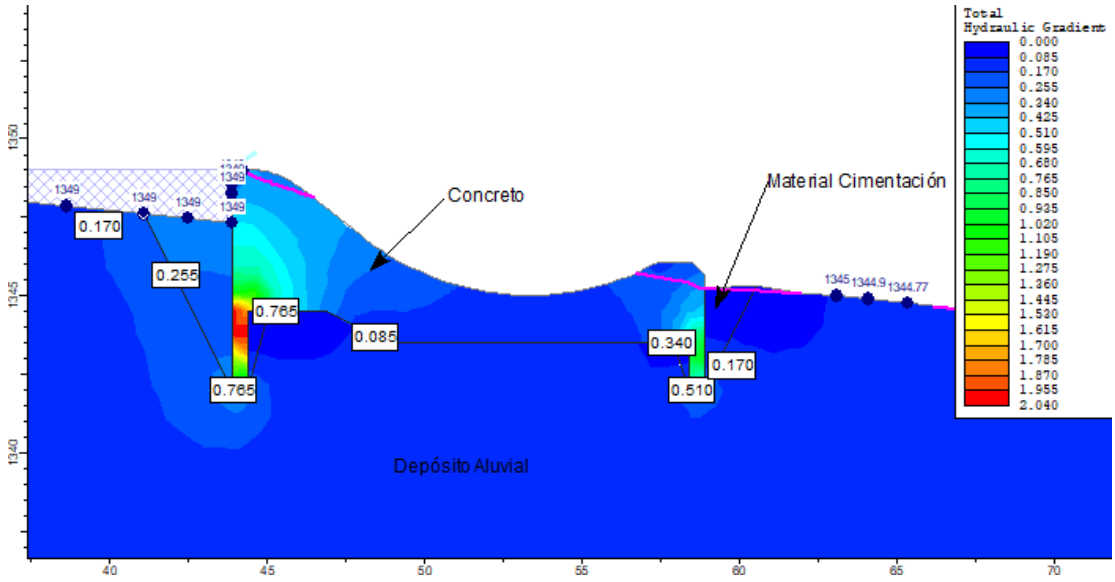


Figura 5-116 Gradiente hidráulico - lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A'

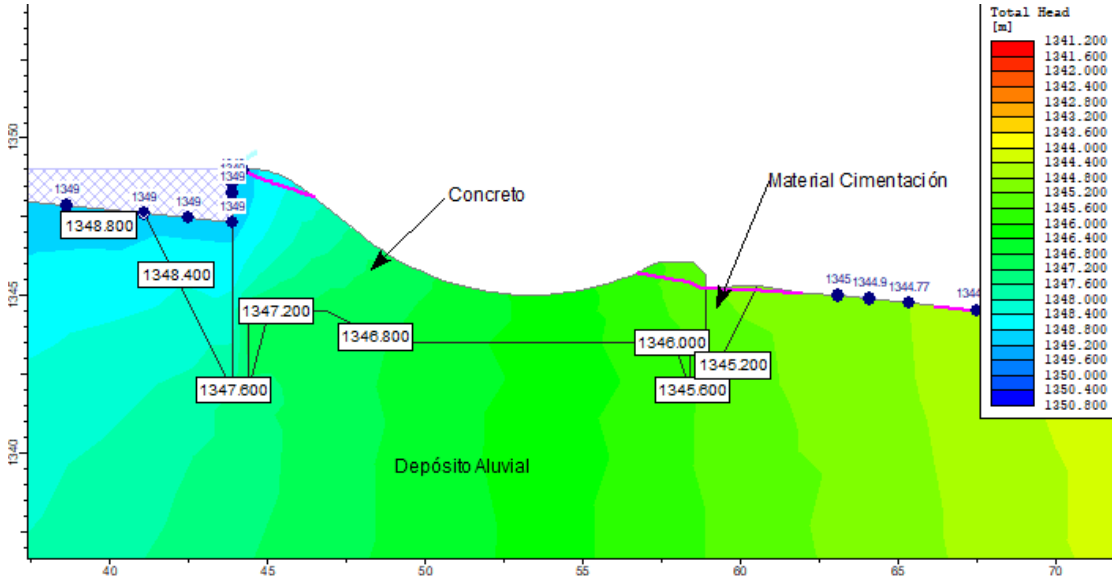


Figura 5-117 Cabeza total - lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A'

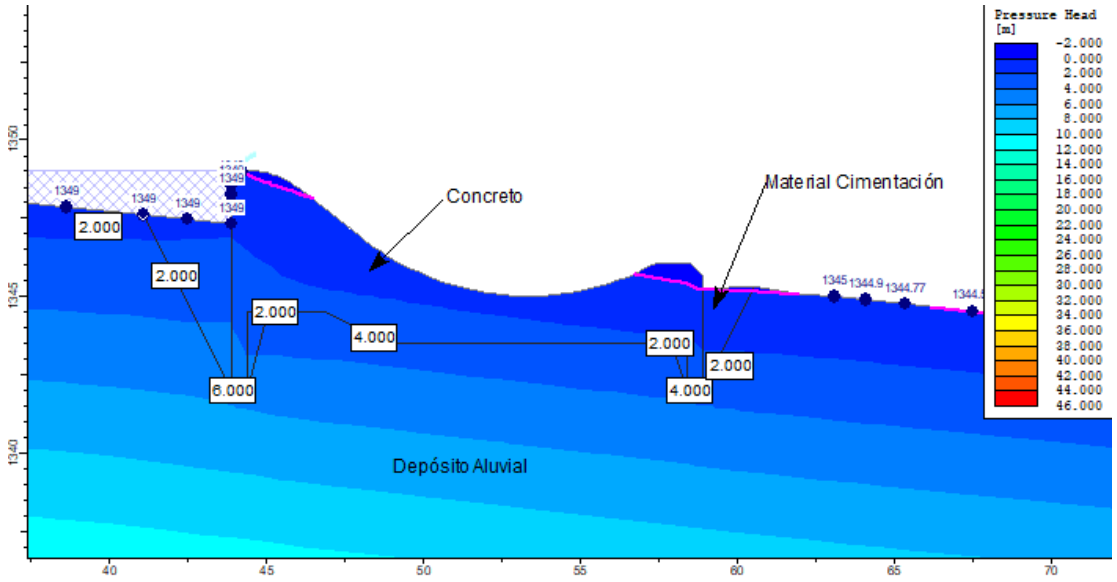


Figura 5-118 Cabeza de presión - lámina de agua producida por el caudal de diseño. Sección A-A'

5.1.4.4.3.4 Excavaciones

Para el análisis de las excavaciones se hizo uso de las secciones localizadas en planta en la Figura 5-119 definidas a partir de los cortes de mayor altura. Se parte desde la geometría de excavación propuesta inicialmente por el diseñador de obras civiles.

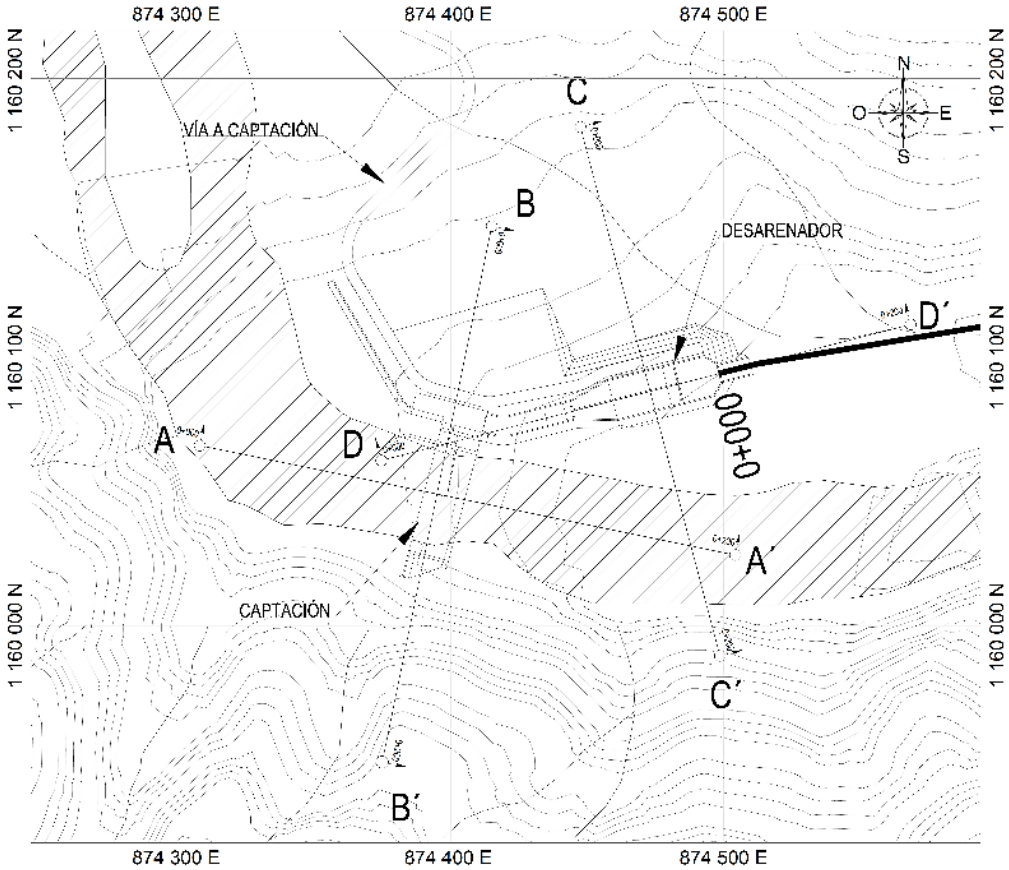


Figura 5-119 Secciones en planta de Captación y Casa de Máquinas.

5.1.4.4.3.4.1 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección B-B' - Captación

Las obras de captación se proyectan sobre un depósito aluvial y sus excavaciones transversales tienen influencia sobre suelo residual, estos estratos fueron determinado conforme a la exploración en campo.

En la Figura 5-120 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud derecho bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Para este talud por su complejidad se recomienda el uso de drenes subhorizontales para abatir el nivel freático y la instalación de anclajes.

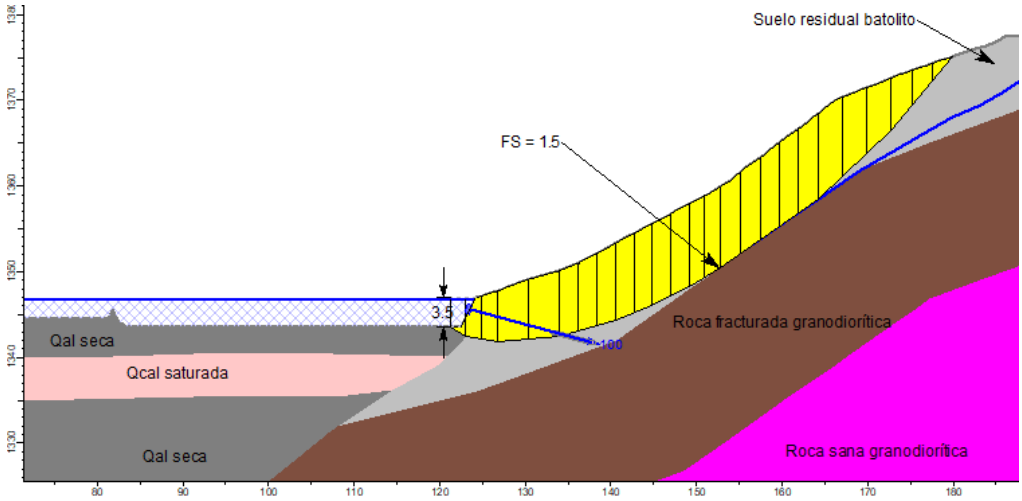


Figura 5-120 Análisis de estabilidad estático. Talud derecho con corte propuesto. Sección B-B' – Captación.

En la Figura 5-121 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,1, el cual se considera aceptable para la obra.

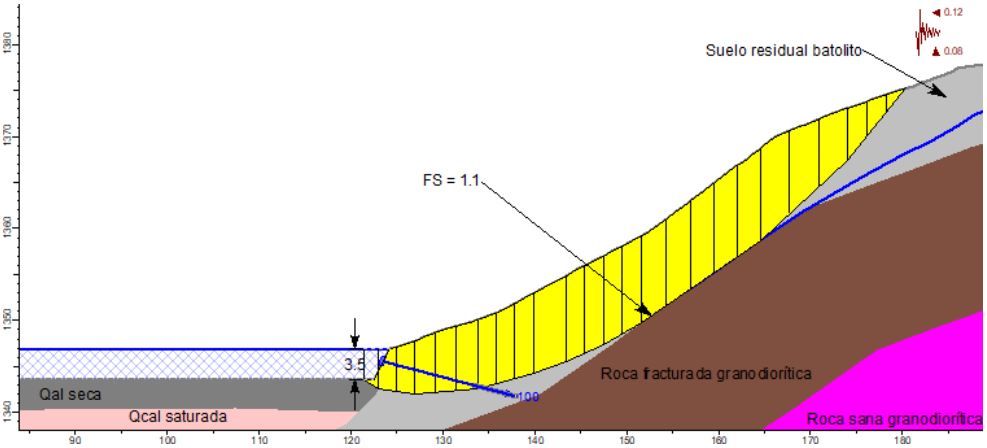


Figura 5-121 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud derecho con corte propuesto. Sección B-B' – Captación

.

El talud izquierdo de la sección B-B' no se consideró para los análisis de estabilidad debido a que no cuenta con condiciones que afecten la estabilidad del terreno.

5.1.4.4.4 Desarenador

5.1.4.4.4.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras del desarenador se excavarán en depósitos aluviales (Qal). En la Figura 5-119 se observa la localización en planta de los perfiles sobre los cuales se elaboró la estratigrafía de la zona.

5.1.4.4.4.2 Capacidad portante

Se analiza la capacidad portante para el sitio de desarenador en la condición de funcionamiento, a una profundidad de desplante promedio, teniendo en cuenta que la cimentación de la estructura en su eje longitudinal es inclinada. El análisis se realizó asumiendo cada contacto estructura-material como una zapata cuadrada de dimensiones 1,0m x 1,0m.

De la Figura 5-122 se presentan las curvas de capacidad y asentamiento, considerando la estructura dispuesta directamente sobre la grava arenosa del depósito aluvial, para la profundidad de desplante antes mencionadas.

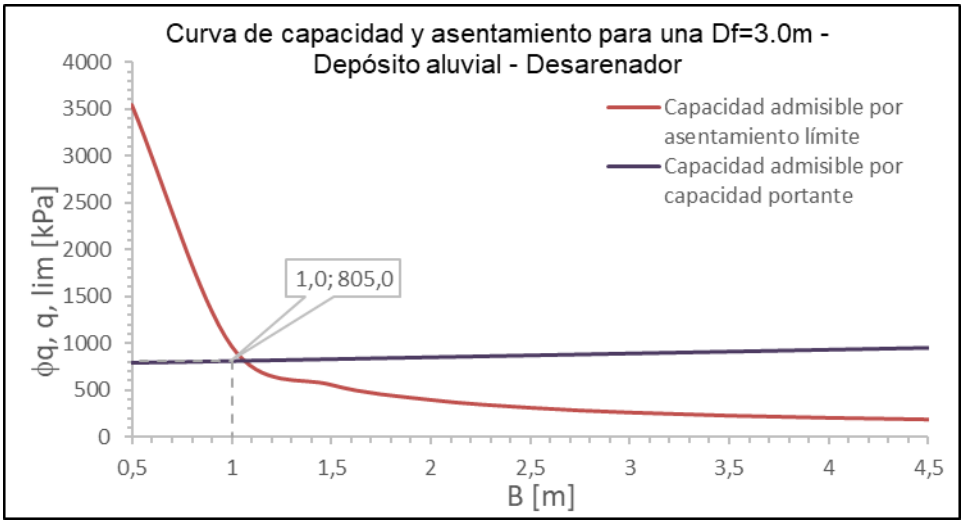


Figura 5-122 Ábaco de capacidad y asentamiento zapata cuadrada – Df = 3,0m – Depósito aluvial.

Se observa que la capacidad de carga límite del suelo es de 805 KPa, se recomienda verificar el valor de la carga transmitida por la estructura del desarenador con el resultado anteriormente mencionado.

5.1.4.4.4.3 Excavaciones

5.1.4.4.4.3.1 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección C-C' (Desarenador)

El desarrollo de los análisis de estabilidad de las excavaciones proyectadas para la construcción del desarenador solo se realizó sobre el talud que se consideró más susceptibles. Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes al desarenador como se indican en la sección C-C' se proyectan sobre un depósito aluvial que debido al nivel freático genera una saturación en uno de sus estratos.

En la se Figura 5-119 presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad.

En la Figura 5-123 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,6, el cual cumple con los requerimientos para la obra.

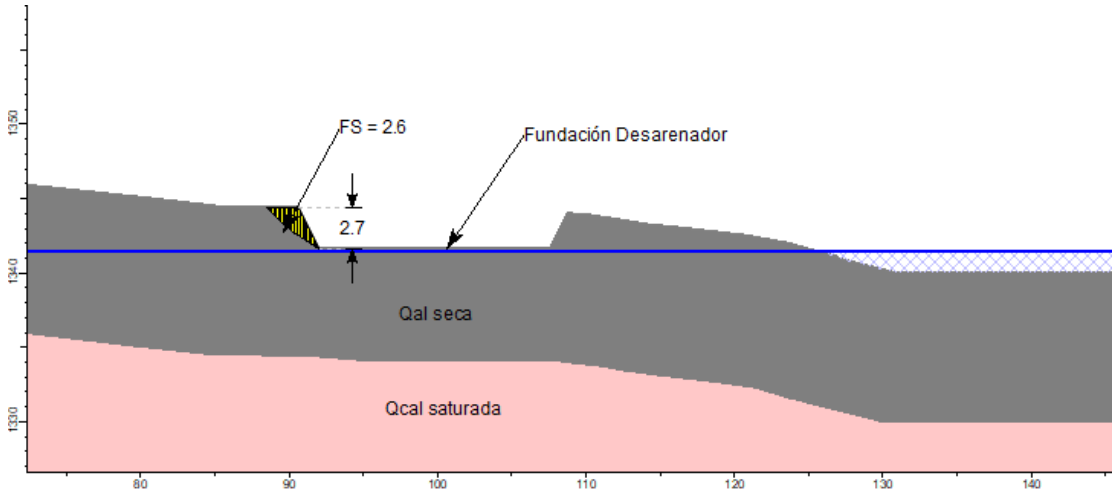


Figura 5-123 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección C-C' – Desarenador

En la

Figura 5-124 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 2,0, el cual se considera aceptable para la obra.

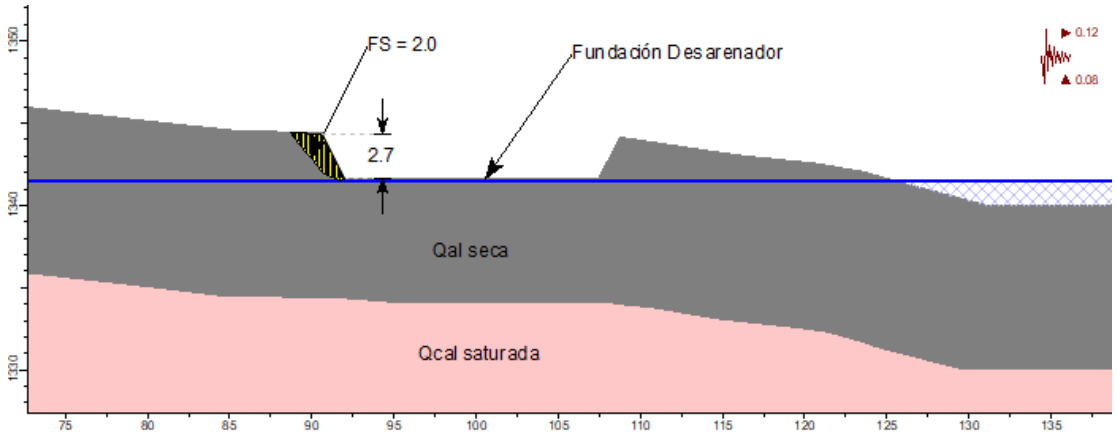


Figura 5-124 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección C-C' – Desarenador

5.1.4.4.5 Conducción

5.1.4.4.5.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción se proyectan sobre distintos materiales, correspondientes a roca sana tipo granodiorítica de Batolito Antioqueño, macizo rocoso fracturado granodiorítico Batolito antioqueño, además, en la capa superior se encuentra suelo residual del Batolito Antioqueño. Se realiza el análisis por tramos homogéneos considerando las secciones más críticas.

5.1.4.4.5.2 Excavaciones

Se evaluó la estabilidad de los taludes según la localización y geometría propuestos por el responsable del diseño civil del proyecto.

5.1.4.4.5.2.1 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 0+310 Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 0+310 se proyectan sobre suelo residual y macizo rocoso fracturado de la roca granodiorítica.

En la Figura 5-125 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-126.

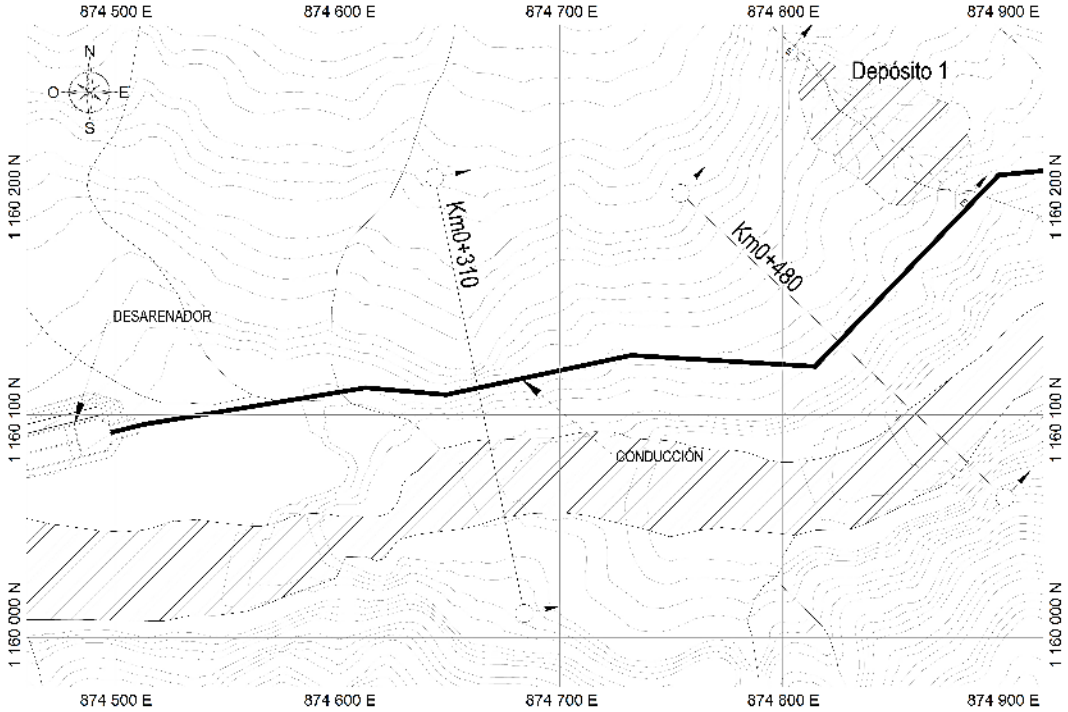


Figura 5-125 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente.

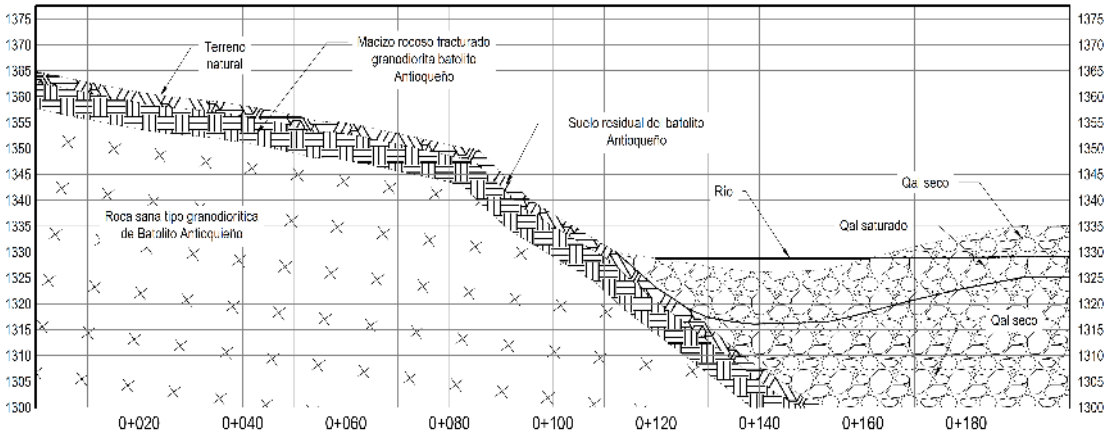


Figura 5-126 Perfil Estratigráfico, km 0+310 – Conducción.

En la Figura 5-127 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Se recomienda realizar una revegetalización inmediatamente después del corte.

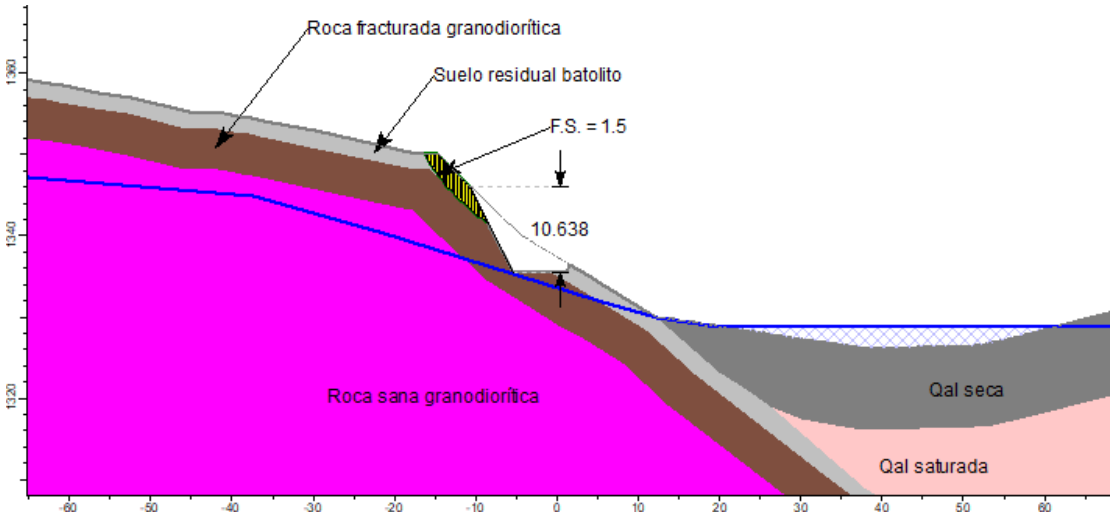


Figura 5-127 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+310 – Conducción.

En la Figura 5-128 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,3, el cual se considera aceptable para la obra.

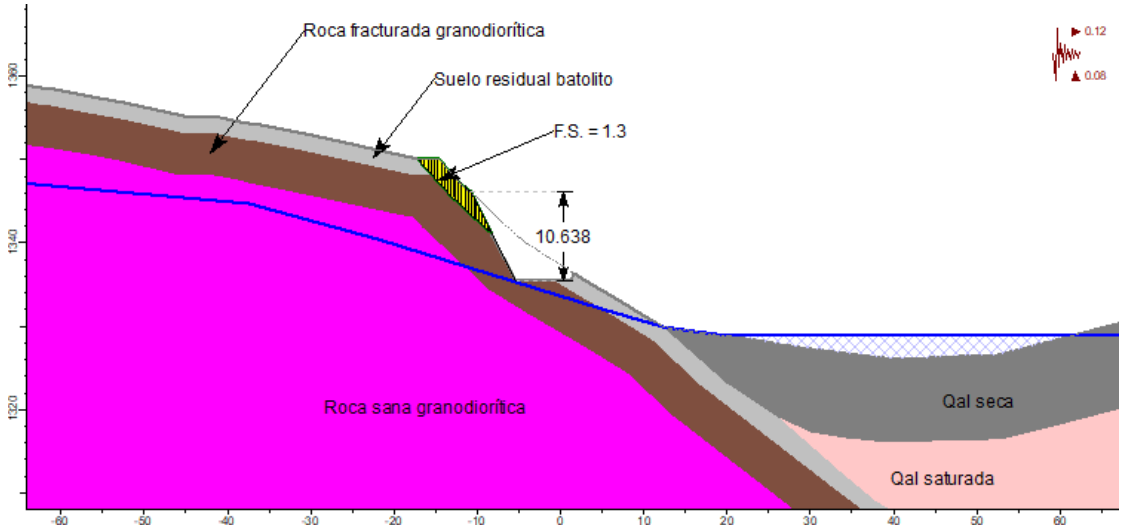


Figura 5-128 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+310 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.2 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 0+480 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 0+480 se proyectan sobre suelo residual.

En la Figura 5-125 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-129.

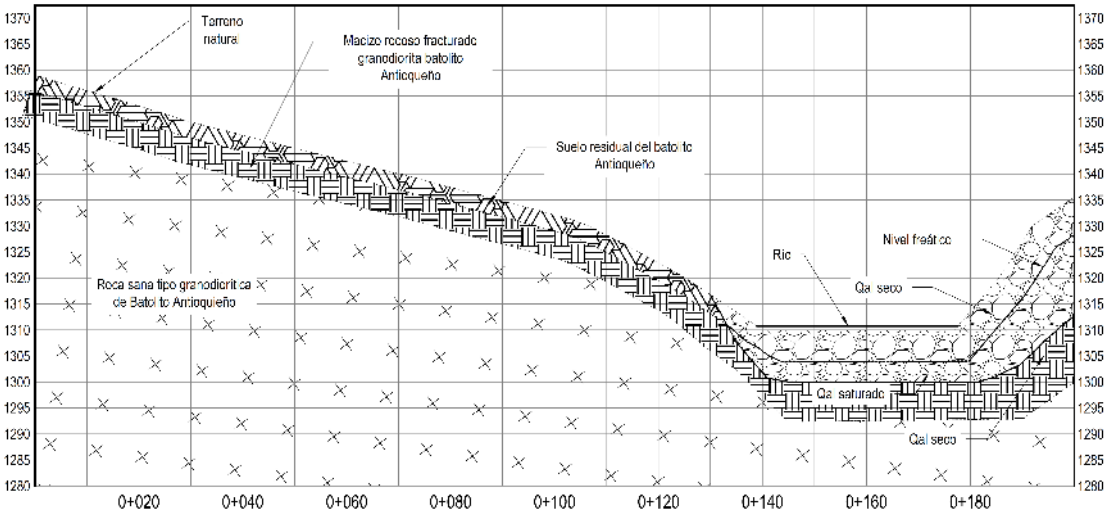


Figura 5-129 Perfil Estratigráfico, km 0+480 – Conducción.

En la Figura 5-130 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,7, el cual se considera aceptable para la obra. Para garantizar la estabilidad del talud se recomienda revegetalizar inmediatamente después del corte.

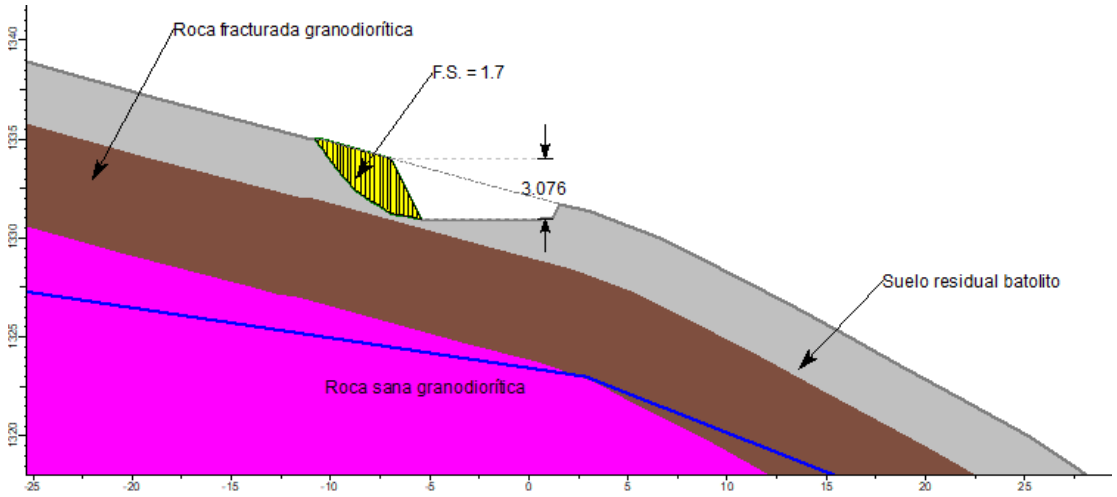


Figura 5-130 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+480 – Conducción.

En la Figura 5-131 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,4, el cual se considera aceptable para la obra.

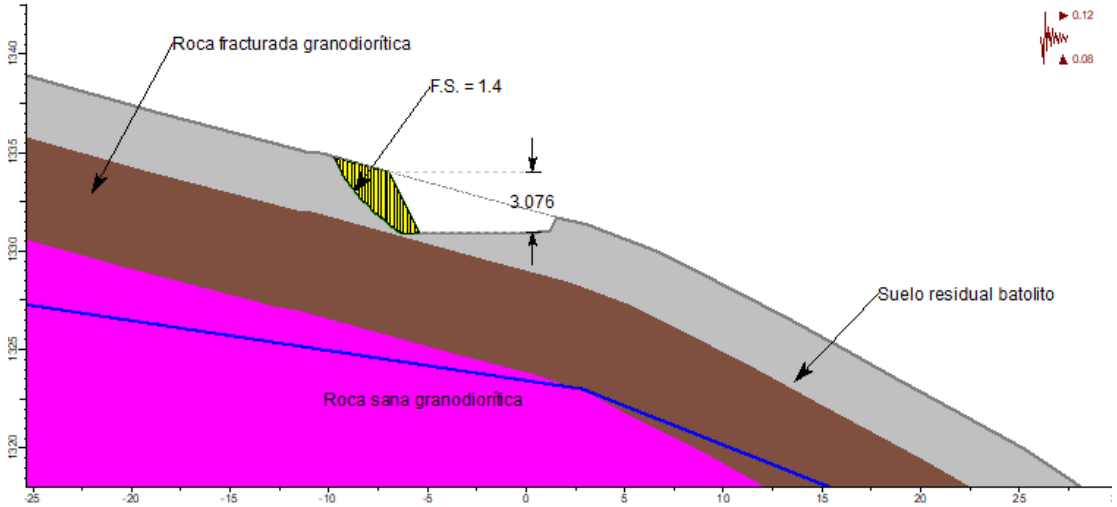


Figura 5-131 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección km0+480 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.3 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 0+910 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 0+910 se proyectan sobre suelo residual y el macizo rocoso granodiorítico.

En la Figura 5-132 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-133.

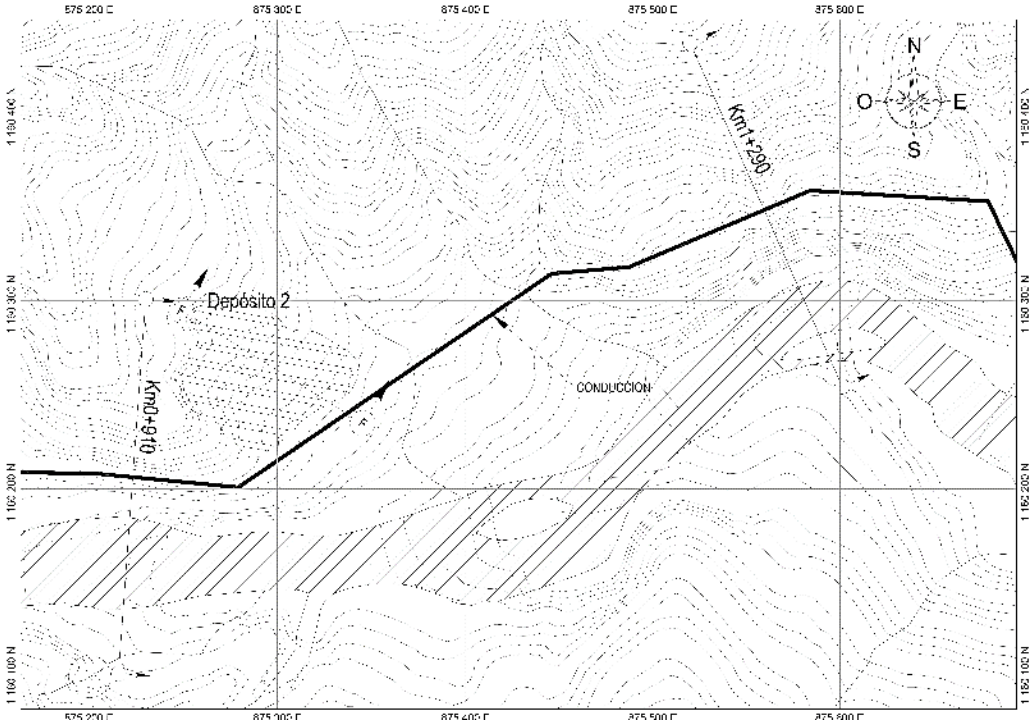


Figura 5-132 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente.

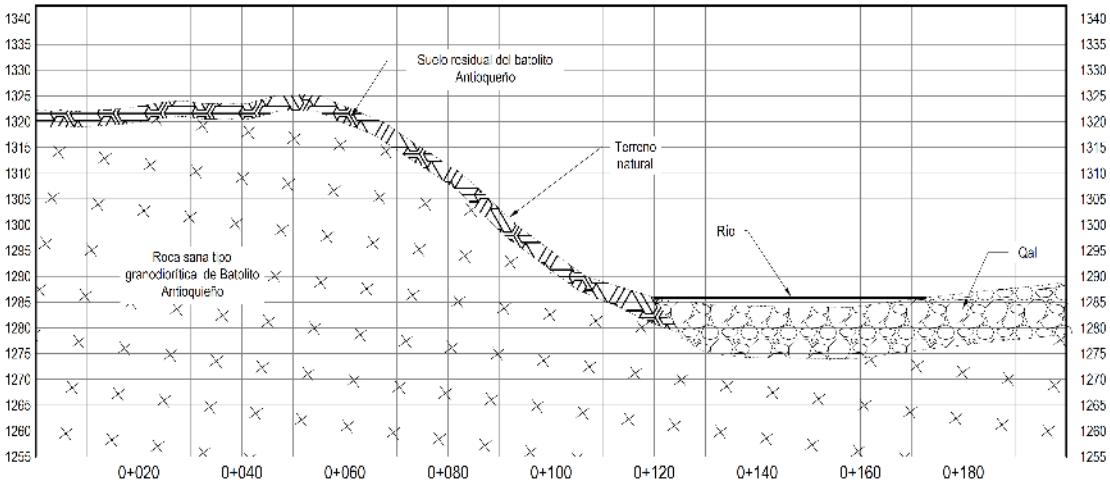


Figura 5-133 Perfil Estratigráfico, km 0+910 – Conducción.

En la Figura 5-134 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Para lograr la estabilidad del talud se recomienda el uso de drenes subhorizontales y la colocación de pernos con una pantalla de concreto.

