
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

CONTRATO No: 0286 de 2014

**PROYECTO “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE
PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE
MEDELLÍN”**



**INFORME DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR
MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS
TORRENCIALES
POLÍGONO EL FARO**

MAYO DE 2018

VERSIÓN 6

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
--	--	--

CONTROL DE VERSIÓN			
Versión	Fecha	Capítulo Modificado	Descripción
0	16/07/2015	No Aplica	Documento Inicial
1	28/08/2015	Todos	Documento Final
2	30/10/2015	Todos	Correcciones documento final
3	27/11/2015	Fue incluido un nuevo capítulo con análisis de redes de servicios públicos y fueron modificados los de vulnerabilidad y conclusiones y recomendaciones	Revisión del documento Final
4	10/03/2016	Se cambió el formato de algunas figuras por mapas tamaño carta	Revisión del documento Final
5	30/11/2017	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud del DAP, DAGRD y SMA.	Revisión del documento Final
6	23/05/2018	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud de Interventoría con base en requerimientos del DAP, DAGRD y SMA	Revisión del documento Final

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
---	--	---

CONTROL DE DISTRIBUCIÓN		
No.	Destinatario	Responsable
1	EDU	Ing. Rafael Tobías Álvarez (Supervisor)

Elaboró	Revisó	Aprobó
Geol Pedro De Greiff Gautier Director Proyecto SIGA	INGEOCILCON INTERVENTORIA	Ing. Rafael Tobías Álvarez Supervisor EDU
Fecha: 23/05/2018	Fecha:	Fecha:

TABLA DE CONTENIDO

CONTROL DE VERSIÓN	.....	2
CONTROL DE DISTRIBUCIÓN	.....	3
1. INTRODUCCIÓN	.....	1
2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	.....	5
3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE (UMI)	.....	7
3.1 GENERALIDADES	.....	7
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN	.....	9
4. ASPECTOS GEOLÓGICOS	.....	19
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL	.....	19
4.1.1 Llenos antrópicos (Qll)	.....	19
4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv)	.....	21
4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)	.....	21
4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)	.....	21
4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)	.....	21
4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	.....	22
4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)	.....	22
4.2 GEOLOGÍA LOCAL	.....	23
4.2.1 Llenos antrópicos (Qll)	.....	28
4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in-situ	.....	29
4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)	.....	30
4.2.4 Depósitos coluviales (Qcol)	.....	31

4.2.5	Depósitos de deslizamiento (Qd)	32
4.2.6	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)	33
4.2.7	Dunitas de Medellín (JKuM)	35
5.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	41
5.1	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	41
5.1.1	Macrounidades geomorfológicas	41
5.1.2	Unidades Geomorfológicas.....	44
5.2	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	47
5.2.1	Unidad de Altiplano AP	51
5.2.2	Unidad de Peldaño Alto PÑA	52
5.2.3	Unidad de Peldaño Tectónico PÑT	52
5.2.4	Unidad de Picacho P	53
5.2.5	Unidad de Lomeríos Estrechos LRE	53
5.2.6	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM.....	54
5.2.7	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM.....	55
5.2.8	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Suaves LAVS	55
5.2.9	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF	55
5.2.10	Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC.....	56
5.2.11	Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI.....	57
5.2.12	Unidad de Superficies con Baja Incisión SBI.....	57
5.2.13	Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI	58
5.2.14	Unidad de Superficie Antrópica SA	59
5.2.15	Unidad de Escarpe E	59
5.2.16	Unidad de Vertiente Moderada VM	60
5.2.17	Unidad de Vertiente Suave VS	60
5.2.18	Unidad de Dolinas.....	61
5.3	MORFODINÁMICA REGIONAL	63

5.4	MORFODINÁMICA LOCAL	68
6.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	76
6.1	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	76
6.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	76
6.2.1	Orientación y buzamiento	78
6.2.2	Espaciamiento	84
6.2.3	Continuidad.....	84
6.2.4	Abertura.....	85
6.2.5	Relleno	86
6.2.6	Alteración.....	87
6.2.7	Rugosidad	87
6.2.8	Agua	89
6.2.9	Resistencia de las paredes	89
6.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	90
7.	EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA.....	95
7.1	ASPECTOS GENERALES	95
7.2	MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS.....	96
7.3	MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA	100
7.4	MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA.....	102
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	107
8.1	ASPECTOS GENERALES	107
8.2	LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG	109



8.3	EL GRADIENTE OROGRÁFICO	113
8.4	EL GRADIENTE NULO	116
8.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	121
8.5.1	Zonas de recarga.....	121
8.5.2	Caracterización del acuífero	122
8.5.3	Flujo regional y flujo local.....	122
8.5.4	Zonas de descarga	123
8.6	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	123
8.6.1	Piezómetros P-EF-PZ-27BD	126
8.6.2	Piezómetros P-EF-PZ-28BD	126
8.6.3	Piezómetros P-EF-PZ-30BD	127
8.6.4	Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto.....	128
8.7	AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	129
9.	ASPECTOS SÍSMICOS.....	134
10.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	138
10.1	SONDEOS EXPLORATORIOS	138
10.1.1	Perforaciones.....	138
10.1.2	Líneas geofísicas	153
10.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	173
10.2.1	Ensayos de Clasificación	174
10.2.2	Ensayos de resistencia al corte.....	179
10.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES.....	184
10.3.1	Aspectos generales	184
10.3.2	Lleno antrópico	185

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
--	--	--



10.3.3	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros	186
10.3.4	Depósitos de deslizamiento	188
10.3.5	Depósitos coluviales	189
10.3.6	Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)	190
10.3.7	Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte	192
11.	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	193
11.1	GENERALIDADES	193
11.2	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	193
11.3	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN	196
11.3.1	Estación Planta Villa Hermosa	198
11.3.2	Estación Mazo	198
11.3.3	Estación Miguel de Aguinaga	199
11.4	DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS	200
11.4.1	Parámetros morfométricos de las cuencas	203
11.4.2	Usos del suelo	203
11.4.3	Tiempos de concentración	205
11.5	CAUDALES MÁXIMOS	207
11.5.1	Intensidades de Diseño	207
11.5.2	Método Racional	208
11.5.3	Hidrogramas sintéticos	209
11.5.4	Regionalización de caudales	213
11.5.5	Resumen de caudales	216
12.	ASPECTOS HIDRÁULICOS	217
12.1	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	217

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
--	--	--

12.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES	217
12.2.1	Quebrada Chorro Hondo.....	219
12.2.2	Quebrada Chorro Hondo 1.....	223
12.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES.....	230
12.3.1	Descripción del Modelo FLO-2D	230
12.3.2	Caudales empleados en la modelación.....	231
12.3.3	Información topográfica	231
12.3.4	Tamaño de la malla	231
12.3.5	Condiciones de Frontera.....	231
12.3.6	Condiciones Iniciales	232
12.3.7	Condiciones de estabilidad numérica.....	232
12.3.8	Coeficiente de rugosidad	232
12.3.9	Estructuras hidráulicas.....	232
12.3.10	Resultados en la Quebrada Chorro Hondo (Condiciones Actuales)	233
12.3.11	Resultados en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Condiciones Actuales)	237
13.	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	242
13.1	METODOLOGÍA.....	242
13.1.1	Objetivo y aspectos generales	242
13.1.2	Escenarios de análisis	242
13.1.3	Cálculo de los factores de seguridad	244
13.1.4	Cálculo de la probabilidad de falla	247
13.1.5	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)	249
13.1.6	Criterios para calificar la amenaza	252
13.2	RESULTADOS	253
14.	AMENAZA POR INUNDACIONES.....	266
14.1	ASPECTOS GENERALES.....	266

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
---	--	---

14.2	METODOLOGÍA.....	266
14.3	RESULTADOS	269
15.	AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES	272
15.1	ASPECTOS GENERALES	272
15.2	AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA	272
15.3	AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN DEL MATERIAL DEL LECHO	273
15.4	RESULTADOS	275
16.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	276
16.1	ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL.....	276
16.2	VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA.....	278
16.2.1	Metodología de análisis	278
16.2.2	Calibración de la metodología.....	284
16.2.3	Levantamientos de campo y análisis de la información.....	293
16.2.4	Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas.....	306
16.3	VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES	316
16.4	SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS.....	328
17.	RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	330
17.1	ASPECTOS GENERALES	330
17.2	CÁLCULO DEL RIESGO	330

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

17.3	RESULTADOS	331
18.	RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	338
18.1	METODOLOGÍA.....	338
18.2	RESULTADOS	338
19.	ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS.....	342
19.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES.....	342
19.2	SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA	342
19.3	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES.....	347
19.4	EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES	347
20.	PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO.....	348
20.1	OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA	348
20.2	OBRAS PARA RIESGO POR INUNDACIONES	351
20.2.1	Análisis de resultados en condiciones actuales	351
20.2.2	Análisis de resultados en condiciones proyectadas	352
21.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	357
22.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	364
23.	LIMITACIONES	371

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Zonificación de la UMI El Faro - Golondrina asociada al Polígono El Faro (Sin Escala).....	11
Figura 2.	Aspectos generales de la UMI El Faro - Golondrinas	13
Figura 3.	Aspectos generales de la UMI El Faro – Golondrinas (Continuación).....	13
Figura 4.	Redes antrópicas de servicios instaladas por la comunidad encontradas en el Polígono El Faro.....	14
Figura 5.	Vista de la parte baja de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas.....	15
Figura 6.	Procesos morfodinámicos presentes al interior del Polígono El Faro	16
Figura 7.	Urbanismo al interior del Polígono El Faro en márgenes de la Quebrada Chorro Hondo	16
Figura 8.	Condiciones actuales de los Drenajes Chorro Hondo y Chorro Hondo 1	18
Figura 9.	Llenos antrópicos en el Polígono El Faro A) Como base para vivienda y B) Cerca de la Quebrada Chorro Hondo	28
Figura 10.	Llenos antrópicos en las Perforaciones P-EF-PR-31 y P-EF-PR-27	29
Figura 11.	Cenizas volcánicas en la parte este de la UMI El Faro - Golondrinas.....	30
Figura 12.	Depósito aluviotorrencial de la Quebrada La Loca en las Estaciones de Campo AMD05-U-EFG y AMD03-U-EFG	31
Figura 13.	Depósitos coluviales típicos de la zona	32
Figura 14.	Depósito de deslizamiento en la parte alta de la UMI El Faro-Golondrinas..	33
Figura 15.	Depósito de flujo de lodos y/o escombros ubicado en la parte superior de la UMI	34
Figura 16.	Depósito de flujos de lodos y/o escombros cerca del Polígono El Faro	35
Figura 17.	Horizonte IB reportado en las perforaciones P-EF-PR-30 y P-EF-PR-42	36
Figura 18.	Horizonte IB de meteorización en estación AMD42-U-EFG.....	36
Figura 19.	Horizonte IC de meteorización A) En la perforación P-PR-EF-30,B) En la perforación P-PR-EF-39 y C) En la estación de campo GPL02-EF	37
Figura 20.	Horizonte IIA de meteorización A) Bloques en superficie por erosión superficial y B) y C) Bloques de dunitas fuertemente diaclasados.....	38
Figura 21.	Horizonte IC de Dunitas con estructura esquistosa	39

Figura 22.	Brecha de DunitasA) En la estación AMD01-G, B) En la perforación P-EF-PR-34 y C) Sobre la Qda. La Loquita	40
Figura 23.	Perfil geomorfológico A-A´	51
Figura 24.	Perfil geomorfológico B-B´	51
Figura 25.	Perfil geomorfológico C-C´	51
Figura 26.	Unidad de Altiplano AP.....	52
Figura 27.	A) Unidad de Peldaño Alto PÑA, al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA y B) Unidad de Vertiente Suave VS	52
Figura 28.	Unidad de Picacho	53
Figura 29.	Unidad de Lomeríos Estrechos LRE.....	54
Figura 30.	Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM, Escarpe E, Vertiente Moderada VM y Superficies sobre Depósitos SSDMI	54
Figura 31.	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM	55
Figura 32.	Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Suaves cerca del CAI del Polígono El Faro.....	56
Figura 33.	Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF	56
Figura 34.	Unidad de Escarpe Largo Semicircular-ELSC localizado en la parte alta del polígono	57
Figura 35.	Unidad de Depósitos Sin Incisión-DSI	57
Figura 36.	Unidades geomorfológicas de Superficies con Baja Incisión y Escarpe Largo Semicircular-ELSC	58
Figura 37.	Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI.....	58
Figura 38.	Unidad de Superficie Antrópica-SA	59
Figura 39.	Vertiente Escarpada-VE exhibiendo bloques en superficie.....	59
Figura 40.	Unidad de Vertiente Moderada VM con bloques en superficie.....	60
Figura 41.	Vertiente Suave VS en la parte superior del Polígono Golondrinas	61
Figura 42.	Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007).....	62
Figura 43.	Disolución en la Dunita de Medellín en forma de canales.....	62
Figura 44.	Dolinas por colapso SFJ13-U-EFG	63

Figura 45.	A) Dolina generada por colapso reportada en la Estación de Campo SFJ13-U-EFG y B) Dolina vegetada reportada en la Estación de Campo SFJ14-U-EFG.....	63
Figura 46.	Distribución de los fenómenos.....	65
Figura 47.	Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos.....	66
Figura 48.	Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987 (Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987).....	68
Figura 49.	Deslizamiento activo en Estación de Campo MAD03-U-TN	72
Figura 50.	(A) Macizo rocoso con discontinuidades que favorecen la caída.....	72
Figura 51.	(B) Frentes de roca inestables.....	73
Figura 52.	(A) Surcos y (B) bloques en superficie en pendientes moderadas.....	73
Figura 53.	Corona activa contenida en cárcava.....	74
Figura 54.	Cárcavas activas ubicadas en la parte superior de la UMI en Estaciones de Campo SFJ05-U-EFG y SFJ06-U-EFG	75
Figura 55.	Socavación lateral en la Quebrada Chorro Hondo.....	75
Figura 56.	Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	80
Figura 57.	Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	80
Figura 58.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD01-U-TN, MAD03-U-TN y MAD16-U-TN	81
Figura 59.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG y SFJ05-U-EFG	82
Figura 60.	Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades.....	84
Figura 61.	Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades.....	85
Figura 62.	Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades	86
Figura 63.	Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades	87
Figura 64.	Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades	88
Figura 65.	Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002)	88
Figura 66.	Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades	89

Figura 67.	Análisis de la característica de agua en las discontinuidades.....	89
Figura 68.	Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	90
Figura 69.	Secciones analizadas en la UMI El Faro-Golondrinas	91
Figura 70.	Análisis cinemático Secciones 1 y 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	92
Figura 71.	Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	93
Figura 72.	Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica.....	95
Figura 73.	Esquema de localización de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)	108
Figura 74.	Recta Meteórica para Colombia	109
Figura 75.	Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio	111
Figura 76.	Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental ...	112
Figura 77.	Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	114
Figura 78.	Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	115
Figura 79.	Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	115
Figura 80.	Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	116
Figura 81.	Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012).....	119
Figura 82.	Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá.....	122
Figura 83.	Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil	125
Figura 84.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-EF-PZ-27B y P-EF-PZ-27D	126
Figura 85.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-EF-PZ-28B y P-EF-PZ-28D	127
Figura 86.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-EF-PZ-30B y P-EF-PZ-30D	128

Figura 87.	Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono El Faro	129
Figura 88.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica (Skempton, 1964)	132
Figura 89.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica (Skempton, 1964)	133
Figura 90.	Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)	134
Figura 91.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas.....	142
Figura 92.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	143
Figura 93.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	144
Figura 94.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	145
Figura 95.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	146
Figura 96.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	147
Figura 97.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	148
Figura 98.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	149
Figura 99.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	150
Figura 100.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	151
Figura 101.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)	152
Figura 102.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-01	155
Figura 103.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-01	155
Figura 104.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01	155
Figura 105.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01	156

Figura 106.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-02	157
Figura 107.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-02	157
Figura 108.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02	157
Figura 109.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02.....	158
Figura 110.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-03	159
Figura 111.	Dispersión y ajuste para la Línea P—EF-LG-03	159
Figura 112.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03	159
Figura 113.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03.....	160
Figura 114.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-04	161
Figura 115.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-04	161
Figura 116.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04	161
Figura 117.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04.....	162
Figura 118.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-01	163
Figura 119.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-01	163
Figura 120.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01	163
Figura 121.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01.....	164
Figura 122.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-02	165
Figura 123.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-02	165
Figura 124.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02	165
Figura 125.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02.....	166
Figura 126.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-03	167
Figura 127.	Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-03	167
Figura 128.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03	167
Figura 129.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03.....	168

Figura 130. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-04.....	169
Figura 131. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-04	169
Figura 132. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04.....	169
Figura 133. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04.....	170
Figura 134. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EFG-LG-10	171
Figura 135. Dispersión y ajuste para la Línea U-EFG-LG-10.....	171
Figura 136. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EFG-LG-10	171
Figura 137. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-14.....	172
Figura 138. Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-14	172
Figura 139. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14	173
Figura 140. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14	173
Figura 141. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande.....	177
Figura 142. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad	177
Figura 143. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.	178
Figura 144. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad	178
Figura 145. Resultados corte directo Muestra EF1-M1 a 0.20 m de profundidad	181
Figura 146. Resultados corte directo Muestra P-EF-PR-30-M3 a 2.20 m de profundidad	181
Figura 147. Resultados corte directo Muestra P-EF-PR-39-M3 a 2.20 m de profundidad	181
Figura 148. Resultados corte directo Muestra UEFG1-M1 a 1.0 m de profundidad.....	182
Figura 149. Resultados corte directo Muestra UEFG2-M1 a 2.0 m de profundidad.....	182
Figura 150. Resultados corte directo Muestra UEFG3-M1 a 3.0 m de profundidad.....	182
Figura 151. Resultados corte directo Muestra UEFG4-M1 a 0 m de profundidad.....	183
Figura 152. Resultados corte directo Muestra UEFG5-M1 a 0 m de profundidad.....	183
Figura 153. Resultados corte directo Muestra UEFG5-M1 a 0 m de profundidad.....	183

Figura 154.	Resultados corte directo Muestra UEFG7-M1 a 3.0 m de profundidad.....	184
Figura 155.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico	186
Figura 156.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los depósitos de flujo de lodos y escombros	187
Figura 157.	Análisis de estabilidad de talud estable	188
Figura 158.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos	190
Figura 159.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas	191
Figura 160.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa.....	198
Figura 161.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo	198
Figura 162.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga.....	199
Figura 163.	Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)	200
Figura 164.	Inicio de la descripción Quebrada Chorro Hondo en la intercepción del cauce con límite del Polígono El Faro.....	219
Figura 165.	Canal natural Quebrada Chorro Hondo en el inicio del Tramo 1.....	220
Figura 166.	Canal natural Quebrada Chorro Hondo parte intermedia del Tramo 1 ubicado a 140 m desde la intercepción del cauce con el límite del Polígono El Faro	221
Figura 167.	Intercepción del cauce con sendero peatonal ubicado a 40 m desde puente peatonal aguas arriba y batea en concreto ciclópeo.....	222
Figura 168.	Características del tramo final de la Quebrada Chorro Hondo aguas abajo de batea en concreto ciclópeo.....	223
Figura 169.	Tramo en canal de concreto con fondo escalonado en piedra pegada de la Quebrada Chorro Hondo 1	224
Figura 170.	Tramo inicial canal natural de la Quebrada Chorro Hondo 1 dentro de Polígono El Faro.....	225
Figura 171.	Condiciones de entrada del flujo hacia el canal de fondo escalonado (Est.1)	226
Figura 172.	Entrada y descarga de canal de concreto con fondo escalonado (Est.1). Puente Peatonal	1
	.....	226

Figura 173.	Cauce natural intermedio entre los canales (Est.1 y Est.2) de fondo escalonado. Quebrada Chorro Hondo 1	227
Figura 174.	Entrada y descarga de canal en concreto de fondo escalonado (Est.2). Puente Peatonal	2 228
Figura 175.	Tramo final en cauce natural de Quebrada Chorro Hondo 1	229
Figura 176.	Batea en concreto ciclópeo y margen izquierda respecto a la dirección del flujo	235
Figura 177.	Obstrucción en cauce e invasión por viviendas en la Quebrada Chorro Hondo 1	238
Figura 178.	Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar	245
Figura 179.	Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa	251
Figura 180.	Esquema de localización en planta de la sección analizada.....	260
Figura 181.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 1-A).....	261
Figura 182.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 1-B).....	261
Figura 183.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 2-A).....	262
Figura 184.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 2-B).....	262
Figura 185.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 2-C)	263
Figura 186.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 2-D)	263
Figura 187.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 3-A).....	264
Figura 188.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 3-B).....	264
Figura 189.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 3-C)	265
Figura 190.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 3-D)	265

Figura 191. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003).....	267
Figura 192. Asignación de la amenaza por inundación a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006)	268
Figura 193. Variación del esfuerzo a lo largo de la Quebrada Chorro Hondo.....	275
Figura 194. Variación del esfuerzo a lo largo de la Quebrada Chorro Hondo 1	275
Figura 195. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa	279
Figura 196. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables.....	283
Figura 197. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa	284
Figura 198. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo ...	285
Figura 199. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías	286
Figura 200. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973.....	287
Figura 201. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	289
Figura 202. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio	292
Figura 203. Zonificación para análisis de la vulnerabilidad en el Polígono El Faro	295
Figura 204. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras....	310
Figura 205. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones	318
Figura 206. Clasificación del riesgo para inundaciones según el grado de amenaza y de vulnerabilidad	338
Figura 207. Estructura general de la información entregada	363

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local	47
Tabla 2.	Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles	65
Tabla 3.	Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio	67
Tabla 4.	Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor	68
Tabla 5.	Colores definidos para los procesos según año	71
Tabla 6.	Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006.....	76
Tabla 7.	Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas de campo	79
Tabla 8.	Familias de discontinuidades considerando todos los datos.....	81
Tabla 9.	Familias de discontinuidades en la Estación MAD01-U-TN	82
Tabla 10.	Familias de discontinuidades en la Estación MAD03-U-TN	82
Tabla 11.	Familias de discontinuidades en la Estación MAD16-U-TN	83
Tabla 12.	Familias de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG	83
Tabla 13.	Descripción del espaciamiento de las discontinuidades	84
Tabla 14.	Descripción de la continuidad de las discontinuidades	85
Tabla 15.	Descripción de la abertura de las discontinuidades	86
Tabla 16.	Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas.....	91
Tabla 17.	Resumen resultados análisis cinemático.....	94
Tabla 18.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas	96
Tabla 19.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas	98
Tabla 20.	Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica.....	100
Tabla 21.	Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio.....	111

Tabla 22.	Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá.....	112
Tabla 23.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá	113
Tabla 24.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás.....	116
Tabla 25.	Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10	136
Tabla 26.	Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños....	137
Tabla 27.	Exploración geotécnica utilizada en la UMI El Faro - Golondrinas.....	140
Tabla 28.	Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI El Faro - Golondrinas	153
Tabla 29.	Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio	174
Tabla 30.	VARIABLES DE ESTADO DE algunas de las muestras ensayadas.....	176
Tabla 31.	Resultados ensayos de corte directo modalidad CD	180
Tabla 32.	Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales	192
Tabla 33.	Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual	196
Tabla 34.	Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca.....	203
Tabla 35.	Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en El Faro.....	203
Tabla 36.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en El Faro	205
Tabla 37.	Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración.....	206
Tabla 38.	Tiempos de concentración calculados para las cuencas	206
Tabla 39.	Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)	207
Tabla 40.	Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca	208
Tabla 41.	Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca	209
Tabla 42.	Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización	214
Tabla 43.	Resultados de regionalización de caudales máximos.....	214
Tabla 44.	Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años	216
Tabla 45.	Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años	216
Tabla 46.	Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años	216

Tabla 47.	Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años	216
Tabla 48.	Coordenadas de los pasos peatonales y estructuras de canales. Quebrada Chorro Hondo 1	229
Tabla 49.	Resumen de estructuras quebrada Chorro Hondo 1	229
Tabla 50.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 1 (Cauce natural) de la Quebrada Chorro Hondo	234
Tabla 51.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el puente peatonal en madera de la Quebrada Chorro Hondo	234
Tabla 52.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo2 (Cauce natural) de la Quebrada Chorro Hondo	235
Tabla 53.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 1 (Cauce natural) de la Quebrada Chorro Hondo 1	237
Tabla 54.	Verificación de las condiciones hidráulicas de los pasos peatonales o puentes en la Quebrada Chorro Hondo 1 para un Tr=100 años. Condiciones Actuales	238
Tabla 55.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 (Canal Fondo Escalonado Est.1) de la Quebrada Chorro Hondo 1	239
Tabla 56.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 (Canal natural) de la Quebrada Chorro Hondo 1	239
Tabla 57.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 (Canal Fondo Escalonado Est.2) de la Quebrada Chorro Hondo 1	239
Tabla 58.	Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 3 (Canal Natural) de la Quebrada Chorro Hondo 1	240
Tabla 59.	Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad	252
Tabla 60.	Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años	252
Tabla 61.	Asignación de la calificación de la probabilidad de inundaciones	267
Tabla 62.	Asignación de la calificación de la intensidad de inundaciones	268
Tabla 63.	Propiedades de los materiales de los caucescon influencia en el polígono El Faro.....	274
Tabla 64.	Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996).....	280
Tabla 65.	Factor por tipo de estructura.....	281
Tabla 66.	Factor por altura de la estructura.....	281
Tabla 67.	Factor de estado de la estructura	282
Tabla 68.	Tipo de ocupación – Movimiento en Masa.....	298

Tabla 69.	Tipo de estructura – Movimiento en Masa	298
Tabla 70.	Estado de la estructura – Movimiento en Masa	298
Tabla 71.	Tipo de cubierta – Movimiento en Masa	299
Tabla 72.	Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa	299
Tabla 73.	Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa	306
Tabla 74.	Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa	311
Tabla 75.	Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono El Faro.....	313
Tabla 76.	Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales.....	316
Tabla 77.	Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV	317
Tabla 78.	Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	319
Tabla 79.	Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	319
Tabla 80.	Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales.....	320
Tabla 81.	Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales.....	320
Tabla 82.	Registro fotográfico en el Polígono El Faro	328
Tabla 83.	Registro fotográfico en el Polígono El Faro (Continuación)	329
Tabla 84.	Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total.....	335
Tabla 85.	Categorización del riesgo total	335
Tabla 86.	Inventario de las estructuras en alto riesgo No Mitigable por movimientos en masa en el Polígono El Faro	337

LISTA DE MAPAS



Mapa 1.	Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles	6
Mapa 2.	UMI asociada al Polígono El Faro	8
Mapa 3.	Usos generales del suelo rural UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014).....	12
Mapa 4.	Usos generales del suelo urbano UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014)..	17
Mapa 5.	Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006)	20
Mapa 6.	Geología local de UMI El Faro - Golondrinas	25
Mapa 7.	Perfiles estratigráficos A-A' y B-B' de la UMI El Faro - Golondrinas.....	26
Mapa 8.	Perfil estratigráfico C-C' de la UMI El Faro - Golondrinas	27
Mapa 9.	Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	43
Mapa 10.	Unidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	46
Mapa 11.	Análisis de pendientes UMI El Faro – Golondrinas.....	48
Mapa 12.	Unidades geomorfológicas UMI El Faro – Golondrinas	50
Mapa 13.	Procesos morfodinámicos UMI El Faro - Golondrinas	70
Mapa 14.	Estructuras encontradas en la UMI El Faro – Golondrinas	77
Mapa 15.	Criticidad geomorfológica UMI El Faro – Golondrinas	97
Mapa 16.	Criticidad de zonas homogéneas UMI El Faro – Golondrinas.....	99
Mapa 17.	Criticidad morfodinámica UMI El Faro-Golondrinas.....	101
Mapa 18.	Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)	104
Mapa 19.	Clasificación del suelo (POT, 2014).....	105
Mapa 20.	Aptitud Geológica - Geotécnica UMI El Faro-Golondrinas	106
Mapa 21.	Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil.....	124
Mapa 22.	Localización de la exploración directa e indirecta	139
Mapa 23.	Información cartográfica empleada en el estudio.....	195
Mapa 24.	Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005.....	197
Mapa 25.	Red hídrica en la UMI El Faro - Golondrinas	201
Mapa 26.	Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI El Faro - Golondrinas.....	202

Mapa 27.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI El Faro - Golondrinas	204
Mapa 28.	Cuencas consideradas en el método de regionalización	215
Mapa 29.	Localización obras en el cauce de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1	218
Mapa 30.	Mancha de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono E Faro.....	236
Mapa 31.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono El Faro.....	241
Mapa 32.	Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones estáticas	254
Mapa 33.	Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudoestáticas con sismo de 0.25g	255
Mapa 34.	Probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones actuales y naturales.....	256
Mapa 35.	Probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años	257
Mapa 36.	Probabilidad de falla anualizado de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g.....	258
Mapa 37.	Zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g	259
Mapa 38.	Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 del Polígono El Faro.....	270
Mapa 39.	Superposición de Vías de Acceso y Equipamientos sobre la amenaza por inundaciones	271
Mapa 40.	Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	288
Mapa 41.	Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono El Faro ..	296
Mapa 42.	Localización espacial del tipo de estructura por movimientos en masa en el Polígono El Faro.....	300
Mapa 43.	Localización espacial del desplante de fundaciones por movimientos en masa en el Polígono El Faro	301
Mapa 44.	Localización espacial del estado de estructura por movimientos en masa en el Polígono El Faro.....	302

Mapa 45.	Localización espacial del tipo de cubierta por movimientos en masa en el Polígono El Faro.....	303
Mapa 46.	Localización espacial de la altura de estructura por movimientos en masa en el Polígono El Faro.....	304
Mapa 47.	Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa	305
Mapa 48.	Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono El Faro	307
Mapa 49.	Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono El Faro por movimientos en masa	308
Mapa 50.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso y equipamientos en el Polígono El Faro	309
Mapa 51.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono El Faro por movimientos en masa	312
Mapa 52.	Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono El Faro por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	314
Mapa 53.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono El Faro por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	315
Mapa 54.	Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono El Faro.....	321
Mapa 55.	Localización espacial del estado de estructura por inundación en el Polígono El Faro.....	322
Mapa 56.	Localización espacial de la altura de estructura por inundación en el Polígono El Faro.....	323
Mapa 57.	Localización espacial la densidad de la población en el Polígono El Faro .	324
Mapa 58.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones para el Polígono El Faro	325
Mapa 59.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono El Faro con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	326
Mapa 60.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono El Faro para las Vías de Acceso y Equipamientos.....	327
Mapa 61.	Análisis de riesgo por movimientos en masa en términos de porcentaje de pérdidas económicas en el Polígono El Faro.....	332
Mapa 62.	Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en términos de porcentaje de pérdidas de vidas en el Polígono El Faro	333



	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
--	--	--

Mapa 63.	Análisis de riesgo estructural de vías de acceso y equipamientos por movimientos en masa	334
Mapa 64.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones actuales.....	336
Mapa 65.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono El Faro	340
Mapa 66.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono El Faro para las vías de acceso y equipamientos	341
Mapa 67.	Redes de servicios públicos sobre mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g	344
Mapa 68.	Superposición de Redes de servicio público sobre la amenaza por inundaciones.....	345
Mapa 69.	Redes de servicios públicos analizadas desde el mapa de amenaza por inundaciones para condiciones proyectadas. Polígono El Faro.....	346
Mapa 70.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones proyectadas.....	350
Mapa 71.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas para el Polígono El Faro.....	353
Mapa 72.	Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Polígono El Faro	354
Mapa 73.	Análisis de riesgo por inundaciones para las condiciones proyectadas	355
Mapa 74.	Retiro POT y retiro hidrológico para las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1	356



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

LISTA DE MAPAS DEL ATLAS

- 01_EFRLocalizacionGeneral_Medellin_T
- 02_EFRLocalizacionUMI_Medellin_T
- 03_EFRGeomorfologiaRegional_Medellin_T
- 04_EFRGeologiaLocalUMI_Medellin_T
- 05_EFRPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 06_EFRPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 07_EFRMacroUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 08_EFRUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 09_EFRPendientes_Medellin_T
- 10_EFRGeomorfologiaLocal_Medellin_T
- 11_EFRProcesosMorfodinamicos_Medellin_T
- 12_EFRGeologiaEstructural_Medellin_T
- 13_EFRExploracion_Medellin_T
- 14_EFRClasificaciondelSuelo_Medellin_T
- 15_EFRCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T
- 16_EFRUsosdelSueloUrbano_Medellin_T
- 17_EFRUsosdelSueloRural_Medellin_T
- 18_EFRAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T
- 19_EFRAMenazaMovimientosenMasa_Medellin_T
- 20_EFRRedHidricaUMI_Medellin_T
- 21_EFRManchaInundaciones_Medellin_T
- 22_EFRManchaInundacionesCondProyecto_Medellin_T

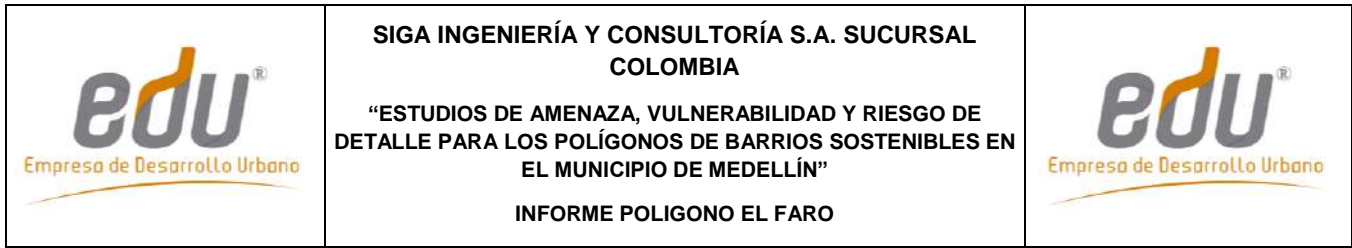
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

- 23_EFRamenazasInundaciones_Medellin_T
- 24_EFRamenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_T
- 25_EFRTipodeEstructura_Medellin_T
- 26_EFRDesplantedeFundaciones_Medellin_T
- 27_EFREstadodelaEstructura_Medellin_T
- 28_EFRTipodeCubierta_Medellin_T
- 29_EFRAlturadelaConstruccion_Medellin_T
- 30_EFRMapadeResistencia_Medellin_T
- 31_EFRTipodeEstructura_Medellin_T
- 32_EFREstadodelaEstructura_Medellin_T
- 33_EFRAlturadelaConstruccion_Medellin_T
- 34_EFRDensidaddePoblacion_Medellin_T
- 35_EFRViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T
- 36_EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T
- 37_EFRVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T
- 38_EFRVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T
- 39_EFRRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T
- 40_EFRRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T
- 41_EFRRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T
- 42_EFRRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T
- 43_EFRRiesgoInundaciones_Medellin_T
- 44_EFRRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_T
- 45_EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T
- 46_EFRVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

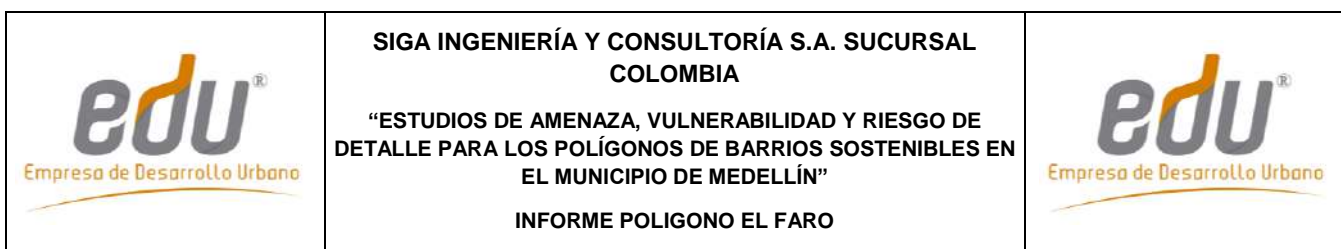
47_EFRRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T

48_EFRRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T



LISTA DE PLANOS

- P-2445-EF-OM-01 Paso peatonal 1-Qda Chorro Hondo 1
- P-2445-EF-OM-02 Paso peatonal 2-Qda Chorro Hondo 1
- P-2445-EF-OM-03 Conformación Cauce-Qda Chorro Hondo 1



LISTA DE ANEXOS

- Anexo 01. Formatos con levantamientos de campo
- Anexo 02. Registros de la exploración de campo
- Anexo 03. Ensayos de laboratorio
- Anexo 04. Memorias hidrológicas
- Anexo 05. Memorias hidráulicas
- Anexo 06. Fichas de vulnerabilidad estructural
- Anexo 07. Fichas análisis de alternativas obras de mitigación
- Anexo 08. Memorias de diseño obras de mitigación
- Anexo 09. Planos de diseño obras de mitigación
- Anexo 10. Actas de instrumentación
- Anexo 11. Cantidades de obra, Presupuesto y Especificaciones
- Anexo 12. Geodatabase

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
--	--	--



1. INTRODUCCIÓN

En el marco del Contrato 286 de 2014, que la Empresa Ingeniería y Consultoría S.A. Sucursal Colombia (SIGA) firmó con la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU), SIGA fue contratada para llevar a cabo los estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de detalle para los polígonos del “Proyecto Barrios Sostenibles”. Se trata de polígonos en los Barrios La Cruz, Golondrinas, El Faro, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay del municipio de Medellín.

En este informe se presentan los resultados de los estudios del polígono correspondiente al Barrio El Faro. El alcance final que se pretende es la definición de las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del Polígono El Faro, por medio de métodos cuantitativos y fácilmente reproducibles. Al interior de las zonas con riesgo mitigable se pretende llegar hasta el establecimiento de las medidas de estabilización estructural y no estructural, que puedan ayudar a la mitigación de dicho riesgo.

Es importante aclarar que esta Versión 7 del estudio atiende todas las observaciones que finalmente se acordaron con La Interventoría y La EDU que se harían a las versiones iniciales entregadas en mayo de 2016. Se tienen en cuenta observaciones de entidades tales como Planeación Municipal, Secretaría del Medio Ambiente y el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo (DAGR). Si se consultan versiones anteriores, se podrá verificar que existen diferencias en los resultados, algunas mayores y otras menores. Todo esto obedece al hecho de que la ejecución de varias versiones del estudio de todos los polígonos que hacen parte del Proyecto Barrios Sostenibles, ha permitido una depuración y perfeccionamiento de la metodología. Los resultados que finalmente deben tenerse en cuenta son los de esta Versión 7 del informe, de tal manera que los de otras versiones no son válidos ni comparables con los acá presentados. Si se revisan en conjunto las entregas finales de los ocho polígonos estudiados, se puede ver incluso que hay una total coherencia en las metodologías de uno y otro sitio de estudio y que se han solucionado problemas de versiones anteriores tales como la excesiva importancia que sobre los mapas finales de riesgo de algunos polígonos tenían variables tales como la vulnerabilidad.

La metodología empleada para el estudio es la presentada de forma detallada en el Informe I-2445-01-Rev7, entregado como parte de este mismo contrato a la Empresa de Desarrollo Urbano. En dicho informe se presentan los pasos generales y específicos que se siguen para la evaluación tanto de la amenaza como de la vulnerabilidad y el riesgo en la zona del Proyecto Barrios Sostenibles. La idea principal sobre la que se desarrolla la metodología es la implementación de teorías básicas de equilibrio límite, flujo de agua y flujo de detritos y la probabilidad de ocurrencia de los mismos, que permitan determinar condiciones críticas de factor de seguridad, velocidades de flujo y niveles de agua y establecer con estas las condiciones de amenaza regional y local de la zona de estudio. Las condiciones de amenaza por los diferentes eventos antes descritos, se analizan a la luz de la información de la infraestructura física presente en cada uno de los polígonos,



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

determinándose para tal fin la vulnerabilidad física de las estructuras a través de la identificación de algunos aspectos específicos de la misma como son el tipo de estructura y sus materiales, el estado o mantenimiento y el nivel de fundación. Finalmente, los análisis de amenaza y vulnerabilidad por los diferentes escenarios, permiten obtener las zonas de riesgo y determinar si el mismo puede ser mitigable o no mitigable.

Con respecto a la metodología, es importante resaltar que los estudios de amenaza se enmarcan dentro de las directrices y lineamientos metropolitanos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos y geotécnicos para la prevención del riesgo en construcciones en ladera, consignadas en el Decreto Metropolitano 09 del 25 de mayo de 2012, conocido en el medio como Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012). Mediante este último documento, se exige el estudio para nuevos proyectos en zonas de ladera dentro de la denominada Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) en que se localice. Así las cosas, realmente se incluyen los estudios de amenaza partiendo de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) dentro de la cual se ha incluido este polígono. Se consideraron tres escenarios de amenazas enfocados desde el punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico, que podrían afectar a las comunidades que habitan los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles y en este caso en particular el del Polígono El Faro:

- ✓ Amenaza por movimientos en masa, considerada como la probabilidad de que se presente este tipo de eventos, con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.
- ✓ Amenaza por inundación, consistente en la probabilidad que tiene una zona de ser afectada por un fenómeno de inundación. Las inundaciones son fenómenos propios de la dinámica natural de las corrientes, pero hay diferentes factores que pueden aumentarla, tales como modificación en el alineamiento de los cauces, obras hidráulicas, urbanización en retiros de quebradas, desecación de zonas inundables para proyectos de infraestructura y llenos artificiales y cambios en el uso del suelo, entre otros.
- ✓ Amenaza por avenidas torrenciales, consistente en la probabilidad que tiene una zona de ser afectada por fenómenos de crecientes súbitas que por las condiciones geomorfológicas de la cuenca, están compuestas por un flujo de agua con alto contenido de materiales de arrastre y con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad. Estas pueden estar ocasionadas por movimientos en masa que ocurren en la parte superior de la cuenca y que son transportados por el drenaje.



Los estudios de vulnerabilidad se concentran en el análisis de la vulnerabilidad física, por medio de la cual se determinaron las características de los elementos expuestos a las amenazas identificadas, considerando factores como tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial entre otras.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

El análisis del riesgo combina los resultados de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad. La etapa final del proyecto considera la evaluación de las zonas que se encuentran en riesgo alto mitigable. Al interior de las mismas se establecen todas las medidas de estabilización estructural y no estructural, para mitigar el riesgo. Para esta fase del proyecto se implementaron análisis de estabilidad local en las zonas de interés, por medio de herramientas de análisis de estabilidad bidimensional. Se evaluaron los modelos de inestabilidad considerando la infraestructura propuesta y las medidas de estabilización que se requieren.



Los resultados del estudio se presentan en los 23 capítulos de este informe, distribuidos de la siguiente manera:

- ✓ Luego de la presente introducción, en los Capítulos 2 y 3 se presenta una breve descripción de la localización del sitio de estudio y de la delimitación de la Unidad Morfodinámica Independiente (UMI) que tiene influencia sobre la zona de estudio.
- ✓ La geología regional y la geología local son presentadas en el Capítulo 4 y la descripción de las macrounidades y unidades geomorfológicas de las diferentes UMI's que influyen en los polígonos de estudio, haciendo énfasis en la correspondiente al polígono de este informe, se presentan en el Capítulo 5. El Capítulo 6 describe la geología estructural a nivel regional y local, detallando fallas, diaclasamientos, cizalladuras, etc., Los aspectos relacionados con la aptitud geológica se presentan en el Capítulo 7.
- ✓ La conceptualización de la hidrogeología de la zona de estudio se presenta en el Capítulo 8, donde se hace la debida conexión con el sistema de instrumentación instalado en la zona de estudio.
- ✓ En el Capítulo 9 se incluye un análisis de la zona a partir de los resultados de estudios existentes de la Microzonificación Sísmica de Medellín. Por su parte, el Capítulo 10 contiene los diferentes aspectos geotécnicos para la UMI en estudio, incluyendo la caracterización de los materiales a partir de ensayos de laboratorio.
- ✓ Los Capítulos 7 y 12 presentan los aspectos hidrológicos e hidráulicos, incluyendo una caracterización y los caudales máximos de las cuencas que influyen en el polígono, así como la evaluación del comportamiento hidráulico de las corrientes hídricas.
- ✓ Los análisis de amenaza por movimiento en masa, por inundaciones y por avenidas torrenciales se presentan en los Capítulos 13, 14 y 15, respectivamente. Se tienen en cuenta los resultados de análisis geológicos, geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos presentados en los capítulos anteriores a estos.
- ✓ El análisis de vulnerabilidad de los elementos físicos expuestos a los tres fenómenos en estudio (movimiento en masa, inundaciones y avenidas torrenciales) es presentado en el Capítulo 16. Este capítulo es de suma importancia no sólo por cuanto muestra en el Numeral 16.2 lo concerniente a vulnerabilidad por movimientos en masa, sino porque también en este capítulo, en el Numeral 16.2.2, se muestran

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

resultados de aplicación de la metodología al deslizamiento Villatina como la manera más contundente de validación de la metodología.

- ✓ Luego de tenerse los resultados de la amenaza y la vulnerabilidad por movimiento en masa, éstos son procesados y en el Capítulo 17 se presenta el resultado para el riesgo por dicho evento para la zona de estudio. Por su parte, el riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales se presenta en el Capítulo 18.
- ✓ En el Capítulo 19 se incluyen los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa, por inundaciones y por avenidas torrenciales para las líneas vitales asociadas a redes de servicio público. La amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo ante los tres fenómenos estudiados para las demás líneas vitales, como las vías y los equipamientos son analizados al interior de cada uno de los capítulos donde se expone cada fenómeno, es decir, en los Capítulos 13, 14 y 15 para la amenaza, en el Capítulo 16 para la vulnerabilidad y en los Capítulos 17 y 18 para el riesgo.
- ✓ Los Capítulos 20 y 21 comprenden los diseños de obras de mitigación ante los diferentes fenómenos, así como las conclusiones y recomendaciones para el polígono de estudio.
- ✓ Finalmente, los Capítulos 22 y 23 contienen las referencias bibliográficas y las limitaciones del estudio.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

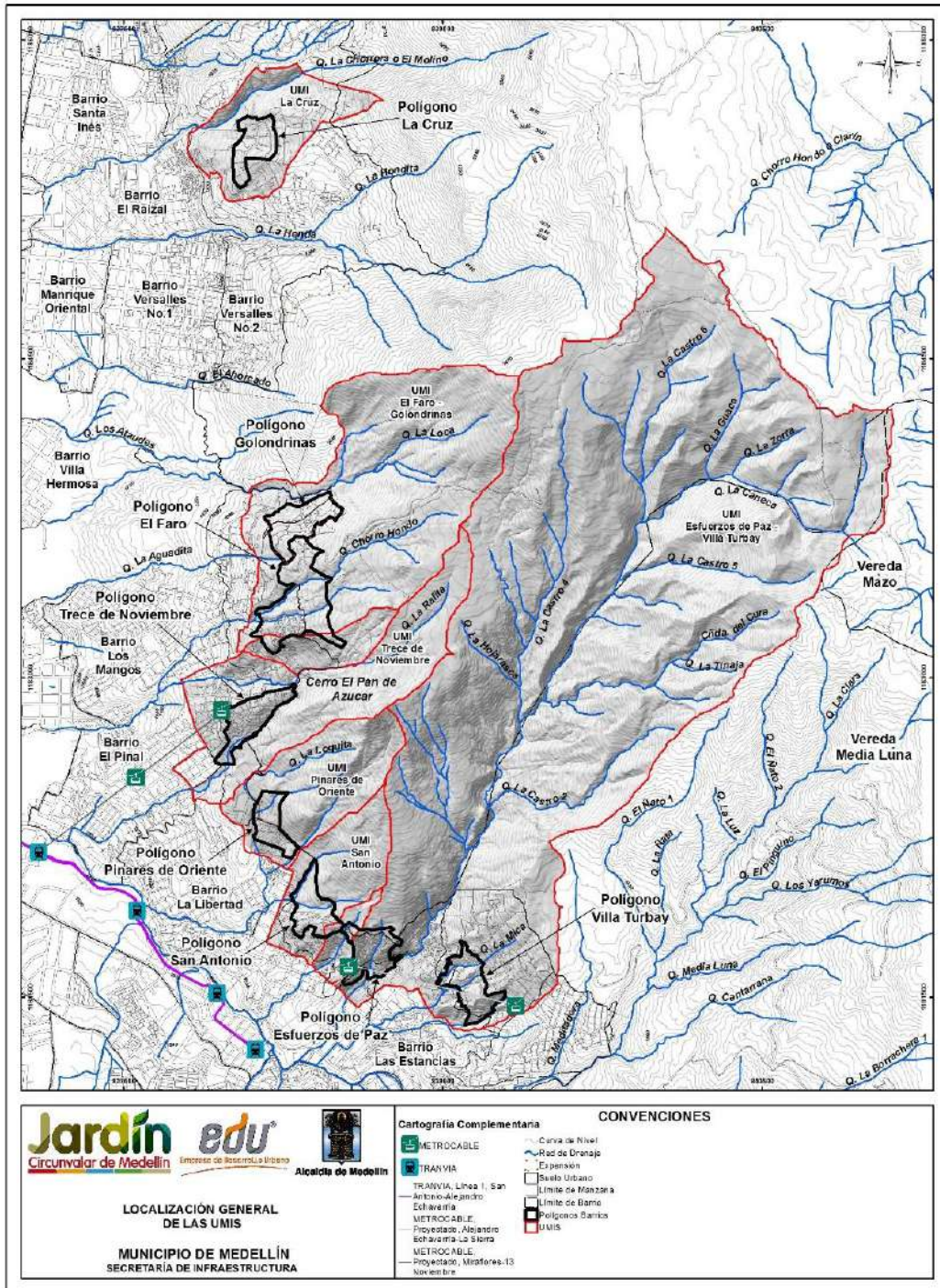
2. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la parte alta de la ladera centro oriental, entre los límites rurales y urbanos de la ciudad de Medellín. Los polígonos correspondientes al “Proyecto Barrios Sostenibles”, se encuentran ubicados en su mayoría en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique).



Los polígonos localizados al interior de la Comuna 8 son los correspondientes a los Barrios Golondrinas, El Faro, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay. El polígono localizado al interior de la Comuna 3 corresponde al Barrio La Cruz. En el Mapa 1 se presenta la localización general de todas las UMI definidas para cada uno de los polígonos de estudio.

El Polígono El Faro, objeto principal de este estudio, cuenta con un área aproximada de 10.83 hectáreas. Éste se encuentra ubicado en el Barrio Llanaditas y sus sectores Golondrinas, El Faro, Altos de la Torre y El Pacífico. Además, ocupa una parte de la zona rural del corregimiento de Santa Elena, en las veredas Piedras Blancas – Matasano, Media Luna y una pequeña porción de Mazo. A su vez, ocupa sectores de las cuencas de las Quebradas La Castro, Chorro Hondo, La Aguadita, La Loca, El Ahorcado y una pequeña fracción de la quebrada El Ñato.

El área de intervención del Polígono El Faro se concentra en los sectores El Faro y Altos de la Torre, ubicados en la vertiente de la microcuenca de la Quebrada Chorrohondo, cercanas están las vertientes de la Quebrada La Loca en el sector de Golondrinas y la Quebrada La Rafita en el sector El Pacífico.



Mapa 1. Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles (01_EFRLocalizacionGeneral_Medellin_C y 01_EFRLocalizacionGeneral_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

3. UNIDAD MORFODINÁMICA INDEPENDIENTE (UMI)

3.1 GENERALIDADES

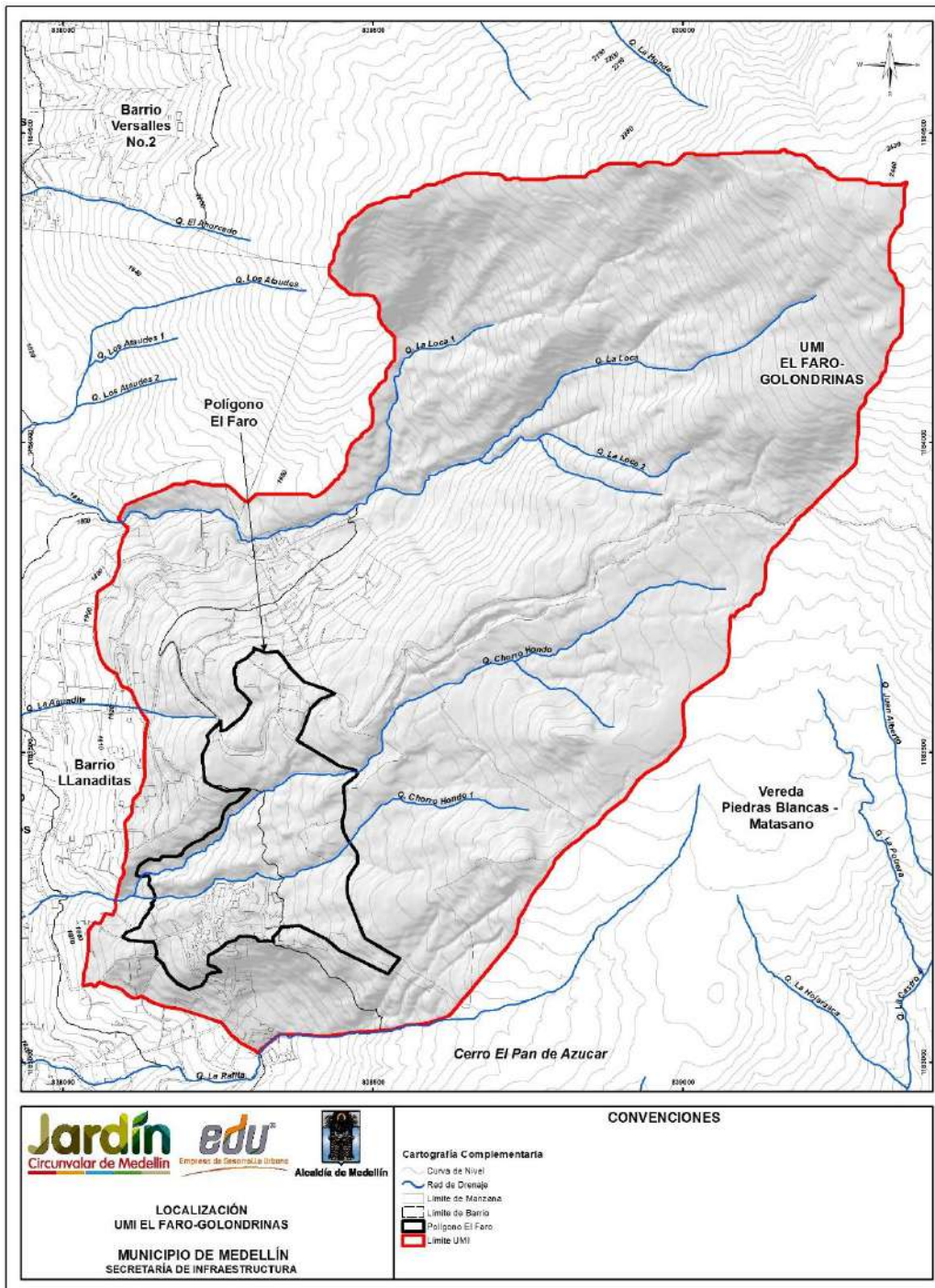
Como punto de partida para la ejecución del estudio que se presenta en este informe, se requiere la delimitación de la conocida como Unidad Morfodinámica Independiente (UMI), entendiéndola a ésta como la unidad del territorio que enmarca el predio de interés o que presenta un comportamiento independiente de las unidades adyacentes. Se considera que cualquier proceso morfodinámico que se presente en el exterior no afecta su interior e igualmente que cualquier proceso morfodinámico que se presente en el interior de ésta no afecta las unidades adyacentes.

Se trata de un concepto de obligatorio cumplimiento para estudios de nuevos proyectos en las zonas de ladera Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es tratado de forma detallada en el Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012). Según el código, las evaluaciones geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, hidrológicas e hidráulicas deben extenderse a lo largo y ancho de la denominada Unidad Morfodinámica Independiente (UMI).



De acuerdo con lo anterior, se procedió a delimitar la UMI de los polígonos de estudio en las Comunas 3 y 8 que hacen parte del Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente de los polígonos El Faro - Golondrinas, siendo el primero objeto de este informe. Siguiendo los lineamientos del Código de Laderas del Valle de Aburrá, se consideraron aspectos de tipo geológico, geomorfológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico. De forma resumida, puede decirse que se incluyó el área en la que cualquier proceso de inestabilidad, potencial o existente, pudiera afectar las estructuras existentes y programadas, bien fuera porque las impactara directamente o porque a través de las corrientes de agua pudiera llegar hasta la zona del proyecto.

La unión de todas las UMI de la Comuna 8 (Mapa 1) da lugar a un área aproximada de 700 hectáreas e involucra las cuencas y/o subcuencas de las Quebradas La Arenera, La Loca, La Rafita, La Gallinaza, Chorro Hondo, San Antonio, La Mica, El Saperó y La Castro con todos sus afluentes y cañadas como por ejemplo La Hojarasca, La Potrera, Juan Alberto, Los Moros, La Caneca, La Tinaja y La Paloma, entre otras.

La inclusión de los Polígonos El Faro y Golondrinas dentro de una misma UMI, resulta como consecuencia de su proximidad. La selección inicial de cada UMI para estos polígonos generó que ambas presentaran una intercepción mayor al 80% en su área de influencia, es decir más de la mitad del área de una UMI consideraba el área de la UMI vecina, con procesos en común para ambas UMI. Por lo anterior, para efectos de optimizar los trabajos de análisis, ambas UMIS se unificaron. En el Mapa 2 se presenta la UMI denominada en este estudio como El Faro – Golondrinas asociada al polígono El Faro, el cual tiene un área aproximada de 158 hectáreas.



Mapa 2. UMI asociada al Polígono El Faro
 (02_EFRLocalizacionUMI_Medellin_C y 02_EFRLocalizacionUMI_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

En el numeral siguiente se hace referencia a la UMI correspondiente a los polígonos ubicados dentro de los Barrios El Faro y Golondrinas, la cual se seguirá denominando en este informe como UMI El Faro - Golondrinas o simplemente como la UMI. También se hará referencia al Polígono El Faro, correspondiente al polígono en estudio dentro del barrio con este mismo nombre.



3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

La selección de la UMI de Faro - Golondrinas partió del análisis de las condiciones morfométricas, morfodinámicas, hidráulicas e hidrológicas de la zona. Se enfoca en atender las evaluaciones de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones que podrían afectar directamente las estructuras al interior del Polígono El Faro.

De forma general, la UMI se localiza en el centro de la Comuna 8 y se posiciona en el extremo norte del Proyecto Barrios Sostenibles, limitando al sur con la UMI del Polígono Trece de Noviembre, al oriente con la UMI Esfuerzos de Paz y Villa Turbay y hacia la zona occidental con el Barrio Llanaditas. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI se encuentra acotada principalmente en sus flancos sur, norte y oriente por la presencia física de algunas divisorias de aguas.

Al sur de la UMI, esta se encuentra limitada en gran parte por la divisoria de aguas de la margen derecha de la Quebrada La Rafita, ya que parte del Polígono El Faro se encuentra inmerso en la zona de afectación de la UMI Trece de Noviembre. Este límite desciende desde la parte alta rural por dicha divisoria, pero en el extremo más sur, entrando a la zona urbana de la ladera, el límite se convierte en parte del cauce de la Quebrada La Rafita. Esta inclusión es fundamental ya que dentro de la UMI deben contenerse procesos existentes sobre el cauce y la margen derecha de la Quebrada La Rafita, que se comparten con el sector del Trece de Noviembre, y que afectarían el extremo sur del Polígono El Faro. Este límite no consideró parte de la margen izquierda de la Quebrada La Rafita ya que esta no presenta una dinámica hidráulica importante por no presentar un caudal constante, además los procesos existentes en dicha margen no son relevantes para la estabilidad de la UMI en este sector, por lo que se consideró suficiente apenas considerar el límite izquierdo del cauce. Además de enmarcar la totalidad de los procesos que podrían afectar el Polígono El Faro, el límite sur de la UMI incluye todas las áreas de drenaje de las Quebradas Chorro Hondo, Chorro Hondo 1 y los afluentes superiores de la Quebrada La Loca, áreas fundamentales para los análisis por inundaciones de estos drenajes sobre el Polígono El Faro.

El límite norte, por su parte, considera principalmente la divisoria de aguas de la Quebrada La Loca. Este límite de la UMI desciende desde la parte alta de la zona rural involucrando toda la zona de cuenca de la Quebrada La Loca y sus respectivos afluentes. Dentro de este límite se involucran en la parte alta, todos aquellos procesos morfodinámicos generados en las márgenes de los Afluentes La Loca, La Loca 1 y La Loca 2, los cuales podrían afectar principalmente al Polígono Golondrinas por efectos de inundaciones y avenidas torrenciales, teniéndose evidencia concreta de estos procesos en las partes bajas de la UMI, muy cerca del Polígono Golondrinas. Hacia la zona urbana este límite adiciona parte de la margen derecha del cauce de la quebrada La Loca, que

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

aunque no es trascendental como una zona que pueda amenazar al Polígono Golondrinas, si es importante para efectos de las modelaciones proyectadas para los fenómenos de inundaciones y avenidas torrenciales y se requiere de la caracterización del mismo por considerarse un cauce con caudal base y una dinámica hidráulica importante.

Finalmente, el límite inferior estuvo enmarcado por atravesar la zona urbana del sector, determinado principalmente por las vías principales del sector de Llanaditas correspondientes a la Carrera 18B, Carrera 18C y la Carrera 17^a. No obstante, se debe recalcar que parte de estos límites cruzan por senderos peatonales consecuencia del urbanismo desordenado del sector. Estos límites enmarcaron principalmente la zona de los procesos morfodinámicos que por efectos de desconfinamiento pudieran afectar directamente los límites de los Polígono El Faro. La escogencia además de este límite inferior se hizo tratando de tomar las zonas de mayor consolidación urbana y las zonas de mayor estabilidad, de tal forma que los mismos límites garantizaran su propia característica de estabilidad.

Como sus límites lo indican, la escogencia de la UMI está supeditada a las incidencias hidrológicas e hidráulicas de los drenajes que la atraviesan y también de los procesos morfodinámicos que se identifican en las zonas de sus márgenes. Se resalta que los límites escogidos se manifiestan estables y los procesos que puedan encontrarse por fuera de estos no tendrán incidencias directas o relevantes sobre las condiciones de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en el Polígono El Faro.

Como parte de la caracterización de la UMI, la Figura 1 muestra la UMI El Faro - Golondrinas, dividiéndose en las Zonas 1, 2 y 3, delimitadas de acuerdo con sus pendientes, usos del suelo y condiciones de actividad morfodinámica.

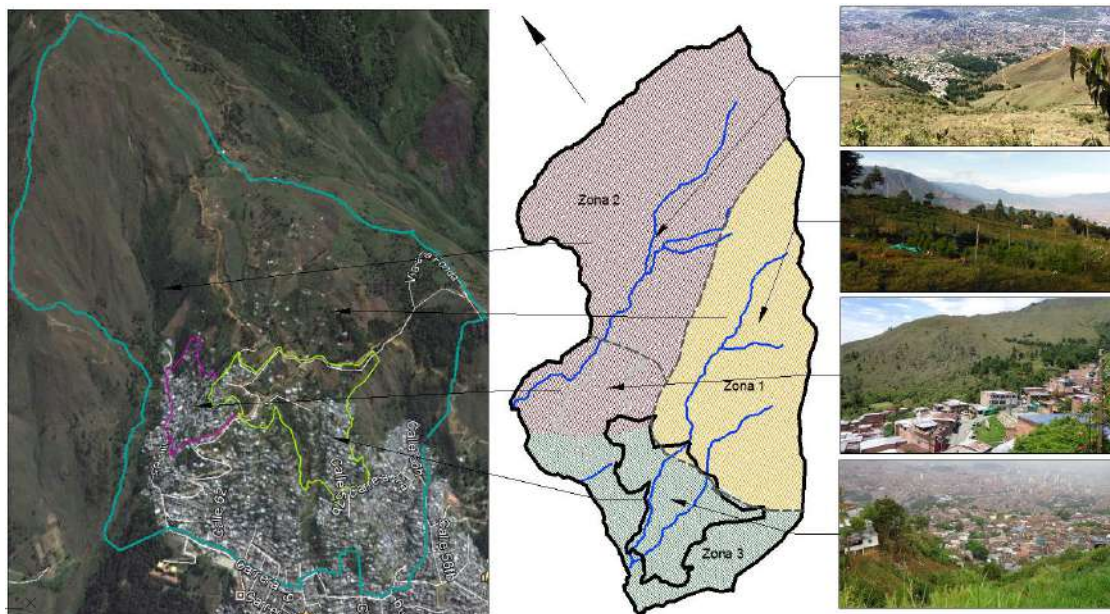
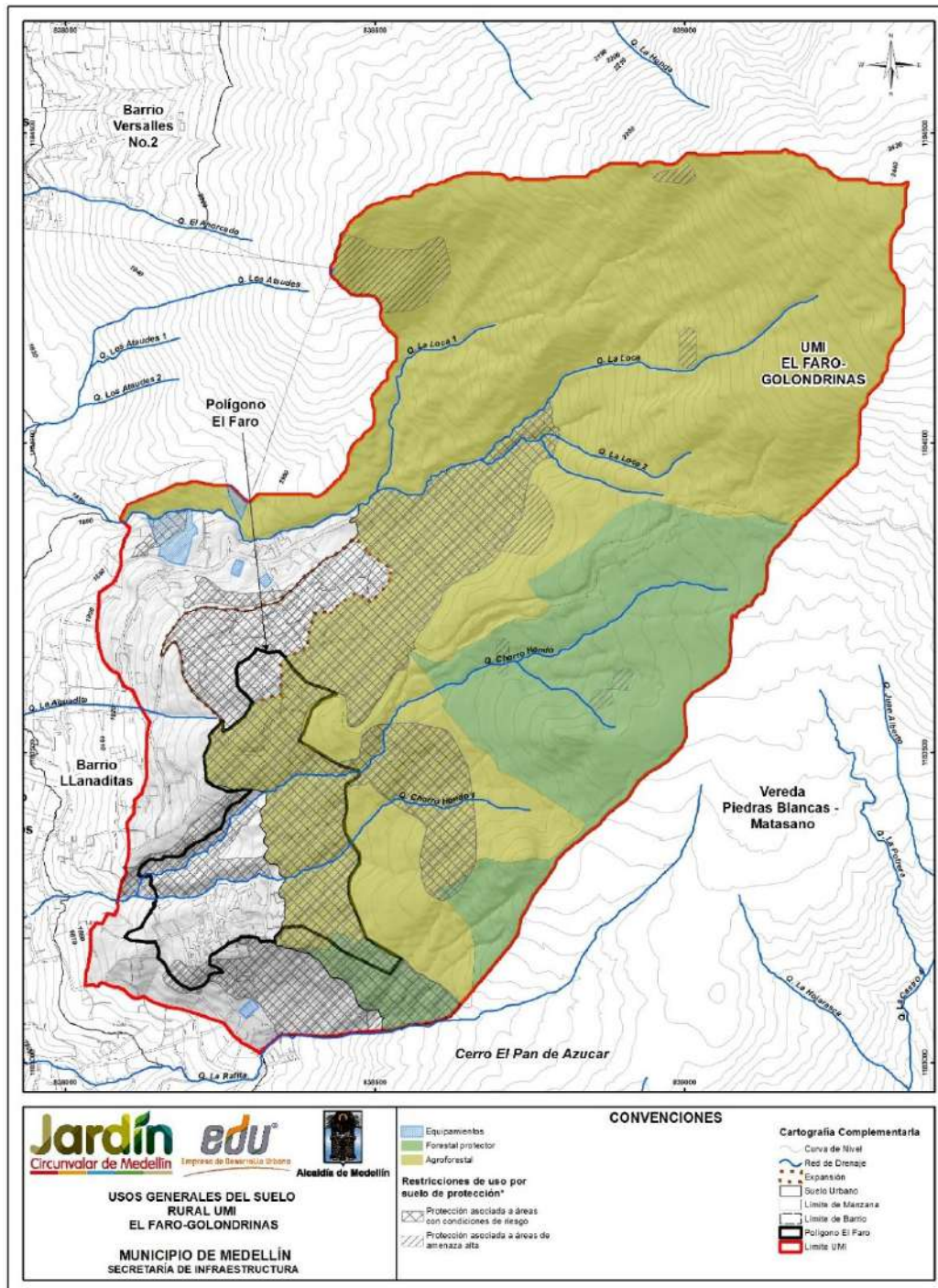


Figura 1. Zonificación de la UMI El Faro - Golondrina asociada al Polígono El Faro (Sin Escala)

La Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrina se ubica limitando con la UMI Trece de Noviembre, teniendo las siguientes características:

- ✓ Pertenece a la zona rural, donde los usos del suelo corresponden a *Forestal protector* y *Agroforestal* (Mapa 3), con la presencia de los senderos Cinturón Verde y Ruta de Campeones. No se presentan grandes asentamientos humanos y sólo se ubican algunas viviendas y parcelaciones campesinas.
- ✓ Las pendientes que se presentan en esta zona varían principalmente entre laderas de pendientes bajas a altas, con inclinaciones que van entre los 5° hasta los 30°.
- ✓ La actividad morfodinámica en este sector es baja a media y la ubicación de la gran mayoría de estos procesos se encuentra en las márgenes de los cauces de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, cuyos nacimientos se encuentran al interior de esta zona y son quienes atraviesan directamente el Polígono El Faro. Otros procesos se encuentran muy relacionados con la actividad antrópica del sector y los usos del suelo que se le dan a esta zona.
- ✓ Las evidencias en campo permitieron constatar la presencia de redes artesanales de acueductos y las descargas no controladas de alcantarillado, así como también sistemas de riego no tecnificados. Actualmente, se viene trabajando en la instalación de dichos servicios públicos de tal forma que a futuro esta problemática podrá ser mitigada de forma definitiva.



Mapa 3. Usos generales del suelo rural UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014)
 (17_EFRUsosdelSueloRural_Medellin_C y 17_EFRUsosdelSueloRural_Medellin_T)

En la Figura 5 y en Figura 3 se presentan algunas imágenes sobre la panorámica general de la Zona 1 de la UMI El Faro – Golondrinas. En la Figura 4 se muestran algunos hallazgos de redes antrópicas instaladas por la comunidad.



Parte superior de la Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrina

Figura 2. Aspectos generales de la UMI El Faro - Golondrinas



Zona 1 de la UMI El Faro - Golondrinas limitando con la UMI Trece de Noviembre



Parte baja de la Zona 1 de la UMI El Faro – Golondrinas incluyendo Quebrada Chorro Hondo

Figura 3. Aspectos generales de la UMI El Faro – Golondrinas (Continuación)



Figura 4. Redes antrópicas de servicios instaladas por la comunidad encontradas en el Polígono El Faro

La Zona 2 se ubica sobre el flanco norte y oriental de la UMI y corresponde principalmente a la geoforma de la cuenca de la Quebrada La Loca quien afecta directamente al Polígono Golondrinas, teniendo las siguientes características principales:

- ✓ Esta zona se caracteriza por pertenecer a la zona rural donde el uso del suelo corresponde a *Agroforestal*, en el Mapa 3. Estos suelos están encaminados a interés estratégico al presentarse como cuencas destinadas para el abastecimiento de acueductos o cuencas hidrográficas de orden cero. Adicionalmente, desde el punto de vista de la vegetación, es un área totalmente desprovista de la misma y sólo se tienen áreas con cobertura vegetal.
- ✓ Las pendientes que se presentan en esta zona son mayores que 30° correspondiente a laderas de pendientes altas y escarpadas, razón por la cual en esta zona no se identifica ningún tipo de asentamiento urbano.
- ✓ Es la zona que presenta mayores indicios de actividad morfodinámica con todo tipo de procesos, que incluyen coronas de deslizamientos antiguos, cicatrices de deslizamientos activos y procesos erosivos superficiales. Todos estos procesos se encuentran direccionados hacia el drenaje de la Quebrada la Loca, la cual en su lecho ha mostrado la presencia de depósitos de origen torrencial.

La importancia entonces de la prolongación de la UMI hasta la Zona 2, involucrando la cuenca de la Quebrada La Loca, está en la necesidad de analizar fenómenos de inestabilidad en la cuenca que podrían desencadenar torrencialidades sobre la Quebrada La Loca. En la Figura 5 se presenta una vista panorámica de las condiciones actuales de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas.