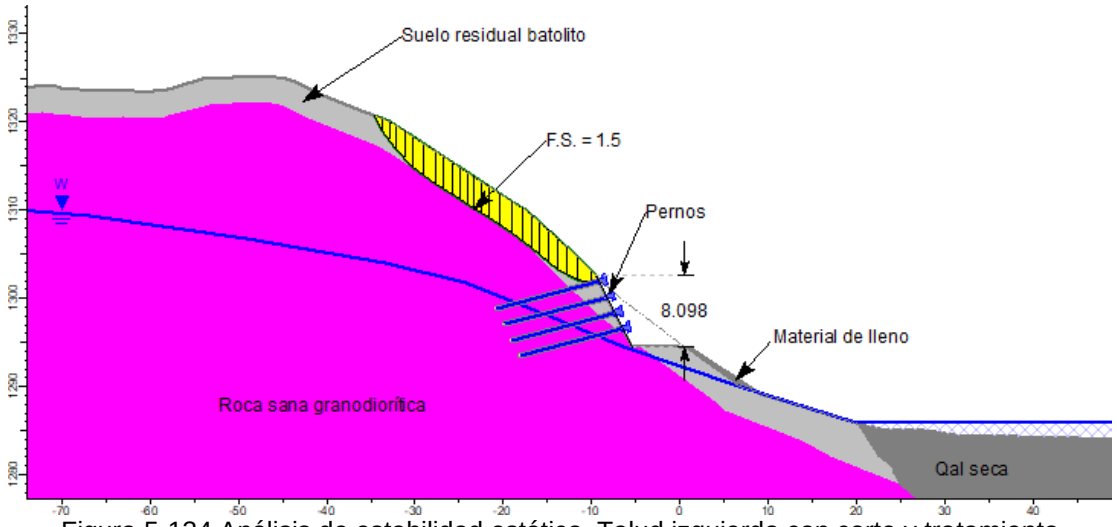


Figura 5-134 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km0+910 – Conducción.

En la Figura 5-135 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

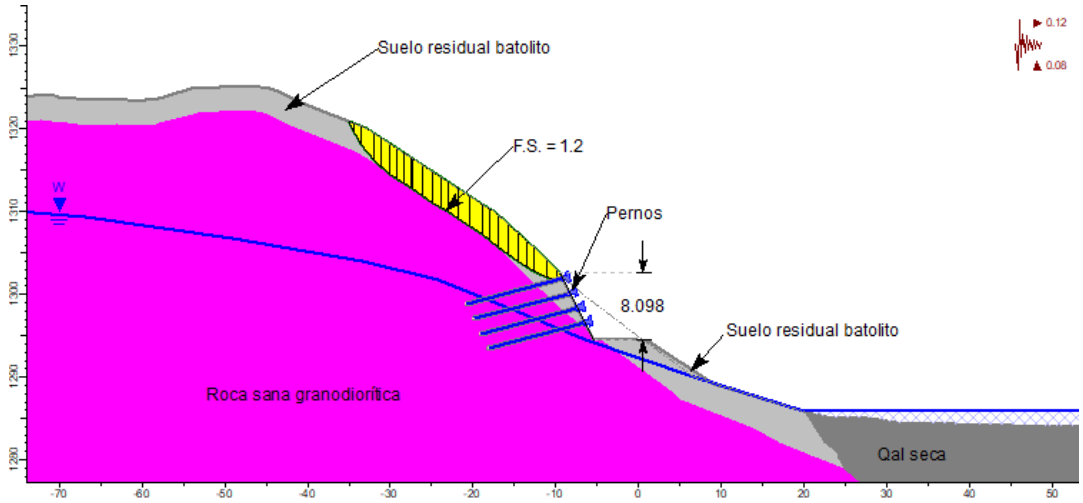


Figura 5-135 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km0+910 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.4 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 1+290 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 1+290 se proyectan sobre suelo residual y el macizo rocoso granodiorítico.

En la Figura 5-132 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-136.

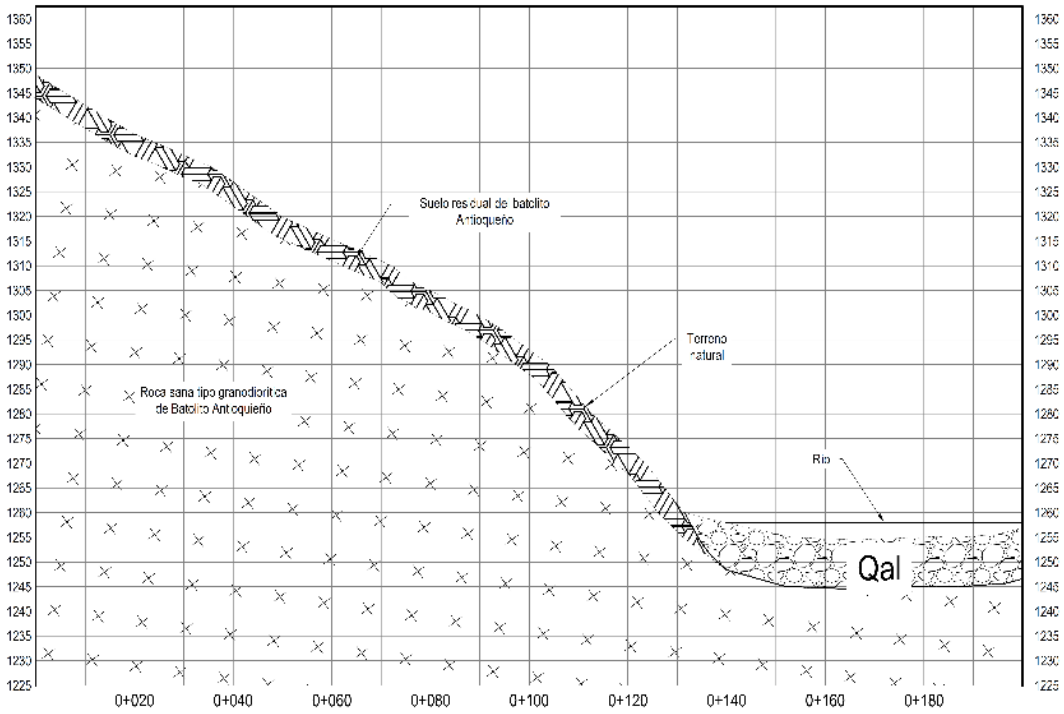


Figura 5-136 Perfil Estratigráfico, km 1+290 – Conducción.

En la Figura 5-137 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = ,.8, el cual se considera aceptable para la obra. Para lograr la estabilidad del talud se recomienda revegetalización inmediata después del corte.

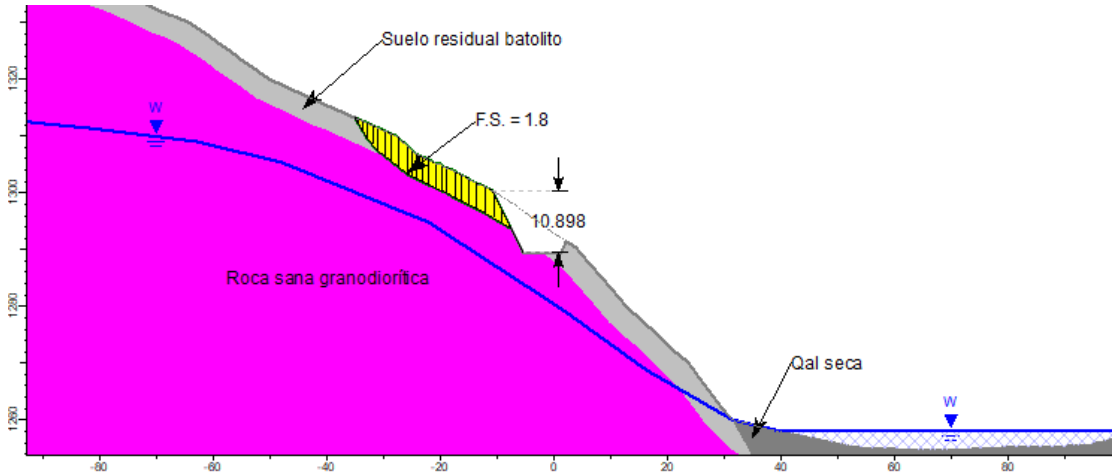


Figura 5-137 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+290 – Conducción.

En la Figura 5-138 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,6, el cual se considera aceptable para la obra.

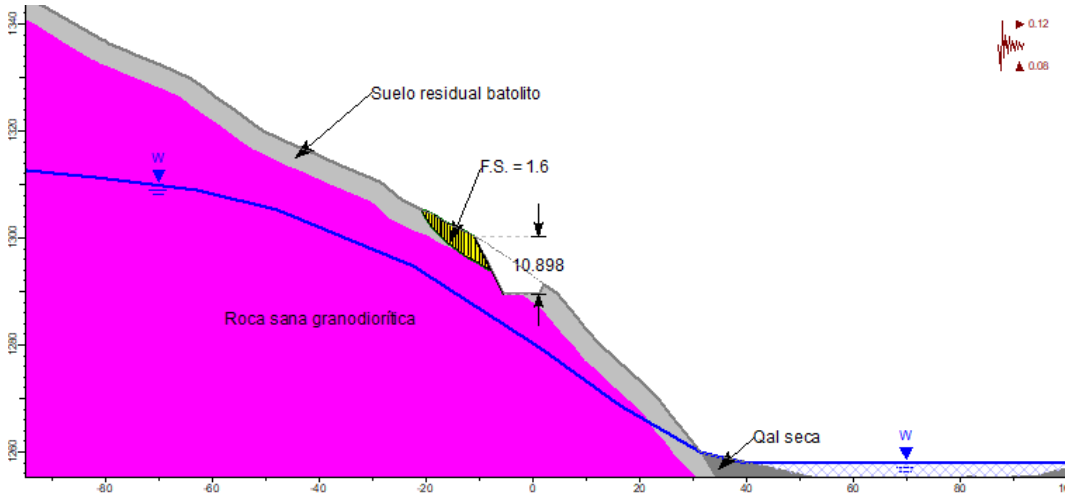


Figura 5-138 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+290 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.5 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 1+680 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 1+680 se proyectan sobre suelo residual y el macizo rocoso granodiorítico.

En la Figura 5-139 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-140.

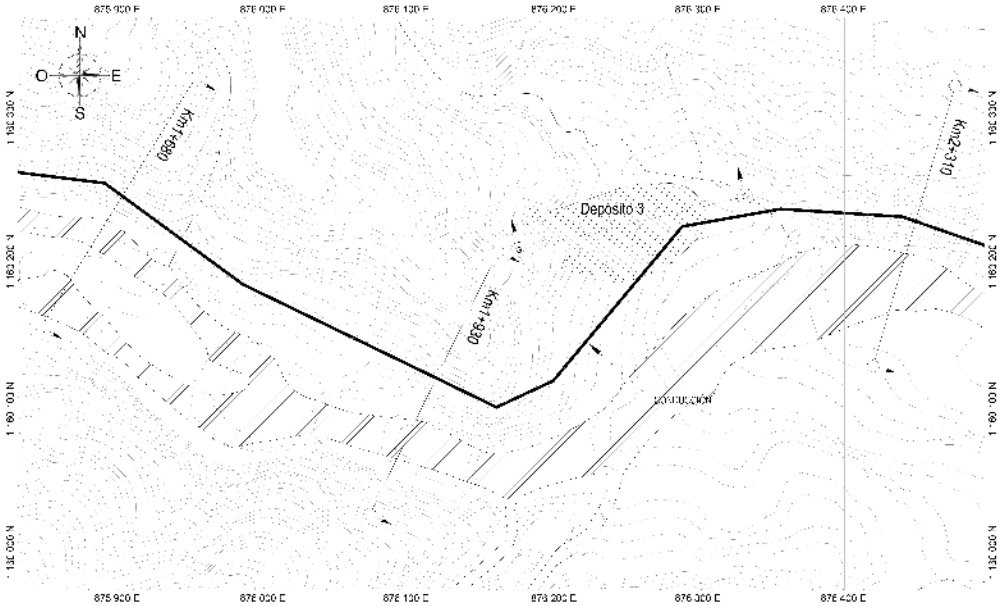


Figura 5-139 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente.

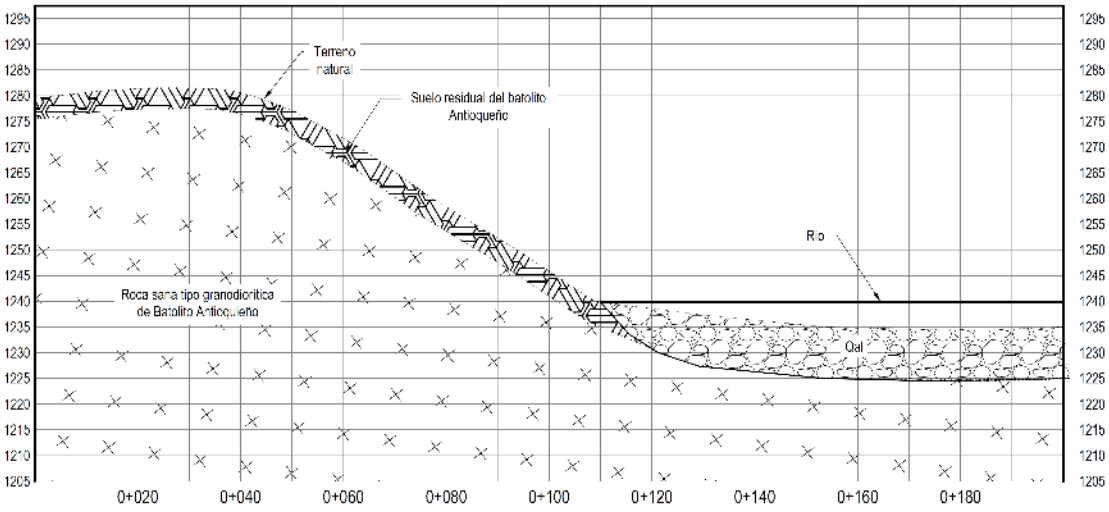


Figura 5-140 Perfil Estratigráfico, km 1+680 – Conducción.

En la Figura 5-141 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Para lograr la estabilidad del talud se

recomienda el uso de drenes subhorizontales y la colocación de pernos con una pantalla de concreto.

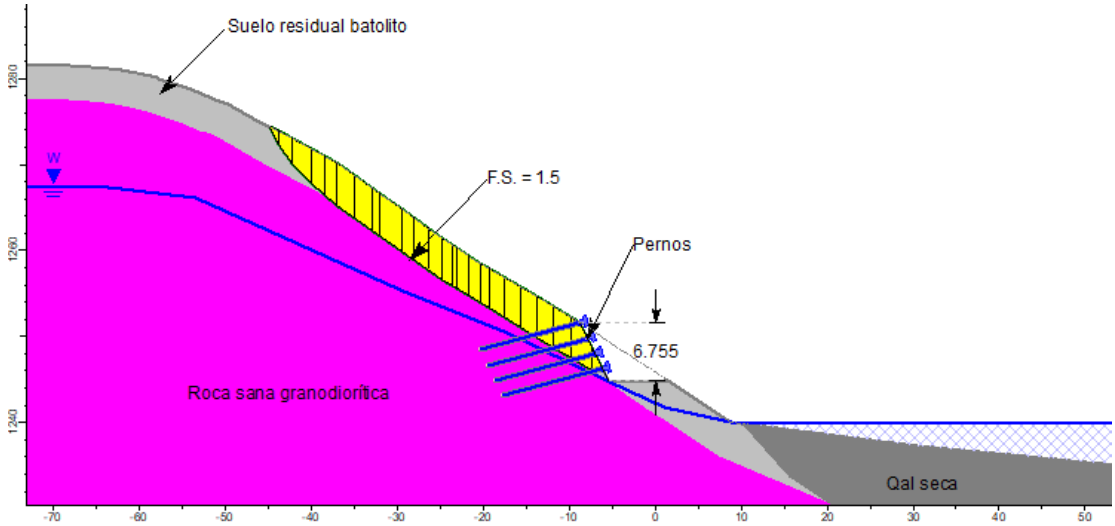


Figura 5-141 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km1+680 – Conducción.

En la Figura 5-142 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

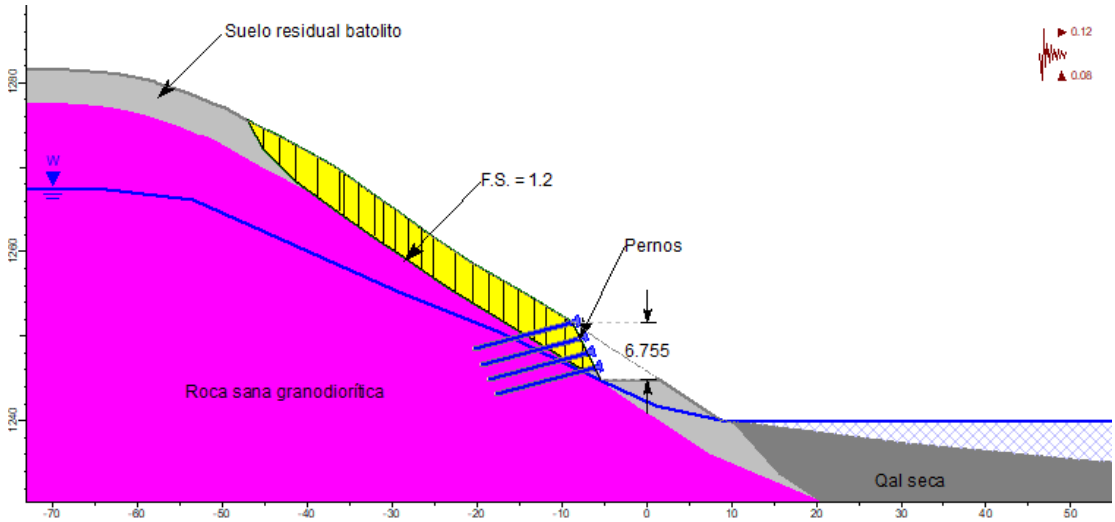


Figura 5-142 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km1+680 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.6 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 1+930 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 1+930 se proyectan sobre suelo residual.

En la Figura 5-139 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-143.

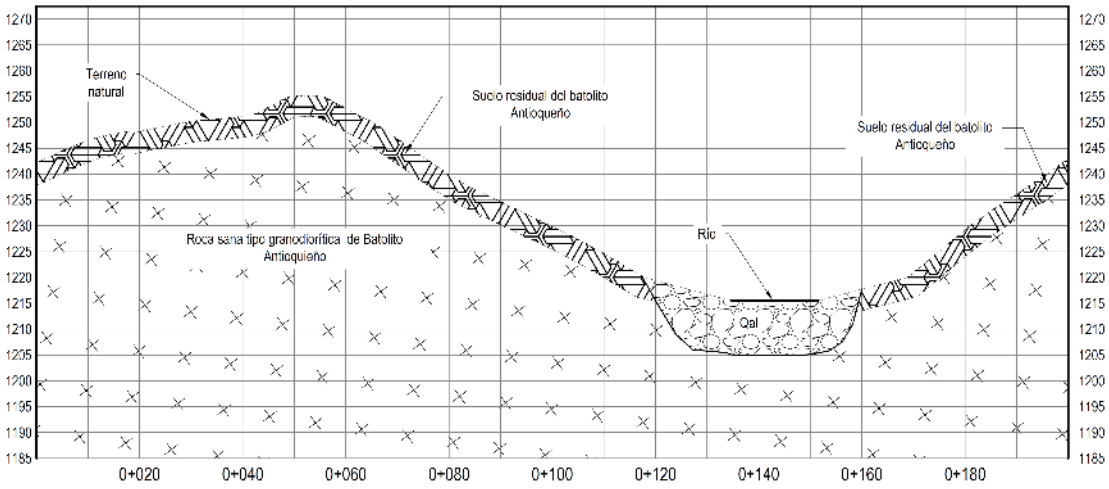


Figura 5-143 Perfil Estratigráfico, km 1+930 – Conducción.

En la Figura 5-144 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Para lograr la estabilidad del talud se recomienda revegetalización inmediata después del corte, además, del uso de drenes subhorizontales en la base del talud.

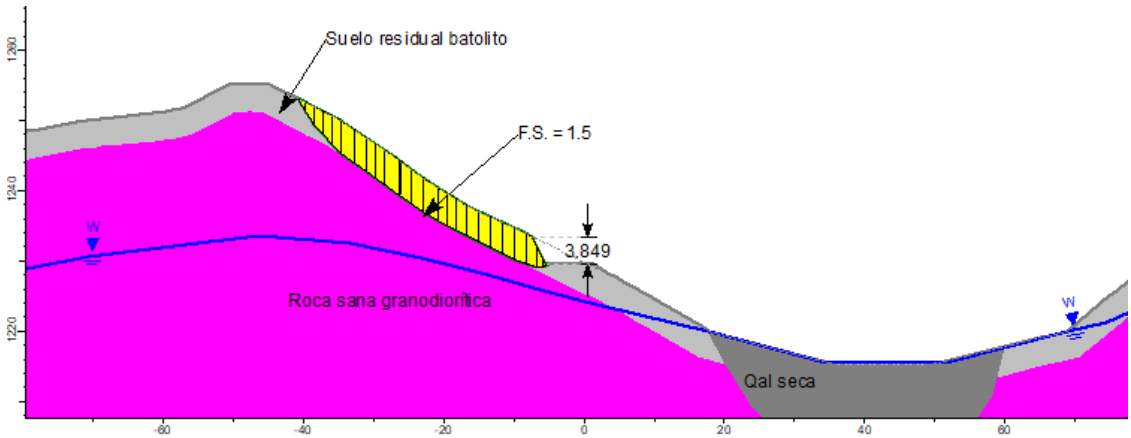


Figura 5-144 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+930 – Conducción.

En la Figura 5-145 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

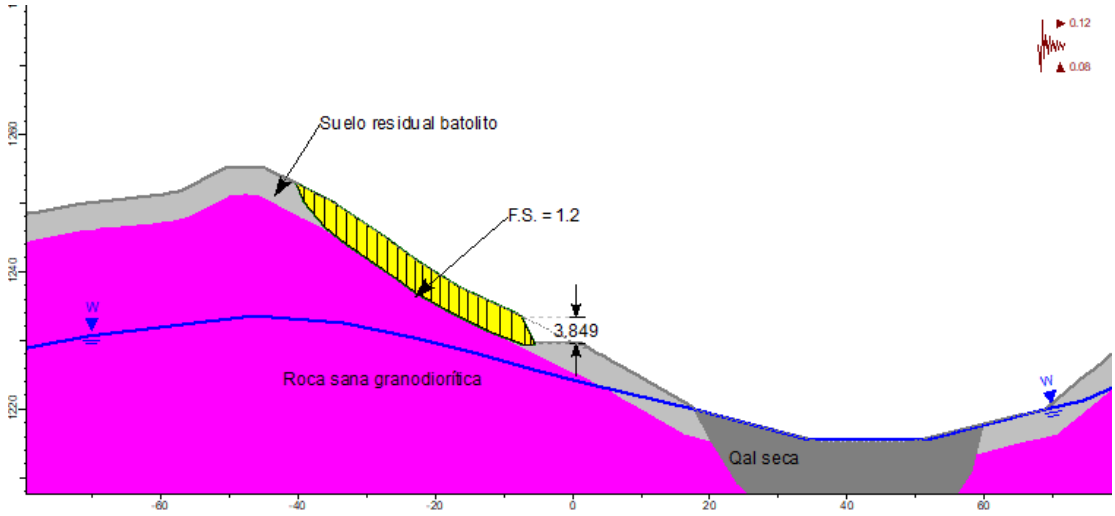


Figura 5-145 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km1+930 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.7 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 2+310 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 2+310 se proyectan sobre suelo residual.

En la Figura 5-139 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-146.

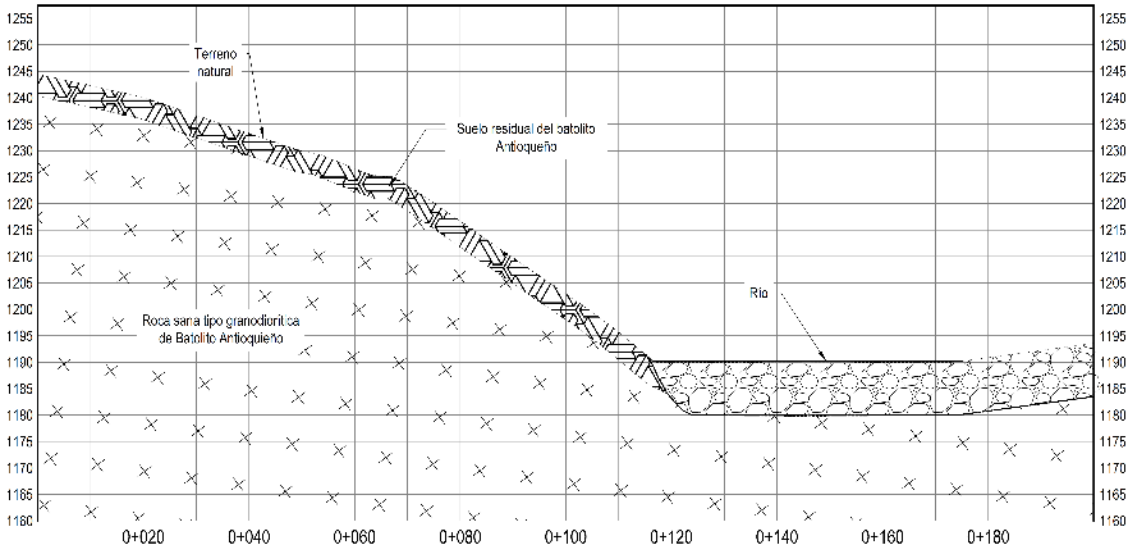


Figura 5-146 Perfil Estratigráfico, km 1+930 – conducción.

En la Figura 5-147 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Para lograr la estabilidad del talud se recomienda el uso de drenes subhorizontales y la colocación de pernos con una pantalla de concreto.

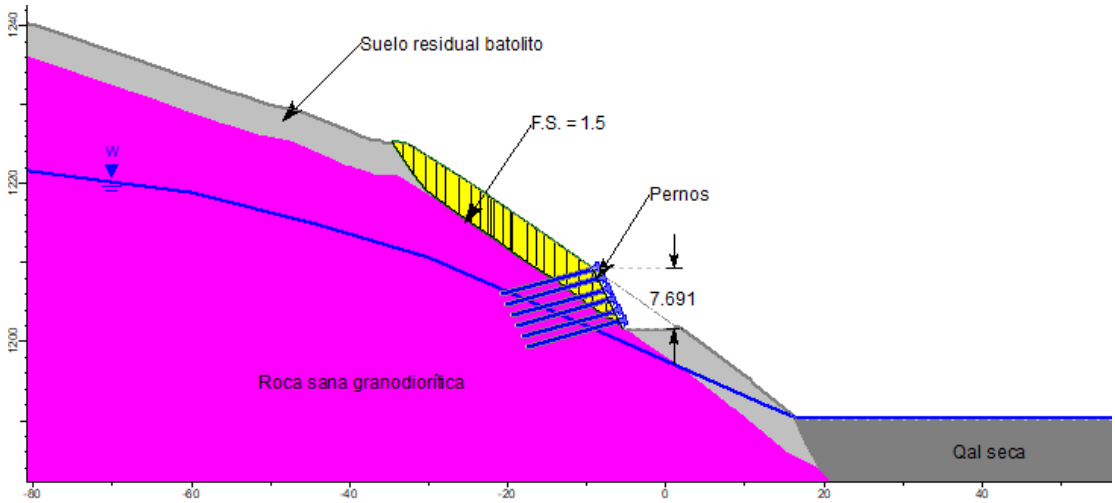


Figura 5-147 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km2+310 – Conducción.

En la Figura 5-148 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

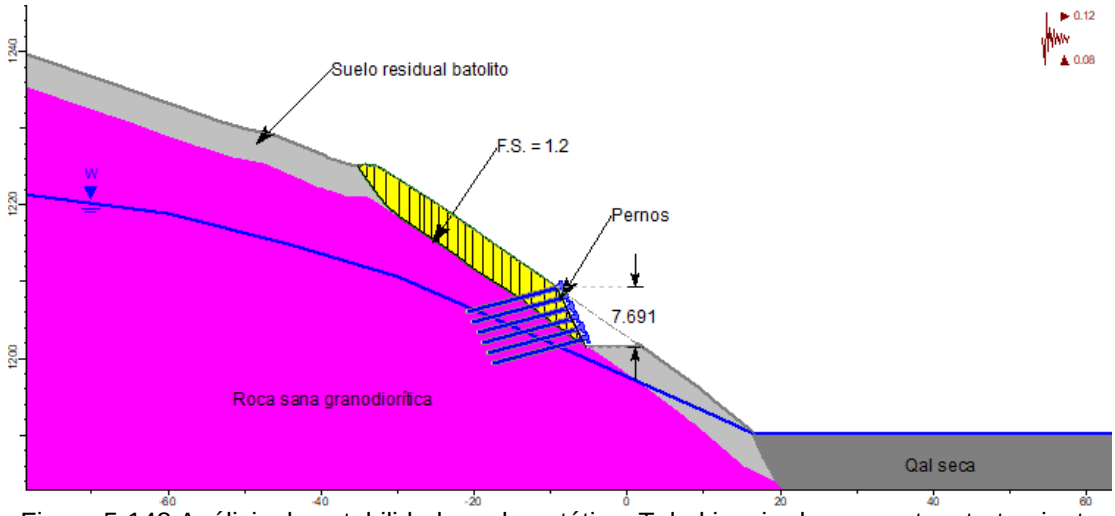


Figura 5-148 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte y tratamiento propuesto. Sección km2+310 – Conducción.

5.1.4.4.5.2.8 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección km 3+110 (Conducción margen izquierda)

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la conducción cercanas al km 3+110 se proyectan sobre suelo residual.

En la Figura 5-149 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-150.

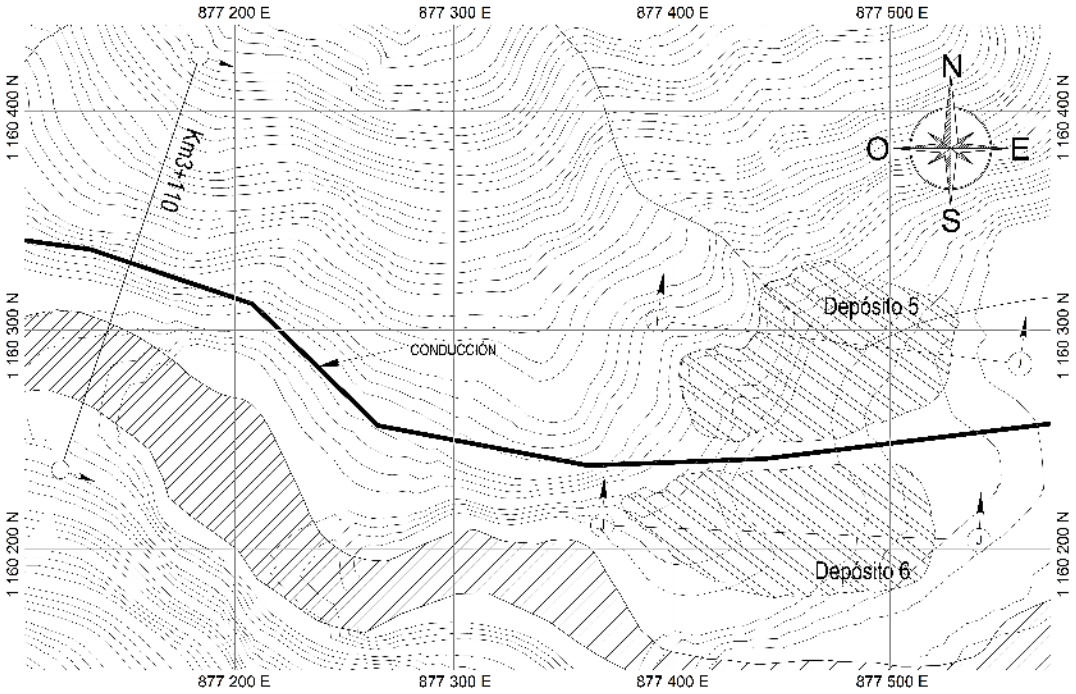


Figura 5-149 Localización en planta secciones conducción y depósitos de material excedente.

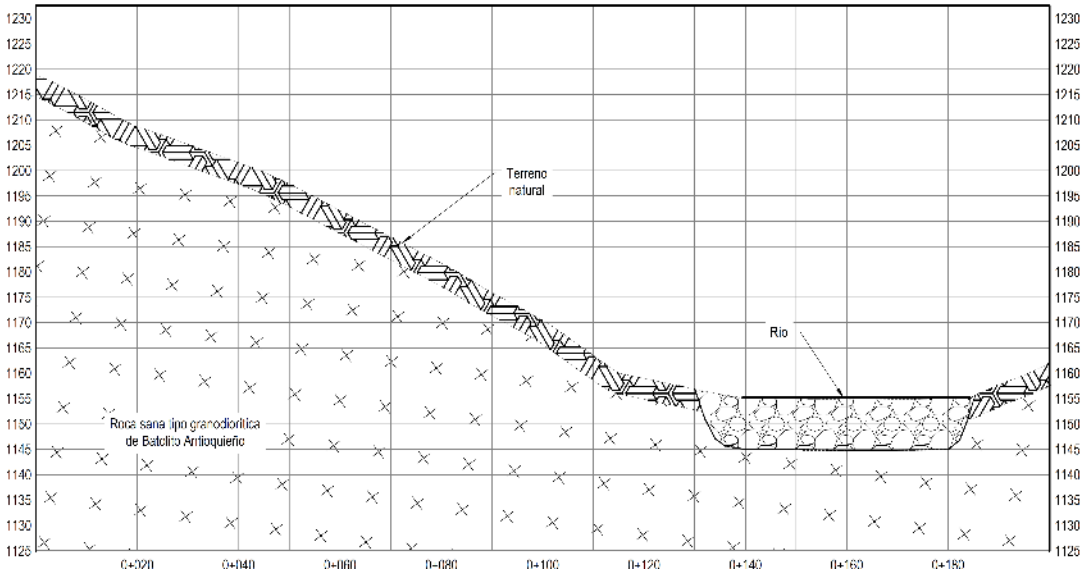


Figura 5-150 Perfil Estratigráfico, km 3+110 – conducción.

En la Figura 5-151 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5,

el cual se considera aceptable para la obra. Para lograr la estabilidad del talud se recomienda revegetalización inmediata después del corte.

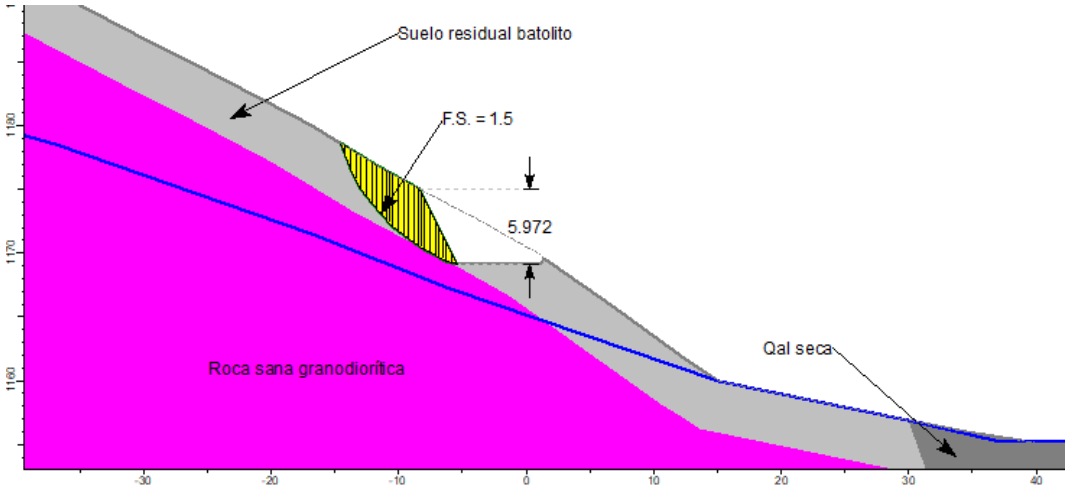


Figura 5-151 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km3+110 – Conducción.

En la Figura 5-152 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

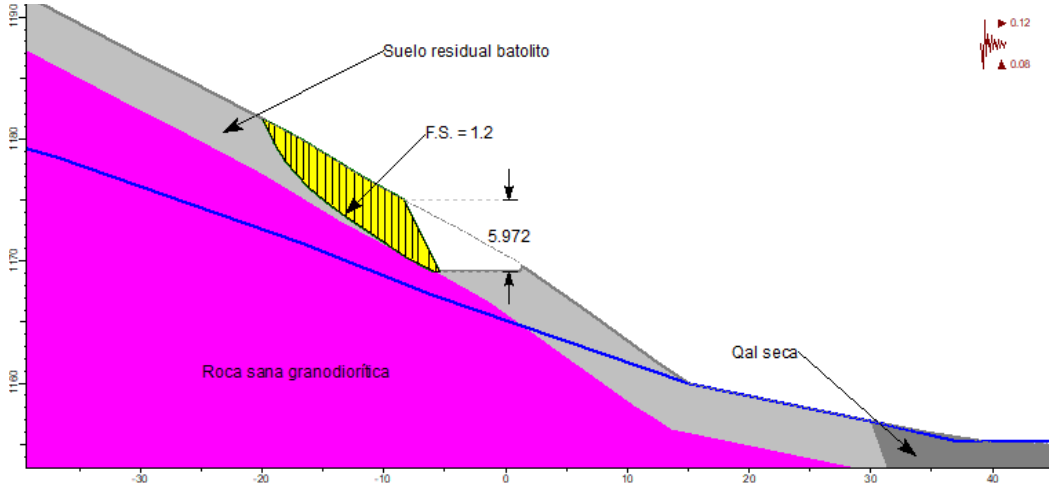


Figura 5-152 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección Km3+110 – Conducción.

5.1.4.4.6 Casa de maquinas

5.1.4.4.6.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la vía de acceso a captación se proyectan sobre un depósito aluvial (Qal). Se realiza el análisis por tramos homogéneos considerando las secciones más críticas en las que se deben desarrollar cortes.

5.1.4.4.6.2 Capacidad portante

Se analiza la capacidad portante para el sitio de casa de máquinas en la condición de funcionamiento, a una profundidad de desplante promedio según los diseños realizados. El análisis se realizó asumiendo cada contacto estructura-material como una zapata cuadrada de dimensiones 1,0m x 1,0m.

De la Figura 5-153 se presentan las curvas de capacidad y asentamiento, considerando la estructura dispuesta directamente sobre la grava arenosa del depósito aluvial, para la profundidad de desplante antes mencionadas.

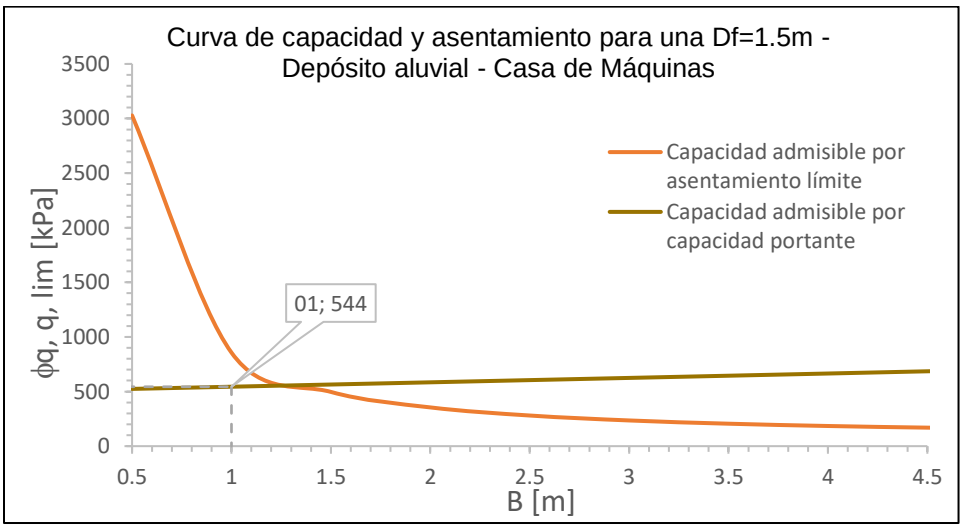


Figura 5-153 Ábaco de capacidad y asentamiento zapata cuadrada – Df = 1,5 m – Depósito aluvial.

Se observa que la capacidad de carga límite del suelo es de 544 KPa, se recomienda verificar el valor de la carga transmitida por la estructura de la casa de máquinas con el resultado anteriormente mencionado.

5.1.4.4.6.3 Excavaciones

5.1.4.4.6.3.1 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección CM2 – CM2'

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la casa de máquinas se proyectan sobre depósitos aluviales (Qal). En la Figura 5-154 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad.