Figura 5. Vista de la parte baja de la Zona 2 de la UMI El Faro - Golondrinas

La Zona 3 finalmente corresponde a la zona baja de la UMI y estará directamente influenciada por lo que ocurra en las Zonas 1 y 2. Esta zona abarca los Polígono El Faro y Golondrinas y presenta las siguientes características:

- ✓ Desde el punto de vista del uso de suelo comparte el límite entre lo urbano y lo rural, aunque el crecimiento urbanístico, en el Mapa 4, del sector ha llevado a que casi la totalidad del área se encuentre urbanizada, incluyendo las zonas cercanas a los drenajes. En lo que respecta al Polígono El Faro, la mitad de su área se encuentra catalogada como un área forestal con condiciones de riesgo (Mapa 3).
- ✓ Las pendientes que se presentan son variables, entre 15° y mayores a 30° que corresponden a laderas de pendiente moderada a muy alta.
- ✓ La zona presenta una actividad morfodinámica media a alta consecuencia de la pendiente y de las malas prácticas de urbanismo. Los principales procesos determinados se encuentran en las zonas de las márgenes de las Quebradas Chorro Hondo 1 y 2 y la Quebrada La Loca. En el caso específico del Polígono El Faro, se concentran cicatrices de procesos morfodinámicos localizados principalmente hacia las márgenes derecha e izquierda de las Quebradas Chorro Hondo 1 y 2.

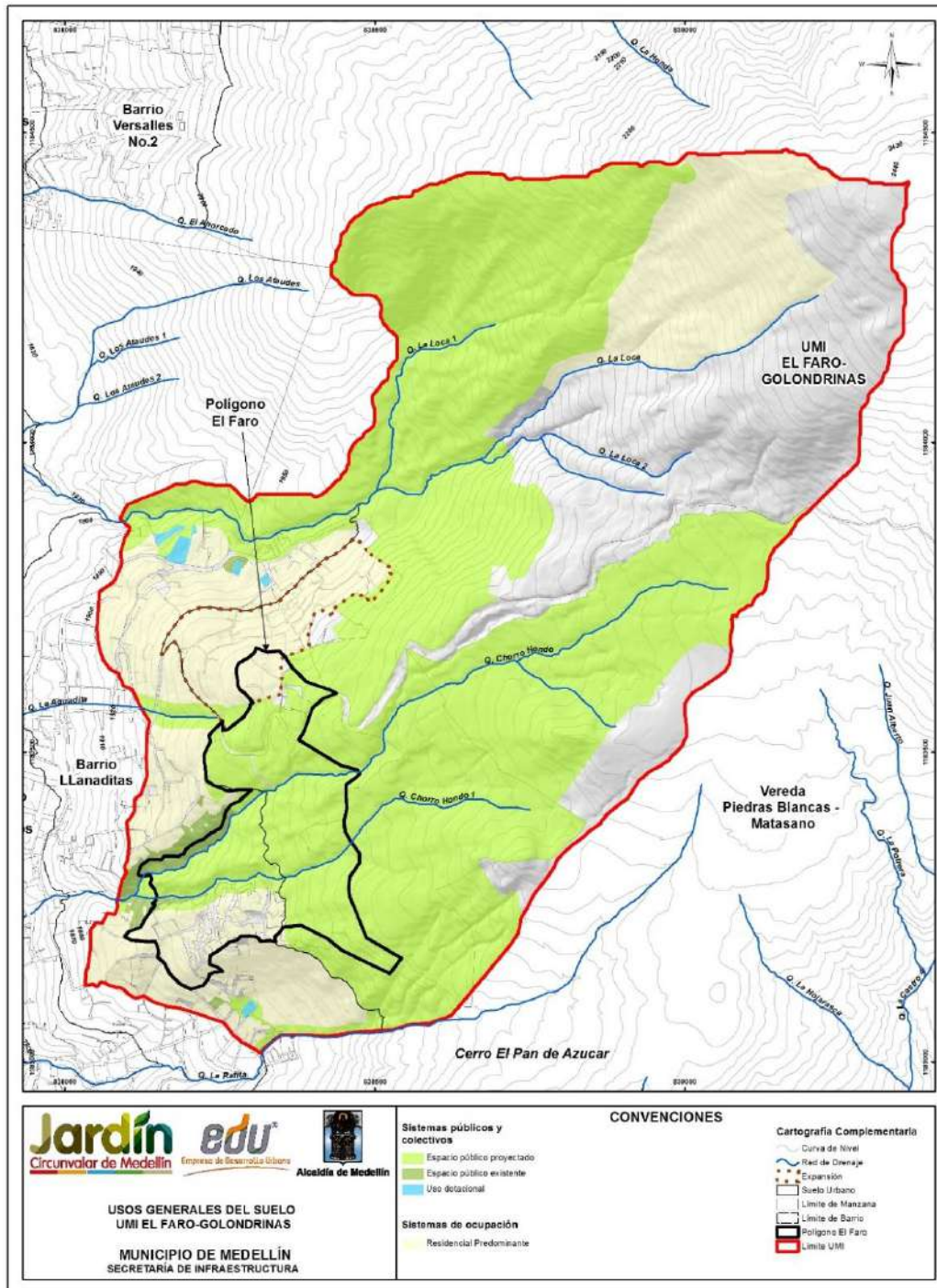
En esta Zona 3, la UMI El Faro – Golondrinas comparte una parte de la UMI Trece de Noviembre, específicamente parte de la margen derecha de la Quebrada La Rafita como consecuencia de que parte del Polígono El Faro se encuentra afectado por la actividad de dicha margen (Figura 3). En la Figura 6 y en la Figura 7 se presenta un panorama general de las condiciones actuales de la Zona 3 de la UMI, especialmente algunos procesos e intervenciones antrópicas evidenciadas al interior del Polígono El Faro.



Figura 6. Procesos morfodinámicos presentes al interior del Polígono El Faro



Figura 7. Urbanismo al interior del Polígono El Faro en márgenes de la Quebrada Chorro Hondo



Mapa 4. Usos generales del suelo urbano UMI El Faro - Golondrinas (POT, 2014)
(16_EFRUsosdelSueloUrbano_Medellin_C y 16_EFRUsosdelSueloUrbano_Medellin_T)

Desde los puntos de vista hidrológico e hidráulico, la UMI está delimitada por las divisorias de aguas de varios drenajes principales que demarcan la zona de estudio y en la cual se enmarcan las problemáticas más importantes que podrían afectar el Polígono El Faro, como se indica a continuación:

- ✓ La UMI es atravesada por los drenajes de la Quebrada La Loca y sus afluentes, Chorro Hondo y Chorro Hondo ,1 en sentido oriente occidente, los cuales fluyen sobre cauces naturales.
- ✓ Los drenajes de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 atraviesan el Polígono El Faro y la mayor problemática de estos radica en el nivel de urbanismo localizado sobre sus márgenes, lo cual incrementa la amenaza y el riesgo en términos de movimientos en masa e inundaciones.
- ✓ Adicionalmente, el problema se incrementa por el manejo que se le da a los residuos humanos, los cuales son depositados al interior y sobre las márgenes del cauce, incrementando las zonas de lleno antrópico y modificando las condiciones del cauce en algunos sectores.
- ✓ Finalmente, los drenajes Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 confluyen en la zona baja de la UMI por fuera del Polígono El Faro. La Figura 8 muestrea un panorama de las condiciones actuales de los drenajes de Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.

En la Zona 3 también es posible evidenciar la presencia de un tramo del Drenaje La Aguadita, correspondiente a su punto de nacimiento. No obstante, este drenaje no será considerado en este proyecto al no representar ningún tipo de amenaza para los polígonos de la UMI.





Drenaje natural quebrada Chorro Hondo1



Drenaje natural quebrada Chorro Hondo

Figura 8. Condiciones actuales de los Drenajes Chorro Hondo y Chorro Hondo 1

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

De acuerdo con la Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (Consortio Microzonificación, 2006), la geología de la zona se compone principalmente de rocas ígneas ultramáficas como las Dunitas de Medellín (JKuM), cuerpos plutónicos como el Stock de las Estancias (KcdE) y el Stock de Media Luna (KcdML), que para este informe se agrupan como la unidad denominada Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA). Estas unidades están suprayacidas por llenos antrópicos (QII), depósitos aluviotorrenciales (Qat), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII). Además, se encuentran cenizas volcánicas que no fueron reportadas por el Consortio Microzonificación (2006), debido a la escala del estudio. En el Mapa 5 se muestra la disposición en planta de estas unidades.

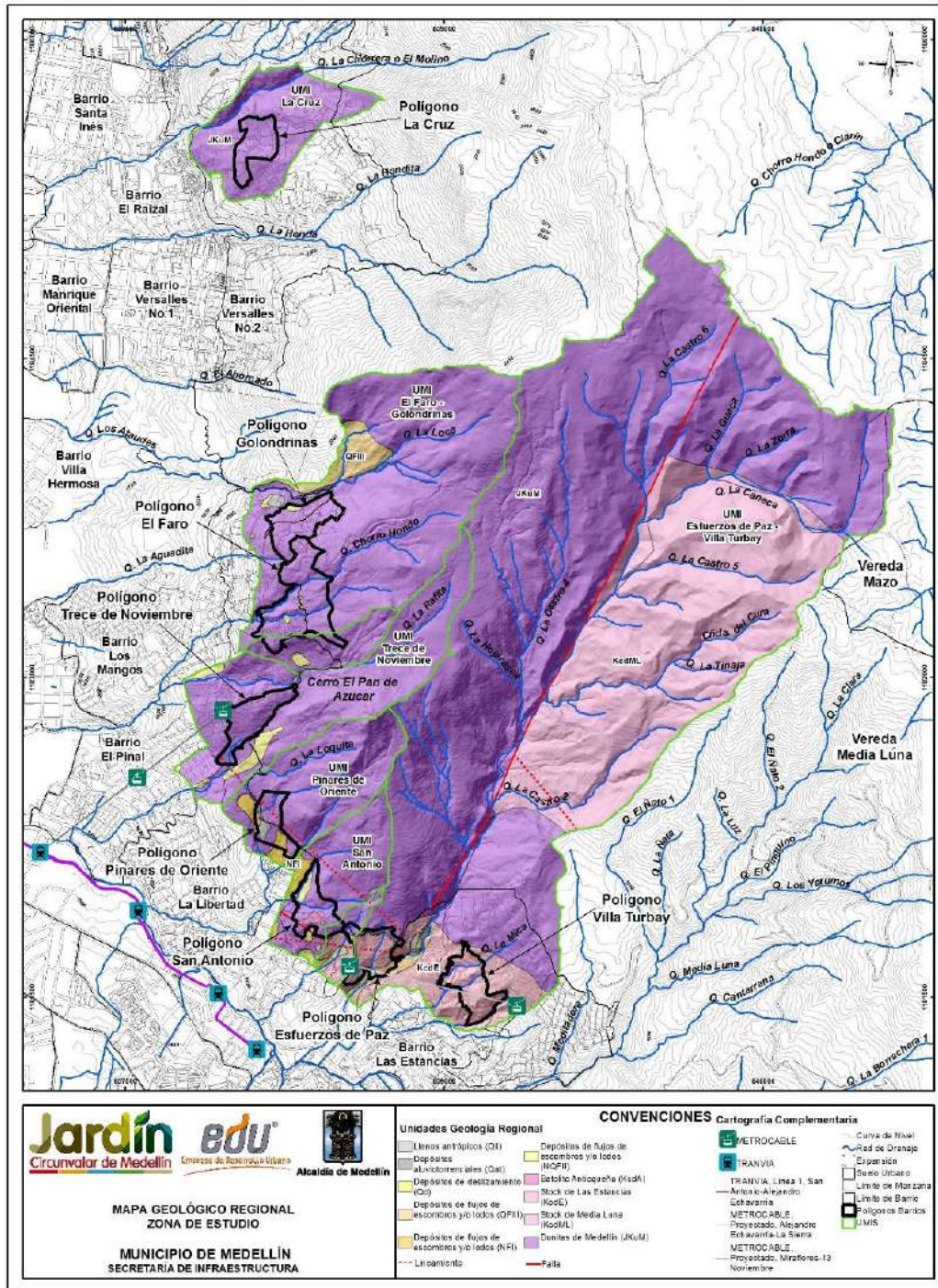
La UMI El Faro-Golondrinas se ubica sobre las unidades geológicas denominadas como Dunitas de Medellín (JKuM), depósitos de flujos de lodos y/o escombros (QFIII, NQFII), depósito de deslizamiento (Qd) y llenos antrópicos (QII). A continuación, se describen en orden cronológico todas las unidades geológicas donde se ubican los polígonos del proyecto Barrios Sostenibles, desde las más recientes hasta las más antiguas.

4.1.1 Llenos antrópicos (QII)



Se derivan de la actividad constructiva y urbanística en una región de crecimiento, la cual genera gran cantidad de escombros que se acumulan en ciertos lugares formando terraplenes. En el municipio de Medellín se encuentran principalmente hacia las zonas urbanas, otros corresponden a sitios de botaderos que se generan por la apertura de vías (Consortio Microzonificación, 2006).

Su composición es muy heterogénea, presentando desde materiales formados con normas técnicas, hasta basura, materia orgánica y escombros vertidos. Presentan extensión variable que permite cartografiarlos en escala 1:10.000 y espesores hasta de 10 m o más (Consortio Microzonificación, 2006).

Están presentes como cuerpos dispersos en toda el área de estudio, que se concentran en las zonas urbanas y centros poblados cerca al Cerro Pan de Azúcar.



**Mapa 5. Geología regional (Consortio Microzonificación, 2006)
(03_EFRGeologiaRegional_Medellin_C y 03_EFRGeologiaRegional_Medellin_T)**

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv)

Esta unidad no está reportada en la zona de estudio por el Consorcio Microzonificación (2006), pero fue encontrada durante los recorridos de campo en la parte alta de las vertientes que conforman las UMI, tanto in situ como removilizada.

Posada (2000) establece que las cenizas que se presentan en el oriente del departamento de Antioquia, aparecen como capas muy finas de carácter eólico, originadas en el Complejo Volcánico Ruiz Tolima de la Cordillera Central, las cuales abarcarían varios períodos eruptivos ocurridos en los últimos 350.000 años (Consortio Microzonificación, 2006).

4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)

Se encuentran en los valles de quebradas, con formas alargadas o de abanicos, como producto de avenidas torrenciales ocurridas principalmente en periodos de alta pluviosidad. Están formados por clastos subredondeados a redondeados con variedad de tamaños, forma y litología, envueltos en matriz arenosa, de color gris. Se caracterizan por no presentar estratificación ni selección de los materiales (Consortio Microzonificación, 2006).

En la zona de estudio se presentan principalmente en la quebrada La Castro y la quebrada Chorro Hondo.

4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)



Estos depósitos son generados por procesos de inestabilidad o movimientos de masa en vertientes o zonas de alta pendiente. Se dan principalmente por la combinación de factores como la gravedad, el agua y la intervención humana. Generalmente se encuentran en zonas de baja pendiente o topografía suave seguidas de zonas con pendiente fuerte de la cual se desprendieron los materiales que los forman (Consortio Microzonificación, 2006).

Se encuentran a lo largo de la zona de estudio como pequeños cuerpos asociados a procesos morfodinámicos.

4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)

Estos depósitos cubren la mayoría de las vertientes del municipio de Medellín con composición variable según los materiales que se encuentran en la parte alta de estas, reposando sobre el perfil de meteorización generado por las rocas del basamento (Consortio Microzonificación, 2006).

Corresponden a diferentes eventos depositacionales de tipo flujo, que por su espesor, altura, grado de consolidación, madurez, grado de incisión, y dataciones realizadas en algunos, tienen asignadas edades variables entre el Neógeno y el Cuaternario (Consortio Microzonificación, 2006).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

Están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. Son generados al producirse una saturación y pérdida de resistencia hacia las partes altas de las vertientes. Estos eventos en caso de ocurrir, le confieren a los suelos un carácter viscoso, debido a la mezcla del agua con los suelos arcillosos y limosos, de forma que pueden descender más o menos controlados por los cauces de las corrientes, arrastrando nuevos materiales y mezclándose caóticamente hasta encontrar unas condiciones de baja pendiente que permitan su depositación (Consortio Microzonificación, 2006).

Según la granulometría de los materiales que conforman la fuente, pueden dar lugar a depósitos de flujo con predominio de bloques rocosos denominados flujos de escombros o de la fracción fina (en general arcilla o limo) en cuyo caso se llaman flujos de lodos. Sin embargo, dada la mecánica del fenómeno, que no permite una selección o clasificación del material, pueden existir dentro del mismo depósito zonas que correspondan a flujos de escombros y otras a flujos de lodos (Consortio Microzonificación, 2006).

Se encuentran principalmente en la parte baja de la zona de estudio, sobre el perfil de meteorización de la Dunita de Medellín y del Stock de Las Estancias, principalmente.

4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)

Son cuerpos intrusivos de composición granitoide, con características similares al Batolito Antioqueño (KcdA) y que por su posición hace suponer una relación genética con éste. Entre los cuerpos presentes en la zona se encuentran el Stock de Media Luna (KcdML) y el Stock de Las Estancias (KcdE).

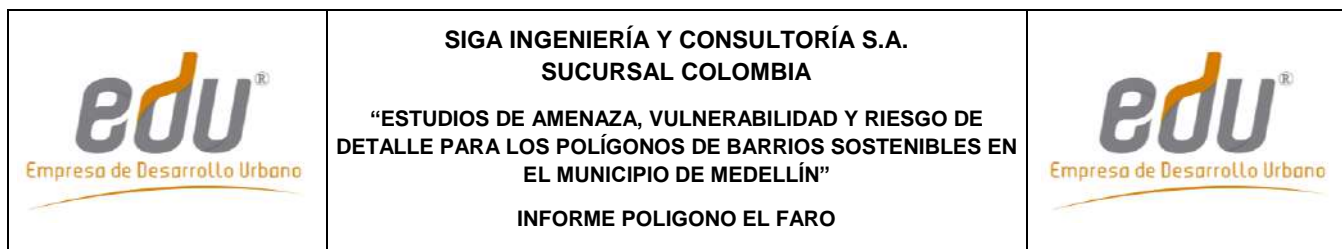
El Stock de Media Luna presenta composición cuarzodiorítica con textura fanerítica media, aflora en la vereda Media Luna por la vía principal de Santa Elena-Medellín. En la zona de estudio se encuentra al sureste, en contacto con la Dunita de Medellín. Los suelos residuales desarrollados son generalmente limo arenosos de coloración amarilla y rojiza que conservan la textura original de la roca (Consortio Microzonificación, 2006).

El Stock de Las Estancias se encuentra en el extremo suroeste del área de interés, en la parte baja del cerro Pan de Azúcar y en los alrededores de la quebrada La Castro. La composición y textura de la roca es similar al cuerpo anterior, al igual que el suelo residual (Consortio Microzonificación, 2006).

4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)

Esta unidad hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá y atraviesa el Valle del río Aburra, encontrándose en las laderas oriental y occidental. Se extiende desde Las Palmas, en los límites con el municipio de Envigado, hasta el suroccidente del municipio de San Pedro de Los Milagros, como una franja de dirección NNW, pero que particularmente en el corregimiento de Santa Elena forma un cuerpo elongado con dirección N-S (Consortio Microzonificación, 2006).

La presencia actual de esta secuencia ofiolítica, obedece a procesos tectónicos probablemente de cabalgamiento mediante una obducción de edad cretácea temprana



(Restrepo y Toussaint, 1974). Lo anterior, genera una zona de esquistos cloríticos actinolíticos, replegados en el contacto con las Anfibolitas de Medellín, además de mostrar una fuerte expresión geomorfológica en el cambio de pendiente de la cima de las colinas a la parte distal de las mismas. La dunita está en contacto fallado de bajo ángulo con la Anfibolita de Medellín en la quebrada Rodas (autopista Medellín - Bogotá) (Consortio Microzonificación, 2006).

Se trata de una roca ígnea masiva, compuesta principalmente por olivino, con contenidos menores de magnetita y cromita, esta última con concentraciones mayores hacia la zona de Santa Elena. El olivino presenta alteraciones parciales a tremolita y ésta última a minerales del grupo de la serpentina, como talco y clorita. La roca es masiva de color gris oscuro a negro, con tonalidades verdes dadas por la alteración a minerales del grupo de la serpentina, meteorizada presenta variaciones de color entre diferentes tonalidades de pardo, gris y ocre fuerte dado el alto contenido de hierro (Consortio Microzonificación, 2006)

Este tipo de roca presenta un perfil de meteorización de espesor variable entre 6 m y 40 m, dependiendo de la pendiente de la zona, en el que se encuentra desde el horizonte IB hasta el IIA principalmente, y en ocasiones hasta el horizonte III, del perfil de meteorización según Deere, D.U. y Patton F.D. (1971). En el sector del altiplano de Santa Elena, el perfil es de bajo espesor con frecuentes salientes rocosas y geoformas de disolución como dolinas, cavernas, úvalas y valles kársticos (Consortio Microzonificación, 2006).



En el municipio de Medellín, el cuerpo de dunitas presenta muy pobres condiciones geotécnicas hacia las partes altas de la comuna nororiental, generadas por el alto grado de meteorización, además de la forma particular de meteorizar en bloques rocosos de abundante matriz que es fácilmente lavada por las aguas de escorrentías, esto ha generado importantes problemas geotécnicos en estas laderas (Consortio Microzonificación, 2006).

Es la unidad dominante y con mayor extensión en la zona de estudio. Hacia la parte sureste de la zona de estudio se encuentra en contacto con el Stock de Media Luna, y hacia el noroccidente con el Stock de Las Estancias, cubierta por parches de depósitos de vertiente a lo largo y ancho de las vertientes.

4.2 GEOLOGÍA LOCAL

Como base geológica para este estudio, se hizo una recopilación de información secundaria de estudios realizados por diferentes empresas en el área, tales como DEACIVIL, INTEINSA, entre otras. En el Numeral 10.1.1 se presenta la localización de las perforaciones de dichos estudios, las cuales fueron consultadas para la elaboración del modelo geológico y fueron clasificadas en “Perforaciones Estudios Anteriores Utilizadas” y “Perforaciones Estudios Anteriores No Utilizadas” (Mapa 22).

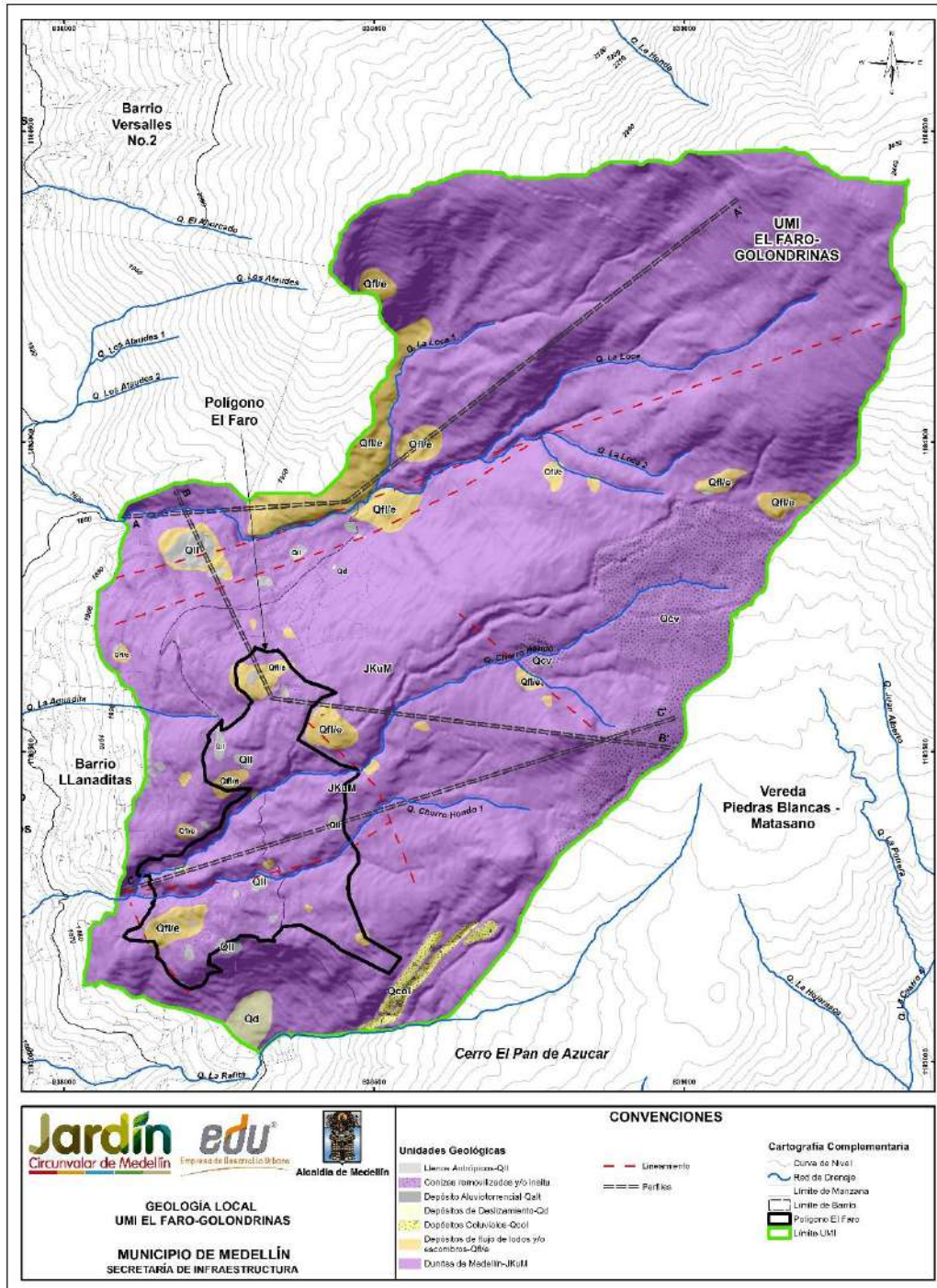
Después de correlacionar dichas perforaciones con la exploración directa e indirecta ejecutada para el presente estudio, de realizar los recorridos de campo y de utilizar herramientas como análisis multitemporal y geomorfológico, se obtuvo como resultado el

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

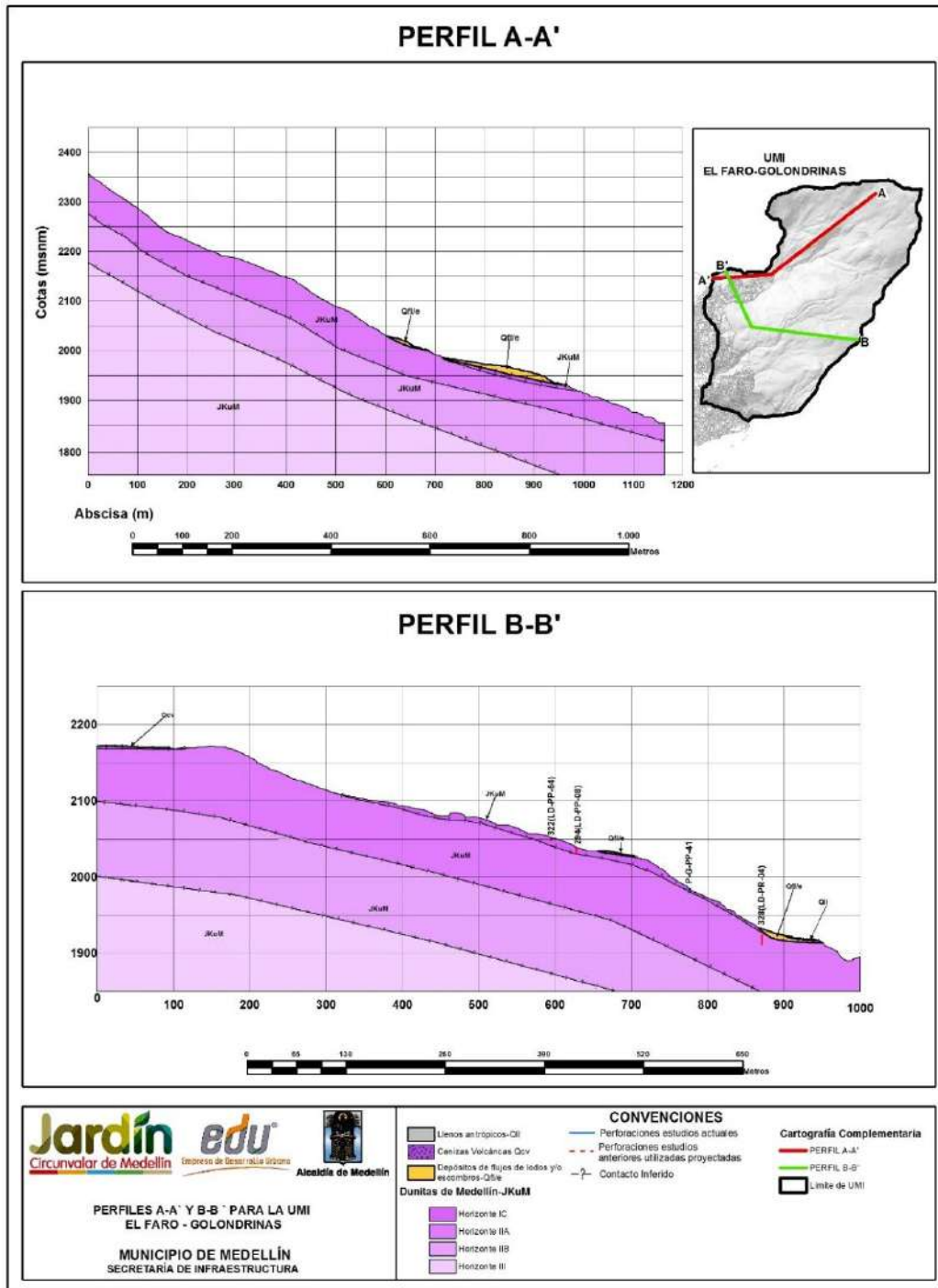
modelo geológico de la UMI El Faro - Golondrinas planteado en el Mapa 6. Además, en el Mapa 7 y en el Mapa 8 se presentan los perfiles estratigráficos típicos del modelo geológico.

Las unidades geológicas predominantes corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qf/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

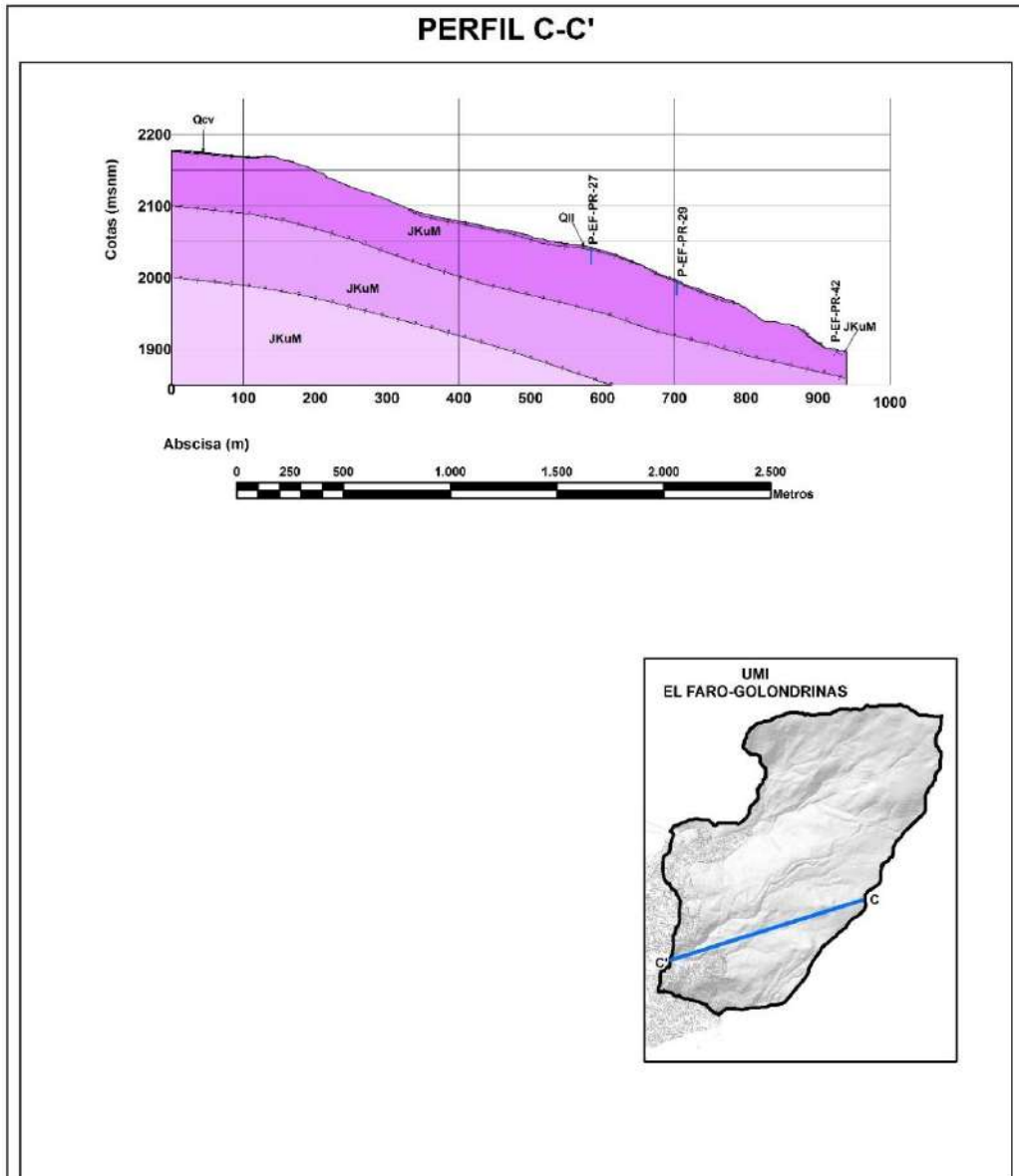
En el Polígono El Faro se presentan los Horizontes IC y IIA del perfil de meteorización de la Dunita de Medellín, el Horizonte IC en la mayor parte del polígono, y el Horizonte IIA en las vertientes de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Suprayaciendo las unidades anteriores se encuentran depósitos de flujo de lodos y/o escombros principalmente en los extremos norte y este y llenos antrópicos dispersos en toda la zona.




Mapa 6. Geología local de UMI El Faro - Golondrinas
(04_EFRGeologiaLocalUMI_Medellin_C y 04_EFRGeologiaLocalUMI_Medellin_T)



Mapa 7. Perfiles estratigráficos A-A' y B-B' de la UMI El Faro - Golondrinas (05_EFRPerfilesGeologicos_Medellin_C y 05_EFRPerfilesGeologicos_Medellin_T)



 <p align="center">PERFILES C-C' PARA LA UMI EL FARO Y GOLONDRINAS</p> <p align="center">MUNICIPIO DE MEDELLÍN SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA</p>	<p align="center">CONVENCIONES</p> <table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> Llanos aluviales-QII Cenizas volcánicas reactivadas y/o in situ Dunites de Medellín-JKuM Horizonte IC Horizonte IIA Horizonte IIB Horizonte IIC </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> Perforaciones estudios actuales Perforaciones estudios actuales proyectados Contacto Infiesto </td> <td style="vertical-align: top;"> <p align="center">Cartografía Complementaria</p> <ul style="list-style-type: none"> PERFIL C-C' Límite de UMI </td> </tr> </table>	<ul style="list-style-type: none"> Llanos aluviales-QII Cenizas volcánicas reactivadas y/o in situ Dunites de Medellín-JKuM Horizonte IC Horizonte IIA Horizonte IIB Horizonte IIC 	<ul style="list-style-type: none"> Perforaciones estudios actuales Perforaciones estudios actuales proyectados Contacto Infiesto 	<p align="center">Cartografía Complementaria</p> <ul style="list-style-type: none"> PERFIL C-C' Límite de UMI
<ul style="list-style-type: none"> Llanos aluviales-QII Cenizas volcánicas reactivadas y/o in situ Dunites de Medellín-JKuM Horizonte IC Horizonte IIA Horizonte IIB Horizonte IIC 	<ul style="list-style-type: none"> Perforaciones estudios actuales Perforaciones estudios actuales proyectados Contacto Infiesto 	<p align="center">Cartografía Complementaria</p> <ul style="list-style-type: none"> PERFIL C-C' Límite de UMI 		

Mapa 8. Perfil estratigráfico C-C' de la UMI El Faro - Golondrinas
(06_EFRPerfilesGeologicos_Medellin_C y 06_EFRPerfilesGeologicos_Medellin_T)

A continuación, se hace una breve descripción de cada una de estas unidades encontradas en la UMI El Faro-Golondrinas, desde la más reciente hasta la más antigua.

4.2.1 Llenos antrópicos (QII)

En la UMI El Faro - Golondrinas se encuentran cuerpos que en superficie abarcan longitudes entre 5 m y 30 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.5 m y 3.0 m, los cuales se concentran en la zona del Polígono El Faro y hacia la parte baja de la UMI. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-31, 294 (LD-PP-08), 326(LD-PR-02), 327 (LD-PR-03), 328 (LD-PR-04), 331 (LD-PR-07), suprayaciendo los suelos residuales de las Dunitas de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Además, se utilizaron algunas líneas geofísicas como apoyo para determinar algunos cuerpos y las Estaciones de Campo GPL33-U-EFG, GPL08-U-EF, GPL10-U-EFG, GPL11-U-EFG, GPL06-U-EFG, GPL22-U-EFG.

Se encuentran cuerpos pequeños dispersos en la zona del polígono, hacia la parte inferior de la UMI, la mayoría como resultado de la construcción de viviendas, con diferente geometría y profundidad (Figura 9).



Figura 9. Llenos antrópicos en el Polígono El Faro A) Como base para vivienda y B) Cerca de la Quebrada Chorro Hondo

El lleno antrópico encontrado en la Perforación P-EF-PR-31 está hacia la parte norte del polígono, con otros cuerpos pequeños como los hallados en las Perforaciones 326(LD-PR-02), 294(LD-PP-08). Presenta un espesor de 1.8 m, está compuesto por material limoso de color café naranja con zonas café grisáceas y negras, con fragmentos de dunitas de forma angular y tamaños de hasta 0,025 m, moderadamente meteorizados.

En la Perforación P-EF-PR-27 se encuentra un cuerpo con 1 m de espesor, ubicado hacia la parte superior del polígono, formado por la mezcla de limos y arcillas, de color café naranja a café grisáceo con bloques de ladrillo y concreto (Figura 10).



Figura 10. Llenos antrópicos en las Perforaciones P-EF-PR-31 y P-EF-PR-27

Hacia la parte inferior de la UMI se encuentran llenos antrópicos identificados en las Estaciones de Campo GPL35-U-EFG, GPL36-U-EFG, GPL37-U-EFG y GPL39-U-EFG, asociados a las viviendas de la zona, y en la perforación 331 (LD-PR-07) con 1.4 m de espesor, formado por material limo arcilloso de color café rojizo.

Hacia el extremo sur del polígono, cerca de la Quebrada Chorro Hondo 1, se encuentran llenos antrópicos con espesores entre 0.5 m y 2 m, de material limoso a limo arenoso, color pardo a pardo naranja, con fragmentos de dunitas y milonitas subangulares, y materiales antrópicos.

4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in-situ

Las cenizas volcánicas se encuentran como capas discontinuas, por lo general in situ, aunque también se hallan removilizadas. En la UMI El Faro - Golondrinas están localizadas en la unidad geomorfológica denominada como Peldaño Alto, identificadas en las Estaciones de Campo GPL23-U-EFG, GPL25-U-EFG, AMD24-U-EFG y en la perforación U-EFG-PP-01 con un espesor de 1.8 m.

En algunas partes se encuentran mezcladas con suelo residual de las Dunitas de Medellín, el tamaño de grano es principalmente limo, de color pardo amarillento y generalmente se encuentran húmedas (Figura 11).



Figura 11. Cenizas volcánicas en la parte este de la UMI El Faro - Golondrinas

4.2.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qalt)

Estos depósitos se han asociados al comportamiento torrencial de las quebradas de la zona, como la Quebrada La Loca, que ha sido referenciada en el Inventario de Procesos de Desinventar con un episodio torrencial en el año 1936, sin mayor detalle de la zona afectada, sin embargo el reporte indica el daño de una vivienda y la muerte de cuatro personas.

En el extremo noroeste de la UMI se encuentra un cuerpo con aproximadamente 200 m de longitud, identificado en las Estaciones de Campo AMD02-U-EFG, AMD03-U-EFG y AMD05-U-EFG.

Se encuentra principalmente en el cauce de la Quebrada La Loca y en algunas de sus margenes, especialmente aguas abajo de la desembocadura de la Quebrada La Loca 1. La relación matriz/fragmentos varía de 60/40 a 10/90. La matriz es areno limosa a limo arenosa de color café oscuro con naranja, se encuentra húmeda y/o saturada, presenta consistencia blanda y tenacidad baja. Los fragmentos corresponden a dunitas ligera a moderadamente meteorizados, subangulares, con tamaños de 2 mm a 1 m (Figura 20).

En algunas partes se encuentra mezclado con el depósito de vertiente de la zona y en otras con basura y llenos superficiales generados para las viviendas del sector.



Figura 12. Depósito aluviotorrencial de la Quebrada La Loca en las Estaciones de Campo AMD05-U-EFG y AMD03-U-EFG

4.2.4 Depósitos coluviales (Qcol)

Con este nombre se clasifican los depósitos generados por procesos erosivos superficiales, que están conformados por materiales finos que han sufrido poco desplazamiento y el movimiento es grano a grano. En la UMI El Faro - Golondrinas, esta unidad se encuentra en el extremo sur, en límites con el Polígono El Faro y la UMI Trece de Noviembre, en la parte media de los afluentes de la Quebrada La Rafita, generando cuerpos de forma alargada que miden entre 70 m y 250 m de longitud y entre 10 m y 20 m de ancho.

Estos depósitos fueron identificados en las fotografías aéreas de 1987 y verificados durante los recorridos de campo en las Estaciones MAD-13-U-TN, MAD-14-U-TN, KGL-04-U-EFG, KGL-05-U-EFG y KGL-06-U-EFG.

Consisten en una matriz limosa a limo arenosa con altos contenidos de materia orgánica y nódulos de hierro, de color café, húmeda, de consistencia blanda a firme y tenacidad baja a nula, con menos del 10% de fragmentos de roca, subangulares a angulares, que miden hasta 10 cm. Estos cuerpos se hallan en medio de bloques métricos in situ de las Dunitas de Medellín, los cuales quedan expuestos en superficie por erosión hídrica y/o eólica (Figura 13).



Figura 13. Depósitos coluviales típicos de la zona

4.2.5 Depósitos de deslizamiento (Qd)

En la zona de estudio, se encuentran algunos depósitos de deslizamiento de pocos metros de extensión (1 m a 3 m), no cartografiados a la escala del plano. En la parte superior de la UMI, hacia el extremo este, se encuentra un depósito de este tipo, suprayaciendo un depósito de flujo de lodos y/o escombros. Este depósito fue identificado en la Estación de Campo AMD19-U-EFG (Figura 14), es producto de un proceso morfodinámico (desgarre) y está formado por material limoso de color pardo naranja.

Hacia el extremo sur de la UMI, en el límite con la UMI Trece de Noviembre, se encuentra un depósito de deslizamiento, cerca de las Estaciones de Campo MAD-02-U-TN y MAD-03-U-TN. Tiene un espesor superior a 5 m. Es angosto en la parte superior y se amplía hacia la base. Se trata de un depósito clasto soportado con relación matriz/fragmentos de 10/90 que varía en la parte superior, donde tiene acumulación de material fino mezclado con materia orgánica, el color varía de café oscuro a negro. En la parte distal del depósito donde se hace más ancho se encuentra acumulación de fragmentos de roca con tamaños menores que 1 m, las rocas son dunitas moderadamente meteorizadas y angulares.



Figura 14. Depósito de deslizamiento en la parte alta de la UMI El Faro-Golondrinas

El material de este depósito proviene del Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, que se encuentra en el escarpe de la parte media de la UMI, dejado por una cárcava inactiva, en la cual están contenidos otros procesos menores actualmente activos. Además, contiene superficialmente materiales antrópicos como basura y escombros, provenientes de las viviendas ubicadas en la parte superior del escarpe mencionado anteriormente.

4.2.6 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)

Se encuentran distintos cuerpos distribuidos aleatoriamente en toda la UMI, especialmente en la parte media y baja, en algunos casos cubiertos de forma parcial por lodos antrópicos. Tienen espesores entre 3 m y 10 m y abarcan longitudes entre 15 m y 470 m. Se encontraron en las Perforaciones P-EF-PR-39, 10 (P1), 11 (P2), 291 (LD-PP-03C), 299 (LD-PP-18), 301 (LD-PP-22), 319 (LD-PP-61), 322 (LD-PP-64), 323 (LD-PP-66), 328 (LD-PP-04) y 331 (LD-PP-07), y así como en las Estaciones de Campo AMD01-U-EFG, AMD02-U-EFG, AMD04-U-EFG, AMD13-U-EFG, AMD14-U-EFG, AMD15-U-EFG, AMD19-U-EFG, AMD35-U-EFG y KGL01-U-EFG.

Es importante tener en cuenta que un depósito de flujo de lodos y/o escombros (de vertiente) puede presentar grandes variaciones en cuanto a su fábrica (relación matriz/fragmentos), tanto lateral como en profundidad, haciendo que existan diferencias en cuanto a la concentración de fragmentos y/o matriz (matriz soportado o clasto soportado) en un mismo cuerpo. Por lo anterior, de manera general se ha denominado a esta unidad litológica como depósitos de flujos de lodos y/o escombros a todos los cuerpos de este tipo encontrados en la zona de estudio.

En este estudio los depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e) agrupan las unidades de depósitos cartografiados por el Consorcio Microzonificación (2006) como QFIII, NFI y NQFII, cuya subdivisión fue hecha con herramientas de apoyo como datación, grado de incisión y madurez (grado de meteorización), lo cual no es objeto del presente estudio. Debido a lo anterior y sumado a que los cuerpos identificados en la zona de

estudio presentan el mismo grado de meteorización, todas estas unidades se agruparon de manera general como Qf/e.

Para la UMI El Faro - Golondrinas se identificaron depósitos de flujos de lodos y/o escombros principalmente hacia la parte media e inferior, y al interior del Polígono El Faro. Los depósitos encontrados al noreste de la UMI, se caracterizaron gracias a las Estaciones de Campo AMD15-U-EFG, AMD19-U-EFG y KGL01-U-EFG. Tienen una relación matriz/fragmentos de 70/30, con matriz limosa, de color naranja, húmeda, de consistencia blanda y tenacidad media. Los fragmentos corresponden a dunitas milonitizadas, moderadamente meteorizados, subangulares y con tamaños menores a 10 cm. Presentan espesores de al menos 2 m.

Los depósitos localizados hacia el oeste de la UMI son los más extensos de la zona de estudio. Se definieron tres depósitos con espesores de hasta de 10 m (Figura 15). Para ello fue fundamental el apoyo de fotografías aéreas, el uso de perfiles topográficos y la información tomada en las Estaciones de Campo AMD01-U-EFG, AMD02-U-EFG, AMD04-U-EFG y con la Línea Geofísica P-G-LG-03. Presentan relación matriz/fragmentos de 80/20, con matriz limosa de color pardo anaranjado con café, húmeda a saturada, de consistencia blanda y tenacidad media a alta. Los fragmentos corresponden a dunita y esquistos, subredondeados, con tamaños entre 50 cm y 1 m.

Los depósitos encontrados al interior del Polígono El Faro, son cortos en extensión. Estos se definieron de acuerdo con las Perforaciones P-EF-PR-39, 323 (LD-PP-66), 301 (LD-PP-22) y 299 (LD-PP-18) y con las Estaciones de Campo AMD13-EFG y AMD14-EFG. Estos depósitos presentan espesores de al menos 4 m, con relación matriz/fragmentos 95/5, matriz limosa de color pardo anaranjado, húmeda, de consistencia blanda y tenacidad media. Los fragmentos corresponden a dunitas, moderadamente meteorizadas, subredondeados, con tamaños menores a 7 cm (Figura 16).



Figura 15. Depósito de flujo de lodos y/o escombros ubicado en la parte superior de la UMI



Figura 16. Depósito de flujos de lodos y/o escombros cerca del Polígono El Faro

4.2.7 Dunitas de Medellín (JKuM)

Esta unidad fue identificada en la zona de estudio, mediante la exploración en profundidad y los recorridos de campo, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Fueron halladas en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-28, P-EF-PR-29 P-EF-PR-30, P-EF-PR-31, P-EF-PR-39, P-EF-PR-42, U-EFG-PP-01 y en las Líneas Geofísicas P-EF-LG-04 y P-EF-LG-02. En esta unidad es común encontrar evidencias de falla, tales como espejos, milonitas, salbanda (tacto jabonoso) y brechas tectónicas (cataclasitas), por lo que se podría clasificar como dunitas cizalladas.

El Horizonte IB se localiza en la parte alta y media de la UMI, específicamente donde se tienen las zonas con pendientes suaves correspondientes a las unidades geomorfológicas de Altiplano y Peldaño. De acuerdo con las Perforaciones P-EF-PR-30, P-EF-PR-42 y U-EFG-PP-01, se tiene que este material presenta espesores entre 1.5 m y 10 m. Consiste en un suelo de color pardo naranja, en algunas partes con tonalidades verdosas debido a la presencia de minerales como talco y clorita, con tamaño de grano limo y arcilla, húmedo, consistencia firme a blanda y tenacidad baja. Contiene raíces, micas y nódulos de hierro con longitudes de hasta de 5.0 mm.

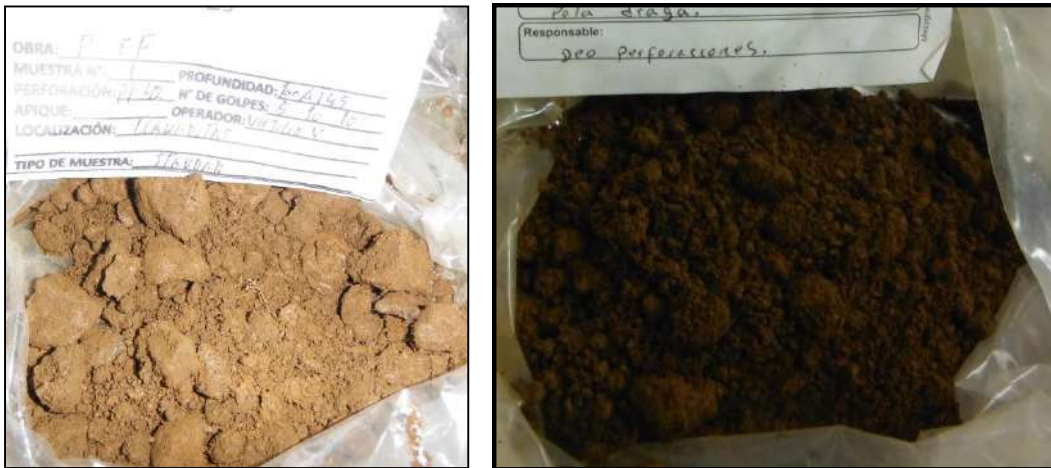


Figura 17. Horizonte IB reportado en las perforaciones P-EF-PR-30 y P-EF-PR-42

Además, en las Estaciones de Campo SFJ08-U-EFG, SFJ09-U-EFG, AMD42-U-EFG, AMD43-U-EFG, AMD44-U-EFG, AMD45-U-EFG, AMD46-U-EFG, GPL28-U-EFG, GPL29-U-EFG y KGL05-EFG se identificó el Horizonte IB como un suelo limoso con alto contenido de nódulos de hierro de hasta 6.0 mm de longitud, consistencia blanda y húmedo, como se ilustra en la Figura 18.



Figura 18. Horizonte IB de meteorización en estación AMD42-U-EFG

El Horizonte IC se encuentra en las Perforaciones P-EF-PR-30, P-EF-PR-31, P-EF-PR-27, P-EF-PR-29, P-EF-PR-39 y P-EF-PR-42 y en las Líneas Geofísicas P-EF-LG-04 y P-EF-LG-02, donde muestra espesores de hasta 10 m. En todos los casos se trata de un horizonte de meteorización de una brecha (Figura 19). El suelo es limo arcilloso, de color pardo anaranjado con manchas verdes, húmedo y con tenacidad media. Contiene bloques de dunitas, frescos y con estructura esquistosa. En las Estaciones de Campo GPL02-EF y KGL05-EF se encuentra este horizonte en taludes de 2.0 m de altura, en el cual el suelo residual exhibe estructura esquistosa y bloques angulosos de dunitas, como se ilustra en la Figura 19.

El Horizonte IIA tiene espesores inferidos superiores a 20 m, de acuerdo con las Perforaciones P-EF-PR-30, P-EF-PR-31, P-EF-PR-27, P-EF-PR-29, P-EF-PR-28, P-EF-PR-39, las Líneas Geofísicas P-EF-LG-04 y P-EF-LG-02 y las Estaciones de Campo AMD04-EF, AMD05-EF, MAD04-G, AMD16-EF, entre otras. Este horizonte de meteorización está formado por bloques de dunitas y dunitas milonitizadas con longitudes inferiores a 30 cm en promedio, con suelo limoso de color pardo naranja a pardo rojizo, que varía entre 80% y 30%. La roca se encuentra moderadamente meteorizada, altamente fracturada y diaclasada, presenta alteraciones a serpentina y talco, con pátinas de oxidación negras y pardas. Se observan igualmente espejos de falla y zonas de cizalla.

En la Perforación P-EF-PR-39 se encontró el Horizonte IIA de diques de rocas graníticas que intruyen las Dunitas de Medellín. Las rocas graníticas varían entre diorita y tonalita, están fracturadas, tienen tamaños de hasta 0,05 m de diámetro, forma angular y están alteradas.

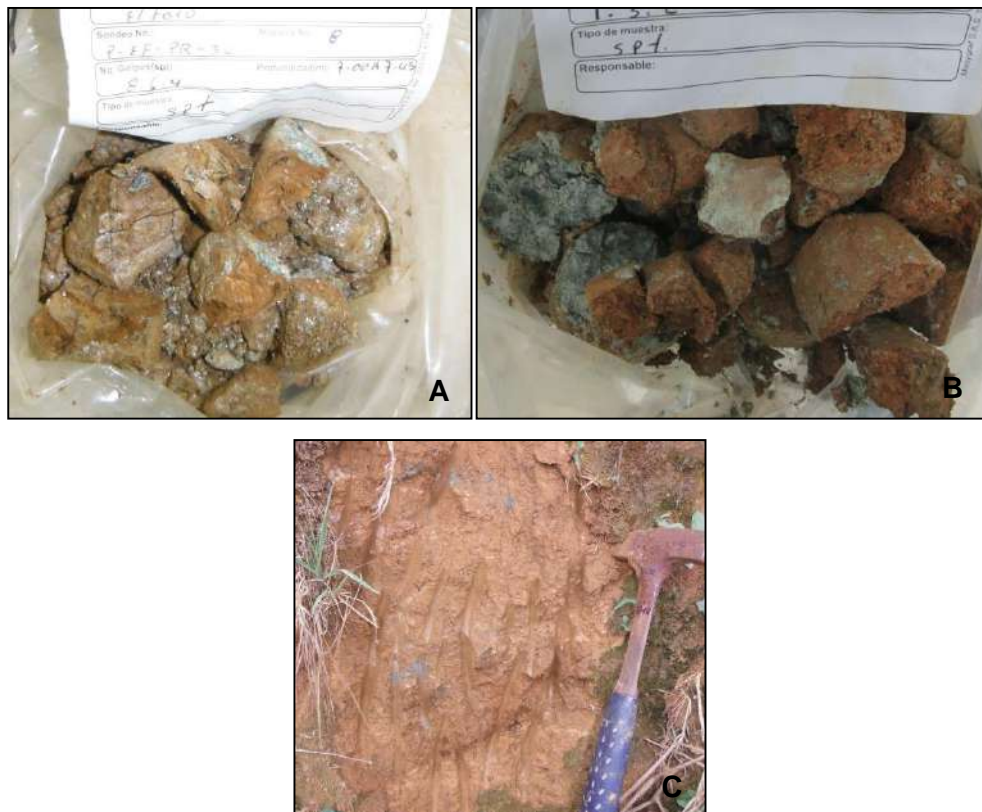


Figura 19. Horizonte IC de meteorización A) En la perforación P-PR-EF-30, B) En la perforación P-PR-EF-39 y C) En la estación de campo GPL02-EF

En las Estaciones de Campo SFJ03-U-EFG, SFJ05-U-EFG y GPL15-U-EFG, es común encontrar zonas donde el suelo residual ha sido lavado, quedando bloques de roca frescos en superficie (Figura 20A) de tamaños menores de 50 cm. Los bloques están

fuertemente diaclasados y cizallados como se ilustra en la Figura 20B y en la Figura 20C, en la parte alta de la margen derecha de la Quebrada La Loca.



Figura 20. Horizonte IIA de meteorización A) Bloques en superficie por erosión superficial y B) y C) Bloques de dunitas fuertemente diaclasados

Además, cabe resaltar que aunque en la zona de estudio las dunitas están afectadas tectónicamente, hacia el sur se halla salbanda de dunitas (tacto jabonoso) y hacia el norte y noreste de la UMI se encuentran zonas en donde las brechas tectónicas son más evidentes.

La salbanda de dunitas (tacto jabonoso) fue identificada en las Estaciones AMD01-EF y AMD09-U-EFG, y en la Perforación P-EF-PP-29, localizadas en la parte superior del Polígono El Faro (Figura 29), cerca del CAI (límites con la UMI del Trece de Noviembre) y sobre la margen izquierda de la Quebrada La Loca. Este suelo residual tiene estructura esquistosa, con minerales verdes tales como talco, clorita y serpentina, de aspecto jabonoso.





Figura 21. Horizonte IC de Dunitas con estructura esquistosa

Las brechas tectónicas fueron encontradas en las Estaciones de Campo AMD01-G, MAD01-G y en las Perforaciones P-G-PR-33 y P-EF-PR-34 (Figura 22). En la Perforación P-EF-PR-34, entre 14 m y 16 m se presenta una brecha soldada donde se identifican los bloques angulares de dunitas, embebidos en un suelo tamaño arena completamente consolidado (duro-cementado). Se encuentra en contacto neto con la dunita, tal y como se observa en la Figura 22B.



Figura 22. Brecha de Dunitas A) En la estación AMD01-G, B) En la perforación P-EF-PR-34 y C) Sobre la Qda. La Loquita

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

5. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

5.1 GEOMORFOLOGÍA REGIONAL



El Valle de Aburrá se ubica en un valle profundo comprendido por dos altiplanos o superficies de erosión cuyas alturas oscilan entre los 2200 msnm y 3200 msnm. Regionalmente, las geoformas más sobresalientes corresponden a superficies de erosión localizadas en el altiplano de Santa Elena, escarpes erosivos, superficies con diversos grados de incisión desarrollados sobre materiales in situ y transportados y geoformas asociadas a estructuras geológicas. A continuación, se describen e ilustran las macrounidades o bloques y las unidades geomorfológicas que se encuentran en la zona de estudio.

5.1.1 Macrounidades geomorfológicas

Las macrounidades o bloques se asocian a unidades de paisaje en escalas regionales relacionadas genéticamente en cuanto a su geología, procesos de erosión y controles estructurales.

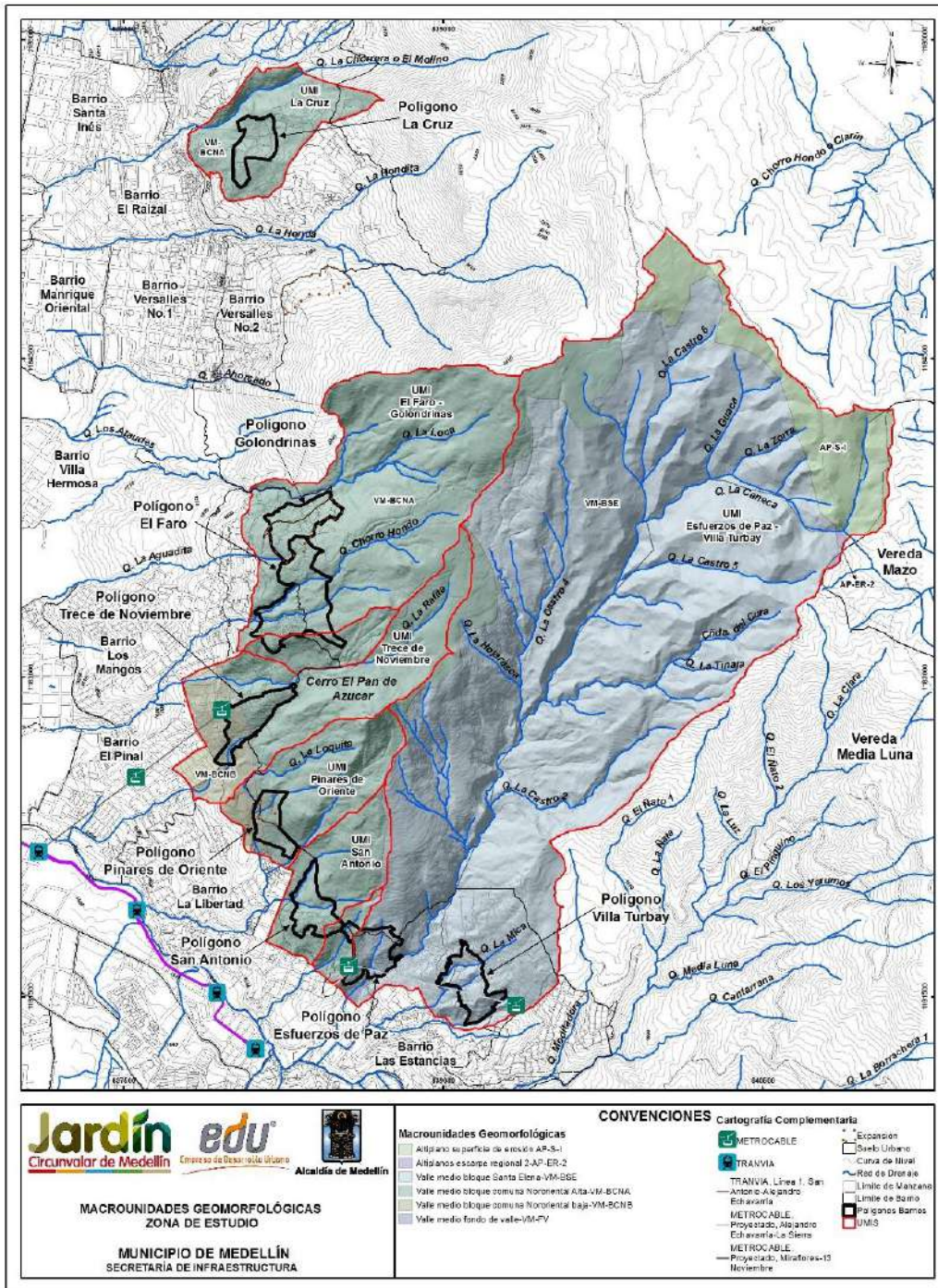
La UMI El Faro - Golondrinas se ubica sobre la macrounidad denominada como Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA). A continuación se presenta la descripción de todas las macrounidades.

- ✓ Superficie de erosión S-I (AP-S-I), ubicada a altura del corregimiento de Santa Elena hacia el oriente de Medellín. Se encuentran entre alturas de 2500 msnm y 2600 msnm y se caracterizan por ser superficies con baja incisión pertenecientes al altiplano mencionado anteriormente en medio de sistemas de falla.
- ✓ Escarpe erosivo regional ER-2 (AP-ER-2), que limita las superficies de erosión descritas en el párrafo anterior. Genéticamente corresponden a zonas donde hubo un levantamiento tectónico que genera una superficie con un gradiente que facilita la ocurrencia de procesos de erosión, denominándose de esta manera como escarpe erosivo. Esta macrounidad es observada como un conjunto de lomos bajos exhibiendo un alto grado de incisión en comparación con la superficie de erosión.
- ✓ Valle medio del Bloque Santa Elena (VM-BSE), ubicado sobre la margen derecha de la Quebrada Santa Elena. Se trata de lomos con tendencia S-N a SSE-NNW, de topes redondeados y vaguadas poco incisadas. Cerca del sector de la Estancias y La Sierra se tienen controles estructurales evidenciados en lineamientos y descansos topográficos denominados peldaños.
- ✓ Valle medio del Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA), el cual se desarrolla geológicamente sobre las denominadas Dunitas de Medellín y de manera local sobre depósitos de vertiente. Su clasificación y característica principal es el control estructural presente, exhibiendo así un relieve escalonado sobre las laderas. Comprende un sistema de lomos con tendencia E-W de topes suaves y estrechos cañones.



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

- ✓ Valle medio del Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB), comprendiente a sistemas de lomos con tendencia N-S de topes suaves y estrechos cañones con control estructural como lineamientos con tendencia N-S. Esta unidad se desarrolla geológicamente sobre suelos depositados como aluviotorrenciales y aluviales asociados a la Qda Santa Elena.
- ✓ Valle medio de fondo de Valle (VM-FV), el cual corresponde a zona planas de baja inclinación e incisión asociadas a depósitos aluviales del fondo del Valle de Aburrá.

En el Mapa 9 se muestra la distribución de estas macrounidades que acaban de ser descritas.



Mapa 9. Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio (07_EFRMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellín_C y 07_EFRMacroUnidadesGeomorfológicas_Medellín_T)



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

5.1.2 Unidades Geomorfológicas

Las unidades geomorfológicas se detallan en escalas un poco más locales, haciendo referencia a aquellas geoformas con relaciones en cuanto a su geometría, la homogeneidad del proceso que las genera, la geología y su edad. Dentro de las macrounidades descritas anteriormente se puede encontrar diversas unidades geomorfológicas, es decir, una misma unidad geomorfológica puede estar presente en varias macrounidades.

La UMI El Faro-Golondrinas se ubica sobre la Unidad de Lomos (L), Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados (SSDMI) y Peldaños (PÑ). A continuación se presenta la descripción de todas las unidades geomorfológicas y se menciona la macrounidad donde se encuentran.

- ✓ Unidad de lomos bajos (LB), la cual se encuentra en la macrounidad denominada Altiplano Escarpe Regional 2. Son lomos alargados sin ninguna orientación y con bajo grado de disección.
- ✓ Unidad de superficies con baja incisión (SBI), la cual se encuentra en la macrounidad denominada como Altiplanos Superficie de Erosión I y corresponde a geoformas de lomos alargados localizadas cerca de zonas escarpadas.
- ✓ Unidad de lomos (L), la cual se encuentra en las macrounidades denominadas Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta y Valle Medio Bloque Santa Elena. Se caracterizan por estar orientados hacia el eje fluvial principal, corresponden a filos alargados y estrechos.
- ✓ Unidad de Peldaños (PÑ): Esta unidad se encuentra en las macrounidades: Valle medio-Bloque Comuna Nororiental Alta, Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Baja, y Valle Medio-Bloque Santa Elena, corresponden a superficies de baja inclinación de gran continuidad.
- ✓ Unidad de rasgos morfotectónicos (RMT), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta y corresponden a geoformas asociadas estructuralmente a lineamientos, fallas y contactos entre unidades geológicas.
- ✓ Unidad de superficies suaves depósitos moderadamente incisados (SSDMI), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Alta. Se desarrolla sobre depósitos de vertiente (flujo de lodos y/o escombros) y corresponde a zonas continuas de baja inclinación e incisión moderada.
- ✓ Unidad de superficies suaves en depósitos poco incisados (SSDPI), la cual se encuentra en las macrounidades denominadas como Valle Medio Bloque El Salvador y Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja. Se desarrollan sobre depósitos de vertiente (flujo de lodos y/o escombros) y corresponden a zonas continuas de baja inclinación y poca incisión.
- ✓ Unidad de Vertiente en suelos residuales moderadamente incisados (VSRMI), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio Bloque Comuna Nororiental Baja.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

La localización de esta geoforma varía de acuerdo con la unidad geológica presente. Corresponden a laderas con filos estrechos y topes agudos. Para el caso de estudio se desarrollan sobre suelos residuales de las Dunitas de Medellín.

- ✓ Unidad de Escarpes semicirculares superiores (ESCS), la cual se encuentra en la macrounidad Valle Medio-Bloque Santa Elena. Se encuentra en zonas escarpadas y superficies rocosas hacia los límites con los altiplanos, caracterizándose por presentar fuertes pendientes.

La localización en planta de estas unidades geomorfológicas que acaban de ser descritas se muestra en el Mapa 10.

5.2 GEOMORFOLOGÍA LOCAL

En este capítulo se realiza el análisis para la definición de las unidades geomorfológicas de la UMI del Polígono El Faro, a partir de las geoformas levantadas en campo, el mapa de pendientes, la geología local de la zona de estudio y los procesos morfodinámicos que se observan en ella.

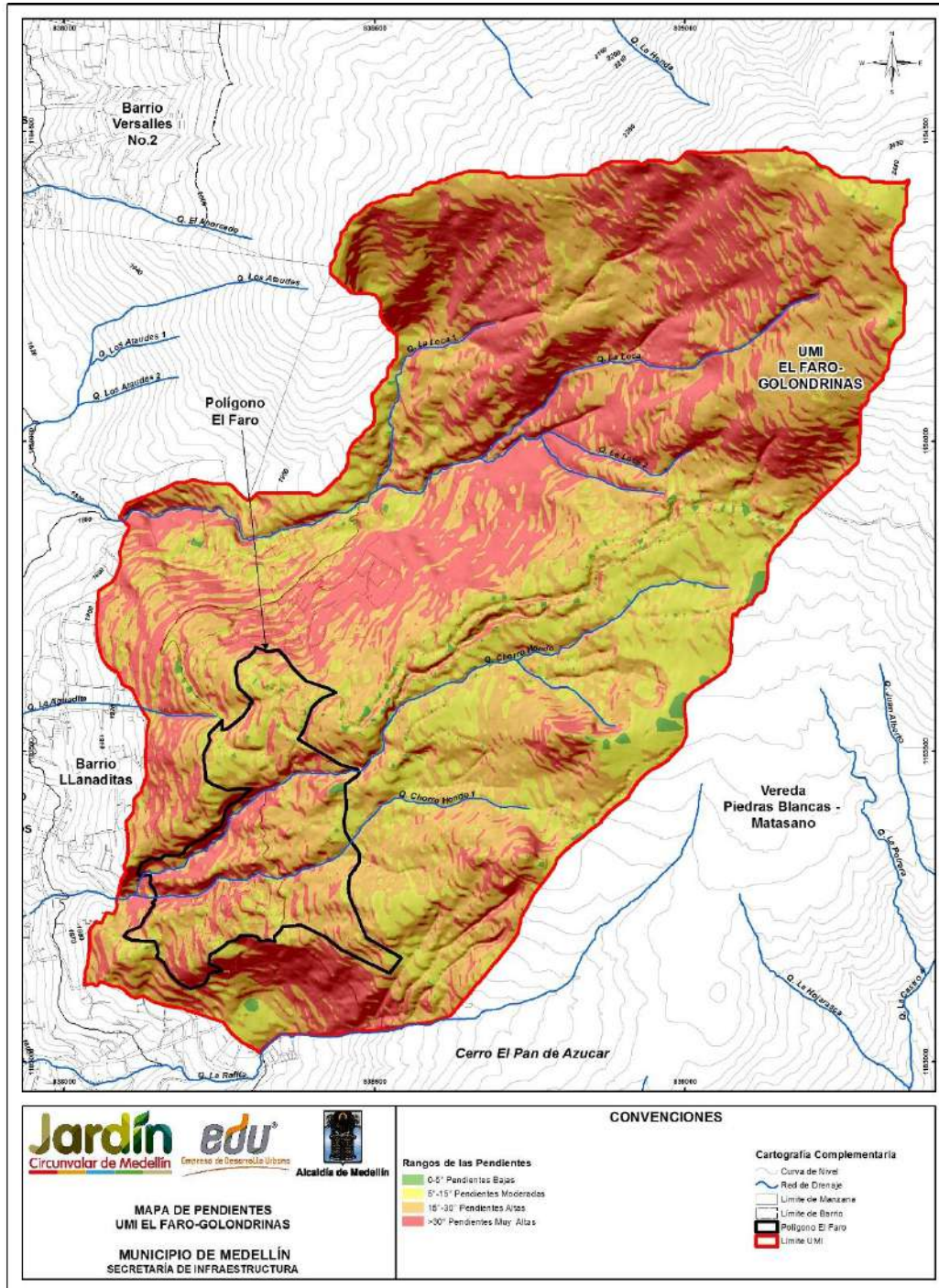
Se definieron rangos de pendiente de acuerdo con el ángulo de inclinación que presenta el terreno, el cual es expresado según el Acuerdo Metropolitano N°9 de 2012 del AMVA (Tabla 1). Además, se revisaron fotografías aéreas para la fotointerpretación y recorridos de campo para delimitación e identificación de la morfogénesis de las unidades geomorfológicas.