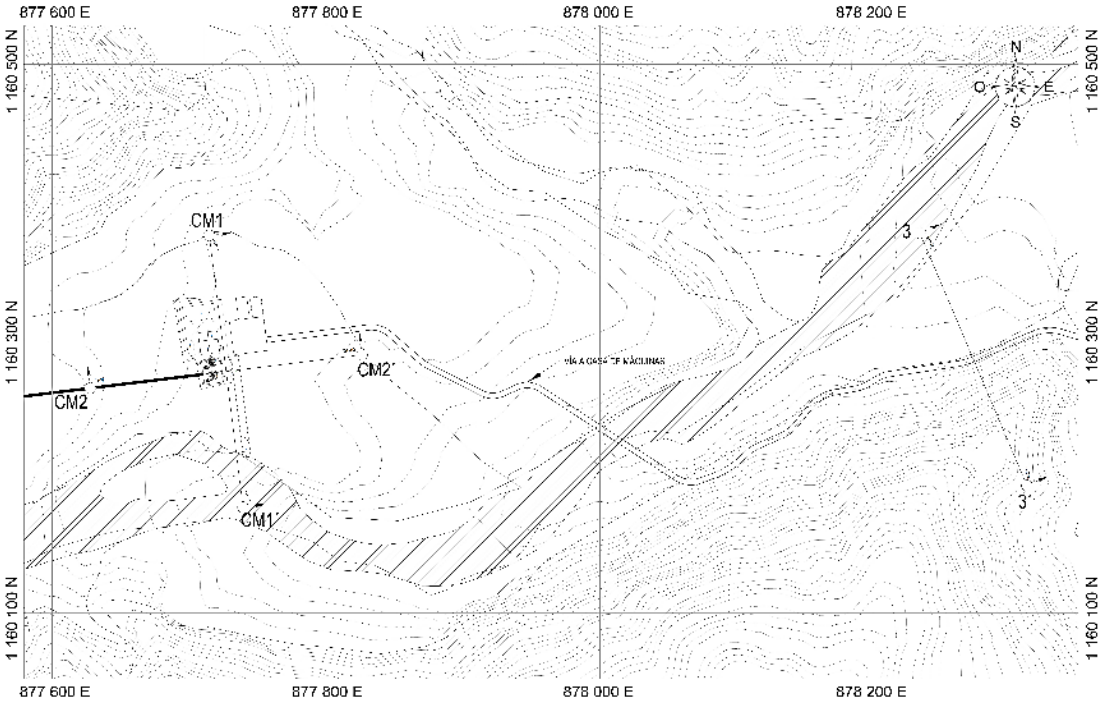


Figura 5-154 Localización en planta secciones casa de máquinas y su respectiva vía de acceso.

En la Figura 5-155 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo de casa de máquinas, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 3,4, el cual se considera que cumple para la obra.

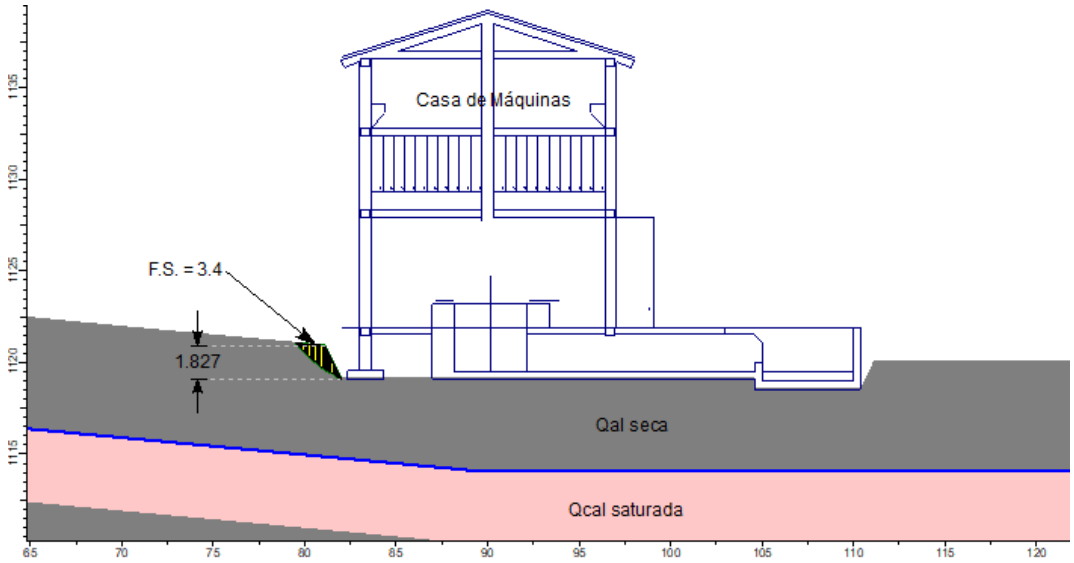


Figura 5-155 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM2–CM2' – Casa de Máquinas.

En la Figura 5-156 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 2,6, el cual se considera aceptable para la obra.

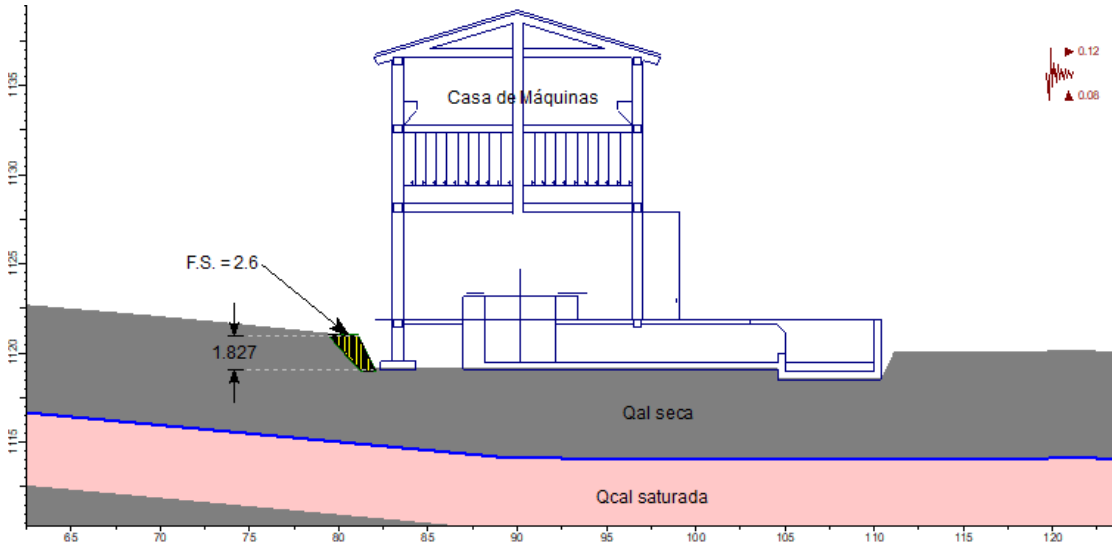


Figura 5-156 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM2–CM2' – Casa de Máquinas.

5.1.4.4.6.3.2 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección CM1-CM1’

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la casa de máquinas se proyectan sobre depósitos aluviales (Qal). En la Figura 5-154 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad.

En la Figura 5-157 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud izquierdo de casa de máquinas, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,6, el cual se considera que cumple para la obra.

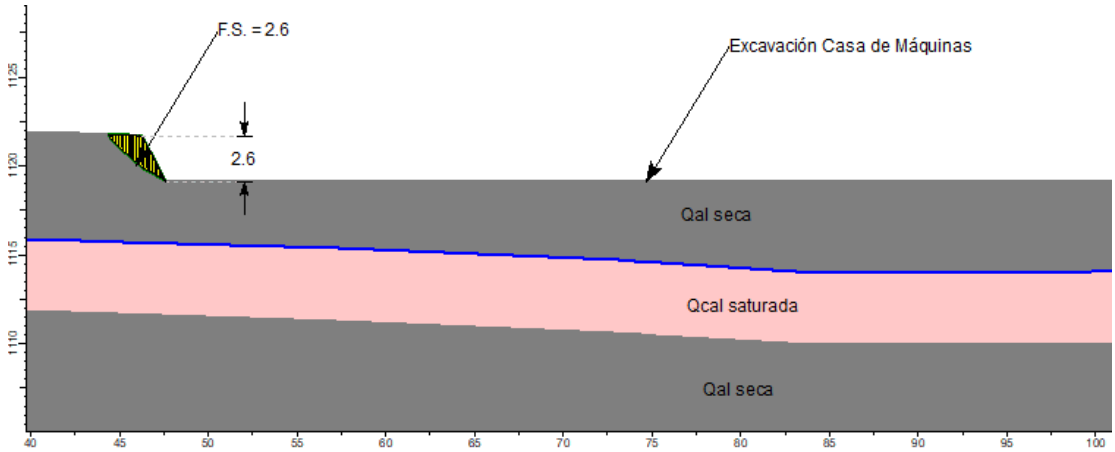


Figura 5-157 Análisis de estabilidad estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM1-CM1’ – Casa de Máquinas.

En la Figura 5-158 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 2,0, el cual se considera aceptable para la obra.

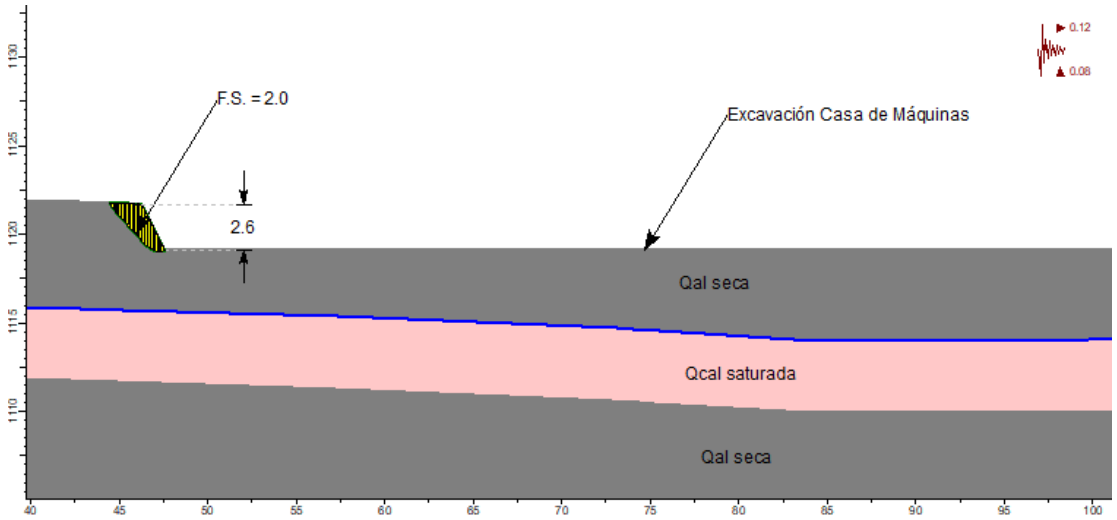


Figura 5-158 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud izquierdo con corte propuesto. Sección CM1–CM1' – Casa de Máquinas.

5.1.4.4.7 Acceso a casa de máquinas

5.1.4.4.7.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la vía de acceso a casa de máquinas se proyectan sobre distintos materiales, correspondientes a roca sana tipo granodiorítica de Batolito Antioqueño, macizo rocoso fracturado granodiorítico Batolito antioqueño, en la capa superior se encuentra suelo residual del Batolito Antioqueño. Se realiza el análisis para la sección que representa el tramo más crítico.

5.1.4.4.7.2 Excavaciones

Para este caso sólo se analizará la sección 3-3' la cual se presenta su ubicación en planta en la Figura 5-154, dicha sección cuenta con el perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico.

En la Figura 5-159 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud superior de la vía a casa de máquinas, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,8, el cual se considera aceptable para la obra. Se recomienda realizar una revegetalización inmediatamente después del corte, además, de instalar drenes subhorizontales en la base del talud.

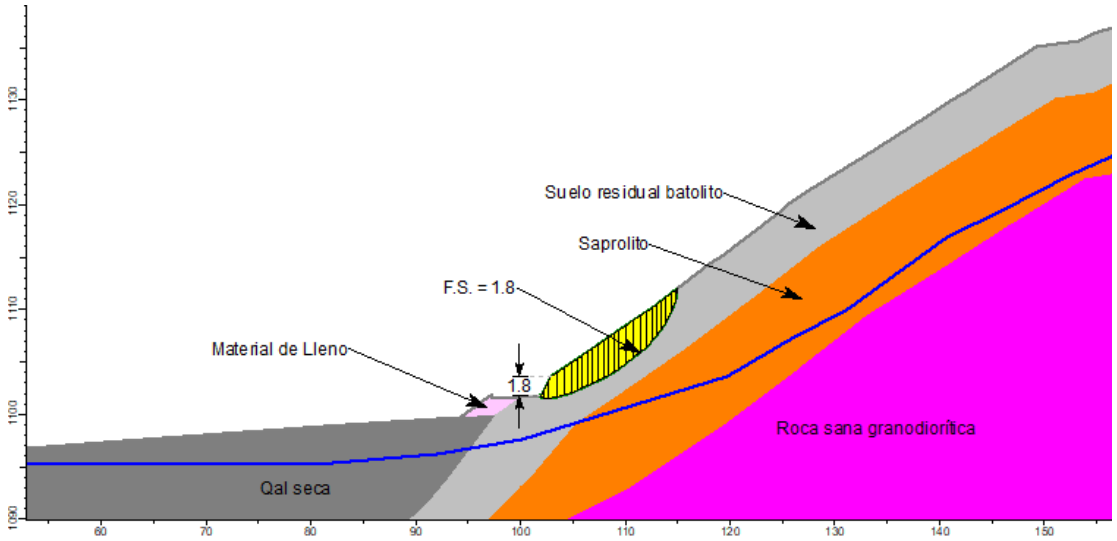


Figura 5-159 Análisis de estabilidad estático. Sección 3-3' – Acceso a Casa de Máquinas.

En la Figura 5-160 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra.

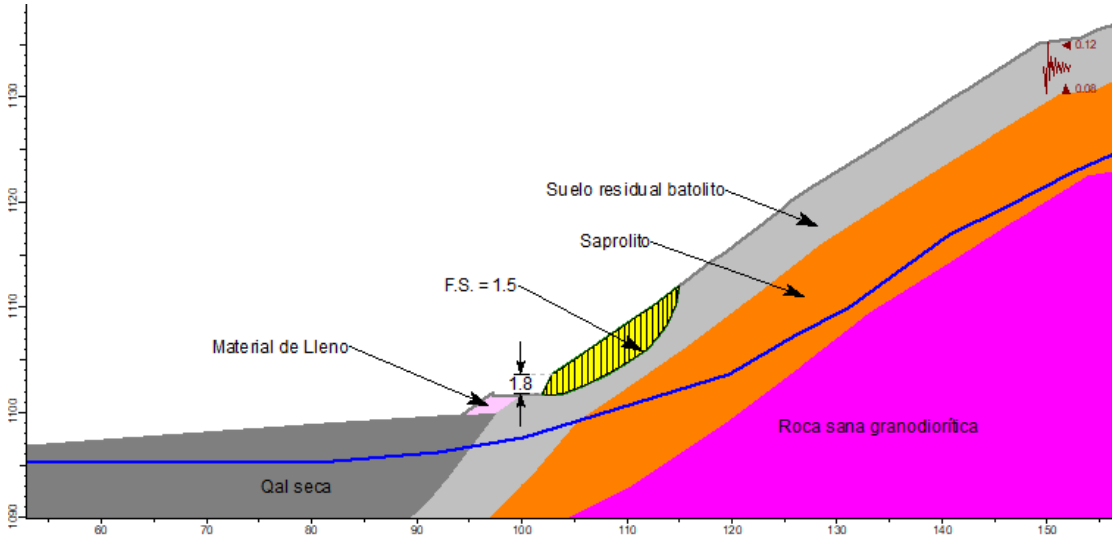


Figura 5-160 Análisis de estabilidad seudo-estático. Sección 3–3' – Acceso a Casa de Máquinas.

5.1.4.4.8 Acceso a captación

5.1.4.4.8.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la vía de acceso a captación se proyectan sobre distintos materiales, correspondientes a roca sana tipo granodiorítica de Batolito Antioqueño, macizo rocoso fracturado granodiorítico Batolito antioqueño, en la capa superior se encuentra suelo residual del Batolito Antioqueño, además, en algunos tramos la vía se proyecta sobre depósitos de vertiente. Se realiza el análisis por tramos homogéneos considerando las secciones más críticas en las que se deben desarrollar cortes.

5.1.4.4.8.2 Excavaciones

5.1.4.4.8.2.1 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección 1-1’

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la vía de captación se proyectan sobre depósito de vertiente. La vía a captación pasa dos veces por la sección 1-1’, en ambos casos se analizaron individualmente los taludes.

En la Figura 5-161 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad.

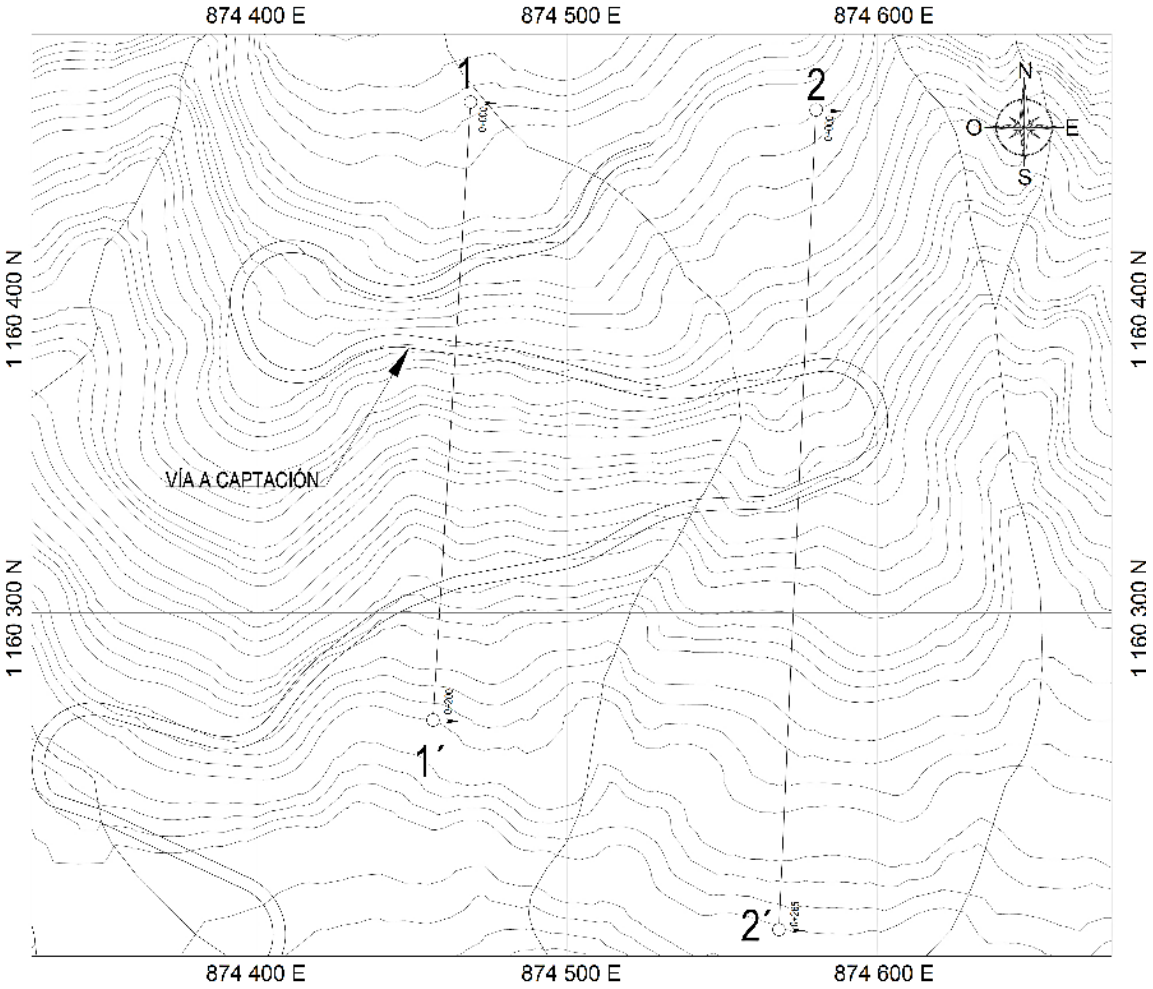


Figura 5-161 Localización en planta secciones acceso a captación.

En la Figura 5-162 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud superior de la vía a captación, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Se recomienda realizar una revegetalización inmediatamente después del corte, además, de un cambio en la geometría del talud con el fin de garantizar la estabilidad del terreno.

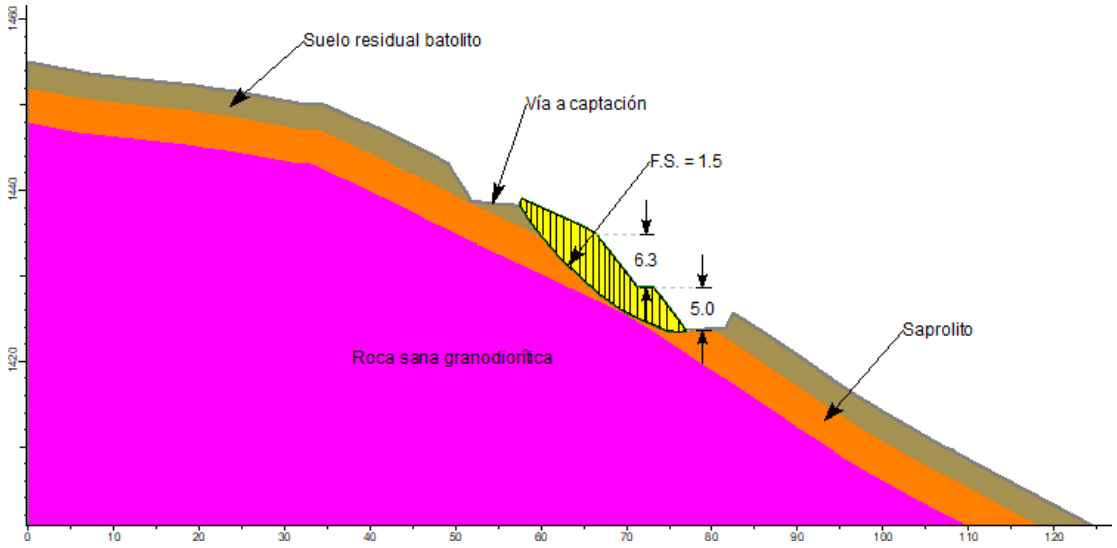


Figura 5-162 Análisis de estabilidad estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 1-1' – Vía a captación.

En la Figura 5-163 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

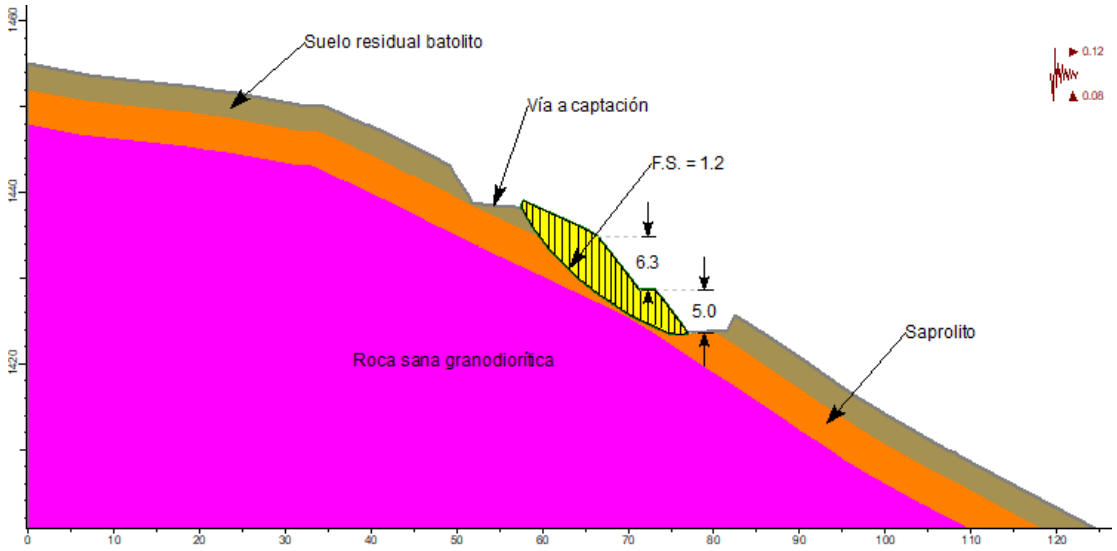


Figura 5-163 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 1-1' – Vía a captación.

En la Figura 5-164 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud superior de la vía a captación, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,7, el cual se considera que cumple para la obra. Se recomienda realizar una

revegetalización inmediatamente después del corte, además, de un cambio en la pendiente del talud con el fin de garantizar la estabilidad del terreno.

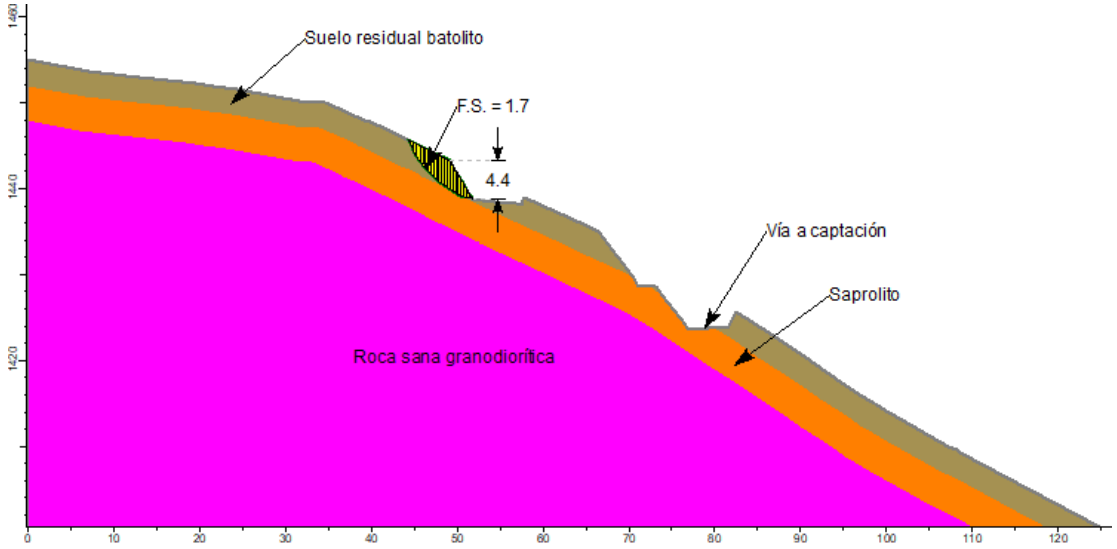


Figura 5-164 Análisis de estabilidad estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 2-2' – Vía a captación.

En la Figura 5-165 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra.

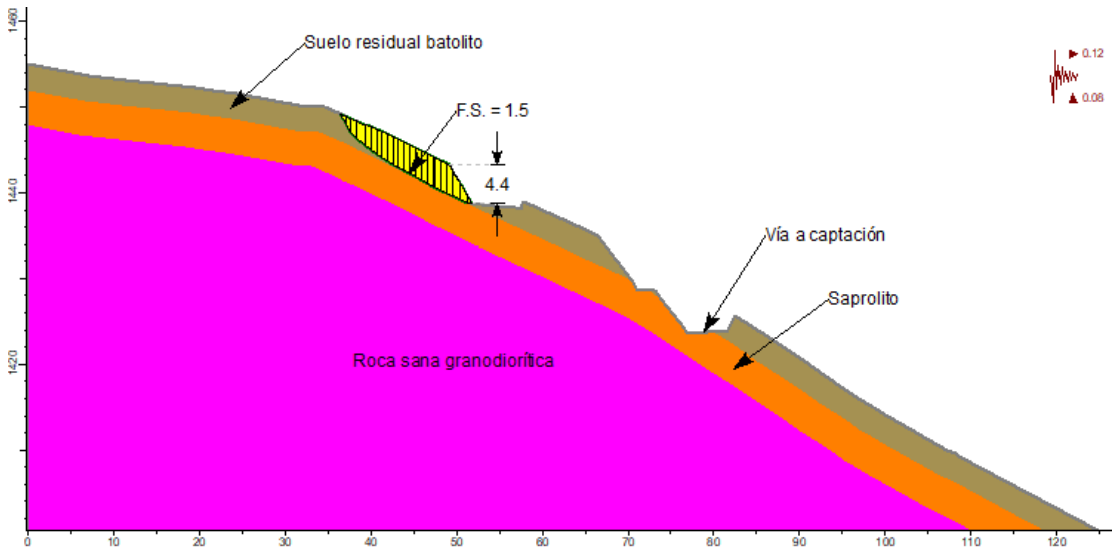


Figura 5-165 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 1-1' – Vía a captación.

5.1.4.4.8.2.2 Análisis estático, seudo-estático y cinemático sección 2-2’

Conforme resultados de la exploración de campo, las obras correspondientes a la vía de captación se proyectan sobre depósito de vertiente. La vía a captación pasa dos veces por la sección 2-2’, en ambos casos se analizaron individualmente los taludes.

En la Figura 5-161 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad.

En la Figura 5-166 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud superior de la vía a captación, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera aceptable para la obra. Se recomienda realizar una revegetalización inmediatamente después del corte, además, de un cambio en la pendiente del talud con el fin de garantizar la estabilidad del terreno.

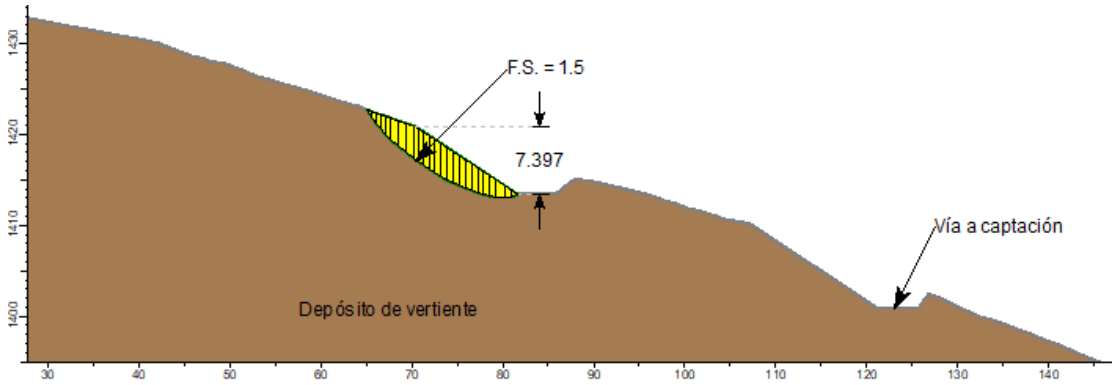


Figura 5-166 Análisis de estabilidad estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 2-2’ – Vía a captación.

En la Figura 5-167 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,3, el cual se considera aceptable para la obra.

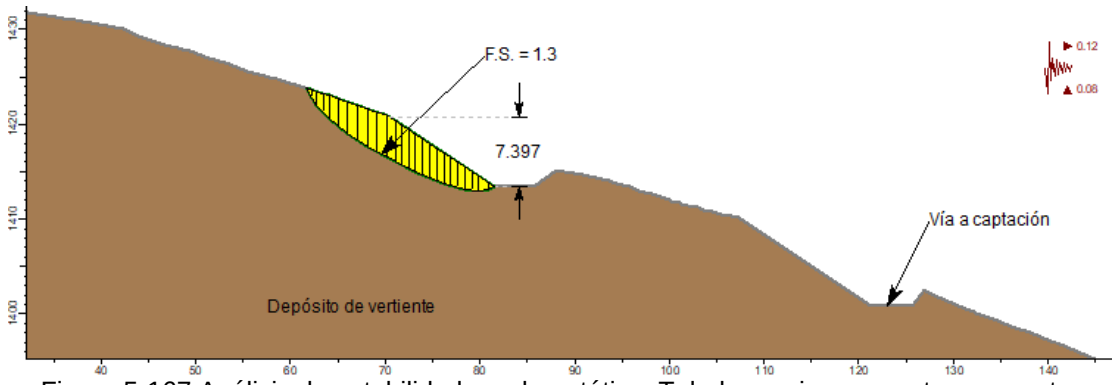


Figura 5-167 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud superior con corte propuesto. Sección 2-2’ – Vía a captación.

En la Figura 5-168 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud inferior de la vía a captación, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,6, el cual se considera que cumple para la obra. Se recomienda realizar una revegetalización inmediatamente después del corte, además, de un cambio en la pendiente del talud con el fin de garantizar la estabilidad del terreno.

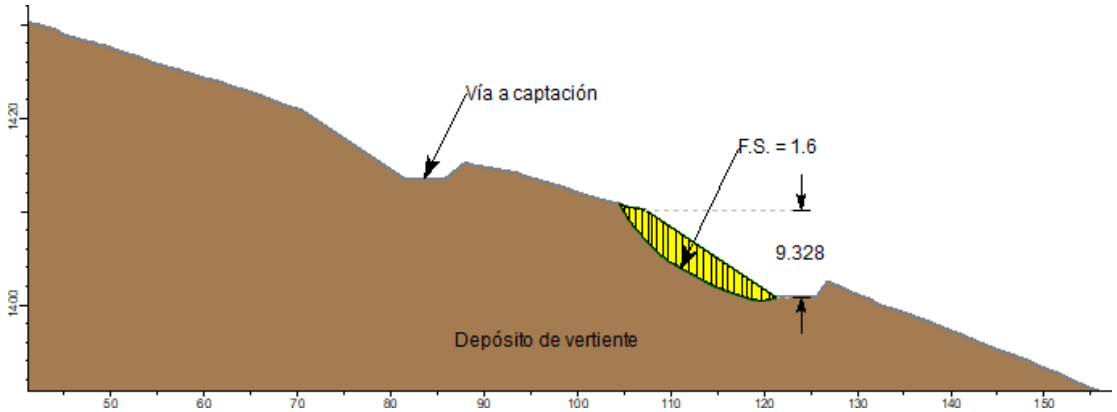


Figura 5-168 Análisis de estabilidad estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 2-2' – Vía a captación.

En la Figura 5-169 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,2, el cual se considera aceptable para la obra.

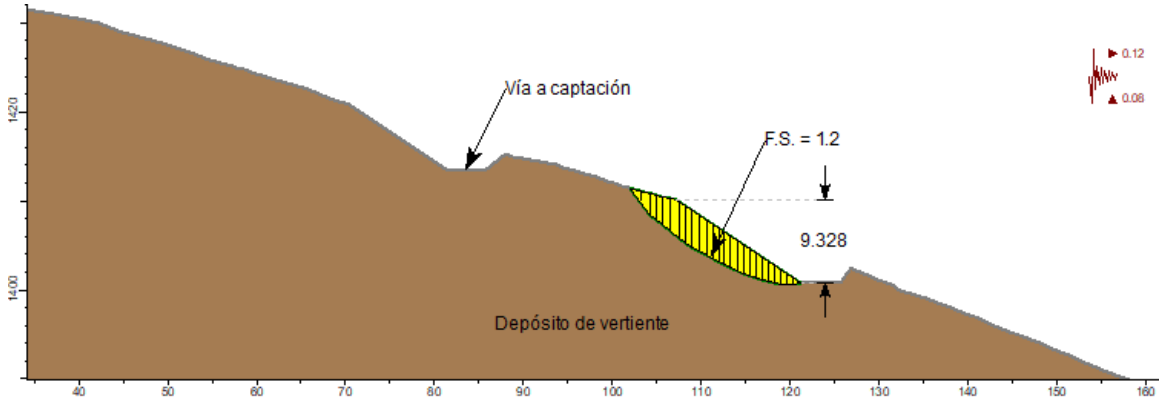


Figura 5-169 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud inferior con corte propuesto. Sección 2-2' – Vía a captación.

5.1.4.4.9 Depósitos de material excedente

5.1.4.4.9.1 Estratigrafía

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente de las obras donde se desarrollan excavaciones se proyectan sobre distintos estratos,

correspondientes a roca sana tipo granodiorítica de Batolito Antioqueño, macizo rocoso fracturado granodiorítico Batolito antioqueño, además, en la capa superior se encuentra suelo residual del Batolito Antioqueño y depósitos aluviales. Se realiza el análisis por tramos homogéneos considerando las secciones más críticas.

5.1.4.4.9.2 Depósitos

5.1.4.4.9.2.1 Análisis estático, seudo-estático y cinemático del Depósito 1

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente se proyectan sobre saprolito del batolito antioqueño.

En la Figura 5-125 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-170.

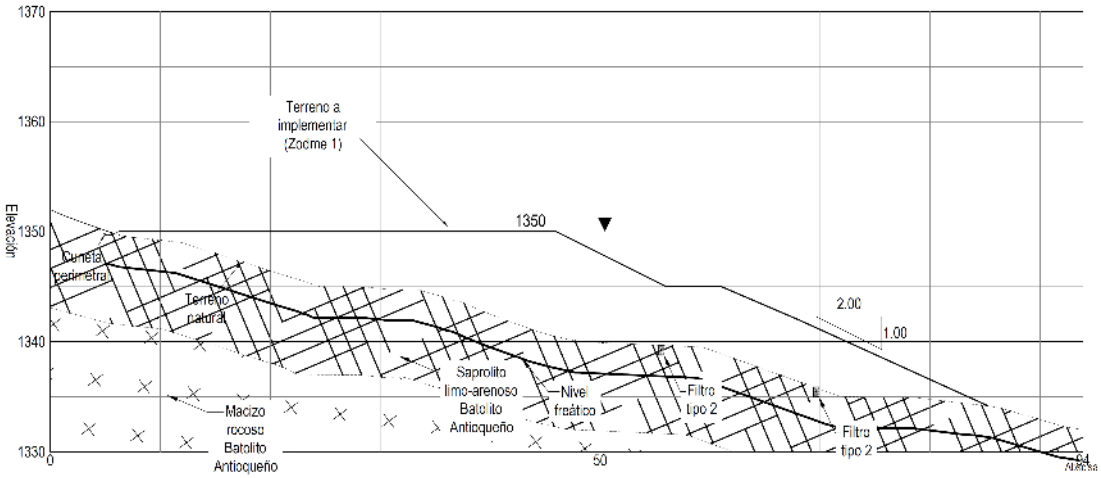


Figura 5-170 Perfil Estratigráfico, sección E - Depósito 1.

En la Figura 5-171 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,3, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra. Se recomienda revegetalizar los taludes del depósito de material excedente.

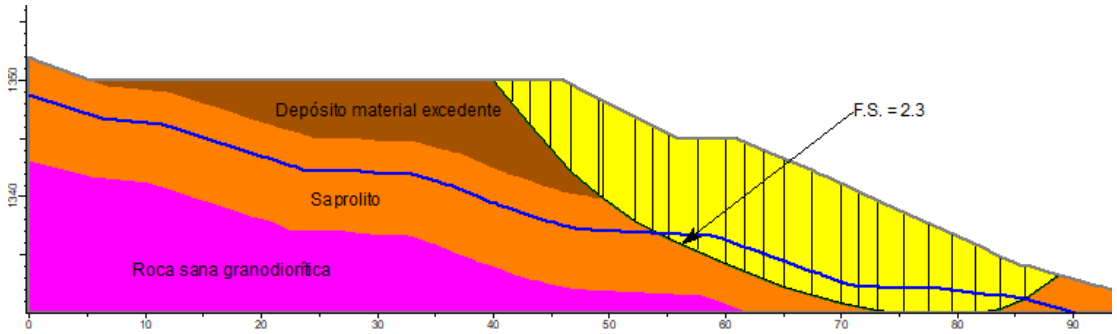


Figura 5-171 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto sección E - Depósito 1.

En la Figura 5-172 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,7, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra.