Tabla 1. Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local



Rango	Clasificación	Rasgo Geomorfológico	Tipo de Proceso
0° a 5°	Baja	Planicies	Erosión superficial
5° a 15°	Moderada	Superficies Suaves	Erosión superficial
15° a 30°	Alta	Superficies Moderadas	Movimientos en masa y Erosión superficial
> 30°	Muy Alta	Laderas Empinadas	Movimientos en masa y Caída de rocas

Haciendo uso de Herramientas SIG se obtuvo el mapa de pendientes que se presenta en el Mapa 11, de manera que pueden hacerse las siguientes observaciones:

- ✓ Las zonas resaltadas en color verde son las de pendientes bajas (0° a 5°), correspondientes a planicies. Estas zonas son las menos predominantes y están asociadas a rasgos tectónicos denominados como peldaños o descansos y también a superficies suaves modeladas en depósitos y explanaciones antrópicas.
- ✓ Las zonas con pendientes moderadas (5° a 15°) y altas (15° a 30°) corresponden a las sombreadas de colores amarillo y naranja, respectivamente. Son las predominantes en el Polígono El Faro. Corresponden a superficies suaves y moderadas modeladas por la incisión de las quebradas y sus afluentes.
- ✓ Las zonas con pendientes muy altas (>30°) se resaltan con color rojo. Éstas son caracterizadas por presentar vertientes escarpadas moldeadas en roca, estando algunas hoy día cubiertas por la vegetación.

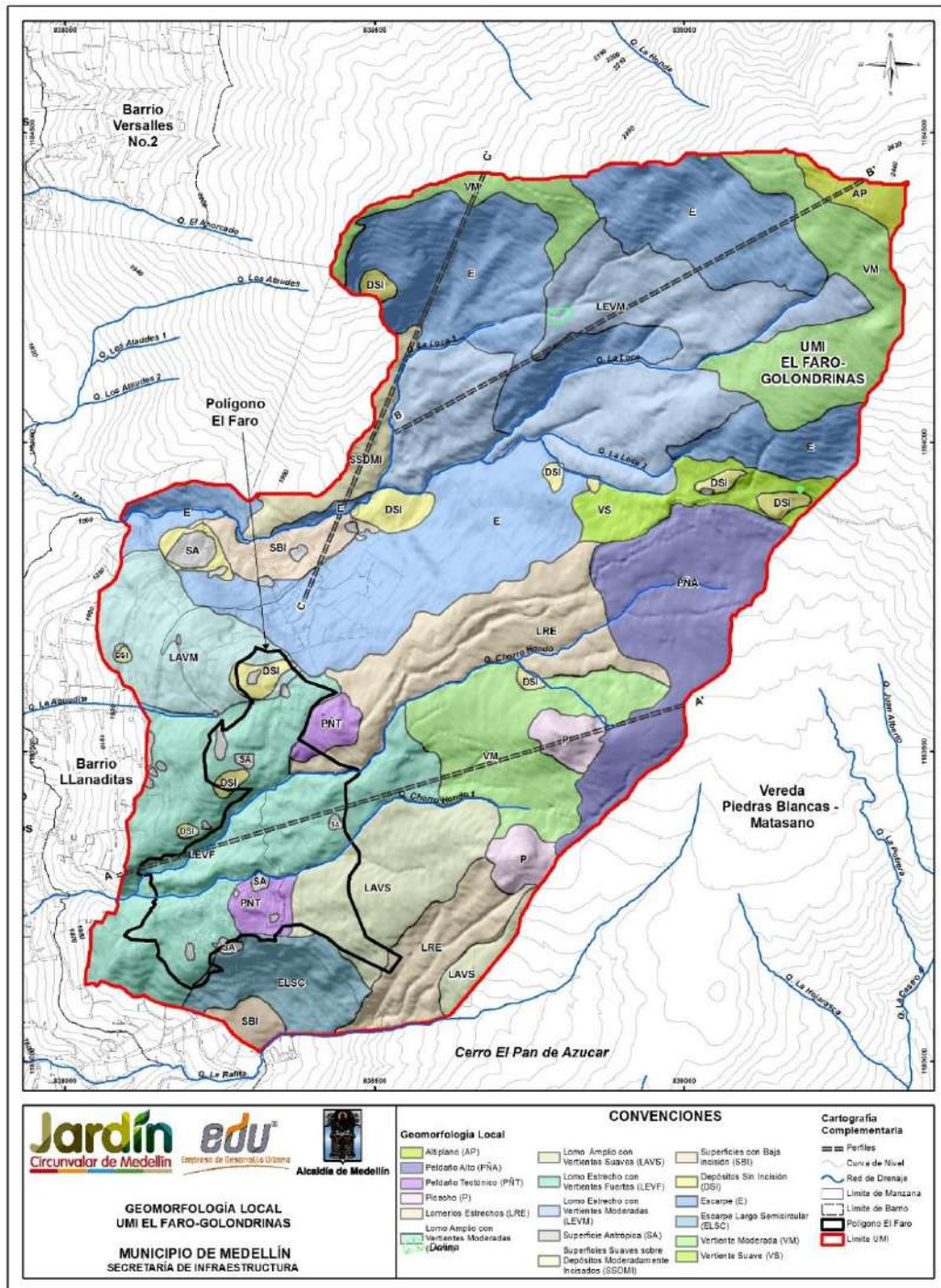


Mapa 11. Análisis de pendientes UMI El Faro – Golondrinas
(09_EFRPendientes_Medellin_C y 09_EFRPendientes_Medellin_T)

	<p align="center"> SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO </p>	
---	--	---

Teniendo en cuenta el análisis del mapa de pendientes, los recorridos de campo y la geología local de la zona de estudio, se lograron definir 18 unidades geomorfológicas que se describen detalladamente en los Numerales 5.2.1 a la 5.2.18 de este capítulo.

En el Mapa 12 se presentan las unidades geomorfológicas de la UMI y de la Figura 23 a la Figura 25 se muestran los perfiles esquemáticos de las unidades más sobresalientes. Las unidades predominantes en esta UMI son las de lomos tales como Lomo Amplio con Vertientes Moderadas-LAVM y Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes-LEVF.



Mapa 12. Unidades geomorfológicas UMI El Faro – Golondrinas
 (10_EFRGeomorfologiaLocal_Medellin_C y 10_EFRGeomorfologiaLocal_Medellin_T)

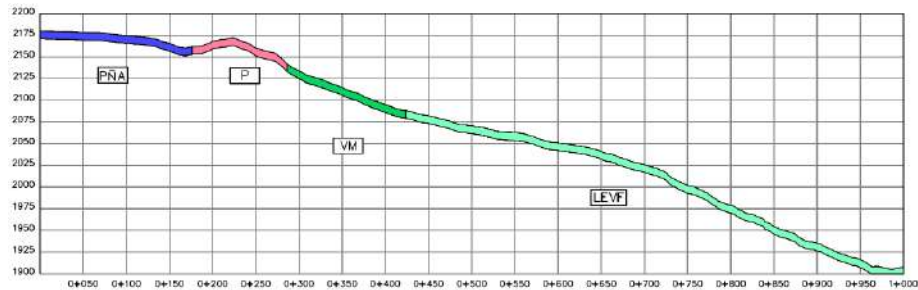


Figura 23. Perfil geomorfológico A-A´

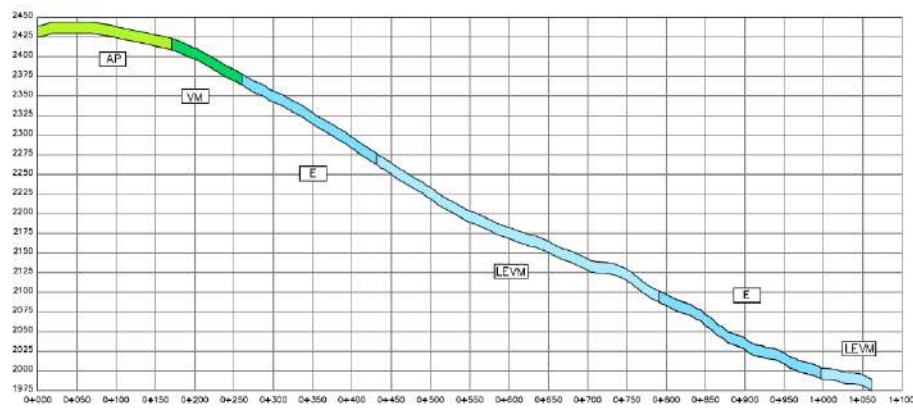


Figura 24. Perfil geomorfológico B-B´

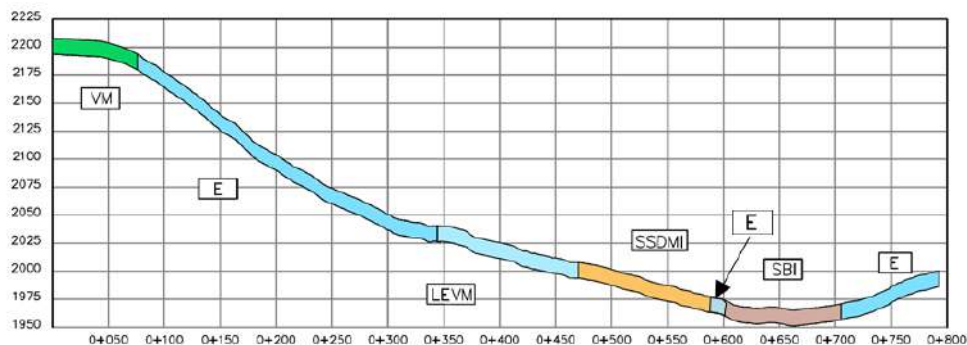


Figura 25. Perfil geomorfológico C-C´

5.2.1 Unidad de Altiplano AP

Se localiza en el extremo nororiental de la UMI, en las cercanías del Altiplano de Santa Elena entre las cotas 2141 msnm y 2444 msnm. Esta unidad se caracteriza por presentar pendientes suaves menores de 5°, compone una superficie plana continua casi horizontal con baja incisión (Figura 26). Litológicamente se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

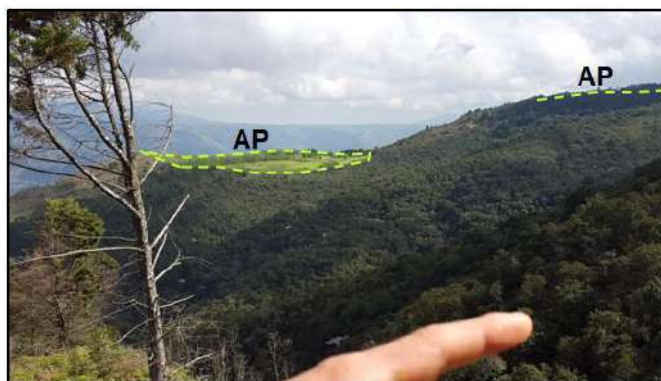


Figura 26. Unidad de Altiplano AP

5.2.2 Unidad de Peldaño Alto PÑA



Se localiza en el extremo oriental de la UMI hacia los límites con la UMI del Trece de Noviembre. Esta geoforma se encuentra dispuesta en sentido preferencial NE en la parte alta de la Quebrada Chorro Hondo, entre las cotas 2206 msnm y 2134 msnm. Se relaciona con rasgos estructurales asociados a descansos de falla, ya que limita tanto en la parte superior como inferior por escarpes y lineamientos de gran continuidad observados en quiebres de pendiente y lomos deflectados. Presenta baja inclinación entre los 0° y 5° (superficies suaves), son de gran continuidad encontrándose desde la parte alta de la UMI hasta el camino que conduce hacia el Cerro Pan de Azúcar, presenta bajo grado de incisión y forma irregular. Litológicamente se desarrolla sobre los Horizontes IB y IC de las Dunitas de Medellín. En la Figura 27 se resalta sombreada dicha unidad.



Figura 27. A) Unidad de Peldaño Alto PÑA, al fondo el Cerro Pan de Azúcar CPA y B) Unidad de Vertiente Suave VS

5.2.3 Unidad de Peldaño Tectónico PÑT

Se encuentran en la parte media de la UMI, entre las cotas 1860 msnm y 1872 msnm y corresponde a la expresión geomorfológica denominada “silleta o silla de montar”. Como

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

su nombre lo indica, son geoformas que se caracterizan por presentar dos extremos elevados en cuya mitad se ubica una depresión (como una silla para montar a caballo), este tipo de depresiones son generadas por la presencia de planos de debilidad donde se produce con mayor facilidad la meteorización de una unidad geológica debido a la presencia de estructuras geológicas como lineamientos y fallas. Esta unidad fue cartografiada con la ayuda de fotografías aéreas, cartografía y mapa de pendientes. No se obtuvo una imagen representativa de la misma.

5.2.4 Unidad de Picacho P

Se encuentra en la parte media de la UMI en donde se tienen los nacimientos de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Incluye el Cerro Pan de Azúcar (CPA) y un conjunto de pequeños cerros aislados (Figura 28). Se caracteriza por encontrarse en el rango de pendientes mayores que 30°, son cerros que alcanzan cotas desde 2118 msnm a 2172 msnm, siendo muy distinguibles en el relieve. Presentan formas desde ovaladas, alargadas hasta redondas, sus vertientes son fuertes a escarpadas con topes convexos. Litológicamente se encuentra sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. En esta unidad geomorfológica se desarrollan procesos de inestabilidad como caída de rocas, favorecidos además por procesos de erosión superficial debido al agua de escorrentía.

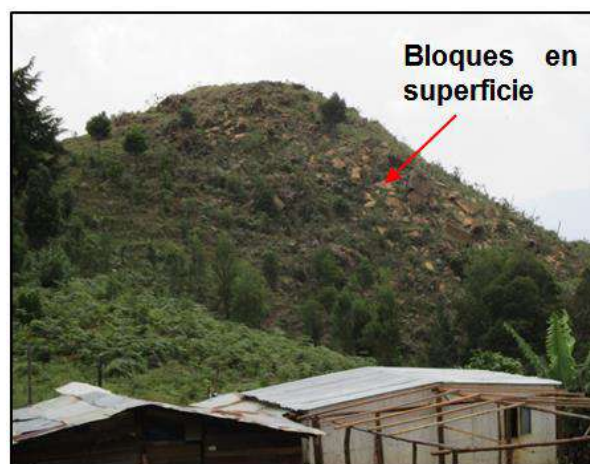


Figura 28. Unidad de Picacho

5.2.5 Unidad de Lomeríos Estrechos LRE

Se encuentra localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Rafita en las inmediaciones de la UMI del Trece de Noviembre y en la parte alta del Polígono El Faro, sobre la margen derecha de la Quebrada Chorro Hondo. Esta geoforma se caracteriza por presentar topes estrechos subredondeados, con pendientes variables entre 5° y 15° de inclinación y longitudes de hasta 500 m. Sus laderas son cortas, convexas con inclinaciones menores que 15°. De manera general esta geoforma presenta formas alargadas con grado de incisión moderado. Los drenajes presentes en esta unidad son

afluentes de la Quebrada La Rafita y Chorro Hondo. Litológicamente esta unidad geomorfológica se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín (Figura 29).

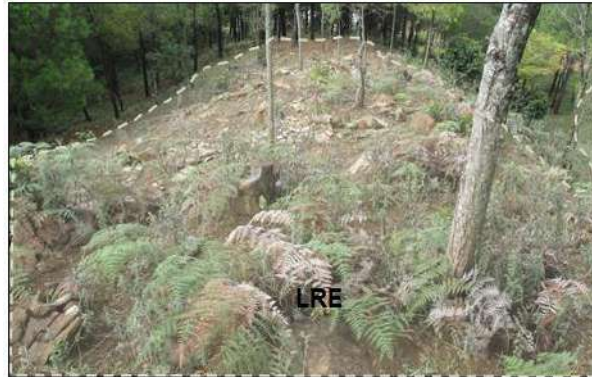


Figura 29. Unidad de Lomeríos Estrechos LRE

5.2.6 Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM

Se localiza hacia el norte de la UMI, sobre la margen izquierda de la Quebrada La Loca 1. Esta unidad se caracteriza por presentar topes suaves discontinuos (aspecto rugoso) con pendientes menores de 15°, vertientes cóncavas de moderadas a fuertes con pendientes entre 15° y 30°, se encuentra limitada en la parte superior por escarpes y en la parte inferior por superficies modeladas en depósitos. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín, como se ilustra en la Figura 30.

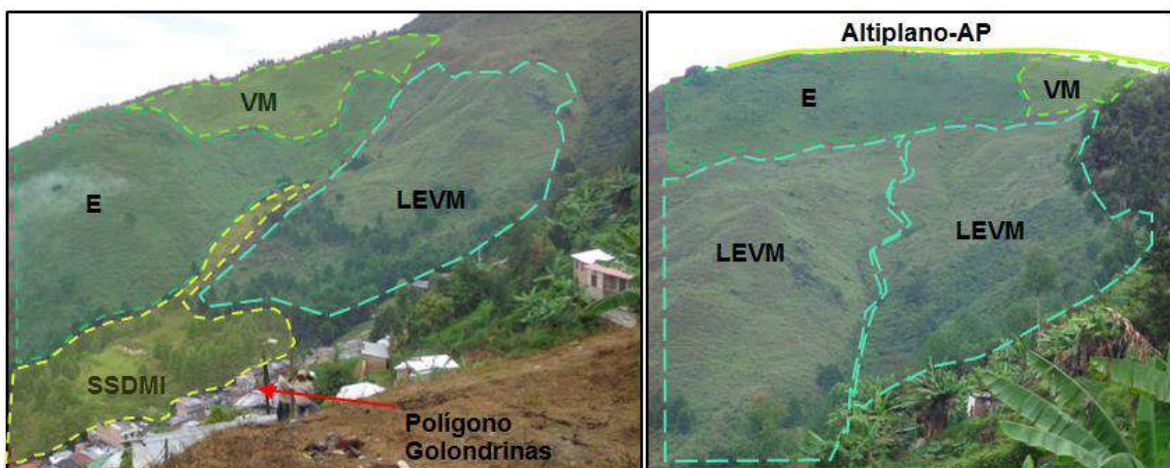


Figura 30. Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas LEVM, Escarpe E, Vertiente Moderada VM y Superficies sobre Depósitos SSDMI

5.2.7 Unidad de Lomo Ancho con Vertientes Moderadas LAVM

Se localiza en la parte baja de la UMI, sobre la margen derecha de la Quebrada La Aguadita entre los Polígonos Golondrinas - El Faro. Limita en la parte superior por la unidad de Vertientes y Lomeríos. Se caracteriza por presentar topos convexos con pendientes entre 15° y 30°, vertientes cortas con pendientes moderadas, presenta forma irregular con moderado grado de incisión. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín. En la Figura 31 se resalta con un sombreado claro esta unidad.

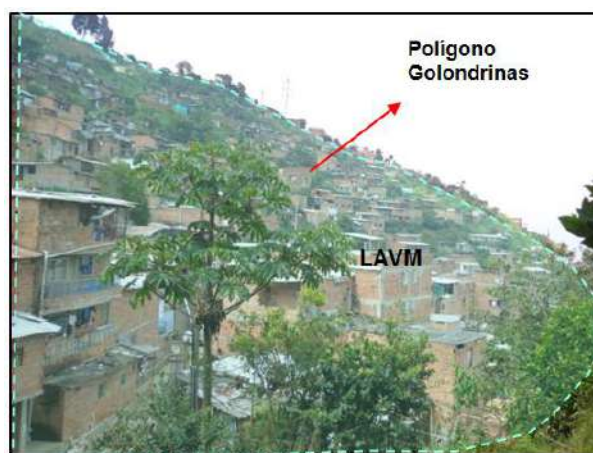


Figura 31. Unidad de Lomo Ancho con Vertientes Moderadas LAVM

5.2.8 Unidad de Lomo Ancho con Vertientes Suaves LAVS

Se encuentra en los límites con la UMI Trece de Noviembre, delimitada por las unidades de Peldaño Alto, Picacho y Escarpe Largo Semicircular. Esta unidad se caracteriza por presentar topos suaves convexos de 130 m de ancho, con pendientes menores que 15°, laderas con pendientes cortas y moderadas entre 15° y 30° de inclinación. Litológicamente, esta geoforma se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín. Esta unidad geomorfológica fue cartografiada con la ayuda de fotografías aéreas y mapa de pendientes. No fue posible obtener una imagen representativa de la misma.

5.2.9 Unidad de Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF

Se localiza sobre la margen derecha e izquierda de la quebrada Chorro Hondo 1. Conformada cerca del 50% del Polígono El Faro. Presenta topos estrechos subangulosos con pendientes fuertes entre 15° y 30°. Sus laderas son cortas y escarpadas con pendientes mayores que 30°, de formas rectas. Litológicamente esta geoforma está compuesta por material rocoso de los horizontes IIA y IIB de las Dunitas de Medellín (Figura 33).

5.2.10 Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC

Se encuentra ubicado en el extremo sur del Polígono El Faro, hacia los límites con la UMI del Trece de Noviembre. Conformar una antigua cárcava, la cual se encuentra entre las cotas 1864 msnm y 2022 msnm. Se caracteriza por presentar pendientes muy escarpadas con ángulos mayores que 30°, desarrolladas sobre material rocoso altamente fracturado de las Dunitas de Medellín. Presenta paredes (frentes) de roca largos de aproximadamente 2000 m de longitud y altura mayor de 100 m (Figura 34), con forma semicircular muy característica, y moderado grado de incisión asociado a la Quebrada La Rafita. Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. En esta unidad geomorfológica se desarrollan procesos de inestabilidad como caída de rocas favorecido por procesos de erosión superficial.

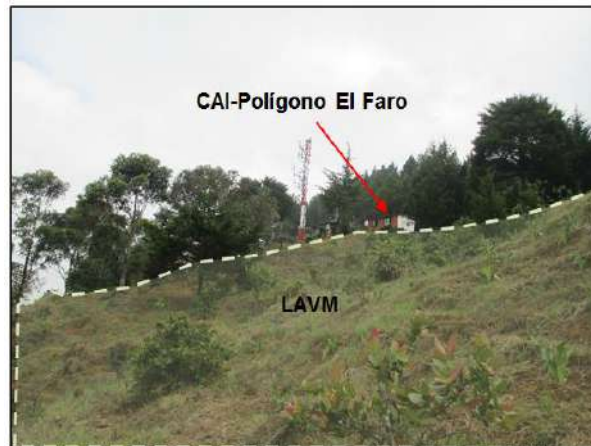


Figura 32. Unidad de Lomo Amplio con Vertientes Suaves cerca del CAI del Polígono El Faro



Figura 33. Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF



Figura 34. Unidad de Escarpe Largo Semicircular-ELSC localizado en la parte alta del polígono

5.2.11 Unidad de Depósitos Sin Incisión DSI

Esta geoforma presenta varios cuerpos distribuidos en toda la UMI. Corresponden a zonas con pendientes suaves menores de 15° sin incisión, presenta formas variadas desde alargadas hasta ovaladas. Son producto del desprendimiento de materiales provenientes de las vertientes y zonas escarpadas. Se desarrollan sobre flujos de lodos y/o escombros (Figura 35).



Figura 35. Unidad de Depósitos Sin Incisión-DSI

5.2.12 Unidad de Superficies con Baja Incisión SBI

Localizada en el extremo sur del Polígono El Faro, en los límites con la UMI del Trece de Noviembre y sobre la margen izquierda de la Quebrada la Loca 1. Esta geoforma presenta topes suaves con pendientes menores que 5°, con bajo grado de incisión. Es el resultado de la acumulación de fragmentos de roca desprendidos, producto de la inestabilidad (caída de rocas) presente en la parte superior de la unidad geomorfológica

denominada como escarpes largos semicirculares (ELSC). Litológicamente, se desarrolla sobre depósitos de deslizamiento y materiales antrópicos asociados a urbanizaciones aledañas (Figura 36)



Figura 36. Unidades geomorfológicas de Superficies con Baja Incisión y Escarpe Largo Semicircular-ELSC

5.2.13 Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI

Localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Loca 1. Esta geoforma tiene forma alargada cuya longitud en planta alcanza cerca de 400 m, presenta topes suaves con pendientes menores de 15° y laderas cortas moderadamente incisadas. Son el resultado de procesos de inestabilidad generados en la unidad geomorfológica de Escarpes y Vertientes Moderadas. Litológicamente, se encuentra sobre depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Figura 37).



Figura 37. Unidad de Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI

5.2.14 Unidad de Superficie Antrópica SA

Se encuentra distribuida a lo largo de la UMI, con mayor concentración dentro de los Polígonos El Faro y Golondrinas. Corresponde a superficies explanadas con formas irregulares modificadas antrópicamente. Presenta pendientes suaves, variables entre 0° y 5° de inclinación. Se desarrollan sobre materiales antrópicos como se ilustra en la Figura 38.



Figura 38. Unidad de Superficie Antrópica-SA

5.2.15 Unidad de Escarpe E

Localizada en el extremo norte de la UMI, sobre las márgenes de las Quebradas La Loca 1 y La Loca 2. Se encuentra limitada por la unidad de Peldaños, Lomos Alargados y Vertientes Moderadas. Son vertientes con superficies rugosas onduladas poco continuas con pendientes mayores de 30°. Sobre esta unidad se tienen bloques en superficie de dunita, los cuales pueden ser removilizadas por agentes erosivos como el agua. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IC-IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 39).

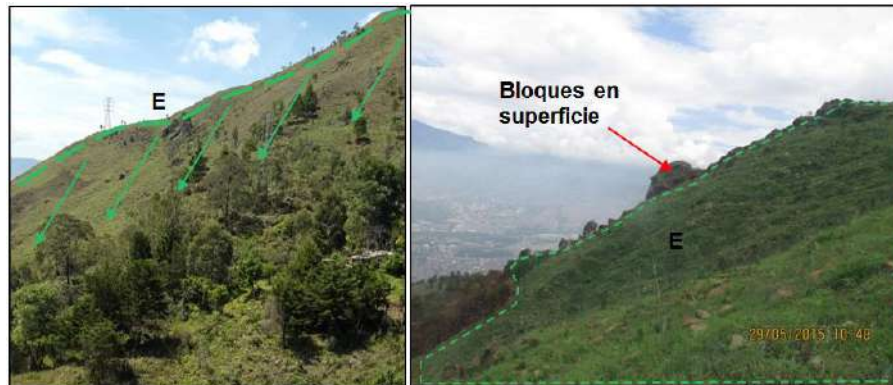


Figura 39. Vertiente Escarpada-VE exhibiendo bloques en superficie

5.2.16 Unidad de Vertiente Moderada VM

Localizada en el extremo norte de la UMI, sobre la margen derecha e izquierda de la quebrada La Loca 1 y 2 y en la zona centro oriental de la UMI. Se encuentra limitada por la unidad de Peldaños, Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas y Escarpes como se ilustra en la Figura 40. Esta unidad presenta pendientes moderadas con inclinaciones entre 15° y 30°, irregulares y continuas. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre el horizonte IC-IIA de las Dunitas de Medellín.

5.2.17 Unidad de Vertiente Suave VS

Localizada en la parte media de la UMI, entre las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, limitada en la parte inferior por la Unidad de Escarpe y Peldaño Alto. Se caracteriza por tener pendientes de suaves rectas continuas, como se ilustra en la Figura 41. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín.

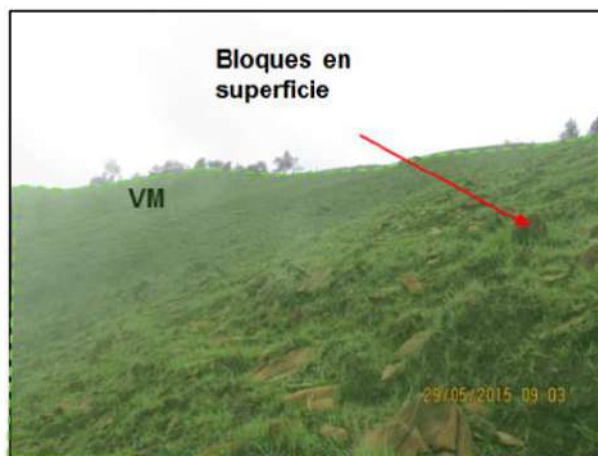


Figura 40. Unidad de Vertiente Moderada VM con bloques en superficie



Figura 41. Vertiente Suave VS en la parte superior del Polígono Golondrinas

5.2.18 Unidad de Dolinas

Las dolinas son depresiones cóncavas formadas por varios procesos tales como colapso de cavernas, piping, subsidencia, disolución y por controles estructurales en la unidad litológica (Figura 42), aunque todos estos procesos en conjunto también dan origen a una dolina (poligenética) (Huggett, 2007).

En el Valle de Aburrá han sido reportados pseudokarst, los cuales han sido denominados así ya que la roca que moldea el paisaje no es sedimentaria química, sino cristalina (ígneas y/o metamórficas). Dado lo anterior, los procesos que controlan la formación de las geoformas pseudokársticas en nuestro entorno son debidos a movimientos tectónicos, los cuales generan fisuras que favorecen procesos de erosión interna tales como sufusión-piping.

Para el caso de la zona de estudio, las dolinas reportadas están asociadas a pseudokarst en las Dunitas de Medellín, donde se pueden disolver algunos minerales. Asimismo, las estructuras geológicas evidenciadas en el grado de fracturación (zonas de cizalla y brechas) de la roca ocasionan colapso, favoreciendo así la formación de este tipo de geoformas. Esto ocurre debido a que en el Horizonte IIA de meteorización quedan bloques expuestos en suelo que puede ser lavado por la escorrentía, generándose también colapso en la superficie del terreno.

Las opciones a, b y c de la Figura 42, son los procesos de formación que se asocian a las dolinas reportadas en la UMI en estudio. Esto se debe al fuerte control estructural, evidenciado en lineamientos, geoformas de origen estructural tales como peldaños, peldaños tectónicos, patrones de meteorización particulares en la unidad geológica (bloques rocosos en abundante matriz) y estructuras de disolución en la roca como canales en forma de tubos (Figura 43). Estos factores ponen en evidencia la conjugación de procesos que dan origen al paisaje pseudokárstico en las Dunitas de Medellín (Figura 44).

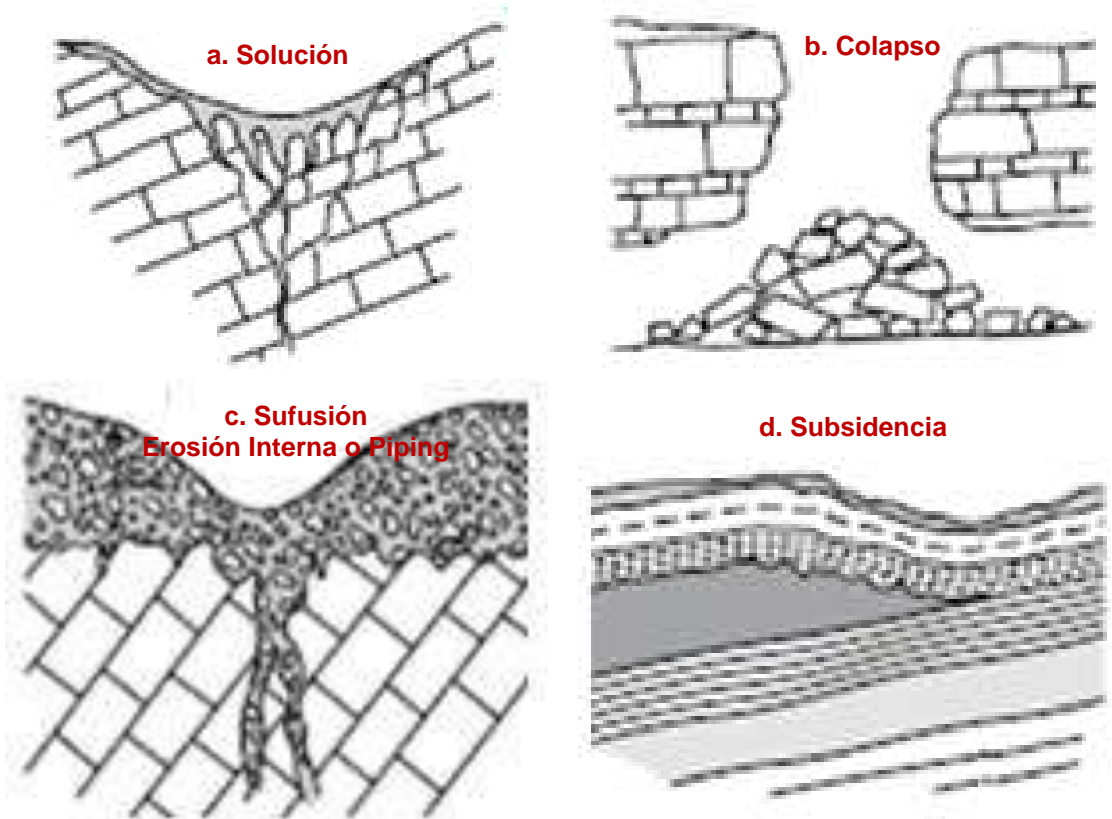


Figura 42. Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007)



Figura 43. Disolución en la Dunita de Medellín en forma de canales (Parte alta de la UMI El Faro - Golondrinas)

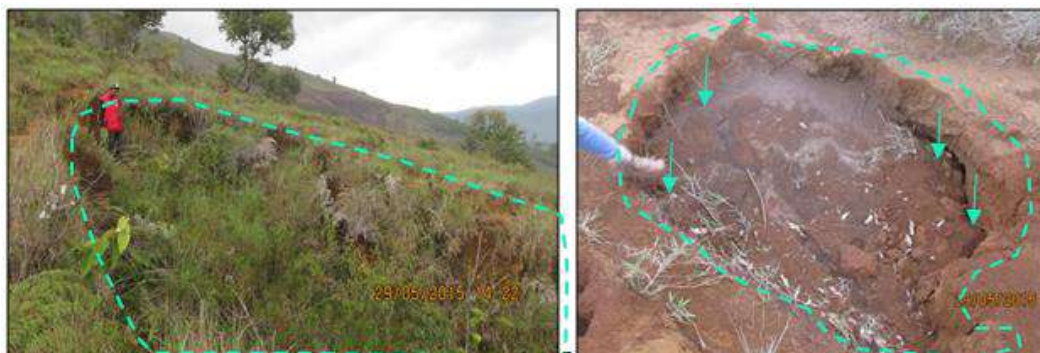


Figura 44. Dolinas por colapso SFJ13-U-EFG

En el Mapa 12 cartografiaron un conjunto de dolinas (Figura 44 y Figura 45), localizadas en la parte alta de la UMI, cuyas dimensiones son aproximadamente 5 m de largo, 4 m de ancho y hasta 1.0 m de profundidad. La dolina reportada en la Figura 45A se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín, en la cual se observa colapso en la superficie y continuación en profundidad con forma de canal por efectos de procesos de erosión (piping-sufusión). En la Figura 45B, la dolina reportada se encuentra cubierta por vegetación y tiene bloques de Dunita en su interior con diámetros variables entre 0.5 m y 0.7 m.

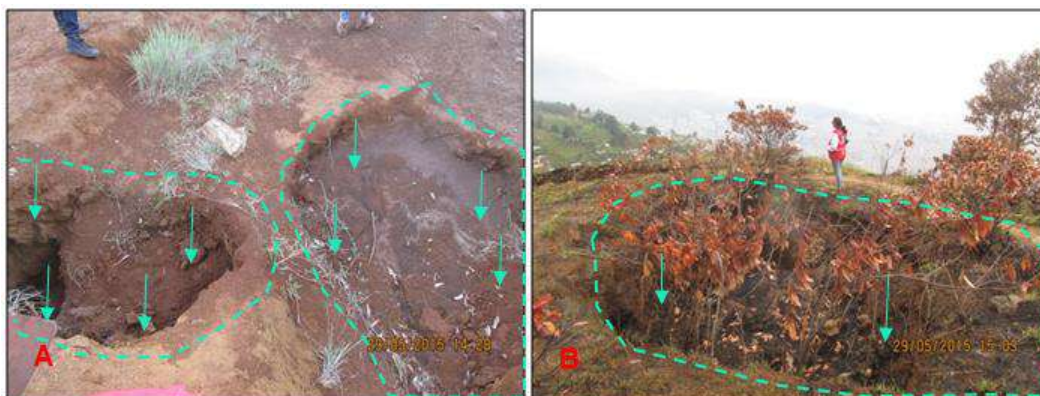
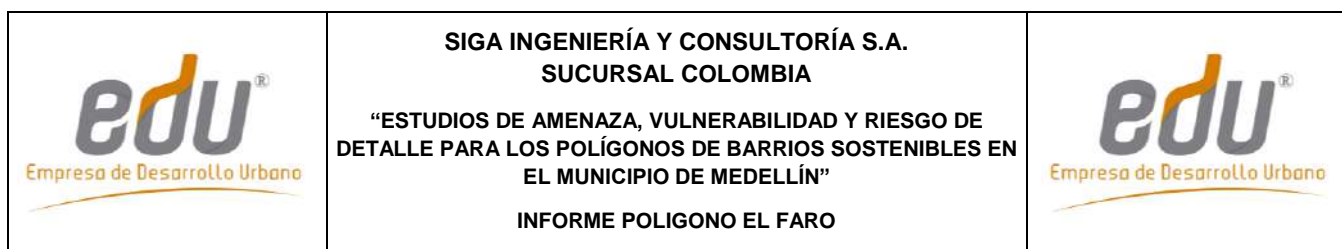


Figura 45. A) Dolina generada por colapso reportada en la Estación de Campo SFJ13-U-EFG y B) Dolina vegetada reportada en la Estación de Campo SFJ14-U-EFG

5.3 MORFODINÁMICA REGIONAL

Debido a las condiciones geomorfológicas y a la ocupación del territorio, los eventos más recurrentes con afectaciones considerables sobre la comunidad, son aquellos generados por las inundaciones y los movimientos en masa, respectivamente. La manifestación u ocurrencia de estos fenómenos coincide con la distribución anual bimodal de las lluvias medidas en la región metropolitana, donde la mayor manifestación de movimientos en masa e inundaciones se presentan en dos picos del año que coinciden con los meses de mayo y octubre. Lo anterior se evidencia en la relación de las condiciones



hidrometeorológicas, como factor detonante de los fenómenos naturales que ocurren en el Valle de Aburrá (Aristizábal & Gómez, 2007).

Aunque las inundaciones son los eventos de mayor recurrencia, los movimientos en masa son los que generan mayor afectación, especialmente en pérdida de vidas humanas. Adicionalmente, aunque las avenidas torrenciales no presentan una alta recurrencia, sus afectaciones en términos de pérdidas humanas es alta, con tendencia a aumentar en las últimas décadas, lo que, muy probablemente, refleja la ocupación de áreas susceptibles a la ocurrencia de este tipo de eventos, tales como zonas correspondientes a los retiros por normativa y las zonas inundables de las quebradas. (Aristizábal & Gómez, 2007).

En un contexto general, en el Valle de Aburrá, sólo 253 eventos reportan al menos una víctima mortal, lo que significa que el 99,96% de los eventos presenta afectaciones considerables sin víctimas mortales. Tomando la división de la CEPAL en el Valle de Aburrá, los desastres pequeños con víctimas entre 0 y 10 muertos, corresponde a 6.739 registros, lo que representa casi la totalidad de los eventos. Con respecto a los desastres medianos, se registraron nueve eventos, y tan sólo dos fueron catalogados como desastres grandes, con más de 100 muertos, los cuales corresponden a los movimientos en masa desencadenados en Santa Elena el 12 de julio de 1954, y el de Villatina ocurrido el 27 de septiembre de 1987 (Aristizábal & Gómez, 2007), ambos ocurridos en la Comuna 8 de Medellín donde se concentra este estudio en particular. Las inundaciones y avenidas torrenciales han sido fenómenos naturales frecuentes, asociados al origen y evolución del Valle de Aburrá. Sin embargo, las afectaciones producto de éstos han aumentado considerablemente en las últimas décadas, debido a la creciente ocupación de terrenos en condiciones de amenaza.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una búsqueda e inventario de los principales fenómenos naturales que se relacionen con inundaciones, movimientos en masa y avenidas torrenciales manifestados específicamente en los sectores de la Comuna 8 y la Comuna 3 de Medellín, cerca de los Barrios Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz, Villa Turbay, Golondrinas, El Faro y La Cruz. En dicha búsqueda se utilizaron fuentes tanto públicas como privadas con el fin de recolectar la mayor cantidad de información. Las mayores fuentes públicas consultadas fueron el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), Sistema Municipal para la Atención de Desastres (SIMPAD) cuyo nombre actualmente es Departamento Administrativo de Gestión el Riesgo de Desastres (DAGR) y Empresas Públicas de Medellín (EPM).

Gran parte de la información de estas entidades se encuentra consignada en la base de datos DesInventar. Esta base de datos permite evaluar la recurrencia y temporalidad de fenómenos que afectan considerablemente la comunidad. El Módulo DesInventar, adicionalmente, permite ser alimentado mediante datos en campo predefinidos (información espaciotemporal, tipos de eventos y causas, y fuentes), efectos directos e indirectos (sobre la vida, las viviendas, la infraestructura, los sectores económicos).

El AMVA cuenta con una base de datos actualizada en el DesInventar. Ésta integra las bases de datos elaboradas por la Universidad EAFIT, lo que antiguamente era el SIMPAD y ahora se conoce como el DAGRD. Además, trabaja en un proceso diario de

actualización de datos, que incluye los registros de eventos publicados en los periódicos locales y nacionales, los reportes de los Comités Locales de Emergencia y de la comunidad.

A través de la base de datos DesInventar, se logró consultar que cerca de la zona de estudio se tienen unos 322 registros de eventos que involucran movimientos en masa, avenidas torrenciales, inundaciones y caídas de roca desde 1981 hasta 2006. Estos eventos se reportaron en 12 barrios de la Comuna 8 y la Comuna 3, entre los cuales se encuentran los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles. En la Tabla 2 se presenta la cantidad de los diferentes eventos que ocurren en cada uno de los 12 barrios que se encuentran cerca de los polígonos. Por su parte la Figura 46 y la Figura 47 presentan un análisis de frecuencia de ocurrencia de los principales fenómenos y cuáles son los barrios más afectados por los mismos.

Tabla 2. Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles

	EL PINAL	LA CRUZ	LA LADERA	LA LIBERTAD	LA SIERRA	LLANADITAS	LOS MANGOS	SAN ANTONIO	TRECE DE NOVIEMBRE	VILLA LILIAM	VILLA TINA	VILLA TURBAY
Avenidas Torrenciales	2.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	1.0
Caídas de Rocas	2.0	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	3.0	1.0
Inundaciones	7.0	1.0	2.0	14.0	0.0	2.0	3.0	2.0	2.0	11.0	16.0	3.0
Deslizamientos	12.0	24.0	1.0	20.0	9.0	24.0	3.0	6.0	7.0	45.0	62.0	16.0
TOTAL	23.0	27.0	3.0	35.0	10.0	27.0	6.0	8.0	9.0	57.0	89.0	21.0
	7.1%	8.4%	0.9%	10.9%	3.1%	8.4%	1.9%	2.5%	2.8%	17.7%	27.6%	6.5%

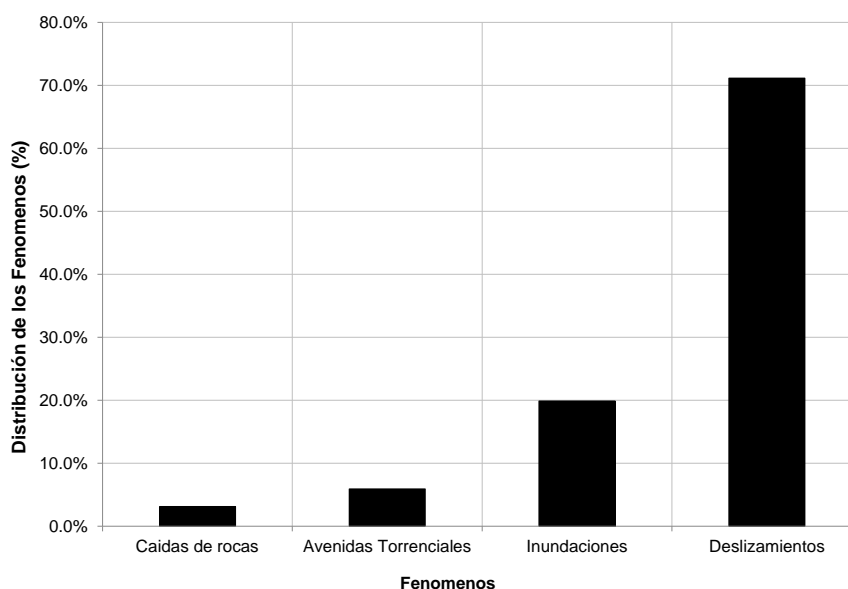


Figura 46. Distribución de los fenómenos

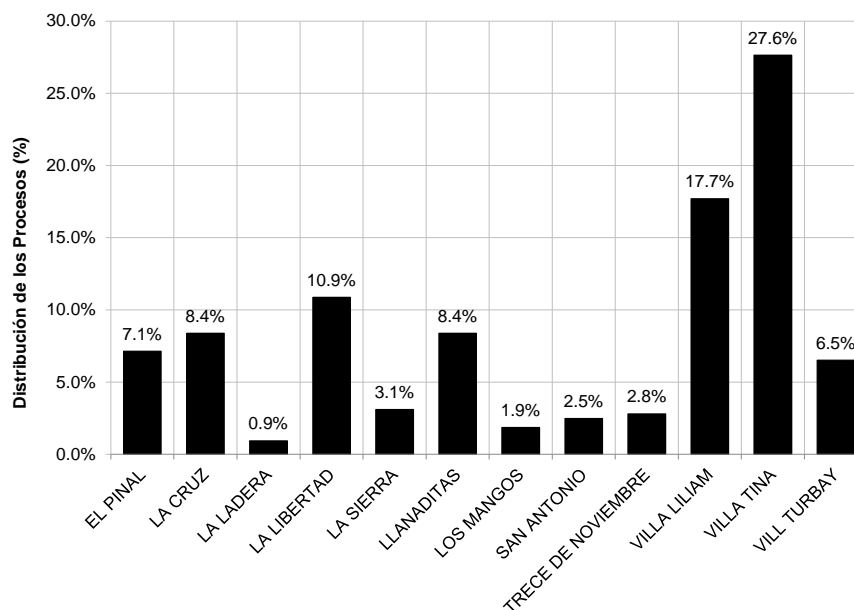


Figura 47. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos

Se puede observar que los deslizamientos son los fenómenos más recurrentes (Figura 46) en la zona de estudio (Figura 47), seguidos de los fenómenos de inundación tal como lo describió Aristizábal & Gómez (2007). Estos fenómenos representan el 70% y el 20% respectivamente, de los registros encontrados en la base de datos de DesInventar. Por otra parte, la Figura 47 muestra que los barrios más afectados por diferentes fenómenos según los registros encontrados son Villatina, Villa Liliam y La Libertad. Respecto a los barrios de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles, el barrio más afectado es La Cruz, seguido de Llanaditas donde se localizan los Barrios Golondrinas y El Faro y finalmente el Barrio Villa Turbay.

En la Tabla 3 se presenta el registro de algunos de los fenómenos y eventos más importantes ocurridos alrededor de la zona de estudio.

Tabla 3. Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio

Localización	Fecha	Movimiento en Masa
Media Luna	12 de julio de 1954	Flujo de lodos
Villatina	27 de septiembre de 1987	Deslizamiento flujo de lodos compuesto
San Antonio	20 de octubre de 1980	Flujo de escombros
La Cruz	28 de Mayo de 2007	Deslizamiento de tierra compuesto
Villatina - San Antonio	31 de mayo de 2008	Deslizamiento por redes antrópicas
La Cruz	entre 10 de octubre y 5 de diciembre 2011	3 deslizamientos de tierra
La Libertad	octubre de 2010	Deslizamiento
Santa Ines	2010	Reptaciones y movimientos lentos
Enciso - Los Mangos	6 de junio de 2011	Deslizamiento por redes de servicios públicos
Villa Turbay - Las Miras	Abril de 2011	Deslizamientos flujo de lodos
Villa Turbay - Colegio Diana Turbay	Marzo de 2011	Deslizamientos traslacionales
La Sierra	8 de diciembre de 2014	Flujo de escombros, posible ingenerencia de redes de servicios públicos

Dentro del registro presentado se destaca el movimiento en masa de Santa Elena (Media Luna), ocurrido el 12 de julio de 1954. Este movimiento dejó un saldo de más de 100 personas muertas, de las cuales sólo se recuperaron 77 cadáveres y se registró un número de desaparecidos que se considera sobrepasa los 70.

También se destaca el movimiento en masa de Villatina, el 27 de septiembre de 1987 (Figura 48). Aunque no se logró determinar con el número exacto de víctimas, se calcula que fueron unas 500 personas, habiéndose rescatado aproximadamente 200 cuerpos, por lo que el sitio se declaró “campo santo”.



**Figura 48. Fotografía del deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987
(Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987)**

Otro movimiento en masa de resaltar es el del Barrio La Sierra, el 8 de diciembre de 2014. Este proceso obligó la evacuación de 15 familias y dejó incomunicadas a más de 4 mil personas del Barrio La Sierra con el centro de la ciudad. En su momento, la Alcaldía de Medellín decretó la urgencia manifiesta.

Finalmente, se destacan varios deslizamientos detonados por lluvias en el sector de Villa Turbay durante el primer fin de semana del mes de abril de 2014, los cuales provocaron el colapso de cuatro viviendas y el fallecimiento de cuatro personas.

5.4 MORFODINÁMICA LOCAL

Como parte del análisis morfodinámico de la UMI El Faro-Golondrinas, se llevó a cabo el análisis multitemporal con la fotointerpretación de las 103 fotografías aéreas recopiladas, correspondientes a 13 líneas de vuelo para el período comprendido entre 1959 y 1998 y con escalas variables entre 1:3.200 y 1:21.700.

Las fotografías aéreas fueron clasificadas por año, línea de vuelo y número de fotos, como se muestra en la Tabla 4.

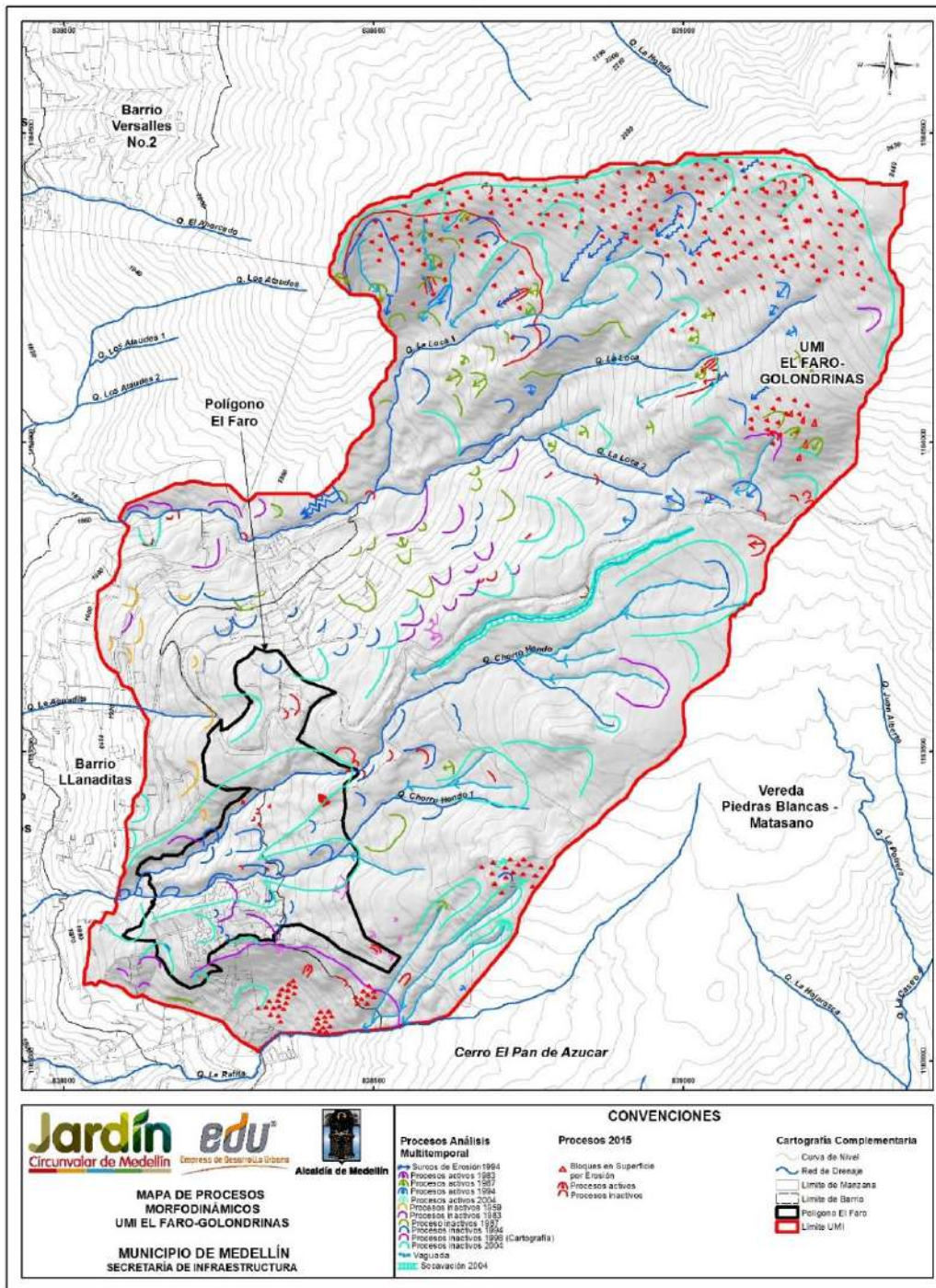
Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

Año	Vuelo	Faja	Fotos	Escala
1959	C-889	3	045-052	1 : 5.000
1976	FD-87	3	29-35	1 : 10.000

Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

Año	Vuelo	Faja	Fotos	Escala
1981-1983	R-898	1	261-271	1 : 5.160
1985	Geovial-2	6	31-34	1 : 3.200
1987	Geovial-18	19	232-240	1 : 5.300
1987	Geovial-18	20	212-222	1 : 4.600
1987	Geovial-18	21	243-246	1 : 5.200
1994	Geovial 65/3	32	156-160	No conocida
1994	Geovial 65/3	33	98-109	1 : 5.000
1994	Geovial 65/3	34	130-141	1 : 5.000
1998	FAL-403	12	114-119	1 : 21.700
1998	FAL-402	2	106-113	1 : 10.700
1998	FAL-401	03-3	144-151	1 : 11.300

En el Mapa 13 se presentan los procesos morfodinámicos de la UMI El Faro – Golondrinas, los cuales fueron clasificados por año como se muestra en la Tabla 5 y definidos con base en la fotointerpretación de las fotografías aéreas mencionadas anteriormente, análisis cartográficos y la identificación en campo. Cabe anotar que se encontraron procesos morfodinámicos persistentes en varios años, por lo que en el plano aparece para el año más antiguo, es decir el primer proceso reportado en las fotografías aéreas.



Mapa 13. Procesos morfodinámicos UMI El Faro - Golondrinas (11_EFRProcesosMorfodinamicos_Medellin_C y 11_EFRProcesosMorfodinamicos_Medellin_T)

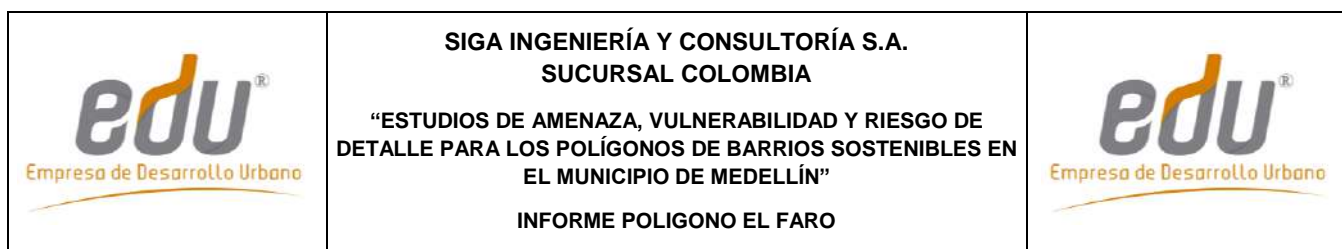


Tabla 5. Colores definidos para los procesos según año

Año de Visualización	Color en el Plano
1959	Naranja
1983	Magenta
1987	Verde
1998	Rosado
2004	Azul
2015	Rojo

Los procesos morfodinámicos identificados son predominantemente activos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión y socavación lateral. Los deslizamientos y las caídas de rocas son generados por procesos de inestabilidad en las vertientes con pendientes moderadas y altas, así mismo los bloques del macizo que sobresalen en superficie y que se encuentran muy fracturados son propensos a desprenderse.

En la zona de estudio del Proyecto Barrios Sostenibles, los deslizamientos se concentran en mayor proporción en el área comprendida entre la parte media y alta de cada UMI. El mecanismo de falla de estos materiales varía entre superficies de falla planares y/o rotacionales, principalmente activos, con coronas de anchos variables entre 4 m y 70 m y escarpes que pueden llegar a medir hasta 10 m, principalmente sobre los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín. Además, en la UMI se encontraron coronas de deslizamiento tanto activas como inactivas, de 8 m a 10 m de longitud, 4 m a 15 m de ancho y 2 m de escarpe, que se generan sobre el perfil de meteorización de las dunitas. Uno de los más sobresalientes es el deslizamiento activo identificado en la Estación de Campo MAD03-U-TN, el cual tiene una corona de 15 m de ancho, 30 m de longitud, 5 m de escarpe, obedece a un mecanismo de falla del tipo planar y se genera sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 49).



Figura 49. Deslizamiento activo en Estación de Campo MAD03-U-TN

Las caídas de rocas son evidenciadas principalmente en las unidades geomorfológicas denominadas como Escarpes E y Vertientes Moderadas VM, donde aflora el Horizonte IIA de las Dunitas y se observan pequeños picachos y paredes de roca, ambos fracturados. El fenómeno de inestabilidad es favorecido por tres causas principalmente, la primera se atribuye a los procesos de erosión superficial, los cuales moldean la roca generando acanaladuras entre ellas, haciendo que los bloques de roca queden desconfiados y favorezcan la susceptibilidad al desprendimiento (Figura 50B). La segunda hace referencia al lavado por agua del suelo residual del Horizonte IIA, haciendo que los bloques de roca queden expuestos y susceptibles a moverse (Figura 51). La tercera causa que incide en la ocurrencia de este fenómeno, se asocia a las estructuras geológicas (diaclasas, zonas de cizalla y foliación) y el fuerte grado de fracturamiento que presenta la roca en la zona de estudio (Figura 50A).



Figura 50. (A) Macizo rocoso con discontinuidades que favorecen la caída



Figura 51. (B) Frentes de roca inestables

Los surcos, las cárcavas y los bloques en superficie por erosión son producto de procesos de erosión superficial eólica y fluvial. Los surcos (Figura 121 -A) se hallan en la parte alta y media de la UMI, alcanzando longitudes de hasta 20 m y profundidad de 80 cm, generándose sobre el suelo residual de las dunitas. Algunos de los surcos se encontraron con agua y localizados en la parte superior de algunas cicatrices de deslizamiento. Los bloques en superficie se encuentran tanto en pendientes moderadas como en escarpes, siendo estos últimos los más susceptibles a generar caídas de rocas como se observa en la Figura 121 (B).



Figura 52. (A) Surcos y (B) bloques en superficie en pendientes moderadas

Hacia el oeste de la UMI se evidencia una cárcava activa donde se aprecia el grado de erosión que tiene el área de estudio. Esta cárcava tiene pendientes escarpadas y presenta bloques en superficie en toda su extensión, debido al efecto de lavado de suelo que ocasiona el agua de escorrentía. Asimismo, se tienen coronas de deslizamiento activas dentro la misma (Figura 53). Hacia la parte superior de la UMI se tienen pequeñas cárcavas asociadas al inicio de pequeños drenajes.

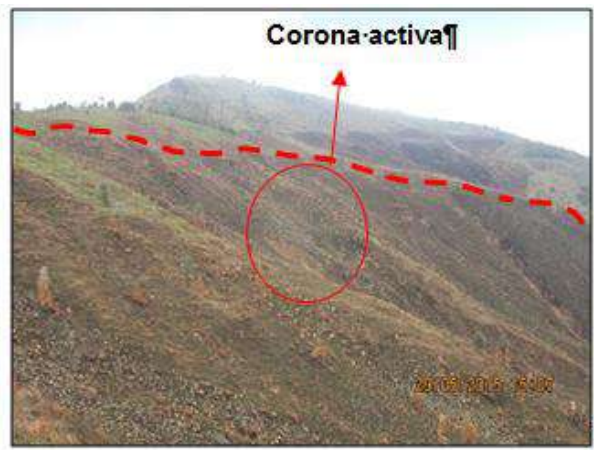


Figura 53. Corona activa contenida en cárcava

En la UMI El Faro - Golondrinas se destacan dos cárcavas activas en las Estaciones de Campo SFJ05-U-EFG y SFJ06-U-EFG, con coronas de 15 m y 90 m de ancho (Figura 54), 60 m y 80 m de longitud, 8 m y 10 m de escarpe, los cuales obedecen a mecanismos de falla complejos, ya que se encuentran tanto superficies de tipo planar como rotacional y se generan sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín. Los escarpes de las coronas evidencian un macizo rocoso fuertemente fracturado, al menos en tres direcciones, donde la roca se encuentra moderadamente meteorizada. En este punto se tiene que la relación suelo/roca varía entre 20/80 y 40/60. Hacia la parte superior de las coronas se encontraron surcos de al menos 40 cm de profundidad y 7 m de longitud, algunos con agua.



Figura 54. Cárcavas activas ubicadas en la parte superior de la UMI en Estaciones de Campo SFJ05-U-EFG y SFJ06-U-EFG

En lo que tiene que ver con procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI El Faro - Golondrinas, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, en las márgenes de las Quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (incluidos sus afluentes). Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas. El fenómeno de socavación lateral se evidenció en la Quebrada Chorro Hondo, justo aguas arriba de la intersección con el Polígono El Faro. Dicha socavación produce el desconfinamiento del material de las orillas y genera desgarres de 1 m de profundidad (Figura 55).



Figura 55. Socavación lateral en la Quebrada Chorro Hondo

6. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

6.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

En el valle de Aburrá, conforme a la geología de la Plancha 147, Medellín Oriental (Ingeominas, 2005) predominan tres direcciones de cizallamiento, que son N-S, N45°E y N45°W. Lo anterior es concordante con la dirección del Sistema de Fallas Romeral, reportado por varios autores, donde la dirección predominante es N-S (Consortio Microzonificación, 2006).

Al sur del valle de Aburrá se han reportado un gran número de fallas regionales y lineamientos con dos direcciones predominantes: NS a NNW al oeste del río Aburrá y una tendencia NW al este del mismo (Grosse, 1926, Case et al., 1971, González, 1980 y Toussaint y Restrepo, 1984). Se destacan trazas de las Fallas San Jerónimo, Minas y Santa Isabel. Al norte del valle existe otro sistema de fallas regionales con dirección NW, donde sobresalen las Fallas Don Matías y Rodas. Del sistema de fallas con dirección NE, las principales trazas son La Chapa y Santa Elena (Consortio Microzonificación, 2006).

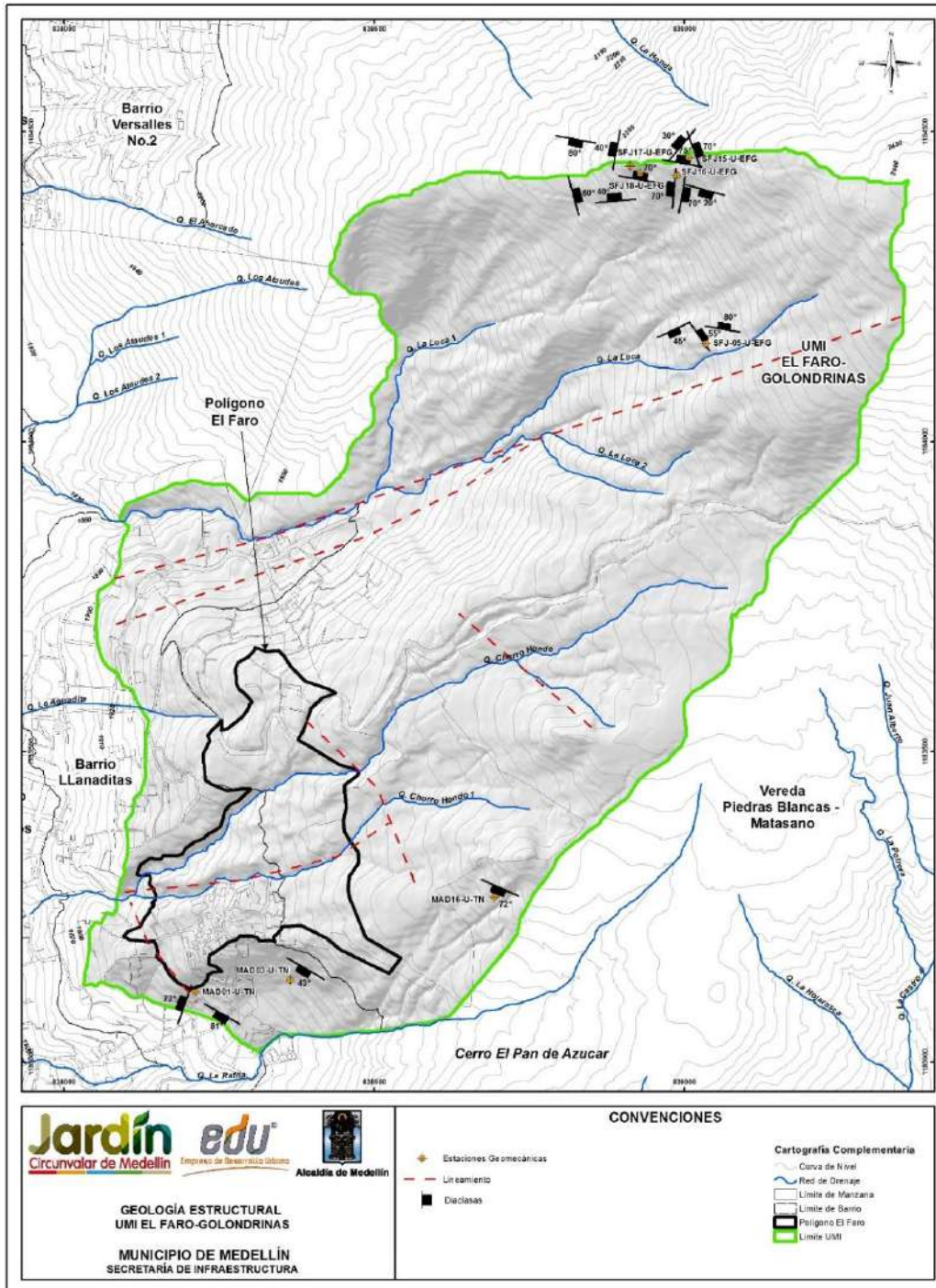
En la zona de estudio, el Consortio Microzonificación (2006) reporta estructuras geológicas para las Dunitas de Medellín, tales como diaclasas, cizallas y fallas, cuyos datos de rumbo/buzamiento fueron tomados en el municipio de Envigado y en el corregimiento de Santa Elena, tal y como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consortio Microzonificación, 2006



Localización	Tipo de estructura	Rumbo/buzamiento
Vía al Plan Envigado	Diaclasas	S20°W/V, N5°W/65°NE y N5°W/17°SW
	Cizalla	S35°W/55°W y S65°W/66°W
Vereda Pericos Envigado	Diaclasas	N50°E/45°E
	Cizalla	N10°E/65°W
Santa Elena	Falla Contacto Anfibolitas Dunitas	N80°W/45°S
Quebrada Rodas Autopista Medellín-Bogotá	Falla Normal Contacto Anfibolitas Dunitas	NS/45°NS-45°E

6.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL

En la UMI El Faro - Golondrinas se encontraron estructuras tales como lineamientos geológicos, discontinuidades y zonas de cizalla, las cuales se muestran en el Mapa 14.



Mapa 14. Estructuras encontradas en la UMI El Faro – Golondrinas
 (12_EFRGeologiaEstructural_Medellin_C y 12_EFRGeologiaEstructural_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

A nivel local, se presentan estructuras propias del tipo de roca que fueron heredadas por los eventos de cizallamiento y deformaciones discontinuas. Estas se asocian a comportamientos frágiles de rotura, como fracturas aleatorias, diaclasas y fallas, asociadas a estructuras regionales o locales, producto de la dinámica del sector.

A través de los análisis geomorfológicos y fotogeológicos, se encontraron tendencias NW-SE y NE, en donde la primera se relaciona con las principales trazas y lineamientos, y la segunda tendencia corresponden a las Fallas La Castro, La Castro 1 observadas sobre la quebrada que lleva su nombre y La Aguadita la cual presenta su máxima expresión en las cercanías del centro de rehabilitación Hogares Claret, evidenciándose un gran cambio de pendiente.

En general, se observaron geofomas estructurales tales como lomos de obturación y material altamente fracturado en las inmediaciones de la Quebrada La Castro, la cual pone en contacto un pequeño cuerpo de las Anfíbolitas con las Dunitas de Medellín.

Cabe resaltar la posible relación de estos lineamientos geológicos con las evidencias de zonas de cizalla encontradas en las perforaciones, lo cual lleva a concluir que las Dunitas y los cuerpos intrusivos asociados al Batolito Antioqueño de la zona de estudio están igualmente afectados por estos sistemas de fallas.

Para la caracterización de los afloramientos del macizo rocoso evidenciado en la UMI El Faro - Golondrinas, fue importante llevar a cabo el estudio del sistema de discontinuidades encontradas en los afloramientos. El análisis de discontinuidades, inició con el levantamiento manual en campo de los planos de discontinuidades. La toma de información se realizó mediante el establecimiento de estaciones geomecánicas en las cuales se hacía la descripción del macizo tomándose las respectivas medidas y características de las discontinuidades. Las estaciones geomecánicas se repartieron a lo largo de la UMI. El levantamiento de campo comprendió la toma de información del macizo rocoso correspondiente a la medida de la orientación de los planos de discontinuidad, la observación y consignación de las características de espaciamiento, continuidad, abertura, relleno, alteración, rugosidad, agua, y la resistencia de las paredes.

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

6.2.1 Orientación y buzamiento

En cada una de las estaciones geomecánicas al interior de la UMI El Faro-Golondrinas se tomaron datos de rumbo y buzamiento para los planos de discontinuidad, bajo la notación buzamiento/dirección de buzamiento. En total se recolectaron 193 datos distribuidos en ocho estaciones geomecánicas, como se indica en la Tabla 7. Cabe añadir que cada estación geomecánica de la UMI El Faro-Golondrinas corresponde a una franja alargada de terreno sobre la cual se encontró aflorando el macizo rocoso.

En el Mapa 14 también se presenta la localización de las estaciones geomecánicas mostradas en la Tabla 7, donde se realizaron las medidas de discontinuidades. En el

Anexo 01 de este informe se presentan los formatos de levantamiento en campo, en los cuales se establecen las características de las discontinuidades medidas en campo.

Tabla 7. Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas de campo

Estación	Coordenadas		Número de Datos
	Norte	Este	
SFJ05-U-EFG	839034	1184158	3
SFJ15-U-EFG	839007	1184458	3
SFJ16-U-EFG	838987	1184429	3
SFJ17-U-EFG	838928	1184433	3
SFJ18-U-EFG	838912	1184444	2
MAD01-U-TN	838211	1183113	11
MAD03-U-TN	838364	1183131	13
MAD-16-U-TN	838693	1183266	9

Los análisis se ejecutaron de dos formas diferentes, primero teniendo en cuenta todas las discontinuidades medidas en las ocho estaciones geomecánicas, denominándose como el análisis general, del cual se obtuvo un patrón de discontinuidades general para la UMI.

Posteriormente, se hizo un análisis local, analizando cada estación por separado. De esta forma se quiere entender si el patrón de fracturamiento general se puede particularizar por zonas.

La Figura 56 presenta el diagrama de polos y en la Figura 57 el diagrama de rosas, obtenidos con todas las discontinuidades tomadas en las estaciones geomecánicas. Se pueden observar concentraciones de polos que permiten definir, en principio, cuatro tendencias (familias) principales, con las características que se muestran en la Tabla 8.

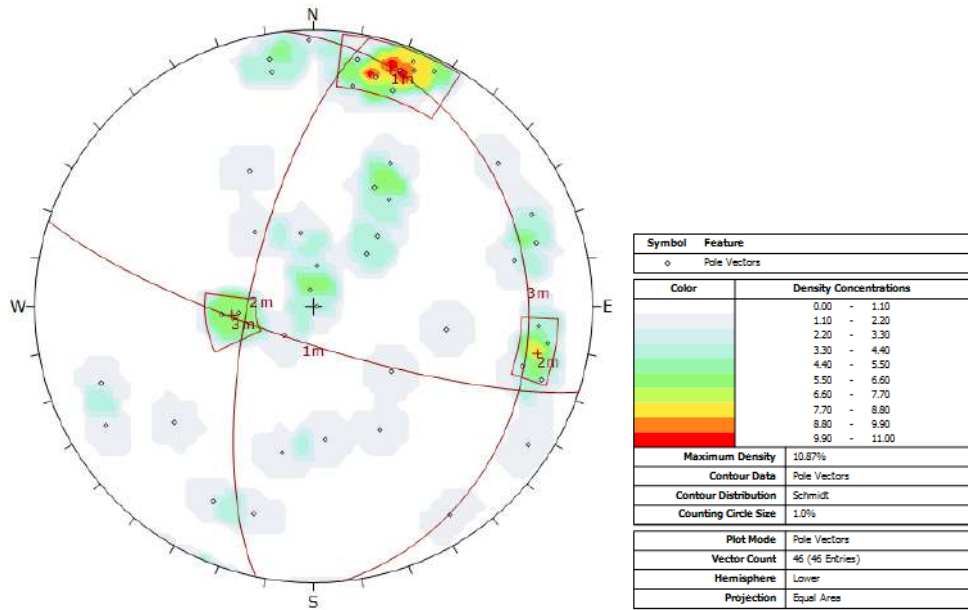


Figura 56. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

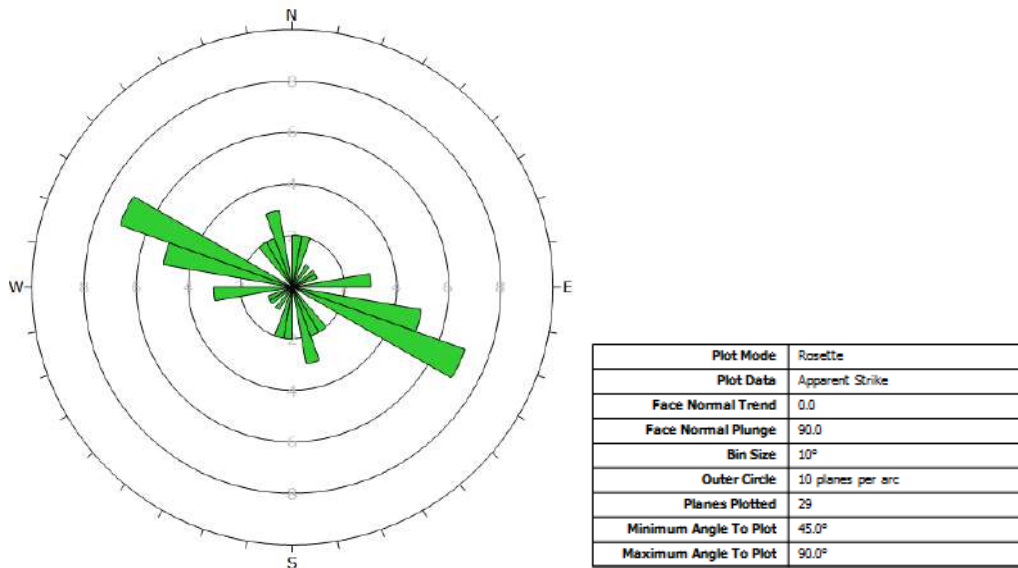


Figura 57. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

Tabla 8. Familias de discontinuidades considerando todos los datos

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	79°/198°	N72°W/79°SW	4.4-11
2	71°/282°	N12°E/71°NW	4.4-8.8
3	24°/84°	N66°W/24°NE	4.4-6.6

El análisis local de las discontinuidades consistió en revisar en la red estereográfica los datos levantados en cada una de las estaciones geomecánicas. El objetivo de este análisis es identificar la posible existencia de una tendencia especial en algunas de las familias principales observadas en el análisis general. Los diagramas de polos para las estaciones geomecánicas se muestran en la Figura 58 y en la Figura 59 y las características de cada familia se presentan de la Tabla 9 a la Tabla 12.

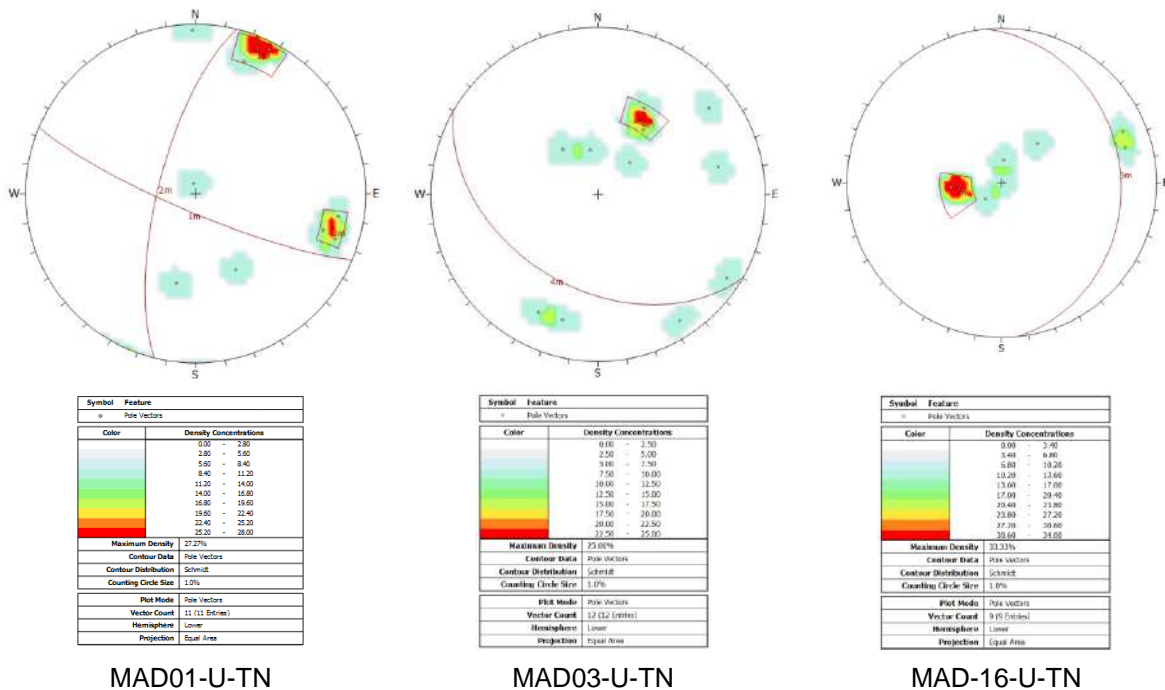
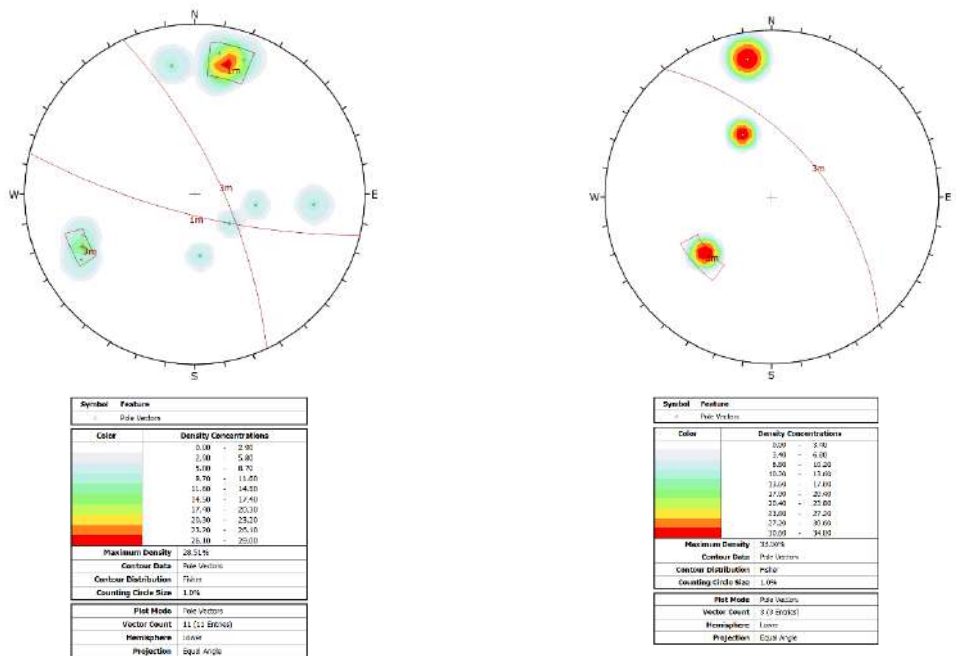


Figura 58. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD01-U-TN, MAD03-U-TN y MAD16-U-TN



SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG

SFJ05-U-EFG

Figura 59. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG y SFJ05-U-EFG

Tabla 9. Familias de discontinuidades en la Estación MAD01-U-TN

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	81/203	N67°W/81°SW	11.2– 28
2	72/284	N14°E/72°NW	11.2– 28

Tabla 10. Familias de discontinuidades en la Estación MAD03-U-TN

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
4	43/210	N60°W/43°SW	10 – 25



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	---	--

Tabla 11. Familias de discontinuidades en la Estación MAD16-U-TN

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
3	24/83	N66°W/24°NE	13.6– 34

Tabla 12. Familias de discontinuidades en las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración (%)
1	76/194	N76°W/76°SW	26.10 – 29
3	72/65	N25°W/72°NE	14.5 – 17.4

Los resultados observados en la Estación MAD01-U-TN correlacionan muy bien con el patrón de discontinuidades global de la UMI, donde la familia de discontinuidades encontrada tiene orientación similar a la Familia 1 del análisis general.

En las Estaciones MAD01-U-TN y MAD16-U-TN, las Familias 2 y 3 se correlacionan con el patrón de discontinuidades global de la UMI. Además, aparece una Familia 4 en la Estación MAD03-U-TN. Aunque cuentan con pocos datos, han de tenerse en cuenta en el análisis, puesto que fueron discontinuidades identificadas en campo.

Debido a la cantidad de datos en la Estación SFJ05-U-EFG, no se obtienen familias de discontinuidades representativas, pero las discontinuidades se tienen en cuenta en el análisis porque fueron identificadas en campo. Además, se observa que una de las discontinuidades coincide con la orientación de la Familia 3.

En las Estaciones SFJ15-U-EFG, SFJ16-U-EFG, SFJ17-U-EFG, SFJ18-U-EFG, las Familias 1 y 3 se correlacionan con las familias de discontinuidades del análisis global.

Los resultados obtenidos en el análisis general y local indican que la UMI El Faro - Golondrinas tiene tres tendencias de discontinuidades, de las cuales una se considera familia principal (Familia 1) y las otras dos secundarias (Familias 2 y 3). La Familia 1 (N72°W/79°SW), es semejante a los lineamientos trazados a lo largo de la zona de estudio, presentando una tendencia NW, la cual se asocia regionalmente a la falla Santa Elena. Las Familias 2 y 3 del análisis local, se correlacionan de forma directa con las estructuras geológicas reportadas a escala local, por ello, se asumen como discontinuidades de las Estaciones MAD01-U-TN, MAD03-U-TN y MAD16-U-TN.

6.2.2 Espaciamiento

Se define como la distancia perpendicular entre los planos de discontinuidad en una misma familia. Influye en el comportamiento global del macizo rocoso y define el tamaño de los bloques. Los rangos empleados para la categorización de esta propiedad son los indicados a continuación en la Tabla 13.

Tabla 13. Descripción del espaciamiento de las discontinuidades

Descripción	Medida
Extremadamente junta	< 2 cm
Muy junta	2 cm – 6 cm
Junta	6 cm – 20 cm
Moderadamente junta	20 cm – 60 cm
Separada	60 cm – 2 m
Muy separada	2 m – 6 m
Extremadamente separada	> 6 m

En la Figura 60 se presentan los respectivos resultados obtenidos. En los levantamientos realizados predominan discontinuidades entre moderadamente juntas y separadas las cuales acaparan el 73% de la totalidad de los levantamientos.

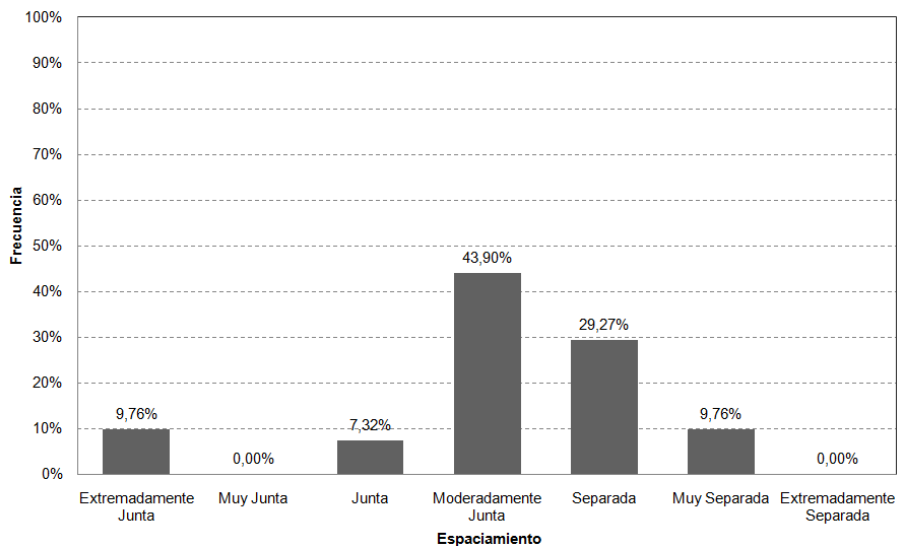


Figura 60. Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades

6.2.3 Continuidad

Se trata de la extensión del plano de discontinuidad en el rumbo. Los rangos para la categorización de esta propiedad son los mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Descripción de la continuidad de las discontinuidades

Descripción	Medida
Muy baja	< 1 m
Baja	1 m – 3 m
Media	3 m – 10 m
Alta	10 m – 20 m
Muy alta	> 20 m

Se obtuvieron finalmente los resultados que se muestran en la Figura 61. En términos de la continuidad, el 58.54% de las discontinuidades levantadas presentaron una continuidad muy baja la cual corresponde a planos con longitudes de hasta 1.0 m. El 41.46% restante presentaron continuidades bajas y medias, es decir entre 1.0 m a 10 m.

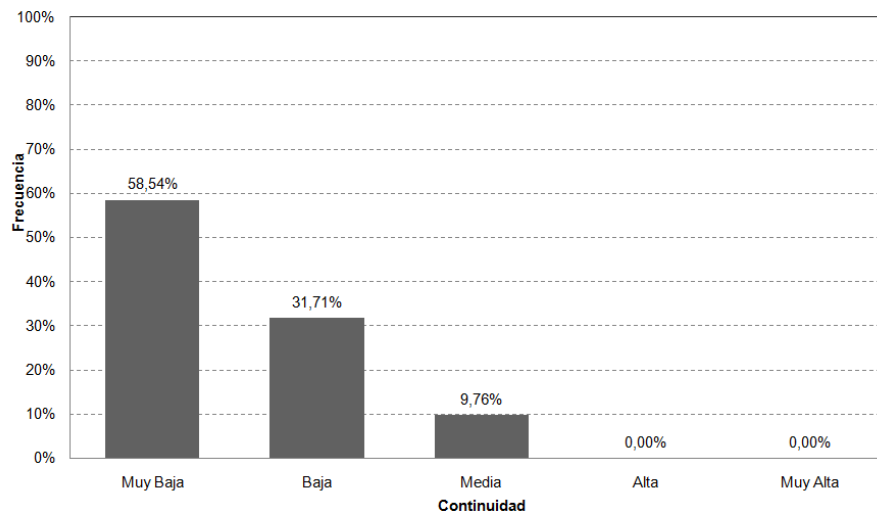


Figura 61. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades

6.2.4 Abertura

Corresponde a la distancia perpendicular al buzamiento que separa las paredes de la discontinuidad cuando no existe relleno. Este parámetro puede tener grandes cambios a lo largo del macizo rocoso. Los rangos para esta clasificación son los mostrados a continuación en la Tabla 15.

Tabla 15. Descripción de la abertura de las discontinuidades

Descripción	Medida
Muy cerrada	< 0.1 mm
Cerrada	0.1 mm – 0.25 mm
Parcialmente abierta	0.25 mm – 0.5 mm
Abierta	0.5 mm – 2.5 mm
Moderadamente abierta	2.5 mm – 10 mm
Ancha	> 10 mm
Muy ancha	1 cm – 10 cm
Extremadamente ancha	10 m – 100 cm
Cavernosa	> 1 m

Con base en los en los rangos de la Tabla 15, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 62. Las discontinuidades se presentaron predominantemente ancha ya sea variando entre parcialmente o extremadamente abiertas, esto equivale a tener discontinuidades con aberturas entre 0.25 mm hasta 100 cm. Los procesos que más favorecen la abertura de estos planos se asocian a la meteorización y disolución en la roca que amplían la zona discontinua.

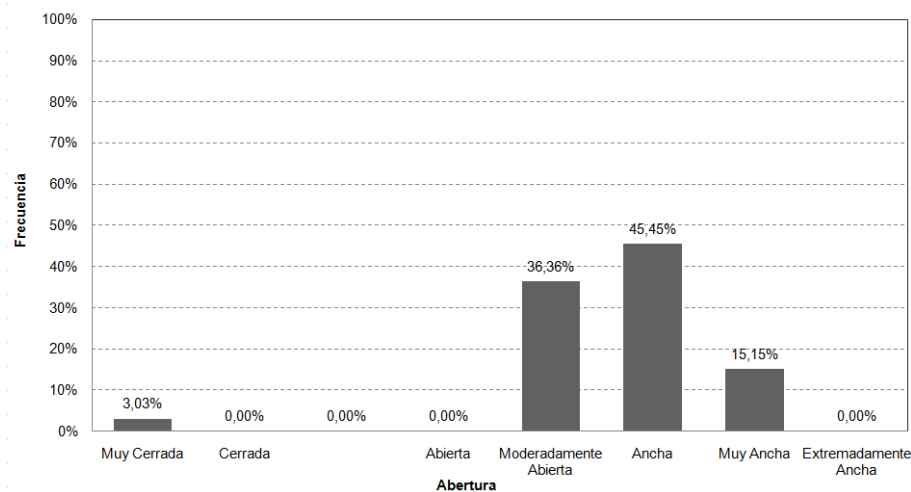


Figura 62. Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades

6.2.5 Relleno

En ocasiones, en las discontinuidades puede aparecer relleno de materiales blandos arcillosos o con materiales rocosos de naturaleza distinta a la de las paredes. Las propiedades físicas y mecánicas del relleno pueden ser variables y controlan el

comportamiento de la discontinuidad. Los rangos de esta característica van desde ninguno, hasta duro de más o menos que 5 mm y blando de más o menos que 5 mm.

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 63. En lo que respecta al relleno, las discontinuidades conformada por el 71.45%, no presentan ningún tipo de relleno al interior de la abertura, mientras el 28.57% restante de las discontinuidades presentan relleno generalmente con un material limoso u arcilloso muy húmedo y plástico que debe ser producto de la meteorización y precipitación del suelo.

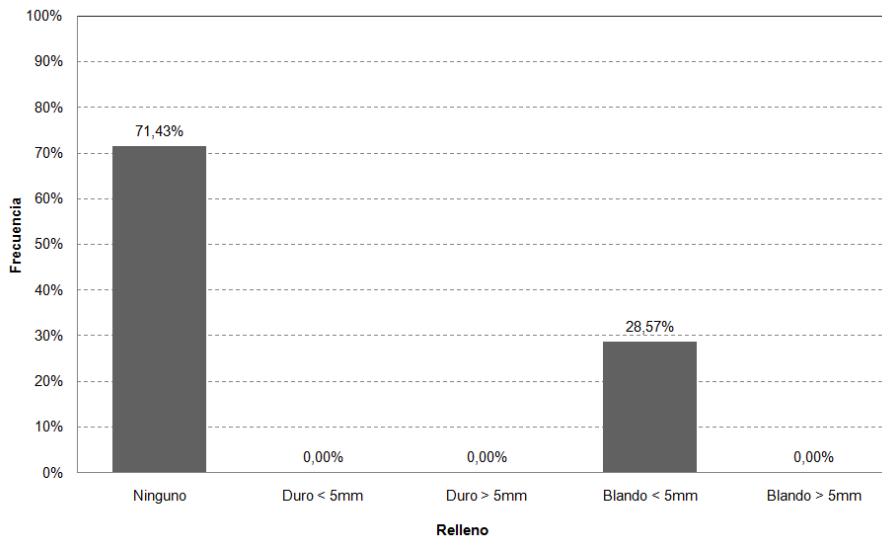


Figura 63. Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades

6.2.6 Alteración

Es el cambio físico-químico que los agentes atmosféricos pueden producir sobre el macizo rocoso, afectando las propiedades geomecánicas. Los rangos de esta característica van desde inalterada, ligeramente alterada, moderadamente alterada, muy alterada hasta descompuesta.

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 64. La discontinuidades levantadas en cada una de las estaciones geomecánicas mostraron un nivel entre ligeramente alterada y muy alterada.

6.2.7 Rugosidad

Esta propiedad determina la resistencia al corte de la discontinuidad. A mayor rugosidad, mayor es la resistencia. La presencia de irregularidades dificulta el movimiento durante los procesos de desplazamiento tangencial por corte a favor de las discontinuidades. La rugosidad de las discontinuidades se calificó según dos escalas diferentes, como se muestra en la Figura 65. Primero la escala decimétrica o métrica, la cual puede ser

escalonada, ondulada o plana. Luego se juzgó la escala centimétrica o milimétrica que da lugar a discontinuidades rugosas, lisas o planas.

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 66. En términos de la rugosidad las discontinuidades se presentaron predominantemente escalonadas con un 63.63%, ondulada con un 30.3% y plana con un 6.06%. Entre los tres tipos se resalta que la mayoría de las discontinuidades se presentan lisas.

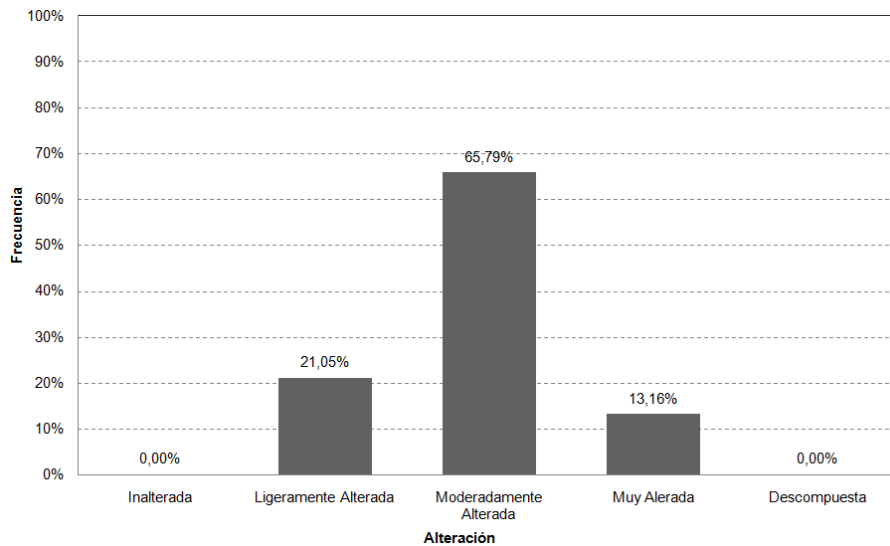


Figura 64. Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades

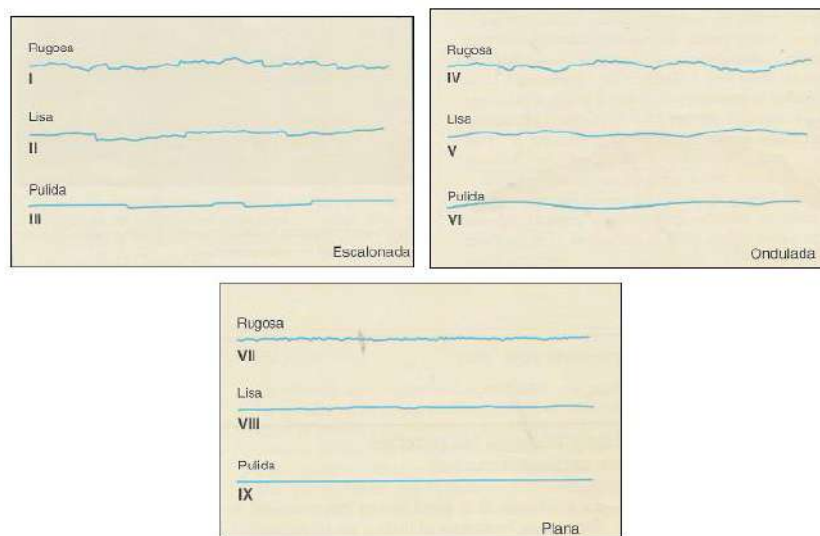


Figura 65. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Tomado de Gonzales de Vallejo, 2002)

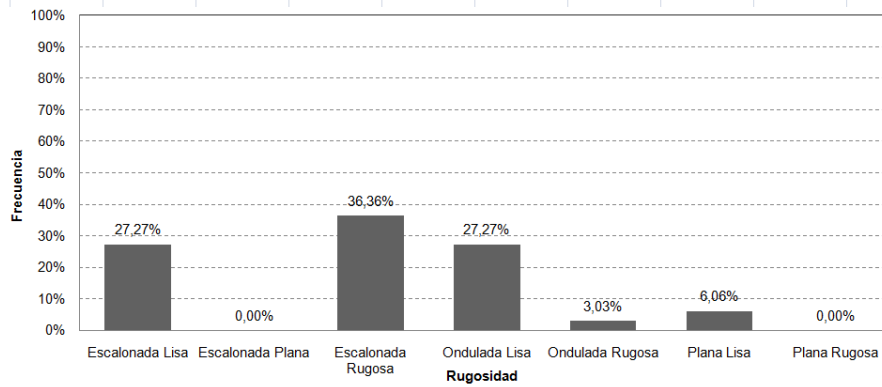


Figura 66. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades

6.2.8 Agua

Es el flujo que circula por las discontinuidades. Los rangos de esta característica consideran como posibilidades que la discontinuidad esté seca, ligeramente húmeda, húmeda, goteando o con agua fluyendo.

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 67. Desde el punto de vista de las condiciones de humedad identificadas en las discontinuidades, la mayoría de las mismas presentaron condiciones secas y húmedas.

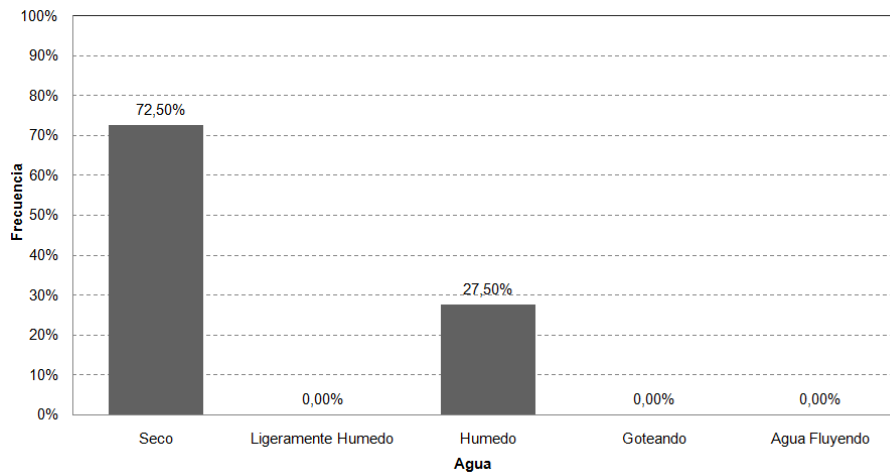


Figura 67. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades

6.2.9 Resistencia de las paredes

Es la resistencia a la compresión inconfiada, considerándose entonces que es una buena medida de la alteración de las paredes de la discontinuidad. Los rangos de esta característica son extremadamente blanda, muy blanda, blanda, moderadamente dura, dura, muy dura y extremadamente dura.

Para la UMI El Faro-Golondrinas se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 68. Desde el punto de vista de la resistencia, el material observado en campo presenta una resistencia moderadamente dura a muy dura con un porcentaje del 97.3%, mientras sólo el 2.7% se presenta blanda.

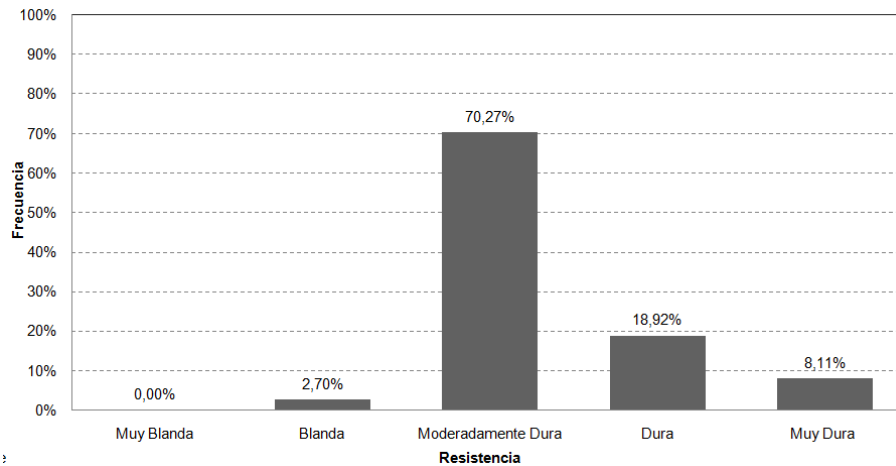


Figura 68. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades

6.3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En este numeral se presenta el análisis cinemático basado en la geología estructural presentada anteriormente. Este análisis se llevó a cabo para tres secciones cerca de las cuales se tomaron datos estructurales o se observaron escarpes en roca, localizados, como se muestra en la Figura 69 y en la Tabla 16.

En primer lugar, se determinó la dirección y buzamiento de las secciones analizadas y, además, se determinó el ángulo de fricción de las discontinuidades de acuerdo con lo observado en campo. A partir de las características de relleno y alteración de las discontinuidades se definió un ángulo de fricción de 25° considerando que es el límite inferior, según la clasificación de Barton et al. (1974), para un índice de alteración de las discontinuidades (J_a) de 2, es decir, para “planos de discontinuidades ligeramente alterados que presentan minerales no reblandecibles, partículas arenosas, roca desintegrada libre de arcillas, etc”. Con los datos de las secciones y el ángulo de fricción de las discontinuidades, se llevó a cabo el análisis cinemático haciendo uso del Software Dips de Rocscience, el cual permite analizar fallas planares, por cuña, por volcamiento flexural y por volcamiento directo, entregando gráficamente la zona crítica para cada una de estas fallas, así como la probabilidad de falla de cada mecanismo, de acuerdo con el número de elementos críticos en comparación con el número total de elementos.

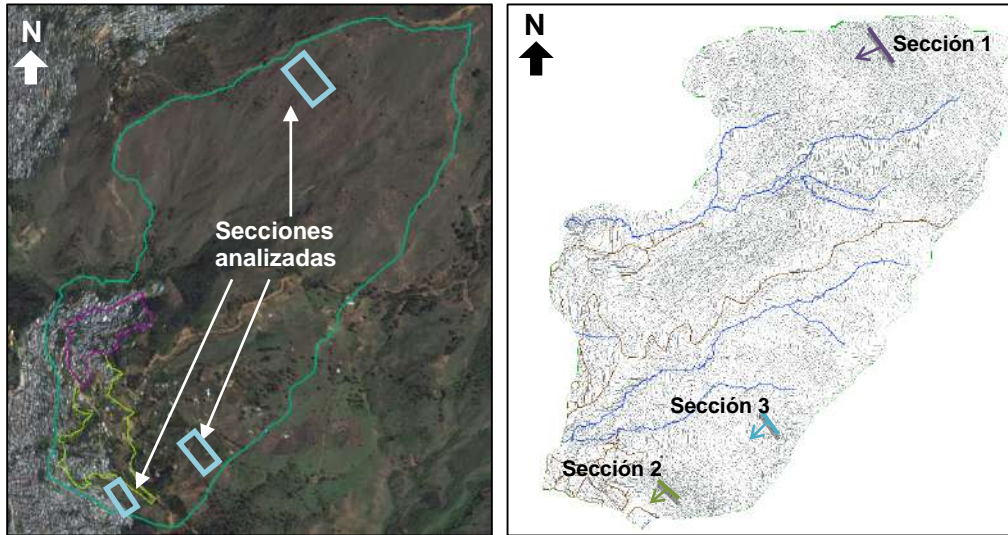


Figura 69. Secciones analizadas en la UMI El Faro-Golondrinas

Tabla 16. Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas

Sección	Buzamiento	Dirección del Buzamiento
1	38°	231°
2	36°	235°
3	31°	222°

Como se observa en la Tabla 16, las tres secciones escogidas tienen orientaciones similares, en la Sección 1 es de N39°W/38°SW) en la Sección 2 es de N35°W/36°SW y en la Sección 3 es de N48°W/31°SW. Por la similitud demostrada, se realizará un sólo análisis para las Secciones 1 y 2.

Los resultados gráficos de los análisis realizados se muestran en la Figura 70 y en la Figura 71, mientras que los resultados numéricos se presentan en la Tabla 17. En las observaciones de la tabla se incluyen las probabilidades de falla para las familias más críticas de cada mecanismo.

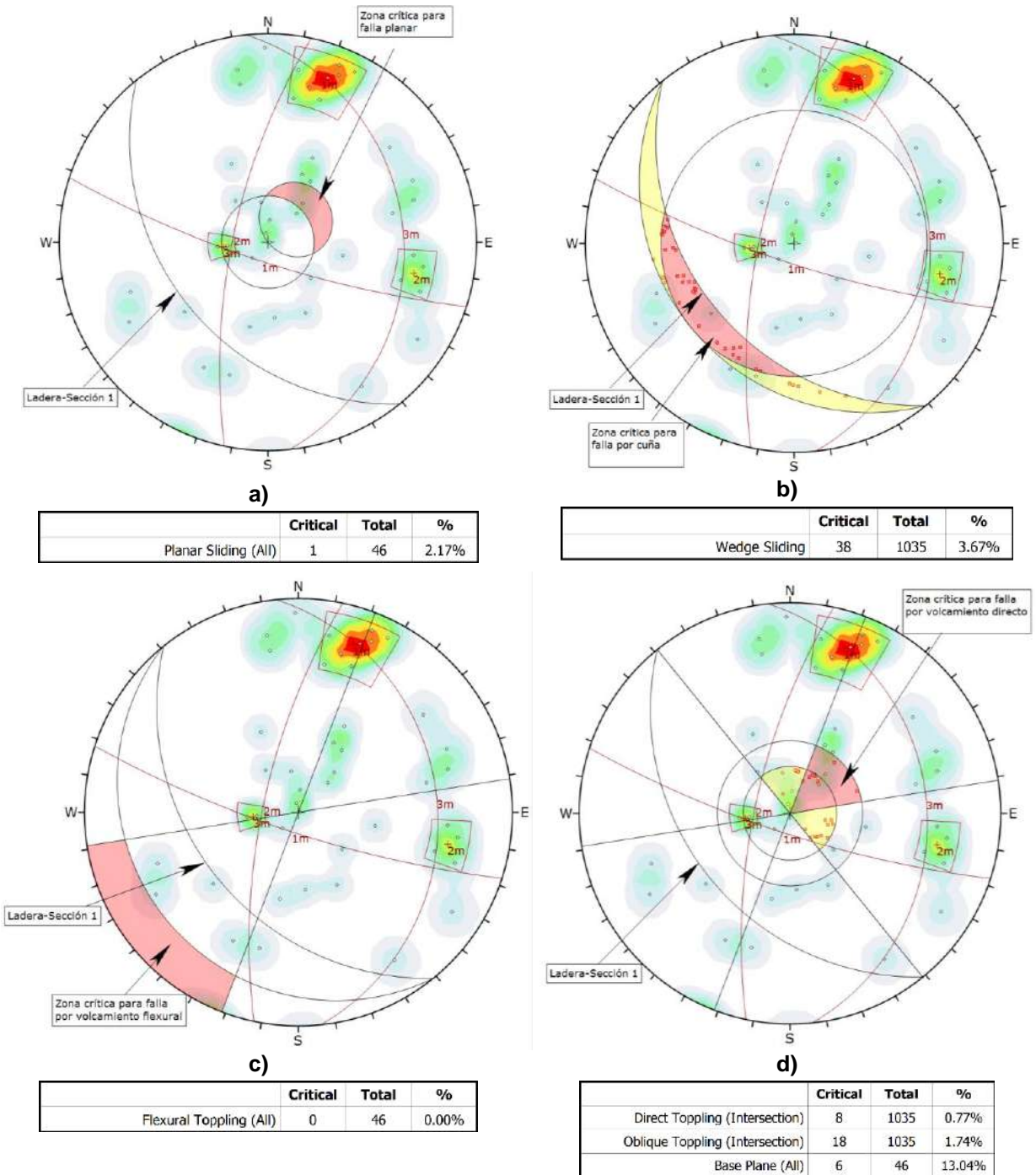
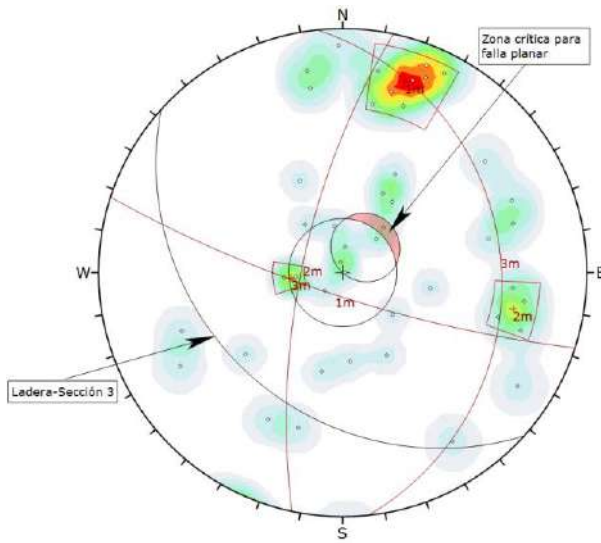
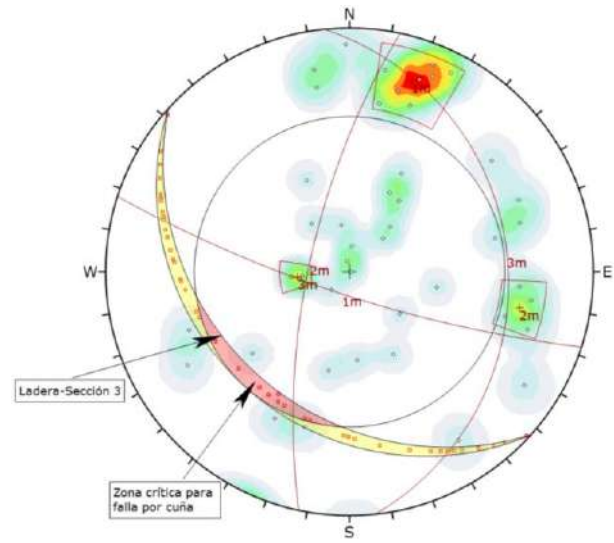


Figura 70. Análisis cinemático Secciones 1 y 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo



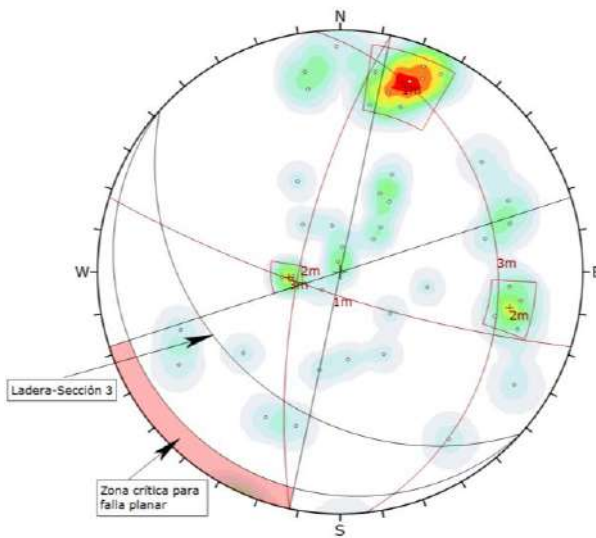
a)

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	1	46	2.17%



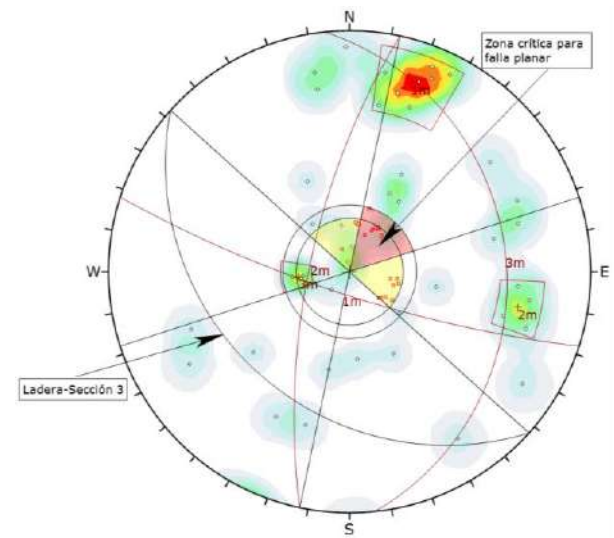
b)

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	46	1035	4.44%



c)

	Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	0	46	0.00%



d)

	Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	7	1035	0.68%
Oblique Toppling (Intersection)	15	1035	1.45%
Base Plane (All)	6	46	13.04%

Figura 71. Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

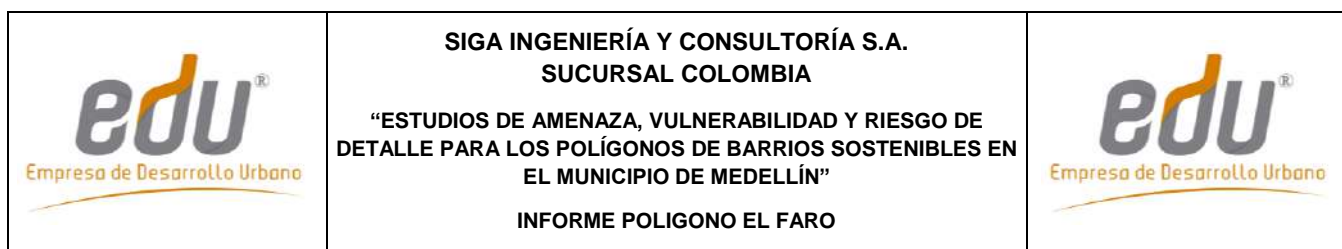


Tabla 17. Resumen resultados análisis cinemático

Sección	Falla planar	Falla por cuña	Volcamiento flexural	Volcamiento directo	Volcamiento oblicuo	Volcamiento por base	Observaciones
1 y 2	2,17%	3,67%	0,00%	0,77%	1,74%	13,04%	No se encontraron familias críticas para los mecanismos de falla.
3	2,17%	4,44%	0,00%	0,68%	1,45%	13,04%	No se encontraron familias críticas para los mecanismos de falla.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis cinemático de la UMI El Faro - Golondrinas (Tabla 17) se puede concluir que no hay un mecanismo con probabilidad de falla mayor a 20%. El mecanismo de falla con mayor probabilidad es el volcamiento (mecanismo por la base) con un 13% en todas las secciones. El volcamiento flexural tiene un 0% de probabilidad de ocurrencia. En las secciones analizadas se presenta intersección entre las Familias 1 y 3, aunque la dirección de la línea de intersección es igual a la dirección de buzamiento del talud, no se favorece la formación de cuñas debido a que la inclinación de esta intersección no es menor que el buzamiento del talud. El porcentaje de probabilidad de falla por cuña es aproximadamente 4% en todas las secciones.

7. EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA

7.1 ASPECTOS GENERALES

Basados en el Código de Laderas del AMVA (2012), una vez ejecutados los estudios geológicos y geomorfológicos para la UMI de estudio, se procedió a la realización del mapa de zonificación de la aptitud geológica de la UMI El Faro-Golondrinas.

Con el fin de definir la aptitud geológica de dicha UMI, se planteó una metodología que reúne una secuencia lógica de pasos en los que se tienen en cuenta aspectos tales como la geomorfología, la actividad morfodinámica, las pendientes y la geología, esta última representada en las formaciones superficiales de la zona de estudio. Estos factores se valoran en un álgebra de mapas, utilizando Herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), con el fin de realizar una zonificación geológica y la identificación del uso del suelo para el urbanismo.

A continuación se describe la metodología implementada, la cual se resumen además en la Figura 72.

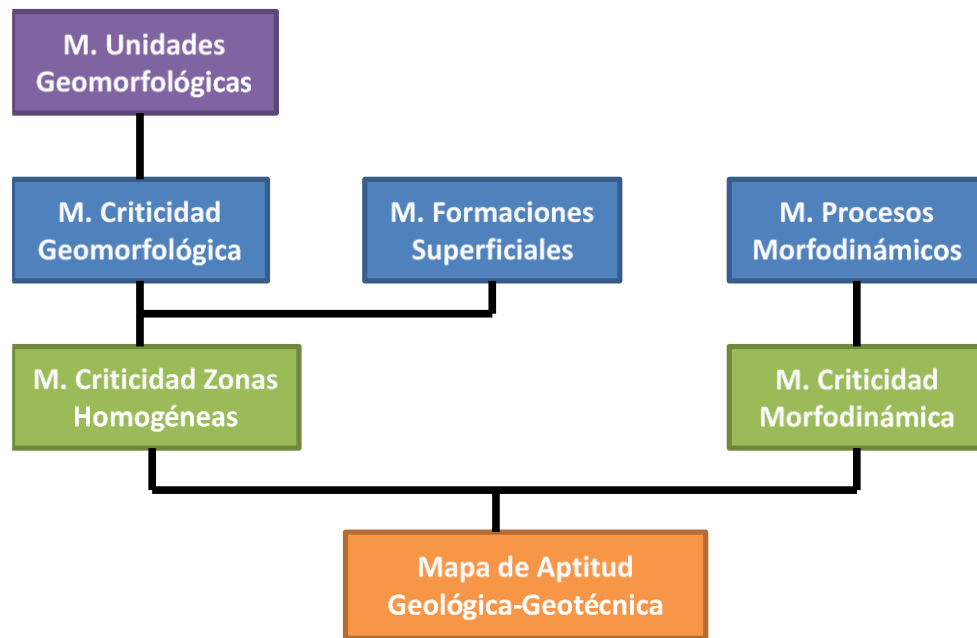


Figura 72. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica

Como se observa en la Figura 72, la metodología lleva finalmente a la generación de tres mapas importantes, el de criticidad de zonas homogéneas, a partir del mapa de criticidad geomorfológica y del mapa de formaciones superficiales, el de criticidad morfodinámica y el de zonificación de la aptitud geológica.

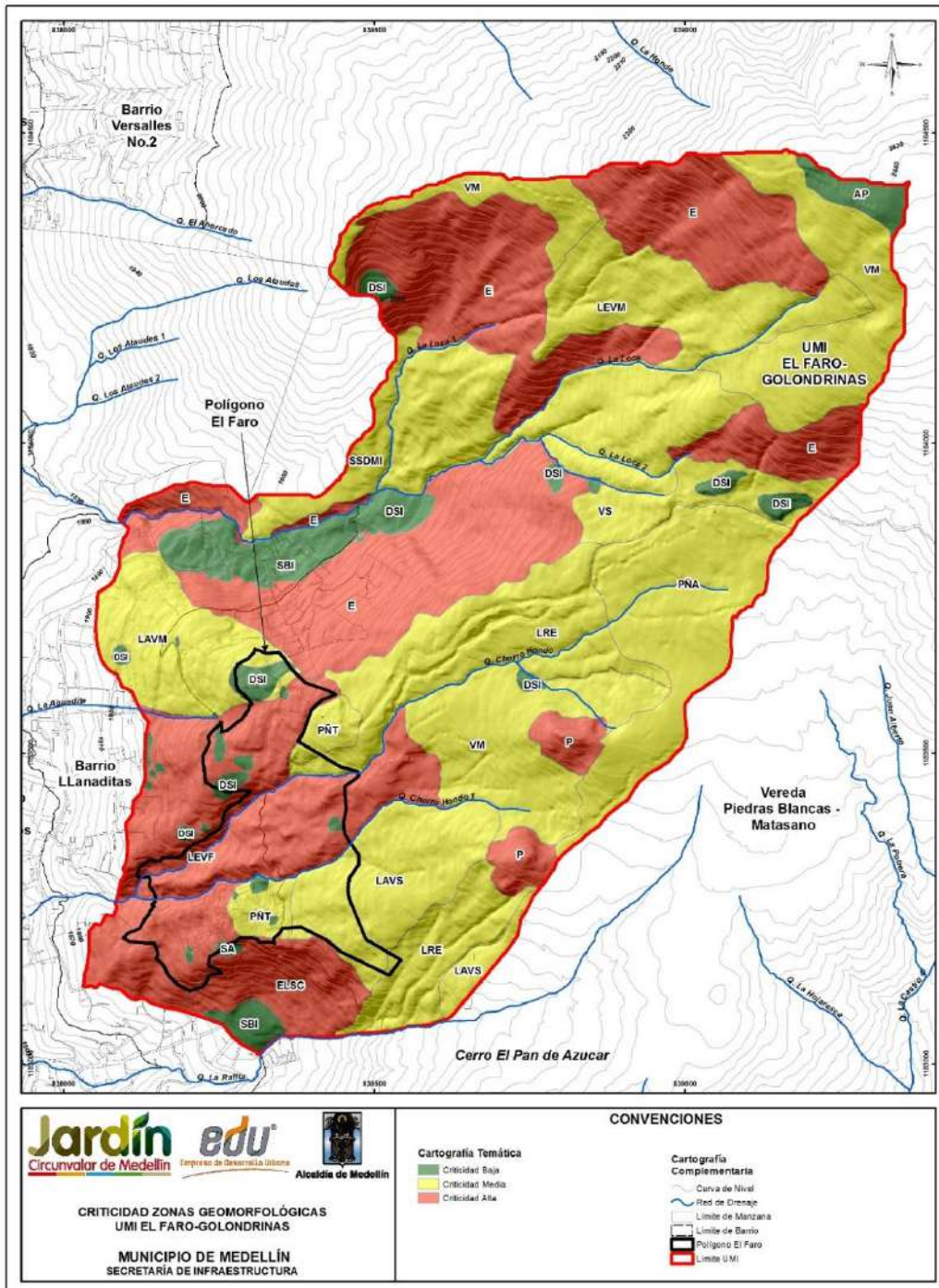
7.2 MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS

Para la obtención de este mapa, se realizó el cruce del mapa de unidades geomorfológicas con el mapa de formaciones superficiales, definiéndose zonas del terreno conformadas por una unidad geológica superficial en una unidad geomorfológica determinada.

Para cada unidad geomorfológica se asigna un valor de criticidad según la pendiente y la geoforma asociada (Tabla 18). Se da un valor cualitativo entre alto, medio y bajo, equivalente a un valor de peso en una escala numérica de 1 a 3 y a colores de verde, amarillo y rojo. El color verde es para el Nivel 1 (Bajo), el amarillo para el Nivel 2 (Moderado) y el rojo para el Nivel 3 (Alto). En el Mapa 15 se muestra análisis de la criticidad geomorfológica obtenido para la UMI El Faro-Golondrinas.

Tabla 18. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Nivel de Criticidad
Altiplano	1
Depósitos Sin Incisión	1
Escarpe	3
Escarpe Largo Semicircular	3
Lomeríos estrechos	2
Lomo Amplio con Vertientes Suaves	2
Lomo Amplio con Vertientes Moderadas	2
Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes	3
Lomo Estrecho con Vertientes Moderadas	2
Peldaño Alto	2
Peldaño Tectónico	2
Picacho	3
Superficie Antrópica	1
Superficies con Baja Incisión	1
Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	2
Vertiente Moderada	2
Vertiente Suave	2



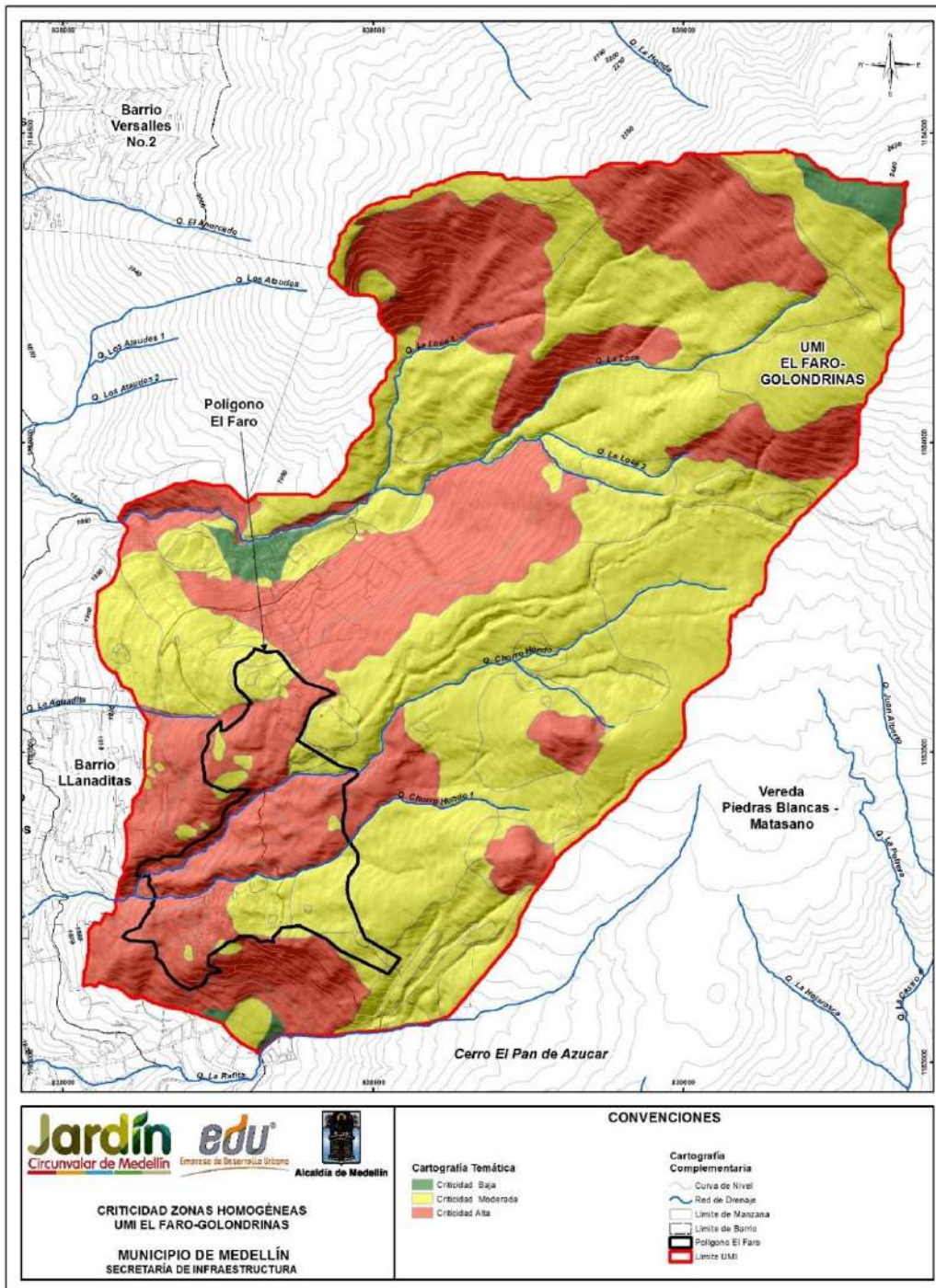
Mapa 15. Criticidad geomorfológica UMI El Faro – Golondrinas
 (EFR_CriticidadZonasGeomorfológicas_Medellin_C)

Posteriormente, se avalúa el mapa de criticidad geomorfológica en función de las formaciones superficiales, según las características de cada material. A partir de lo anterior, se obtiene la criticidad de las zonas homogéneas utilizando las combinaciones que se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas

Criticidad Unidad Geomorfológica	Formación Superficial	Criticidad Zona Homogénea
1	Lleno Antrópico	2
	Depósitos (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín y de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	1
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
2	Lleno Antrópico	3
	Depósitos (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	2
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín y de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	2
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	2
3	Lleno Antrópico	3
	Depósitos (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	3
	Horizonte IB y IC de Dunitas de Medellín y de Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño	3
	Horizonte IIA de Dunitas de Medellín	3

Finalmente, se genera el mapa de criticidad de las zonas homogéneas asignando un color para cada nivel de criticidad. El color verde se asigna para el Nivel 1 (Bajo), el color amarillo se asigna para el Nivel 2 (Moderado) y el color rojo se asigna para el Nivel 3 (Alto) como se muestra en el Mapa 16.



Mapa 16. Criticidad de zonas homogéneas UMI El Faro – Golondrinas (EFR_CriticidadZonasHomogéneas_Medellín_C)

7.3 MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA

A partir de la información de los procesos morfodinámicos, se generó el mapa morfodinámico, como insumo fundamental en la clasificación de la zona respecto a las diferentes amenazas por fenómenos de movimientos en masa. Primero se realizó un mapa de densidad de procesos morfodinámicos, seguidamente se generó el mapa de grado de actividad y finalmente se integraron estos dos mapas con lo que se obtuvo el mapa de criticidad morfodinámica.

Para la definición del mapa de densidad de procesos morfodinámicos, se debió determinar la unidad de cálculo del terreno (UCT). Esta se definió de acuerdo con la recomendación planteada en la Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015) del Servicio Geológico Colombiano (SGC). La UCT definida fue de 400 m² (malla de 20 m x 20 m), ya que la escala de trabajo es 1:2.000.

Posteriormente, se definieron densidades para cada una de las UCT, con el fin de determinar concentraciones de los procesos morfodinámicos, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Densidad baja cuando se tiene menos que un proceso morfodinámico dentro de la UCT.
- ✓ Densidad moderada cuando se tiene un proceso morfodinámico dentro de la UCT.
- ✓ Densidad alta cuando se tiene más de un proceso morfodinámico dentro de la UCT.

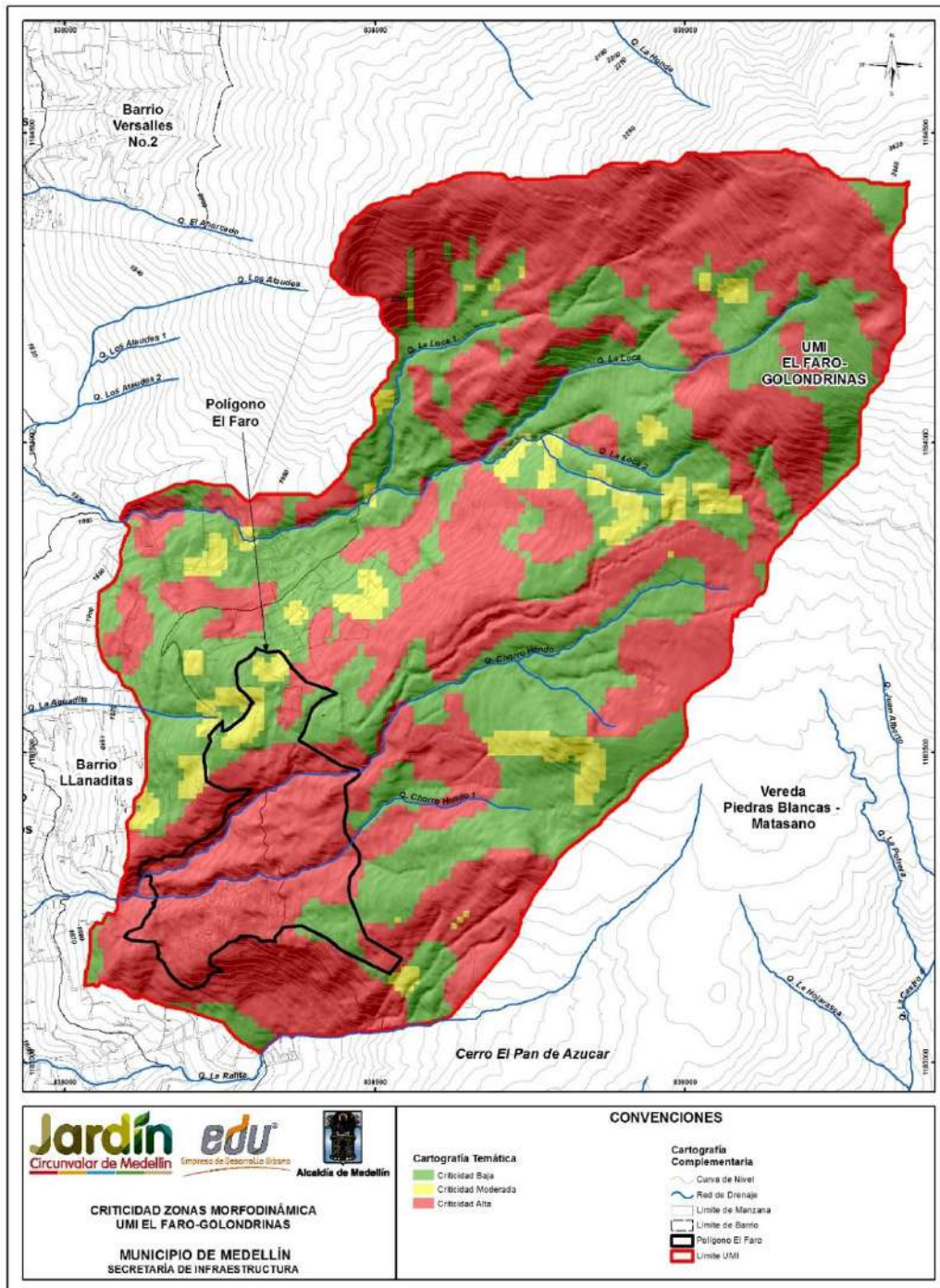
Luego de lo anterior, se hizo una zonificación de la zona de estudio de acuerdo con el grado de actividad de los procesos morfodinámicos, dividiéndose estos en activos e inactivos.

Finalmente, se llevó a cabo la integración de los resultados anteriores y clasificación de la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica, de acuerdo con los criterios de decisión que se presentan en la Tabla 20.



Tabla 20. Criterios de decisión para clasificar la zona de estudio con respecto a la criticidad morfodinámica

Criticidad Morfodinámica alta (Nivel 3 - Color Rojo)	Se presenta densidad alta y procesos activos Se presenta densidad moderada y procesos activos. Se presenta densidad baja y procesos activos. Se presenta densidad alta y procesos inactivos.
Criticidad Morfodinámica moderada (Nivel 2 - Color Amarillo):	Se presenta densidad moderada y procesos inactivos
Criticidad Morfodinámica baja (Nivel 1 - Color Verde)	Se presenta densidad baja

Una vez obtenido el mapa con la metodología planteada, se hicieron ajustes en la criticidad de las zonas, de acuerdo con lo observado en campo (método holístico). En el Mapa 17 se presenta el análisis de la criticidad morfodinámica de la UMI, obtenido con la metodología descrita anteriormente, en donde verde corresponde al Nivel 1 (bajo), amarillo al Nivel 2 (moderado) y rojo al Nivel 3 (alto).



Mapa 17. Criticidad morfodinámica UMI El Faro-Golondrinas
 (EFR_CriticidadMorfodinámica_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

7.4 MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA

Una vez obtenidos el mapa de criticidad de zonas homogéneas y el mapa de criticidad morfodinámica, se procede a realizar el álgebra de mapas con Herramientas SIG, a través de la siguiente función:



$$A (F)= X1 (\text{Mapa de criticidad Zonas homogéneas}) + X2 (\text{Mapa Criticidad Morfodinámica})$$

En donde, X1 y X2 corresponden a los coeficientes de la susceptibilidad por inestabilidad de las vertientes y se asignaron valores de 60% y 40%, respectivamente.

A partir de los resultados, se determinaron las cuatro zonas propuestas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012), que se describen a continuación. .

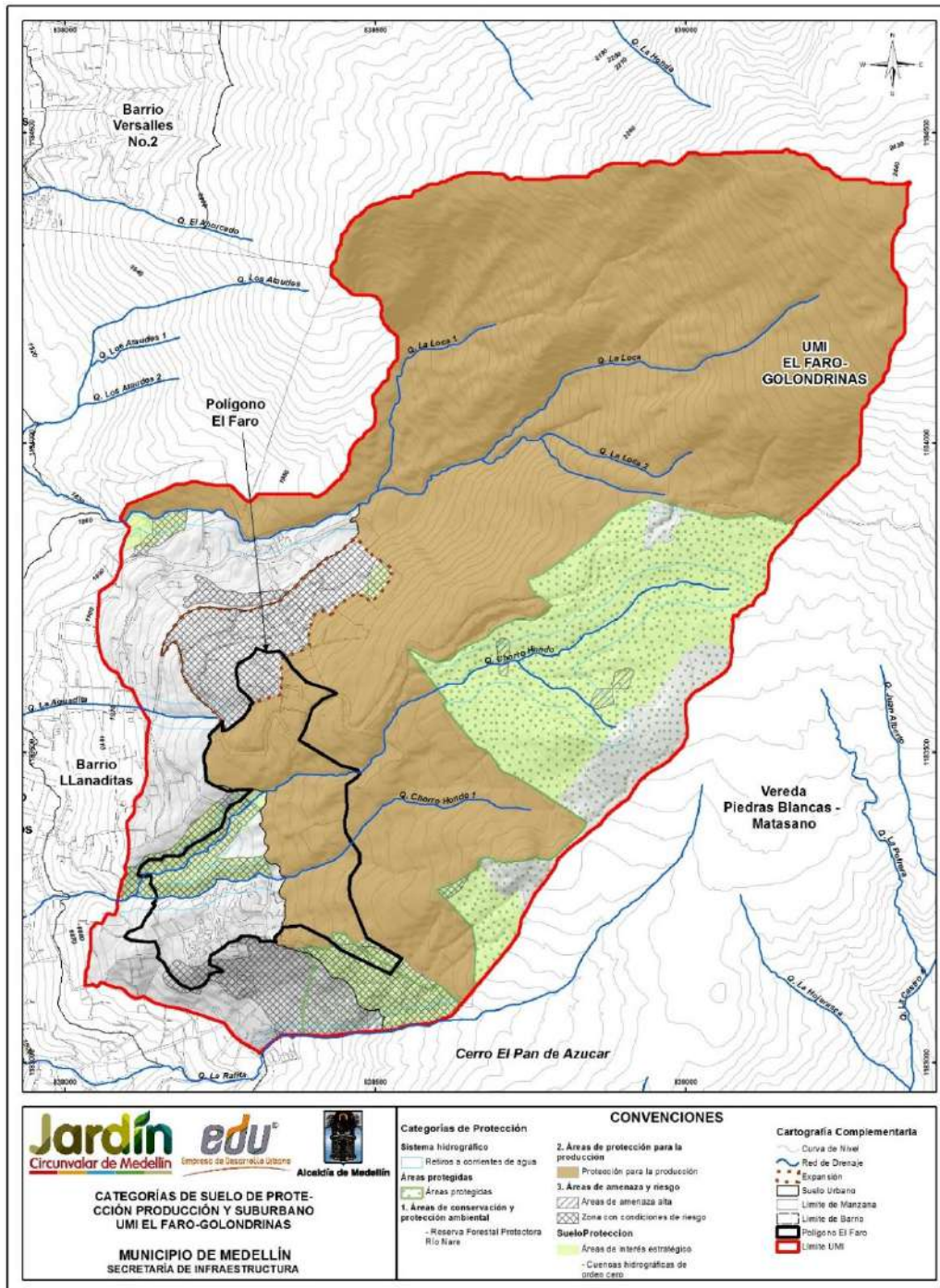
- ✓ Zonas aptas que corresponden a áreas con alto grado de estabilidad, en las que no se aprecia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos e inactivos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa que afecten la estabilidad global del predio de interés y de la UMI asociada. La estabilidad global de estas zonas está condicionada al tipo de intervención que se proyecte y al uso y manejo que se dé a estas y a la UMI asociada.
- ✓ Zonas aptas con restricciones moderadas, que corresponden a áreas estables dentro del predio de interés, aunque su estabilidad está condicionada por la incidencia directa que presentan procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa identificados en la UMI asociada. La estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte. Se considera que las obras de estabilización proyectadas son técnica y económicamente viables.
- ✓ Zonas aptas con restricciones altas, en las cuales se evidencia la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa localizados en el predio de interés y en la UMI asociada. La estabilidad global de estas zonas dependerá del manejo que se dé a los procesos morfodinámicos y al tipo de intervención que se proyecte sobre estas. El estudio debe evaluar la viabilidad técnica y económica de las obras de estabilización proyectadas dentro del lote y la UMI asociada.
- ✓ Zonas no aptas, que son aquellas con evidente inestabilidad por la ocurrencia de procesos morfodinámicos activos tales como socavación de márgenes y movimientos en masa dentro del lote de interés y la UMI asociada. El estudio considera que las obras de estabilización proyectadas son técnicamente complejas y de alto costo con respecto a las inversiones proyectadas en la zona o predio de interés. Las zonas con restricciones normativas se considerarán como no aptas.

En el Mapa 20 se presenta el análisis de la aptitud geológica y geotécnica de la UMI El Faro - Golondrinas obtenido con la metodología descrita anteriormente. Este mapa está refinado con base en lo observado en campo y teniendo en cuenta las áreas que por norma tengan restricción, como lo son las áreas protegidas y los retiros a corrientes de agua, según las especificaciones del POT (2014) del municipio de Medellín, como se

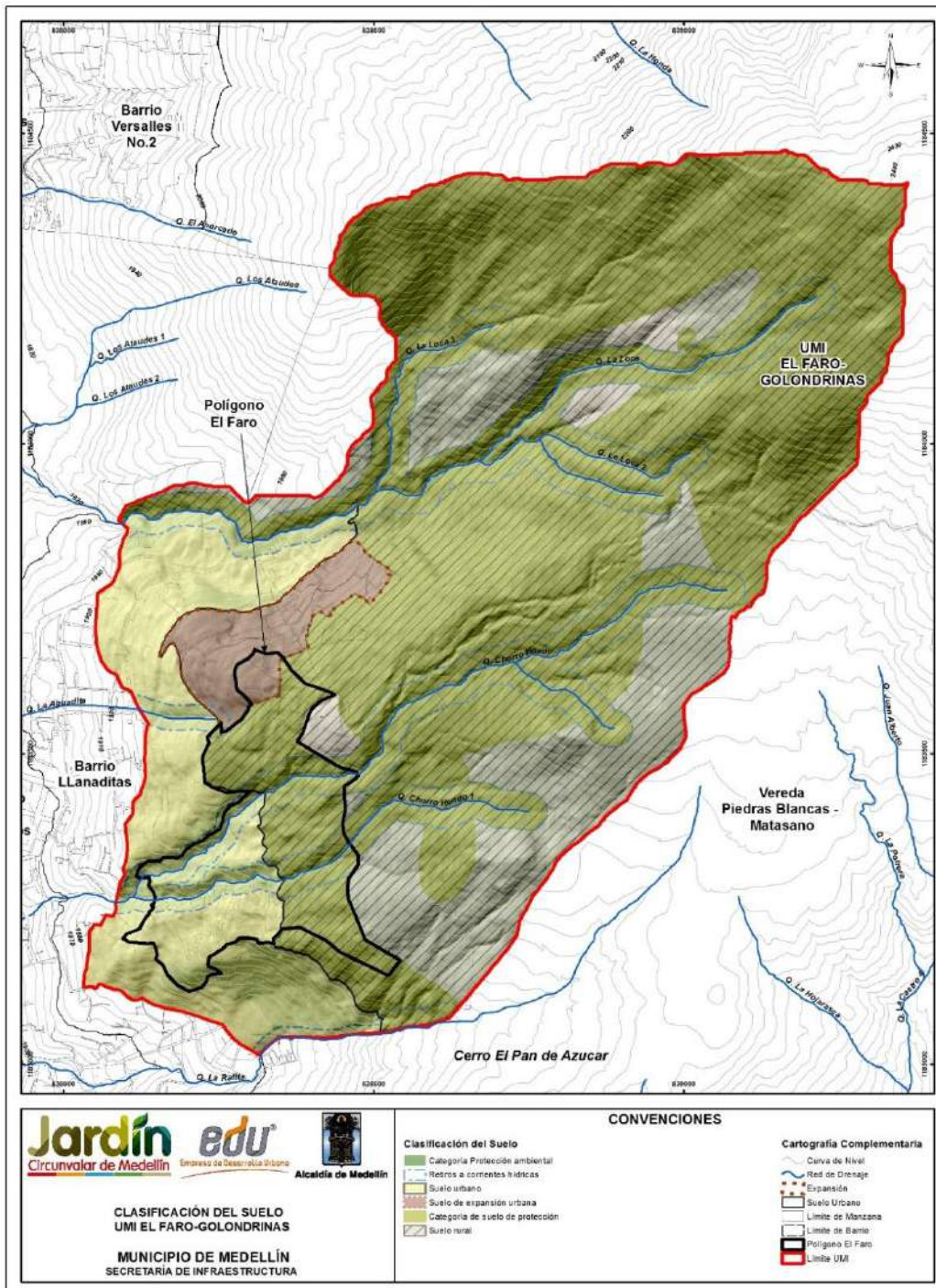
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

muestran en el Mapa 18 y el Mapa 19. Además, se delimitaron otros retiros de quebradas que no han sido reportados en el Mapa de Estructura Ecológica del Acuerdo 48 de 2014, debido a la escala de trabajo.