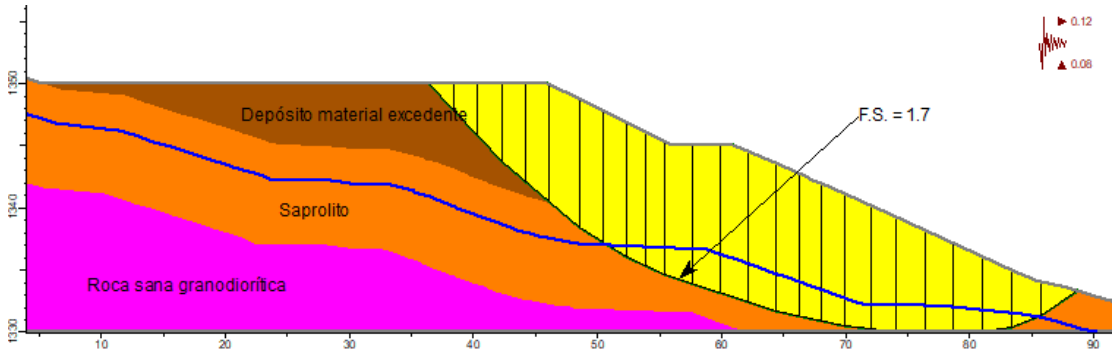


Figura 5-172 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto sección E - Depósito 1.

5.1.4.4.9.2.2 Análisis estático, seudo-estático y cinemático del Depósito 2

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente se proyectan sobre suelo residual del batolito antioqueño.

En la Figura 5-132 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-173.

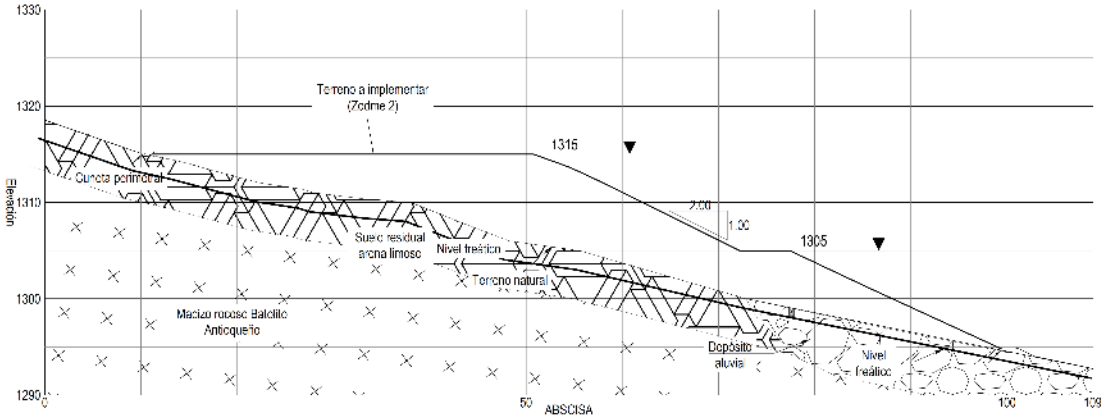


Figura 5-173 Perfil Estratigráfico, depósito 2.

En la Figura 5-174 presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 1,8, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra. Se recomienda revegetalizar los taludes del depósito de material excedente.

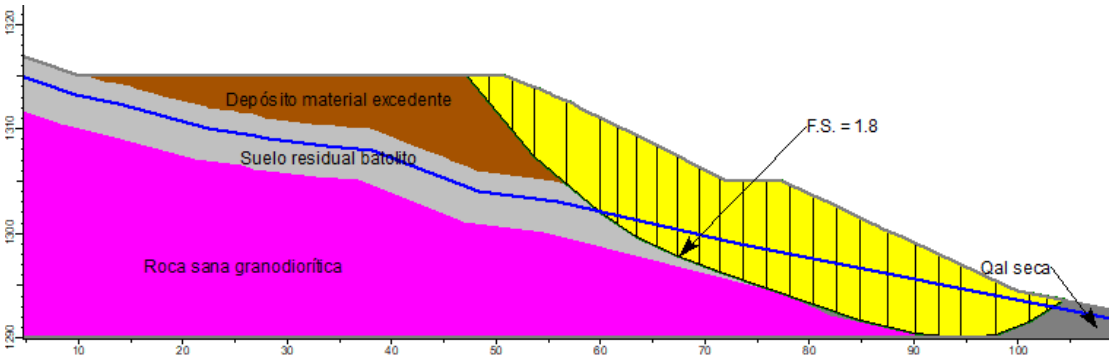


Figura 5-174 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 2.

En la Figura 5-175 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,3, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra.

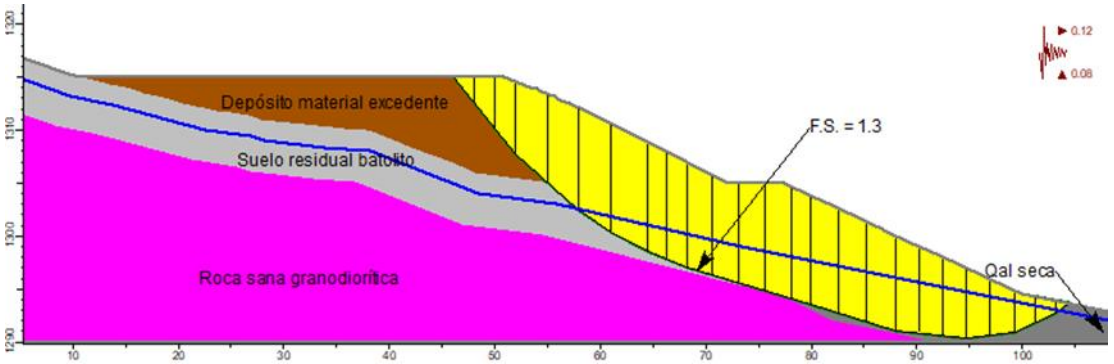


Figura 5-175 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 2.

5.1.4.4.9.2.3 Análisis estático, seudo-estático y cinemático del depósito 3

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente se proyectan sobre suelo residual del batolito antioqueño, demás, se encuentra sobre un depósito aluvial.

En la Figura 5-149 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-176.

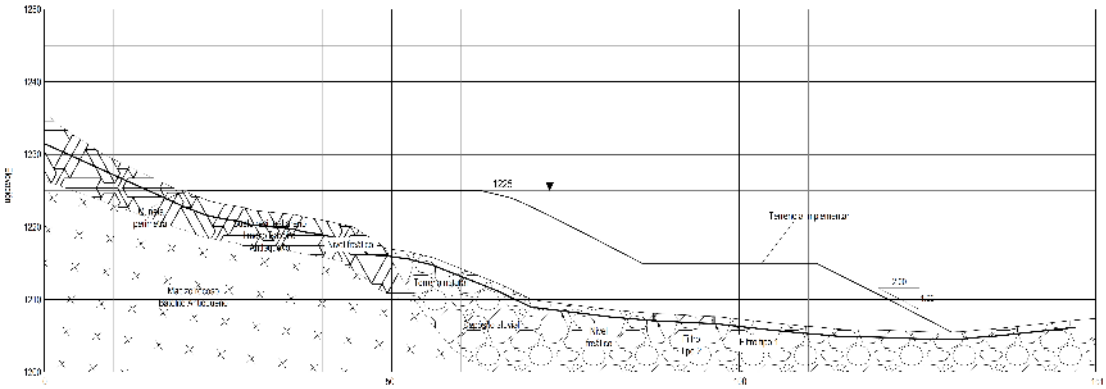


Figura 5-176 Perfil Estratigráfico, depósito 3.

En la Figura 5-177 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,5, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra. Se recomienda revegetalizar los taludes del depósito de material excedente.

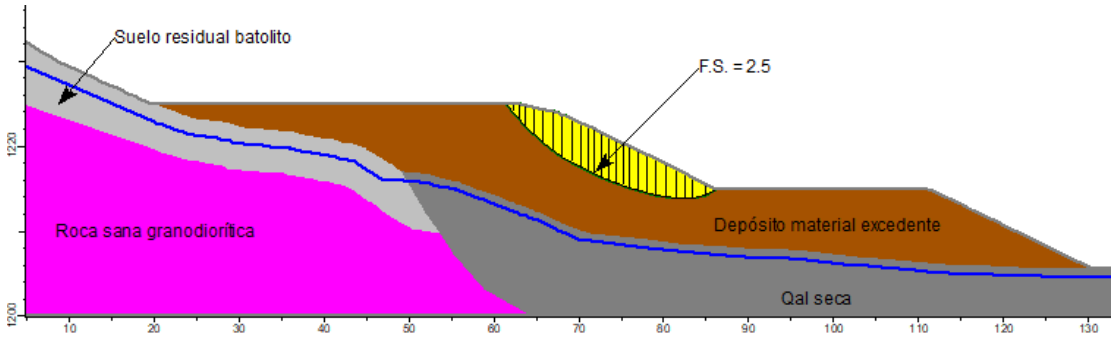


Figura 5-177 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 3.

En la Figura 5-178 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,7, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra.

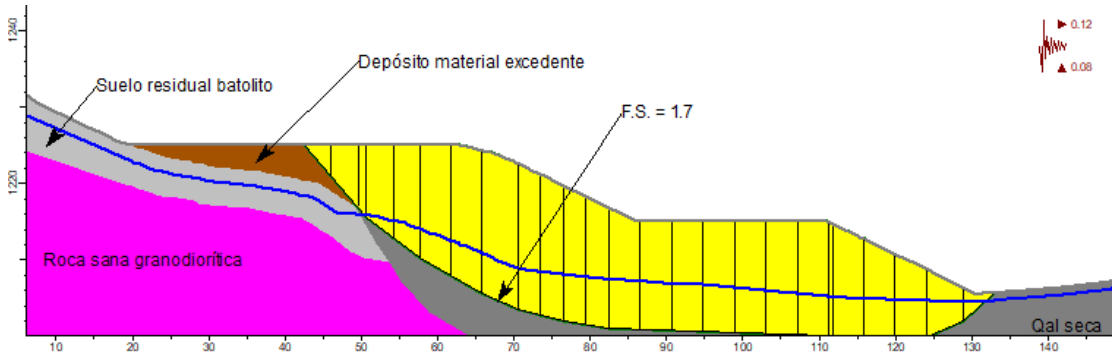


Figura 5-178 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 3.

5.1.4.4.9.2.4 Análisis estático, seudo-estático y cinemático del depósito 4

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente se proyectan sobre un depósito de vertiente.

En la Figura 5-179 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-180.

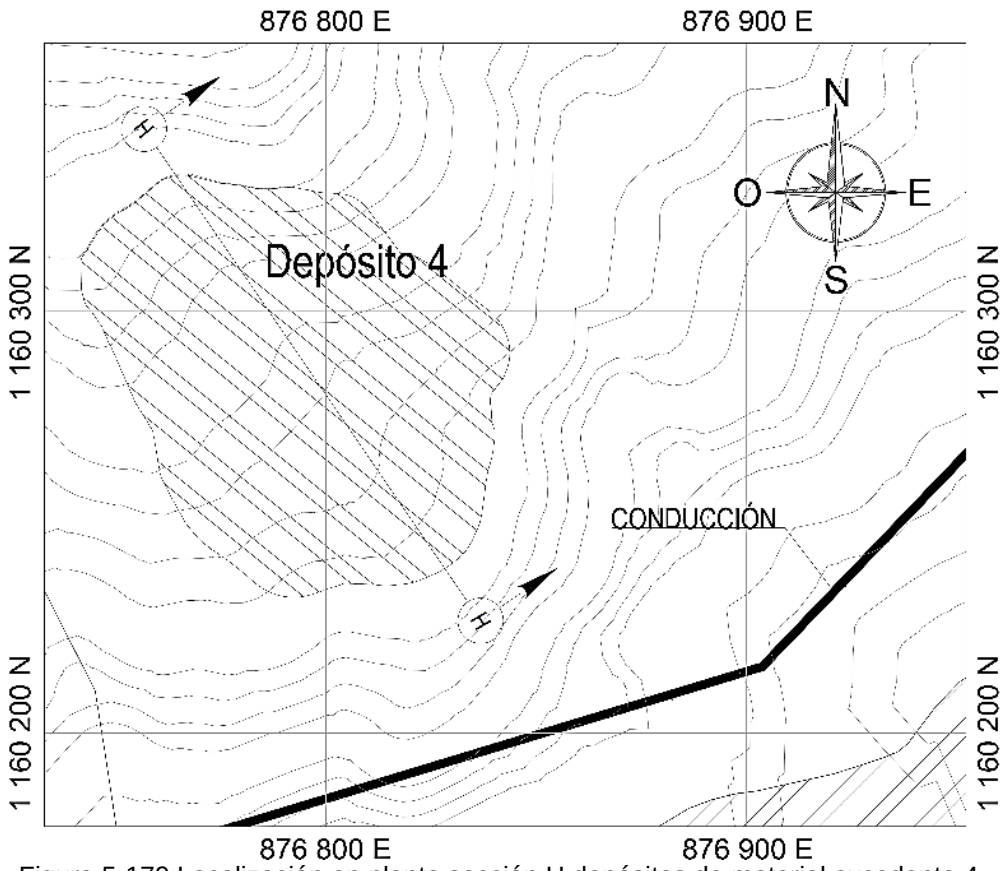


Figura 5-179 Localización en planta sección H depósitos de material excedente 4.

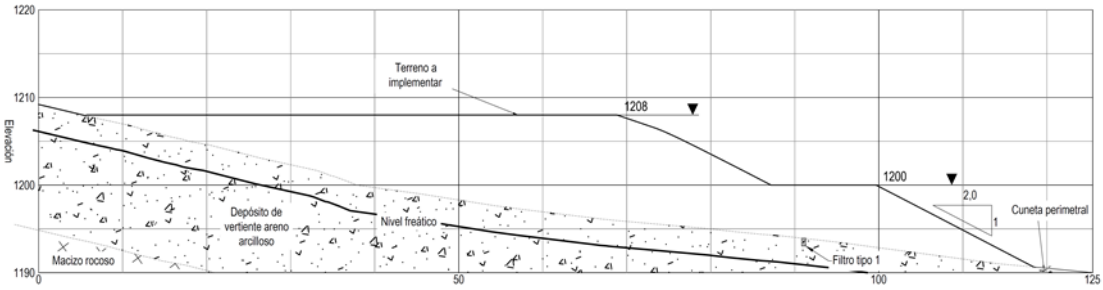


Figura 5-180 Perfil Estratigráfico, depósito 4.

En la Figura 5-181 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,8, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra. Se recomienda revegetalizar los taludes del depósito de material excedente.

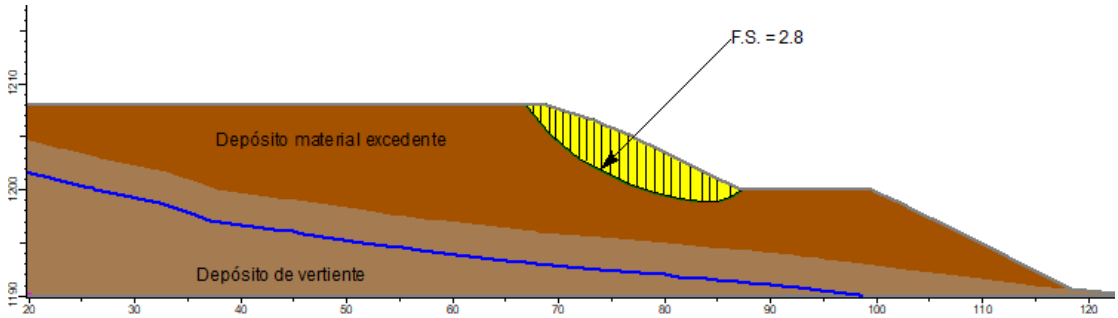


Figura 5-181 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 4.

En la Figura 5-182 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 2,2, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra.

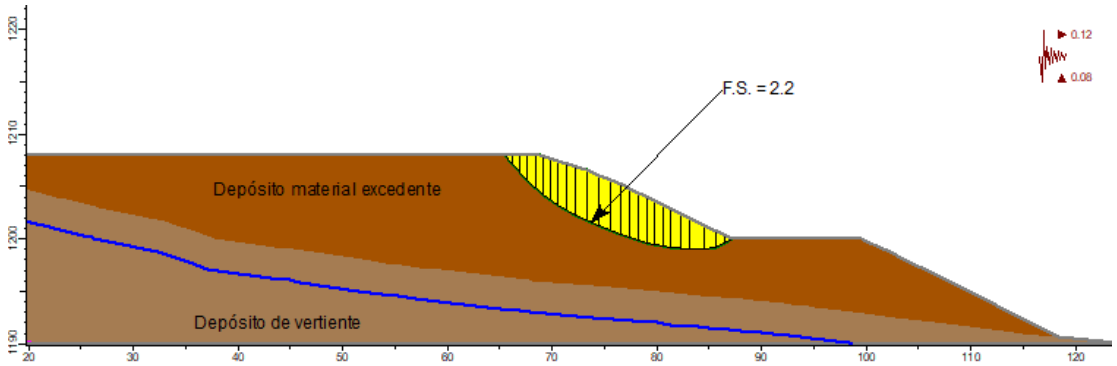


Figura 5-182 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 4.

5.1.4.4.9.2.5 Análisis estático, seudo-estático y cinemático del depósito 5

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente se proyectan sobre suelo residual del batolito antioqueño, demás, se encuentra sobre un depósito aluvial.

En la Figura 5-154 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-183.

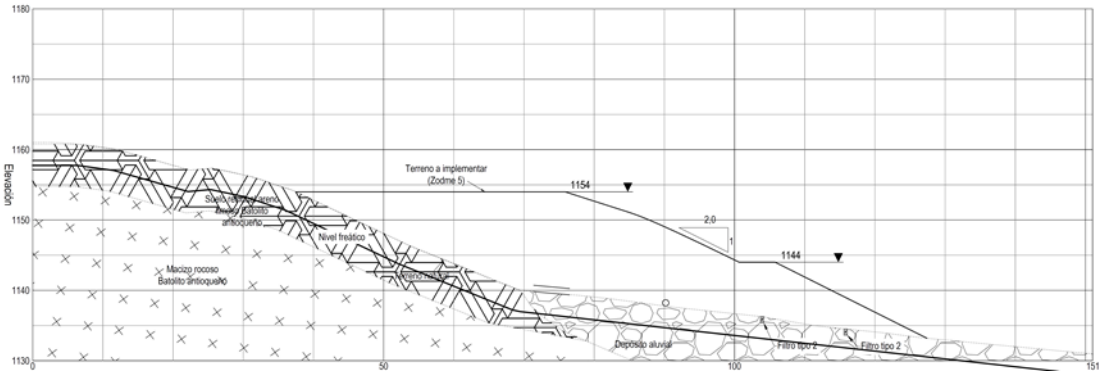


Figura 5-183 Perfil Estratigráfico, depósito 5.

En la Figura 5-184 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,1, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra. Se recomienda revegetalizar los taludes del depósito de material excedente.

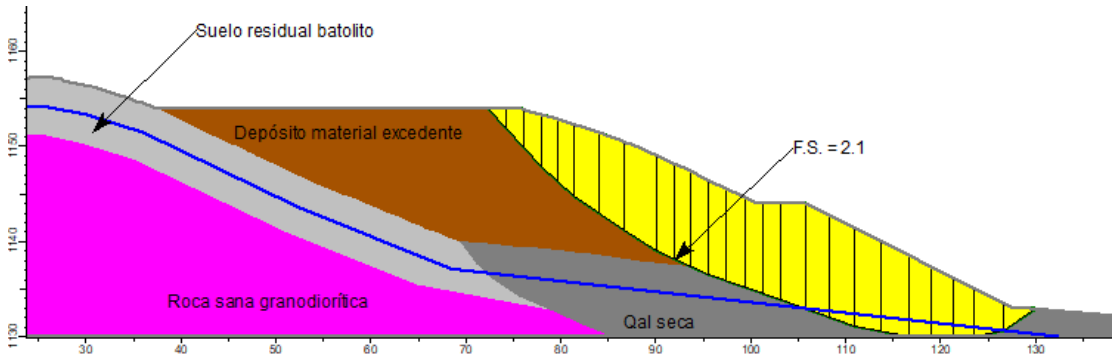


Figura 5-184 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 5.

En la Figura 5-185 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 1,5, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra.

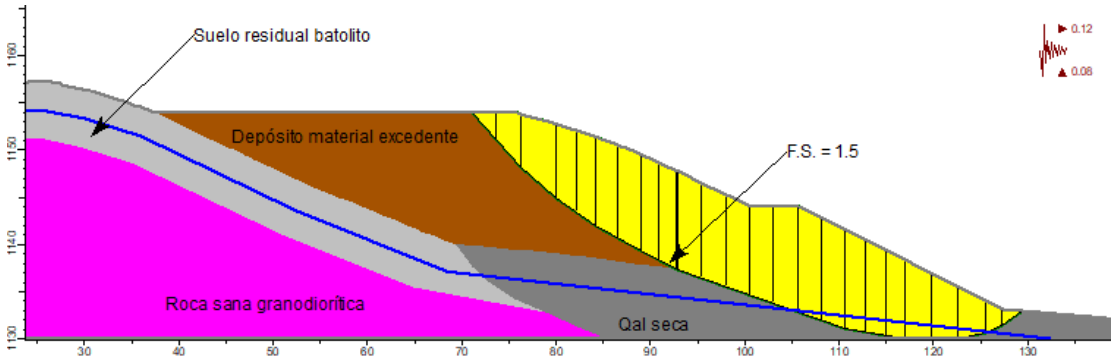


Figura 5-185 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 5.

5.1.4.4.9.2.6 Análisis estático, seudo-estático y cinemático del depósito 6

Conforme resultados de la exploración de campo, los depósitos de material excedente se proyectan sobre un depósito de vertiente.

En la Figura 5-154 se presenta la ubicación en planta del perfil sobre el cual se construyó el modelo geológico, para realizar los análisis de estabilidad como se observa en la Figura 5-186.

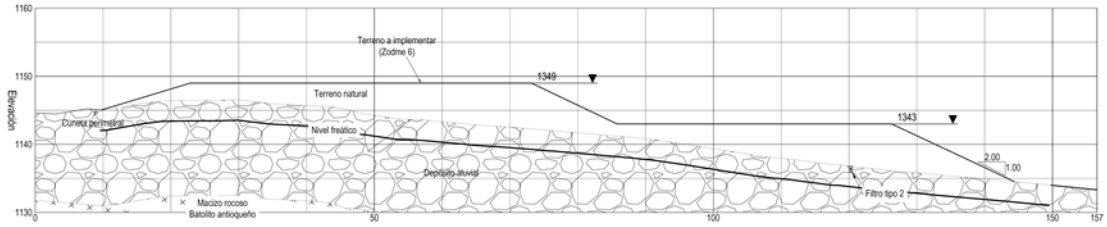


Figura 5-186 Perfil Estratigráfico, depósito 6.

En la Figura 5-187 se presenta el análisis de estabilidad estático para la conformación del talud bajo falla local, obteniéndose un factor de seguridad de F.S = 2,5, el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra. Se recomienda revegetalizar los taludes del depósito de material excedente.

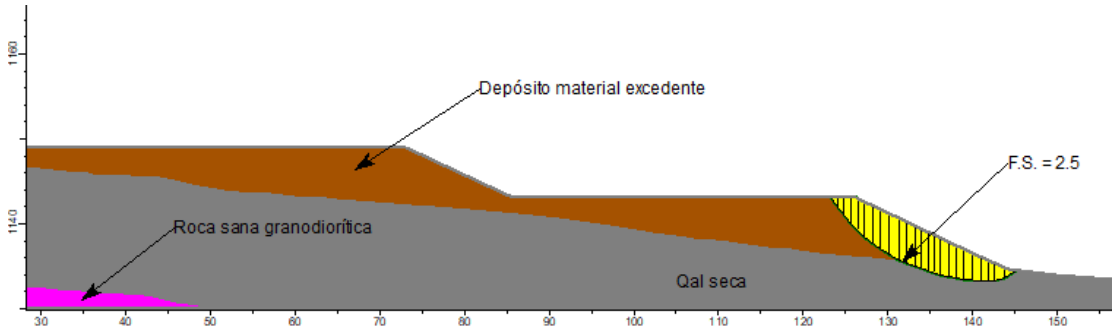


Figura 5-187 Análisis de estabilidad estático. Talud propuesto Depósito 6.

En la Figura 5-188 se presenta el análisis de estabilidad bajo la influencia del sismo de diseño, en donde se obtiene un factor de seguridad de F.S = 2,0 el cual se considera que cumple para el requerimiento de la obra.

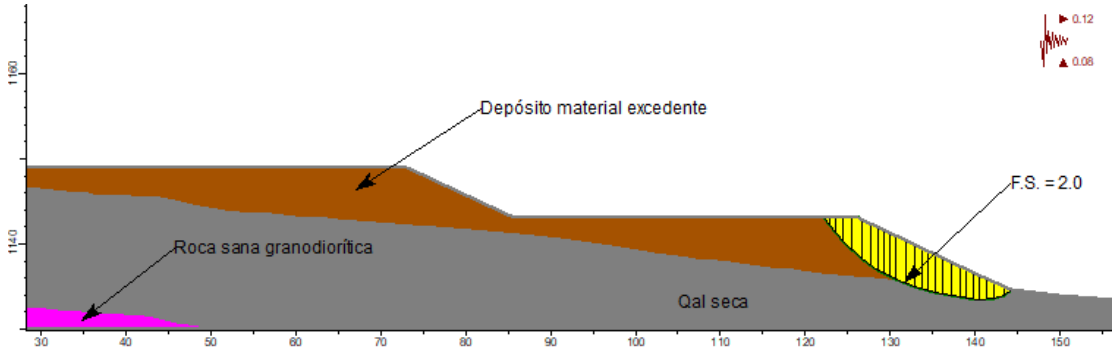


Figura 5-188 Análisis de estabilidad seudo-estático. Talud propuesto Depósito 6.

5.1.4.4.10 Presentación de resultados análisis de estabilidad

El resumen de los factores de seguridad obtenidos en los análisis y los tratamientos considerados para las secciones analizadas, se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 5-47 Resumen resultados F.S. y tratamientos considerados en el análisis de estabilidad.

Estructura	Sección	Inclinación	Falla	F.S estático	F.S seudo estático	Observaciones
Conducción	Km 0+000 hasta Km0+310	0.5H:1V	Local	1.5	1.3	Revegetalización inmediata después del corte

Estructura	Sección	Inclinación	Falla	F.S estático	F.S seudo estático	Observaciones
	Km 0+310 hasta Km0+880	0.5H:1V	Local	1.7	1.4	Revegetalización inmediata después del corte
	Km0+880 hasta Km0+940	0.5H:1V	Local	1.5	1.2	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud; además, la colocación de pernos de barra N°8 inyectados con lechada a gravedad, con una pantalla de concreto lanzado de 15 cm de espesor reforzada con doble malla electrosoldada en la cara del talud.
	Km0+880 hasta Km1+660	0.5H:1V	Local	1.8	1.6	Revegetalización inmediata después del corte
	Km1+660 hasta Km1+720	0.5H:1V	Local	1.5	1.2	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud; además, la colocación de pernos de barra N°8 inyectados con lechada a gravedad, con una pantalla de concreto lanzado de 15 cm de espesor reforzada con doble malla

Estructura	Sección	Inclinación	Falla	F.S estático	F.S seudo estático	Observaciones
						electrosoldada en la cara del talud.
	Km1+920 hasta KM1+970	0.5H:1V	Local	1.5	1.2	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud.
	Km2+280 hasta Km2+350	0.5H:1V	Local	1.5	1.2	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud; además, la colocación de pernos de barra N°8 inyectados con lechada a gravedad, con una pantalla de concreto lanzado de 15 cm de espesor reforzada con doble malla electrosoldada en la cara del talud.
	Km2+350 hasta Km3+700	0.5H:1V	Local	1.5	1.2	Revegetalización inmediata después del corte.

Estructura	Sección	Inclinación	Falla	F.S estático	F.S seudo estático	Observaciones
Vía a Captación	Sección 1-1' inferior	0.75H:1.0V	Local	1.5	1.2	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud, además, se propone una berma de 2 metros a 5 metros desde el pie de la vía, con pendientes de 0.75H:1.0V
	Sección 1-1' superior	1.5H:1.0V	Local	1.7	1.5	Con drenes y cambio de pendiente del diseño original.
	Sección 2-2' inferior	1.5H:1V	Local	1.5	1.3	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud y cambio de pendiente del diseño original.
	Sección 2-2' superior	1.5H:1V	Local	1.6	1.2	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud y cambio de pendiente del diseño original.
Captación	Sección B-B'		Local	1.5	1.1	Se debe instalar un anclaje espaciado en la horizontal 2,5m y se deben instalar drenes subhorizontales de 20 metros

Estructura	Sección	Inclinación	Falla	F.S estático	F.S seudo estático	Observaciones
						para abatir el nivel freático.
Desarenador	Sección C-C’		Local	2.6	2.0	---
Casa de Máquinas	Sección CM1-CM1’		Local	2.6	2.0	---
	Sección CM2-CM2’		Local	3.4	2.6	---
Vías Casa de Máquinas	Sección 3-3’		Local	1.8	1.5	Se recomienda el uso de drenes subhorizontales de 12 m de largo colocados cada 3 m en la base del talud.
Depósitos	Sección E-E'	2H:1V	Local	2.3	1.7	---
	Sección F-F'	2H:1V	Local	1.8	1.3	---
	Sección G-G'	2H:1V	Local	2.5	1.7	---
	Sección H-H'	2H:1V	Local	2.8	2.2	---
	Sección I-I'	2H:1V	Local	2.1	1.5	---
	Sección J-J'	2H:1V	Local	2.5	2.0	---

5.1.5 Suelos y usos de la tierra

5.1.5.1 Unidades Cartográficas de Suelos

Las unidades cartográficas que presenta el estudio general de los suelos del departamento de Antioquia en el área de influencia del proyecto Cocorná III, corresponden a la asociación Yarumal (YA) en su fase de erosión ligera (e1) y del complejo La Pulgarina (LP) en la fase ligeramente plana (a), unidades que agrupan poblaciones de suelos con baja evolución pedogenética y que se ubican en un paisaje de montaña, geomorfológicamente están localizados en las laderas de conos coluviales y en los pequeños vallecitos conformados por terrazas aluviales respectivamente.

Los órdenes de suelos que se encuentran en estas unidades cartográficas son por abundancia inceptisoles, andisoles y entisoles, todos estos con un pobre desarrollo, a partir de diversos materiales (rocas ígneas, depósitos coluvio – aluviales) y cenizas volcánicas. Estas últimas evidenciándose en signos dentro de los perfiles descritos como una reacción positiva al Fluoruro de Sodio (NaF). La Figura 5-189 muestra la reacción que presentan los suelos al NaF sobre papel filtro impregnado con fenoftaleína, señalando la presencia de alofana presente en las cenizas volcánicas; este signo infiere sobre las propiedades ándicas que poseen estos suelos, que le confieren a su vez rasgos físicos y químicos que influyen en la fertilidad natural de estos, como la fijación de fosfatos que dificultan su aprovechamiento por las plantas y la formación de complejos húmicos que poseen una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) propiedad que evita la pérdida de nutrientes por lixiviación y puedan ser obtenidos por las plantas.

Figura 5-189. Pruebas para la identificación de presencia de cenizas volcánicas realizadas en los sitios de obra. Fuente: Praming SAS, 2020

Por su parte el clima tiene una influencia en el desarrollo de los suelos y para su clasificación se tienen en cuenta diferentes variables climáticas como la precipitación, la temperatura del ambiente y del suelo, además, de la evapotranspiración potencial, para así determinar los regímenes de humedad y de temperatura del suelo. En la Tabla 5-48, se muestran las variables ambientales y los regímenes climáticos en el área de influencia del proyecto, estos suelos tienen un régimen de humedad údico, condición en la que este no permanece seco en ninguna parte de la sección de control por más de 90 días acumulativos por año. (IGAC, 2014). Además, el régimen de temperatura en estos suelos entra en la clasificación como isohipertérmica lo que significa que la temperatura media anual del suelo es 22 °C o mayor (USDA, 2014).

Tabla 5-48. Relación de los regímenes de humedad y de temperatura en el suelo con la subdirección de Agrología

Relación ETP/P	Calificación provincia de humedad		Régimen de humedad del suelo	Altitud (m)	Temperatura (°C)	Régimen de temperatura en el suelo
	Holdridge (Original)	Subdirección de Agrología IGAC				
1 – 0.5	Húmedo	Húmedo	Údico	1000 - 2000	18 - 24	Isohipertérmico
0.5 – 0.25	Perhúmedo	Muy húmedo	Údico			Isohipertérmico

Fuente: IGAC, 2014

En la Tabla 5-49, están consignados los componentes taxonómicos determinados en campo para las dos unidades cartográficas de suelos, mejorando así la resolución cartográfica de estas. Con la mejor escala de análisis se logró ajustar la distribución espacial tanto de la unidad cartográfica YAe1 correspondiente a la asociación Yarumal, como para la unidad LPa complejo La Pulgarina, como se representa en la Figura 5-190, las dos unidades se ubican en las zonas que corresponden físicamente a los tipos de relieve y formas del terreno, ver Tabla 5-49, característicos de los ambientes formativos de las unidades taxonómicas de los suelos que las conforman, en específico los tipos y formas geomorfológicas asociadas al río Cocorná, que en la cartografía 1:100.000 del estudio general de suelos del IGAC contaban con una distribución diferente.

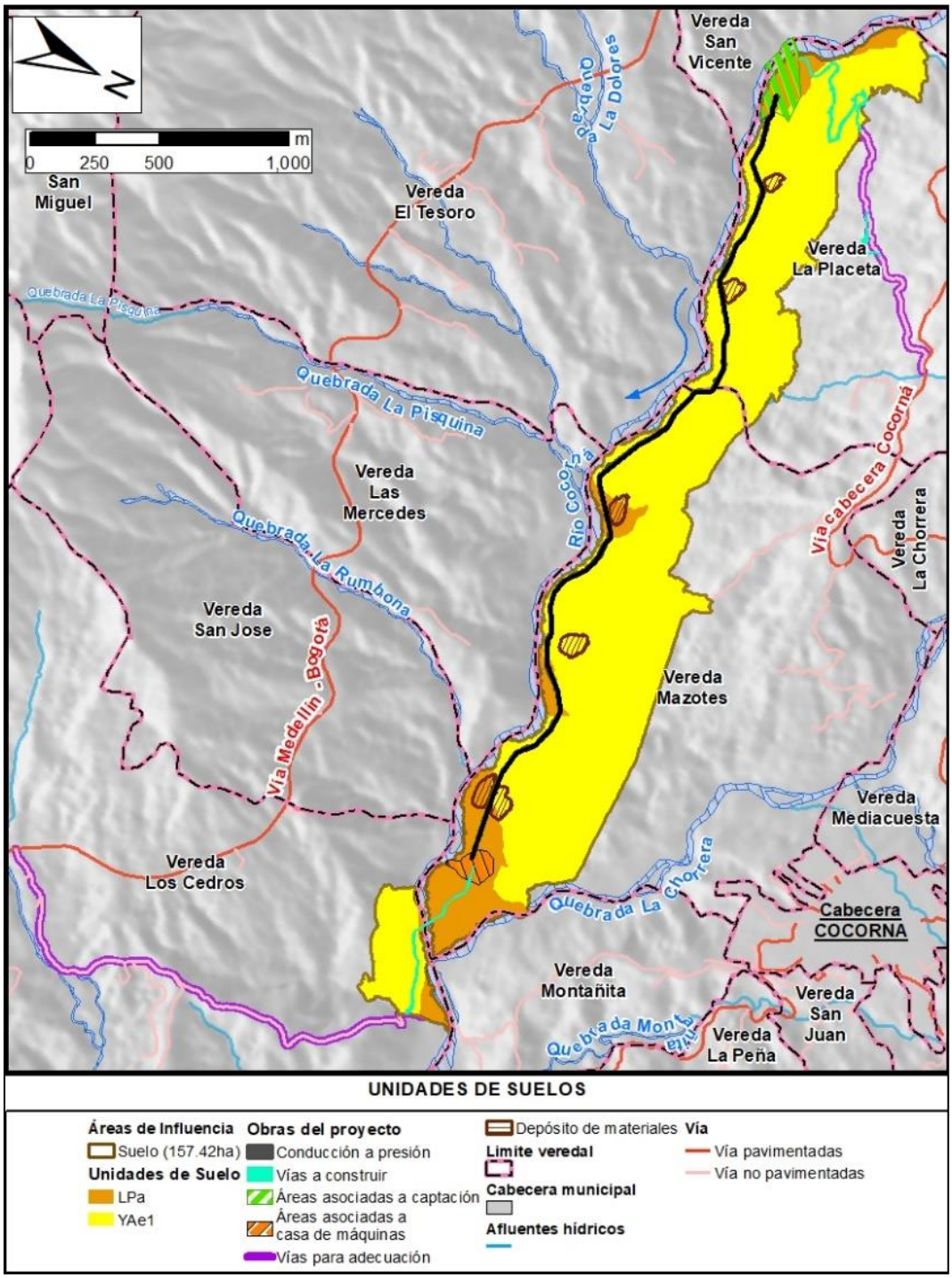


Figura 5-190. Unidades cartográficas de suelos ubicadas en la zona donde se ubican las obras del proyecto Cocorná III

A continuación, se describen las unidades cartográficas de suelos del área de influencia del proyecto y que están registradas en la Tabla 5-49, iniciando dicha descripción con la integración del paisaje, con el material parental y el clima ambiental.

Tabla 5-49. Leyenda de los suelos del área de influencia del proyecto Cocorná III

Paisaje y ambiente morfogenético		**Montaña**	
Clima ambiental		Templado húmedo a muy húmedo	
Tipo de relieve		Terraza	Cono coluvial
Forma del terreno		Plano y taludes de terraza	Ladera coluvial
Litología y/o sedimentos		Depósitos aluviales heterogéneos y cenizas volcánicas	Rocas ígneas (cuarzodioritas y granodioritas) y depósitos de cenizas volcánicas
Características de los suelos		Moderadamente profundos, drenaje natural imperfecto a moderado, texturas medias a moderadamente gruesas, fertilidad muy baja, pH 5,1	Moderadamente Profundos, moderadamente drenados, texturas medias y finas, erosión ligera y moderada, fertilidad muy baja, pH 4,9
Unidades cartográficas de suelos	Nombre	COMPLEJO LA PULGARINA	ASOCIACIÓN YARUMAL
	Símbolo	LP	YA
	Fase	b	e1
Componentes taxonómicos y porcentajes			
Perfil		(32 - 05) y (36 -06)	(32 - 04)
Área (ha)		22,53	134,89
Porcentaje (%)		14,31	85,69

Fuente: Modificado de IGAC, 2007

5.1.5.1.1 Suelos ubicados en laderas de conos coluviales, a partir de rocas ígneas y cenizas volcánicas en un clima templado muy húmedo.

Estos suelos según el estudio general de suelos del departamento de Antioquia (IGAC, 2007) se encuentran dentro de la Asociación Yarumal (YA) en su fase de erosión ligera (e1), y dentro del área de influencia del componente ocupan una

extensión de 134.89 hectáreas (ha) 85.7% de esta. Esta unidad en los sitios de obra en los cuales se realizó la caracterización en detalle representa el 70,4 %.

Se ubican en un paisaje de montaña sobre conos coluviales, en un relieve de laderas coluviales con pendientes que van desde fuertemente inclinada (12 – 25%), ligeramente escarpada (25 – 50%), moderadamente escarpada (50 – 75%) y fuertemente escarpada (> 75%). Sus límites son bien definidos con los paisajes más recientes (terrazas). Se pudo determinar a través de los muestreos realizados en los sitios de obra, que esta se compone de los suelos Typic Hapludands, francosa fina, subactiva (perfil modal 32 – 04), de régimen de temperatura isohipertérmico en un clima templado muy húmedo y de humedad údico.

El material parental sobre el que se desarrollan pertenece a rocas ígneas (granodioritas, cuarzodioritas, granodioritas) y cenizas volcánicas. Son moderadamente profundos, moderadamente drenados, de texturas de medias a finas, una reacción ligera al floruro de sodio, pH 4.9 de reacción muy fuertemente ácida y de fertilidad muy baja.

Con una conductividad hidráulica de K= 7.E-03 cm/seg, que califica como bueno. Estos suelos pertenecen a la clase hidrológica TIPO B, que son Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua. (MINAMBIENTE, Resolución 865, 2004).

Se encontró también que la fase indicada por la cartografía del IGAC en el estudio general a escala 1:100.000 de F: e1, pendientes 25 – 50%, erosión ligera, clima muy húmedo, se constata con las observaciones en campo que corresponden a la F: e1, pendientes 25 – 50%, erosión moderada, clima muy húmedo. Con la presencia de F: e2 en algunos sectores y por presentar extensión pequeña y puntual no se puede representar espacialmente.