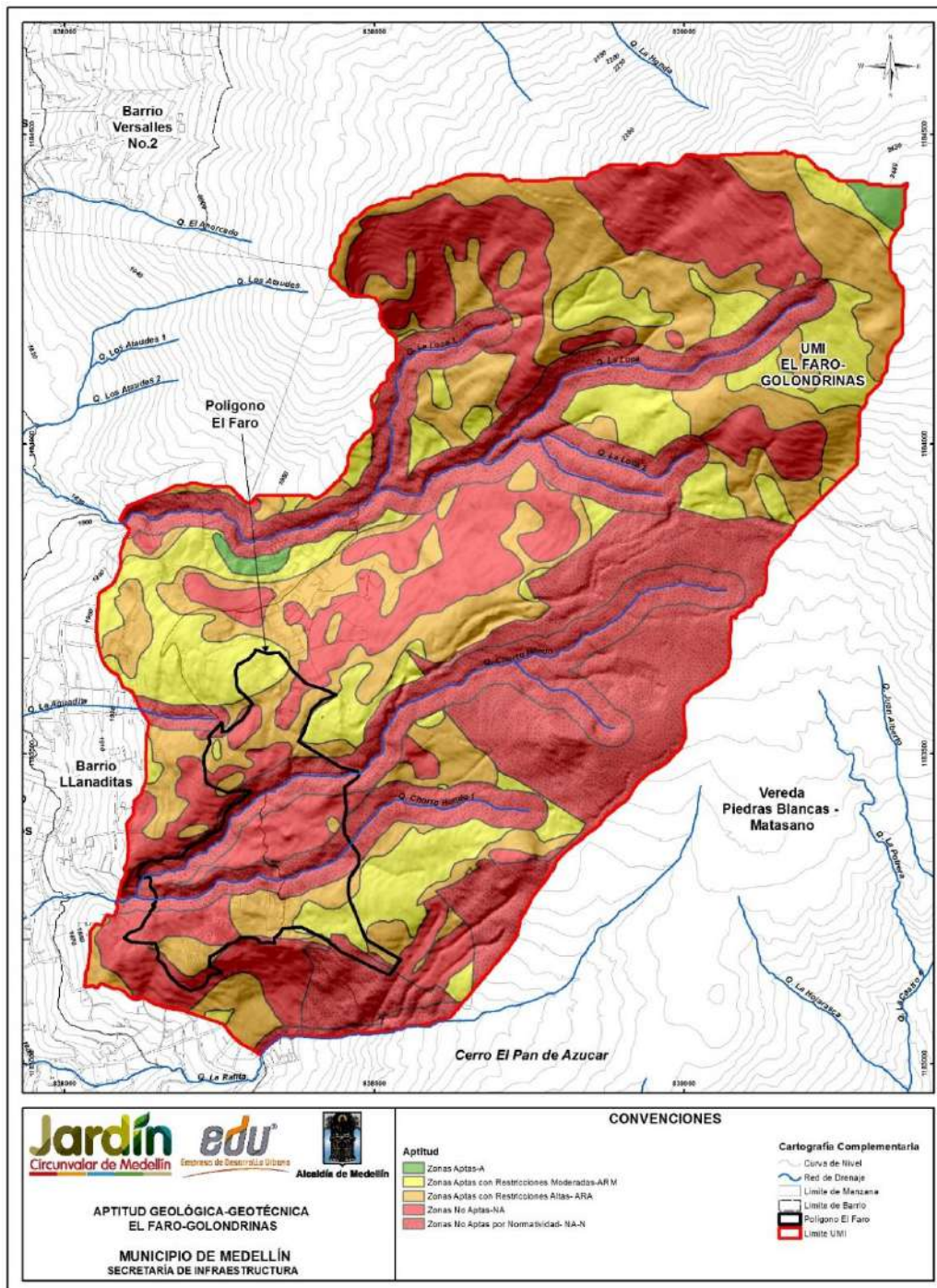
- ✓ Las zonas aptas son las de menor ocurrencia en la UMI El Faro. Se restringen a dos áreas menores, una en el extremo norte de la UMI y otra en la zona occidental. No se tiene este tipo de zonas al interior del polígono El Faro.
 - ✓ Las zonas aptas con restricciones moderadas se encuentran distribuidas aleatoriamente en la UMI. Al interior del polígono El Faro se encuentran dos zonas con esta clasificación, una en el extremo sur y otra en el extremo norte.
 - ✓ Las zonas aptas con restricciones altas se encuentran distribuidas aleatoriamente en la UMI. Con esta clasificación se tienen áreas en la zona norte y en la zona sur del polígono en estudio.
 - ✓ Las zonas no aptas se distribuyen a lo largo de toda la UMI. La mayor parte del área del polígono El Faro se encuentra bajo esta clasificación, concentrada en la parte central del polígono, en medio de las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.
 - ✓ Las zonas no aptas por normatividad se encuentran en la parte oriental de la UMI y en franjas dispuestas a lo largo de los drenajes que la atraviesan. Estas zonas corresponden a la Reserva Forestal Protectora Río Nare y retiros de las quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, definidas por el POT (2014) del Municipio de Medellín según el Acuerdo 48 de 2014 (Mapa 18 y Mapa 19).
- Las quebradas Chorro Hondo, Chorro Hondo 1, La Loca 1 y La Loca 2 tienen retiros de 60 m, mientras que La Aguadita tiene un retiro de 40 m.
- ✓ En general la proporción de las zonas aptas con restricciones moderadas, aptas con restricciones altas, no aptas y no aptas por normatividad es similar en toda la UMI. Al interior del Polígono El Faro dominan las zonas no aptas y aptas con restricciones altas.





Mapa 18. Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)
 (15_EFRCategoríasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_C y
 15_EFRCategoríasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T)



Mapa 19. Clasificación del suelo (POT, 2014)
 (14_EFRClasificaciondelSuelo_Medellin_C y 14_EFRClasificaciondelSuelo_Medellin_T)



Mapa 20. Aptitud Geológica - Geotécnica UMI El Faro-Golondrinas
 (18_EFRaptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_C y
 18_EFRaptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

8. ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

8.1 ASPECTOS GENERALES

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación llevada a cabo específicamente con el objetivo de proponer un modelo hidrogeológico conceptual del sitio en estudio.

En otras investigaciones (Hoyos, 2000) ha sido postulada la existencia de dos sistemas hidrogeológicos separados que descargan en el Valle de Aburrá (VA). El primero y más elevado, con su zona de recarga en el Planalto de Santa Elena (PSE), descarga en la parte alta de las laderas orientales del Valle de Aburrá. El segundo, cuya área de recarga se encuentra en el Valle de San Nicolás (VSN), descarga en la parte inferior de esas mismas laderas. En la Figura 73 pueden apreciarse las posiciones relativas de los Valles de San Nicolás a 2150 msnm y de Aburrá a 1550 msnm. Entre ambos valles se encuentra el Planalto de Santa Elena a 2550 msnm, con alturas máximas mayores que 2650 m. Los polígonos correspondientes al Proyecto Barrios Sostenibles se encuentran ubicados entre el Planalto de Santa Elena y el Valle de Aburrá.

En una primera aproximación puede aceptarse que las aguas subterráneas en el Valle de Aburrá proceden en su mayor parte del Valle de San Nicolás y en menor proporción del Planalto de Santa Elena. Entre las zonas de recarga y el Valle de Aburrá existen conexiones hidráulicas, dadas por las discontinuidades estructurales del macizo rocoso, cuya ocurrencia puede ser verificada mediante la información de la composición isotópica de los diferentes componentes del sistema.

La evaluación del sistema hidrogeológico en los polígonos de estudio, requiere entonces la identificación de las áreas de recarga y las direcciones de flujo del agua subterránea hacia el Valle de Aburrá desde el Planalto de Santa Elena y los Valles de San Nicolás.

Para efectos del análisis y de elaboración de los modelos de flujo, se considera un medio hidráulicamente homogéneo dado por un macizo rocoso fracturado con una permeabilidad secundaria equivalente de 10^{-7} m/s, cruzado por un conjunto de fallas, y con una cobertura de limo cuyo espesor varía entre 0 m y 30 m. Este valor de permeabilidad ha sido estimado a partir de los datos obtenidos en la construcción de túneles en rocas masivas de la Cordillera Central y del análisis regional de caudales mínimos (Hoyos, 1998 y 1985). En la cubierta de limo, el flujo libre es nulo para efectos prácticos, de modo que la circulación del agua en la cobertura de limo y en el macizo rocoso procede a lo largo de discontinuidades. Las empinadas pendientes que limitan estas tres unidades y la baja permeabilidad en el regolito, del orden de 10^{-9} m/s, calculada a partir de ensayos de consolidación unidimensional, hacen que la infiltración efectiva en las laderas sea muy baja.



Figura 73. Esquema de localización de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)

Dicha evaluación se hace considerando la aplicación de técnicas isotópicas, basadas en la existencia de isótopos estables de Oxígeno (^{16}O , ^{17}O y ^{18}O) e Hidrógeno (H y D), y la regularidad de la variación del contenido de dichos isótopos estables en la composición del agua. Su condición de isótopos estables y la regularidad de su variación en función de las condiciones de evaporación y de condensación, permiten seguir su pista en el ciclo hidrológico con certeza y utilizarlos como trazadores en dicho ciclo. Los valores de contenido de isótopos estables son dados como desviaciones de valores estándar (valores delta), que en el caso del agua son dados con relación al contenido de Deuterio y Oxígeno 18 del agua media del océano (SMOW: Standard Mean Ocean Water) y se expresan en tantos por mil.

La información utilizada en esta investigación incluye datos y resultados de investigaciones anteriores del autor citado, los resultados de análisis isotópicos de muestras de agua lluvia colectadas en el sitio de estudio en el trimestre comprendido de abril de 2015 a junio del mismo año y de muestras de agua de manantiales colectadas también en la zona de interés después de un intervalo de 10 días sin lluvia.

8.2 LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG

Los contenidos de Deuterio y Oxígeno 18 del agua lluvia presentan una elevada correlación lineal conocida como la Recta Meteórica o Recta de Craig, cuya ecuación general a escala global corresponde a la expresión:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10$$

La Figura 74 ilustra la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia con base en 654 datos generados en todo el país, la cual se ajusta a la expresión:

$$\delta D = 7.7\delta^{18}O + 5.5$$

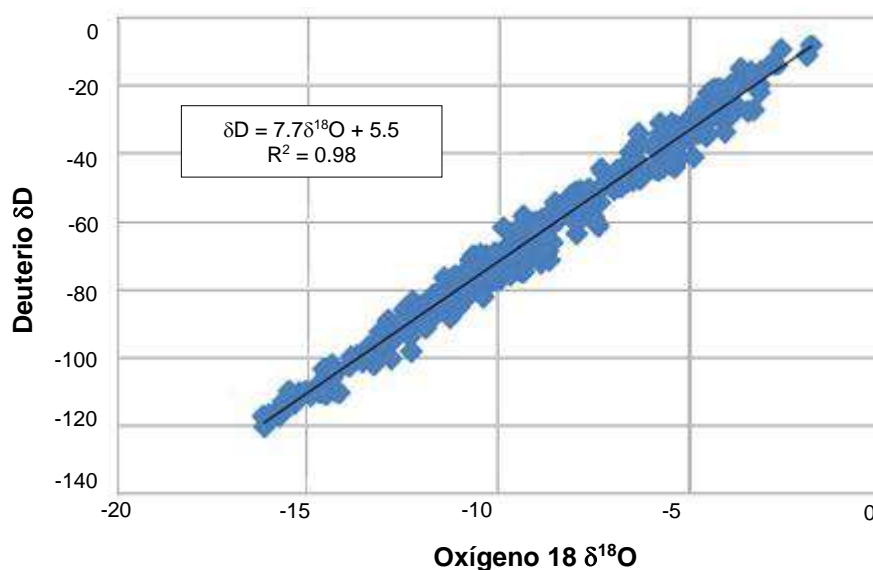




Figura 74. Recta Meteórica para Colombia

Existen otras versiones (Rodríguez, 1990) de la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia, aunque se prefiere la presentada en la Figura 74 por estar basada en un mayor número de datos.

Esta recta permite reconocer si el agua analizada en un punto determinado es agua lluvia o si corresponde a otra categoría, como aguas juveniles o connatas, o ha sufrido un proceso de evaporación o de contaminación con productos químicos.

Al localizar el par de valores Deuterio : Oxígeno 18 en la gráfica, se puede determinar que los datos que se encuentran cerca de esta recta corresponden a aguas lluvias puras, mientras que aquellos que se apartan significativamente de esta recta corresponden a aguas lluvias que han sido modificadas. Las modificaciones más comunes son debidas a procesos de evaporación en lagos y lagunas, a intercambio isotópico con los medios en los que fluye, o a contaminación con productos químicos y desechos líquidos urbanos. En el caso de los polígonos en estudio, las modificaciones podrían ser especialmente las debidas a evaporación o a intercambio isotópico, pudiéndose anotar lo siguiente:

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

- ✓ En el agua que ha sufrido un proceso de evaporación se presenta un enriquecimiento relativo de Oxígeno 18. Esto porque dado que la magnitud del fraccionamiento por evaporación es diferente para los isótopos de Hidrógeno y Oxígeno, la relación que permanece constante entre Deuterio y Oxígeno 18 en el agua lluvia, no se mantiene así en los procesos de evaporación.
- ✓ Los procesos de intercambio isotópico pueden ocurrir, por ejemplo, entre el agua y los minerales de las rocas a través de las cuales fluye el agua. Este intercambio es menos probable en el caso del Hidrógeno y su isótopo estable el Deuterio, en razón de la escasez relativa de minerales hidratados en el macizo rocoso. En todos los casos, el efecto es más notorio en el contenido de Oxígeno 18 que en el contenido de Deuterio.

La variación en la composición isotópica depende de las condiciones de evaporación y de condensación de las masas de agua en la hidrosfera, lo cual implica que ella depende básicamente de las condiciones de presión y temperatura del ambiente en que ocurre la evaporación o la condensación. Esta condición hace que en los análisis de hidrología isotópica sea necesario contar con muestras de agua lluvia representativas de períodos suficientemente largos que permitan suponer que ellas corresponden a las condiciones ambientales medias del sitio de muestreo. En este caso, los muestreadores de agua lluvia fueron instalados durante un período de tres meses que incluyó los meses de abril de 2015 a junio del mismo año. La toma de muestras se realizó mediante la instalación de pluviómetros artesanales que permitían el ingreso del agua lluvia evitando la evaporación en el tiempo (Figura 75). Las muestras de agua de manantiales fueron colectadas durante un lapso seco al finalizar el mes de junio de 2015.

Específicamente en la Tabla 21 y en la Tabla 22 se presenta la información obtenida por medio de las muestras ensayadas en este proyecto. El gráfico de la Figura 76 muestra gráficamente la relación Deuterio : Oxígeno 18 de estas muestras, diferenciando las aguas lluvias de las aguas de manantiales. Se puede observar que la relación Deuterio : Oxígeno 18 de las muestras colectadas en desarrollo de este proyecto se ajusta a la Recta Meteorica de Colombia, tratándose de una recta cuya pendiente es cercana a 8, lo que permite reconocer las muestras tomadas en manantiales como agua lluvia infiltrada (Figura 74 vs. Figura 76). La diferencia en el término independiente de la ecuación puede responder a condiciones meteorológicas particulares del área donde fueron tomadas las muestras.

Se observa además que los valores de contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 del agua de manantiales se distribuyen en dos conjuntos. El primero con pares de valores del orden de -71.8 y -10 y el segundo con pares de valores del orden de -79 y -11. Los valores más altos de contenido isotópico de los primeros pueden corresponder exclusivamente a agua subterránea. Los valores de contenido isotópico de los segundos, corresponden a manantiales que drenan agua subterránea combinada con agua de escorrentía.



Muestra EDU-02 Santa Elena R



Muestra EDU-06 CAI Torres

Figura 75. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio

Tabla 21. Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δ ¹⁸ O	Observaciones
EDU-01	03/07/15	844618.50	1178332.35	2650	-96.7	-13.16	Santa Elena Waira
EDU-02	03/07/15	843170.78	1180895.89	2570	-96.5	-13.11	Santa Elena R
EDU-03	03/07/15	842970.42	1183004.41	2460	-95.5	-12.75°	Santa Elena ARPSE
EDU-04	03/07/15	840041.39	1189109.01	2045	-85.5	-11.44	Altos de Oriente
EDU-05	03/07/15	839168.65	1182630.68	2100	-89.4	-11.84	Pan de Azúcar
EDU-06	03/07/15	838950.41	1182665.08	2030	-87.7	-11.77	CAI Torres
EDU-07	03/07/15	836091.03	1180638.77	1665	-78.9	-10.79	Medellín Loreto
EDU-08	03/07/15	835283.30	1178828.00	1550	-87.5	-11.98	Medellín Castropol

Tabla 22. Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δ ¹⁸ O	Observaciones
EDU-09	03/07/15	838772.26	1182739.33	1950	-78.7	-10.96	Plan Pan de Azúcar
EDU-10	03/07/15	839161.24	1183861.49	2220	-71.5	-9.56	
EDU-11	03/07/15	838457.66	1182730.36	1980	-76.5	-10.21	
EDU-12	03/07/15	838334.52	1182771.17	2130	-71.8	-9.84	
EDU-13	03/07/15	839015.08	1183857.13	2190	-71.8	-10.02	
EDU-14	03/07/15	838409.73	1182610.21	1900	-78.1	-11.06	
EDU-15	03/07/15	838739.46	1183720.75	2130	-80.6	-11.06	
EDU-16	03/07/15	839046.39	1183497.60	1915	-80.0	-11.37	

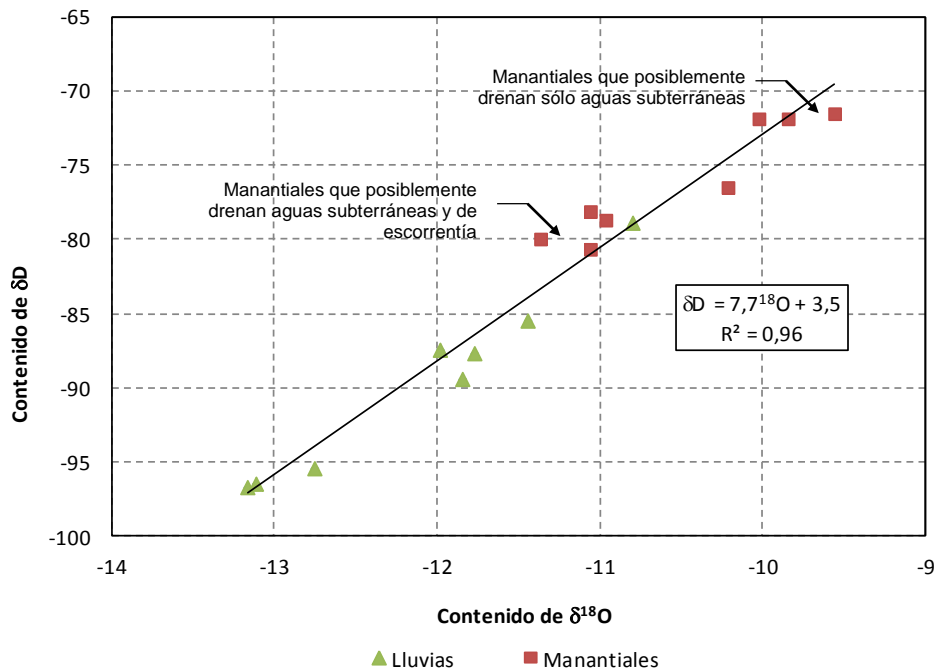


Figura 76. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental

Se resalta el hecho de que los valores de contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 del agua lluvia son consistentemente menores que los esperados con base en una amplia base de datos compilada en los últimos 30 años. Esto no sucede con los valores

reportados de contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 del agua de manantiales. Esta diferencia en el contenido isotópico de Deuterio y Oxígeno 18 puede ser explicada por el hecho de que las muestras del agua lluvia fueron colectadas en su totalidad durante un evento cálido ENSO, en tanto que los contenidos isotópicos del agua de manantiales corresponden a una acumulación de largo plazo en el macizo rocoso.

8.3 EL GRADIENTE OROGRÁFICO

Una regularidad también útil en los análisis isotópicos, es la variación que puede tener el agua lluvia por las condiciones de presión y temperatura en las que se produce la condensación y la correspondiente precipitación. Dado que en las regiones equinocciales la temperatura ambiente es una función de la altura sobre el nivel del mar, el contenido isotópico del agua lluvia varía en función de la altura de precipitación que se toma siempre como la cota del pluviómetro o del recipiente de recolección de muestras. Las desviaciones a esta generalización están asociadas a las condiciones particulares de presión en las que ocurre cada evento de precipitación, razón por la cual conviene contar con muestras que representen una media de precipitación en un intervalo tan amplio como sea posible.

La evaluación, identificación y valoración de esta función permite determinar un gradiente orográfico de contenido isotópico en el agua lluvia, información clave para determinar las zonas de recarga. En la Figura 77 y Figura 78 se encuentran estas funciones para Colombia, con información desde el nivel del mar hasta el Parque Los Nevados (Rodríguez, 1990).

Las ecuaciones generales para el conjunto del territorio colombiano indican que el contenido de Deuterio varía cerca de 1.2 unidades por cada 100 metros de cambio en la altura sobre el nivel del mar y el contenido de Oxígeno 18 cambia a razón de 1.4 unidades por cada 1000 metros de altura sobre el nivel del mar.

La evidencia isotópica, presentada de manera general para Colombia puede confirmarse para la vertiente oriental del Valle de Aburrá y para el área de interés de este proyecto, con los resultados obtenidos de los análisis isotópicos realizados para el presente informe que fueron presentados en la Tabla 22 y complementados con los de la Tabla 23. A partir de la información de dichas tablas fueron elaboradas la Figura 79 y Figura 80.

Tabla 23. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
OMO16	15/04/13	840101.30	1188537.29	2160	-83.3	-11.32	Altos de Oriente Tejas Arriba
OPB03	23/04/14	837340.15	1186344.78	1655	-79.1	-10.83	Qda. La Bermejala en estiaje
OPB05	26/05/14	837340.15	1186344.78	1655	-82.6	-11.53	Escorrentía en cuenca de Qda. La Bermejala

Tabla 23. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
OPB06	16/05/14	839988.94	1189044.63	2060	-78.8	-10.77	Manantial
MAP11	21/06/14	837235.7	1186381.95	1630	-79.5	-10.96	Pozo

Se puede observar que las muestras de manantiales y quebradas tomadas en otros puntos de la vertiente oriental y las del proyecto como tal se ajustan a las líneas rectas de ajuste para Colombia, quedando dentro de las bandas que generan las muestras utilizadas para dicho ajuste. Los manantiales se han dividido en dos grupos, diferenciando aquellos que están por encima de la cota 2100 msnm de aquellos que están por debajo de dicha cota, lo cual se hace por las razones que se explican más adelante en el Numeral 8.4 de este mismo capítulo.

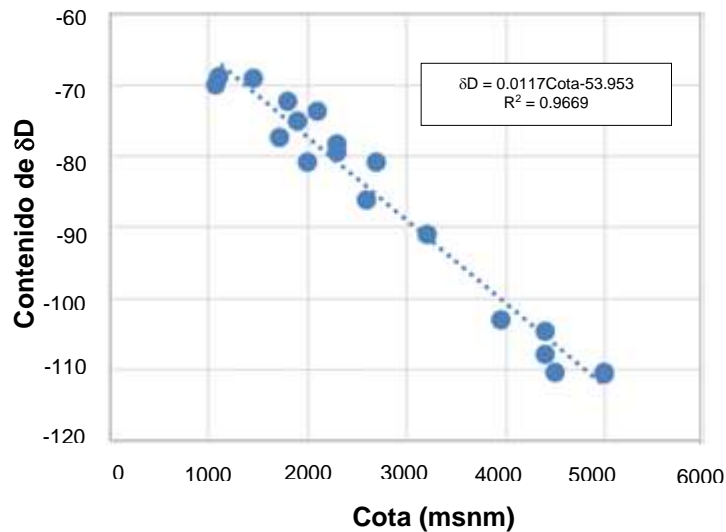


Figura 77. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

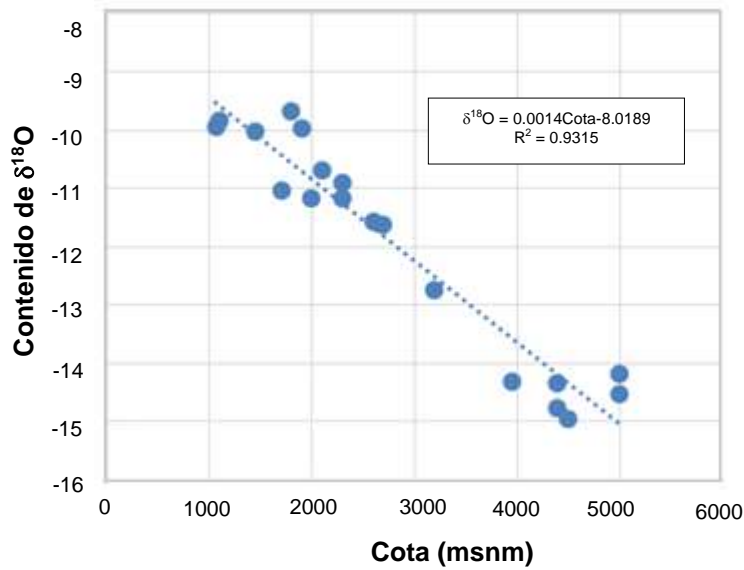


Figura 78. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

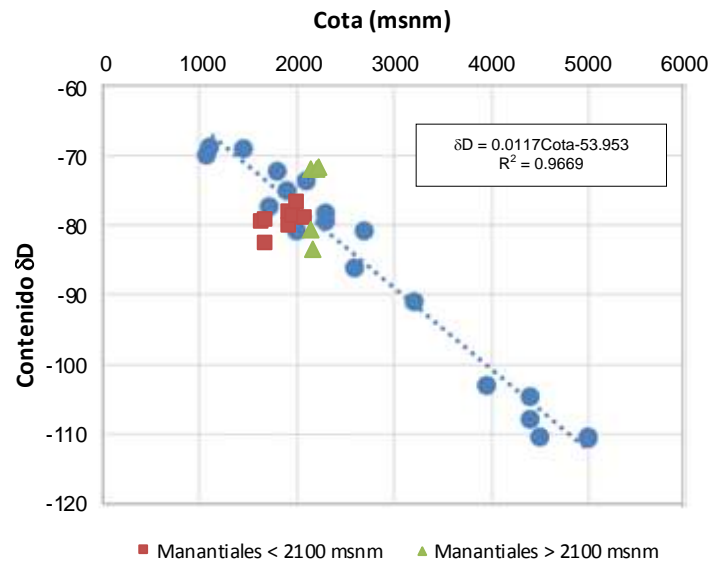


Figura 79. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

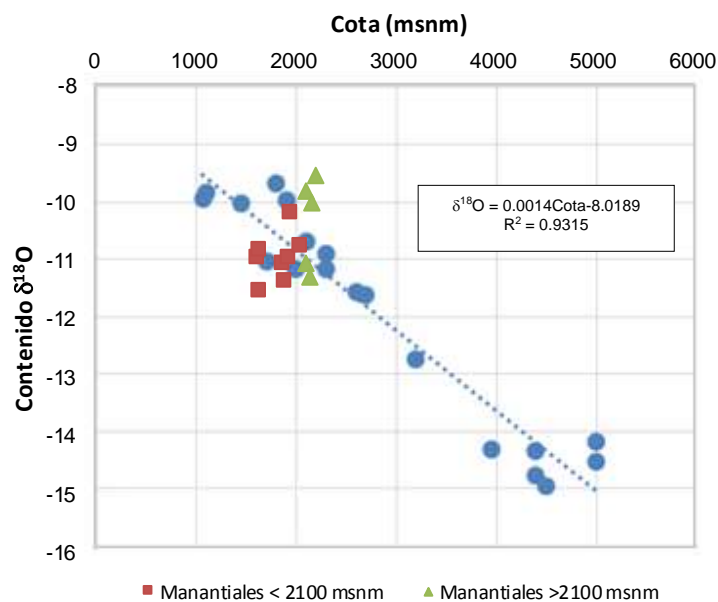


Figura 80. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

8.4 EL GRADIENTE NULO

A diferencia del agua de precipitación, el agua subterránea no necesariamente presenta esa regularidad de variación con la altura. Esta condición ha sido utilizada para identificar el área de recarga de las aguas subterráneas mediante la relación entre el contenido isotópico del agua subterránea cuyo origen se investiga y el contenido isotópico del agua de precipitación en el área de recarga.

En la Tabla 24 se encuentran los datos de contenidos isotópicos de agua de otras muestras de manantiales y quebradas utilizadas en otras investigaciones del autor que se viene citando en este capítulo.

Tabla 24. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
TAO-01	06/09/12	842599.43	1178844.76	2540	-85.3	-11.71	Quebrada Santa Elena
TAO-02	06/09/12	841909.11	1179439.69	2445	-83.1	-11.63	Sede Mediagua CORANTIOQUIA
TAO-03	06/09/12	841952.29	1179485.66	2350	-85.4	-11.87	Fuente surgente en el camino Santa Elena La Bocana
TAO-04	06/09/12	841835.34	1179452.18	2375	-82.3	-11.52	Amagamiento con aporte de agua de escorrentía
TAO-05	06/09/12	841844.84	1179553.55	2359	-86.2	-11.96	
TAO-06	06/09/12	841774.04	1179529.16	2346	-82.4	-11.49	Amagamiento con aporte de agua de



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

Tabla 24. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
							escorrentía
TAO-07	06/09/12	841654.11	1179529.49	2314	-85.4	-11.76	
TAO-08	06/09/12	841641.73	1179498.79	2270	-86.3	-11.96	
TAO-09	06/09/12	841458.14	1179840.38	2120	-85.5	-11.91	
TAO-10	06/09/12	841108.11	1180037.99	2020	-85.7	-11.77	Quebrada, fuente de acueducto comunal
TAO-11	06/09/12	841092.72	1180034.96	2040	-82.8	-11.43	Pie de escarpe.
TAO-12	06/09/12	841978.34	1180020.27	2023	-82.7	-11.32	
TAO-13	06/09/12	841403.61	1180144.74	2005	-85.6	-11.83	Quebrada Santa Elena
TAO-14	07/09/12	841415.91	1180141.63	2007	-83.8	-11.55	Manantial en margen izquierda de QSE
TAO-15	07/09/12	841186.64	1180646.21	2040	-82.3	-11.37	Manantial
TAO-16	07/09/12	841239.10	1180713.67	2081	-85.0	-11.78	Vía Medellín Rionegro km 6+060
TAO-17	07/09/12	841116.02	1180686.35	2080	-85.5	-11.52	Vía Medellín Rionegro km 6+050
TAO-19	07/09/12	841090.06	1181316.36	2128	-83.1	-11.14	Vía Medellín Rionegro K6+800
TAO-20	07/09/12	843169.62	1178170.28	2560	-86.2	-11.58	Quebrada San Pedro
TAO-22	07/09/12	844813.23	1177545.19	2610	-84.4	-11.81	Manantial
TAO-23	07/09/12	848135.78	1174466.79	2222	-81.9	-11.62	Quebrada Yarumal
TAO-28	07/09/12	839194.59	1179766.66	1933	-81.0	-11.13	Seminario Redemptoris Mater
TAO-31	07/09/12	843996.88	1178177.29	2570	-84.8	-11.71	Quebrada El Cartucho Acceso a Montevivo
TAO-32	07/09/12	844073.75	1178170.94	2575 ^o	-83.9	-11.62	Acueducto San Ignacio, Santa Elena
CON-05	13/10/10	840045.51	1192802.63	1295	-77.8	-10.40	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-06	13/10/10	840045.49	1192796.48	1295	-78.0	-10.57	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-08	13/10/10	840054.74	1192805.67	1305	-74.0	-9.58	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-21	12/11/10	840076.26	1192802.54	1295	-78.7	-10.56	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-22	12/11/10	840054.67	1192778.02	1305	-75 ^o .4	-9.68	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-23	12/11/10	840134.67	1192802.38	1335	-78.6	-10.71	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-24	12/11/10	840134.65	1192796.23	1340	-77.3	-10.61	Fosa de grava CONASFALTOS
CON-25	12/11/10	840060.70	1192738.05	1360	-79.9	-10.85	Fosa de grava CONASFALTOS
HV-286		839485.94	1189494.67	1885	-80.2	-9.50	Rellano al sur de Planta Manantiales, EPM
HV-297		839410.99	1180180.91	1880	-78.3	-10.85	Vía Medellín Rionegro

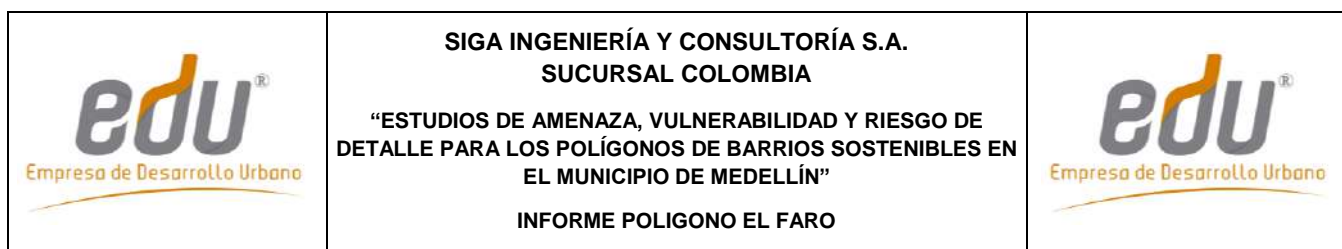


Tabla 24. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
HV-351		844896.06	1177471.23	2600	-84.3	-11.73	Santa Elena
HV-352		844010.39	1177473.58	2600	-83.8	-11.54	Santa Elena

Las muestras identificadas con el Acrónimo CON y dos dígitos corresponden a muestras tomadas en la Mina CONASFALTOS en el fondo del Valle de Aburrá. Las muestras identificadas con el Acrónimo TAO corresponden a muestras tomadas para el estudio hidrogeológico del Túnel Aburrá – Oriente. Las restantes muestras hacen parte del archivo personal del autor que se viene citando y corresponden a muestras tomadas desde el decenio de 1990.

En la Figura 81 se presenta un gráfico preparado con los datos presentados en la Tabla 24 junto con los de este proyecto presentados en la Tabla 22. Se ha consolidado entonces la información obtenida en diferentes investigaciones en el Valle de Aburrá para poder hacer la discriminación del flujo de aguas subterráneas hacia el Valle de Aburrá procedente del Planalto de Santa Elena y del Valle de San Nicolás. En este gráfico puede apreciarse que los contenidos isotópicos del agua de los manantiales se agrupan en dos conjuntos bien definidos: uno por encima de la cota 2100 msnm y otro por debajo de esta cota. Los manantiales que se encuentran en cotas inferiores a 2100 msnm presentan un contenido medio de Deuterio, δD, alrededor de -80 por mil, en tanto que los manantiales que se encuentran en cotas mayores que 2100 msnm presentan un contenido medio de Deuterio, δD, alrededor de -83 por mil.

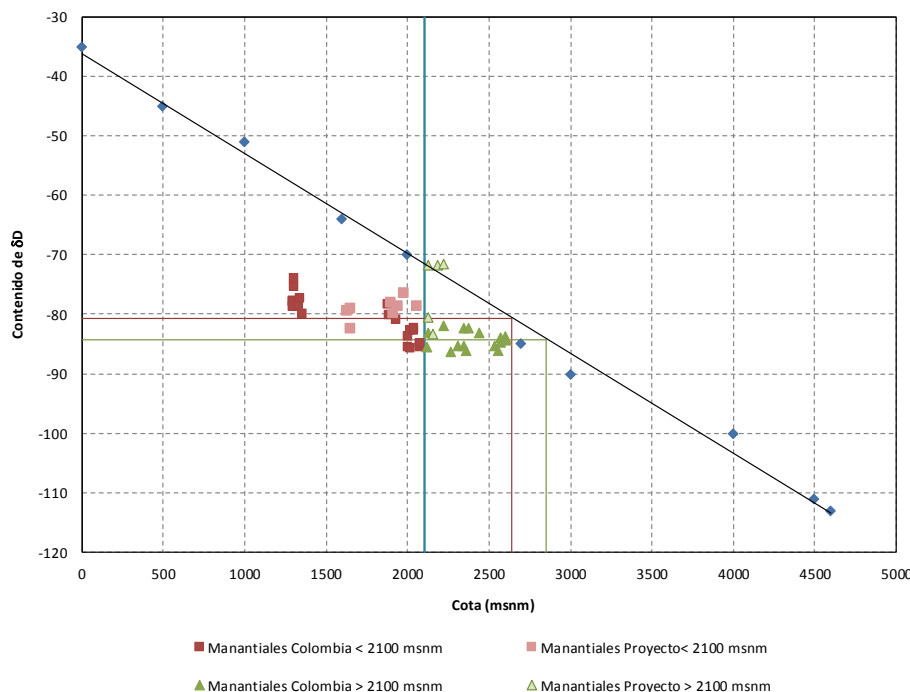




Figura 81. Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012)

La diferenciación mencionada indica que los manantiales ubicados por encima de la cota 2100 msnm y tienen su zona de recarga en una zona más alta que la de los manantiales ubicados por debajo de esta cota. La Figura 81 muestra los dos conjuntos de manantiales bien definidos, con sus límites en la cota 2100 msnm y en el $\delta D = -81$. Se indican además las cotas correspondientes a las fuentes de alimentación de cada conjunto de manantiales según el ajuste lineal empleado.

La discriminación de los dos conjuntos se hace más clara cuando se depuran los datos con base en las observaciones de campo. Las Muestras TAO-04 y TAO-06 corresponden a dos amagamientos cuya posición topográfica permiten suponer que las muestras colectadas tenían un aporte de agua de escorrentía. Si se excluyen estos dos datos, la distribución del contenido de Deuterio define nítidamente los dos conjuntos ya enunciados.

En este punto es interesante anotar los valores obtenidos en las aguas de la Quebrada Santa Elena en las cotas 2540 msnm y 2005 msnm, Muestras TAO-01 y TAO-13. El contenido de Deuterio de ambas muestras es esencialmente igual, lo que implica que el agua aportada en la cuenca por exfiltración desde el macizo entre estas dos cotas tiene el mismo contenido isotópico del agua del Planalto de Santa Elena.

Si se tiene en cuenta la complejidad de los procesos hidrogeológicos, es más prudente afirmar que el agua lluvia infiltrada en el Planalto de Santa Elena es drenada en la parte

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

alta de la ladera hasta una cota por encima de los 2000 msnm, en tanto que el agua lluvia infiltrada en el Valle de San Nicolás es drenada en la parte baja de la ladera por debajo de la cota 2000 msnm. En un intervalo altitudinal, que se encuentra aproximadamente entre las cotas 1900 msnm y 2100 msnm, los manantiales drenan una mezcla de agua lluvia infiltrada en ambas áreas de recarga.



Entre las cotas 2080 msnm y 2540 msnm, los valores de contenido de Deuterio y Oxígeno 18 de los manantiales son aproximadamente constantes y muy cercanos a -85 y -11, que corresponden al contenido isotópico del agua lluvia en el Planalto de Santa Elena. Ya fue anotado que la variación del contenido isotópico del agua de la Quebrada Santa Elena es mínima entre las cotas 2540 msnm, en el planalto y en la cota 2005 msnm en el cruce con la vía Medellín Rionegro, lo que implica que entre estas dos cotas el agua exfiltrada al cauce proviene en su totalidad. El agua de la pequeña quebrada que surte el acueducto comunal de La Bocana tiene el mismo contenido isotópico.

Los sitios donde fueron colectadas las Muestras TAO-02, TAO-04, TAO-06, localizadas por encima de la cota 2340 msnm, corresponden a sitios en los que el manantial se encuentra en una zona de quiebre de pendiente donde es posible la acumulación de agua de escorrentía. El contenido de Deuterio de las muestras colectadas en estos sitios tiene un valor mayor que el del agua del Planalto de Santa Elena.

Entre las cotas 2000 msnm y 2040 msnm, las medias de los valores de contenidos isotópicos se encuentran cercanos a -82,5 y -11,5, lo que indica una fuerte contribución de agua procedente del Valle de San Nicolás. La contribución del Valle de San Nicolás al flujo que aflora en manantiales entre las cotas 2000 msnm y 2040 msnm es aproximadamente de 50% con base en la propiedad aditiva de los contenidos isotópicos. Los manantiales cerca de la cota 1900 msnm presentan un contenido isotópico similar al del agua lluvia en el Valle de San Nicolás, lo que permite definir esta cota como límite de la zona de mezcla de la recarga procedente del Valle de San Nicolás y el Planalto de Santa Elena.

A medida que se desciende en las laderas del Valle de Aburrá, los valores de contenido de isótopos pesados aumentan, lo que puede ser interpretado como un incremento de la contribución de la recarga procedente del Valle de San Nicolás, cuyo contenido es del orden de -80, 11 y la correspondiente disminución del Planalto de Santa Elena.

En la cota 1900 msnm, los valores de contenido isotópico disminuyen hasta valores cercanos a 80 y -11, característicos de la precipitación en el Valle de San Nicolás. Este sería el límite inferior del flujo de agua procedente del Planalto de Santa Elena. Los valores de contenido isotópico que se encuentran en muestras de manantiales en cotas inferiores a 1900 msnm pueden ser explicados por la contribución de la escorrentía y la infiltración de agua lluvia en las laderas del Valle de Aburrá. En este punto debe tenerse en cuenta que estas muestras fueron colectadas sin tener en cuenta las condiciones de lluvia antecedente.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

8.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

La información disponible permite presentar un modelo conceptual del sistema hidrogeológico que comprende el Planalto de Santa Elena, el Valle de San Nicolás y la vertiente nororiental del Valle de Aburrá, cuya ilustración de encuentra en la Figura 82. Los límites del sistema pueden definirse por las vaguadas de los Ríos Negro y Medellín, las Quebradas Santa Elena, Yarumal y La Mosca.

8.5.1 Zonas de recarga

Las zonas de recarga, en el sistema hidrogeológico que descarga en el Valle de Aburrá, se encuentran por fuera de sus laderas y deben localizarse en los valles y planaltos vecinos localizados en cotas superiores a las del valle mismo y sus vertientes, en el Planalto de Santa Elena y el Valle de La Mosca y la porción occidental del Valle de San Nicolás. La información generada por medio del estudio que se presenta en este informe, permite validar esta afirmación.

El contenido isotópico del agua de los manantiales en la Comuna Nororiental se ajusta al par de valores $\delta D:80$, $\delta^{18}O:11$, que en investigaciones anteriores (Hoyos, 2012) permitieron establecer una discriminación de áreas de recarga del agua subterránea en la vertiente oriental del Valle de Aburrá y definir un flujo regional desde el Planalto de Santa Elena y el Valle de San Nicolás hacia el Valle de Aburrá.

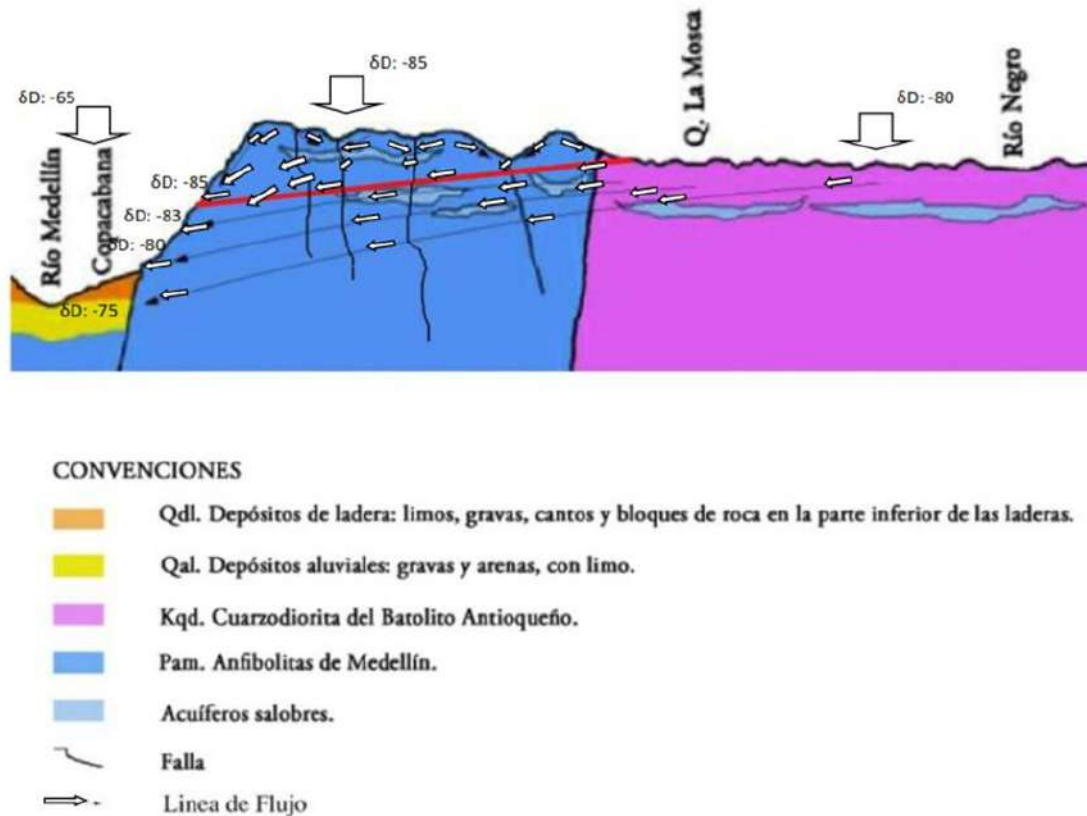




Figura 82. Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá

8.5.2 Caracterización del acuífero

El agua subterránea en este sistema se encuentra en las discontinuidades del macizo rocoso formado por anfibolitas, esquistos, dunitas, serpentinitas y granitoides y puede ser caracterizado como un acuífero confinado cuyo sello está formado por el regolito limoso de suelos residuales y depósitos de vertiente. El coeficiente de permeabilidad del sello, calculada a partir de ensayos de consolidación es del orden de 10^{-9} m/s. El coeficiente de permeabilidad del macizo rocoso, estimado a partir de información de infiltración en túneles excavados en este tipo de rocas, y corroborada con el cálculo de coeficiente de permeabilidad medio de cuencas a partir de caudales mínimos de corrientes, se encuentra entre $5 \cdot 10^{-7}$ m/s en el macizo diaclasado hasta $3 \cdot 10^{-5}$ m/s en zonas de falla.

8.5.3 Flujo regional y flujo local

La distribución del agua lluvia en la superficie y en el subsuelo después de su precipitación es objeto de afirmaciones genéricas, muchas de ellas equivocadas, aun por personas que por su formación podrían entender mejor el fenómeno del flujo subterráneo.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

En este punto es preciso anotar que la energía que hace mover el agua en el subsuelo es la debida a la atracción gravitacional, y en menor medida la energía térmica que permite la evaporación, y la tensión superficial que da lugar al ascenso capilar y a la retención del agua contra la atracción gravitacional. El flujo del agua libre en el subsuelo es debido en su totalidad a la atracción gravitacional y procede desde puntos donde la energía es mayor a puntos donde ella es menor. En él influyen la distribución de los materiales del subsuelo y sus características hidráulicas y la morfología del terreno. En particular es necesario considerar que la permeabilidad al flujo gravitacional del regolito limoso es muy baja, lo que, combinado con las altas pendientes de las laderas del Valle de Aburrá, hace que la infiltración en ellas sea nula en la práctica.

A escala regional es preciso resaltar el papel de la topografía en el flujo del agua subterránea que es controlado en gran medida por los gradientes y discontinuidades topográficas locales y regionales y cada una de estas categorías determina la escala del flujo del agua subterránea.

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. Este es el caso de las cuencas de la Quebrada Santa Elena, La Mosca, Honda y Yarumal. 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 de Rionegro y el Valle de Aburrá. Este sistema complejo de flujos subterráneos a escala local y regional, tiene interés en la medida en que permite introducir un criterio de discriminación en el flujo de agua subterránea.

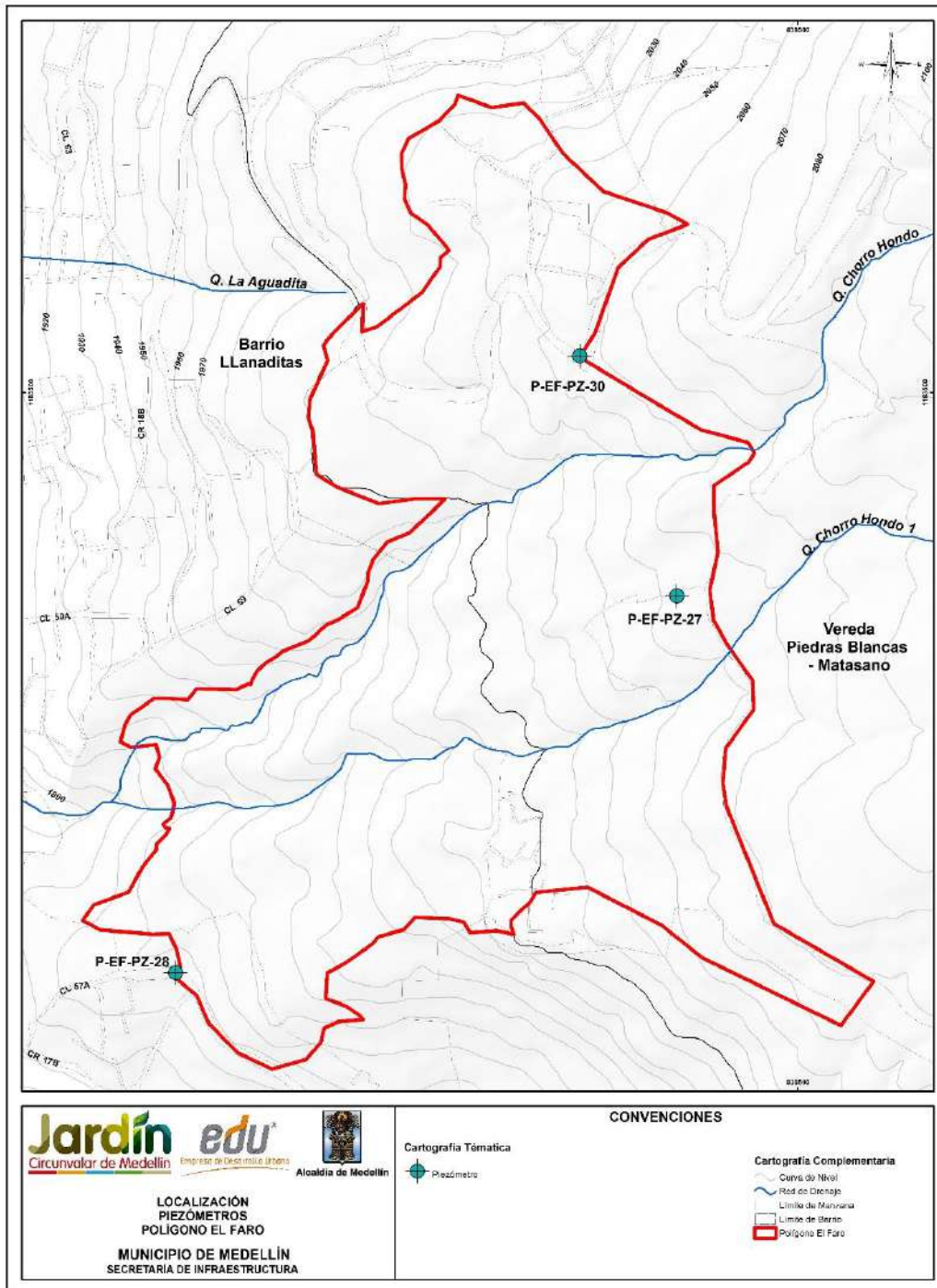
8.5.4 Zonas de descarga

La descarga de agua subterránea tiene lugar a lo largo y ancho de la vertiente. No se cuenta con un inventario de manantiales sistemático en el Valle de Aburrá que permita presentar un patrón de descarga del agua subterránea y su relación con los rasgos estructurales que la controlan. Puede postularse que, si se mantienen iguales las condiciones estructurales, la densidad de afloramientos aumenta a medida que se descende en la ladera, y que en la misma faja altitudinal la densidad de manantiales es función de la densidad de diaclasamiento y el máximo está asociado a las zonas de falla.

En la UMI El Faro, se hicieron recorridos de campo detallados con el fin específico de levantar los manantiales existentes. De acuerdo con estos recorridos, es posible determinar que en la zona no se tienen manantiales.

8.6 INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

Con el fin de determinar las condiciones de flujo en los polígonos en estudio del Proyecto Barrios Sostenibles se instalaron piezómetros de alambre vibrátil. Los piezómetros fueron localizados en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-28, P-EF-PR-30 realizadas en el Polígono El Faro (Mapa 21).



**Mapa 21. Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil
(EFRInstrumentacion_Medellin_C)**

Los piezómetros instalados fueron denominados como Piezómetros P-EF-PZ-27B, P-EF-PZ-27D, P-EF-PZ-28B, P-EF-PZ-28D, P-EF-PZ-30B y P-EF-PZ-30D, como se muestra en la Figura 83.

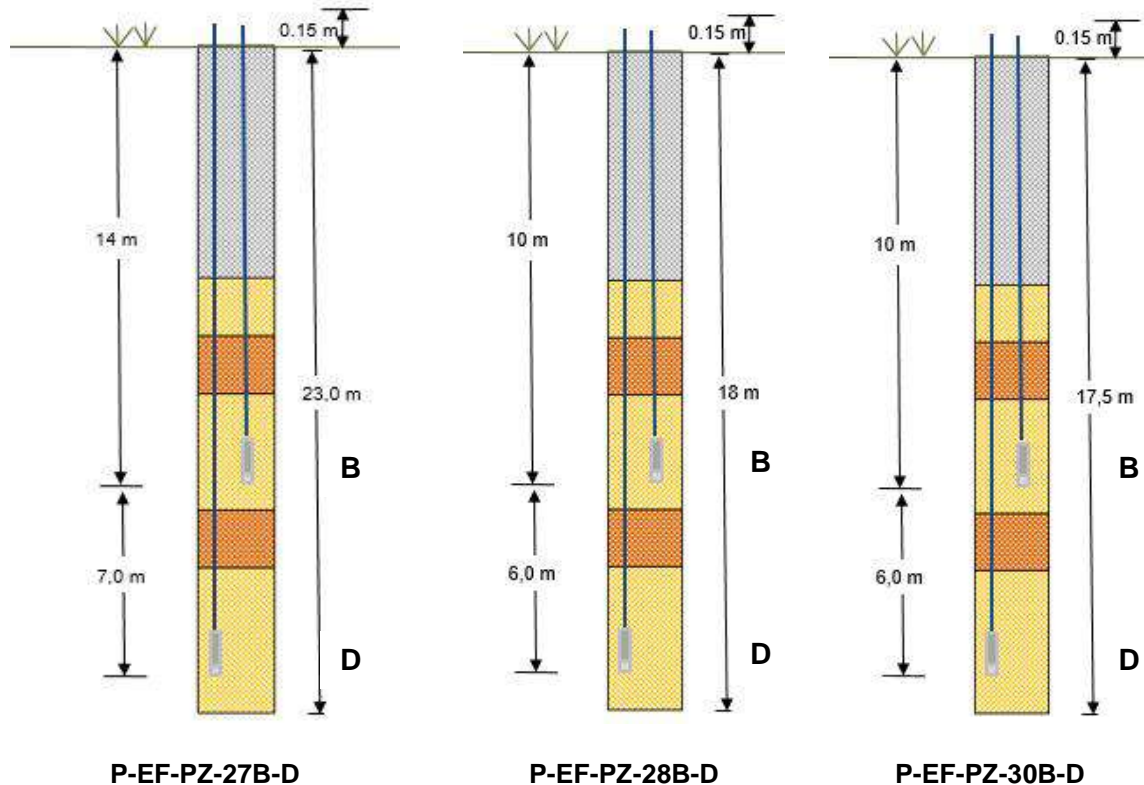


Figura 83. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil

Estos equipos registran una lectura que se relaciona directamente con la frecuencia de vibración de un alambre debido a la presión ejercida por el agua en sus alrededores. Esta frecuencia se usa para calcular las presiones de poros o la altura de la lámina de agua por encima de la cota de instalación del equipo o la profundidad del nivel freático o la cota piezométrica. El cálculo de la presión de poros con base en la frecuencia de vibración del alambre se hace por medio de ecuaciones de calibración suministradas por el fabricante.

Se debe entender entonces a la cota piezométrica como la suma de la cabeza de posición, es decir, la cota de instalación con respecto al nivel del mar (z) y la cabeza de presión, es decir, la presión de poros dividida por el peso unitario del agua (μ/γ_w):

$$H = z + \frac{u}{\gamma_w}$$

De estos equipos se vienen haciendo lecturas continuas de las presiones de poros, valores con base en los cuales se calculan las correspondientes cotas piezométricas. En

los siguientes tres numerales se presentan y discuten las gráficas de variación de dichas cotas piezométricas con el tiempo para cada uno de estos piezómetros. En cada una de estas gráficas, las líneas continuas corresponden a la cota de instalación del equipo y las líneas discontinuas corresponden a las cotas piezométricas. La cabeza de presión es entonces la diferencia entre la cota de instalación y la cotas piezométrica.

En el anexo 10 se presenta la carta de calibración, el acta de verificación de la calibración y el acta de instalación, de cada uno de los piezómetros instalados en el Polígono El Faro.

8.6.1 Piezómetros P-EF-PZ-27BD

La Figura 84 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-EF-PZ-27B y P-EF-PZ-27D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

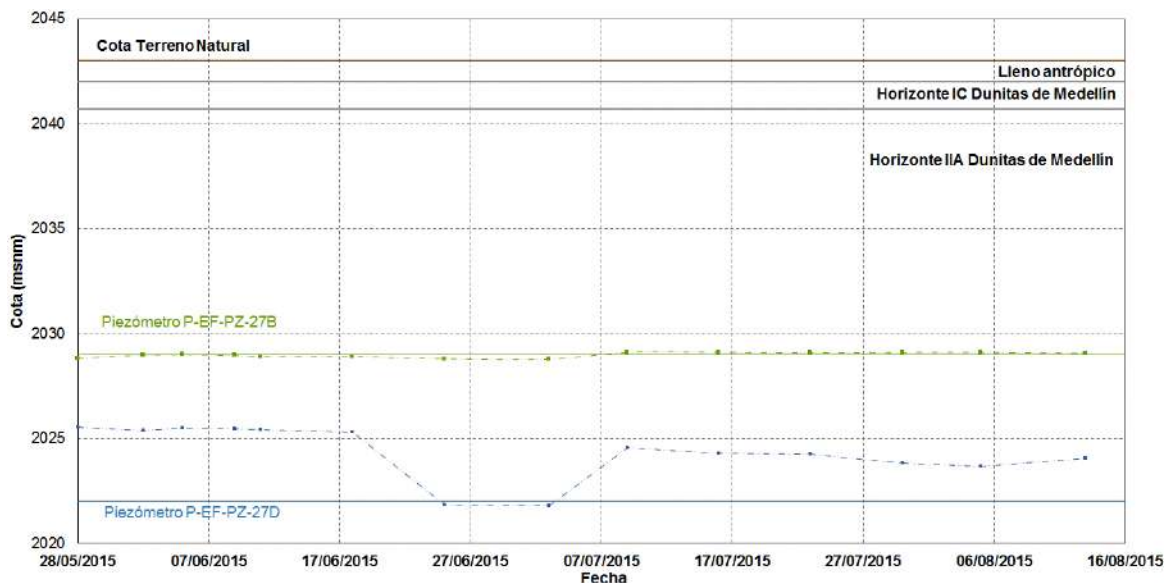


Figura 84. Cotas piezométricas en Piezómetros P-EF-PZ-27B y P-EF-PZ-27D

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-EF-PR-27, vale la pena destacar el hecho de que la medida del nivel freático reportado en la mañana, a 20.5 m de profundidad del sondeo, fue de 5.0 m. Sin embargo, de acuerdo con lo registrado por el Piezómetro P-EF-PZ-27D, puede establecerse un nivel de aguas subterráneo a 18.2 m de profundidad en el Horizonte IIA.

8.6.2 Piezómetros P-EF-PZ-28BD

La Figura 85 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-EF-PZ-28B y P-EF-PZ-28D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que los Piezómetros fueron instalados en profundidad, en el Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

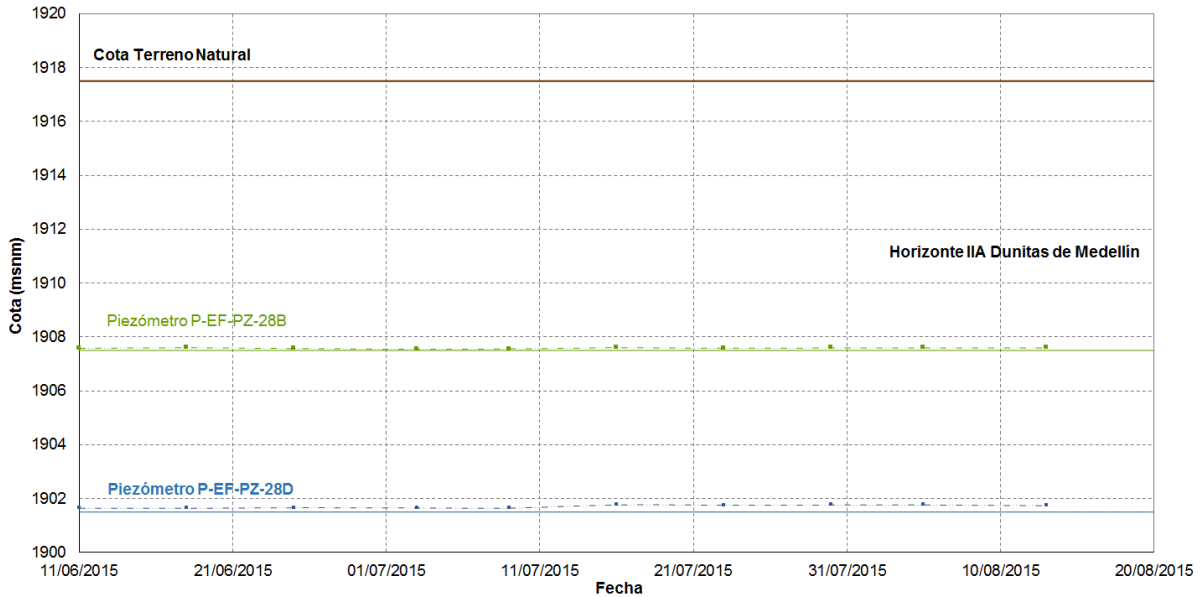


Figura 85. Cotas piezométricas en Piezómetros P-EF-PZ-28B y P-EF-PZ-28D

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-EF-PR-28, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

8.6.3 Piezómetros P-EF-PZ-30BD

La Figura 86 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-EF-PZ-30B y P-EF-PZ-30D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fue instalado el equipo. Se puede observar que el Piezómetro P-EF-PZ-30B fue instalado en profundidad, en el Horizonte IC de Dunitas de Medellín y el Piezómetro P-EF-PZ-30D en el Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

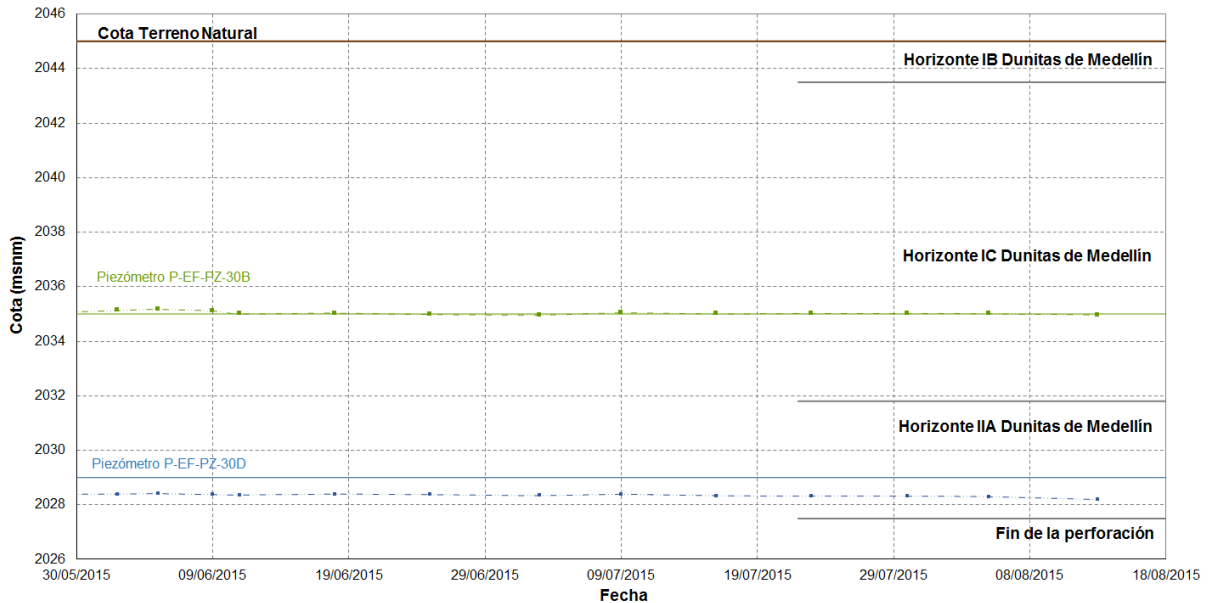


Figura 86. Cotas piezométricas en Piezómetros P-EF-PZ-30B y P-EF-PZ-30D

Con respecto al sondeo en que fue instalado este equipo, la Perforación P-EF-PR-30, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático. Con base en los registros obtenidos hasta el momento, se puede establecer que efectivamente no se tiene un nivel freático. Los dos equipos registran cabezas de presión muy bajas a nulas que dan cuenta de que no existe realmente un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este sondeo.

8.6.4 Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto

El modelo hidrogeológico propuesto, ha citado dos tipos de flujo. En primer lugar, el flujo local cuyo nivel de base está dado por las vaguadas de los valles, siendo este el caso de las cuencas de la Quebrada Santa Elena, La Mosca, Honda y Yarumal. 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 corresponden al flujo que se establece entre el Altiplano de Rionegro y el Valle de Aburrá.

La instrumentación instalada en la UMI El Faro - Golondrinas, limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, muestran que específicamente con el Piezómetro P-EF-PZ-27D fue posible interceptar el flujo regional, ubicado en sus alrededores en la cota 2025 msnm. Con los demás piezómetros no fue posible interceptar el flujo regional.

Las condiciones de flujo del agua subterránea en la UMI El Faro - Golondrinas pueden ser esquematizadas en la red de flujo que se presenta en la Figura 87.

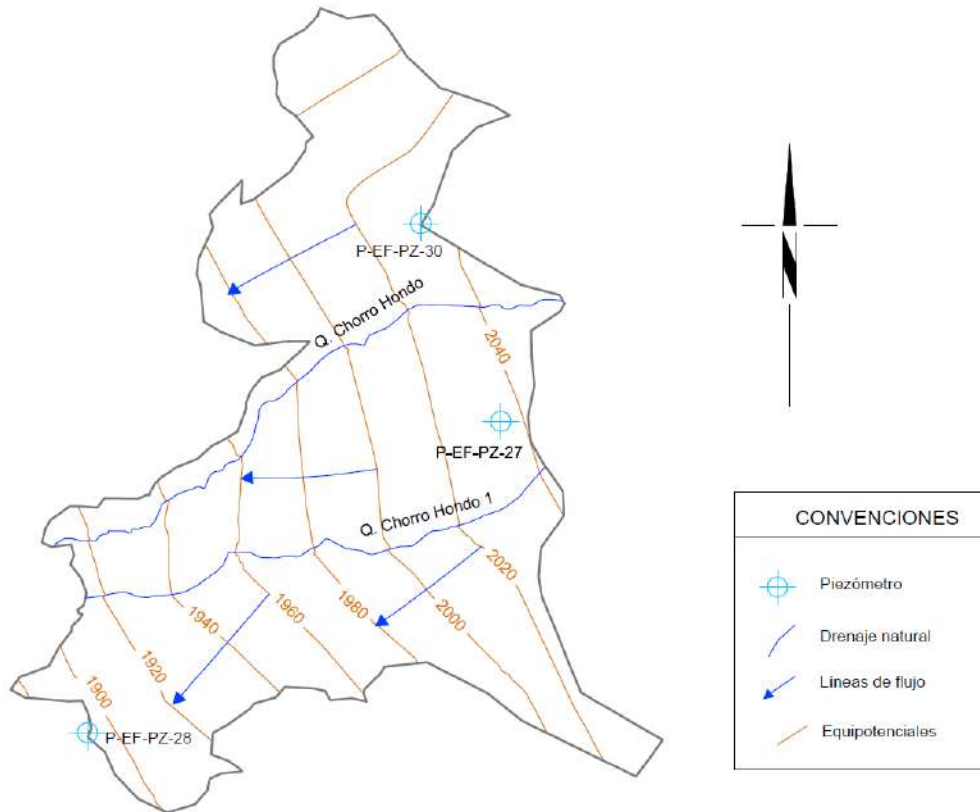




Figura 87. Líneas equipotenciales y de flujo local para el Polígono El Faro

Las líneas equipotenciales fueron definidas a partir de los registros del Piezómetro P-EF-PZ-27D y se tuvieron en cuenta las líneas de drenaje superficial con corrientes permanentes (Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1), bajo la suposición razonable de que ellas corresponden a la intersección del nivel freático con la superficie del terreno. Ellas siguen de manera aproximada la topografía del terreno. Las líneas de flujo, a su vez, fueron trazadas ortogonalmente a las líneas equipotenciales, con las líneas de drenaje de las corrientes permanentes utilizadas como control físico para su trazado geométrico.

8.7 AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Algunos movimientos en masa en laderas de alta montaña, pueden ser explicados como un proceso de falla progresiva en razón de las condiciones hidrogeológicas particulares del medio en el que el regolito limoso de baja permeabilidad constituye el sello o acuícludo del acuífero confinado formado por el basamento rocoso. La presión hidrostática en el techo del basamento puede alcanzar una magnitud capaz de fracturar el manto de regolito, lo que inicia un proceso de falla progresiva.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---



Los análisis de estabilidad de taludes y laderas se basan en modelos en los que se hace un balance de fuerzas/momentos motores versus fuerzas/momentos resistentes. Cualquier elemento externo (sobrecargas, cargas dinámicas, estructuras de contención, elementos de refuerzo, etc.) es integrado al sistema que queda reducido a un sistema cerrado cuyo equilibrio es calculado en forma iterativa.

La presión artesiana en las laderas de alta montaña ha sido una variable pasada por alto en el análisis de estabilidad de taludes y laderas. Los esfuerzos asociados a la presión artesiana en la base del manto del suelo que suprayace el macizo rocoso fracturado en las laderas de alta montaña es un elemento externo que bien puede explicar algunos movimientos de masa. Un incremento excepcional de dicha presión o la disminución de la carga del regolito sobre el macizo rocoso debido al efecto de la erosión secular o a cortes del terreno, pueden dar lugar al desequilibrio de fuerzas que dé lugar a la ruptura desencadenando un proceso de movimiento de masa.

En las laderas de alta pendiente, donde el regolito limoso constituye el sello impermeable sobre el acuífero confinado del basamento rocoso, debe considerarse una condición adicional de estabilidad: la resistencia mecánica del sello impermeable debe ser mayor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del acuífero. Esta es una condición necesaria de estabilidad. Cuando la resistencia mecánica del sello impermeable sea menor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del acuífero habrá lugar para que se rompa el sello y se inicie un proceso de falla progresiva (Hoyos, 1990, 1992, 2006).

A partir de estas consideraciones, puede proponerse como mecanismo de falla un proceso falla progresiva (Skempton, 1964) que puede presentarse donde un manto de regolito con baja permeabilidad suprayace al basamento rocoso, de manera que este constituye un acuífero confinado en cuyo techo el agua puede encontrarse a presión mayor que la presión atmosférica. El mecanismo de falla es ilustrado en Figura 88 y en la Figura 89. Dicho mecanismo puede ser descrito en términos de los eventos enumerados y descritos a continuación:

- ✓ Disminución del espesor del regolito hasta el punto en que la resistencia del manto de regolito es menor que la fuerza generada por la presión hidrostática en el techo del acuífero.
- ✓ Aumento del nivel piezométrico hasta el punto en que la resistencia del manto de regolito es menor que la fuerza generada por la presión hidrostática en el techo del acuífero.
- ✓ El manto de regolito, sometido a tensión, sufre una primera fractura o conjunto de fracturas que pueden permitir el drenaje de agua desde el acuífero hasta superficie.
- ✓ La fractura inicial constituye una zona de debilidad a partir de la cual se inicia un proceso de falla progresiva (Skempton, 1964).

	<p style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p style="text-align: center;">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p style="text-align: center;">INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

- ✓ Colapso de la masa de suelo. La geometría de la superficie de deslizamiento puede ser esferoidal, poliédrica o en cuña, dependiendo de las condiciones particulares del terreno.

En el caso de la UMI El Faro - Golondrinas, la amenaza por deslizamientos producto del modelo hidrogeológico propuesto se descarta. Esto, principalmente porque las presiones generadas por el flujo subterráneo que se pueden esperar, comparada con la de la carga que representa el regolito, son bajas a nulas. Aunque se descarta la amenaza por deslizamientos producto del modelo hidrogeológico propuesto, se considera necesario continuar con el monitoreo de los piezómetros instalados en la zona de estudio. Es importante determinar si ascienden los niveles freáticos regionales en temporadas lluviosas.



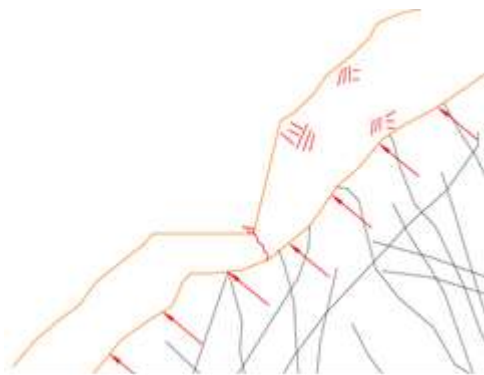
Condición de equilibrio

La resistencia del manto de regolito es mayor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



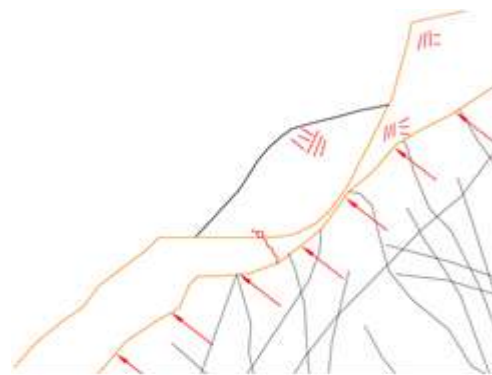
Cambio en las condiciones de equilibrio

Un corte en el manto de regolito, o el incremento de la presión hidrostática, o ambas, cambian la relación entre la resistencia del regolito y la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



Condición inicial de falla progresiva

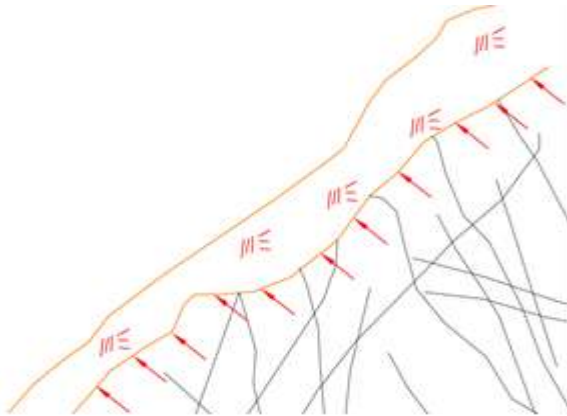
Rotura del manto de regolito por acción de la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



Colapso de la masa de regolito

Finalmente el material que ha sufrido rotura colapsa

Figura 88. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica (Skempton, 1964)



Condición de equilibrio

La resistencia del manto de regolito es mayor que la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



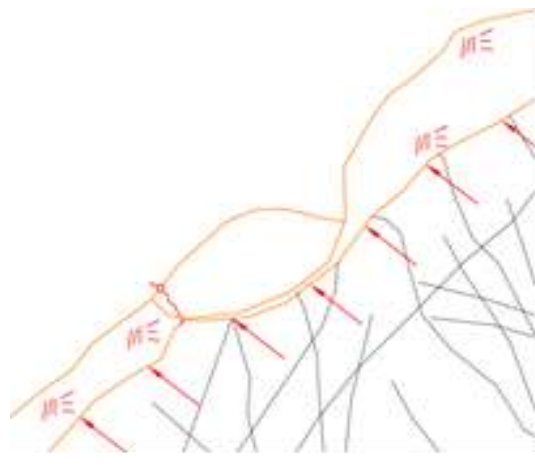
Cambio en las condiciones de equilibrio

Una disminución del espesor del manto de regolito por erosión secular, o el incremento de la presión hidrostática, o ambas, cambian la relación entre la resistencia del regolito y la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



Condición inicial de falla progresiva

Rotura del manto de regolito por acción de la fuerza asociada a la presión hidrostática en el techo del basamento rocoso



Colapso de la masa de regolito

Finalmente el material que ha sufrido rotura colapsa

Figura 89. Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica (Skempton, 1964)

9. ASPECTOS SÍSMICOS

La Figura 90 presenta el mapa de zonas homogéneas de la Microzonificación Sísmica de Medellín y sobre este se han superpuesto los respectivos polígonos del proyecto Barrios Sostenibles, destacándose en este caso en particular el Polígono El Faro.

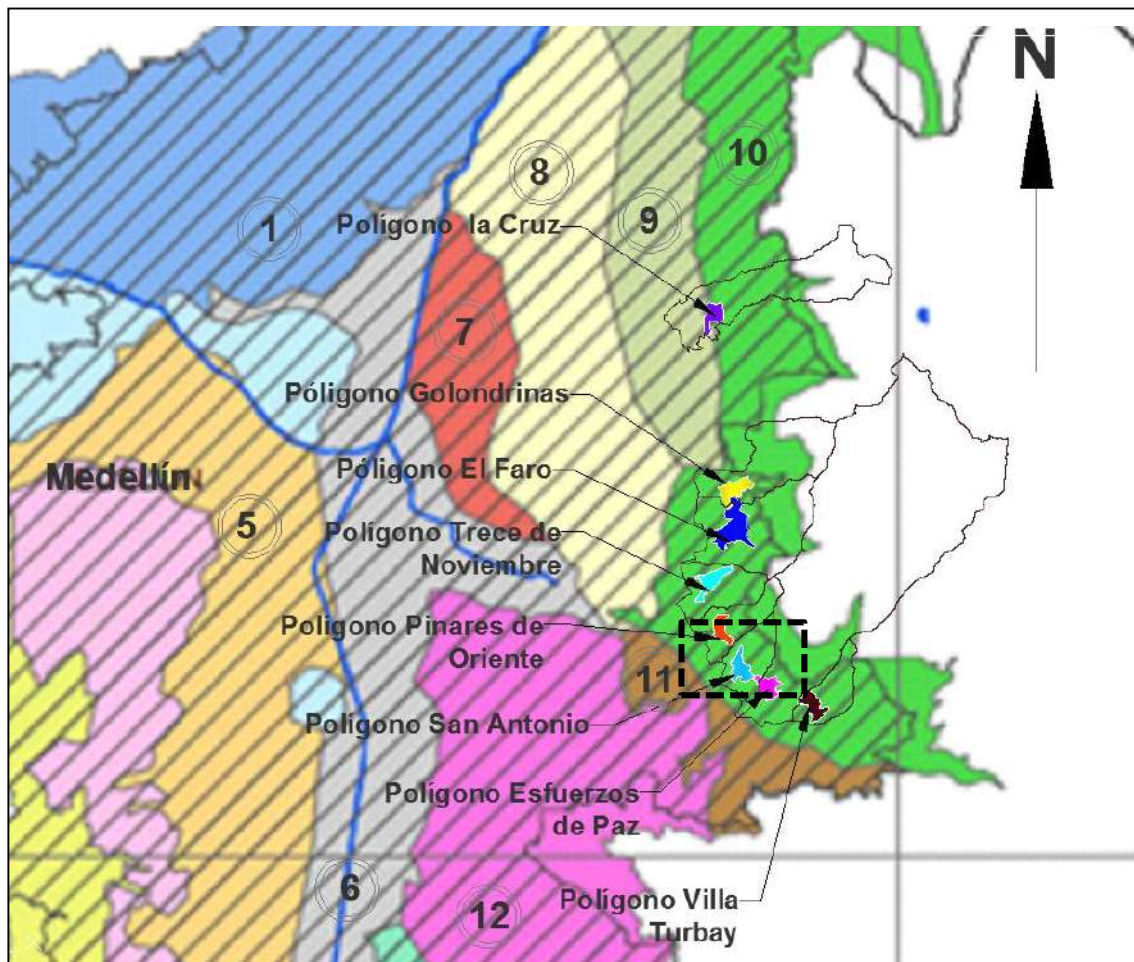




Figura 90. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, 1999)

Se puede observar que desde el punto de vista de la sismica, los Polígonos El Faro, Golondrinas, Trece de Noviembre, Pinares de Oriente, San Antonio, Esfuerzos de Paz y Villa Turbay con sus respectivas UMI, que hacen parte del proyecto de Barrios Sostenibles y que son objeto de estudio, se encuentran localizados según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (MZSM, 1999) sobre la Zona Homogénea 10, la cual corresponde a los suelos residuales de las Dunitas de la parte alta.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

El Polígono La Cruz, que también hace parte del proyecto de Barrios Sostenibles, se encuentra ubicado entre las Zonas Homogéneas 9 y 10, según la MZSM (1999) la Zona Homogénea 9 corresponde a los suelos residuales de la anfibolita y según la geología local del Polígono, las unidades geológicas encontradas corresponden a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín, por lo tanto, en el Polígono La Cruz prevalece la Zona Homogénea 10.

El Polígono El Faro, objeto principal del estudio presentado en este informe, se encuentra en su totalidad dentro de la denominada Zona Homogénea 10. Esta zona homogénea limita al norte con el municipio de Bello al occidente con las Zonas Homogéneas 8 y 9, al sur con la Quebrada Santa Elena, y al oriente con la frontera urbana de la ciudad de Medellín.

La Zona Homogénea 10 cubre en el sector de la Comuna 1 (Popular) los Barrios La Avanzada, parte de Santo Domingo Savio No. 1 y No. 2, La Esperanza No.2, Carpinelo, Aldea Pablo VI, El Compromiso y parte de Granizal. En el sector de la Comuna 3 (Manrique) los Barrios San José La Cima No. 1 y No. 2, María Cano Carambola, Bello Oriente, La Cruz, Versalles No. 2. Finalmente, en el sector de la Comuna 8 (Villa Hermosa) los barrios Llanaditas, Los Mangos, El Pinal, Trece de Noviembre, La Libertad, Pinares de Oriente, Villa Tina, San Antonio, Esfuerzos de Paz, Villa Turbay, Villa Liliam, Santa Lucía, Las Estancias y parte del Batallón Girardot, La Ladera y Sucre.

Para la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín en su descripción de las Zonas Homogéneas, los terrenos de la Zona Homogénea 10 están constituidos predominantemente por Dunitas muy fracturadas debido a efectos tectónicos como se describió previamente en los aspectos geológicos locales (Capítulo), las cuales aparecen cubiertas en forma local por depósitos coluviales. En estos terrenos predominan los afloramientos de carácter rocoso como consecuencia del lavado por escorrentía de las capas de suelo, proceso favorecido por la fuerte pendiente y el escaso espesor o desarrollo de los mismos. Los suelos residuales de las Dunitas se presentan en sectores localizados de relieve suave.

En las vertientes modeladas sobre las Dunitas, caracterizadas por sus declives entre empinados y escarpados, se presentan formas típicas del relieve de la zona que corresponden a lomos o narices topográficas de extensión variable con topes desde suaves y redondeados hasta casi planos, flanqueados por laderas empinadas. Estos aparecen a manera de peldaños o escalones colgados sobre estas vertientes.

La Tabla 25 presenta los perfiles típicos que caracterizan la Zona Homogénea 10 según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999). En la UMI El Faro-Golondrinas, la unidad geológica predominante corresponde a las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidos por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. En el Numeral 4.2 se presentan los perfiles geológico-geotécnicos generales determinados con base en la exploración

disponible para la zona de estudio y el reconocimiento de campo. Así las cosas, se puede establecer que el perfil geológico general de la UMI El Faro-Golondrinas se puede asociar principalmente con el denominado Perfil I de la Microzonificación Sísmica.

Tabla 25. Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10

Perfil	Materiales	Sigla	Espesores (m)
1	Depósitos coluviales	Qc	0 – 15
	Flujos de lodos y/o escombros frescos	Qff	0 – 30
	Dunitas de Medellín	KuM - SuM	10 – 30
2	Depósitos coluviales	Qc	5
	Flujos de lodos y/o escombros frescos	Qff	5
	Stock de las Estancias	KcE - ScE	20
3	Dunitas de Medellín	SuM	5
	Dunitas de Medellín	KuM	51
	Anfibolitas Margen Derecha	KaM	-
4	Depósitos Coluviales	Qc	10
	Dunitas de Medellín	SuM – KuM	22
	Anfibolitas margen Derecha	KaM	-



Teniendo en cuenta lo anterior, las construcciones y edificaciones de cualquier índole que se levanten sobre la Zona Homogénea 10, deberán considerar para tal efecto el espectro para los sismos de servicio (fracción de amortiguamiento crítico del 2%) y de diseño (fracción de amortiguamiento crítico del 5%), de acuerdo con el espectro generalizado.

El coeficiente espectral para la Zona Homogénea 10 para el sismo de diseño corresponde a 0.38g la aceleración de la gravedad el cual corresponde a un sismo de diseño para periodo de retorno de 475 años (Tabla 26).

Tabla 26. Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños

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

No obstante, la magnitud del coeficiente establecido es alto, por lo que se recurrirá a trabajar con magnitudes de este coeficiente no menores a 2/3, equivalente a un coeficiente espectral de 0.25g.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

10. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

10.1 SONDEOS EXPLORATORIOS

Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron sondeos profundos y líneas geofísicas, los cuales fueron localizados en función del modelo geológico-geotécnico que debía determinarse. Se tuvo en cuenta además la ubicación de los sondeos existentes en los estudios recopilados.

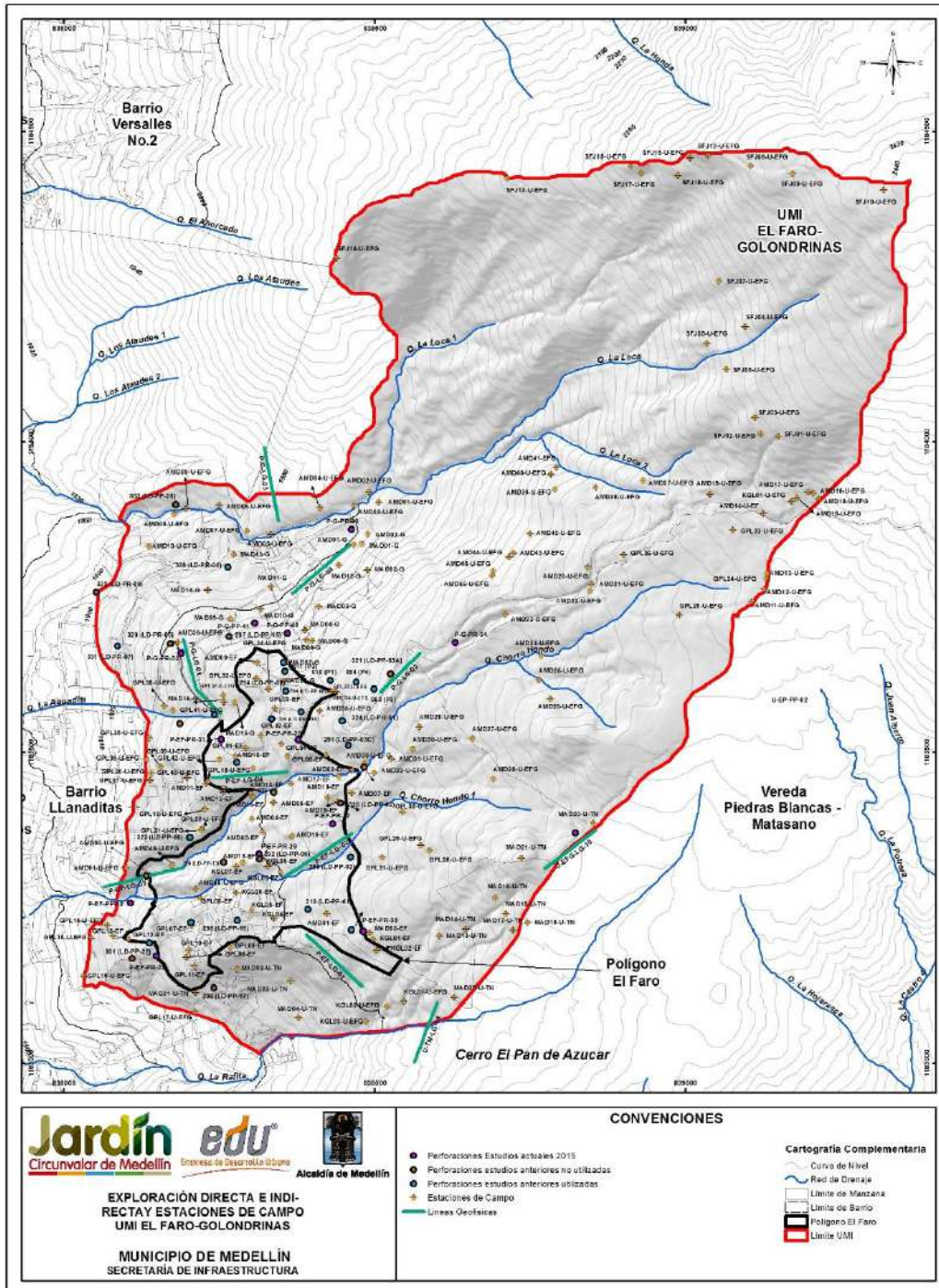
El Mapa 22 presenta la localización de la exploración considerada para la UMI El Faro - Golondrinas. Se pueden observar los sondeos tanto de tipo directo (perforaciones) como indirecto (líneas de geofísica), que en conjunto conforman un sistema de exploración que cubre ampliamente la zona de estudio a nivel local y regional.

10.1.1 Perforaciones

En la UMI El Faro - Golondrinas se realizaron en total nueve perforaciones a rotación, seis dentro del polígono El Faro correspondientes a las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-28, P-EF-PR-29, P-EF-PR-30, P-EF-PR-31 y P-EF-PR-39 y tres dentro del polígono Golondrinas correspondientes a las Perforaciones P-G-PR-32, P-G-PR-33, P-G-PR-34. Además se realizaron cuatro perforaciones a percusión denominadas P-EF-PP-42, P-G-PP-40, P-G-PP-41 y U-EFG-PP-01 (Mapa 22).

Para la caracterización de los materiales al interior de esta UMI también fue considerada la información obtenida de veintiuna perforaciones realizadas en estudios anteriores por DEACIVIL (2014), INTEINSA (2013) e INTEINSA (2011). Las perforaciones correspondientes a cada estudio son presentadas en la Tabla 27. En el Anexo 02 se presenta la descripción detallada de los sondeos realizados por el proyecto y los de estudios anteriores que fueron considerados.

En la Tabla 27 se presenta la profundidad alcanzada, el nivel freático, la cota del terreno y las coordenadas de cada una de las perforaciones tenidas en cuenta en el presente estudio.



Mapa 22. Localización de la exploración directa e indirecta
(13_EFRExploracion_Medellin_C y 13_EFRExploracion_Medellin_T)



 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	--	---

Tabla 27. Exploración geotécnica utilizada en la UMI El Faro - Golondrinas

	Perforación	Prof. (m)	Prof. N.F. (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
Proyecto (2015)	P-EF-PR-27	20.00	Seco	2042.9	838431.626	1183385.327
	P-EF-PR-28	18.00	Seco	1917.4	838148.541	1183172.383
	P-EF-PR-29	23.00	Seco	1997.3	838313.829	1183336.827
	P-EF-PR-30	17.50	Seco	2044.8	838376.892	1183520.794
	P-EF-PR-31	20.00	Seco	2005.7	838253.132	1183521.491
	P-EF-PR-39	15.00	Seco	2049.5	838481.372	1183212.538
	P-EF-PP-42	6.45	Seco	1895.9	838106.506	1183257.500
	P-G-PR-32	16.00	Seco	1980.0	838187.818	1183660.241
	P-G-PR-33	20.00	1.5	1968.8	838462.019	1183859.503
	P-G-PR-34	25.00	4.0	2110.1	838629.341	1183676.936
	P-G-PP-40	8.45	Seco	2002.1	838359.258	1183691.822
	P-G-PP-41	4.45	Seco	1986.0	838306.508	1183708.042
	U-EFG-PP-01	12.45	Seco	2130.2	838822.871	1183370.963
Inteinsa (2011)	10 (P1)	8.45	Seco	2041.3	838354.913	1183630.695
	11 (P2)	7.45	Seco	2034.5	838352.918	1183645.409
Inteinsa (2013)	61 (P1)	12.00	9.0	2058.3	838428.194	1183616.366
	62 (P2)	15.50	9.0	2069.3	838470.284	1183613.348
	63 (P3)	19.00	12.0	2079.0	838498.647	1183602.264
Deacivil (2014)	288 (LD-PP-01)	7.45	Seco	2043.6	838462.390	1183214.075
	289 (LD-PP-02)	6.45	Seco	2038.0	838460.894	1183331.497
	291 (LD-PP-03C)	6.30	Seco	2065.0	838457.494	1183511.462
	294 (LD-PP-08)	9.45	Seco	2038.3	838356.839	1183599.165
	295 (LD-PP-12)	6.45	Seco	1980.1	838278.938	1183229.876
	299 (LD-PP-18)	6.15	Seco	1955.0	838203.993	1183226.368
Deacivil (2014)	301 (LD-PP-22)	5.30	Seco	1920.0	838137.200	1183193.596
	319 (LD-PP-61)	5.45	Seco	2014.5	838392.446	1183247.653
	322 (LD-PP-64)	10.30	Seco	2071.9	838447.398	1183550.882

Tabla 27. Exploración geotécnica utilizada en la UMI El Faro - Golondrinas

Perforación	Prof. (m)	Prof. N.F. (m)	Cota Terreno	Coordenada Este	Coordenada Norte
323 (LD-PP-66)	6.45	Seco	1965.7	838202.406	1183363.352
324 (LD-PR-01)	20.00	7.0	2050.7	838381.879	1183565.451
325 (LD-PR-01A)	20.00	10.0	2031.4	838333.859	1183554.074
326 (LD-PR-02)	20.00	15.0	2011.6	838278.006	1183484.461
327 (LD-PR-03)	20.00	Seco	1996.5	838242.208	1183560.406
328 (LD-PR-04)	25.00	7.5	1938.1	838263.330	1183798.988
331 (LD-PR-07)	18.00	Seco	1926.6	838086.199	1183670.606

De la Figura 91 a la Figura 101 se presentan las gráficas de variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad para todos los sondeos. Se exceptúan las Perforaciones P-G-PR-32 y 328 (LD-PR-04) en las que no se realizó el ensayo de penetración estándar. Adicionalmente, se ha incluido en las figuras la estratigrafía y la profundidad del nivel freático donde fue detectado.

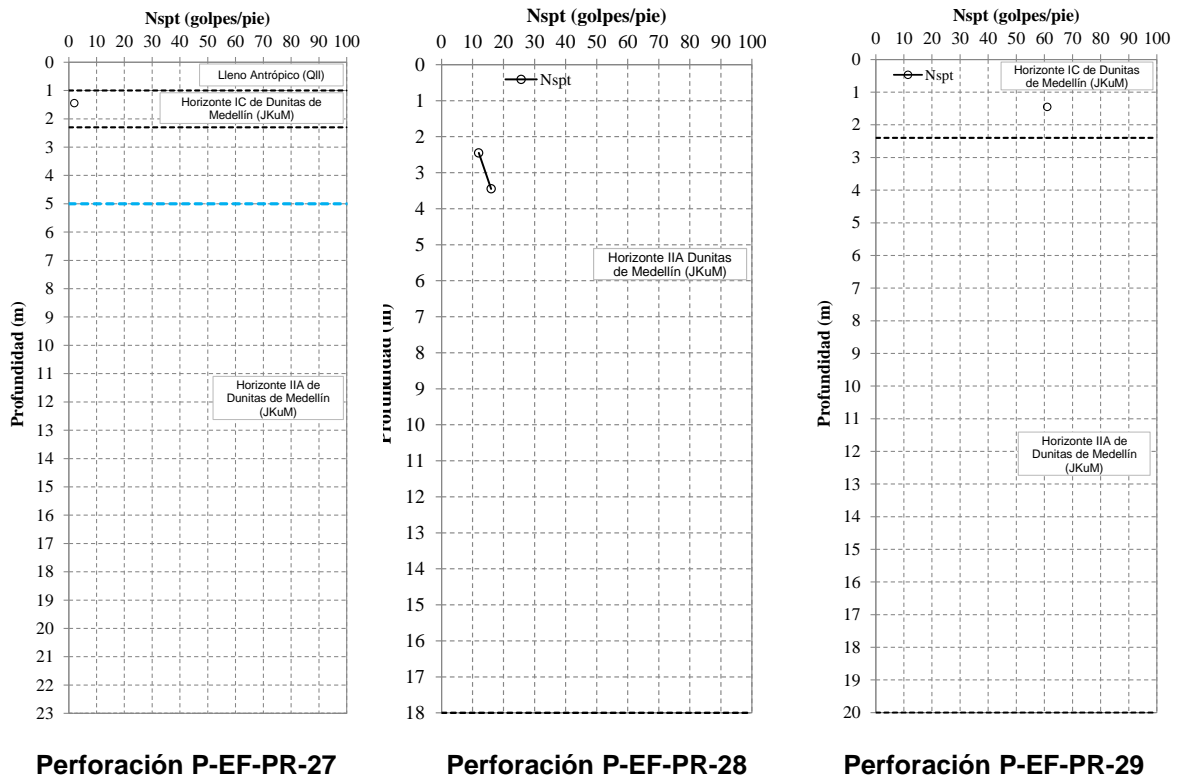


Figura 91. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas

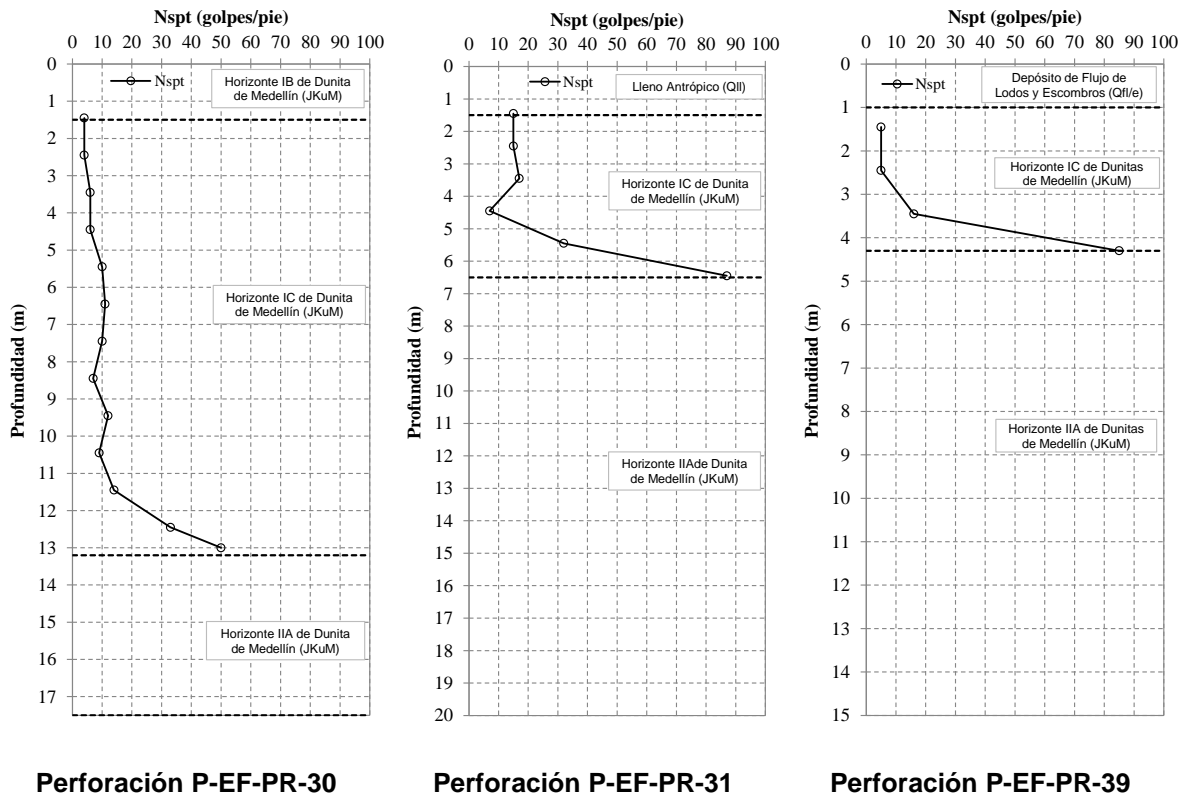


Figura 92. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)

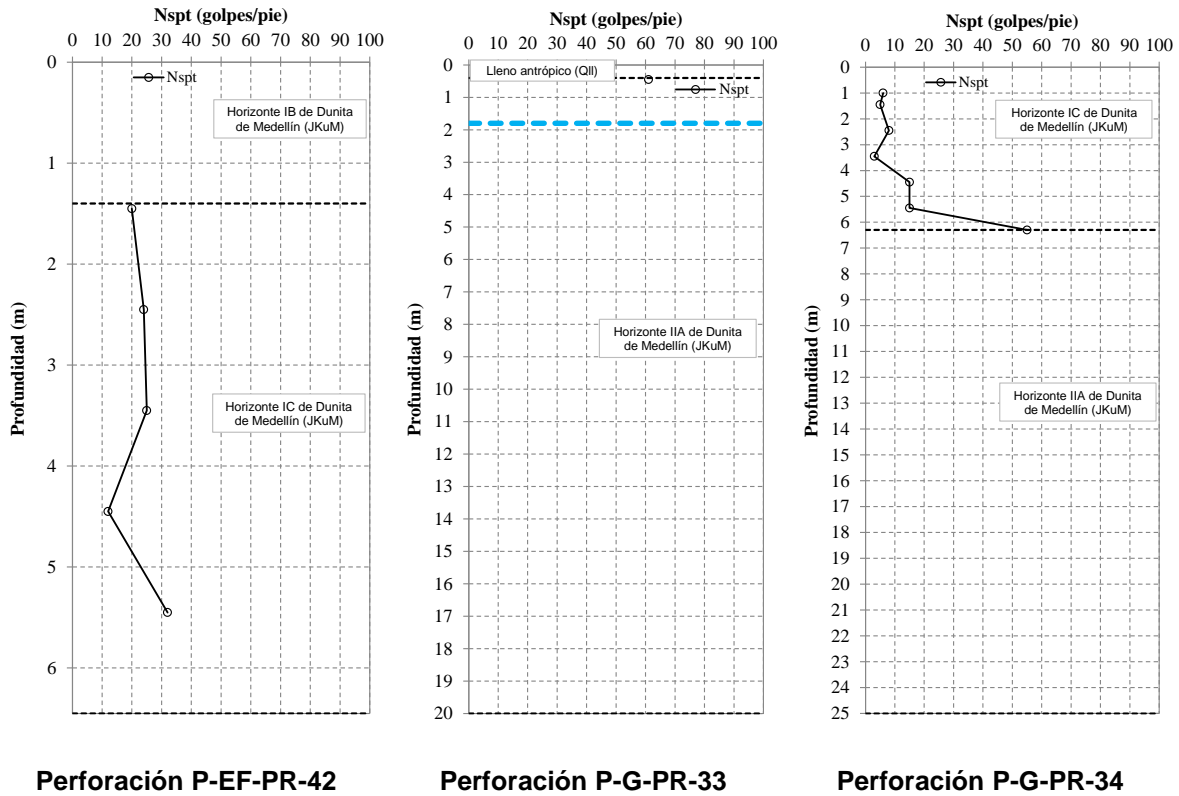
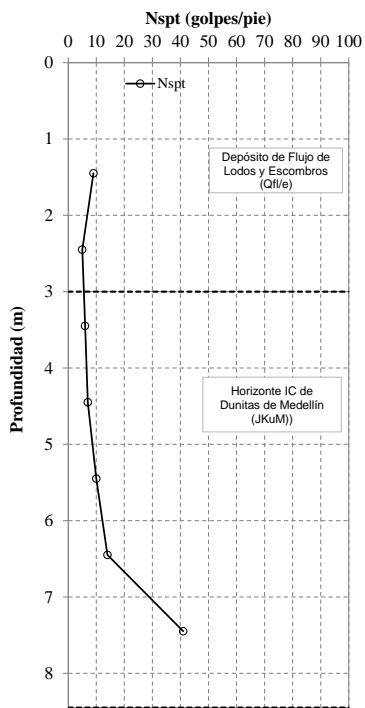
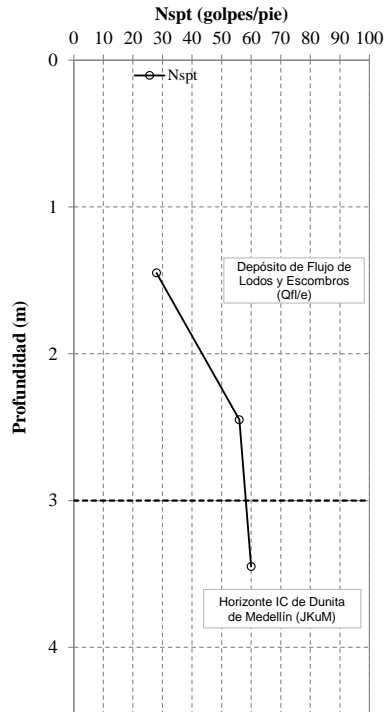


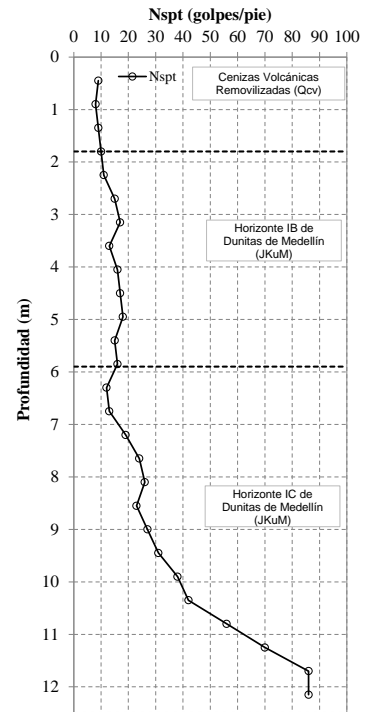
Figura 93. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación P-G-PP-40



Perforación P-G-PP-41



Perforación U-EFG-PP-01

Figura 94. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)

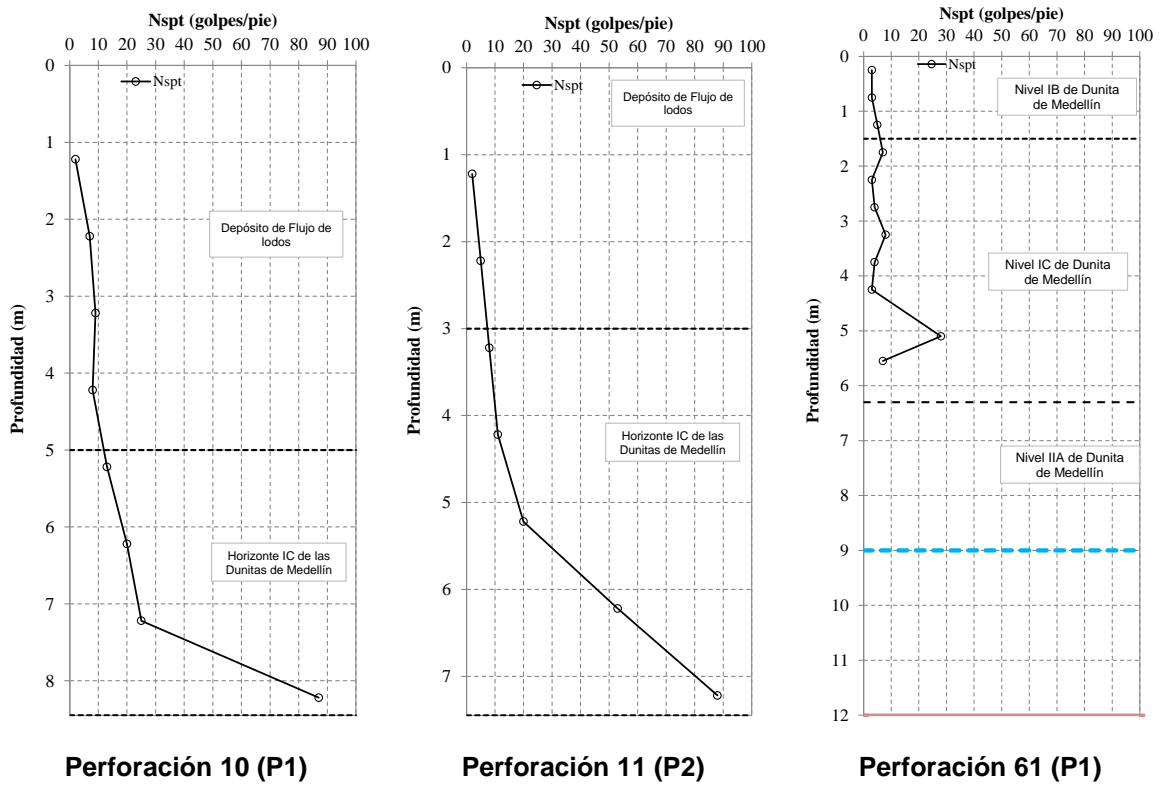
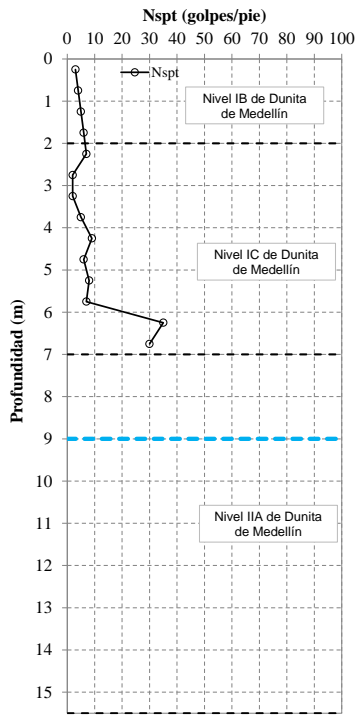
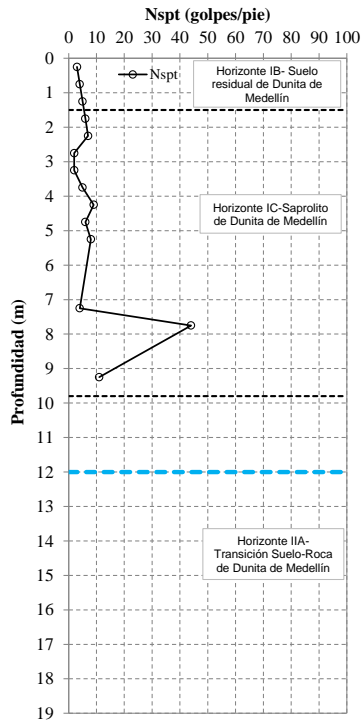


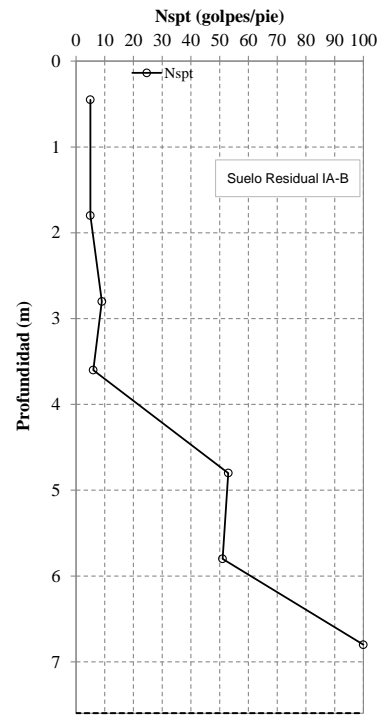
Figura 95. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 62 (P2)

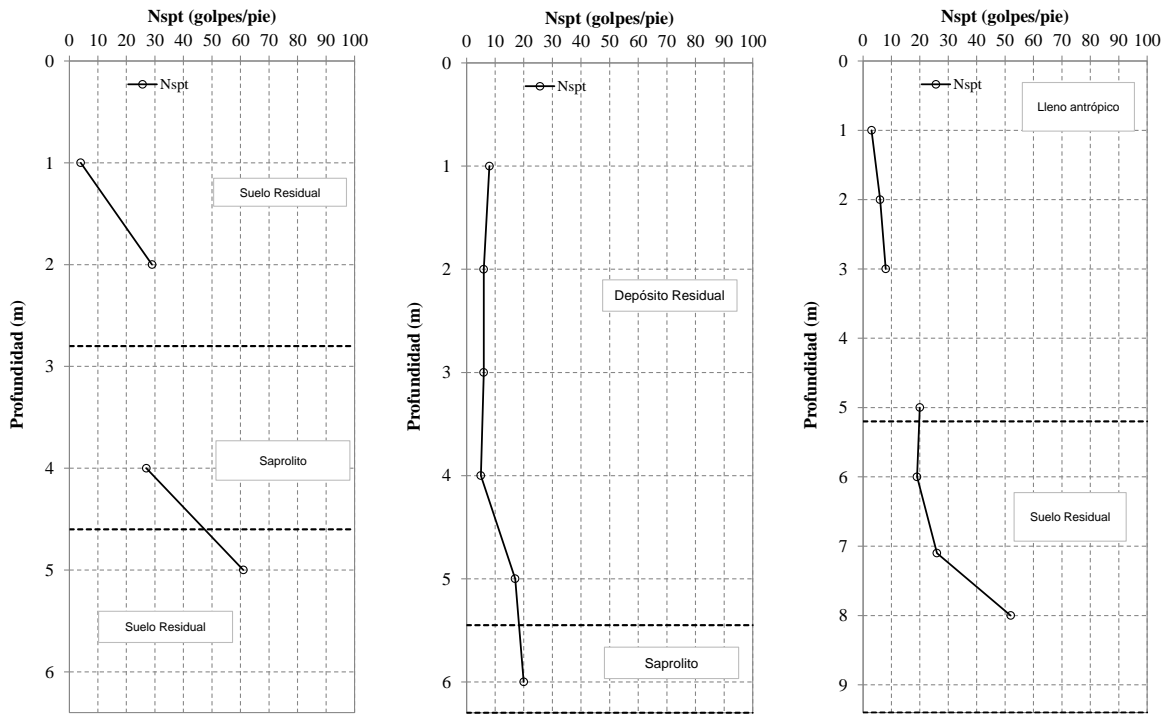


Perforación 63 (P3)

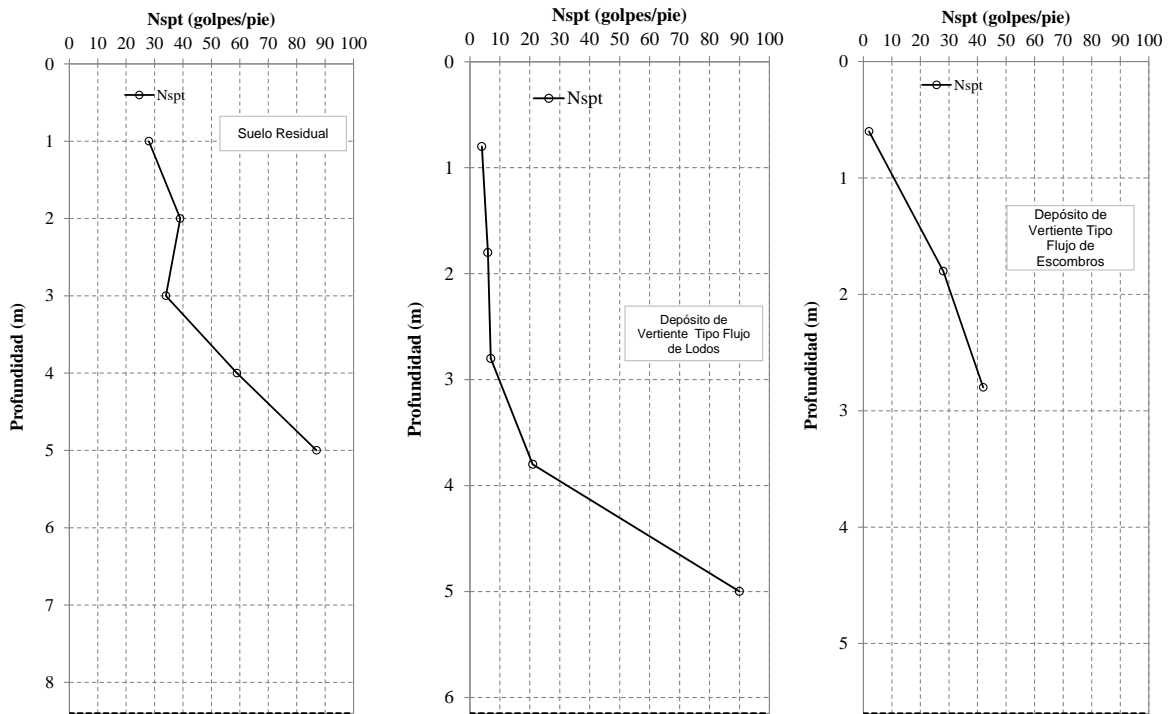


Perforación 288 (LD-PP-01)

Figura 96. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 289 (LD-PP-02) Perforación 291 (LD-PP-03C) Perforación 294 (LD-PP-08)
Figura 97. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)

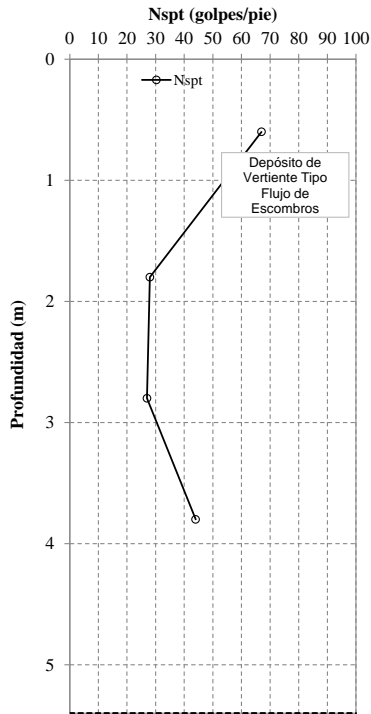


Perforación 295 (LD-PP-12)

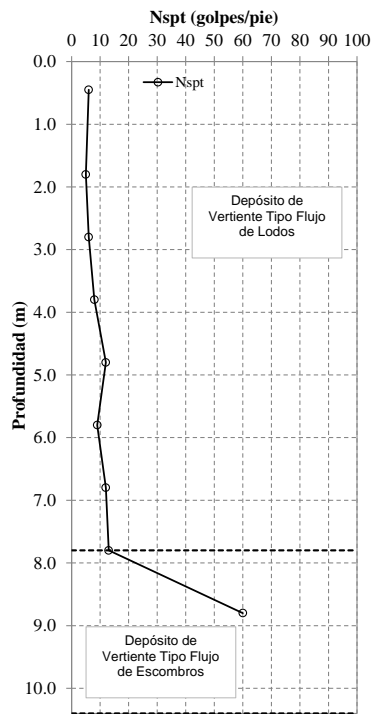
Perforación 299 (LD-PP-18)

Perforación 301 (LD-PP-22)

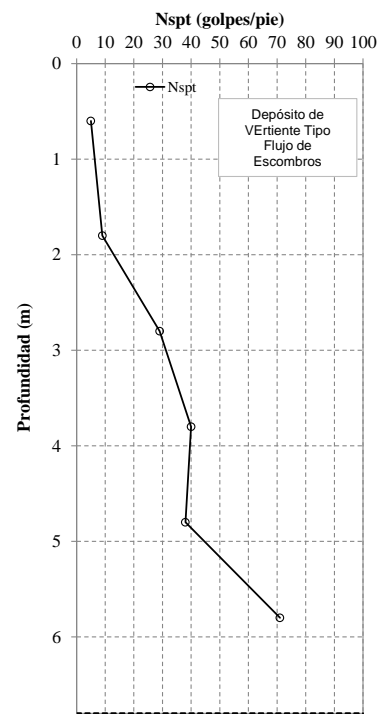
Figura 98. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 319 (LD-PP-61)

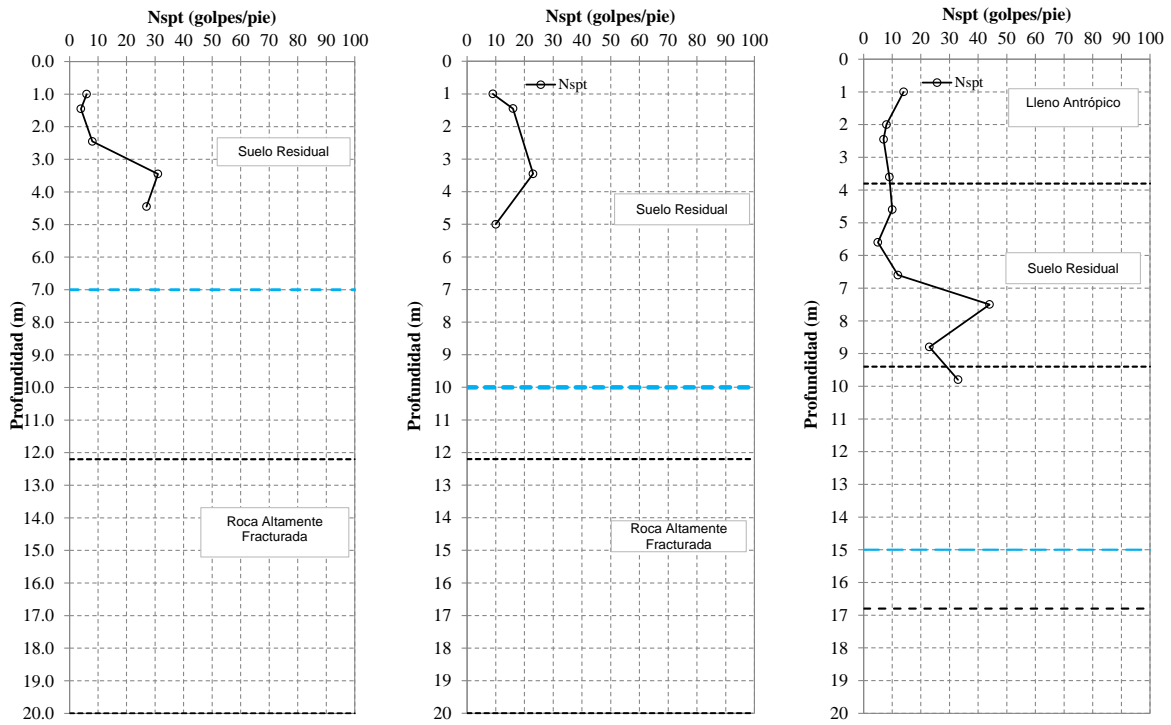


Perforación 322 (LD-PP-64)



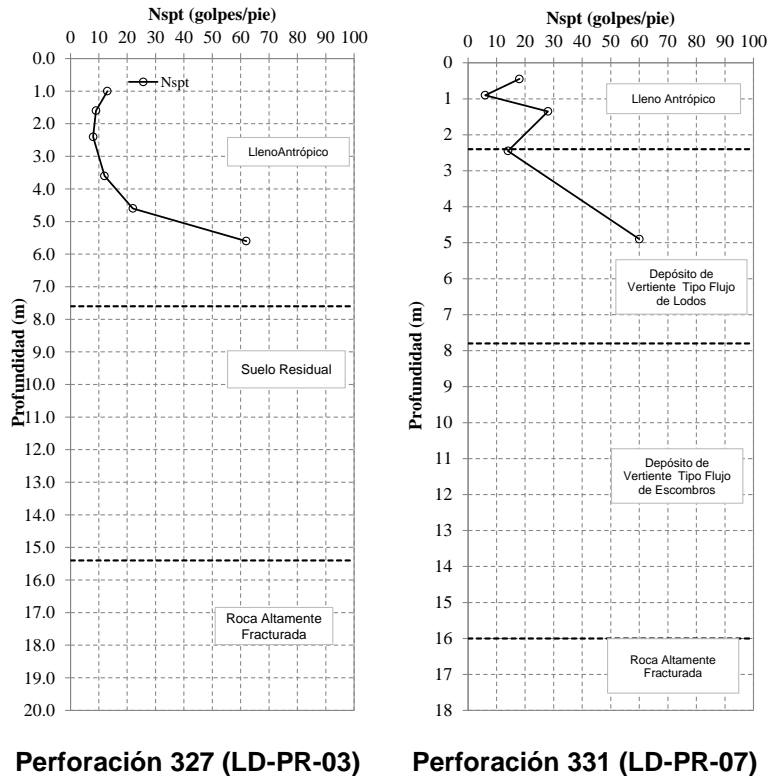
Perforación 323 (LD-PP-66)

Figura 99. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 324 (LD-PR-01) Perforación 325 (LD-PR-01A) Perforación 326 (LD-PR-02)

Figura 100. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)



Perforación 327 (LD-PR-03) Perforación 331 (LD-PR-07)
Figura 101. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones de la UMI El Faro - Golondrinas (Continuación)

De acuerdo a las perforaciones realizadas y consultadas, en la UMI El Faro se encuentran cuerpos de llenos antrópicos que en superficie abarcan longitudes entre 5 m y 30 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.0 m y 11.0 m. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-31, P-G-PR-33, 294 (LD-PP-08), 326(LD-PR-02), 327 (LD-PR-03), 328 (LD-PR-04) y 331 (LD-PR-07), suprayaciendo los suelos residuales de la Dunita de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Este material presenta resistencias a la penetración estándar muy variables, entre 3 golpes/pie y 28 golpes/pie e incluso en la Perforación 327 (LD-PR-03), se obtuvo 62 golpes/pie.

En la Perforación U-EFG-PP-01 fue identificado un cuerpo de ceniza volcánica removilizada y/o in situ de 1.8 m de espesor. Éste material presenta resistencias a la penetración estándar promedio de 9 golpes/pie.

Por debajo de los llenos antrópicos o aflorando en superficie se tienen los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Estos depósitos fueron identificados en las Perforaciones P-EF-PR-39, P-G-PR-40, P-G-PR-41, 10 (P1), 11 (P2), 291 (LD-PP-03C), 299 (LD-PP-18), 301 (LD-PP-22), 319 (LD-PP-61), 322 (LD-PP-64), 323 (LD-PP-66), 331

(LD-PR-07). La resistencia a la penetración varía considerablemente entre 4 golpes/pie y 90 golpes/pie, entre la superficie y 26.0 m de profundidad.

La Dunita de Medellín fue identificada en la zona de estudio, mediante la exploración en profundidad, encontrando el desarrollo de los Horizontes IB, IC y IIA, según la clasificación de Deere y Patton (1971). Se halla en las Perforaciones P-EF-PR-27, P-EF-PR-28, P-EF-PR-29, P-EF-PR-30, P-EF-PR-31, P-EF-PR-39, P-EF-PR-42, U-EFG-PP-01, P-G-PR-33, P-G-PR-34, P-G-PR-40, P-G-PR-41, 10 (P1), 11 (P2), 61 (P1), 62 (P2) y 63 (P3). En esta unidad es común encontrar evidencias de falla, tales como espejos, milonitas, salbanda (tacto jabonoso) y brechas tectónicas (cataclasitas), por lo que se podría clasificar como dunita cizallada. Las resistencias a la penetración estándar también mejoran notablemente con la profundidad, presentando resistencias del orden de 3 golpes/pie y 87 golpes/pie. Esta unidad aflora en superficie en las perforaciones P-EF-PR-28, P-EF-PR-29, P-EF-PR-30, P-EF-PR-42 y P-G-PR-34.

10.1.2 Líneas geofísicas

En la UMI El Faro – Golondrinas se ejecutaron 9 líneas geofísicas, denominadas P-EF-LG-01, P-EF-LG-02, P-EF-LG-03, P-EF-LG-04, P-G-LG-01, P-G-LG-02, P-G-LG-03, P-G-LG-04 y U-EFG-LG-10. Adicionalmente se utilizó la línea geofísica U-TN-LG-14 realizada en la UMI Trece de Noviembre, para complementar el análisis geológico geotécnico. En cada una se realizó el ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor) y la localización en planta se muestra en el Mapa 22.

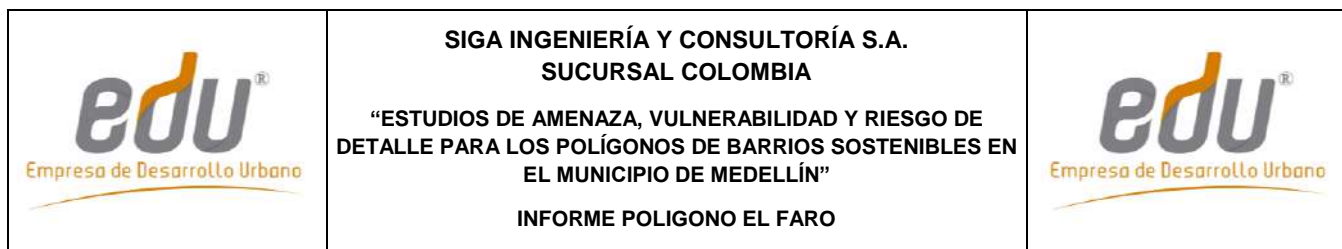
El Ensayo ReMi (Refraction Microtremor) es un método de refracción sísmica empleado para evaluar la velocidad propagación de ondas de corte (V_s) con base en la determinación de la dispersión de la propagación de ondas superficiales. El ensayo está definido por dos ideas tecnológicas básicas, las cuales se exponen a continuación:

- ✓ Los geófonos empleados para registrar el ruido ambiental son dispuestos a lo largo de una línea recta. Estos geófonos registran las ondas superficiales con frecuencias tan bajas como 2 Hz, dependiendo del tipo de sensores que se utilicen.
- ✓ Una transformada en dos dimensiones, lentitud (inverso de la velocidad de propagación de los componentes de ondas superficiales) y frecuencia ($p-f$), de un registro de micro tremores (vibraciones ambientales o inducidas) permite separar la llegada de las ondas Rayleigh de la llegada de otras ondas sísmicas. Una vez las ondas Rayleigh son identificadas, es posible determinar su verdadera velocidad de fase y no su velocidad aparente (Louie, 2001).

En la Tabla 28 se presentan las coordenadas de los puntos inicial y final de los Ensayos ReMi ejecutados, en origen MAGNA-SIRGAS.

Tabla 28. Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI El Faro - Golondrinas

Nomenclatura	Coordenada Inicial		Cota Inicial	Coordenada Final		Cota Final
	Este	Norte		Este	Norte	



P-EF-LG-01	838479	1183124	2015.7	838390	1183207	2013.7
P-EF-LG-02	838463	1183370	2044.6	838357	1183301	2003.2
P-EF-LG-03	838065	1183284	1889.1	838192	1183315	1936.1
P-EF-LG-04	838359	1183468	2025.0	838238	1183459	2002.8
P-G-LG-01	838192	1183682	1982.0	838252	1183563	1999.4
P-G-LG-02	838573	1183660	2098.8	838509	1183597	2082.2
P-G-LG-03	838345	1183873	1947.2	838322	1183991	1950.0
P-G-LG-04	838368	1183756	1976.6	838460	1183834	1971.9
U-EFG-LG-10	838855	1183374	2135.0	838774	1183313	2141.6
U-TN-LG-14	838600	1183097	2046.4	838564	1183002	2026.7

En la Figura 102 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 103, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 104 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 105 se presenta la tomografía obtenida para la Línea P-EF-LG-01 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 1.8 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 97 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 1.8 m y 10.2 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 499 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre 10.2 m y 22.8 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 509 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia densa o como roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde los 22.8 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 807 m/s, la cual puede definirse como roca.

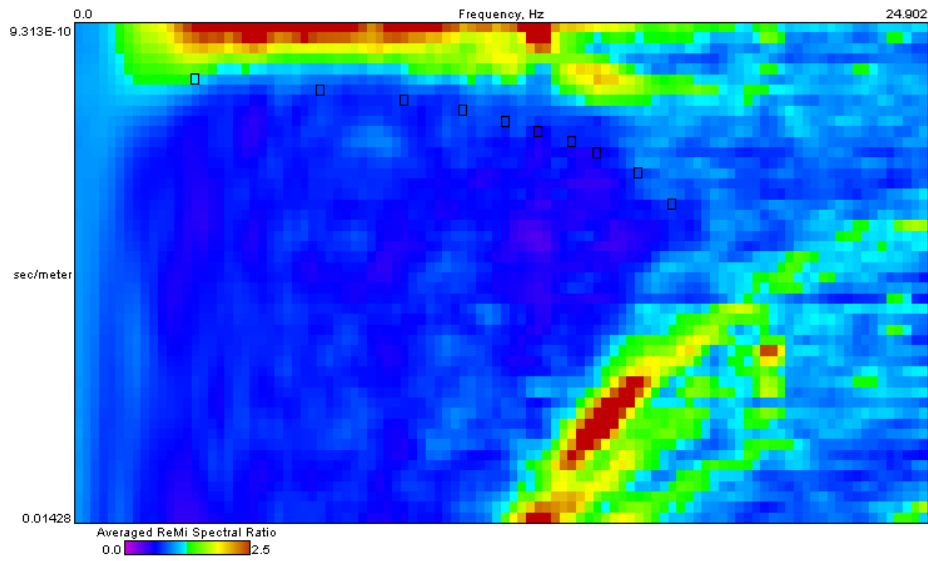


Figura 102. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-01

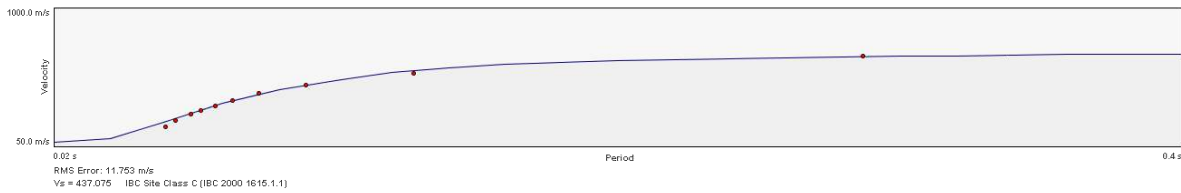
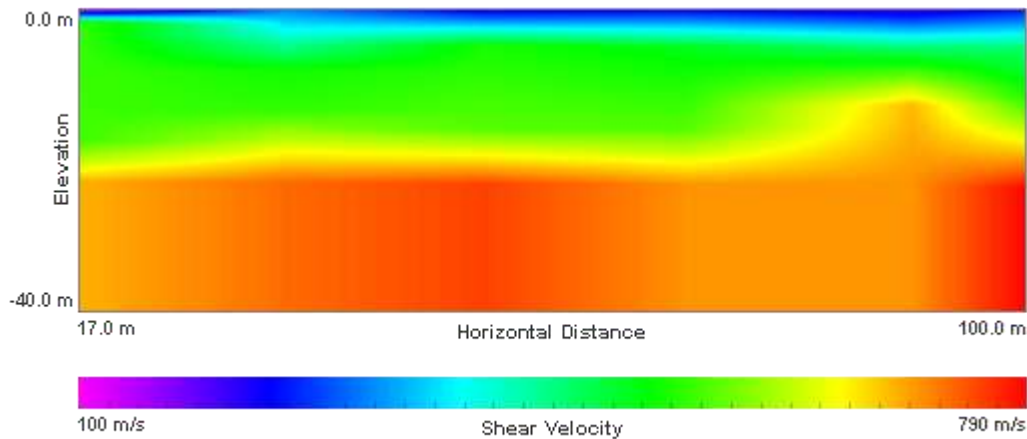


Figura 103. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-01

	Density	Shear Velocity
1.8 m	1.8 g/cc	499.285 m/s
10.2 m	1.8 g/cc	508.989 m/s
22.8 m	1.8 g/cc	806.895 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	806.895 m/s

Figura 104. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01



**Figura 105. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-EF-LG-01**

En la Figura 106 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 107 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 108 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 109 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-EF-LG-02 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 184 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.6 m hasta los 8.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 248 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 8.0 m hasta los 12.2 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 746 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una siguiente capa desde los 12.2 m hasta los 20.2 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 822 m/s, la cual puede definirse como roca.
- ✓ Una capa más profunda desde 20.2 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 864 m/s, la cual puede definirse como roca.

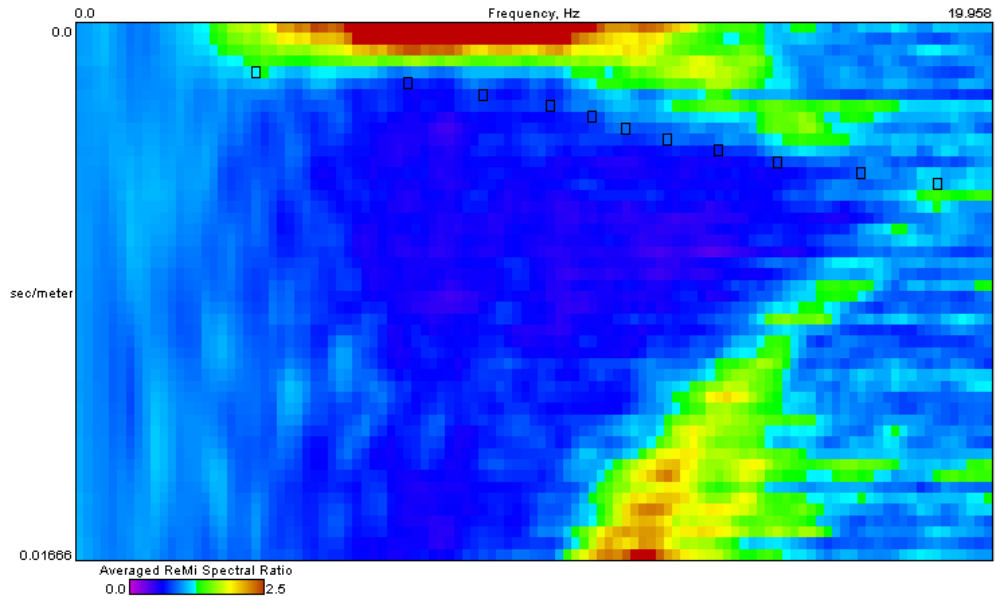


Figura 106. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-02

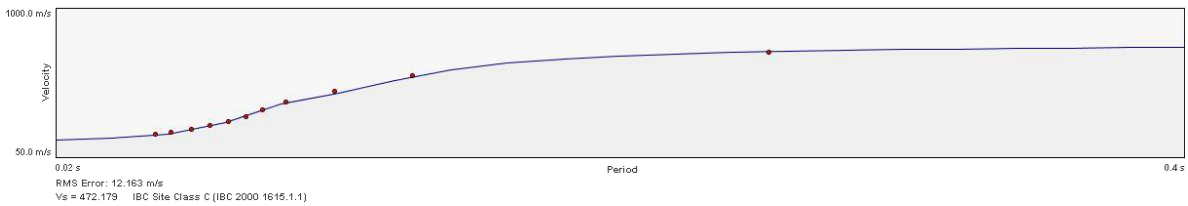
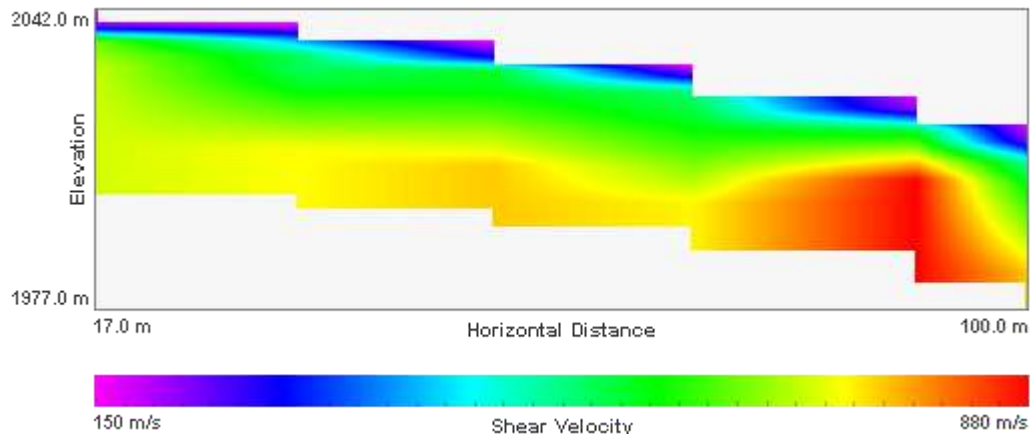


Figura 107. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-02

	Density	Shear Velocity
3.6 m	1.8 g/cc	183.934 m/s
8.0 m	1.8 g/cc	248.306 m/s
12.2 m	1.8 g/cc	745.628 m/s
20.2 m	1.8 g/cc	822.459 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	863.989 m/s

Figura 108. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-02



**Figura 109. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-EF-LG-02**

En la Figura 110 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 111 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 112 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 100 m de longitud. En la Figura 113 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-EF-LG-03 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 3.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 239 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa entre los 3.6 m y 9.60 m de profundidad, con velocidad de propagación de onda S de 518 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una tercera capa entre los 9.60 m y los 24.4 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 604 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia entre los 24.4 m y los 33.0 m de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S de 655 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 33.0 m en adelante de profundidad, con una velocidad de propagación de onda S superior a 1009 m/s, la cual corresponde a roca.