5.1.5.1.1.1.1 Descripción del perfil modal 32 - 04

A continuación, en la Foto 5-107 se muestra el perfil y la panorámica del ambiente de desarrollo asociada a los de perfil modal 32 – 04.

Foto 5-107. Perfil de suelos 32 - 04 y la panorámica del ambiente de desarrollo

Fuente: Proyecto Cocorná III

- Información general:

Perfil No: 32-04 Tipo de perfil: modal

Taxonomía: Typic Hapludand, francosa fina, subactiva

Unidad Cartográfica: YA Símbolo:

Localización geográfica. Departamento: Antioquia Municipio: Cocorná

Sitio: Vereda Mazotes

Coordenadas geográficas: N 6° 2'39.19''W -75°11'55.08'' Altitud: 1402 m

Foto aérea No: Vuelo: No. Plancha:

Paisaje: Montaña Tipo de relieve: Lomas Forma del terreno: Ladera coluvial

Material parental: Granodiorita

Relieve: Clase de pendiente: Ligeramente escarpado Porcentaje de pendiente: 25 - 50

Clima ambiental: Templado, Muy húmedo

Precipitación anual: 2000 - 4000mm Temperatura anual: 18 - 24°C

Clima edáfico: Régimen de temperatura: Isohipertérmico Régimen de humedad: Údico

Erosión: Clase: Tipo: Grado: Moderado

Movimientos en masa: Clase: Por deformaciones Tipo: Solifluxión laminar plástica Frecuencia: Poca

Pedregosidad superficial: Tipo: No hay Clase: Superficie cubierta (%): < 0.1

Afloramientos rocosos: Clase: esporádica Superficie cubierta: 0.1 - 2%

Inundaciones: No hay Frecuencia: Duración:

Encharcamientos: No hay Frecuencia: Duración:

Naturaleza nivel freático: No aparece Profundidad: > 150cm

Drenaje natural: Moderado

Profundidad efectiva: Superficial Limitada por: Sin limitaciones

Horizontes diagnósticos. Epipedón: Ócrico Endopedón: Cámbico

Características diagnósticas: Propiedades ándicas

Vegetación natural:

Uso actual: Ganadería

Limitantes del uso: Pendiente

Descrito por: Rodolfo Correa Peña Fecha: 12/03/2020

- Descripción:

0 – 35 cm Ap	Color en húmedo 10YR4/4 pardo amarrillento oscuro (Munsell, 1990) sin presencia de moteados; textura franco arcillo arenosa; estructura migajosa, muy fina, fuerte; consistencia en seco blanda, en húmedo firme, en mojado pegajosa y ligeramente plástica; poros frecuentes, continuos; muchas raíces, finas y gruesas, vivas de distribución normal, localizadas en inped; frecuente actividad de macroorganismos (lombrices); ligera reacción al NaF; ondulado; pH 4.8, reacción muy fuertemente ácida.
35 – 63 cm Bw1	Color en húmedo 10YR4/6 pardo amarillento oscuro (Munsell, 1990) sin presencia de moteados; textura arcillo arenosa; fragmentos de roca gravilla fina a media, de < 3%, estructura en bloques subangulares, fina, moderada; consistencia en seco blanda, en húmedo friable, en mojado no pegajosa y ligeramente

	plástica; poros finos; frecuentes raíces, finas, vivas de distribución normal, localizadas en inped; ligera reacción al NaF; ondulado; pH 4.9, reacción muy fuertemente ácida.
63 – 113cm Bw2	Color en húmedo 10YR6/6 amarillo pardusco (Munsell, 1990) sin presencia de moteados; textura arcillo limosa; fragmentos de roca cascajo, de < 3%, estructura en bloques subangulares, gruesa, fuerte; consistencia en seco blanda, en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y no plástica; no hay raíces; ligera reacción al NaF; ondulado; pH 5.2, reacción fuertemente ácida.
Observaciones:	

- Características químicas:

En la Tabla 5-50 están consignados los valores que arrojó el análisis de fertilidad del perfil del suelo 32-04. Los suelos de esta unidad cartográfica poseen muy baja fertilidad, estos pertenecen a grupos texturales moderadamente finos, en el cual existe una adecuada distribución de partículas (arenas, arcillas y limos) que permiten un movimiento de agua y aire a través de este, lo que deriva en condiciones ideales para el desarrollo radicular de las plantas.

Tabla 5-50. Resultados de los análisis de fertilidad química y granulometría del perfil 32-04

Profundidad (cm)	Granulometría			Clase textural	Gravilla (%)	pH (1:1)	C.O (%)	M.O (%)	N (%) Total	Fósforo (ppm)	Fertilidad	
	Arenas	Limos	Arcillas								Valor	Calificación
35	**54**	**20**	**28**	**FAr**		**4,8**	**3,71**	**6,4**	**1,9**	**4**	**1,458**	**Muy Baja**
28	**42**	**18**	**40**	**Ar**	**< 3**	**4,9**	**1,28**	**2,2**	**1,7**	**1**		
50	**44**	**18**	**38**	**FAr**	**< 3**	**5,2**	**0,64**	**1,1**	**1,6**	**1**		

Profundidad (cm)	Complejo de cambio cmol/kg											
	CICE	**BT**	**Ca**	**Mg**	**K**	**Na**	**Al**	**SCa**	**SMg**	**SK**	**SNa**	**SAl**
35	**3,9**	**2,39**	**1**	**1,1**	**0,24**	**0,05**	**1,5**	**26%**	**28%**	**6%**	**1%**	**38%**
28	**2,4**	**0,45**	**0,2**	**0,2**	**0,05**	**0**	**1,9**	**8%**	**8%**	**2%**	**0%**	**79%**
50	**1,8**	**0,6**	**0,2**	**0,3**	**0,04**	**0,06**	**1,2**	**11%**	**17%**	**2%**	**3%**	**67%**

Profundidad (cm)	Saturación de bases (%)	Relación de cationes			Relación CIC/Ar	C.E dS/m
		Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K		

35	**61%**	**0,91**	**4,58**	**8,75**	**0,150**	**0,06**
28	**19%**	**1,00**	**4,00**	**8**	**0,060**	**0,03**
50	**33%**	**0,67**	**7,50**	**12,5**	**0,047**	**0,02**

Estos suelos presentan una reacción muy fuertemente ácida en los primeros 63 cm y fuertemente ácida en el horizonte más profundo, con valores entre 4,8 y 5,2, dichos valores afectan la solubilidad de nutrientes importantes como el fósforo (P), el nitrógeno (N), además, de los cationes calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y el potasio (K^{+}). El contenido de aluminio (Al) que presenta este suelo es alto, debido a la naturaleza de la reacción en el suelo y con estos valores de pH aparecen especies químicas del Al que generan problemas de toxicidad para las plantas, condición que se puede ver en la saturación con Al que muestra la Tabla 5-50 y que constituye una seria limitante para el uso del suelo.

En cuanto a los niveles bajos en el contenido de fósforo (P) en el suelo, macronutriente que es esencial para el adecuado desarrollo de las plantas, se puede explicar con la evidencia de presencia de filosilicatos en el suelo como la alofana, que provienen de materiales de origen volcánico y que realizan una fuerte adsorción de P, afectando su disponibilidad en la solución del suelo para ser tomado por las plantas. También los bajos contenidos de bases (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+}) a través del perfil del suelo, se debe a factores asociados al ambiente donde se ubican estos suelos, ver Tabla 5-48, por lo cual se presenta un intenso lavado de bases que se percolan por fuera de la zona de raíces y por tanto afectan la oferta nutricional para el desarrollo vegetal.

El contenido de materia orgánica del suelo es alto en el horizonte superficial y disminuye con la profundidad

5.1.5.1.2 Suelos ubicados en planos y taludes de terraza, a partir depósitos coluvio aluviales y cenizas volcánicas en un clima templado muy húmedo.

Se encuentran dentro del Complejo La Pulgarina (LP) en sus fases (a y b), y dentro del área de influencia del componente ocupan una extensión de 22.53 hectáreas (ha) 14.3% de esta y en los sitios de obra donde se llevó la caracterización en detalle representan el 29,6 %.

Se ubican en un paisaje de montaña, sobre terrazas, en un relieve de planos y taludes de terrazas con pendientes que van desde plana (0 - 3%), ligeramente inclinada (3 – 7%) y moderadamente inclinada (7 - 12%). Sus límites son bien definidos. Se encontraron en los muestreos realizados en los sitios donde se ubicarán la captación y la casa de máquinas, suelos Aquandic Dystrudepts, francosa gruesa, subactiva (perfil modal 32 – 05), de régimen de temperatura isohipertérmico en un clima templado muy húmedo y de humedad údico.

Estos suelos se desarrollan sobre depósitos aluviales y cenizas volcánicas. Son moderadamente profundos, de imperfecta a moderadamente drenados, de texturas medias, una reacción fuerte al floruro de sodio, pH 5.1 reacción fuertemente ácida y fertilidad muy baja.

Con una conductividad hidráulica de K= 3.E-03 cm/seg, que califica como bueno. Estos suelos pertenecen a la clase hidrológica TIPO B, que son Suelos con capacidades de infiltración moderadas cuando están completamente húmedos, principalmente suelos medianamente profundos y drenados, con textura de sus agregados variando entre moderada y muy fina. Tiene velocidades medias de transmisión de agua. (MINAMBIENTE, Resolución 865, 2004).

Se encontró también que la fase indicada por la cartografía del IGAC en el estudio general a escala 1:100.000 de F: a, pendientes 1 - 3%, fase plana, clima muy húmedo. Contrasta con las observaciones en campo que corresponden a la F: b, pendientes 3 - 7%, ligeramente ondulada, clima muy húmedo.

5.1.5.1.2.1.1 Descripción del perfil modal 32 - 04

A continuación, en la Foto 5-108 y Foto 5-109 se muestra el perfil y la panorámica del ambiente de desarrollo asociada a los de perfil modal 32 – 04 respectivamente.

Foto 5-108. Perfil de suelo 32 - 05

Foto 5-109. Panorámicas de los ambientes formativos.

- Información General:

Perfil No: 32-05 Tipo de perfil:

Taxonomía: Aquandic Dystrudepts, francosa gruesa, subactiva

Unidad Cartográfica: Complejo La Pulgarina Símbolo: LP

Localización geográfica. Departamento: Antioquia Municipio: Cocorná

Sitio: Vereda Mazotes

Coordenadas geográficas: N 6° 2'40.06''W -75°10'55.31'' Altitud: 1171 m

Foto aérea No: Vuelo: No. Plancha:

Paisaje: Valle Tipo de relieve: Terraza Forma del terreno: Talud de terraza

Material parental: Aluvial

Relieve: Clase de pendiente: Ligeramente inclinada Porcentaje de pendiente: 3 – 7%

Clima ambiental: Templado, Muy húmedo

Precipitación anual: 2000 - 4000mm Temperatura anual: 18 - 24°C

Clima edáfico: Régimen de temperatura: Isohipertérmico Régimen de humedad: Údico

Erosión: Clase: No hayTipo: Grado:

Movimientos en masa: Clase: No hay Tipo: Frecuencia:

Pedregosidad superficial: Tipo: Laja pequeña Clase: Superficie cubierta (%): < 0.1

Afloramientos rocosos: Clase: Media Superficie cubierta: 10 - 25%

Inundaciones: No hay Frecuencia: Duración:

Encharcamientos: No hay Frecuencia: Duración:

Naturaleza nivel freático: No aparece Profundidad: > 150cm

Drenaje natural: Moderado

Profundidad efectiva: Moderadamente profunda Limitada por: Sin limitaciones

Horizontes diagnósticos. Epipedón: Ócrico Endopedón: Sómbrico

Características diagnósticas: Propiedades ándicas

Vegetación natural:

Uso actual: Ganadería

Limitantes del uso: Afloramientos

Descrito por: Rodolfo Correa Peña Fecha: 12/03/2020

- Descripción:

0 – 20 cm Ap	Color en húmedo 10YR3/2 pardo grisáceo muy oscuro (Munsell, 1990) sin presencia de moteados; textura franco arcillo arenosa; estructura migajosa, media, débil; consistencia en seco dura, en húmedo friable, en mojado pegajosa y no plástica; poros frecuentes, finos, continuos; muchas raíces, finas y gruesas, vivas de distribución normal, localizadas en imped; frecuente actividad de macroorganismos (lombrices); ligera reacción al NaF; límite claro, ondulado; pH 5, reacción muy fuertemente ácida
20 – 40 cm AB	Color en húmedo 10YR4/6 negro (Munsell, 1990) sin presencia de moteados; textura franco arcillo arenosa; estructura en bloques subangulares, media, débil; consistencia en seco dura, en húmedo friable, en mojado no pegajosa y no plástica; poros finos; pocas raíces, finas, vivas de distribución normal, localizadas en inped; fuerte reacción al NaF; límite claro, ondulado; pH 5.1, reacción fuertemente ácida.
40 – 70cm Bw	Color en húmedo 2.5Y4/4 pardo oliva (Munsell, 1990) sin presencia de moteados; textura franco arenosa; estructura en bloques subangulares, media, débil; consistencia en seco dura, en húmedo friable, en mojado pegajosa y no plástica; pocas raíces, finas; fuerte reacción al NaF; límite claro, ondulado; pH 5.2, reacción fuertemente ácida.
Observaciones:	

- Características químicas

Los resultados de los análisis químicos del perfil 32-05 se muestran en la Tabla 5-51. Estos suelos poseen una textura moderadamente fina, grupo textural en el cual existe una proporción ideal de partículas (arenas, arcillas y limos) que favorecen el flujo del agua y la aireación en el suelo y que propicia el desarrollo radicular de las plantas.

Tabla 5-51. Resultados de los análisis de fertilidad química y granulometría del perfil 32-05

Profundidad (cm)	Granulometría			Clase textural	Gravilla (%)	pH (1:1)	C.O (%)	M.O (%)	N (%) Total	Fósforo (ppm)	Fertilidad	
	Arenas	Limos	Arcillas								Valor	Calificación
20	70	20	10	FA		5	5,39	9,3	2	3	1,632	Muy Baja
20	72	18	10	FA		5,1	4,12	7,1	1,9	2		
30	68	20	12	FA		5,2	2,20	3,8	1,8	2		

Profundidad (cm)	Complejo de cambio cmol/kg											
	CICE	BT	Ca	Mg	K	Na	Al	SCa	SMg	SK	SNa	SAl
20	**2.3**	**1.02**	**0.1**	**0.2**	**0.59**	**0.13**	**1.8**	**4%**	**9%**	**26%**	**6%**	**78%**
20	**1.5**	**0.27**	**0**	**0.1**	**0.11**	**0.06**	**1.3**	**0%**	**7%**	**7%**	**4%**	**87%**
30	**0.6**	**0.33**	**0**	**0**	**0.29**	**0.04**	**0.5**	**0%**	**0%**	**48%**	**7%**	**83%**

Profundidad (cm)	Saturación de bases (%)	Relación de cationes			Relación CIC/Ar	C.E dS/m
		Ca/Mg	Mg/K	(Ca+Mg)/K		
20	**44%**	**0.50**	**0.34**	**0.51**	**0.230**	**0.03**
20	**18%**	**0.00**	**0.91**	**0.91**	**0.150**	**0.03**
30	**55%**	**0.00**	**0.00**	**0**	**0.050**	**0.02**

La reacción en el horizonte más superficial del suelo es muy fuerte ácida y fuertemente ácida en los horizontes subsuperficiales, con valores de pH que van de 5,0 a 5,2. Esta acidez está relacionada con el contenido de aluminio intercambiable en el suelo y como se puede observar en la Tabla 5-51, existe una correlación entre el contenido de este con el pH de cada profundidad estudiada. Así pues, tenemos una condición en la que se presenta en potencia toxicidad por aluminio para las plantas (ver saturación de aluminio en el suelo) y afecta la aptitud de uso en esta unidad cartográfica de suelo.

Así las cosas, estos suelos poseen una fertilidad natural muy baja, debido principalmente a los ambientes donde se forman y evolucionan, ver Tabla 5-48. Los contenidos de fósforo (P) son bajos en todo el perfil, esto es debido a la presencia de alofana, mineral que proviene de las cenizas volcánicas que cubren toda la unidad y que tienen una alta capacidad de adsorción de P. Además, en todo el perfil la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) es baja, lo que se traduce en una baja capacidad del suelo para aportar nutrientes (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}) a las plantas. Este valor de la CICE, es explicada por el bajo contenido de bases en el suelo como lo muestra la Tabla 5-51 y también la acidez intercambiable Al^{3+} del suelo, pero que son producto del intenso lavado de bases que sucede por el exceso de humedad en la zona.

5.1.5.2 Capacidad de uso

A partir de los resultados obtenidos en la sección 5.1.5.1, y con la evaluación de las características de los perfiles usados para la descripción de las UCS dentro el área de estudio del componente suelos y usos de la tierra del proyecto Cocorná III, se determinaron las Unidades por Capacidad de Uso (UCU) para el proyecto, que a continuación se presentan:

5.1.5.2.1 Clase 6, subclase pe. (6pe)

En el área de influencia del componente, esta clase de tierras se encuentra sobre un relieve de laderas coluviales, integran la UCS YAe1 de la asociación Yarumal y ocupan el 70,4% del área donde se intervendrá con las obras (que tiene una extensión de 12,84 hectáreas) y 134,89 hectáreas (ha) equivalentes al 85,7% del total de las tierras evaluadas del área de influencia.

En la Tabla 5-52 se presentan las características de estos suelos que permiten asignarles la clase agrológica 6, la cual agrupa tierras con limitaciones severas que restringen su uso. Con la evaluación de dichas características se determinó la pertenencia de estas tierras a la subclase 6pe, donde las principales limitaciones de estos suelos son las pendientes, la susceptibilidad a la erosión y movimientos en masa del tipo conocido como terracetas o pata de vaca, situación que se presenta actualmente y que constituye un factor de aceleración en la degradación del suelo, también aunque en menor grado presentan limitaciones por acidez intercambiable, toxicidad por aluminio, bajo contenido de bases (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}) y en general muy baja fertilidad.

Tabla 5-52. Características y valores del perfil 32-04

Características	Parámetro	Valor
Pendiente	%	25-50
Erosión	Grado	Moderada
Movimientos en masa	% Área afectada	Poca (5-25)

Características	Parámetro	Valor
Drenaje natural	Estado	Moderado
Inundaciones	Frecuencia y duración	No se presentan
Encharcamientos	Frecuencia y duración	No se presentan
Profundidad efectiva	cm	25-50
Textura	Familia	Francosa fina
	Grupo textural	Moderadamente finos
Fragmentos en el suelo	% por volumen	< 3
Pedregosidad superficial	% de área afectada	< 0,1
Afloramiento rocoso	% de área afectada	< 0,1
Fertilidad*	Calificación	Muy baja
Contenido de sales	CE (dS/m), % de sales	No se presentan
Contenido de sodio	RAS y Profundidad	No se presentan
Sales y Sodio	% Na intercambiable PSI	< 50
Ca/Mg	Valor de la relación y profundidad	Invertida
Saturación de aluminio	%	< 60
Distribución de lluvias	Distribución	Suficiente durante un semestre, con exceso en el siguiente
Piso térmico	Clase	Templado
Condición de humedad	Ambiente	Muy húmedo
Temperatura/Heladas	°C y Frecuencia	18-24, baja

Fuente: modificado de IGAC, 2014

Estas tierras tienen aptitud para una limitada clase de cultivos, perennes o semiperennes, intensivos o semintensivos como (café, cítricos, caña, entre otros), teniendo en cuenta la inclusión de prácticas de conservación del suelo como siembras en curvas de nivel y de manera más aconsejable en sistemas agroforestales, en donde se integran espacial y temporalmente actividades agrícolas, ganaderas y forestales.

En cuanto a la ganadería es posible desarrollarse, siempre y cuando se haga un adecuado manejo de las pasturas utilizando especies introducidas como *Brachiaria decumbens* y teniendo una adecuada carga animal por hectárea para evitar la degradación del suelo por sobrepastoreo.

5.1.5.2.2 Clase 4, sub clase s. (4s)

Esta clase se encuentra sobre un relieve de laderas coluviales, hace parte la UCS LPa de la asociación La Pulgarina y ocupa el 29,6% del área donde se intervendrá con las obras del proyecto y dentro del área de influencia tienen una extensión de 22,53 hectáreas correspondiente al 14,3% del total de las tierras.

En la Tabla 5-53 se presentan las características de estos suelos que permiten asignarles la clase agrológica 4, poseen limitaciones severas que restringen su uso a cultivos específicos, exigentes en cuanto a sistemas de manejo (IGAC, 2014). Con la evaluación de dichags características se determinó la pertenencia de estas tierras a la subclase 4s, donde se las principales limitaciones de estos suelos son por acidez intercambiable, toxicidad por aluminio, bajo contenido de bases (Ca^{2+}, Mg^{2+} y K^{+}), una relación Ca/Mg invertida en los primeros 50 cm del suelo y en general muy baja fertilidad

Tabla 5-53 Características y valores del perfil 32-05

Características	Parámetro	Valor
Pendiente	%	0-7
Erosión	Grado	No hay
Movimientos en masa	% Área afectada	No hay
Drenaje natural	Estado	Moderado, imperfecto
Inundaciones	Frecuencia y duración	No hay
Encharcamientos	Frecuencia y duración	Ocasionales
Profundidad efectiva	cm	25-100
Textura	Familia	Franco arenosa, franco arcillo arenosa
	Grupo textural	Moderadamente gruesos, moderadamente finos
Fragmentos en el suelo	% por volumen	0, 0-90
Pedregosidad superficial	% de área afectada	No hay
Afloramiento rocoso	% de área afectada	10-25
Fertilidad*	Calificación	Muy baja
Contenido de sales	CE (dS/m), % de sales	No se presentan
Contenido de sodio	RAS y Profundidad	No se presentan
Sales y Sodio	% Na intercambiable	Na
Ca/Mg	Valor de la relación y profundidad	Invertida
Saturación de aluminio	%	> 60

Características	Parámetro	Valor
Distribución de lluvias	Distribución	Suficiente durante un semestre, con exceso en el siguiente
Piso térmico	Clase	Templado
Condición de humedad	Ambiente	Muy húmedo
Temperatura/Heladas	°C y Frecuencia	18-24, baja

Fuente: modificado de IGAC, 2014

La aptitud de estas tierras permite el establecimiento de cultivos intensivos y semiintensivos, en sistemas que implementen variedades adaptadas, planes de fertilización y de manejo de las condiciones ácidas del suelo. La ganadería puede desarrollarse en estos suelos, siempre y cuando se lleven a cabo prácticas de manejo como el uso de especies introducidas y mejoradas como *Brachiaria decumbens*, manejar cargas de ganado adecuadas por hectárea para evitar el sobre pastoreo y el manejo de la fertilización de las pasturas.

En estos suelos es necesario realizar zanjas de drenaje para evitar la sobre saturación con agua del suelo y mantener las condiciones óptimas de desarrollo para el cultivo.

Los sistemas agroforestales en donde diferentes actividades agrícolas, ganaderas forestales se integran tanto espacialmente con diferentes arreglos (barreras vivas, etc.), como temporalmente son los más aconsejables para esta unidad de tierra.

5.1.5.3 Uso actual y potencial del suelo

5.1.5.3.1 Uso actual del suelo

Dentro del área de influencia, se encontraron tres grandes grupos o categorías de coberturas que actualmente tiene la tierra, estos hacen parte del suelo rural del municipio de Cocorná. En la Tabla 5-54 están relacionadas las coberturas a un mayor detalle con los usos predominantes asociados a estas y que fueron verificados durante el trabajo de campo, estas constituyen el uso actual que posee el suelo.

En la Figura 5-191 se muestra la distribución que tiene el uso actual en el área de influencia del componente de suelos (ver Capítulo 4 Área de influencia), se puede observar como la mayor parte de las obras (captación, conducción a presión y casa de máquinas) intervienen zonas que actualmente se encuentran bajo usos de ganadería y áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, así mismo estos son los grupos de uso que ocupan la mayor parte del área de influencia, como se corrobora en la Figura 5-192, luego el uso más sensible a la intervención aunque de manera puntual en el sitio de obra es el segundo, pues es un uso que luego de su perturbación, durante toda la vida del proyecto no se podrá restituir al estado inicial.

Tabla 5-54. Coberturas dentro del área de influencia del componente suelos y la interpretación de su uso predominante

Nivel			Observación en campo
1	2	3	
Territorios Artificializados	Zonas urbanizadas	Tejido urbano discontinuo	Tejido urbano discontinuo
Territorios Agrícolas	Cultivos permanentes	Cultivos confinados	Cultivo no definido bajo cobertura.
		Cultivos permanentes	Cítricos, caña y plátano
	Pastos	Pastos limpios	Pastos limpios
		Pastos arbolados	Pastos arbolados
		Pastos enmalezados	Pastos enmalezados
Bosques y Áreas seminaturales	Bosques	Bosque de galería y/o ripario	Bosque de galería y ripiario
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Afloramientos rocosos	Afloramientos rocosos
	Áreas con vegetación, herbácea y/o arbustiva	Vegetación secundaria o en transición	Vegetación secundaria y/o en transición

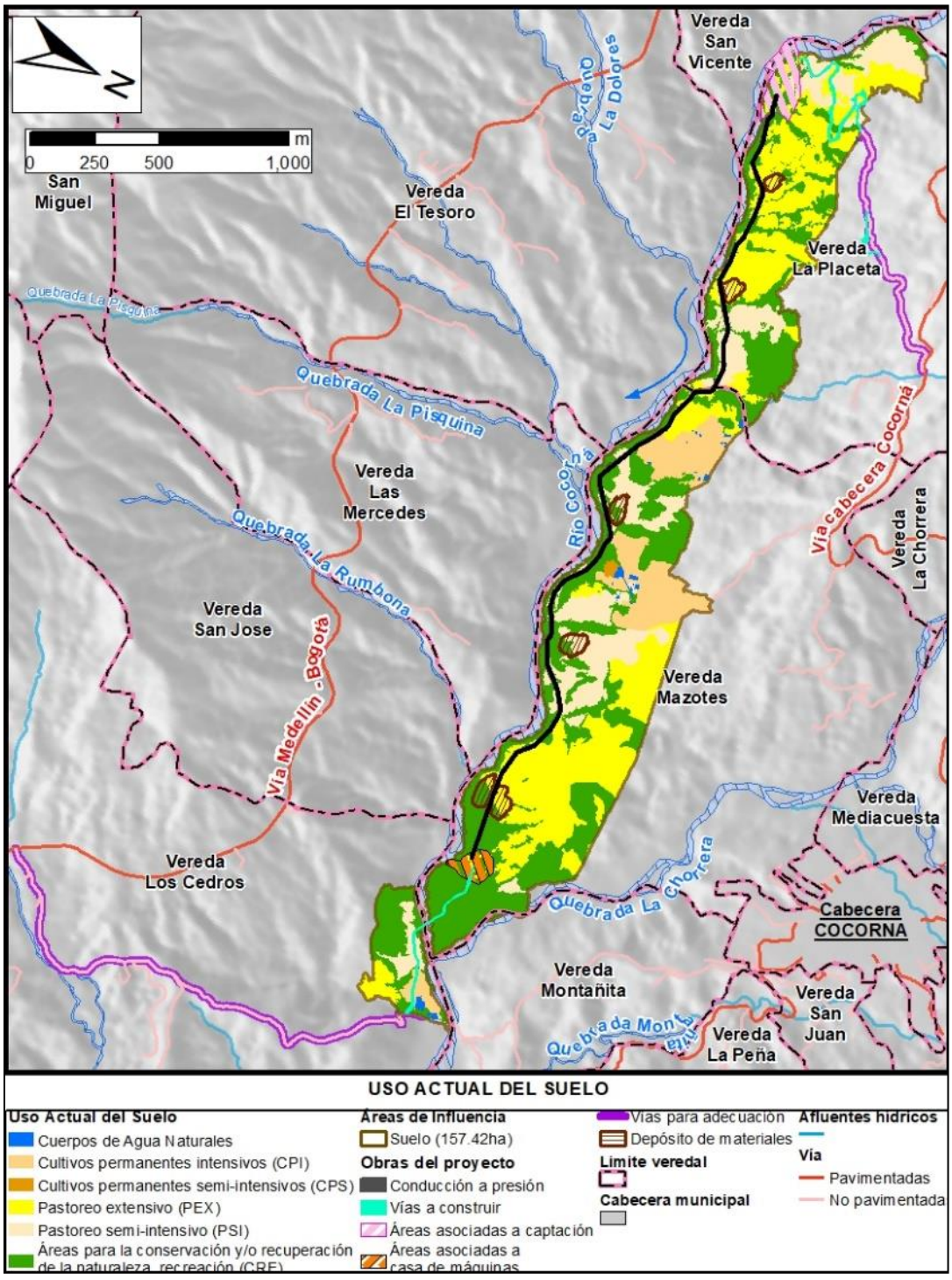


Figura 5-191. Mapa con el uso actual del suelo dentro del área de influencia del componente de suelos del proyecto Cocorná III

Son en total nueve tipos de cobertura que abarcan desde tejido urbano discontinuo, hasta vegetación natural, pasando por cultivos y pastizales, ver Figura 5-191. La cobertura que tiene una mayor prevalencia dentro de la zona estudiada corresponde a pastos arbolados con 47,8 hectáreas, ver Tabla 5-55, ocupando el 30,37% de la superficie que abarca el área de influencia, en esta misma tabla se observa que el 22,14% de la superficie está ocupada por bosque de galería o ripiario, que corresponde a las franjas de tierra que se dejan en las márgenes de los ríos y afluentes, en este caso, su mayoría está compuesta por las franjas ubicadas alrededor del río Cocorná y en algunos de los pequeños afluentes.

Tabla 5-55. Grupos de usos principales del suelo dentro del área de influencia del proyecto Cocorná III.

Cobertura del suelo	Grupo de uso del suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)
Tejido urbano discontinuo	Infraestructura	0,86	0,55
Cultivos permanentes herbáceos	Agricultura	14,31	9,09
Cultivos confinados	Agricultura	0,29	0,18
Pastos limpios	Ganadería	26,92	17,11
Pastos arbolados	Ganadería	47,80	30,37
Pastos enmalezados	Ganadería	3,60	2,29
Bosque de galería y/o ripario	Conservación	34,84	22,14
Vegetación secundaria o en transición	Conservación	24,53	15,59
Afloramientos rocosos	Conservación	4,22	2,68
Total		**157,4**	**100,00**

Las coberturas actuales fueron reclasificadas en cuatro grupos de uso del suelo que describen la destinación que la tierra tiene en el área de influencia. La Figura 5-192, muestra que los usos principales son los de ganadería y conservación, esta preponderancia de los grupos de la zona de estudio, concuerdan con la distribución de los usos del suelo que reporta el POMCA para el municipio de Cocorná, en donde la conservación, la ganadería y la agricultura son los que más porcentaje ocupan en el territorio, con el 41,91%, 32,76% y 6,11% respectivamente. La ganadería se realiza predominantemente de forma extensiva, solo en algunas áreas, las que circundan a la captación, hay evidencia de prácticas de manejo, como el mejoramiento de praderas con especies forrajeras como *Brachiaria decumbens*, aunque por la presencia de terracetas, fenómeno erosivo producto del sobre pastoreo, se puede inferir que este uso, por la manera en que se realiza actualmente, genera impactos negativos en las propiedades del suelo, haciéndolo insostenible.

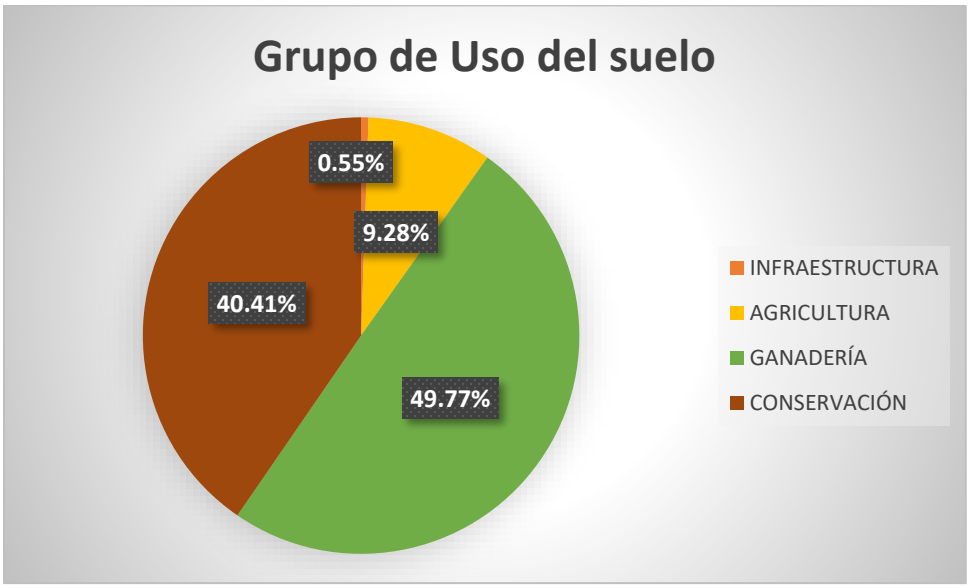


Figura 5-192. Distribución del área en porcentaje de los grupos de uso del suelo dentro del área de influencia.

5.1.5.3.2 Usos del suelo del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Samaná Norte.

Al consultar la información disponible sobre los usos potenciales del suelo que determina el POMCA del Río Samaná Norte, se encontró que dentro del área de influencia del componente, este documento que es un determinante ambiental para la planificación del uso del suelo dentro del área de la cuenca, determina cuatro tipos de usos principales, recopilados en la Tabla 5-56 y Figura 5-193, y de los cuales para el área de influencia, la principal vocación es en sistemas silvopastoriles, seguida de restauración ecológica con el 73,87 y el 22,32% del área respectivamente.

Tabla 5-56. Usos principales del suelo sobre el área de influencia del componente suelos.

Categoría	Uso	Subuso	Descripción del área	Área (ha)	Porcentaje (%)
Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	Sistemas forestales protectores (FPR)	2,89	1,84
	Áreas de Restauración	Áreas de Restauración ecológica	Restauración ecológica (CRE)	35,13	22,32
	Áreas para la producción	Áreas agrícolas	Cultivos transitorios	3,11	1,97

Categoría	Uso	Subuso	Descripción del área	Área (ha)	Porcentaje (%)
Uso Múltiple	agrícola, ganadera y de uso sostenible de Recursos Naturales		semi-intensivo (CTS)		
		Áreas Agrosilvopastoriles	Sistema forestal productor (FPD)	116,28	73,87
Total				**157,4**	**100,00**

Fuente: (Cornare, Corantioquia, & Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño, 2017).

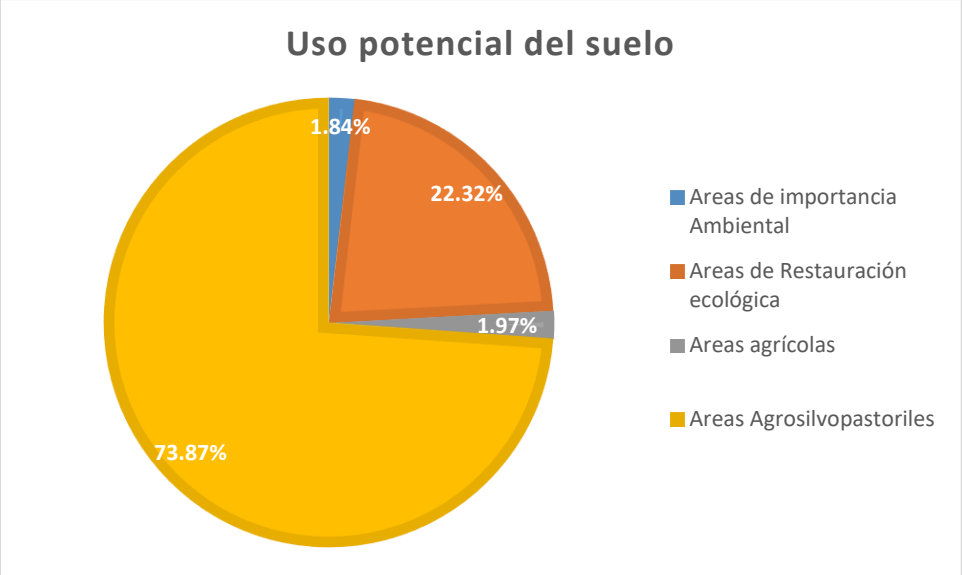


Figura 5-193. Distribución del uso potencial del suelo por porcentaje dentro del área de influencia del componente suelos
Fuete: Elaboración propia a partir de la información consignada en (Cornare et al., 2017).

5.1.5.3.3 Usos del suelo en el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Cocorná.

En este documento el área de influencia del componente suelos se encuentra dentro de la Zona 2: “Protección del suelo rural” y sus vocaciones de uso contemplan agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca. Los usos principales recomendados dentro de esta zona son agricultura, ganadería y como complementarios silvicultura y extracción de madera.

El EOT también define los usos a los que el suelo debe de estar sujeto dentro de las rondas hídricas y las zonas de amenaza por avenidas torrenciales, movimientos en

masa e inundaciones, para la delimitación de estas zonas se aplican los criterios definidos y establecidos dentro del Acuerdo 251 de 2011 expedido por CORNARE, como áreas para de conservación y protección ambiental. A continuación, se listan dichos criterios.

La Ronda Hídrica puede ser:

- X: La distancia a partir de la orilla equivalente a dos veces el ancho del cauce, tomada o medida de forma perpendicular a las orillas, siempre y cuando X no sea inferior a 10 m.
- SAI + X: Zona de alta susceptibilidad a inundaciones (SAI), más la ronda hídrica.
- SAT + X: Zona de alta susceptibilidad a avenidas torrenciales (SAT), más la ronda hídrica.
- r: Es el radio tomado desde el punto de afloramiento del agua hasta el borde exterior del área de encharcamiento (r siempre es mayor o igual a 10 m, si 3r excede la línea divisoria del agua, el retiro se toma hasta dicha línea).

Los usos del suelo dentro de estas franjas en agricultura y ganadería están prohibidos, en silvicultura y pesca están restringidos, en contraste los usos con fines de educación, investigación científica y desarrollo se consideran como usos principales, cabe mencionar que no se encontró una clase de uso dentro de esta zona que aludan de manera directa a la conservación, como áreas para la restauración ecológica, etc. Sin embargo, dentro del esquema de ordenamiento territorial en los artículos 24 en los literales (14, 15, 58 y 59), Art 92, Art 164 y Art 253 se plantean estas zonas como de importancia ecosistémica y por ende entran dentro de las zonas de protección y conservación del municipio de Cocorná.

5.1.5.4 Conflictos por el uso de la Tierra

Del análisis de conflictos en el uso del suelo, que surgen al comparar los usos que en la actualidad se llevan a cabo y la vocación de uso principal definida por el POMCA (Cornare et al., 2017) en el área de influencia del componente, se determinó que el 58% del área presenta conflicto por sobre utilización y como se presenta en la Tabla 5-57, la intensidad del conflicto es moderada, explicado en la discrepancia entre el uso actual en pastoreo extensivo y el principal recomendado que es forestal productor principalmente.

Tabla 5-57. Calificación del conflicto en el uso del suelo, dentro del área de influencia del mismo componente en el proyecto Cocorná III.

Categoría	Símbolo	Área (m^2)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Calificación
Tierra sin conflicto o uso adecuados	A	634.026,3	63,4	40,28%	1,0

Categoría	Símbolo	Área (m^2)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Calificación
Tierras con conflicto por subutilización ligera	S1	2.134,2	0,2	0,14%	2,0
Tierras con conflicto por subutilización severa	S3	18.629,5	1,9	1,18%	4,0
Tierras con conflicto por sobre utilización moderada	O2	767.147,4	76,7	48,73%	6,0
Tierras con conflicto por sobre utilización severa	O3	152.200,4	15,2	9,67%	7,0
Total		**1.574.137,8**	**157,4**	**100,00%**	**4,0**

Así pues, durante el trabajo de campo y como se muestra en la Foto 5-110, en diferentes partes que circundan los sitios donde se ubican las obras de conducción y de captación, se evidenciaron signos de erosión, apoyando así lo enunciado de esta categoría, el agroecosistema supera la capacidad del suelo y de forma progresiva se degrada la calidad del ámbito. Puede afirmarse que las áreas que actualmente están en este uso no cumplen con los criterios de sostenibilidad en la explotación del recurso.

Foto 5-110. Procesos de erosión con un grado moderado y presencia de movimientos en masa por deformación (terracetas) en las laderas circundantes de la conducción del proyecto Cocorná III.

En una menor extensión, pues solo suman dos (2) hectáreas dentro del área de influencia, está la categoría de conflicto por subutilización, ver Tabla 5-57. Cuya intensidad es severa, condición en la cual el uso que se le da al suelo está por debajo de su vocación de uso, este conflicto se puede ubicar fácilmente dentro del área de

influencia, al observar el uso que tienen los suelos que están dentro de las terrazas aluviales asociadas al río Cocorná y cuyo uso actual está en pastoreo extensivo, cuando el uso principal recomendado por el POMCA es en cultivos transitorios semiintensivos. Esta discrepancia entre usos resalta el desaprovechamiento de las características que le confieren una fertilidad natural óptima para una mayor intensificación de actividades productivas y que repercute en un mayor beneficio social del suelo.

En contraste el 40,28% del área no presenta conflicto, cuya cobertura guarda una coherencia con la vocación y por tanto no deteriora las características del suelo, logrando este uso ser sostenible. A manera de conclusión, el área de influencia presenta conflictos en el uso del suelo en el 59,72% Figura 5-194, condición en la que se están deteriorando las características naturales expresadas en la fertilidad natural, suponiendo un riesgo no sólo ecológico desde la perspectiva del suelo como proveedor de servicios ecosistémicos, sino también desde la perspectiva social ya que al deteriorarse la calidad del suelo se pone en riesgo las actividades productivas que son el sostén de las comunidades.

Figura 5-194. Distribución del conflicto en el uso de suelo en el área de influencia, del proyecto Cocorná III.

Fuente: Praming SAS, 2020 a partir de la información del POMCA de la cuenca del río Samaná Norte

La calificación de cada clase de conflicto dentro del área de influencia se ponderó por el peso que tiene esta en la extensión que ocupa y como se muestra en la Tabla 5-57, el resultado es 4,05, valor que lo ubica en un nivel medio de conflicto, esto se justifica claramente por el peso que tiene actualmente un uso acorde con el principal recomendado. Sin embargo, en el área en conflicto es necesario establecer acciones que mitiguen el riesgo y permitan el tránsito a usos más coherentes con la capacidad del suelo como los sistemas silvo pastoriles y/o agroforestales.

5.1.6 Paisaje

La caracterización para el componente Paisaje dentro del medio abiótico se aborda haciendo uso de las estrategias en el marco de enfoque metodológico del paisaje total (ver Capítulo 2, Metodología, Caracterización del Medio abiótico, Paisaje). Estos lineamientos metodológicos se direccionan hacia la integración de factores ambientales presentes en los medios físico, biótico y socioeconómico participantes en los procesos conformantes del paisaje.

La representación espacial de los factores anteriormente mencionados para los diferentes medios del ambiente se desprende de las fuentes de información secundaria listadas en la Tabla 5-58. Estas capas cartográficas sometidas a procesamiento espacial y posterior combinación nos permitirán realzar las características diferenciales del territorio analizado en el desarrollo del presente apartado.

Tabla 5-58. Fuentes de información para el análisis del paisaje

Dato	Descripción
Modelo digital de elevación del terreno (MDT)	Representación digital de las elevaciones del terreno derivada del procesamiento de la información para la zona provenientes de las planchas oficiales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) con escala1:10.000 (Planchas: 147IVD4 y 167IIB2). Este factor da evidencia de las acciones del medio físico sobre el entorno.
Mapa de coberturas	Coberturas terrestres clasificadas mediante metodología Corine Land Cover de la base cartográfica para el proyecto POMCAS de Oriente en escala 1:25.000 (Cornare et al., 2017). Sus características vislumbran la influencia tanto del medio biótico como del medio socioeconómico (áreas antrópicas, naturales y agropecuarias).
Obras del proyecto	Áreas intervenidas por las acciones necesarias para la construcción y operación del Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III.

Los archivos digitales para la representación espacial de los factores mencionados mediante capas de información geográfica pueden revisarse en el repositorio de información cartográfica en el Anexo 13.

5.1.6.1 Territorio visual

La definición de la extensión espacial para la descripción de las características del paisaje tiene como meta la delimitación del área en donde se realizarán los análisis

de este componente ambiental. El establecimiento del área de análisis mencionada prioriza la relación ineludible y esperable entre la localización de la zona a intervenir en concordancia con el contexto del relieve circundante.

Es así como la localización del proyecto cobra relevancia en el escenario de una cuenca media con divisorias de aguas que superan los 4 km de separación, en algunos sectores del tramo del río Cocorná intervenido por el proyecto. Esta condición queda evidenciada en la Figura 5-195, donde sobre la representación del relieve se resaltan las divisorias de agua tanto del afluente principal río Cocorná en el tramo intervenido como la divisoria más al oriente de la quebrada La Chorrera. Estas divisorias conforman barreras o límites de la posible visualización sobre el área de localización de las intervenciones del proyecto.

El territorio o cuenca visual será estimado entonces como las zonas desde las cuales las áreas de intervención para el proyecto hidroeléctrico PCH Cocorná III tienen posibilidad de ser visualizadas; dicho de otra forma, las zonas que tienen línea visual hacia las obras del proyecto. Este primer producto se deriva de la aplicación de análisis automatizados con base en rutinas de procesamiento en software de sistemas de información geográfica a partir del relieve para la zona y la ubicación de las áreas de intervención del proyecto. Los resultados de este proceso pueden apreciarse en la Figura 5-196, en la cual, se demarcan en color café las zonas con visibilidad sobre las áreas a intervenir por parte del proyecto.

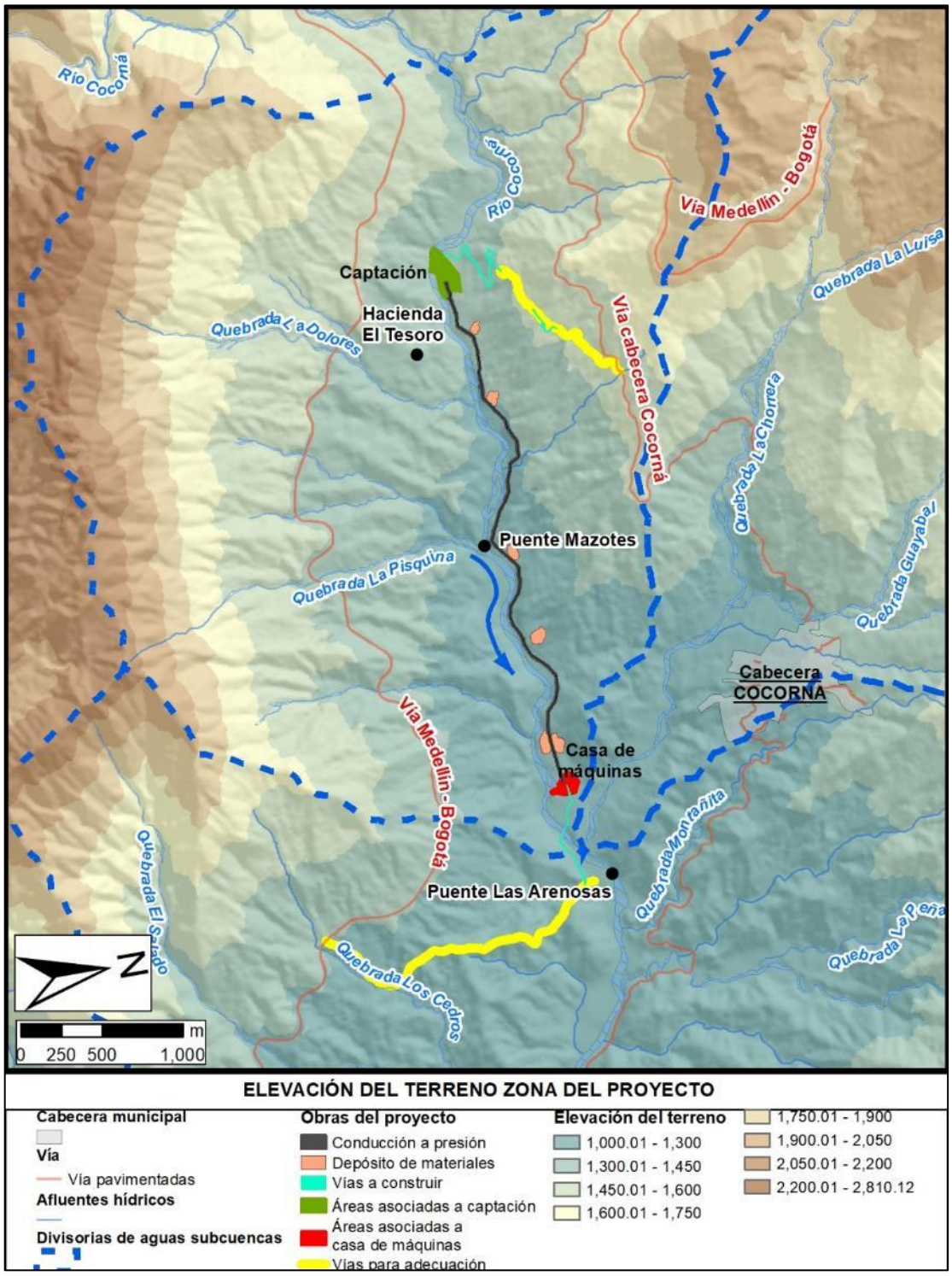


Figura 5-195 Relieve Río Cocorná tramo intervenido

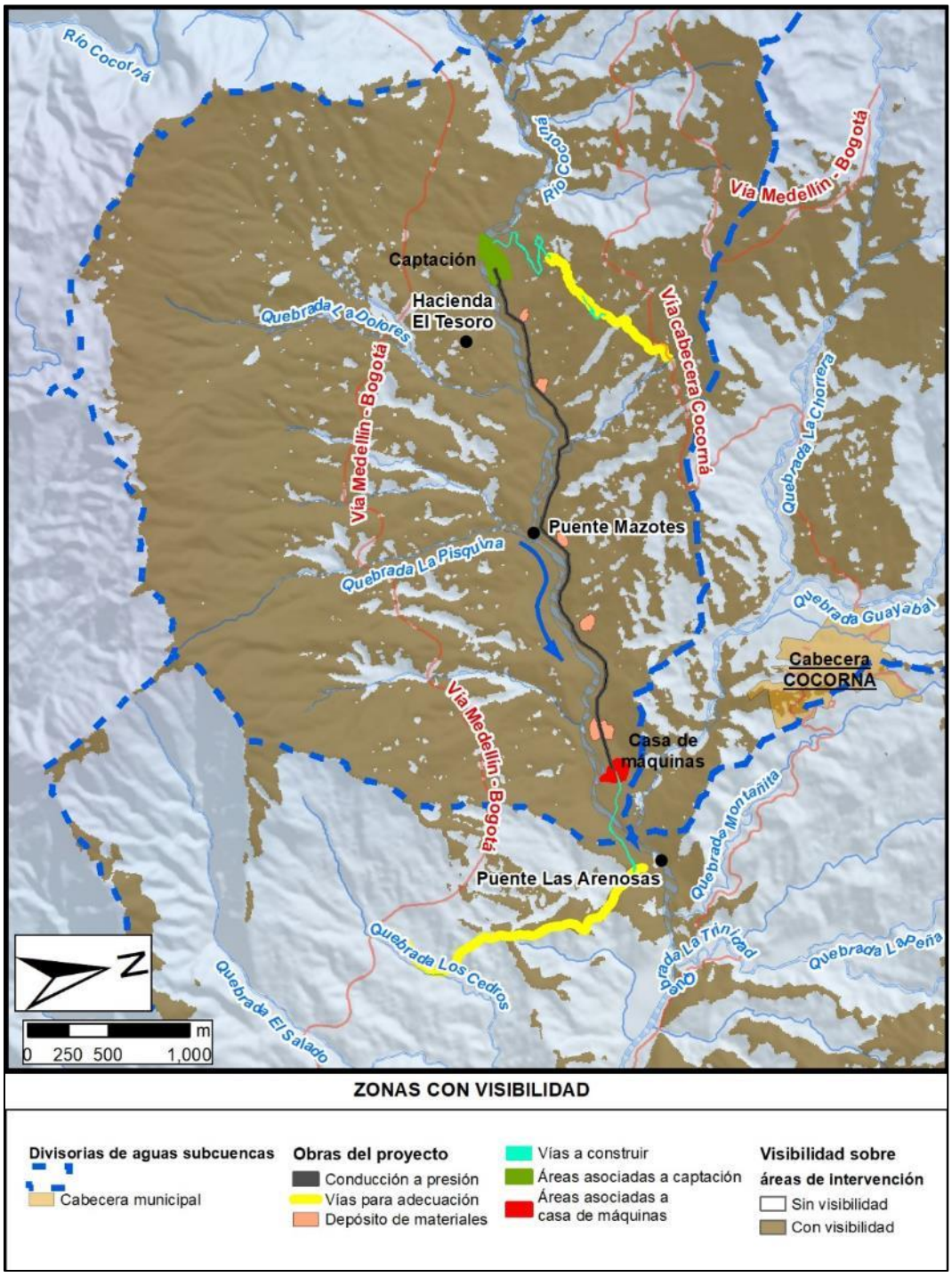


Figura 5-196 Zonas con visibilidad

El amplio territorio definido en esta primera aproximación será acotado de acuerdo a criterios que permitan estimar rangos de distancia dentro de los cuales un observador puede visualizar la ubicación de las obras. De esta forma se aplica el concepto de alcance visual, con el fin de que la amplia extensión del área de la cuenca media del río Cocorná en el tramo de intervención, pueda clasificarse de acuerdo con la efectividad para un observador de visualizar en mayor o menor detalle las zonas intervenidas.

El alcance, plano o escala visual, representa el grado de detalle con el que un observador es capaz de visualizar un objeto según la distancia a la que se encuentra del mismo. La evaluación de este concepto se realiza en el presente estudio por medio de la adaptación de los criterios de STEINITZ (1979) y VAN DER HAM (DE VEER Y BURROUGH, 1978) de la siguiente forma:

Tabla 5-59. Rangos de escala visual

Rango de distanciamiento a obras	Plano visual /Escala visual
0 – 200 m	Plano inmediato
200 – 500m	Primer plano (hasta este rango los objetos visibles se consideran intraoculares).
500 – 800m	Plano intermedio
800 – 1200m	Plano lejano.
1200 - 3000	Plano extraocular (>1200m)

La superposición de la cuenca visual y las zonas de alcance visual en la Figura 5-197, permiten una identificación de las zonas a incluir en el área de análisis para el componente paisaje. La delimitación de dicha área integra tanto la divisoria de aguas del río Cocorná en su margen derecha sobre el tramo intervenido como la divisoria del afluente quebrada Los Cedros. En el caso de la margen izquierda se presenta como limitante natural la divisoria de aguas del río Cocorná, esta vez hasta el tramo de la cuenca baja del afluente La Chorrera

De esta forma, tenemos los elementos necesarios para la delimitación del área o territorio visual para el análisis del componente ambiental paisaje entorno al Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III mediante la combinación de las barreras naturales derivados del análisis del factor relieve (divisorias de agua) y los criterios de alcance visual (ver Figura 5-198).

Es importante confirmar que este territorio o cuenca visual acotado con los criterios mencionados configura el área de influencia para el componente de paisaje dentro del presente estudio con una extensión de 1.438 ha. Esta espacio presenta un carácter de sobre estimación de áreas de posible visualización; la validez de esta afirmación se basa en que la determinación se realiza en un marco desfavorable, toda

vez que, la información tomada como punto de partida es la representación del relieve mediante un modelo de elevación digital de terreno que no considera la presencia de edificaciones, cercamientos, vegetación presente entre otras barreras visuales de posibles observadores hacia las áreas intervenidas por el proyecto.

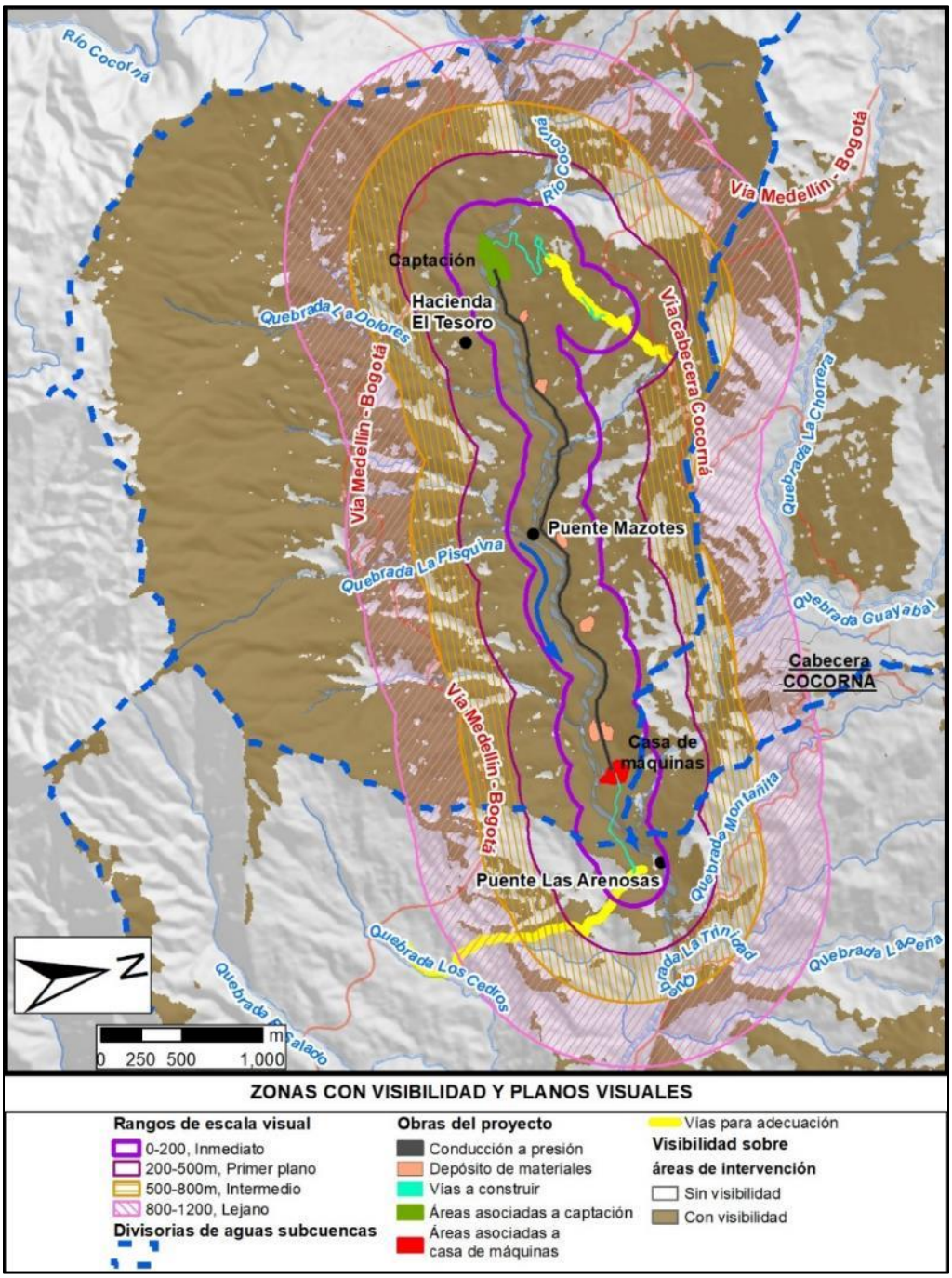


Figura 5-197 Zonas de alcance o escala visual

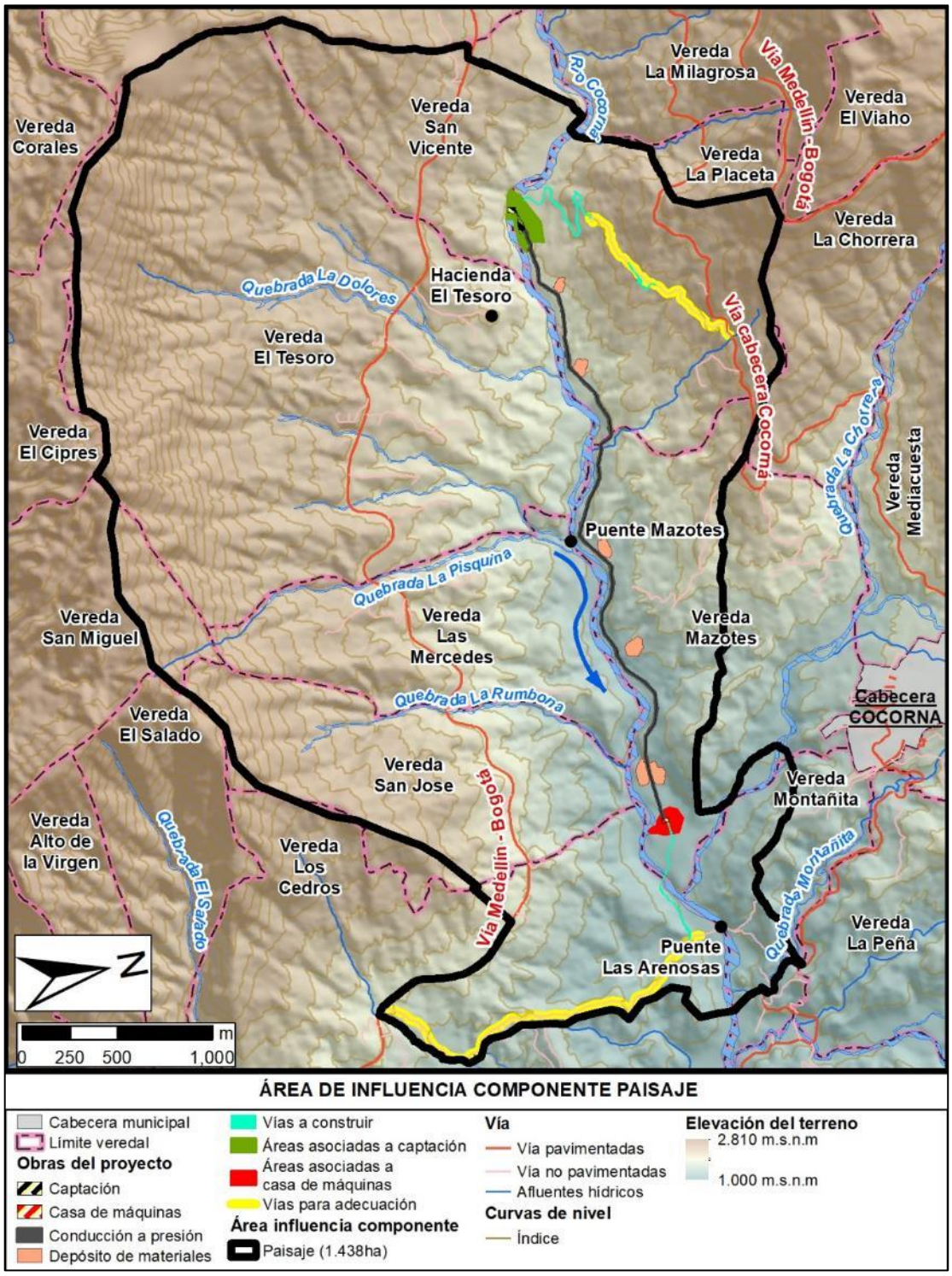


Figura 5-198. Territorio visual y área de influencia componente paisaje

5.1.6.2 Unidades del paisaje

Para la caracterización del componente Paisaje se hace necesario la definición de unidades mínimas de análisis como subdivisión del territorio visual presentado en el apartado anterior. Bajo el enfoque de los lineamientos metodológicos del paisaje total (ver Capítulo “Generalidades” de este EIA, numeral “Metodología”), se tiene como punto de partida la combinación de factores integrantes del medio ambiente como la pendiente, el relieve y las coberturas, entre otros, que sintetizan el resultado de las acciones naturales y antrópicas en la conformación del paisaje.

Los factores que se tuvieron en cuenta son analizados en el contexto característico de la ubicación de las áreas intervenidas por el proyecto en la cuenca media del río Cocorná. Las combinaciones de las expresiones y tipologías de dichos factores dentro de la extensión del territorio estudiado, posibilitan la definición de unidades diferenciales y repetitivas que se analizaran posteriormente.

Como factores para la definición de las unidades del paisaje se incluye la pendiente del terreno (Figura 5-199), la relieve relativo (Figura 5-200), los ecosistemas terrestres (Figura 5-202) y las coberturas de la tierra (Figura 5-201), descritos a continuación entorno a categorías o rangos cuantificados dentro del área de influencia del componente Paisaje de forma correspondiente en las tablas Tabla 5-60, Tabla 5-61, Tabla 5-62 y Tabla 5-63.

Tabla 5-60. Cuantificación clases Factor Pendientes del Terreno

Rango Pendientes	Tipo de inclinación	Área [ha]	Porcentaje [%]
< 12%	Plana a moderadamente inclinada	70,53	4,9%
12 - 25%	Fuertemente inclinada	161,85	11,3%
25 - 75%	Moderadamente empinada a abrupta	1028,52	71,5%
> 75%	Escarpada	177,34	12,3%
Total		**1438,23**	**100,0%**

Tabla 5-61. Cuantificación clases Factor Relieve Relativo

Rango Relieve relativo	Tipo de inclinación	Área [ha]	Porcentaje [%]
> 500m	Contraste de relieve Extremadamente alto	204,37	14,2%
250 – 500m	Contraste de relieve Muy alto	618,00	43,0%
150 – 250m	Contraste de relieve Alto	547,81	38,1%
75 – 150m	Contraste de relieve Moderado	68,04	4,7%
Total		**1438,23**	**100,00%**

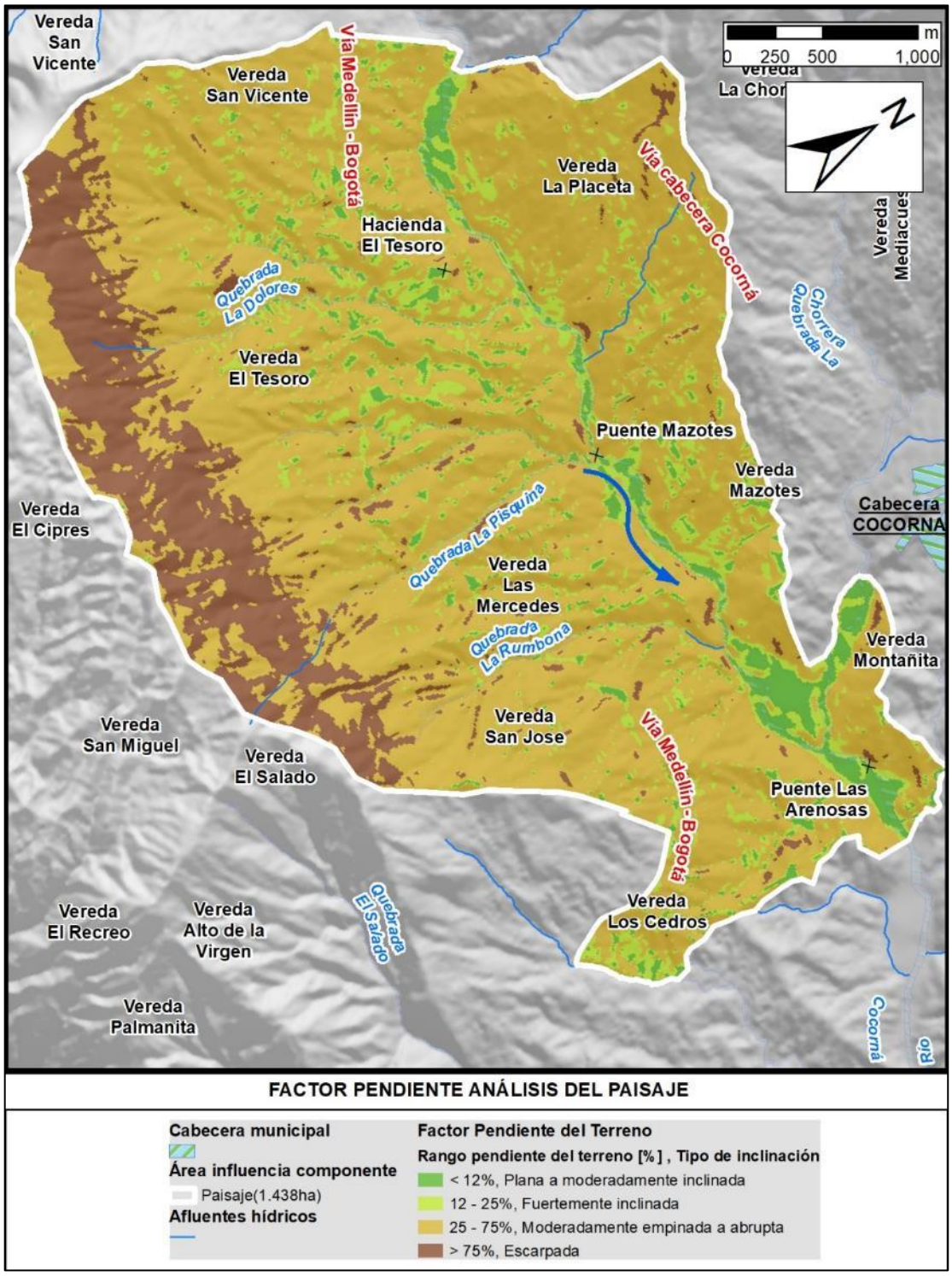
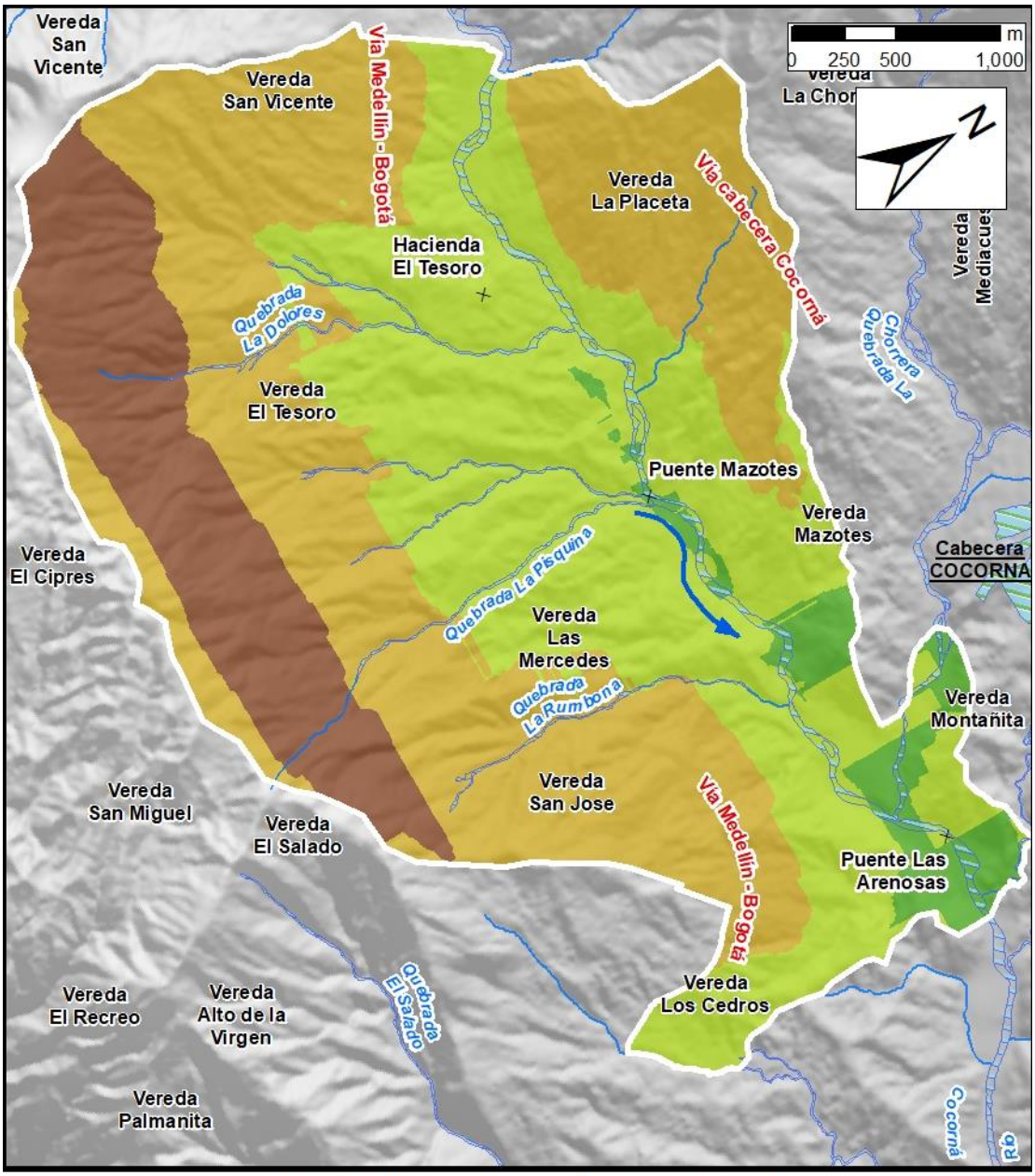


Figura 5-199 Distribución espacial Factor Pendiente del Terreno



FACTOR ALTURA RELATIVA ANÁLISIS DEL PAISAJE

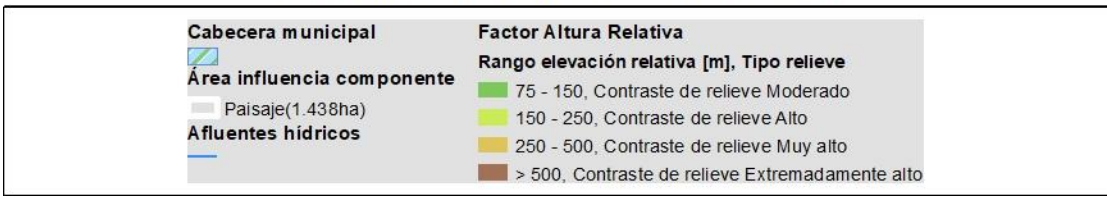


Figura 5-200 Distribución espacial Factor Relieve relativo

Comparativamente entre los factores altura relativa, ecosistemas naturales, pendiente del terreno y coberturas terrestres; los dos últimos se identifican como rasgo característico para denotar las unidades del paisaje.

Los factores ecosistemas y altura relativa son integrados como elementos secundarios respecto a los de pendientes y coberturas del terreno. Esta aseveración se soporta en que para el área de análisis la definición de los aspectos de ecosistemas y altura relativa corresponden a productos de información secundaria con escala de representación general (1:100.000) y de patrones espaciales cuasi regulares para el área de análisis respectivamente. Con esto no se busca descartar esta información, sino resaltar que está un peldaño por debajo en relevancia de los factores que serán analizados en detalle durante el desarrollo de este apartado.