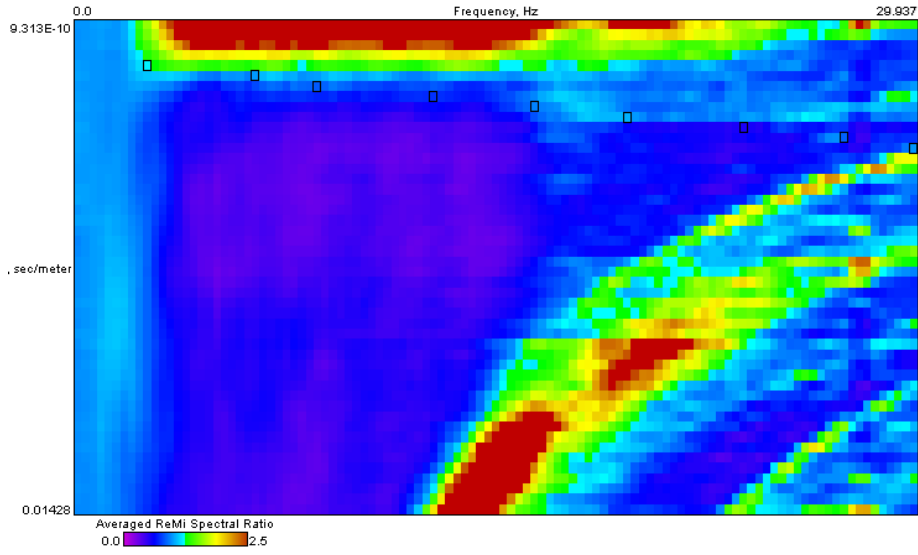


Figura 110. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-03

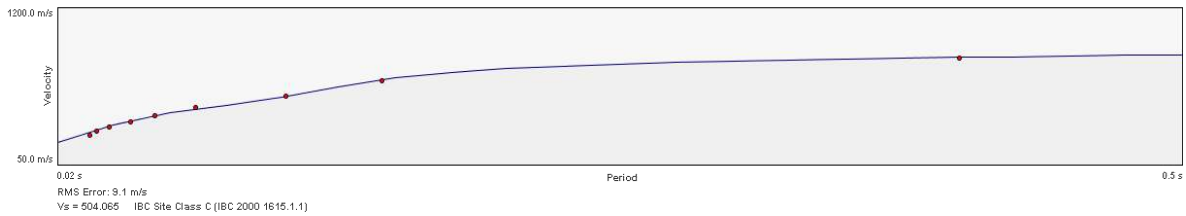


Figura 111. Dispersión y ajuste para la Línea P—EF-LG-03

	Density	Shear Velocity
3.6 m	1.8 g/cc	238.525 m/s
9.6 m	1.8 g/cc	517.541 m/s
24.4 m	1.8 g/cc	604.262 m/s
33.0 m	1.8 g/cc	654.536 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	1008.962 m/s

Figura 112. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03

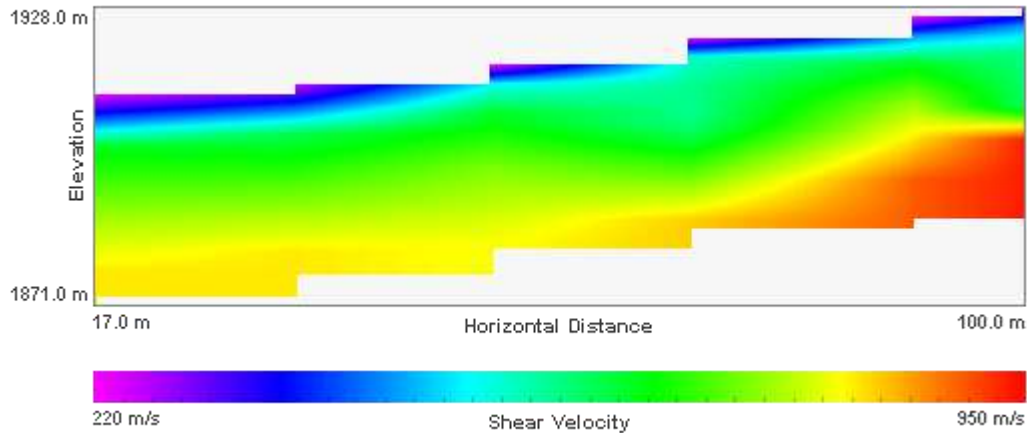


Figura 113. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-03

En la Figura 114 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-EF-LG-04. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 115 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 116 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 117 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-EF-LG-04 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 116 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.8 m hasta los 10.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 186 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una última capa desde los 10.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 445 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

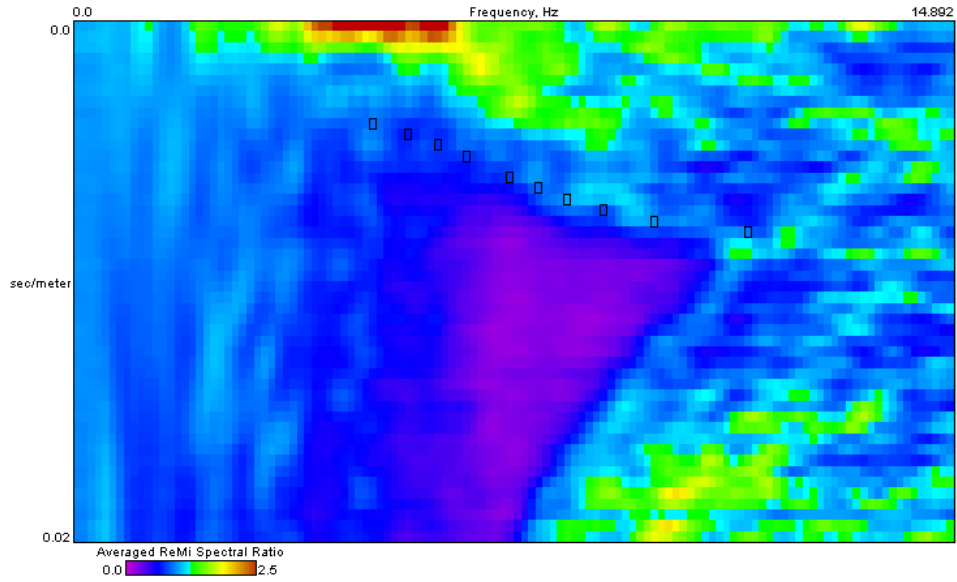


Figura 114. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-04

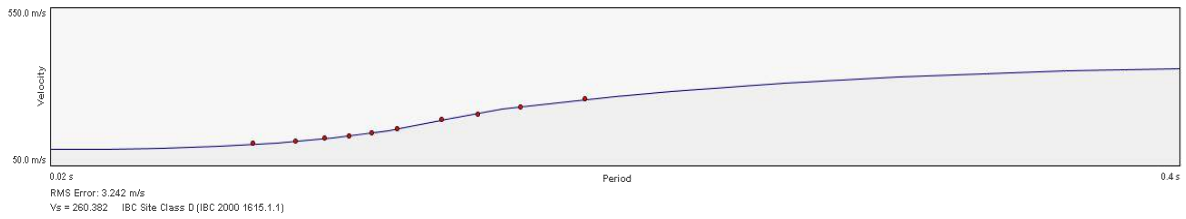


Figura 115. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-04

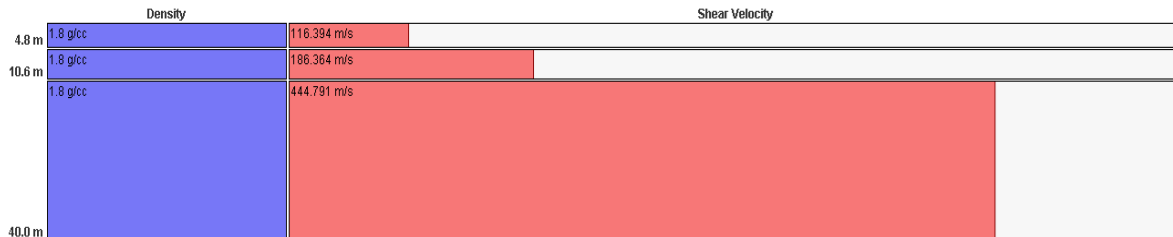
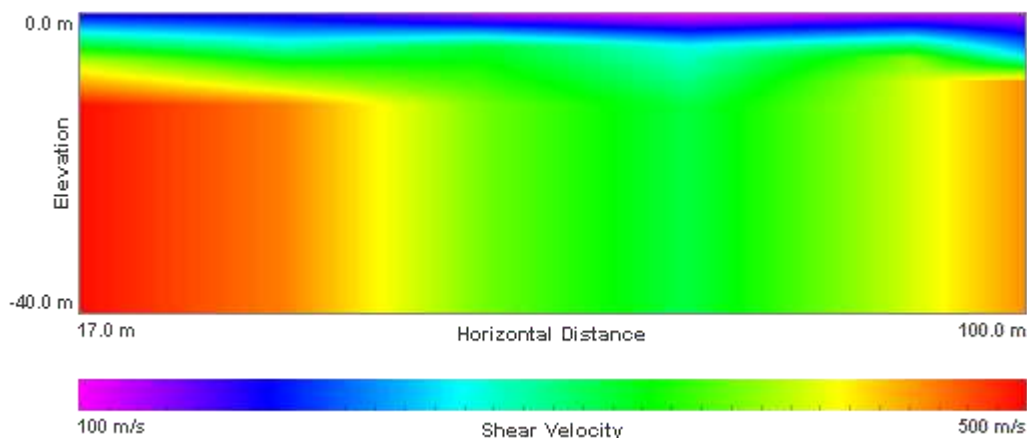


Figura 116. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-04



**Figura 117. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-EF-LG-04**

En la Figura 118 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 119 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 120 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 121 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-01 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 201.9 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.0 m hasta los 10.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 576 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 10.2 m hasta los 22.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 654 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca.
- ✓ Una última capa desde los 22.0 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 711 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

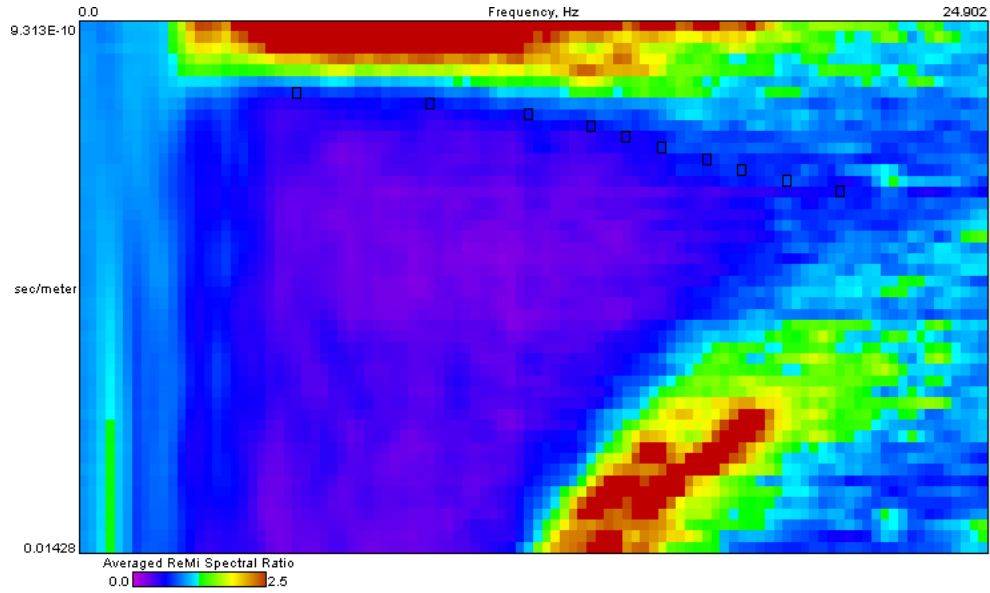


Figura 118. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-01

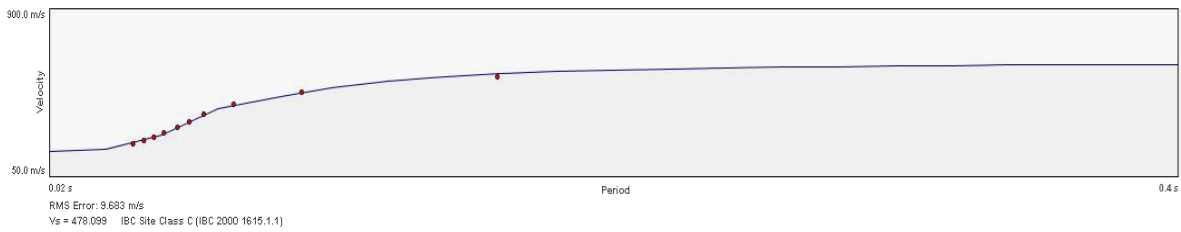
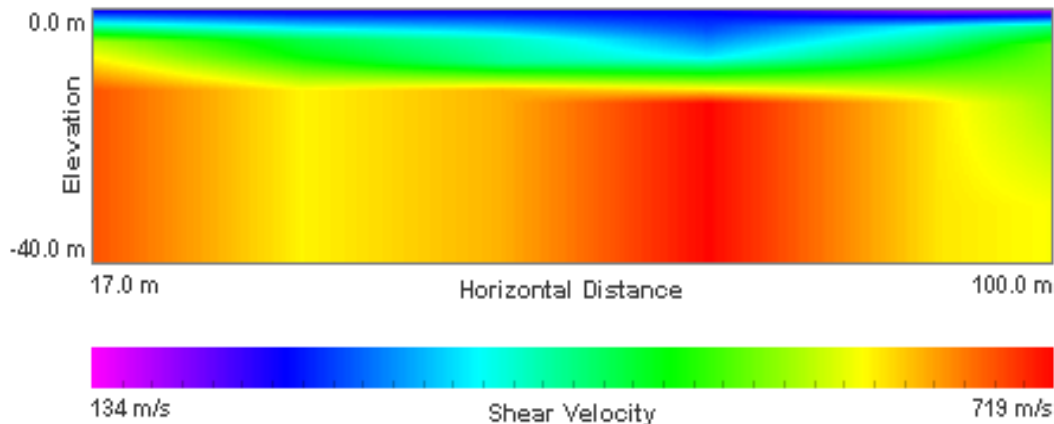


Figura 119. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-01

	Density	Shear Velocity
5.0 m	1.8 g/cc	201.941 m/s
10.2 m	1.8 g/cc	576.149 m/s
22.0 m	1.8 g/cc	654.29 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	710.725 m/s

Figura 120. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-01



**Figura 121. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-G-LG-01**

En la Figura 122 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 123 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 124 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 125 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-02 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 110 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 7.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 468 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 7.0 m hasta los 30.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 479 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 30.2 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 602 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

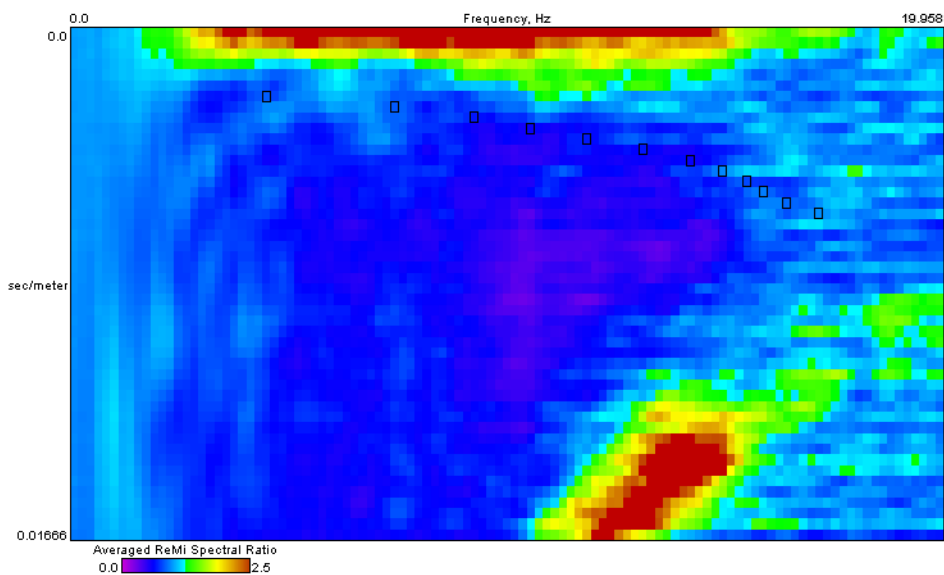


Figura 122. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-02

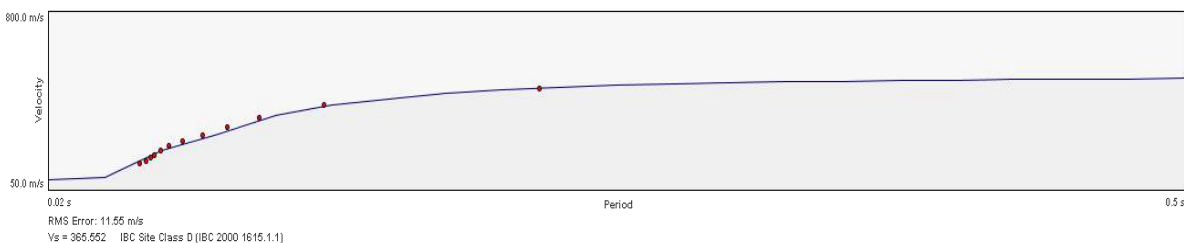
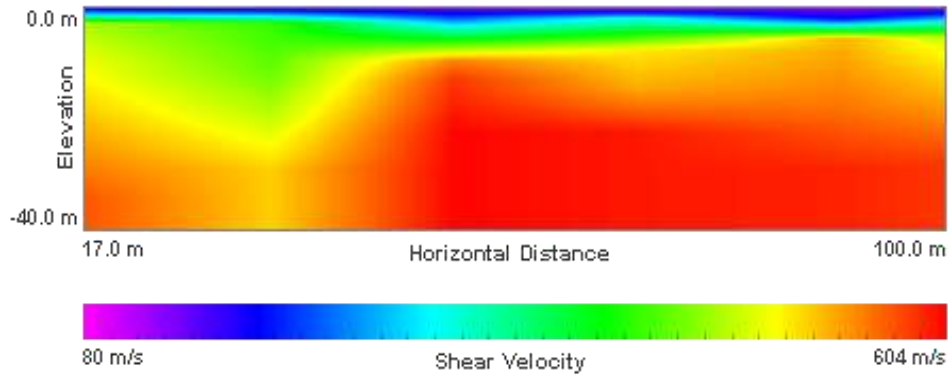


Figura 123. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-02

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	100.755 m/s
7.0 m	1.8 g/cc	468.284 m/s
30.2 m	1.8 g/cc	479.009 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	601.583 m/s

Figura 124. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-02



**Figura 125. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-G-LG-02**

En la Figura 126 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-03. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 127 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 128 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 129 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-03 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 125 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 8.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 258 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 8.8 m hasta los 24.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 482 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 24.8 m hasta los 31.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 548 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 31.0 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 738 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa o roca blanda.

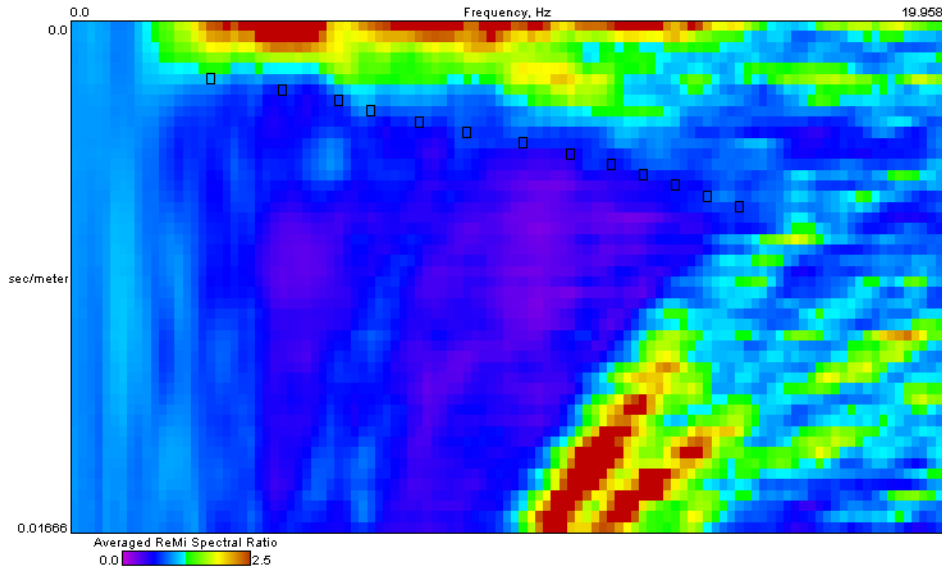


Figura 126. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-03

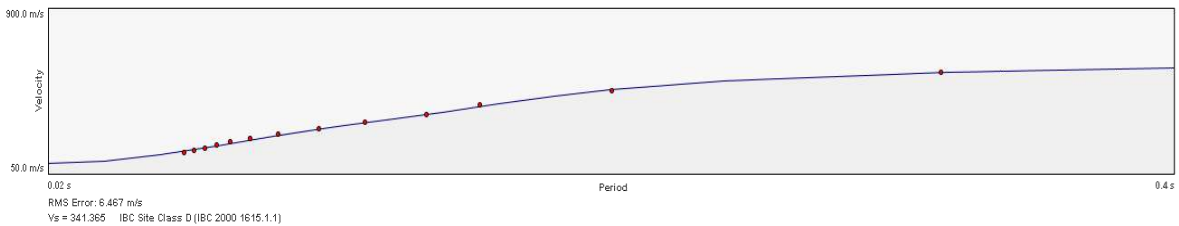
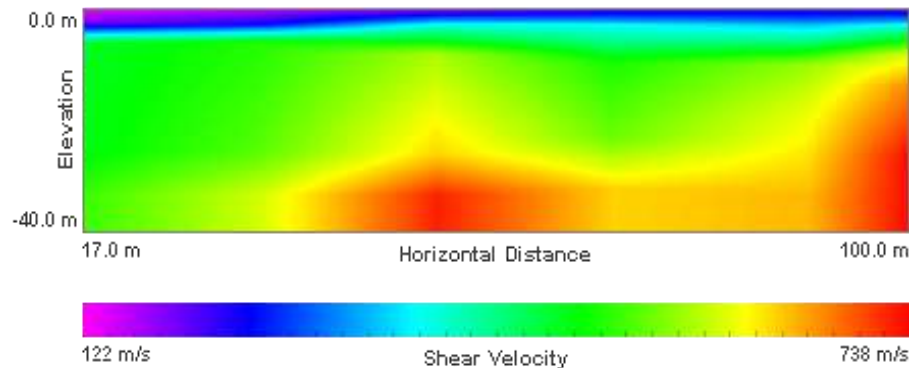


Figura 127. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-03

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	174.668 m/s
8.8 m	1.8 g/cc	257.508 m/s
24.8 m	1.8 g/cc	492.38 m/s
31.0 m	1.8 g/cc	548.366 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	737.64 m/s

Figura 128. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-03



**Figura 129. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-G-LG-03**

En la Figura 130 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica P-G-LG-04. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 131 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 132 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 133 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-G-LG-04 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 2.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 163 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 2.8 m hasta los 7.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 333 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 7.2 m hasta los 12.4 m con velocidad de propagación de Ondas S de 669 m/s, la cual corresponde a suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una capa más profunda desde 12.4 m hasta los 31.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 713 m/s, la cual corresponde a suelo muy denso a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 31.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 713 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.

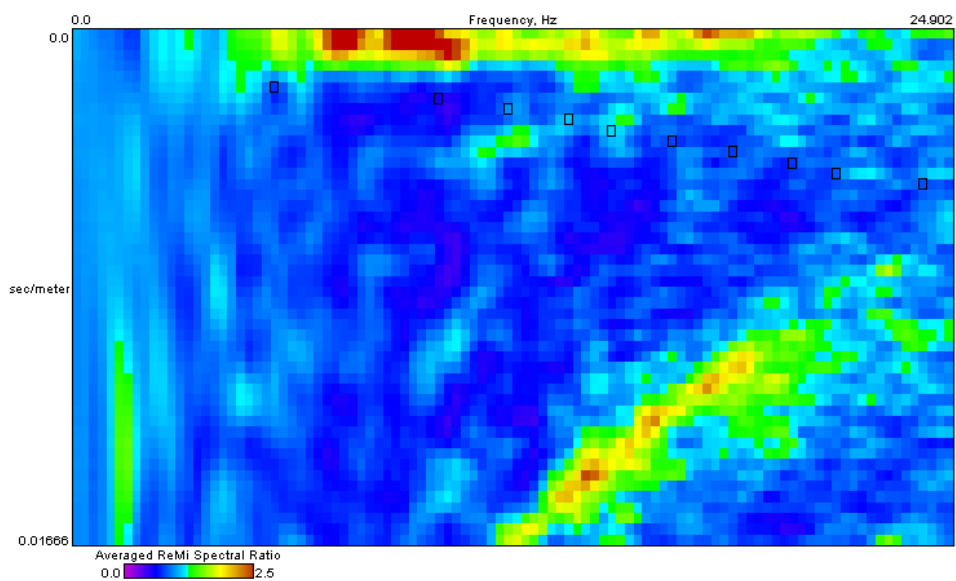


Figura 130. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-G-LG-04

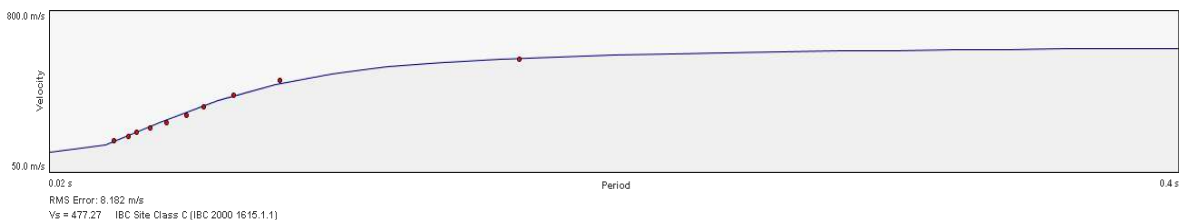
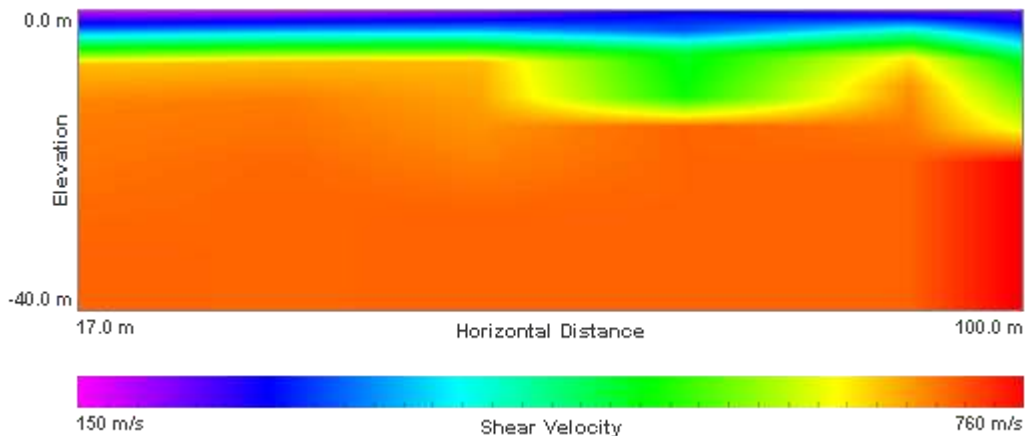


Figura 131. Dispersión y ajuste para la Línea P-G-LG-04

	Density	Shear Velocity
2.8 m	1.8 g/cc	162.615 m/s
7.2 m	1.8 g/cc	332.686 m/s
12.4 m	1.8 g/cc	668.999 m/s
31.6 m	1.8 g/cc	705.005 m/s
40.0 m	1.8 g/cc	712.666 m/s

Figura 132. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-G-LG-04



**Figura 133. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-G-LG-04**

En la Figura 134 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-EFG-LG-10. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 135 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 136 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 124 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.2 m hasta los 9.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 181 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa intermedia desde los 9.2 m hasta los 12.2 m con velocidad de propagación de Ondas S de 284 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una capa más profunda desde 12.2 m hasta los 16.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 512 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 16.8 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 586 m/s, la cual puede definirse como suelo muy denso a roca blanda.

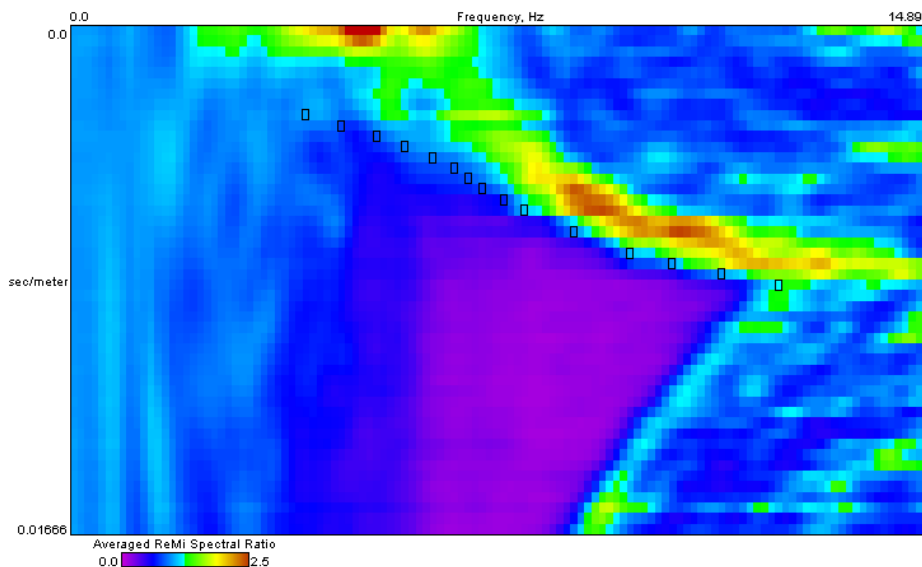


Figura 134. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EFG-LG-10

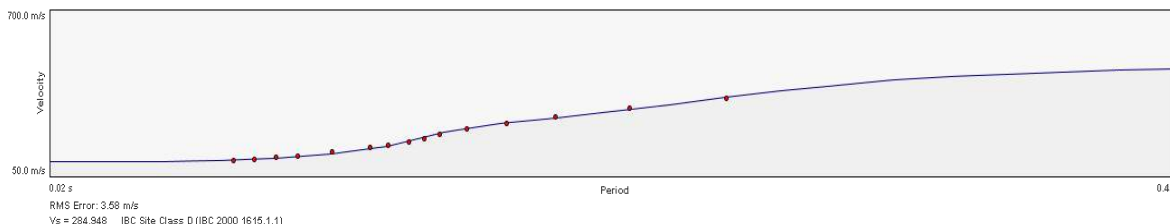


Figura 135. Dispersión y ajuste para la Línea U-EFG-LG-10

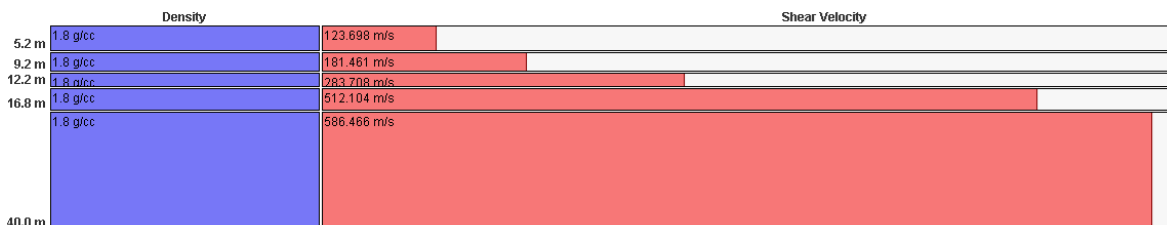


Figura 136. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EFG-LG-10

En la Figura 137 se presenta el gráfico de fase-frecuencia (p-f) obtenido de los ensayos, así como los puntos de dispersión seleccionados en el modelo para la Línea Geofísica U-TN-LG-14. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 138 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 139 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 105 m de longitud. En la Figura 140 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-TN-LG-14 en una imagen suavizada. En general, los resultados obtenidos ayudan a determinar la siguiente estratigrafía típica:

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 4.8 m con velocidad de propagación de Ondas S de 217 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia rígida.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.8 m hasta los 12.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 517 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una capa intermedia desde los 12.0 m hasta los 23.6 m con velocidad de propagación de Ondas S de 650 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia muy densa a roca blanda.
- ✓ Una última capa desde los 23.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 886 m/s, la cual puede definirse como roca.

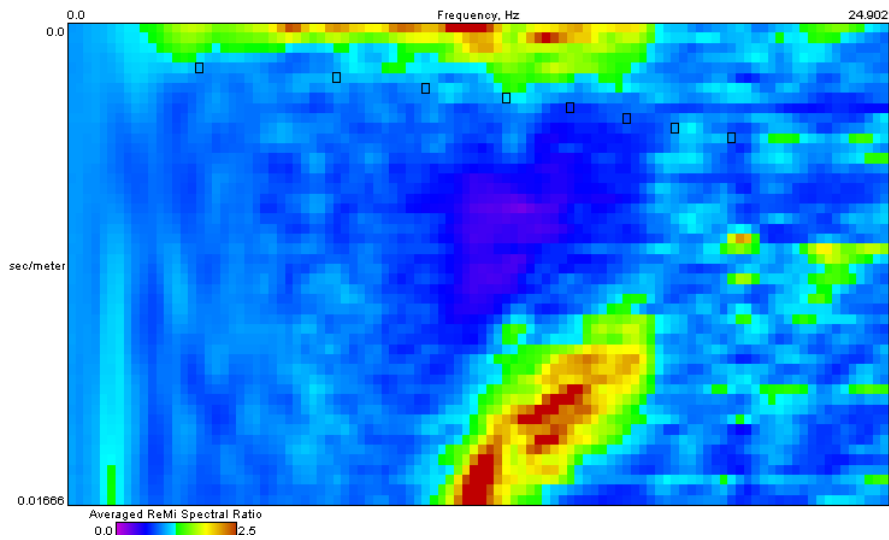


Figura 137. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-14

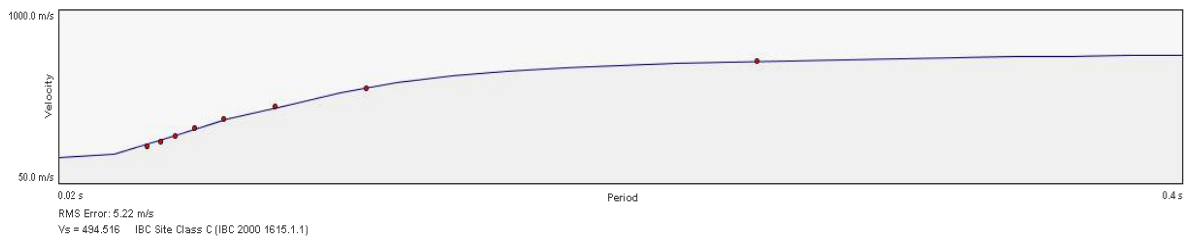


Figura 138. Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-14

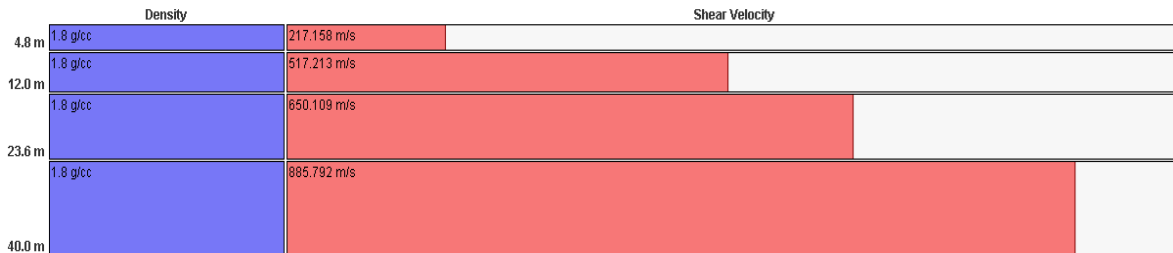


Figura 139. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14

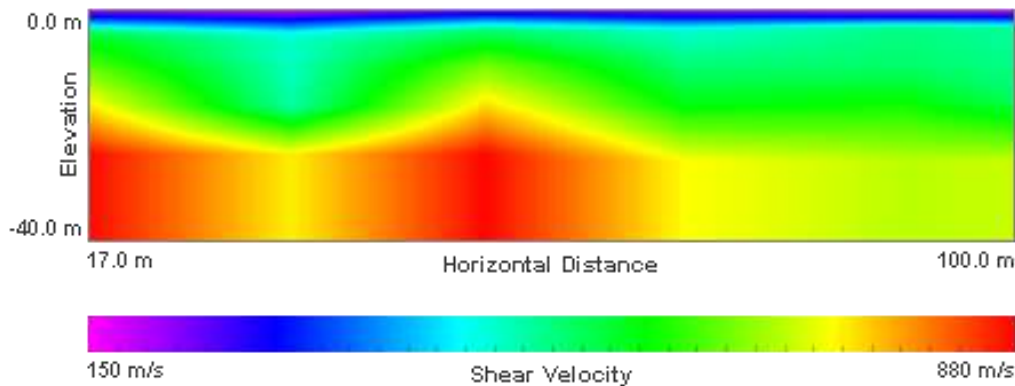




Figura 140. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14

10.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

El programa de ensayos de laboratorio se realizó con el objetivo de determinar propiedades índice del suelo fundamentales para determinar las condiciones de estado de los materiales clasificándolos mediante el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para propósitos ingenieriles, y para realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos.

Durante la etapa de exploración en campo (superficial y profunda), se recuperaron muestras alteradas e inalteradas a diferentes profundidades. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son: humedad natural (ASTM D2216), límites de consistencia (ASTM D4318), granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 (ASTM D422), y gravedad específica (ASTM D854). Sobre las muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo según la norma ASTM D3080 el cual está únicamente estandarizado para condiciones consolidadas drenadas (CD), debido a la imposibilidad de garantizar que la muestra falla en condiciones no drenadas.

La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales, no obstante esta se concentró principalmente en la búsqueda y conformación de una base de datos de ensayos de resistencia al cortante.

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
---	--	---

Para los ensayos de clasificación no se consideró relevante procesar una base de datos, dado el volumen de información que en este aspecto se tiene, pero principalmente por el hecho de que dicha información no juega un papel importante en la modelación de la estabilidad y la obtención de la amenaza, estableciéndose que la información generada propiamente para este estudio en cuanto a la obtención de las propiedades índice, se considera información adecuada y suficiente.

En cuanto a los ensayos de resistencia al cortante, sólo fueron tenidos en cuenta aquellos ensayos que se encontraron cerca de la zona de estudio y que correspondieran a ensayos que modelaran condiciones drenadas y presentaran parámetros de resistencia al corte en condiciones efectivas. Estos ensayos fueron entonces cortes directos modalidad consolidado drenado (CD) y ensayos de compresión triaxial modalidad consolidado drenado (CD) y consolidado no drenado (CU), en estos últimos siempre y cuando se tuviera lectura de presiones de poros. Ensayos de resistencia al corte en modalidad consolidado no drenado (CU) o no consolidado no drenado (UU) que presentan parámetros de resistencia al corte en condiciones totales no fueron tenidos en cuenta para la compilación y procesamiento de la base de datos.

En el Anexo 03 de este informe se presentan los resultados completos de los ensayos de clasificación y resistencia al corte ejecutados para este proyecto y adicionalmente se presenta la base de datos conformada para la caracterización mecánica de los materiales.

10.2.1 Ensayos de Clasificación

La Tabla 29 presenta el resumen de los resultados de los ensayos de clasificación y en la Tabla 30 se presentan las variables de estado de algunas de las muestras tomadas durante la campaña exploratoria.

Tabla 29. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-EF-PR-31	M1	1.00 - 1.45	Lleno antrópico	46.50	52.00	3.00	1.83	0.00	17.00	83.00	MH
P-EF-PR-39	M1	0.00 - 1.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros	50.20	55.00	3.00	1.60	9.00	18.00	73.00	MH
U-EFG-PP-01	M2-M3	0.50-1.40	Cenizas volcánicas removilizadas	128.20				0.00	42.00	58.00	ML
P-EF-PR-27	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.80	72.00	25.00	1.21	8.00	20.00	72.00	MH
P-EF-PR-27	M3	2.00 - 2.30	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	19.70	52.00	8.00	4.04	46.00	27.00	27.00	GM
P-EF-PR-29	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	32.10	50.00	10.00	1.79	10.00	16.00	74.00	ML



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

Tabla 29. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-EF-PR-30	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.60	53.00	8.00	1.43	0.00	17.00	83.00	MH
P-EF-PR-30	M4	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	55.20	58.00	8.00	0.35	0.00	21.00	79.00	MH
P-EF-PR-30	M7	6.00 - 6.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.20	46.00	9.00	0.42	18.00	26.00	56.00	ML
P-EF-PR-30	M10	9.00 - 9.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	76.30	70.00	18.00	-0.35	0.00	11.00	89.00	MH
P-EF-PR-30	M13	12.00 - 12.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	40.80	55.00	18.00	0.79	4.00	31.00	65.00	MH
P-EF-PR-31	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	49.60	44.00	1.00	-5.60	0.00	19.00	81.00	ML
P-EF-PR-31	M4	4.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	83.10	63.00	20.00	-1.01	0.00	15.00	85.00	MH
P-EF-PR-31	M5-M6	5.00 - 6.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	52.90	52.00	5.00	-0.18	6.00	16.00	78.00	MH
P-EF-PR-39	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	18.10	37.00	5.00	3.78	9.00	35.00	56.00	ML
P-EF-PR-39	M4	3.00 - 3.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	24.40	57.00	20.00	1.63	56.00	27.00	17.00	GM
P-EF-PR-39	M5	3.45 - 4.30	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	32.10	56.00	14.00	1.71	42.00	33.00	25.00	GM
P-EF-PP-42	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	42.30	64.00	12.00	1.81	3.00	19.00	78.00	MH
P-EF-PP-42	M2	2.00 - 2.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	30.20	52.00	4.00	5.45	1.00	13.00	86.00	MH
P-EF-PP-42	M3-M4	3.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.20	55.00	10.00	1.38	0.00	8.00	92.00	MH
P-EF-PP-42	M5-M6	5.00 - 6.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	35.50	49.00	11.00	1.23	9.00	14.00	77.00	ML
U-EFG-PP-01	M9-M10	3.60-4.50	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	57.50	64.00	8.00	0.81	3.00	11.00	86.00	MH
U-EFG-PP-01	M19-M20	8.10-9.00	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	78.90	62.00	9.00	-1.88	0.00	14.00	86.00	MH
U-EFG-PP-01	M27-M28	11.70-12.50	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	35.20	44.00	5.00	1.76	48.00	24.00	28.00	GM
P-EF-PR-28	M1	2.00 - 2.45	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	45.10	56.00	10.00	1.09	0.00	17.00	83.00	MH



 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	--	---

Tabla 29. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-EF-PR-28	M2	3.00 - 3.45	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	39.80	58.00	12.00	1.52	6.00	20.00	74.00	MH

Tabla 30. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	Gs	e	S%
U-EFG-PP-01	M2-M3	0.50-1.40	Cenizas volcánicas removilizadas	128.20	2.54	3.31	98.45
P-EF-PR-27	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.80	3.01	1.45	86.94
P-EF-PR-29	M1	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	32.10	3.03	1.30	74.98
P-EF-PR-30	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.60	3.34	1.71	81.16
P-EF-PR-30	M10	9.00 - 9.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	76.30	2.99	2.34	97.61
P-EF-PR-31	M4	4.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	83.10	3.18	2.68	98.45
P-EF-PR-39	M2	1.00 - 1.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	18.10	2.91	0.97	54.17
P-EF-PP-42	M3-M4	3.00 - 4.45	Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	41.20	3.26	1.64	81.91
P-EF-PR-28	M1	2.00 - 2.45	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	45.10	3.05	1.75	78.73
P-EF-PR-28	M2	3.00 - 3.45	Transición (IIA) de Dunitas de Medellín	39.80	3.02	1.62	74.10

Para el análisis de esta información se trazaron las gráficas que se presentan en la Figura 141 hasta la Figura 144. El conjunto de gráficas mencionado muestra la clasificación de la fracción fina de los materiales en la Carta de Plasticidad de Casagrande, la variación en profundidad de la distribución granulométrica de las muestras, así como de la consistencia, relación de vacíos y saturación.

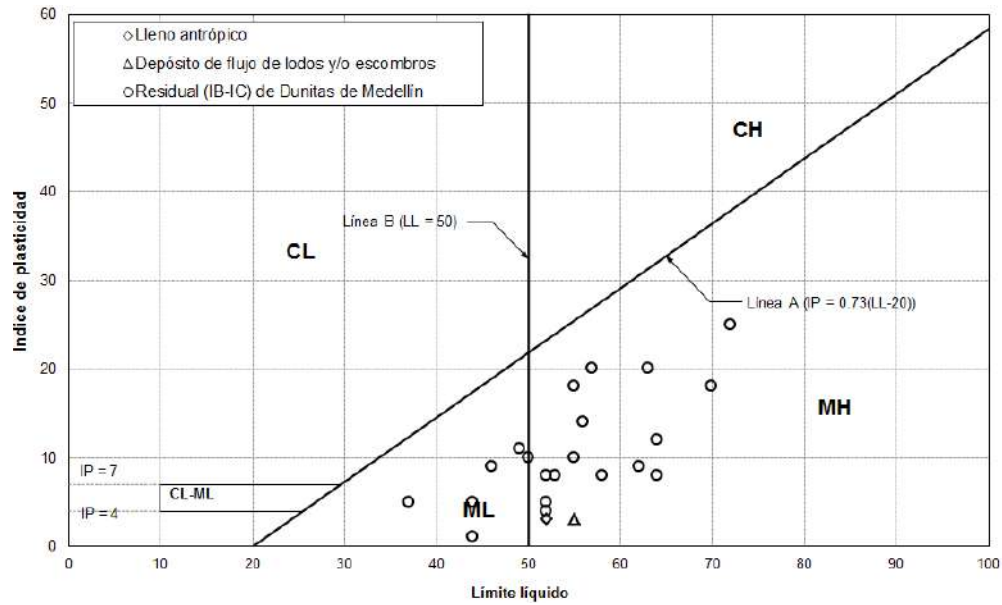


Figura 141. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande

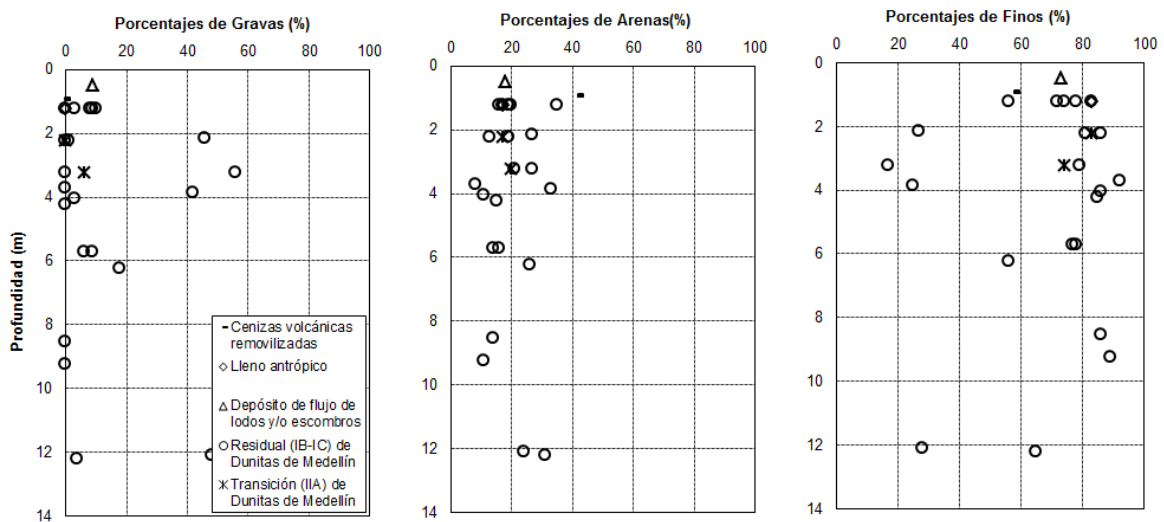


Figura 142. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad

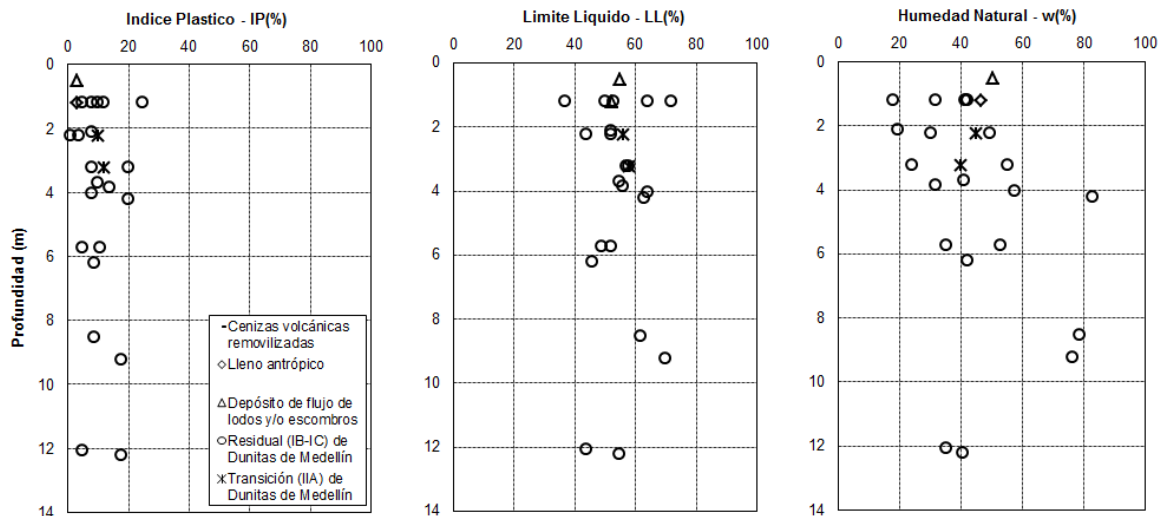


Figura 143. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.

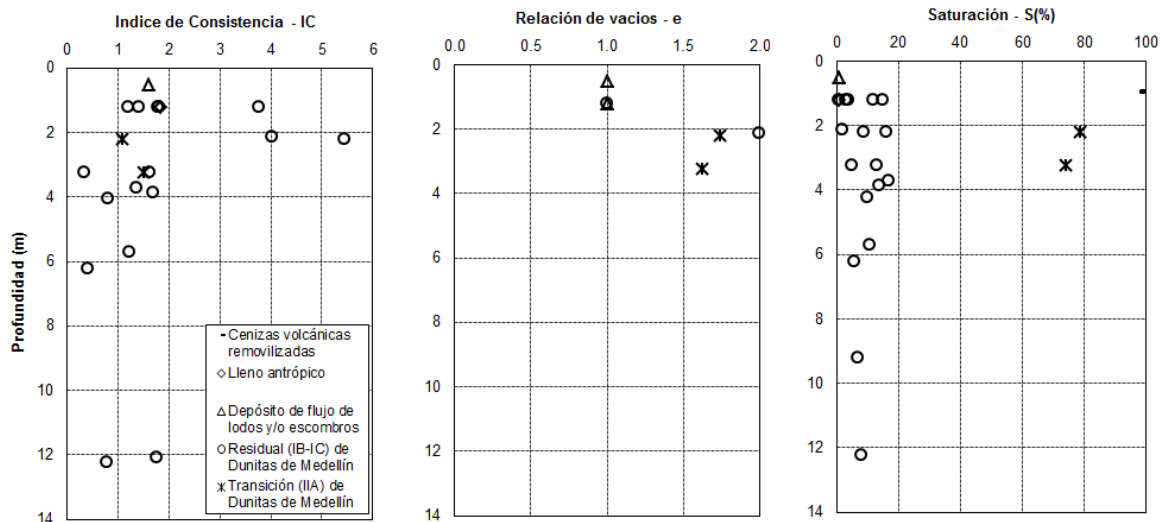




Figura 144. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad

En los suelos residuales (IB-IC) de Dunitas predominó la fracción fina, con un contenido hasta de 92%, 8% a 35% de arenas y 0% a 56% de gravas. La fracción fina de las muestras presentó límites líquidos superiores a 50 (derecha de la Línea B), límites de plasticidad entre 41 y 53, e índices de plasticidad variando de 1 a 25 (debajo de la Línea A). De acuerdo con lo anterior, las muestras analizadas clasificaron principalmente como limos de alta plasticidad (MH), con base en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos, no obstante también se encontraron limos de baja plasticidad (ML). La gravedad específica de los materiales varía de 2.9 a 3.3, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados. Por su parte, se tienen relaciones de vacíos entre 0.97 y 2.7,

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

mostrando que se tienen materiales porosos, con saturaciones no menores a 80% y consistencias de blandas a duras.

En la matriz de la Transición IIA de Dunitas predominó la fracción fina con un 80% de finos, 19% de arenas y 7% de gravas. El límite líquido tiene un valor promedio de 57% (a la derecha de la línea B), el límite plástico es en promedio de 45%, obteniendo un índice plasticidad promedio de 11% (debajo de la Línea A), de manera que el material clasifica como un limo de alta plasticidad (MH), de acuerdo con el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos. Por otra parte, se obtuvo un valor de gravedad específica de 3.03, una relación de vacíos de 1.68, una saturación del 80% y una consistencia dura.

10.2.2 Ensayos de resistencia al corte

Para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo, se realizaron ensayos de corte directo según la Norma ASTM D3080. Este ensayo únicamente está estandarizado para condiciones consolidadas drenadas (CD), debido a la imposibilidad de garantizar que la muestra falla en condiciones no drenadas.

Al realizar la falla a la velocidad máxima recomendada por la norma, se garantiza la condición drenada del ensayo, por lo tanto los esfuerzos transmitidos al espécimen del ensayo son efectivos, por lo que la resistencia del suelo queda en términos de esfuerzos efectivos, siendo c' y ϕ' la cohesión y el ángulo de fricción interna los parámetros efectivos de la envolvente de resistencia al corte de Mohr-Coulomb.

Para este proyecto se realizaron tantos ensayos de resistencia al corte directo como fuera posible, con el propósito de obtener suficientes resultados para el análisis de variabilidad de los parámetros de resistencia al corte. Para el Polígono El Faro ejecutaron diez ensayos de corte directo modalidad CD.

- ✓ Una Muestra EF1-M1, a 0.20 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra P-EF-PR-30-M3, a 2.2 m de profundidad en residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra P-EF-PR-39-M3, a 2.2 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra UEFG1-M1, a 1.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra UEFG2-M1, a 2.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra UEFG3-M1, a 3.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra UEFG4-M1, tomada en superficie en un estrato de lleno antrópico.
- ✓ Una Muestra UEFG5-M1, tomada en superficie en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.

- ✓ Una Muestra UEFG6-M1, tomada en superficie en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.
- ✓ Una Muestra UEFG7-M1, a 3.0 m de profundidad en un estrato residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín.

En la Tabla 31 se presenta un resumen de las propiedades y parámetros de resistencia al corte de las muestras ensayadas y de la Figura 145 a la Figura 154 se presentan las envolventes de los resultados de cada uno de los ensayos de corte directo realizados para las muestras tomadas en la UMI El Faro - Golondrinas.

Tabla 31. Resultados ensayos de corte directo modalidad CD

Sondeo - Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	γ_h [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	Gs	e	S [%]	c' [kPa]	ϕ' [°]
EF1-M1	0.20	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	34.2	15.4	11.5	3.20	1.73	63.00	31.00	25.00
P-EF-PR-30-M3	2.20	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	44.4	15.8	10.9	3.00	1.58	78.00	30.00	23.00
P-EF-PR-39-M3	2.20	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	34.0	16.6	12.3	2.91	1.30	78.00	30.00	21.00
UEFG1-M1	1.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	52.4	14.9	9.7	2.98	2.00	78.00	27.00	21.00
UEFG2-M1	2.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	53.4	15.1	9.8	3.05	2.04	80.00	10.00	25.00
UEFG3-M1	3.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	45.6	16.9	11.6	3.16	1.68	86.00	30.00	23.00
UEFG4-M1	0.00	Lleno antrópico	55.5	14.8	9.5	2.88	1.97	80.00	35.00	25.00
UEFG5-M1	0.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	41.9	17.0	11.9	3.22	1.64	82.00	33.00	25.00
UEFG6-M1	0.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	34.2	17.0	12.7	3.16	1.44	75.00	45.00	23.00
UEFG7-M1	3.00	Residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.	39.2	14.7	10.6	2.92	1.71	67.00	46.00	27.00

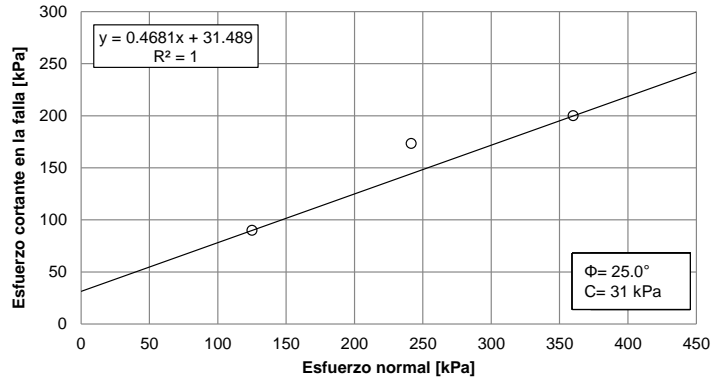


Figura 145. Resultados corte directo Muestra EF1-M1 a 0.20 m de profundidad

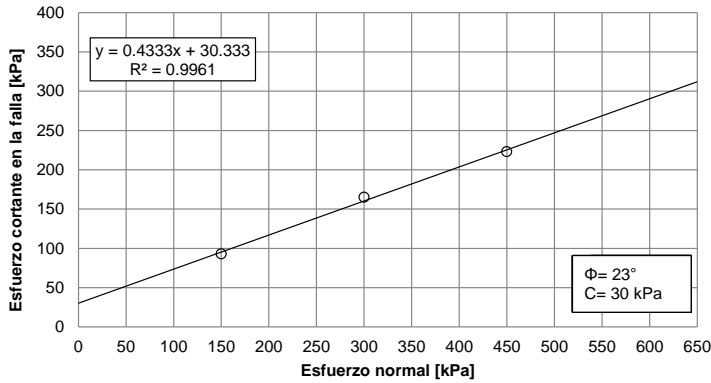


Figura 146. Resultados corte directo Muestra P-EF-PR-30-M3 a 2.20 m de profundidad

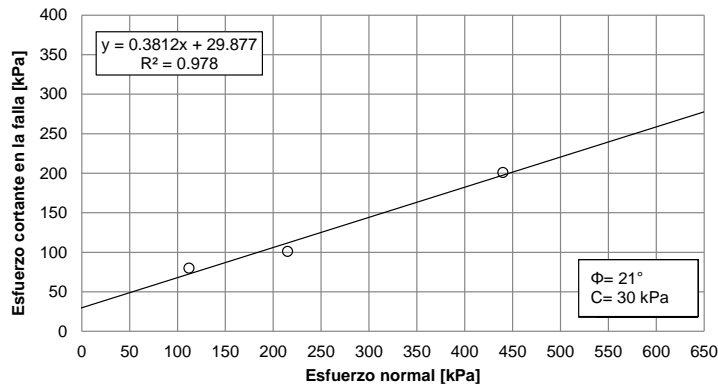


Figura 147. Resultados corte directo Muestra P-EF-PR-39-M3 a 2.20 m de profundidad

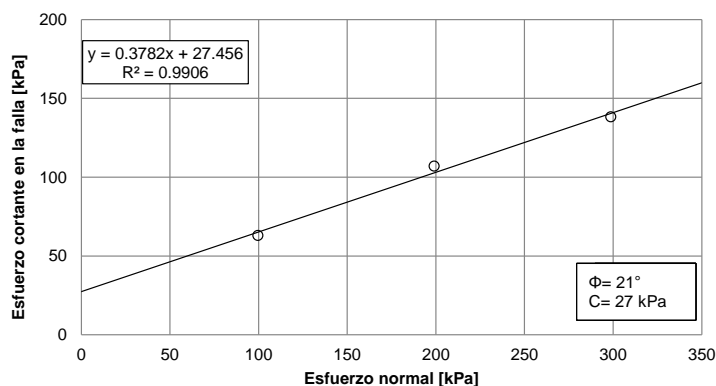


Figura 148. Resultados corte directo Muestra UEFG1-M1 a 1.0 m de profundidad

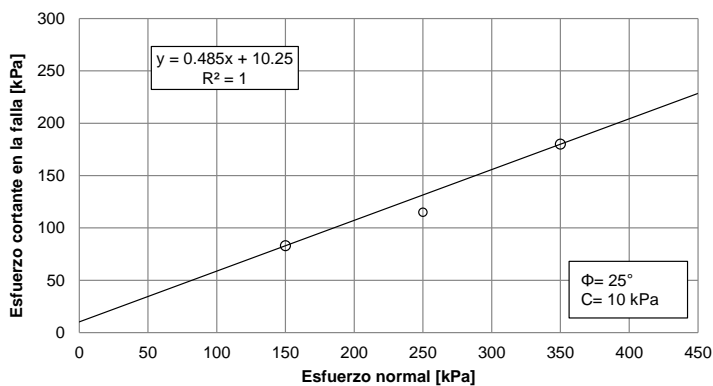


Figura 149. Resultados corte directo Muestra UEFG2-M1 a 2.0 m de profundidad

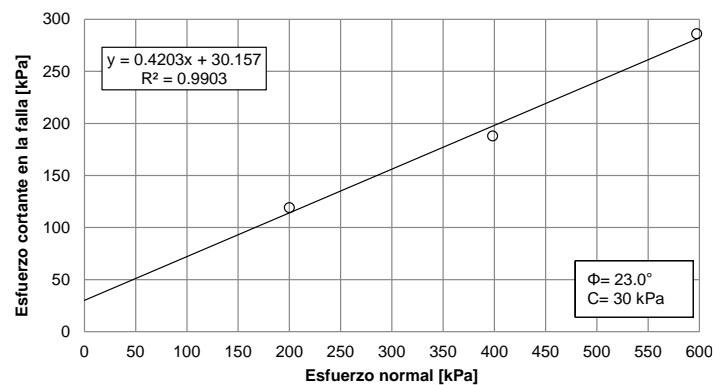


Figura 150. Resultados corte directo Muestra UEFG3-M1 a 3.0 m de profundidad

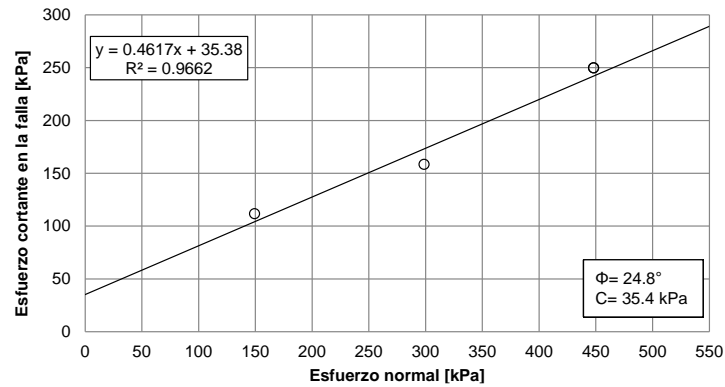


Figura 151. Resultados corte directo Muestra UEFG4-M1 a 0 m de profundidad

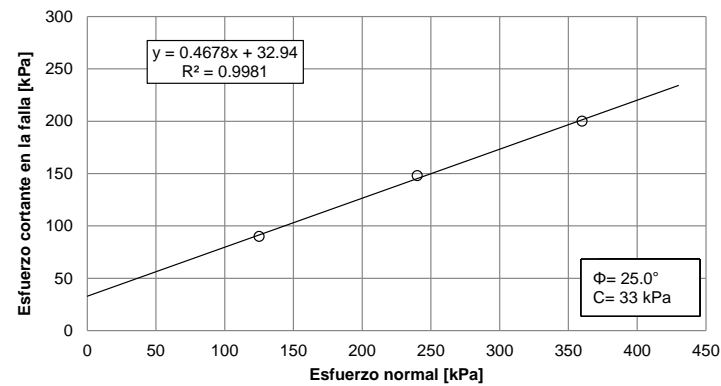


Figura 152. Resultados corte directo Muestra UEFG5-M1 a 0 m de profundidad

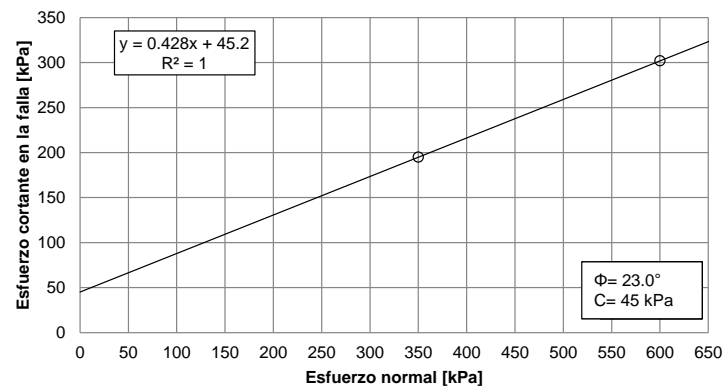


Figura 153. Resultados corte directo Muestra UEFG5-M1 a 0 m de profundidad

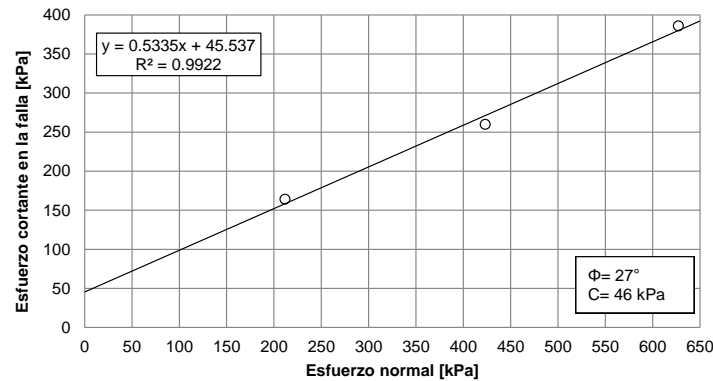


Figura 154. Resultados corte directo Muestra UEFG7-M1 a 3.0 m de profundidad

10.3 PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES



10.3.1 Aspectos generales

Como parte del proceso de caracterización de los materiales, fueron recopilados todos los ensayos de resistencia al corte realizados en la zona de interés. Los ensayos de resistencia al corte considerados de los diferentes estudios, fueron aquellos ejecutados bajo modalidad drenada o en su defecto no drenada con medición de presiones de poros, de tal forma que se pudieran obtener los parámetros de resistencia al corte en condiciones efectivas. Los estudios de los consultores que cumplieron las características anteriores fueron los de las empresas DEACIVIL (2014), GEOCING S.A.S (2012) y además los ensayos de resistencia al corte ejecutados por INTEINSA en proyectos cercanos a la zona de estudio y ensayos propios del proyecto.

Los resultados de los ensayos de laboratorio recopilados y compilados fueron inicialmente clasificados al interior de la base de datos de acuerdo con la formación geológica asociada. La base de datos presenta adicionalmente información como localización, sitio al cual se le podría asociar para este proyecto, identificación y profundidad de la muestra y finalmente los parámetros de resistencia al corte en condiciones efectivas (cohesión efectiva, ángulo de fricción interna efectiva y peso unitario húmedo).

Todos los ensayos recopilados sugieren, como era de esperarse, una variabilidad considerable de las propiedades geotécnicas de los materiales. Por esto, se realizó un análisis estadístico de las propiedades de los materiales que conformando el perfil geotécnico típico, representan mayor amenaza para el proyecto. Estos análisis son necesarios para la aplicación de cualquier método probabilístico que permita encontrar la probabilidad de falla de una ladera, objetivo primordial de este estudio. Por tal razón, se requiere una gran cantidad de información en términos de parámetros de resistencia, por lo que se consideró conveniente unir todos aquellos ensayos de las diferentes UMI o polígonos que caracterizarán los diferentes estratos u horizontes del proyecto.

Se identificaron primero las variables que generan incertidumbre siendo estas la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo. Fue asumida una función de

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

distribución de probabilidad normal para cada uno de estos parámetros. Luego se determinaron los momentos estadísticos de bajo orden, es decir, la media y la desviación estándar. Adicionalmente, fue calculado la covarianza o coeficiente de variación (COV) de cada uno de los parámetros.

10.3.2 Lleno antrópico

Para la caracterización de los llenos antrópicos se utilizaron nueve datos en total, obtenidos a partir de los ensayos de corte directo modalidad CD recopilados de DEACIVIL (2014), además de los realizados para el Proyecto Barrios Sostenibles. El análisis estadístico se presenta en la Figura 155.

Se observa que estos materiales son predominantemente friccionantes, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 13.05 kPa con una desviación estándar asociada de ± 7.87 kPa. El coeficiente de variación es de 60%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 35 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 26.90° y una desviación estándar de $\pm 4.32^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 16%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 15° hasta 40° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del lleno antrópico presentó una media de 16.92 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.28 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 8%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 14 kN/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

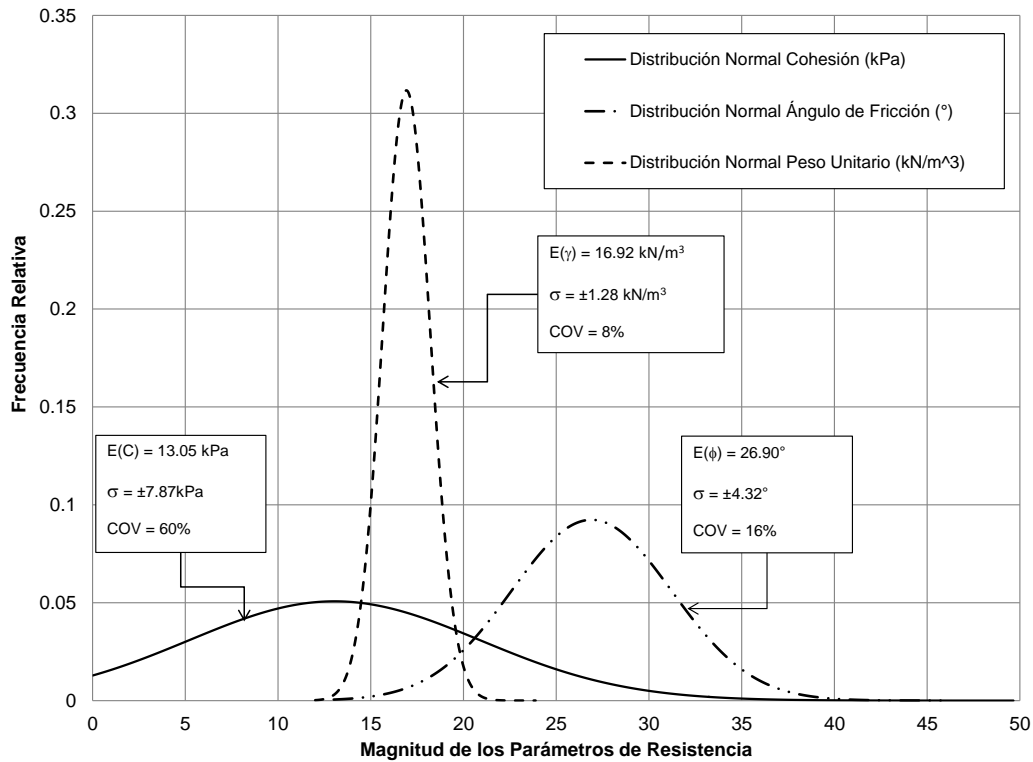


Figura 155. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico

10.3.3 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito tipo flujo de lodos y/o escombros se realizó considerando los ensayos de resistencia al corte realizados sobre todas las muestras ensayadas en el Proyecto Barrios Sostenibles y las cuales coincidieran con el mismo origen geológico. El análisis estadístico se presenta en la Figura 156.

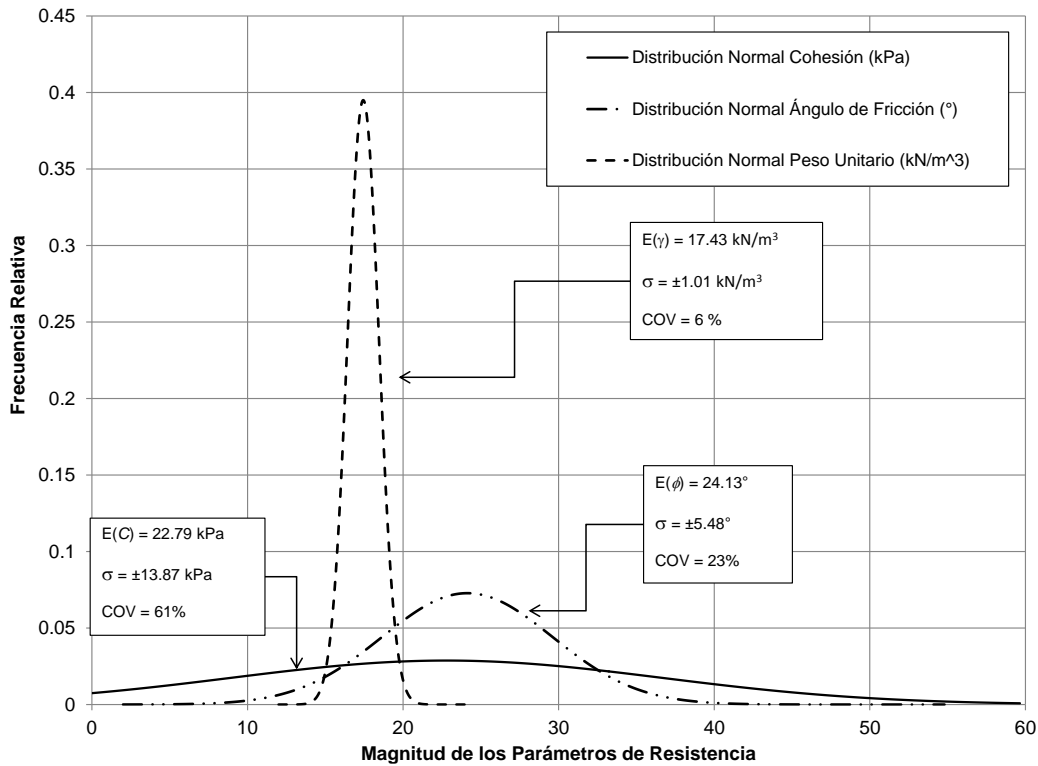


Figura 156. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los depósitos de flujo de lodos y escombros

Se observa que estos materiales presentan tanto cohesión como fricción, pudiéndose establecer las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 22.79 kPa con una desviación estándar asociada de ± 13.87 kPa. El coeficiente de variación es de 61%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 24.13° y una desviación estándar de $\pm 5.48^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 23%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 10° hasta 37° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de 17.43 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.01 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 6%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 15 kN/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

10.3.4 Depósitos de deslizamiento

Para determinar los parámetros de resistencia al corte de este material, se optó en primera instancia por tener en cuenta los resultados de los ensayos de resistencia al corte de los estudios realizados por El proyecto, determinando para estos ensayos los parámetros de resistencia residual. Se obtuvo así un valor de ángulo de fricción interna promedio de 24° y una cohesión promedio de 16 kPa.