Adicionalmente los criterios mencionados buscan reducir el número de unidades definidas permitiendo con esto el rastreo de sus patrones espaciales en el territorio de análisis mientras se amplía la descripción de los aspectos derivados de los factores que las conforman

Tabla 5-62. Cuantificación clases Coberturas del terreno

Rango Pendientes	Área [ha]	Porcentaje [%]
Bosques y Áreas Seminaturales	450,52	31,32%
Superficies de Agua	25,45	1,77%
Territorios Agrícolas	946,92	65,84%
Territorios Artificializados	15,34	1,07%
Total	**1.438,23**	**100,00%**

Tabla 5-63. Cuantificación clases Factor Ecosistemas Terrestres

Rango Pendientes	Área [ha]	Porcentaje [%]
Hidrobioma Nechí-San Lucas	81,99	5,70%
Orobioma Andino Nechí-San Lucas	127,94	8,90%
Orobioma Subandino Cordillera central	138,72	9,65%
Orobioma Subandino Nechí-San Lucas	1089,58	75,76%
Total	**1438,23**	**100,00%**

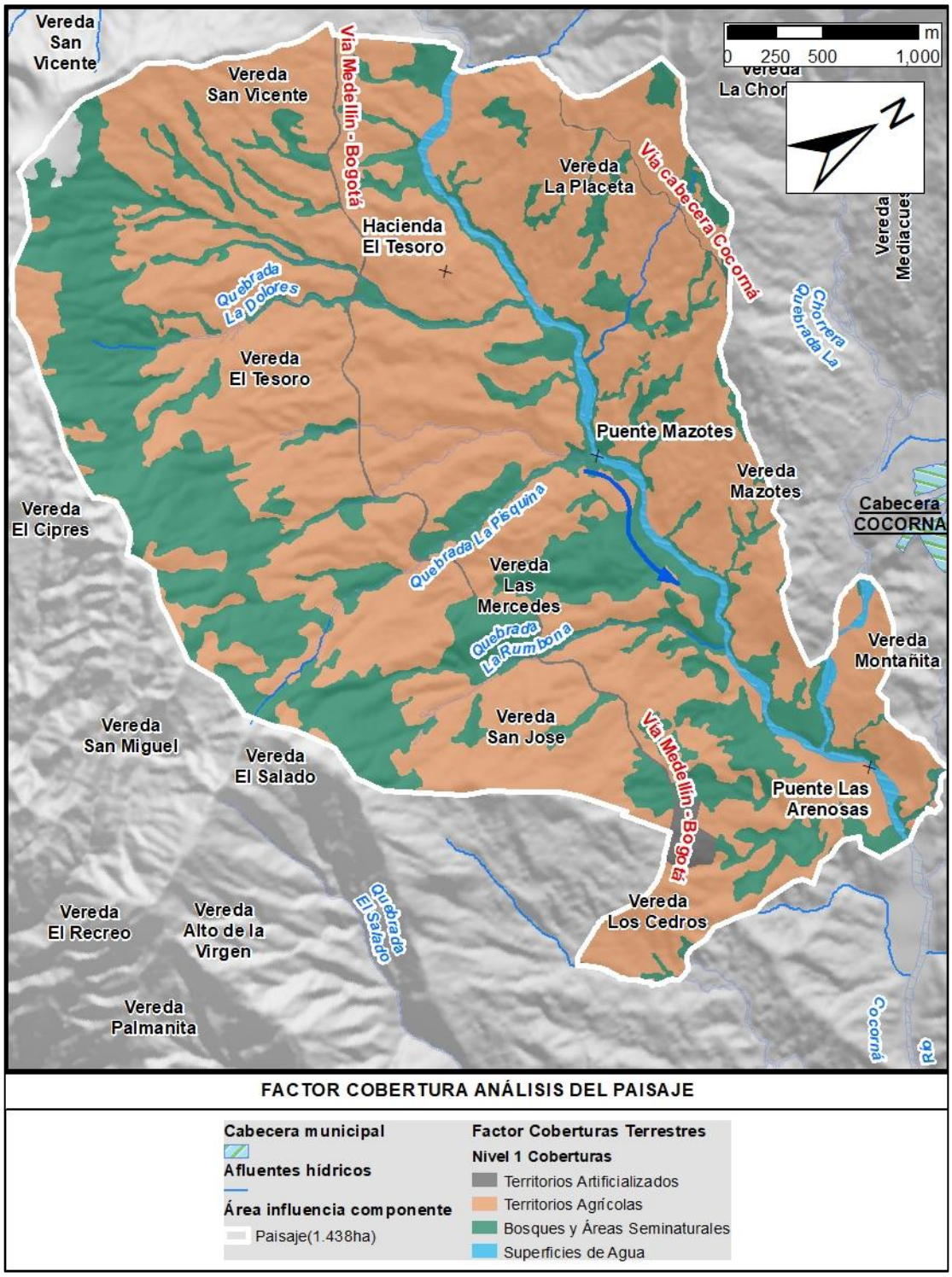
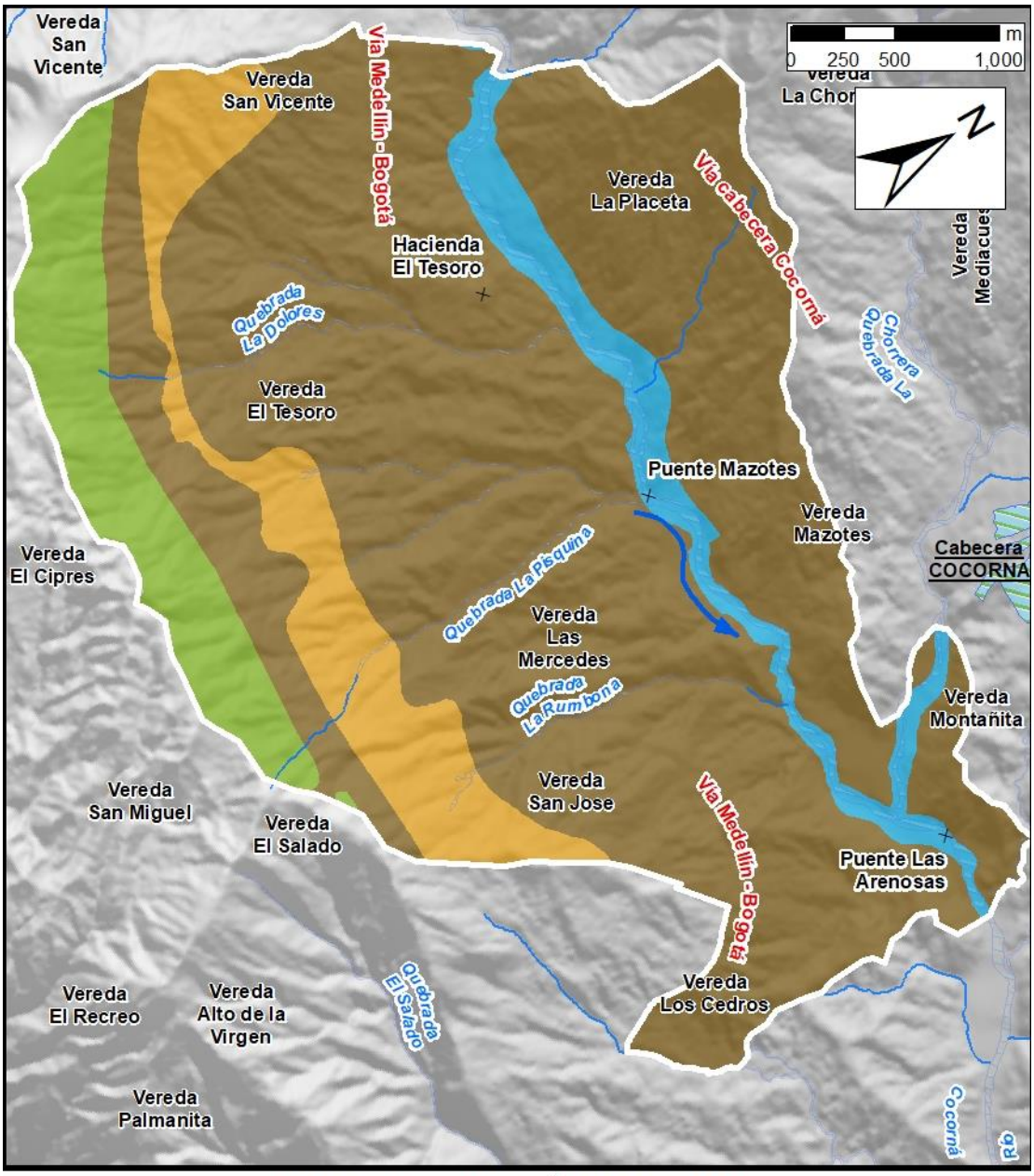


Figura 5-201 Factor Coberturas de la Tierra



FACTOR ECOSITEMAS ANÁLISIS DEL PAISAJE

Cabecera municipal	**Factor Ecosistemas Terrestres**
Afluentes hídricos	Hidrobioma Nechí-San Lucas
Área influencia componente	Orobioma Andino Nechí-San Lucas
Paisaje(1.438ha)	Orobioma Subandino Cordillera central
	Orobioma Subandino Nechí-San Lucas

Figura 5-202 Factor Ecosistemas Terrestres

Abordamos entonces la delimitación de las unidades del paisaje mediante la combinación de las categorías de pendientes del terreno y coberturas terrestres. Como resultado se obtienen 13 unidades listadas en la Tabla 5-64 y representadas en su expresión espacial en la Figura. Se denota que se referencian en una única categoría las coberturas asociadas a superficies de agua

Tabla 5-64. Unidades del Paisaje

Cod	Unidad de Paisaje	Área [ha]	Porcentaje [%]
UND 1	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Escarpada	142,84	9,93%
UND 2	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	35,43	2,46%
UND 3	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	257,10	17,88%
UND 4	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	15,15	1,05%
UND 5	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Escarpada	34,49	2,40%
UND 6	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	114,77	7,98%
UND 7	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	758,82	52,76%
UND 8	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	38,84	2,70%
UND 9	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Escarpada	0,00	0,00%
UND 10	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	3,51	0,24%
UND 11	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	10,64	0,74%
UND 12	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	1,18	0,08%
UND 13	Superficies de Agua	25,45	1,77%
Total		**1.438,23**	**100,00%**

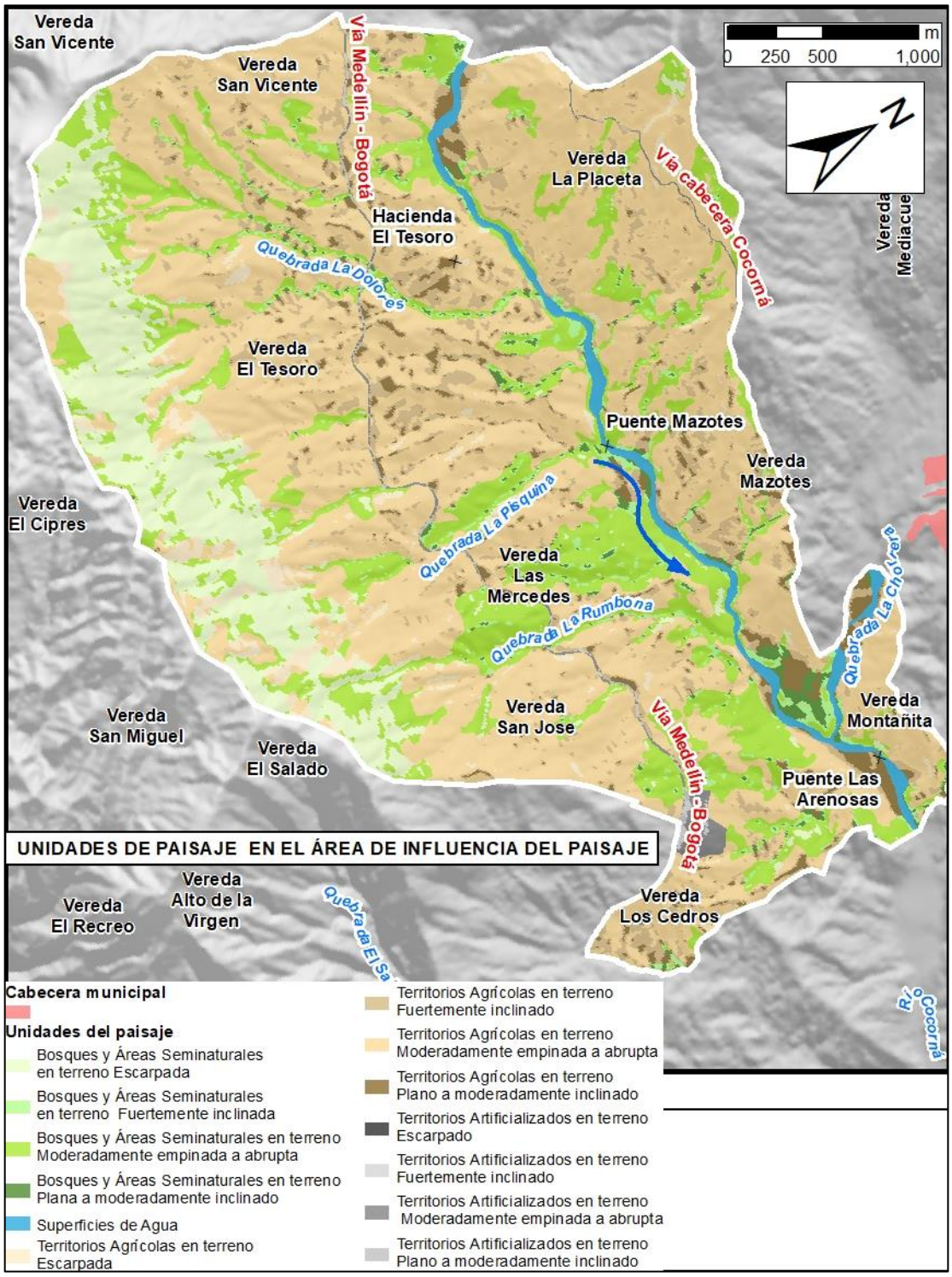


Figura 5-203 Unidades de paisaje en el área de influencia del paisaje

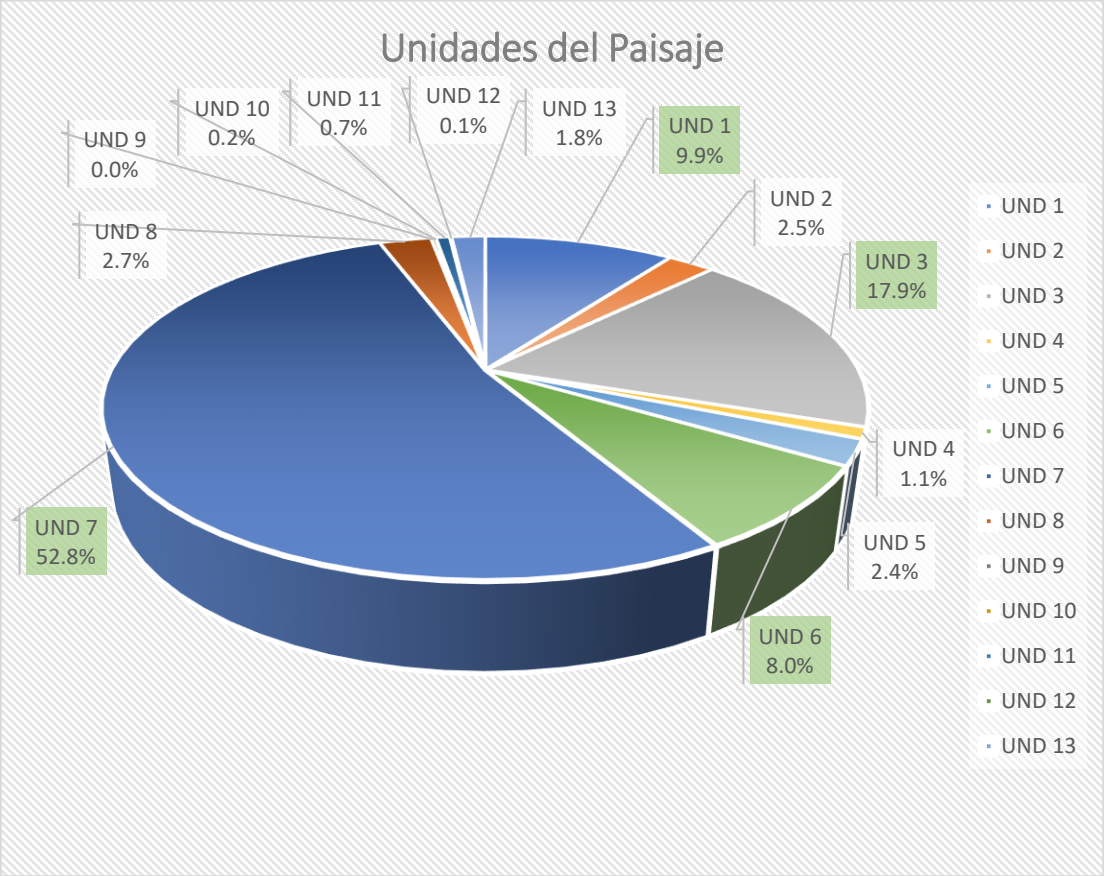


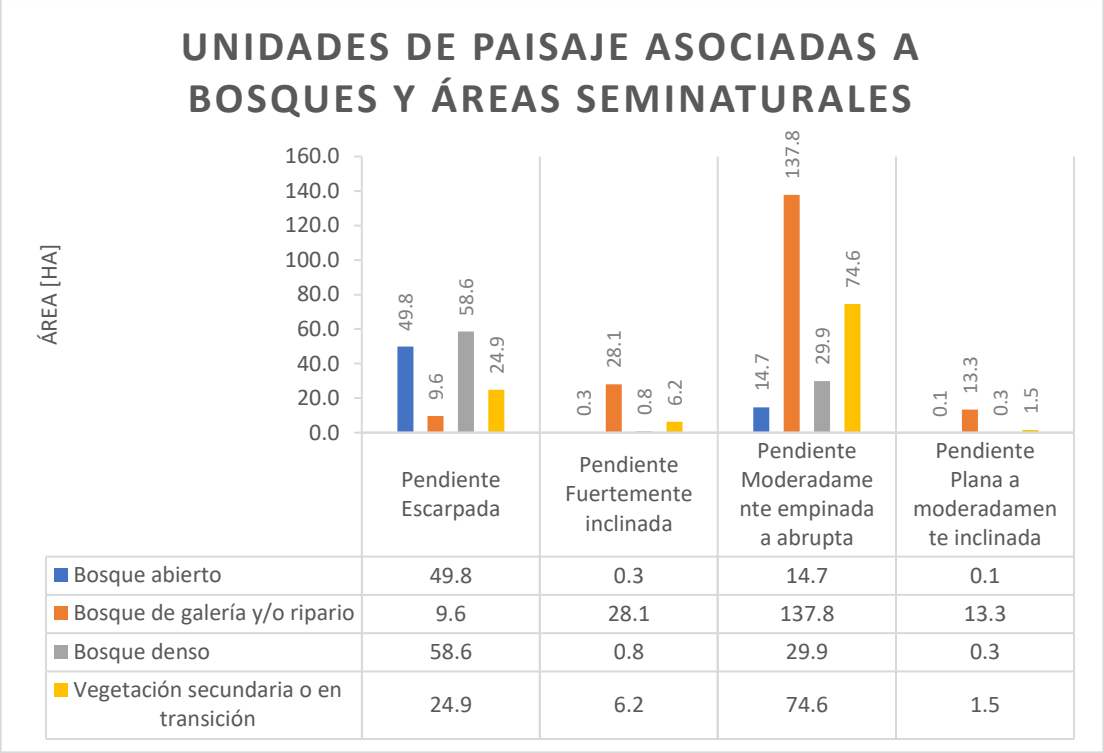
Figura 5-204 Distribución espacial Unidades de Paisaje

La cuantificación de las extensiones ocupadas por las unidades de paisaje definidas, nos permite evidenciar mediante la Figura 5-204 que el 88,55% del área de influencia para el componente paisaje está distribuida en 4 unidades, de mayor a menor área identificamos; Territorios Agrícolas en pendientes del terreno moderadamente inclinada (52,8% - 758,82ha) seguido por Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta (17,9% - 257,10ha), Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Escarpada (9,9% - 142,84ha) y por ultimo Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Fuertemente inclinada (8,0% - 114,77ha).

El factor pendiente caracteriza para la zona la intensidad de las actividades humanas; correspondiendo con una menor intensidad en el rango de pendiente escarpada. Las coberturas por otro lado expresan la extensión tanto, de los rasgos naturales en los grupos de bosques y superficies de agua; como de las áreas antrópicas encontradas en los territorios agrícolas y artificializados.

La descripción en detalle de las coberturas, separadas en los rasgos naturales y antrópicos permite resaltar como es la conformación del paisaje en la zona analizada.

De acuerdo con las denominaciones presentes en el nivel tres de la clasificación Corine Land Cover adaptada para Colombia, en el área de influencia del componente paisaje, los bosques y áreas seminaturales tienen presencia de bosques densos, abiertos y de galería o ríparios, así como vegetación secundaria y en transición, tal como se aprecia en la Figura 5-205 y Figura 5-206.



	Pendiente Escarpada	Pendiente Fuertemente inclinada	Pendiente Moderadamente empinada a abrupta	Pendiente Plana a moderadamente inclinada
Bosque abierto	49.8	0.3	14.7	0.1
Bosque de galería y/o ripario	9.6	28.1	137.8	13.3
Bosque denso	58.6	0.8	29.9	0.3
Vegetación secundaria o en transición	24.9	6.2	74.6	1.5

Figura 5-205 Distribución coberturas de bosques y áreas seminaturales por rango de pendientes del terreno

Si tenemos en cuenta que las coberturas de bosques y áreas seminaturales representan 450,5ha del área de influencia (1438.2ha), lo cual, corresponde a un 31% aproximadamente, podemos observar en la Figura 5-205 como varían estas coberturas de acuerdo con los diferentes rangos de pendientes del terreno ya mencionados.

Podemos realizar algunas aseveraciones a partir de los datos presentados. Las áreas boscosas y seminaturales tienen poca presencia en las zonas planas en comparación con las zonas moderadamente empinada. Las clases de bosques denso y abierto tienen mayor presencia en el rango de pendiente escarpada, mientras que el rango de moderadamente empinada a abrupta aloja la mayor porción de bosques riparios y vegetación secundaría.

Para las unidades de paisaje asociadas a bosques y áreas seminaturales se presenta un panorama de áreas conservadas en las pendientes más empinadas que se

conectan con el río Cocorná mediante corredores de vegetación ripiara y algunos parches de vegetación secundaria y en transición como se observa en la Figura 5-206.

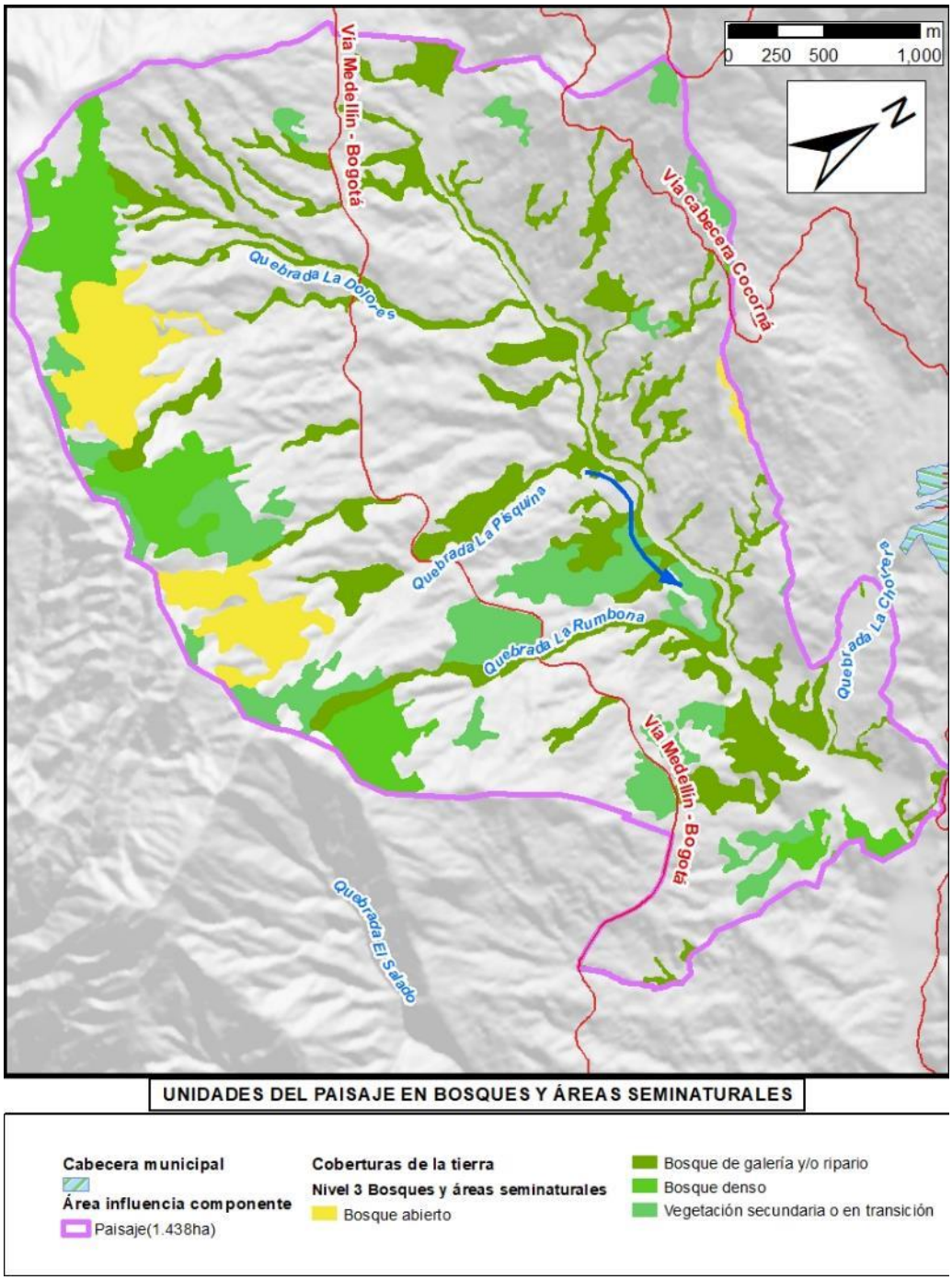
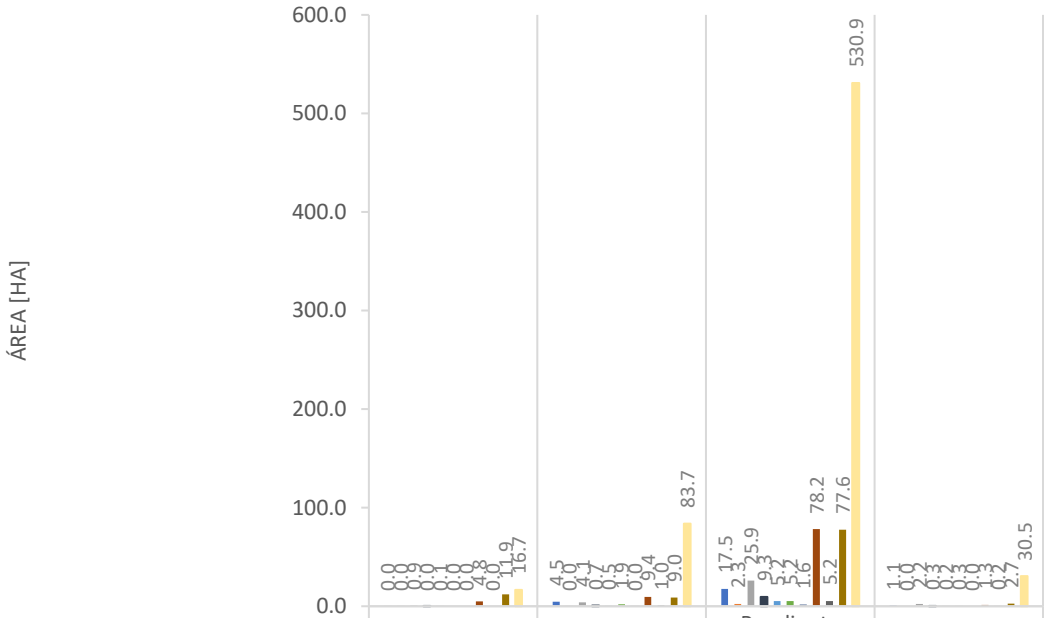


Figura 5-206 Unidades de paisaje asociadas a bosques y áreas seminaturales nivel 3 Coriene Land Cover

En el caso de las coberturas asociadas a territorios agrícolas, estas presentan la mayor extensión como grupos de coberturas (66,8%) que asciende a 946,9 ha de las 1438,2ha que conforman el área analizada. También se resalta que de las once (11) categorías de coberturas listadas en la Figura 5-207 y derivadas de las denominaciones del nivel tres del Corine Land Cover adaptado para Colombia, domine la presencia de pastos limpios para los diferentes rangos de pendientes. La distribución espacial para este conjunto de coberturas esquematizadas en la Figura 5-208, muestra la relación de las intervenciones antrópicas en la configuración de los elementos dominantes del paisaje para el área analizada, en medio de una configuración de relieve con predominancia de pendientes fuertes.

El ultimo conjunto de coberturas agrupa las unidades asociadas a superficies de agua y territorios artificializados, en donde se resaltan las infraestructuras viales de principal orden con trazados cuasi paralelos al afluente del Río Cocorná con presencia de algunas construcciones rurales (Figura 5-210). En la Figura 5-209 con 40,8ha de extensión en los diferentes rangos de pendientes, el río Cocorná, configura el principal atractivo de las zonas planas, mientras que la infraestructura vial y de construcciones segmentan la continuidad ascendente de las coberturas menos artificiales en las pendientes moderadas.



	Pendiente Escarpada	Pendiente Fuertemente inclinada	Pendiente Moderadamente empinada a abrupta	Pendiente Plana a moderadamente inclinada
Cultivos permanentes arbóreos	0.0	4.5	17.5	1.1
Cultivos permanentes arbustivos	0.0	0.0	2.3	0.0
Cultivos permanentes herbáceos	0.9	4.1	25.9	2.2
Mosaico de cultivos	0.0	0.7	9.3	0.3
Mosaico de cultivos y espacios naturales	0.1	0.5	5.2	0.2
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.0	1.9	5.2	0.3
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.0	0.0	1.6	0.0
Mosaico de pastos y cultivos	4.8	9.4	78.2	1.3
Pastos arbolados	0.0	1.0	5.2	0.2
Pastos enmalezados	11.9	9.0	77.6	2.7
Pastos limpios	16.7	83.7	530.9	30.5

Figura 5-207 Distribución coberturas de territorios agrícolas por rango de pendientes del terreno

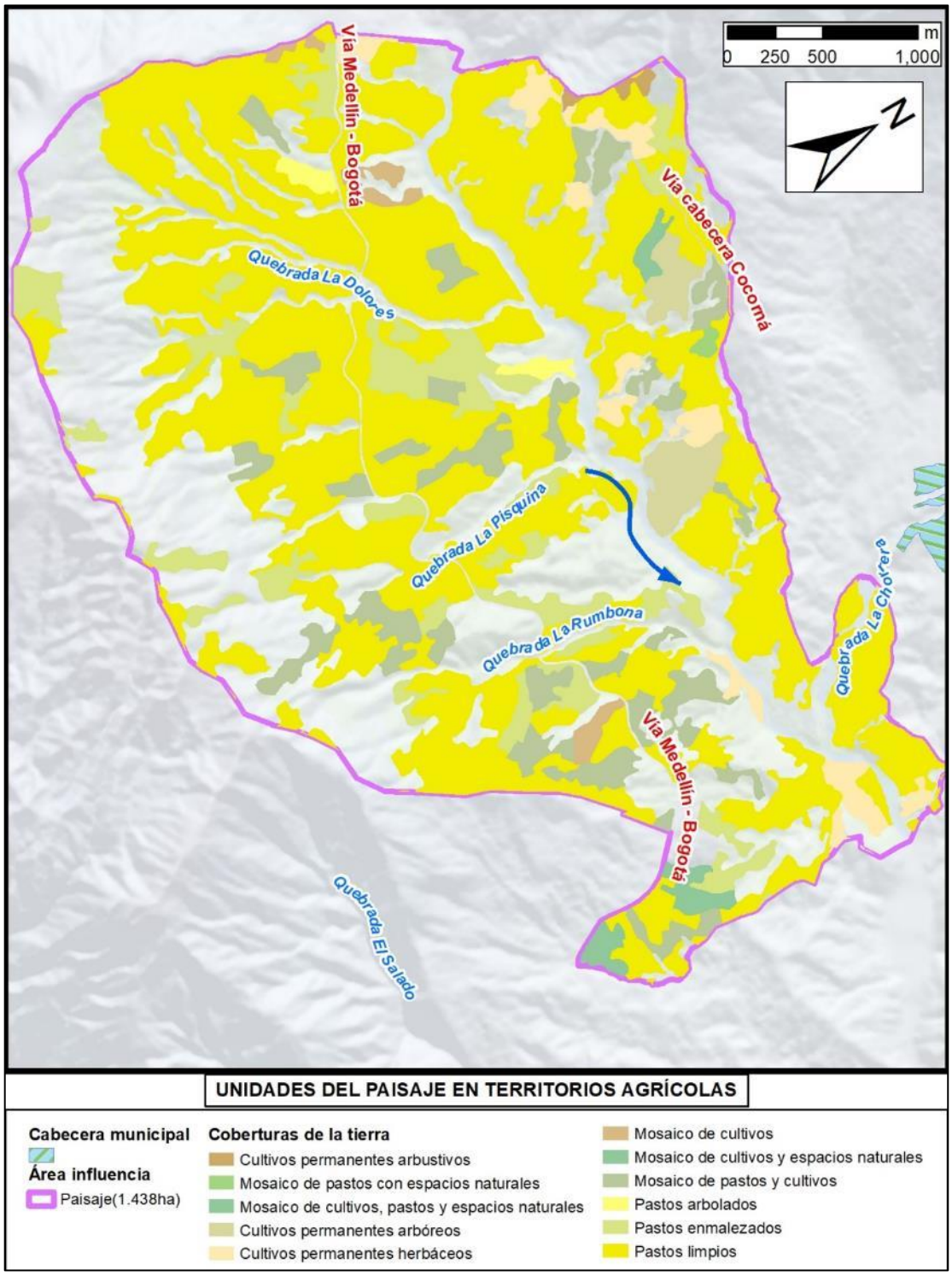


Figura 5-208 Unidades de paisaje asociadas a territorios agrícolas nivel 3 Coriene Land Cover

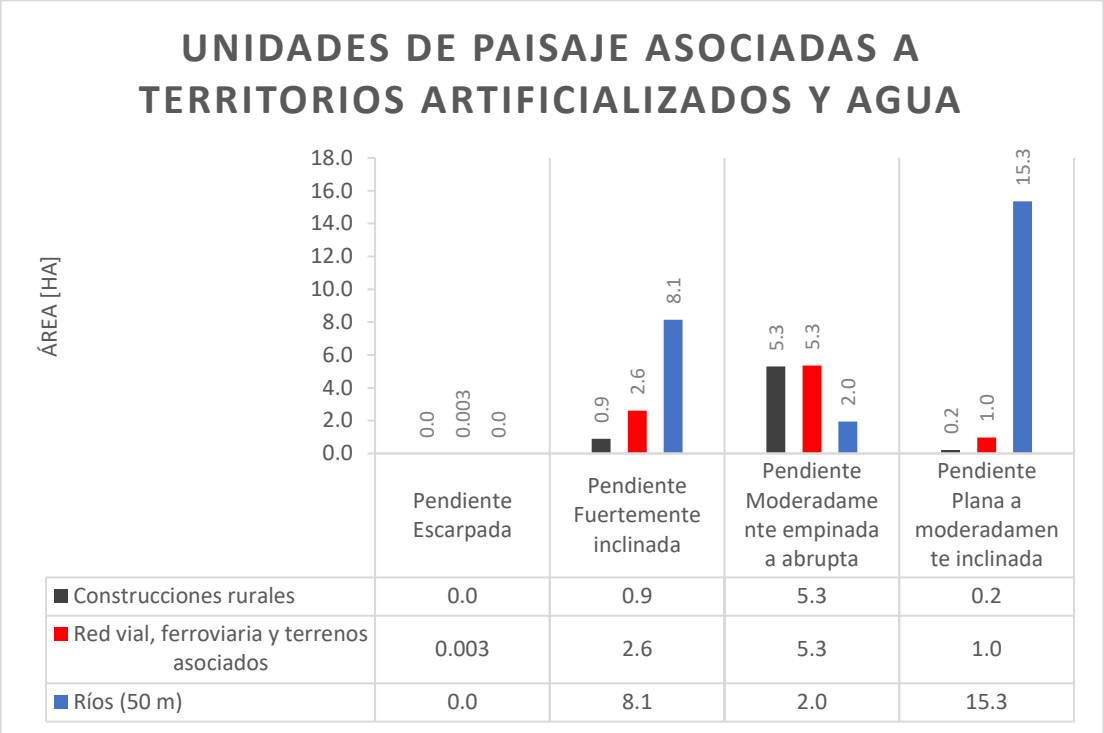


Figura 5-209 Distribución coberturas de territorios artificiales y superficies de agua por rango de pendientes del terreno

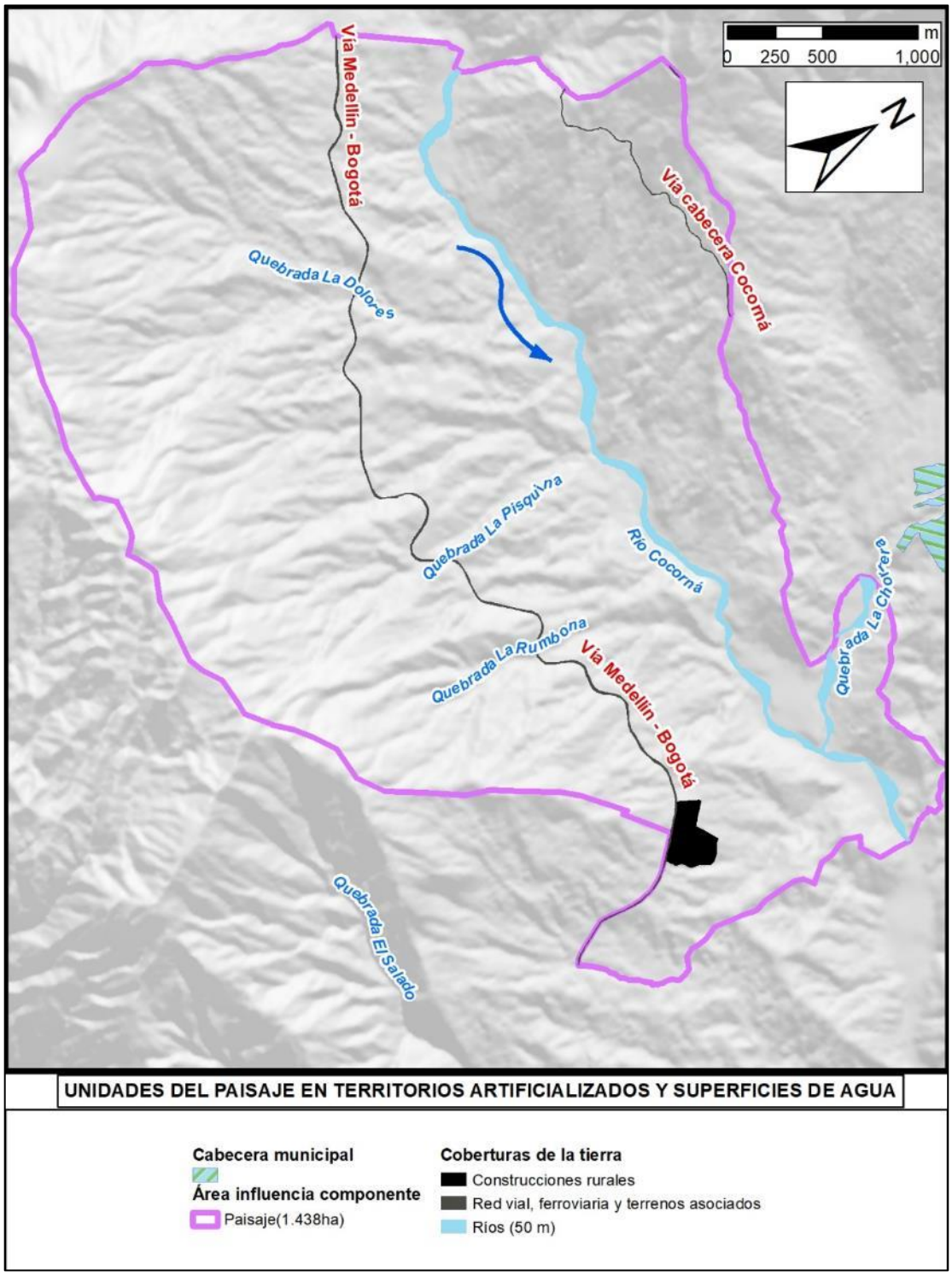


Figura 5-210 Unidades de paisaje asociadas a territorios artificiales y superficies de agua nivel 3 Coriene Land Cover

5.1.6.3 Calidad Visual

La calidad visual se integra como el calificativo mediante el cual se asigna un valor estético a cada una de las unidades del paisaje determinadas en el apartado anterior. Para la evaluación de la calidad visual de las unidades de paisaje definidas para el Proyecto Hidroeléctrico Cocorná III se utiliza el procedimiento planteado por el Bureau of Land Management o BLM (1989).

Aplicando la valoración para cada unidad del paisaje sobre los aspectos referentes a morfología, vegetación, agua, color, vista escénica, rareza, modificaciones y actuaciones humanas (ver Tabla 5-66), se asignan mediante sumatorias una de las tres clases posibles a cada unidad de paisaje de acuerdo con la Tabla 5-65.

Tabla 5-65. Clases de calidad visual BLM (1989)

Clase	Descripción
Clase A	Áreas que reúnen características excepcionales, para cada aspecto considerado (de 19 a 33 puntos)
Clase B	Áreas que reúnen una mezcla de características excepcionales para algunos aspectos y comunes para otros (de 12 a 18 puntos).
Clase C	Áreas con características y rasgos comunes en la región fisiográfica considerada (de 0 a 11 puntos)

La calificación de la calidad visual de cada una de las unidades de paisaje evaluadas y que fueron presentadas en la Tabla 5-64, se detalla en la Figura 5-211. En la Tabla 5-67 se encuentran las clases de calidad visual obtenidas con sus porcentajes de participación en el área de influencia del componente Paisaje.

Tabla 5-66. Evaluación de la calidad visual mediante el método BLM para las unidades de paisaje

Cod	Unidad de Paisaje	Morfología	Vegetación	Agua	Color	Fondo Escénico	Rareza	Acciones Humanas	Calificativo	Categoría
UND 1	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Escarpada	5	5	1	5	5	2	2	**25**	**Clase A**
UND 2	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	3	5	3	5	5	2	2	**25**	**Clase A**

Cod	Unidad de Paisaje	Morfología	Vegetación	Agua	Color	Fondo Escénico	Rareza	Acciones Humanas	Calificativo	Categoría
UND 3	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	3	5	3	5	5	2	2	**25**	**Clase A**
UND 4	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	1	5	3	5	5	2	2	**23**	**Clase A**
UND 5	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Escarpada	5	3	1	1	5	2	0	**17**	**Clase B**
UND 6	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	3	3	1	1	5	2	0	**15**	**Clase B**
UND 7	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	3	3	1	3	3	2	0	**15**	**Clase B**
UND 8	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	3	3	1	5	3	2	0	**17**	**Clase B**
UND 9	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Escarpada	3	1	1	1	3	1		**10**	**Clase C**
UND 10	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	3	1	1	1	3	1		**10**	**Clase C**
UND 11	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	3	1	1	1	3	1		**10**	**Clase C**
UND 12	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	3	1	1	1	3	1		**10**	**Clase C**
UND 13	Superficies de Agua	1	1	5	5	5	5	2	**24**	**Clase A**

Durante la calificación, el conjunto de profesionales responsables del análisis asumió la postura de exaltar las unidades del paisaje con coberturas de origen tanto boscoso y seminatural como las superficies de agua sobre las demás y de asignar a las coberturas de origen más antrópico calificativos bajos de calidad visual. Los resultados de distribución espacial mostrados en la Figura 5-211 y la extensión de cada una de las clases en la Tabla 5-67 representan la tendencia de dichos preceptos dando como resultado mayores calificativos de calidad visual en las unidades de superficie de agua y asociadas a bosques. Mientras que a las unidades de paisaje asociadas a territorios agrícolas y artificializados se les asignan clases intermedias y bajas correspondientemente.

Tabla 5-67. Cuantificación clases calidad visual

Clase	Categoría	Área [ha]	Porcentaje [%]
Clase C	Baja	15,34	1,1%
Clase B	Media	946,92	65,8%
Clase A	Alta	475,96	33,1%
Total		**1.438,23**	**100,00%**

La determinación de la calidad visual para la zona en estudio resalta el valor estético para las áreas con presencia de coberturas boscosas desde las zonas más escarpadas discurriendo entre parches de vegetación secundaría y vegetación riparia hacia las zonas planas en donde el máximo atractivo lo presenta el afluente principal río Cocorná.

Los elementos de alto valor visual en la concepción de este análisis se muestran inmersos en una matriz de territorios agrícolas (66%) de calidad media que se abren paso en virtud de aprovechamientos productivos extensos en comparación con las infraestructuras viales y habitacionales (1%).

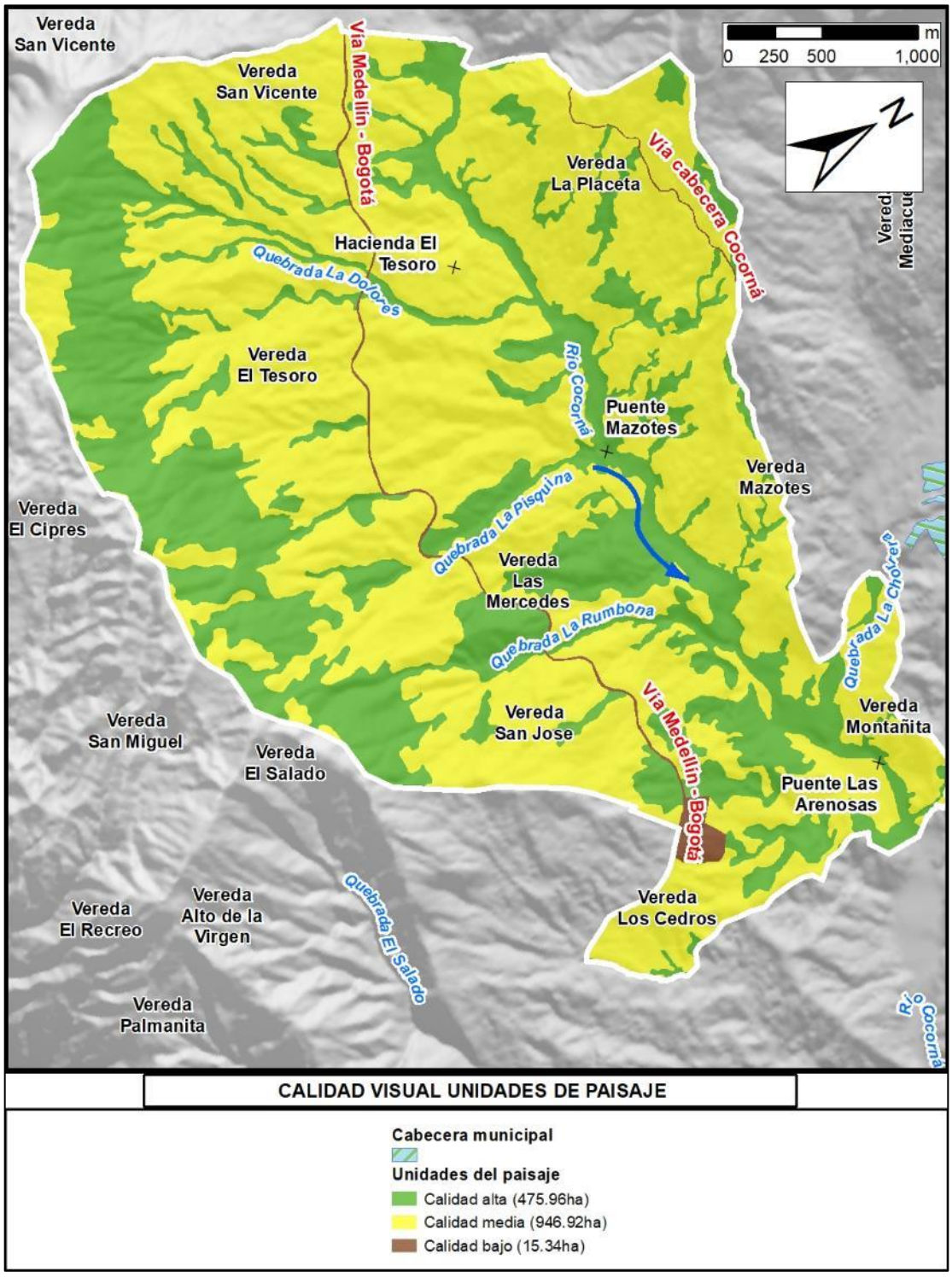


Figura 5-211 Calidad visual unidades del paisaje

5.1.6.4 Fragilidad Visual

Para las unidades de paisaje es posible evaluar la sensibilidad ante la incidencia de actuaciones sobre las mismas. La estimación de la fragilidad visual se aborda de manera indirecta a partir del cálculo de su antípoda como lo es la capacidad de absorción visual. Mediante este último se representa la capacidad de las unidades de paisaje para absorber visualmente las modificaciones o alteraciones sin detrimento de su calidad visual.

De lo anterior se puede inferir que en una unidad de paisaje a mayor fragilidad visual corresponde una menor capacidad de absorción y viceversa. La capacidad de absorción visual (CAV) se evalúa con el uso de la expresión de Yeomans 1986 (ver Ecuación 5-1) mediante la combinación de los parámetros biofísicos listados en la Tabla 5-68.

Ecuación 5-1. Capacidad de absorción visual (Yeomans 1986)

$$CAV = S \times (E + R + D + C + V)$$

Tabla 5-68. Factores biofísicos (Yeomans 1986)

Factor biofísico	Descripción
S	Pendiente. A mayor S menor CAV
E	Erosionabilidad. A mayor E, menor CAV
R	Capacidad de regeneración de la vegetación. A mayor R mayor CAV
D	Diversidad de la vegetación. A mayor D mayor CAV
C	Contraste color de suelo y roca. A mayor C mayor CAV
V	Contraste suelo – vegetación. A mayor V mayor CAV

Evaluada la expresión para el cálculo de la capacidad de absorción visual para cada unidad del paisaje, se asignará una clase cualitativa del mismo en función del valor obtenido de acuerdo con la Tabla 5-69.

Tabla 5-69. Clases de fragilidad visual (adaptado de Yeomans, 1986)

Clase	Rango
Alta	25 - 45
Media	15 - 25
Baja	0 - 15

La calificación de cada uno de los parámetros considerados en el análisis de la fragilidad visual para las unidades de paisaje estudiadas, se presenta en la Tabla 5-70.

Tabla 5-70. Evaluación de la fragilidad visual mediante el método BLM para las unidades de paisaje

Cod	Unidad de Paisaje	(P)	(D)	(E)	(V)	(R)	(C)	Calificativo Capacidad Absorción	Categoría Capacidad Absorción	Categoría Fragilidad Visual
1	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Escarpada	1	3	2	3	3	3	14	Bajo	Alto
2	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	2	3	2	3	3	3	28	Alto	Bajo
3	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	2	3	2	3	3	3	28	Alto	Bajo
4	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	3	3	3	3	2	3	42	Alto	Bajo
5	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Escarpada	1	2	1	1	2	2	8	Bajo	Alto
6	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	2	2	1	1	2	2	16	Moderado	Moderado
7	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	2	2	2	2	2	2	20	Moderado	Moderado
8	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	3	2	2	2	2	2	30	Alto	Bajo

Cod	Unidad de Paisaje	(P)	(D)	(E)	(V)	(R)	(C)	Calificativo Capacidad Absorción	Categoría Capacidad Absorción	Categoría Fragilidad Visual
9	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Escarpada	1	1	1	3	1	1	7	Bajo	Alto
10	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	2	1	1	3	1	1	14	Bajo	Alto
11	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	2	1	3	3	1	1	18	Moderado	Moderado
12	Territorios Artificializados en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	3	1	3	3	1	1	27	Alto	Bajo
13	Superficies de Agua	1	1	1	3	1	1	7	Bajo	Alto

El área de análisis presenta una dominancia de unidades de paisaje con fragilidad visual media, apreciables en la Tabla 5-71. Cuantificación clases fragilidad visual, en donde el emplazamiento de coberturas de carácter boscosa o seminaturales mejoran las capacidades de absorción visual y por ende disminuyen su fragilidad visual. La distribución espacial presentada en la Figura 5-212 permite resaltar zonas con alta capacidad de absorción visual (fragilidad visual baja) aledañas al cauce del río Cocorná que podrían albergar intervenciones ocultando los efectos viduales sobre de las mismas.

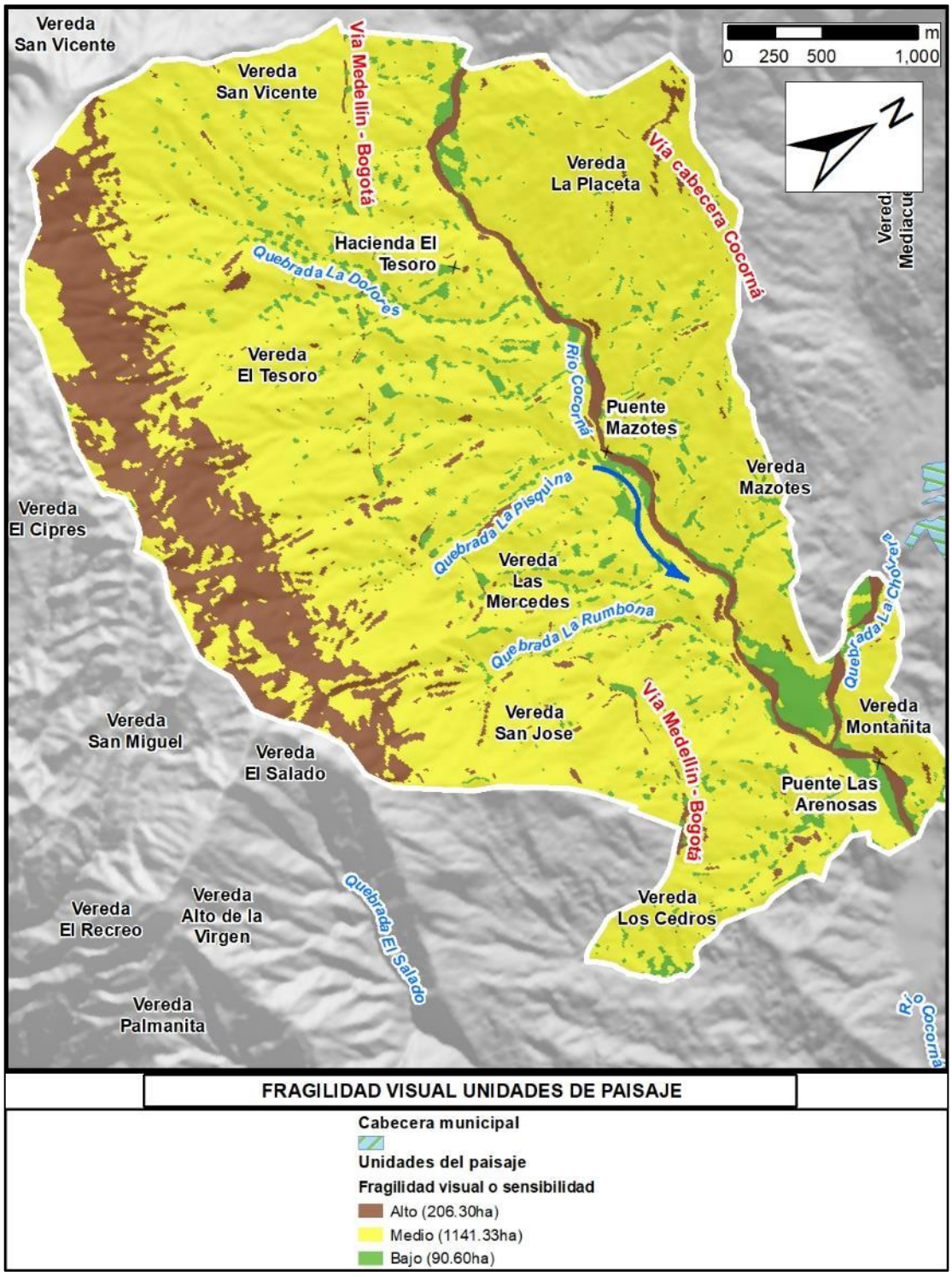


Figura 5-212 Fragilidad visual unidades del paisaje

Tabla 5-71. Cuantificación clases fragilidad visual

Categoría Capacidad Absorción	Categoría Fragilidad Visual	Área [ha]	Porcentaje [%]
Bajo	Alto	90,60	6,3%
Medio	Medio	1141,33	79,4%
Alto	Bajo	206,30	14,3%
Total		**1438,2**	**100,00%**

5.1.6.5 Clasificación visual

Evaluadas tanto la calidad como la fragilidad visual, es posible mediante la combinación de ambos calificativos, para las unidades de paisaje consideradas, asignar un valor paisajístico de los listados en la Tabla 5-72. El valor paisajístico indica cuales son las áreas cuya conservación resulta prioritaria para el disfrute y la promoción del paisaje o por el contrario en cuales se pueden realizar actividades que afecten en mayor medida el paisaje ya que tanto su calidad como su fragilidad visual son bajas.

Tabla 5-72. Clases de valor paisajístico (Ramos et al, 1980)

Clase	Descripción
Clase 1	Zonas de alta calidad y alta fragilidad, cuya conservación resulta prioritaria.
Clase 2	Zonas de alta calidad y baja fragilidad, aptas en principio para la promoción de actividades que requieran calidad paisajística y causen impactos de poca entidad en el paisaje.
Clase 3	Zonas de calidad media o alta y de fragilidad variable, que pueden incorporarse a las anteriores cuando las circunstancias lo aconsejen.
Clase 4	Zonas de calidad baja y de fragilidad media o alta, que pueden incorporarse a la Clase 5 cuando sea preciso.
Clase 5	Zonas de calidad y fragilidad bajas, aptas desde el punto de vista paisajístico para la localización de actividades poco gratas o que causan impactos muy fuertes.

El valor paisajístico se asigna por medio de la matriz representada en la Tabla 5-73 en donde las filas son los cualificativos de la fragilidad visual y las columnas corresponde a la calidad visual. Los valores de clase más bajos indican áreas con capacidades de conservación paisajística más altas, mientras que los valores de clase más altos (clase 4 y 5) indican unidades degradadas con poco interés paisajístico.

Tabla 5-73. Calificación valor paisajístico (Ramos et al, 1980)

ASPECTO	Calidad		
Fragilidad	**Baja**	**Media**	**Alta**
Baja	Clase 5	Clase 3	Clase 2
Media	Clase 4	Clase 3	Clase 3
Alta	Clase 4	Clase 3	Clase 1

Para el área en análisis se identifican como zonas con alto valor paisajístico tanto las asociadas a coberturas de bosques en las pendientes de rango escarpadas como las superficies de agua. Estas dos categorías se encuentran inmersas en una gran matriz de zonas dispuestas para intervención con la aplicación de medidas de manejo (clase 3) en términos de valor paisajístico. En menor medida se listan las clases 4, 5 y 2 de menor a mayor en extensión en la Tabla 5-74; en donde las zonas con potencial de conservación (clase 2) se distribuye en parches cercanos al cauce del río Cocorná y relictos dispersos en tributarios del mismo.

Tabla 5-74. Cuantificación clases valor paisajístico

Clasificación visual	Descripción	Área [ha]	Porcentaje [%]
Clase 1	Conservación paisajística	168,3	11,7%
Clase 2	Potencial de conservación paisajística	50,6	3,5%
Clase 3	Intervención con restricciones	1.204,0	83,7%
Clase 4	Intervención con pocas restricciones	4,7	0,3%
Clase 5	Acciones de intervención permitidas	10,6	0,7%
Total		**1.438,2**	**100,00%**

Para el área de influencia del paisaje, la dominancia de valores medios tanto para fragilidad como para calidad visual conducen hacia unidades con valor paisajístico medio en su mayoría, como se aprecia en la Figura 5-213, acompañado tanto de las zonas de bosques denso y el cauce del río Cocorná con carácter de conservación paisajística como las zonas de vías y construcciones rurales con un carácter más degradado en términos de valor paisajístico.

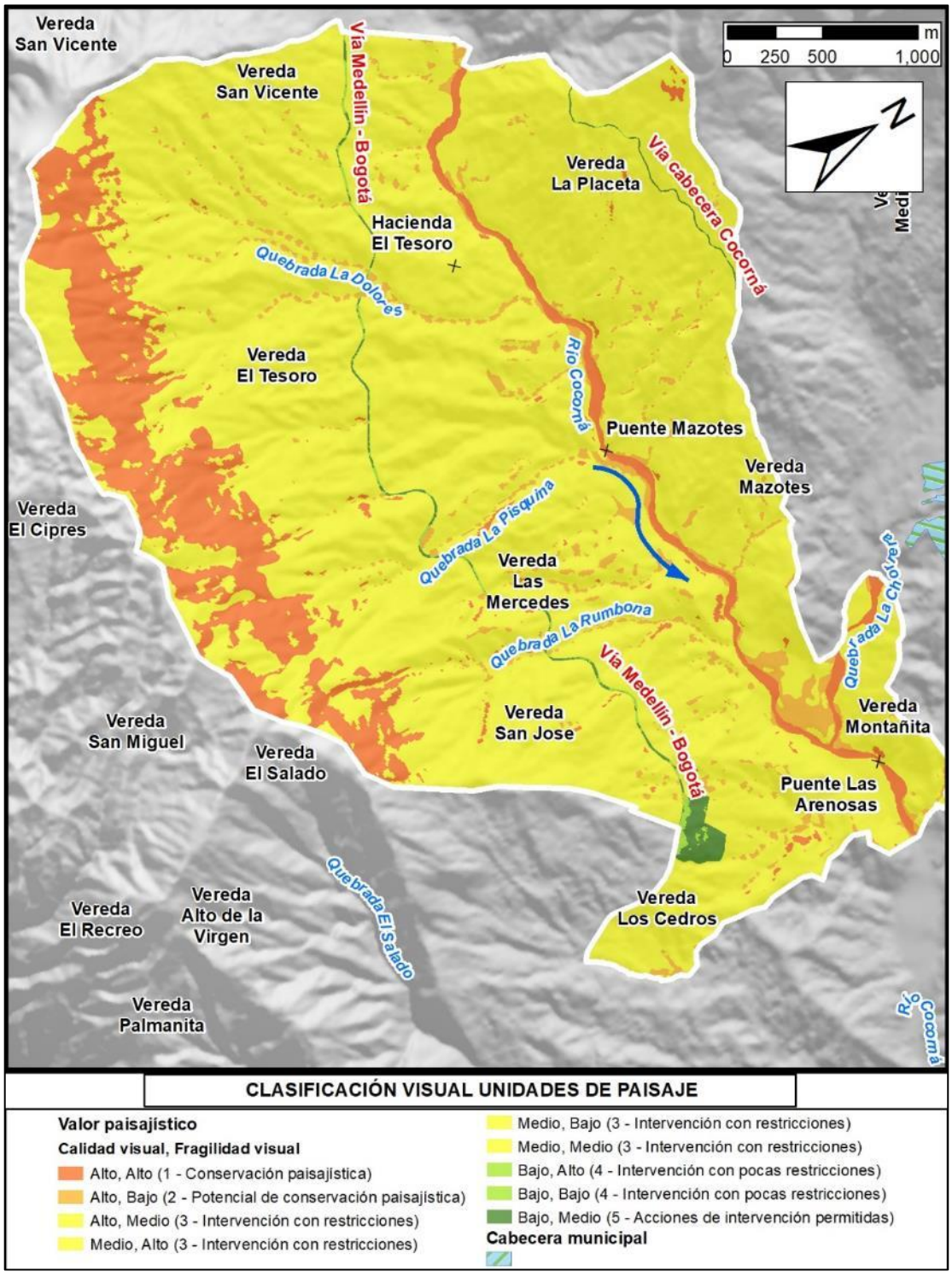


Figura 5-213. Clasificación visual unidades del paisaje

5.1.6.6 Entorno del proyecto

Las áreas de intervención para la construcción y operación del proyecto hidroeléctrico PCH Cocorná III, se localizan en un alto porcentaje sobre la margen izquierda del río Cocorná, tal como se aprecia en la Figura 5-214. Para estas áreas se analizarán los mismos aspectos descritos en los apartados anteriores para la caracterización del paisaje en el área de influencia para este componente.

En el caso de las unidades del paisaje, las áreas de intervención abarcan nueve de las trece unidades definidas como se aprecia en la Tabla 5-75 y la Figura 5-215.De las unidades impactadas el 83% correspondiente a 10,7ha son unidades asociadas a territorios agrícolas.

Tabla 5-75 Unidades del Paisaje en el área de intervención del proyecto

Cod	Unidad de Paisaje	Área [ha]	Porcentaje [%]
UND 1	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Escarpada	0,04	0,28%
UND 2	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	0,45	3,51%
UND 3	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	0,63	4,94%
UND 4	Bosques y Áreas Seminaturales en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	0,47	3,69%
UND 5	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Escarpada	0,06	0,43%
UND 6	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Fuertemente inclinada	2,90	22,56%
UND 7	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Moderadamente empinada a abrupta	4,36	33,97%
UND 8	Territorios Agrícolas en pendientes del terreno Plana a moderadamente inclinada	3,33	25,95%
UND 13	Superficies de Agua	0,60	4,67%
Total		**12,84**	**100,00%**

Figura 5-214 Localización de las obras en torno a las unidades de paisaje

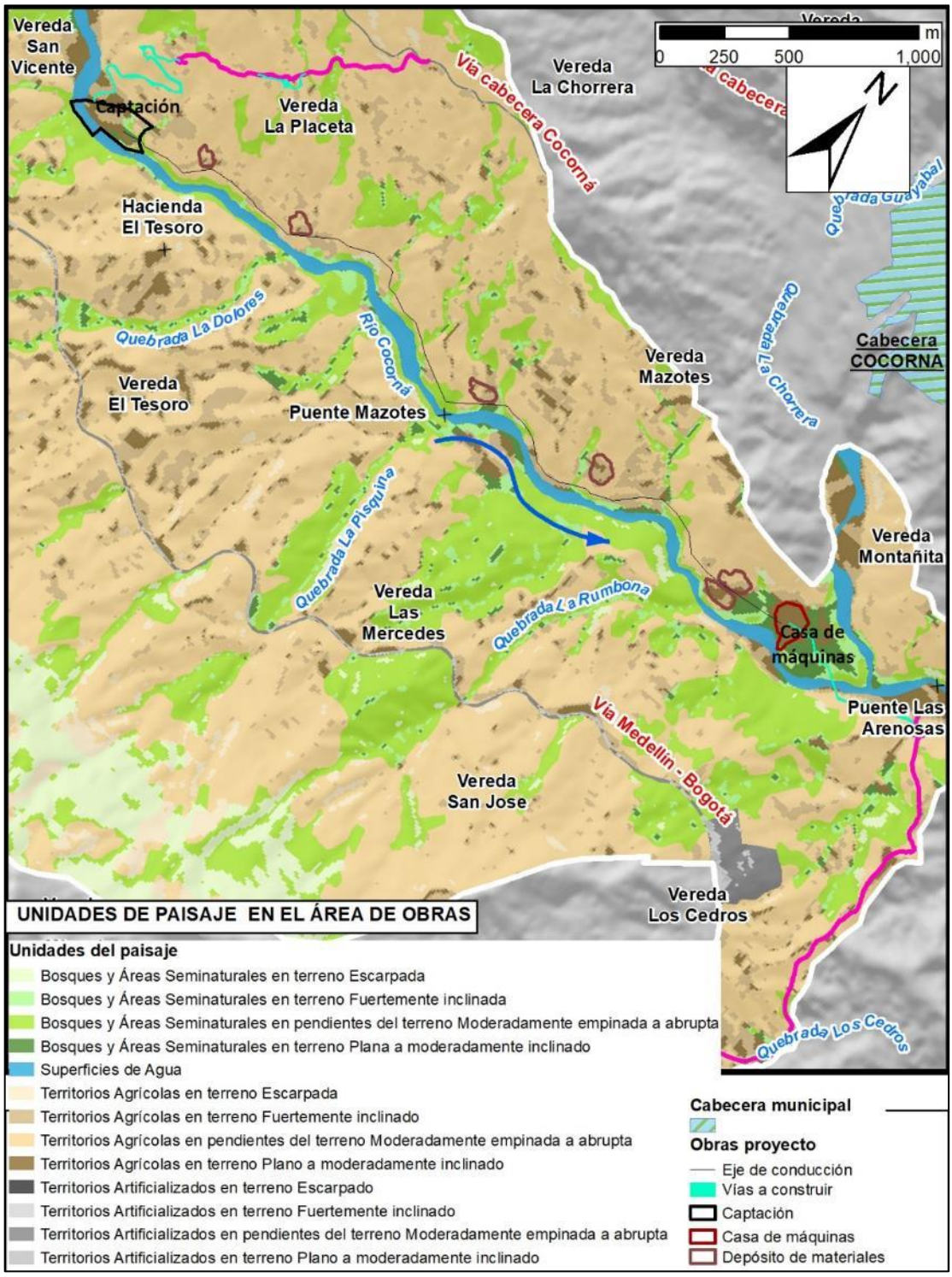


Figura 5-215 Unidades de paisaje en las áreas de intervención del proyecto

La calidad visual para las unidades de paisaje intervenidas esquematizadas en la Figura 5-216, son en su mayoría de clase B o media (ver Tabla 5-65), derivado de la presencia de unidades de territorios agrícolas en un 83%, acompañadas por un 17% proveniente de unidades boscosas y superficies de agua en conjunto (ver Tabla 5-76).

Tabla 5-76. Cuantificación clases calidad visual área de intervención proyecto

Categoría	Área [ha]	Porcentaje [%]
Media	10,65	82,91%
Alta	2,19	17,09%
Total	**12,84**	**100,00%**

El proyecto hidroeléctrico PCH Cocorá III se emplaza en una zona límite entre la conexión de las unidades calificadas en categorías media y alta. Dicho limite apreciado entre los territorios agrícolas y el cauce del río Cocorná presenta las características de las zonas que han recibido un grado de intervención conexas con al atractivo escénico principal que es el cauce del afluente principal.

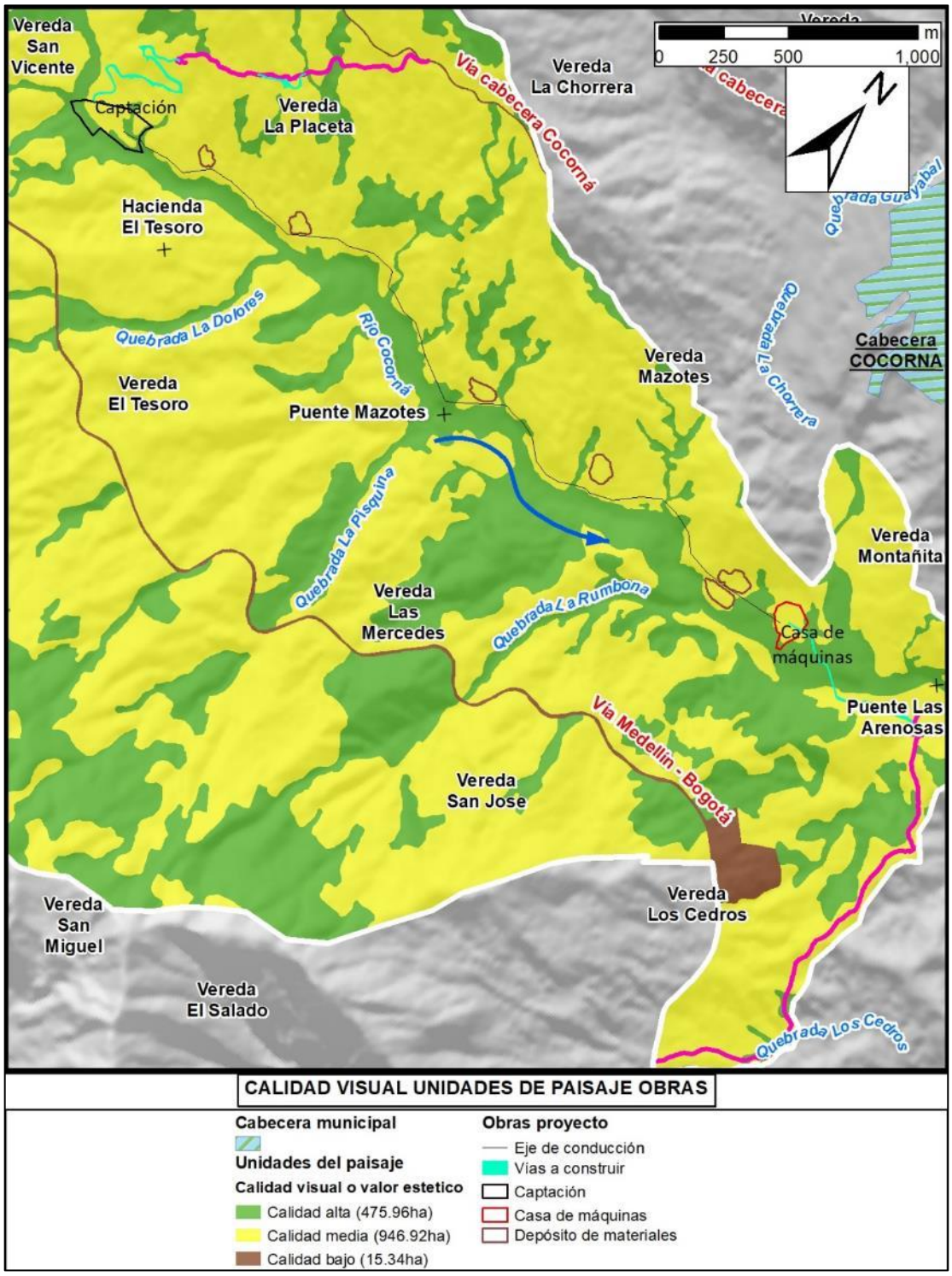


Figura 5-216 Calidad visual de las unidades de paisaje en el área de intervención del proyecto

De acuerdo con los resultados de fragilidad visual de la Tabla 5-77 para las unidades de paisaje interceptadas por las obras, se vislumbra una capacidad de absorción visual (opuesto a la fragilidad) entre alta y media con mayor presencia de esta última (ver Figura 5-217). Esto indica que, asumiendo las medidas adecuadas, el proyecto puede ser poco perceptible para los observadores en especial en los planos visuales más alejados.

Tabla 5-77. Cuantificación clases fragilidad visual área de intervención proyecto

Categoría	Área [ha]	Porcentaje [%]
Bajo	4,26	33,15%
Medio	7,89	61,47%
Alto	0,69	5,38%
Total	**12,84**	**100,00%**

Por último, la clasificación visual obtenidas para las unidades objeto de intervención por las actividades de construcción y operación del proyecto (Figura 5-217), requieren en su mayoría, de acuerdo con lo ilustrado en la Tabla 5-78, la implementación de medidas de manejo que permitan como mínimo conservar las condiciones de clasificación visual que existen en la actualidad.

Tabla 5-78. Cuantificación clases clasificación visual área de intervención proyecto

Categoría	Área [ha]	Porcentaje [%]
Clase 1	0,64	4,95%
Clase 2	0,92	7,20%
Clase 3	11,28	87,85%
Total	**12,84**	**100,00%**

Los aspectos de calidad y fragilidad visual evaluados, así como la calificación visual derivada de estas, nos muestran para el área intervenida por el proyecto un territorio en donde comparativamente en términos de extensión se tienen pocas áreas afectadas con alto valor paisajístico.

Se destaca el potencial de atractivos paisajísticos en especial la superficie de agua y el cauce del río Cocorná al cual, con un manejo adecuado es posible armonizar su acceso mediante estrategias de construcción de las obras del proyecto. Adicionalmente el potencial de relictos de gran valor paisajísticos se identifica como objetivo de estrategias de compensación por las zonas afectadas.

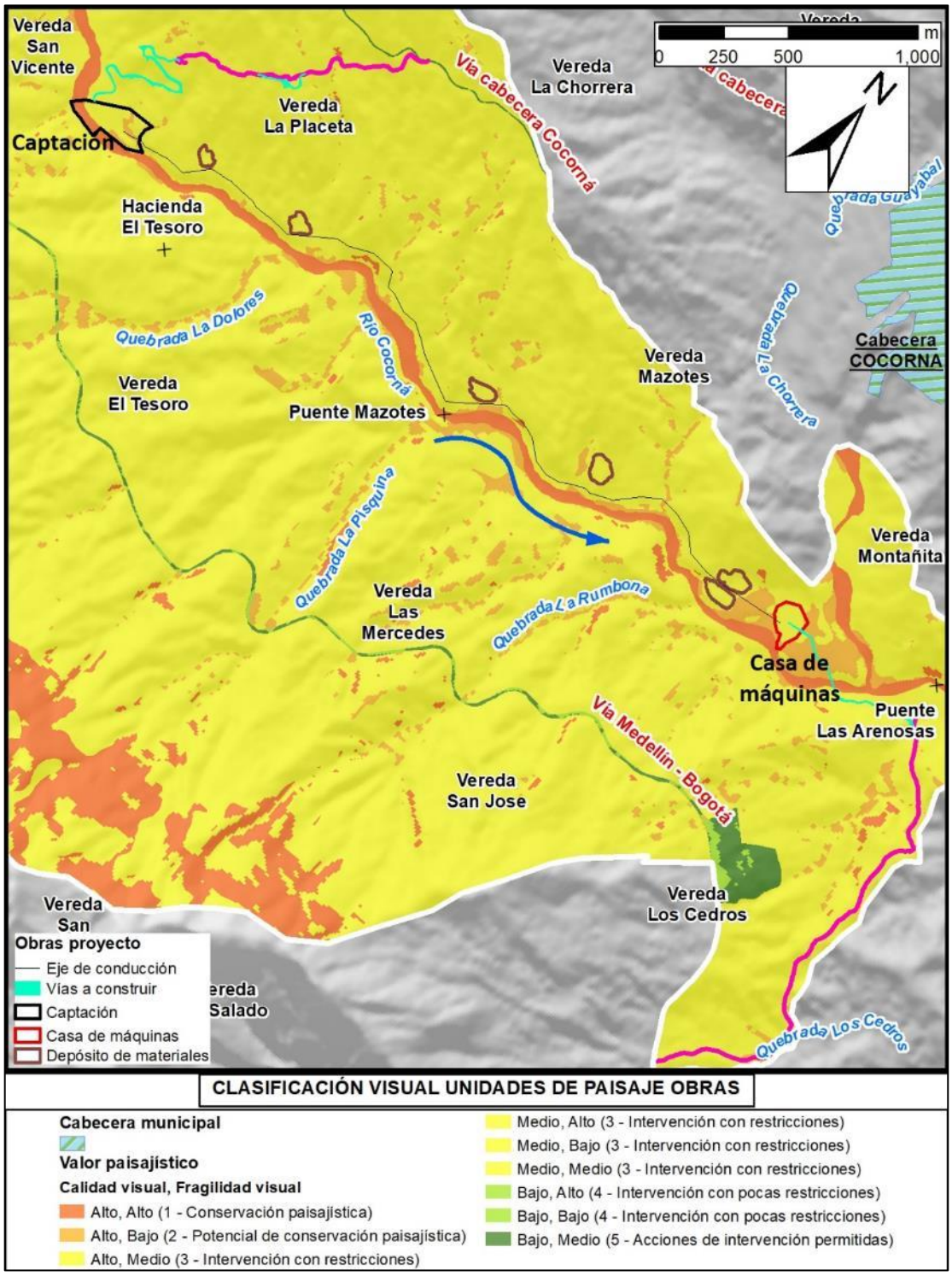


Figura 5-217 Calidad visual unidades paisaje en el área de intervención del proyecto

BIBLIOGRAFÍA

ADVANCED GEOSCIENCES INC. (2020). MiniSting™ R1. Retrieved from https://www.agiusa.com/ministing

Alcaldía Municipal de Cocorná Antioquia. (2008). *Plan de Ordenamiento Territorial Diagnóstico Cocorná Antioquia 2008 - 2011*. Cocorná.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). (2009). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*. Bogotá.

Bates, R., & Jackson, L. (1980). Glossary of Geology. In *Glossary of Geology*.

Benítez, A. (1972). *Aguas Subterráneas: CAPTACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS*. Madrid: DOSSAT SA.

Botero, G. (1942). Contribución al conocimiento de la petrograffa del Batolito Antioqueiio.-. *Minería*, *XX*, 115–117.

Carlos, P. S., Clara, L., Ceiba, L., Estratificadas, R., Florida, L., & El, Q. (1970). *PLANCHA 148 - San Carlos 1'200.000 REPÚBLICA DE COLOMBIA - Departamento de Antioquia*. 1970.

Carvajal, J. H. (2011). *Propuesta De Estandarizacion De La Cartografía.* Bogotá D.C.

Comisión Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogotá.

Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño. (2018). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COCORNÁ Y DIRECTOS AL MAGDALENA MEDIO ENTRE LOS RÍOS LA MIEL Y NARE* (Cornare, Ed.). Medellín: Fondo de adaptación para cambio climático.

Cornare, Corantioquia, & Consorcio POMCAS Oriente Antioqueño. (2017). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Samaná Norte*. Retrieved from http://www.cornare.gov.co/planes-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas-hidrograficas-pomcas/

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). Hidrogeoquímica. *Hidrología Subterránea*, *1*, 1005–1091.

Dearman, W. R. (1991). *Engineering Geological Mapping. Butterworth– Heinemann* .

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (Vol. 506). Wiley New York.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*.

Garcia, C., & Hermelin, M. (2004). Calculo Preliminar de la Tasa de Meteorización del Batolito Antioqueño, Cordillera Central, Colombia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 43–53.

Gleeson, T., Novakowski, K., & Kyser, T. K. (2009). Extremely rapid and localized recharge to a fractured rock aquifer. *Journal of Hydrology*, *376*(3–4), 496–509.

Hoyos, F. (2012). *HIDROGEOLOGIA DE LA ZONA CENTRAL DE ANTIOQUIA*. Medellín.

IGAC. (2007). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Antioquia*. Bogotá.

Kulhawy, F. H., & Hirany, A. (1989). Interpretation of load tests on drilled shafts—Part 2: Axial uplift. *Foundation Engineering: Current Principles and Practices*, 1150–1159. ASCE.

Little, A. L. (1969). The engineering classification of residual torpical soils. *Soil Mech & Fdn Eng Conf Proc/Mexico/*.

Londoño, A. C. (1998). Geoformas Asociadas al Batolito Antloquefio. *Geologia Colombiana*, 133–143.

Mayne, P. W., & Poulos, H. G. (1999). Approximate displacement influence factors for elastic shallow foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *125*(6), 453–460.

Meinzer, O. E. (1942). Ground water. *Hydrology, Physics of the Earth—IX*, 385–477.

Patiño, F. H. (2009). *Diccionario de geotecnia*. Medellín: Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Rendón-Rivera, A. de J., Gallego-Montoya, J. J., Jaramillo-Rendón, J. P., González-Patiño, A., Caballero-Acosta, J. H., & Lalinde-Pulido, C. P. (2015). Neotectonic activity and paleoseismological analysis in Eastern of Antioquia, in the vicinity of Medellin city - Colombia. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 5–19.

Rodríguez, G., González, H., & Zapata, G. (2005). Memoria Explicativa De La Geologia De La Plancha 147 Medellín Oriental. *Ingeominas*, 300 p.

Rodríguez, G., González, H., & Zapata, G. (2007). Complejo El Retiro, Cordillera Central, Colombia. *Boletín Ciencias de La Tierra*, 101–122.

Servicio Geologico Colombiano. (2019). Sismicidad Historica. Retrieved February 10, 2020, from http://www.sgc.gov.co/index.html

Servicio Geológico Colombiano. (2005). *Geología de la Plancha 147 Medellín Oriental*.

Servicio Geológico Colombiano. (2014a). *Memoria Explicativa del Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en masa Esc 1:100.000. Plancha 148 San Carlos.*

Servicio Geológico Colombiano. (2014b). *MEMORIA EXPLICATIVA DEL MAPA GEOMORFOLÓGICO APLICADO A MOVIMIENTOS EN MASA ESC 1:100.000. PLANCHA 167 – SONSÓN*.

Servicio Geológico Colombiano. (2014c). *Memoria Explicativa del Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Esc 1:100.000. Plancha 168 - Argelia*.

Servicio Geológico Colombiano. (2014d). *Memoria Explicativa Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Escala 1:100.000, Plancha 147-Medellín Oriental*.

Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Analisis geotecnico* . Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander UIS.

Vesic, A. S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, *98*(sm3).