A partir de esta información se hicieron análisis de tipo regresivo. Para el análisis se consideró una sección donde aflora el depósito de deslizamiento. Se establece que presenta condiciones de estabilidad bajas representadas por factores de seguridad no mayores que 1.2. Los resultados de los análisis de estabilidad efectuados se presentan en la Figura 157.

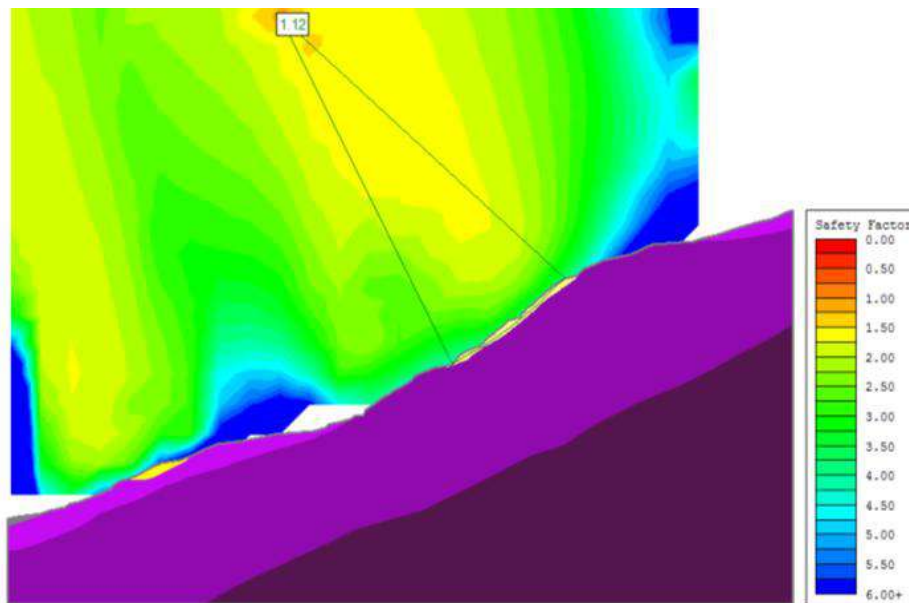




Figura 157. Análisis de estabilidad de talud estable

Para estos análisis de estabilidad se utilizó el programa SLIDE V6 (Rocscience, 2006). El programa resuelve problemas bidimensionales por el método del equilibrio límite, utilizando entre otros métodos los propuestos por Bishop, Spencer y Morgenstern-Price, para superficies de falla circulares y no circulares. Permite considerar variaciones de los niveles piezométricos (construyendo las redes de flujo por el método de los elementos finitos), distribuciones de presión de poros y variación de los coeficientes de la relación de presión de poros. Adicionalmente, permite estimar la probabilidad de falla al asignar valores promedio y desviación estándar a cada una de las propiedades de los materiales asociados a la superficie de deslizamiento. Se empleó la teoría de Spencer asumiendo una función de fuerza interdovelas de constante a media altura, debido a que esta satisface todas las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

Se puede observar que efectivamente, el factor de seguridad para la superficie de falla más crítica tiene un valor cercano a 1.1. Por lo tanto se concluye que los parámetros obtenidos representan las condiciones de campo.

10.3.5 Depósitos coluviales

Son depósitos generados por procesos erosivos superficiales, que están conformados por materiales finos que han sufrido poco desplazamiento y el movimiento es grano a grano. Debido a la disposición puntual fuera del alcance de los sondeos programados, no se obtuvieron muestras inalteradas que permitieran la ejecución de ensayos de resistencia al corte sobre el mismo.

No obstante, con el fin de llevarse a cabo su caracterización, los estudios de DEACIVIL (2014) realizaron 16 ensayos de resistencia al corte en condiciones drenadas sobre depósitos de flujos de lodos, los cuales geológicamente pueden presentar diferencias considerando su origen y agente de transporte, pero geotécnicamente pueden presentar similitudes respecto a su comportamiento dada su composición. El análisis de los parámetros de resistencia al corte se presenta en la Figura 158.

Se observa que estos materiales presentan tanto cohesión como fricción, pudiéndose establecer las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 19.5 kPa con una desviación estándar asociada de ± 9.93 kPa. El coeficiente de variación es de 50%, que corresponde a la variabilidad más alta comparada con la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Dicha variabilidad puede ser observada en la forma de la función de distribución, la cual presenta una amplitud importante cubriendo magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 23.3° y una desviación estándar de $\pm 2.75^\circ$, además de presentar un coeficiente de variación de 11.81%. A comparación del parámetro cohesión, la forma de la función de distribución se presenta menos amplia y cubriendo valores que van desde 10° hasta 40° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del depósito de vertiente presentó una media de 17.4 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.24 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 7.08%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 15 kN/m^3 hasta 22 kN/m^3 .

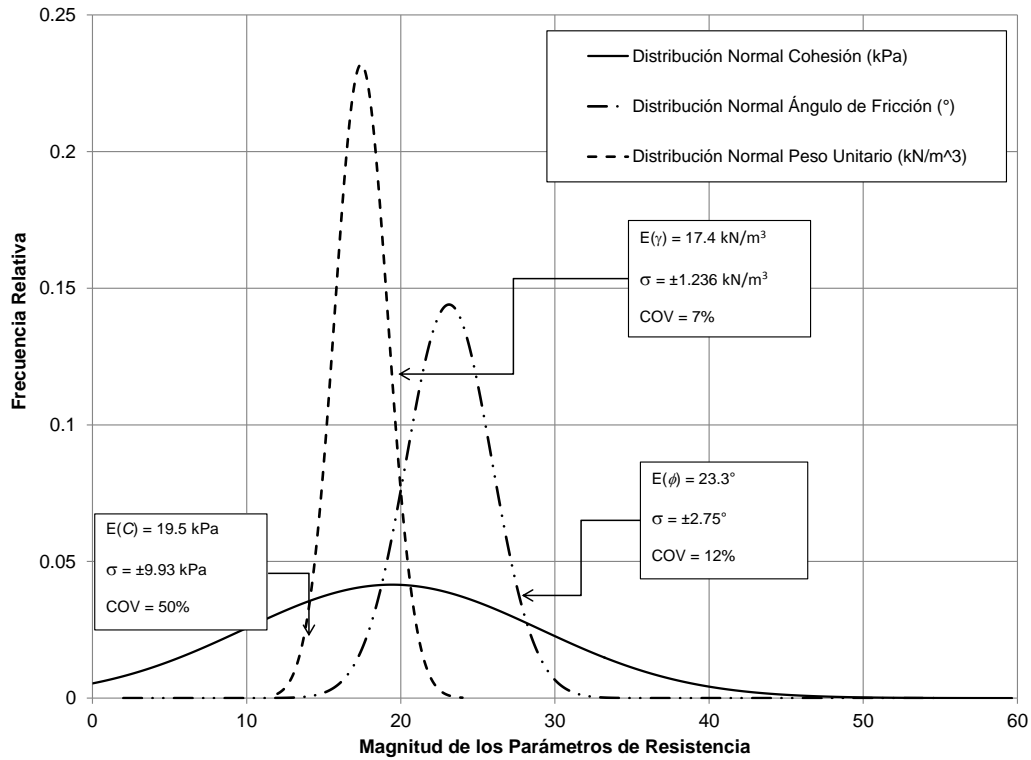


Figura 158. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos

10.3.6 Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)

Los resultados del análisis estadístico de estos materiales se presenta en la en la Figura 159. El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el horizonte de suelos residuales o derivados de las dunitas (Horizontes IB y IC) se realizó considerando los ensayos de resistencia al corte realizados sobre todas las muestras ensayadas en el Proyecto Barrios Sostenibles y las cuales coincidieran con el mismo origen geológico. Adicionalmente, fueron considerados nueve ensayos de corte directo modalidad CD realizados por DEACIVIL (2014).

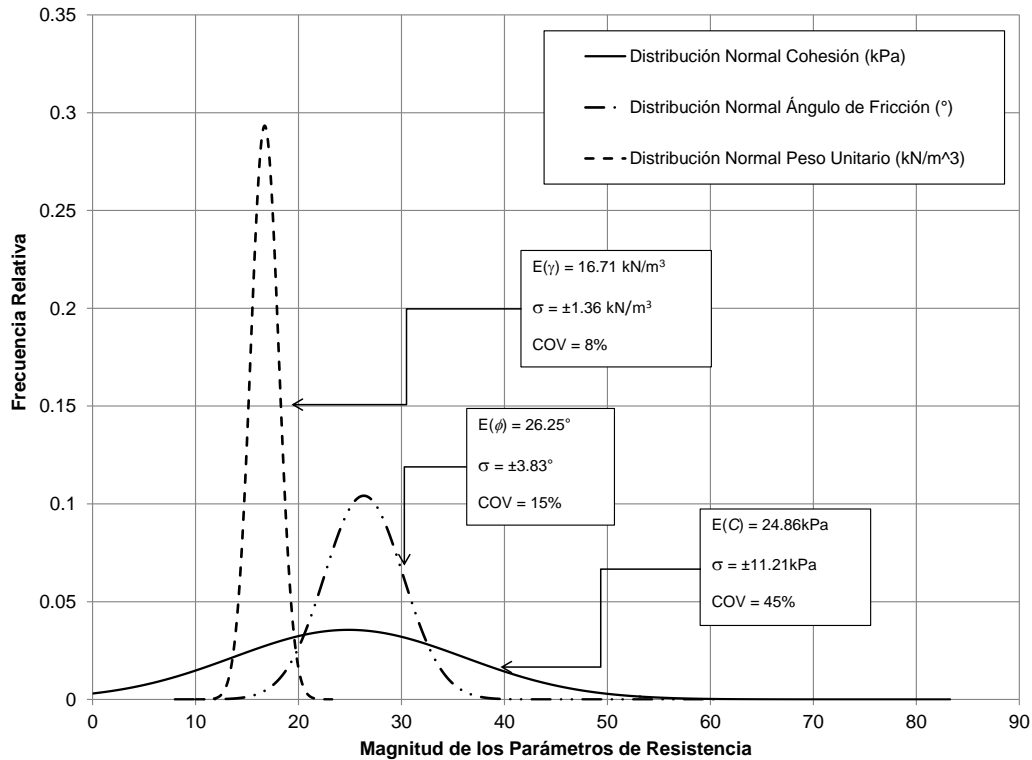


Figura 159. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas

En el caso del residual de la Dunita de Medellín, los parámetros se tornan más cohesivos, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 24.86 kPa con una desviación estándar asociada a $\pm 11.21 \text{ kPa}$. Para la cohesión se obtuvo un coeficiente de variación de 45%, que corresponde a la variabilidad más alta respecto a la obtenida para el ángulo de fricción interna y el peso unitario. La forma de la función de distribución para este material abarca magnitudes que van desde 0 kPa hasta 50 kPa.
- ✓ El ángulo de fricción interna presenta una media de 26.25° y una desviación estándar de $\pm 3.83^{\circ}$. El ángulo de fricción interna presenta un coeficiente de variación de 14.15%. La forma de la función de distribución abarca magnitudes del ángulo de fricción que van desde 18° hasta 36° aproximadamente.
- ✓ Finalmente, el peso unitario del residual de la Dunita de Medellín presentó una media de 16.7 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.43 \text{ kN/m}^3$. El coeficiente de variación para este parámetro es de 9%. Debido a su poca variabilidad, la forma de la función de distribución es bastante cerrada cubriendo valores que van desde 14 kN/m^3 hasta 21 kN/m^3 .

10.3.7 Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte



En la Tabla 32 se presenta el resumen de los parámetros obtenidos para los diferentes materiales.

Tabla 32. Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales

Material	c' (kPa)			φ' (°)			γ (kN/m ³)		
	μ	δ	COV (%)	μ	δ	COV (%)	μ	δ	COV (%)
Lleno antrópico	13.05	7.87	60	26.90	4.32	16	16.92	1.28	8
Depósito de flujo de lodos y/o escombros	22.79	13.87	61	24.13	3.65	23	17.43	1.01	6
Depósito coluvial	19.5	9.93	50	23.30	2.75	12	17.44	1.24	7
Residual (IB-IC) de Dunitas de Medellín	24.86	11.21	45	26.25	3.81	15	16.71	1.36	8
Batolito Antioqueño	19.00	6.83	36	29.00	5.34	18	17.50	1.23	7

Cuando se comparan las variables estadísticas de los materiales estudiados con variables estadísticas presentes en la literatura, es posible identificar varias situaciones que caracterizan los materiales y permiten hacer una especie de validación de los parámetros.

- ✓ Inicialmente el parámetro cohesión, tomando como referencia el coeficiente de variación de los materiales oscila entre el 36% y el 61%. El-Ramly (2006) reporta coeficientes de variación de la cohesión efectiva, para materiales en general igual al 22%. Lee et al. (1983) establecen que para condiciones no drenadas en arenas podrían estar del orden de 25% a 30%.
- ✓ En el caso del parámetro de ángulo de fricción interna, el coeficiente de variación para todos los materiales oscila entre 12% y 23%. En la literatura se reportan coeficientes de variación de este parámetro entre 2% y 13% (Duncan, 2000).
- ✓ Finalmente, en el caso del peso unitario húmedo, el coeficiente de variación no superó el 10%, presentándose reportes en la literatura de este parámetro entre 3% y 7% (Duncan, 2000).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

11. ASPECTOS HIDROLÓGICOS

11.1 GENERALIDADES

La zona completa de estudio, que comprende la parte alta de las Comunas 3 y 8 de la ciudad de Medellín, se caracteriza por ser cruzada por un sistema de drenaje natural que corre de manera general de oriente a occidente y que alimenta la Quebrada Santa Elena y finalmente al Río Medellín. La dinámica natural de este sistema de drenaje podría constituir una fuente de amenaza para la mancha urbana que se ha desarrollado y expandido en las últimas décadas, dado que gran parte de ese desarrollo se ha realizado con asentamientos bastante cercanos a los cauces y a las corrientes naturales. Esta dinámica de las corrientes naturales es función de las características del clima, en particular del régimen de lluvias de la zona, y de las características geológicas y geomorfológicas del terreno.

En este capítulo se describen y caracterizan desde el punto de vista hidrológico las cuencas de drenaje natural que tienen influencia sobre el Polígono El Faro, así como el régimen de precipitaciones que caracteriza a la UMI. En particular, se describe la metodología y se presentan los principales resultados de la estimación de los caudales máximos en cada uno de los cauces.

11.2 REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA

Como parte importante del desarrollo del presente estudio de riesgo, se realizó un proceso de recopilación de información secundaria que es fundamental para los análisis hidrológicos e hidráulicos, así como para la evaluación de la amenaza y el riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.

En primer lugar, se realizó la recopilación de la información cartográfica, que sirvió como punto de partida para la delimitación y caracterización geomorfológica de las cuencas. Dentro de esta información se recopiló lo siguiente:

- ✓ Cartografía del Proyecto SIGAME (1998) del Valle de Aburrá en escala 1:5000 y 1:2000 para zonas rurales y para zonas urbanas respectivamente.
- ✓ Ortofoto de la zona del proyecto suministrada por la Empresa de Desarrollo Urbano (Realizada en 2010).
- ✓ Fotografías satelitales tomadas del software Google Earth.
- ✓ Topografía de detalle levantada a lo largo de los ejes de los cauces en Abril de 2014 por INGEOCILCÓN LTDA.

Las zonas cubiertas por cada una de las cartografías empleadas en el estudio se pueden observar en el Mapa 23. Se tiene que para 16 de las 18 cuencas estudiadas en el Proyecto Barrios Sostenibles la cartografía con escala 1:2000 cubre totalmente el área comprendida por cada una. En el caso de las cuencas de las quebradas La Chorrera o El Molino y la Quebrada La Castro se debió complementar la información cartográfica de escala 1:2000 con la correspondiente a una escala 1:5000.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
--	--	--

Adicionalmente, se recopiló información de las estaciones hidrometeorológicas de las estaciones pluviométricas y pluviográficas que se encuentran ubicadas en la zona de estudio o cerca de ella. En particular, se recopiló la información que se lista a continuación:

- ✓ Curvas Intensidad Duración Frecuencia de las estaciones operadas por Empresas Públicas de Medellín, publicadas la revista hidrometeorológica de EPM del 2005.
- ✓ Registros de precipitación de estaciones del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA).

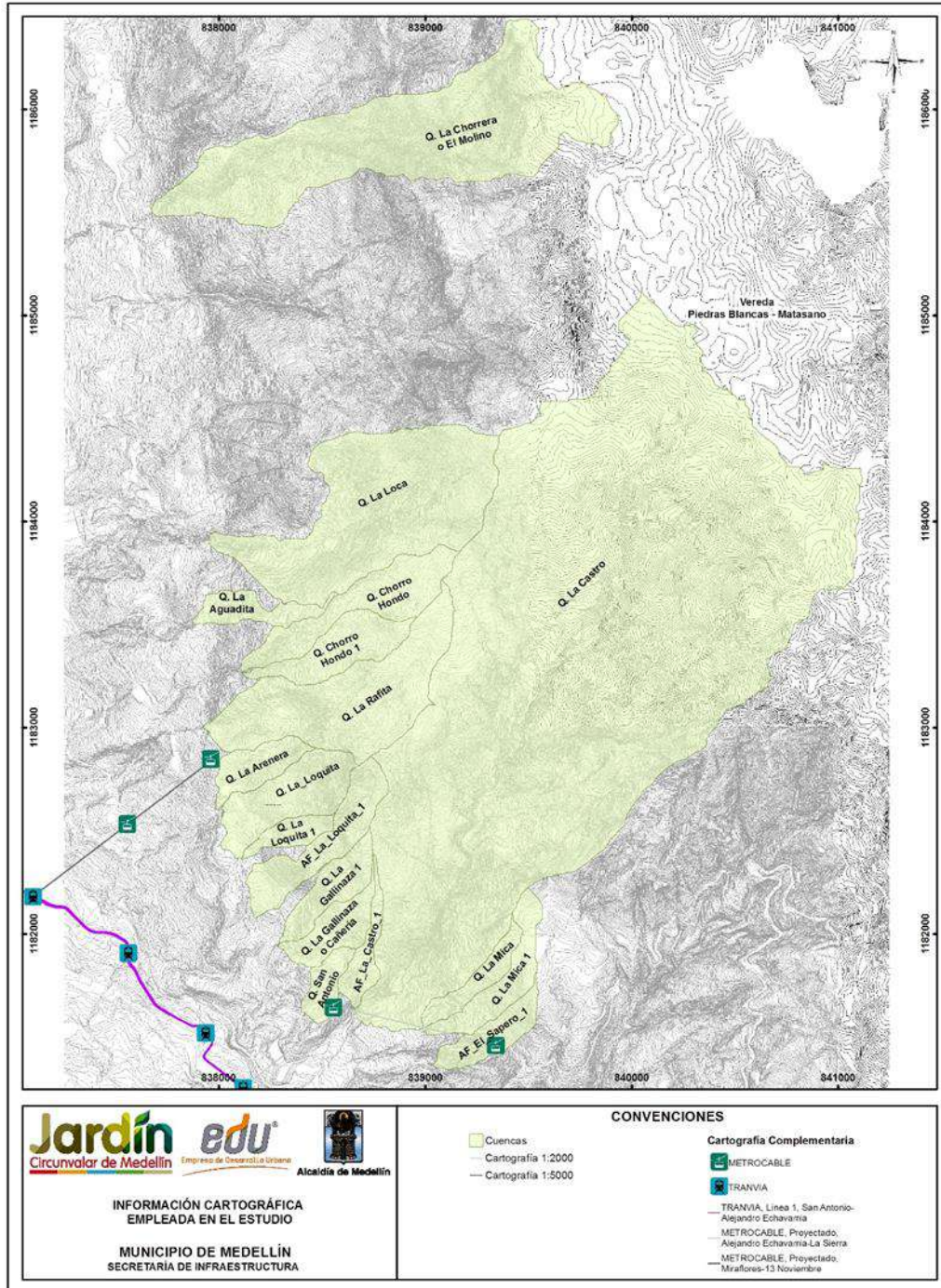
Como insumo importante para este estudio, la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) suministró estudios previos relacionados con hidrología e hidráulica en algunos de los cauces que son objeto del presente estudio. Los estudios suministrados por la EDU corresponden a los siguientes:

- ✓ Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano, realizado por INGEOCILCÓN (2014).
- ✓ Revisión de la información de los estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto cinturón verde metropolitano tramo 1 sector c cerro Pan de Azúcar camino de la vida, realizado por CONCAVAS (2013).

En los primeros estudios, realizados por INGEOCILCÓN, se encuentran los análisis hidrológicos e hidráulicos para 17 quebradas del llamado Cinturón Verde. De estas 17 corrientes, hay cuatro quebradas que intervienen en los polígonos objetos de este estudio, las cuales son Chorro Hondo, La Loca, El Molino y La Aguadita.

En los estudios realizados por CONCAVAS, se encuentran los estudios hidrológicos e hidráulicos para seis quebradas del llamado Cinturón Verde. De estas seis corrientes hay cuatro quebradas que intervienen en los polígonos objeto de este estudio, siendo estas La Loquita, La Arenera, San Antonio y La Rafita.

De esta manera, de cada una de las corrientes mencionadas se tiene un estudio hidráulico e hidrológico realizado por INGEOCILCÓN o por CONCAVAS, en puntos que a pesar de no coincidir precisamente con los puntos de interés para este proyecto, se tuvieron en cuenta como punto de referencia. Del componente hidrológico se destaca la regionalización hecha por INGEOCILCÓN a partir de los resultados obtenidos para las 17 cuencas mediante el método racional para la estimación de caudales máximos.



Mapa 23. Información cartográfica empleada en el estudio
(EFRInformacionCartograficaEmpleadaenelEstudio_Medellin_C)

11.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

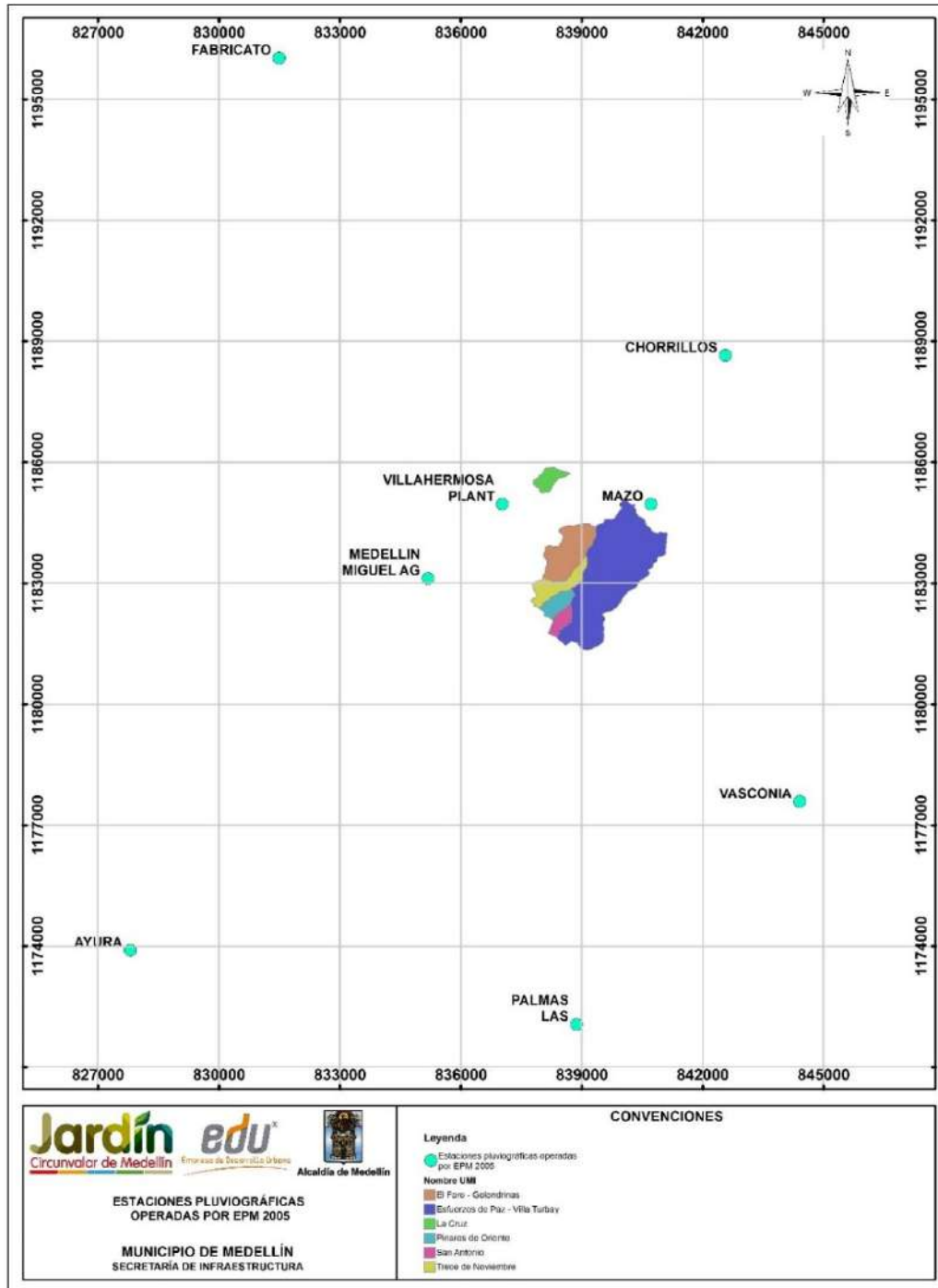
En la zona de estudio, o cerca de ella, se encuentran instaladas diversas estaciones pluviométricas que han registrado las precipitaciones durante años. Las entidades que operan actualmente estas estaciones son Empresas Públicas de Medellín (EPM), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA). Entre todas estas estaciones, las de mayor interés para éste proyecto corresponden a aquellas que son operadas por EPM dado que cuentan actualmente con un periodo de registro que supera los 40 años, y porque presentan mayor certidumbre en registros de corto tiempo por contar con equipos tipo pluviógrafo. Por su parte, las estaciones del IDEAM son de tipo pluviómetro y únicamente registran lluvias en 24 horas. Las estaciones del SIATA presentan información pluviográfica, pero adolecen de un amplio periodo de registros, ya que fueron instaladas en una fecha igual o posterior al año 2010. Sin embargo, la información confiable y disponible del SIATA permitió comparar y validar algunas intensidades de diseño en la zona publicadas por EPM para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Así las cosas, para la obtención de las intensidades de la lluvia de diseño fueron consideradas las estaciones operadas por EPM y cuya información de curvas Intensidad-Frecuencia-Duración fue publicada en la Revista Hidrometeorológica de dicha entidad en el año 2005. En la Tabla 33 se presenta un listado de las estaciones consideradas y en el Mapa 24 se muestra la ubicación de estas con respecto a la zona de estudio.

A partir de la información de las estaciones pluviográficas de EPM, se realizó un análisis de la distribución anual de la lluvia y del registro histórico anual de precipitaciones. La precipitación media multianual de la zona de estudio se estimó mediante una interpolación con el método del inverso cuadrado de la distancia a partir de las precipitaciones medias multianuales de las estaciones (Tabla 33). En el Anexo 04 se muestra el mapa con la variación de la precipitación media multianual.

Tabla 33. Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual

CÓDIGO	ESTACIÓN	CATEGORÍA	FECHA INICIO	REGISTRO HASTA	ENTIDAD	ELEVACIÓN	MUNICIPIO	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)
27010930	AYURA	PG	15/02/1972	2011	EEPP	1770	ENVIGADO	1835.5
27010350	CHORRILLOS	PG	15/03/1948	2011	EEPP	2353	MEDELLIN	1748.3
27010370	FABRICATO	PG	15/09/1949	2013	EEPP	2422	BELLO	1754.6
27010340	MAZO	PG	15/03/1948	2011	EEPP	2455	MEDELLIN	1801.3
27010470	MEDELLIN MIGUEL AG	PG	15/06/1954	2013	EEPP	1549	MEDELLIN	1409.9
23080230	PALMAS LAS	PG	15/04/1948	2011	EEPP	2495	RETIRO	2000.2
23080240	VASCONIA	PG	15/04/1948	2011	EEPP	2510	RIONEGRO	2190.6
27010450	VILLAHERMOSA PLANT	PG	15/07/1948	2011	EEPP	1690	MEDELLIN	1582.4



Mapa 24. Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005
(FEEstacionesPluviograficasOperadasEPM2005_Medellin_C)

11.3.1 Estación Planta Villa Hermosa

En la gráfica de la izquierda de la Figura 160 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la Estación Planta Villa Hermosa para el periodo que va entre 1948 y 2011. Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica de la derecha de la Figura 160 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la Estación Planta Villa Hermosa en el periodo que va entre 1948 y 2011. Puede observarse que la precipitación máxima histórica (2349 mm) se presentó en el año de 2011. Al revisar los registros del Índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el Fenómeno La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.

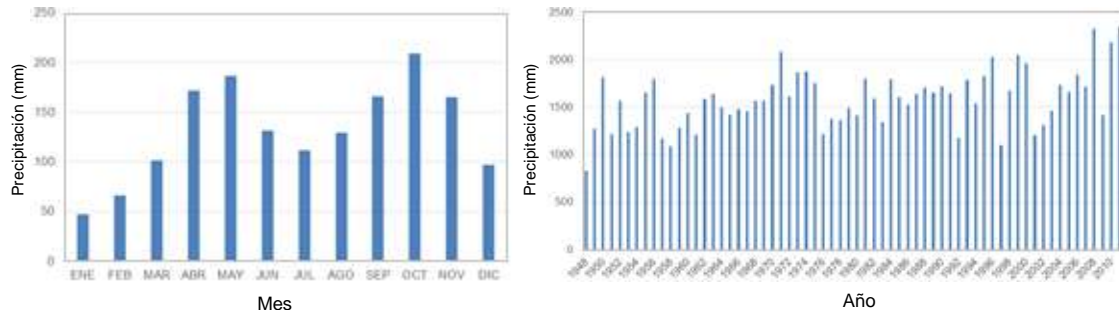


Figura 160. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa

11.3.2 Estación Mazo

En la gráfica a la izquierda de la Figura 161 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la Estación Mazo para el periodo comprendido entre 1948 y 2011.

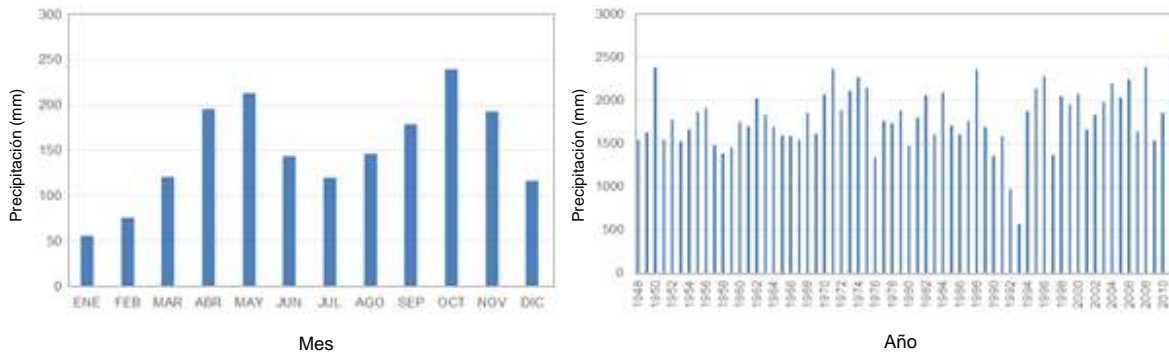


Figura 161. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo

Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica a la derecha de la Figura 161 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la estación Mazo en el periodo comprendido entre 1948 y 2011. En ella puede observarse que la precipitación máxima histórica (2509 mm) se presentó en el año de 2011. Al revisar los registros del Índice MEI de la NOAA, durante ese año se presentó el Fenómeno La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.

11.3.3 Estación Miguel de Aguinaga

En la gráfica a la derecha de la Figura 162 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Miguel de Aguinaga para el periodo comprendido entre 1954 y 2013.

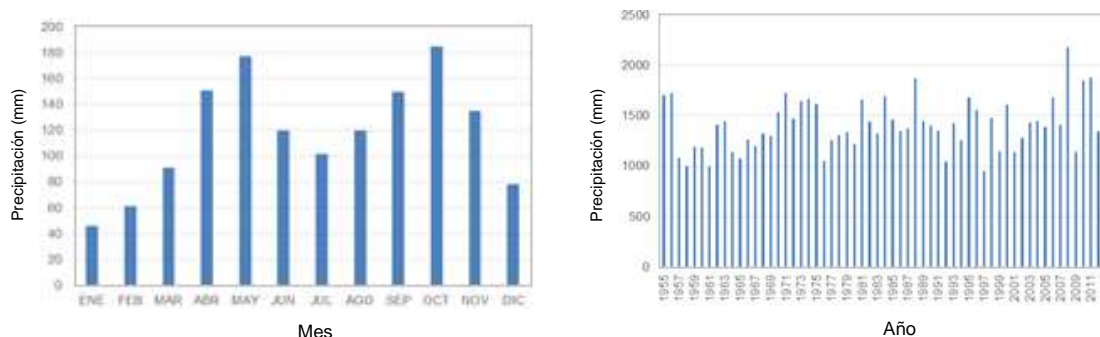


Figura 162. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga

Puede observarse que el régimen de precipitaciones es bimodal, con los meses de mayo y octubre como los más lluviosos y enero como el menos lluvioso. La distribución de lluvias presenta cuatro períodos, así: un período relativamente seco que va de diciembre a marzo, dos períodos de lluvias fuertes, el primero de abril a junio y el segundo de septiembre a noviembre, y un período de transición entre lluvias que va de junio a agosto, llamado veranillo.

En la gráfica a la derecha de la Figura 162 se muestra la variación interanual de la precipitación total anual para la Estación Miguel de Aguinaga en el periodo comprendido entre 1954 y 2013. En ella puede observarse que la precipitación máxima histórica (2180 mm) se presentó en el año de 2008. Al revisar los registros del Índice MEI de la NOAA, ver Figura 163 , durante ese año se presentó el Fenómeno de La Niña.

A partir del análisis de las estaciones citadas, puede concluirse que en la zona de estudio actúa un régimen de precipitaciones bimodal, con dos periodos de lluvias fuertes que van de abril a junio y de septiembre a noviembre.

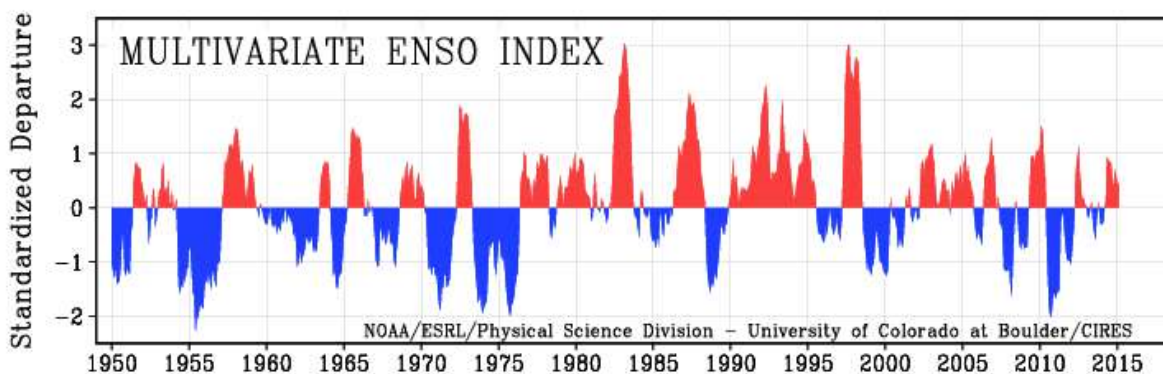


Figura 163. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)

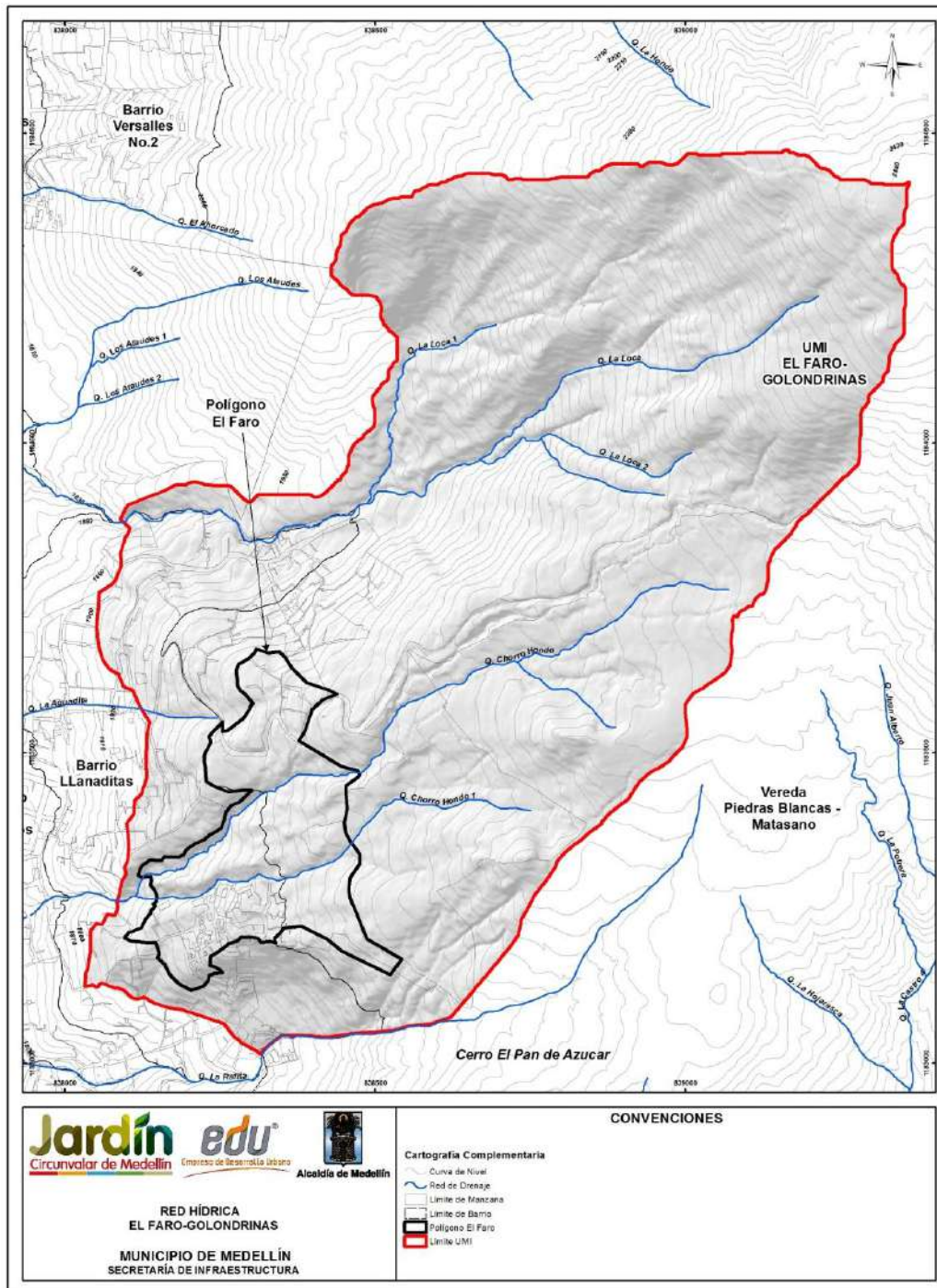
11.4 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

En el Mapa 25 se presenta la red hídrica de la UMI El Faro – Golondrinas y en el Mapa 26 se presenta esta misma red de drenaje de la zona de estudio y las cuencas asociadas a las corrientes de agua que tienen influencia sobre el Polígono El Faro.

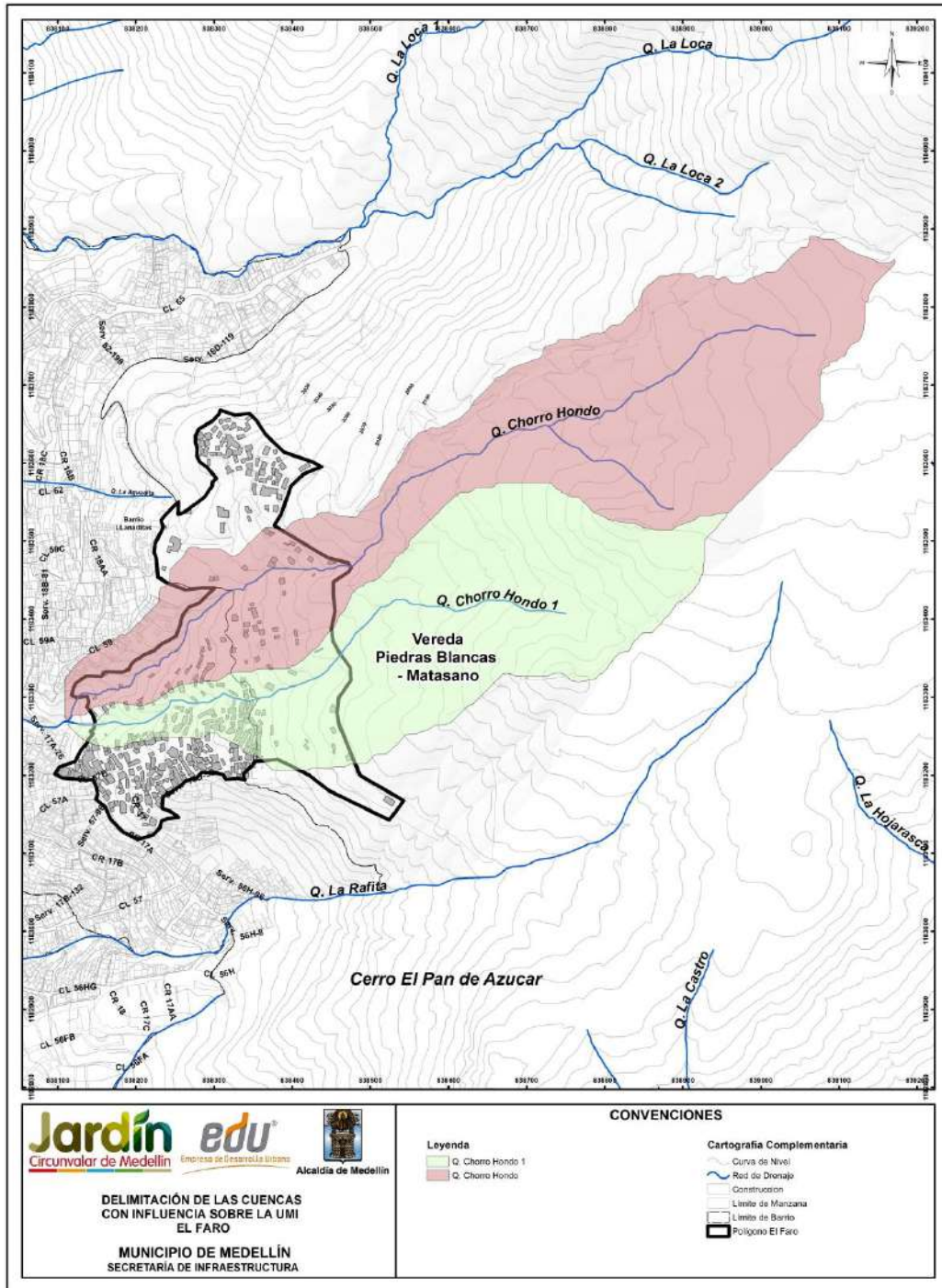
La red de drenaje fue establecida a partir del modelo digital del terreno generado con la información cartográfica, incluyendo los cauces naturales que tienen influencia sobre cada uno de los ocho polígonos de interés para el presente estudio. Se sometió a revisión y validación con respecto a la red hídrica del Plan de Ordenamiento Territorial (POT, 2014) del Municipio de Medellín (2014 2015) y se detectó coherencia entre ambas redes. Adicionalmente, se observó coherencia con lo observado en la ortofoto de la zona de estudio. Por esta razón, se decide adoptar la red hídrica del POT como base para la elaboración del presente estudio.

En particular para el Polígono El Faro, las corrientes naturales que tienen influencia corresponden a las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, las cuales cruzan aproximadamente por el centro-norte y centro-sur, respectivamente.

A partir del Modelo Digital de Elevación del Terreno y de la red de drenaje trazada, se delimitaron las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono El Faro, las cuales fueron nombradas de acuerdo con la corriente a la cual pertenecen.



Mapa 25. Red hídrica en la UMI El Faro - Golondrinas
 (EFRRedHidricaUMI_Medellin_C y Mapa 20_EFRRedHidricaUMI_Medellin_T



**Mapa 26. Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI El Faro - Golondrinas
 (EFRDelimitacionCuencasUMI_Medellin_C)**

11.4.1 Parámetros morfométricos de las cuencas

A partir del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno, de la red de drenaje y del trazado de las cuencas, se hizo una caracterización morfométrica de cada una de ellas. Para el trazado de las cuencas se tuvo en consideración que estas debían abarcar el polígono objeto de este estudio. De esta manera, se presentan en la Tabla 34 las coordenadas de los puntos de salida del flujo para las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Por otro lado, en la Tabla 35 se presentan los parámetros morfométricos de cada cuenca. El tamaño del pixel del Modelo Digital de Elevaciones del Terreno es de 2.0 m de lado, el cual es suficiente para delimitar con detalle las pequeñas cuencas del proyecto.

Tabla 34. Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca

PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	X	Y
1	El_Faro	Q. Chorro Hondo	838125.66	1183299.9
2	El_Faro	Q. Chorro Hondo 1	838148.1	1183267.8

Tabla 35. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en El Faro

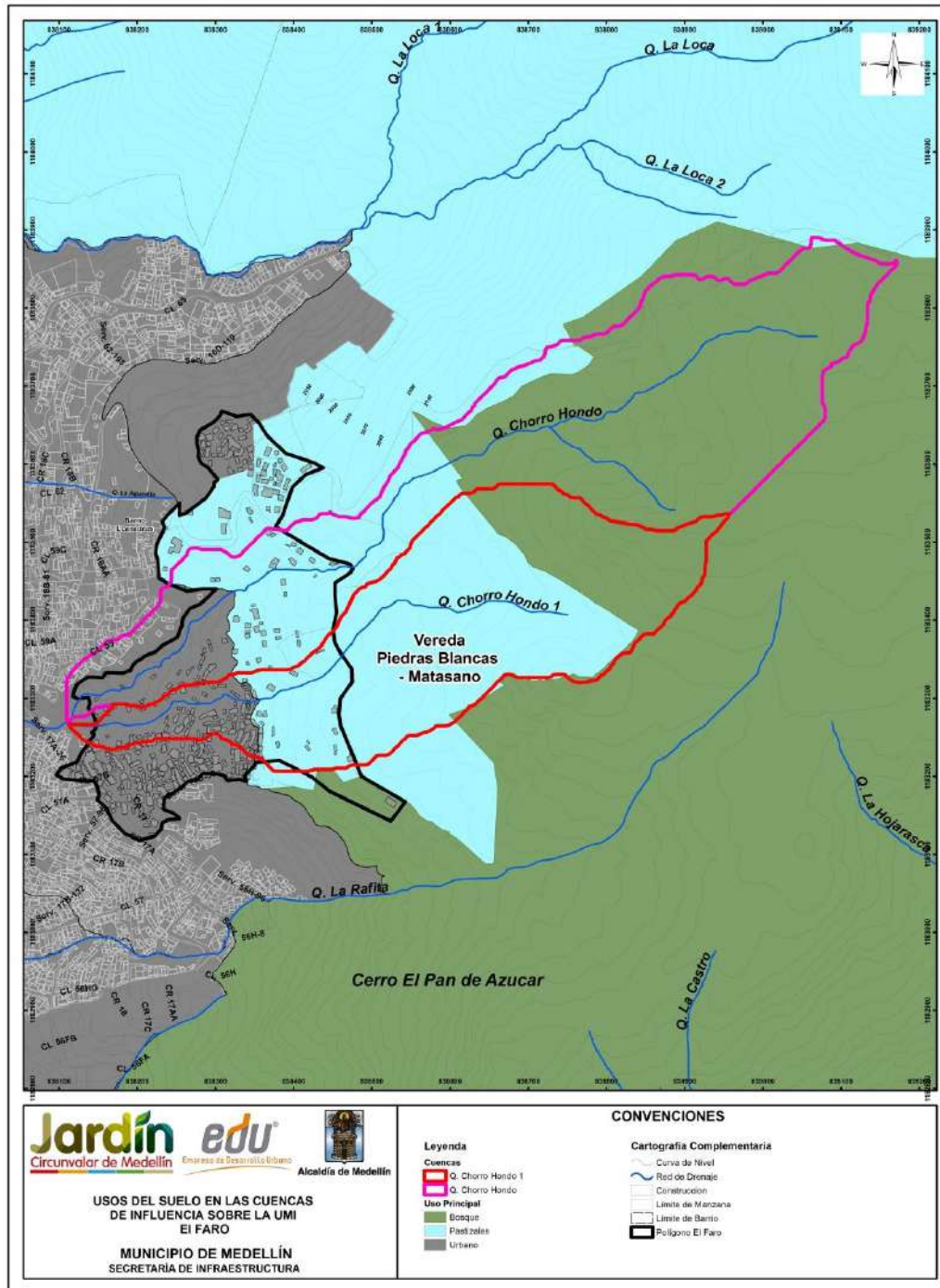
Cuenca	Área (m2)	Pendiente media de la cuenca (%)	Perímetro (m)	Altura media de la Cuenca (m)	Cota max cuenca (msnm)	Cota min cuenca (msnm)	Longitud de la cuenca (m)	Ancho de la cuenca (m)	Longitud del cauce (m)	Pendiente del cauce (%)
Q. Chorro Hondo	182864.43	35.09	2850.83	2134.52	2222.25	1895.04	1213.78	150.66	1344.96	23.04
Q. Chorro Hondo 1	129416.23	38.96	2060.18	2084.52	2175.97	1896.72	886.32	146.02	968.16	27.18

Para determinar la pendiente media de la cuenca, se generó un mapa de pendientes a partir del MDT de la zona de estudio, teniéndose así un mapa en formato Raster en el cual se tiene un valor de pendiente para cada pixel. La pendiente media de la cuenca será determinada como el promedio de los valores de pendiente para cada pixel contenidos dentro de la cuenca.



11.4.2 Usos del suelo

Para la asignación de los usos del suelo al interior de cada una de las cuencas con fines de modelación hidrológica, se empleó la información correspondientes a usos del suelo definidos para la UMI El Faro - Golondrinas como es indicada en el POT (2014) y la cual se presenta en el Mapa 3, el Mapa 4, el Mapa 18 y el Mapa 19. Esta información es retomada en este apartado en el Mapa 27, en el cual se ha realizado una reclasificación en términos de los tipos de coberturas o usos del suelo con fines del cálculo hidrológico. En la Tabla 36 se muestra un resumen para cada una de las cuencas.

Adicionalmente, se realizó una comparación de los usos del suelo indicados en el POT (2014) con respecto de los observados en la ortofoto. Pudo constatar que en la zona rural existen algunas diferencias de asignación al uso del suelo entre la ortofoto y el POT (2014), pero ambas fuentes coinciden en la asignación de la zona urbana. A pesar de lo primero, los coeficientes de escorrentía (Ce) que se asignan a partir de una o de la otra fuente no varían significativamente debido a la semejanza entre los valores recomendados por Chow et al (1994) para zonas no desarrolladas cuando la pendiente del terreno es superior al 7%.



Mapa 27. Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI El Faro - Golondrinas Modificado del POT (2014) (EFRUsosSuelosCuencasUMI_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

Las áreas de las zonas urbanas se encuentran localizadas en la parte baja de cada cuenca, teniéndose en algunas de estas un alto grado de intervención antrópica, que ha modificado las condiciones naturales de escorrentía superficial.

Tabla 36. Usos del suelo en las cuencas de influencia en El Faro

CUENCA	Usos del Suelo (%)			
	Cultivos	Pastizales	Bosques	Urbano
	Forestal productor	Agroforestal	Forestal protector	Urbano
Q. Chorro Hondo	26%	0%	62%	12%
Q. Chorro Hondo 1	65%	0%	24%	10%

11.4.3 Tiempos de concentración

El tiempo de concentración se define como el tiempo que toma una gota de agua desde la parte más alejada de la cuenca hasta el punto de salida de la misma. Para estimar este tiempo se cuenta con una gran cantidad modelos propuestos por diferentes autores, los cuales se encuentran en función de los características morfométricas de la cuenca.

En la Tabla 37 se presentan los diferentes modelos empleados para la estimación del tiempo de concentración y en la Tabla 38 se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración para las cuencas de influencia en el Polígono El Faro.

Tabla 37. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración

Método	Ecuación	Parámetros
Kirpich	$T_c = 0.000325 \times \left(\frac{L^{0.77}}{S_0^{0.385}} \right)$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (m) So: Pendiente del canal en (m/m)
Temez	$T_c = 0.3 \times \left(\frac{L}{S_0^{0.25}} \right)^{0.75}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (%)
Johnstone y Cross	$T_c = 5 \times \left(\frac{L}{S_0^{0.5}} \right)^{0.5}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) So: Pendiente del canal (millas/pies)
Federal Aviation Agency (F.A.A)	$T_c = \frac{(1.1 - C) \times L^{0.5}}{S^{0.333}}$	Tc: Tiempo de concentración (minutos) L: Longitud del cauce principal (m) S: Pendiente del canal en (m/m) C: Coeficiente de escorrentía
Pilgrim	$T_c = 0.76 \times A^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la microcuenca (km ²)
Clark	$T_c = 0.76 \times A^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la microcuenca (km ²)
California Culvert Practice	$T_c = \left(\frac{11.9 \times L^3}{H} \right)^{0.385}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (millas) H: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (pies)
Passini I	$T_c = \frac{0.108 \times (A \times L)^{1/3}}{S^{0.5}}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) S: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (m) A: Área de la microcuenca (km ²)
California Culvert USBR	$T_c = 0.066 \times \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (m/m)
Giandotti	$T_c = \frac{4 \times \sqrt{A} + 1.5 \times L}{25.3 \times \sqrt{L \times S_0}}$	Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (km) A: Área de la microcuenca (km ²) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente (m)

Tabla 38. Tiempos de concentración calculados para las cuencas

Nombre cuenca	Tiempo de concentración (min)									Promedio	Desv. Est.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Promedio	Tc tomado
	Kirpich	Temez	F.A.A.	Pilgrim	Clark	California Culvert Practice	Passini I	California USBR	Giandotti						
Q. Chorro Hondo	8.80	12.48	25.66	23.91	11.34	7.66	8.46	8.75	15.88	13.66	6.81	20.47	6.85	10.48	10.48
Q. Chorro Hondo 1	6.41	9.46	20.60	20.97	8.80	5.66	6.22	6.38	13.37	10.87	6.10	16.98	4.77	8.04	8.04

Para determinar el tiempo de concentración se hizo un promedio descartando los tiempos extremos que generan un gran salto en la media y la desviación estándar, siendo tomado un Tc igual a cinco minutos en los casos en que se obtiene un tiempo menor a este.

11.5 CAUDALES MÁXIMOS

11.5.1 Intensidades de Diseño

Las intensidades de diseño se tomaron a partir de las Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) publicadas por EPM (2005) para las estaciones pluviográficas operadas por esta entidad y que se ubican en la zona. Las curvas IDF presentan una ecuación de la forma:

$$I = C \cdot (D + H)^M$$

Dónde I es la intensidad en mm/h y D es la duración de la precipitación en minutos. C, H y M son parámetros empíricos cuyos valores se presentan en la Tabla 39 para cada estación y periodo de retorno.

A partir de las intensidades puntuales, se determinó la intensidad media de la lluvia para cada cuenca. Esto se realizó mediante un proceso de interpolación en el espacio de las intensidades puntuales. El método empleado es el del inverso del cuadrado de la distancia (IDW). Los pesos asignados a cada estación en este proceso se presentan en el Anexo 04.

Finalmente, en la Tabla 40 se presentan las intensidades medias en cada una de las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono El Faro.

Tabla 39. Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)

ESTACIÓN	PARÁMETRO	TR 2.33	TR 10	TR 50	TR 100
Palmas	C	10721.0	4404.8	2821.9	2903.2
	H	39	20	11	10
	M	-1.2205	-1.0062	-0.8815	-0.8721
Miguel de Aguinaga	C	11762.0	24290.0	39903.0	48618.0
	H	40	43	45	46
	M	-1.2843	-1.3586	-1.4053	-1.4253
Ayurá	C	4238.2	9852.6	16776.0	19876.0
	H	23	22	22	22
	M	-1.0826	-1.1821	-1.237	-1.2526
Chorrillos	C	6256.7	2779.1	3297.3	3448.0
	H	35	15	12	11
	M	-1.1469	-0.9509	-0.942	-0.9352
Mazo	C	37203.0	8937.9	8366.3	9065.6
	H	60	26	19	18
	M	-1.4366	-1.1534	-1.1058	-1.1069
Planta Villahermosa	C	4722.3	3483.1	3487.6	3491.6
	H	24	16	13	12
	M	-1.1075	-0.9946	-0.9511	-0.9353
Vasconia	C	3565.7	3587.9	4339.8	4984.9
	H	17	10	8	8
	M	-1.0225	-0.9653	-0.956	-0.9662
Fabricato	C	1751.8	2023.3	2388.4	2757.4
	H	21	13	10	10
	M	-0.8895	-0.8519	-0.8338	-0.8437

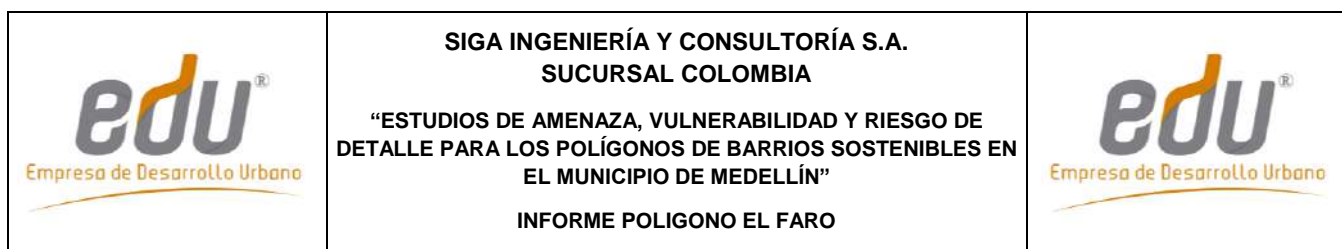


Tabla 40. Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca

CUENCA	Intensidades de Diseño (mm/h)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. Chorro Hondo	87.3	134.1	179.9	199.2
Q. Chorro Hondo 1	93.6	145.7	197.0	218.6

11.5.2 Método Racional

Este método es uno de los de mayor empleo debido a su sencillez. Presenta validez para cuencas de área pequeña, inferior a 3 km², ya que uno de sus supuestos es que la intensidad de la precipitación es uniforme sobre toda la cuenca. Este método también supone que la intensidad de la precipitación, permanece constante durante un tiempo mayor o igual al tiempo de concentración de la cuenca. Dadas las características de las cuencas en estudio, con áreas inferiores a 1 km², los resultados de este método serán válidos en ellas.

Según este método el caudal está dado por la siguiente ecuación, donde Q es el caudal máximo (m³/s), C es el coeficiente de escorrentía, i es la intensidad de la lluvia (mm/h) y A es el área de la microcuenca (ha).

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

El Método Racional, para la estimación de caudales, considera un coeficiente de escorrentía superficial, el cual es la relación entre el volumen escurrido y el volumen llovido. Este coeficiente tiene una naturaleza variable ya que depende de parámetros morfométricos de la cuenca y de las características mismas de la lluvia. Entre los factores referentes a la cuenca se encuentran el área, la pendiente, la forma y el uso del suelo. Los factores propios de la lluvia son la intensidad, duración y distribución espacial sobre la zona. Debido a la variación de los factores anteriormente mencionados, la determinación del coeficiente de escorrentía se hace compleja ya que este no debe considerarse como una constante, pero en algunos casos prácticos se hace razonable el uso de coeficientes constantes obtenidos mediante procesos experimentales.

Para determinar los coeficientes de escorrentía se hace uso de los coeficientes propuestos por Ven Te Chow (1994), los cuales dependen del periodo de retorno, el uso del suelo, y la pendiente de la cuenca. Estos coeficientes de escorrentía de referencia se presentan en el Anexo 04 (Tabla 2), de los cuales se emplearon los correspondientes a uso residencial tipo concreto/techo y a áreas no desarrolladas para pendientes superiores al 7% de acuerdo con la topografía de la zona.

Finalmente, los coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca se presentan en la Tabla 41.

Tabla 41. Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca

Nombre cuenca	Coeficientes de escurrimiento (Adimensional), TR (años)					
	TR2.33	TR5	TR10	TR25	TR50	TR100
Q. Chorro Hondo 1	0.42	0.45	0.47	0.51	0.54	0.58
Q. Chorro Hondo	0.41	0.45	0.47	0.51	0.54	0.58

11.5.3 Hidrogramas sintéticos

Dentro de las metodologías propuestas se tienen las de Williams y Hann, Snyder, y la del Soil Conservation Service (S.C.S). Estas metodologías plantean la construcción de un hidrograma unitario cuya forma está en función de características físicas de la cuenca de acuerdo a los parámetros de cada modelo. A partir de estos hidrogramas unitarios y la tormenta de diseño se obtiene el caudal máximo relacionando estos dos elementos mediante una convolución matemática, operación a través de la cual se obtienen los hidrogramas de escorrentía directa. Aunque en particular para las cuencas del Polígono El Faro no fueron empleados los métodos de los hidrogramas unitarios, por el pequeño tamaño de las cuencas, a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los modelos de las metodologías empleadas.

11.5.3.1 Método de Williams y Hann



J.R.Williams y R.W.Hann propusieron en la década de los 70 un modelo para calcular el hidrograma unitario de una cuenca. El modelo emplea las principales características geomorfológicas de la cuenca y las representa mediante dos parámetros, K y T_p , constante de recesión y tiempo al pico respectivamente, parámetros que fueron obtenidos mediante una regresión sobre una muestra de 34 cuencas ubicadas en los Estados Unidos, la cuales tienen áreas que varían entre 0,5 y 25 millas cuadradas. Las expresiones empleadas para calcular estos parámetros son las siguientes:

$$T_p = 4.63 \cdot A^{0.422} \cdot SLP^{-0.46} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.133} \quad K = 27 \cdot A^{0.231} \cdot SLP^{-0.777} \left(\frac{L}{W} \right)^{0.124}$$

$$Q_p = \frac{(B \cdot A \cdot R)}{896.99} T_p$$

Donde T_p es el tiempo al pico (horas), A es el área de la cuenca (km^2), SLP es la relación entre la diferencia de cotas en la microcuenca y la longitud del cauce principal (pie/milla), L/W es la relación longitud/ancho de la microcuenca, equivalente a la relación entre la longitud al cuadrado y el área (L^2/A), Q_p es el caudal máximo del hidrograma unitario (m^3/s) y R es la profundidad unitaria efectiva asociada con la hidrógrafa, igual a 1 mm.

El Parámetro B empleado para el cálculo del caudal máximo es función de una constante n , la cual depende de la relación entre la constante de recesión (K) y el tiempo al pico (T_p) (Vélez y Smith, 1997).

 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	---	---

$$n = 1 + \left\{ \frac{1}{2(K/T_p)} + \left[\frac{1}{4(K/T_p)^2} + \frac{1}{4(K/T_p)^2} \right]^{1/2} \right\}^2$$

Las expresiones propuestas por Williams y Hann para determinar la forma del hidrograma unitario son las siguientes, donde U es el caudal unitario y Tp es el tiempo al pico.

$U = U_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{n-1} e^{[(1-n)\left(\frac{t}{T_p}-1\right)]}$	Para $t \leq t_0$
$U = U_0 e^{\left[\frac{t_0-t}{K}\right]}$	Para $t_0 < t \leq t_1$
$U = U_1 e^{\left[\frac{t_0-t}{3K}\right]}$	Para $t > t_1$

11.5.3.2 Método de SCS

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, SCS) desarrolló un Hidrograma Unitario Adimensional a partir de una serie de hidrógrafas observadas, correspondientes a microcuencas de diversos tamaños y ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos.

El Hidrograma Unitario adimensional curvilíneo del S.C.S puede ser representado por un Hidrograma Unitario Triangular equivalente, con las mismas unidades de tiempo y caudal, teniendo por consiguiente el mismo porcentaje del volumen en el lado creciente del Hidrograma.

El caudal pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular por medio de la siguiente expresión:



$$U_p = \frac{484 * A_c}{T_p}$$

En donde Up es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario, Ac es el área de la microcuenca en millas cuadradas y Tp es el tiempo al pico en horas.

El SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago, TR y el tiempo de concentración, Tc, como:

$$T_c = \frac{5}{3} T_R$$

El tiempo de rezago, TR, puede calcularse con base en la siguiente expresión, donde Lc es la longitud del canal principal en pies, Sc es la pendiente promedio de la microcuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

$$T_R = \frac{L_c^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * S_c^{0.5}}$$

El factor de retención o almacenamiento S se obtiene del método de la S.C.S para perdidas mediante la siguiente expresión, donde CN es el Número de Curva.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

El tiempo al pico, T_p está dado según la siguiente expresión, en donde T es la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas.

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R$$

La relación entre la duración T de la precipitación efectiva a la que se le va a construir el hidrograma unitario y el tiempo de concentración está dada como:

$$T = 0.133T_C$$

11.5.3.3 Tormenta de diseño e intensidad de la precipitación

A partir de la información de las Curvas IDF de las estaciones a considerar, se determinó la intensidad de la lluvia para cada cuenca, considerando una duración igual al tiempo de concentración, y empleando el método de inverso del cuadrado de la distancia (IDW).



Los modelos de hidrogramas unitarios requieren hietogramas de precipitación efectiva para cada periodo de retorno considerado. La tormenta de diseño se consideró con una duración igual al tiempo de concentración de cada microcuenca.

Con el fin de hacer una distribución temporal de la lluvia, se emplearon las relaciones de distribución temporal de la lluvia propuestas por Huff en 1976 (Chow et al, 1994). Huff desarrolló esta distribución para diferentes patrones de precipitaciones (grupos de probabilidad), desde los patrones de lluvia más severas (I cuartil), hasta los más suaves (IV cuartil). Se empleó la distribución correspondiente al primer cuartil con una probabilidad de excedencia del 50%.

11.5.3.4 Pérdidas hidrológicas

Para simular las pérdidas de precipitación, esto es, la cantidad de agua que se pierde por intercepción en la vegetación, almacenamiento en depósitos del suelo y por infiltración, se usó el método del número de curva. Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS) y relaciona la lluvia total y la lluvia efectiva con el tipo y uso de suelo y las condiciones de humedad antecedente (Chow et al, 1994) a través del parámetro denominado número de curva (CN).

La precipitación efectiva por el método del SCS se estima a partir de la precipitación total acumulada, así:

 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	---	---

$P_e = \frac{(P_{tacum} - I_a)^2}{P_{tacum} - I_a + S}$	$I_a = 0.2 * S$	$S(mm) = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4$
---	-----------------	--

Donde, P_e es la precipitación efectiva en pulgadas, P es la precipitación media en pulgadas, S es la retención potencial máxima del suelo e I_a es la retención mínima que equivale al 20% de la retención máxima.



11.5.3.5 Estimación del Número de Curva

El número de curva depende del tipo del suelo, del tipo de tratamiento superficial que esté presente, de su condición hidrológica y de las condiciones de humedad antecedente la cual puede relacionarse con la precipitación en los 5 días anteriores.

La humedad antecedente del suelo está definida en tres grupos: AMC-I: para suelos secos, AMC-II para suelo intermedios y AMC-III para suelos húmedos. Para estimar los caudales máximos, se considera la condición de humedad antecedente III (AMC III), dado que se asumen condiciones de humedad altas (similares a las generadas por las temporadas de invierno).

El tipo y las características de los materiales que conforman el suelo también inciden en la cantidad de precipitación que se infiltre en ellos. Para tener esto en cuenta, los suelos se pueden clasificar en los siguientes grupos hidrológicos:

- ✓ Grupo de Suelo A. Alta infiltración (baja escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas cubiertos con vegetación (bosque o rastrojo alto) con grado de meteorización 30/50 según Brand (1988) y con discontinuidades en la matriz de suelo producto del proceso de descomposición de la roca. Las estructuras heredadas funcionan como canales de flujo principales. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 7%. También se incluyen los suelos que presentan un efecto geológico marcado por diaclasas y bandeamientos, y cuyo buzamiento se da en ángulos mayores a 60°.
- ✓ Grupo de Suelo B. Infiltración moderada (escorrentía moderada). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas o sedimentarias poco denudados con grado de meteorización 0/30 según Brand (1988) y con discontinuidades difícilmente cartografiables en campo. Las estructuras heredadas ya no son tan importantes en la permeabilidad del conjunto, por lo cual la permeabilidad primaria es la que controla el flujo de agua en el suelo. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 10%.
- ✓ Grupo de Suelo C. Infiltración baja (escorrentía de moderada a alta). Suelos residuales derivados de cualquier tipo de roca, cuyo grado de meteorización se clasifique como residuales maduros (SR, Brand – 1988), en los cuales las propiedades y minerales del material parental no son fácilmente identificables. Esta formación tiene como característica principal que está cubierta por pastos manejados y sus pendientes varían entre un 5% y 15%.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

- ✓ Grupo de Suelo D. Muy poca infiltración (alta escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuyo grado de meteorización varía entre 50/90 y en donde la pendiente media excede 15%. El tipo de vegetación en este grupo no es de mayor importancia ya que el fuerte gradiente topográfico impide la recarga de los acuíferos en la zona, generando por el contrario un flujo hipodérmico hasta aflorar nuevamente en superficie y hacer parte del agua que se aporta al canal principal de la microcuenca.

De acuerdo con las características geológicas de la zona estudiada, se determinó que los suelos presentes allí pertenecen al Grupo Hidrológico C.

En la Tabla 3 del Anexo 04 se muestran los diferentes números de curva para cada una de las coberturas vegetales (o usos del suelo) y para cada uno de los grupos hidrológicos del suelo.

Para determinar el Número de Curva afectado por la condición de humedad antecedente III, se utilizó la siguiente expresión:

$$CN(III) = \frac{23 \times CN}{10 + 0.13 \times CN}$$

Donde CN (III) es el Número de Curva equivalente para las condiciones de humedades AMC-III y CN es el Número de curva para condiciones antecedentes de humedad AMC-II. Según la distribución de los usos y el grupo hidrológico del suelo en las cuencas estudiadas, se estimó un número de curva mediante un promedio ponderado por áreas.

11.5.4 Regionalización de caudales

Después de determinar los caudales asociados a los diferentes periodos retorno para cada cuenca estudiada, se realizó a partir de estos una regresión de tipo potencial entre esta variable y el área. De esta manera, se obtiene una expresión regionalizada que permite estimar los caudales máximos en función del área de la cuenca considerada. La expresión es de la siguiente forma:

$$Q = \alpha.A^\theta$$

Las cuencas consideradas para el análisis de regionalización corresponden a todas las que componen los ocho polígonos de estudio en el presente contrato. Es decir, se consideraron las cuencas de las Quebradas Chorro Hondo, San Antonio, La Rafita, La Arenera, La Gallinaza, La Loquita, El Molino, entre otras. En la Tabla 42 y en el Mapa 28 se puede observar que para la regionalización fueron empleadas 18 cuencas, además de las coordenadas de cada uno de sus puntos de salida.



 Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 Empresa de Desarrollo Urbano
---	--	---

Tabla 42. Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas para las cuencas consideradas en la regionalización

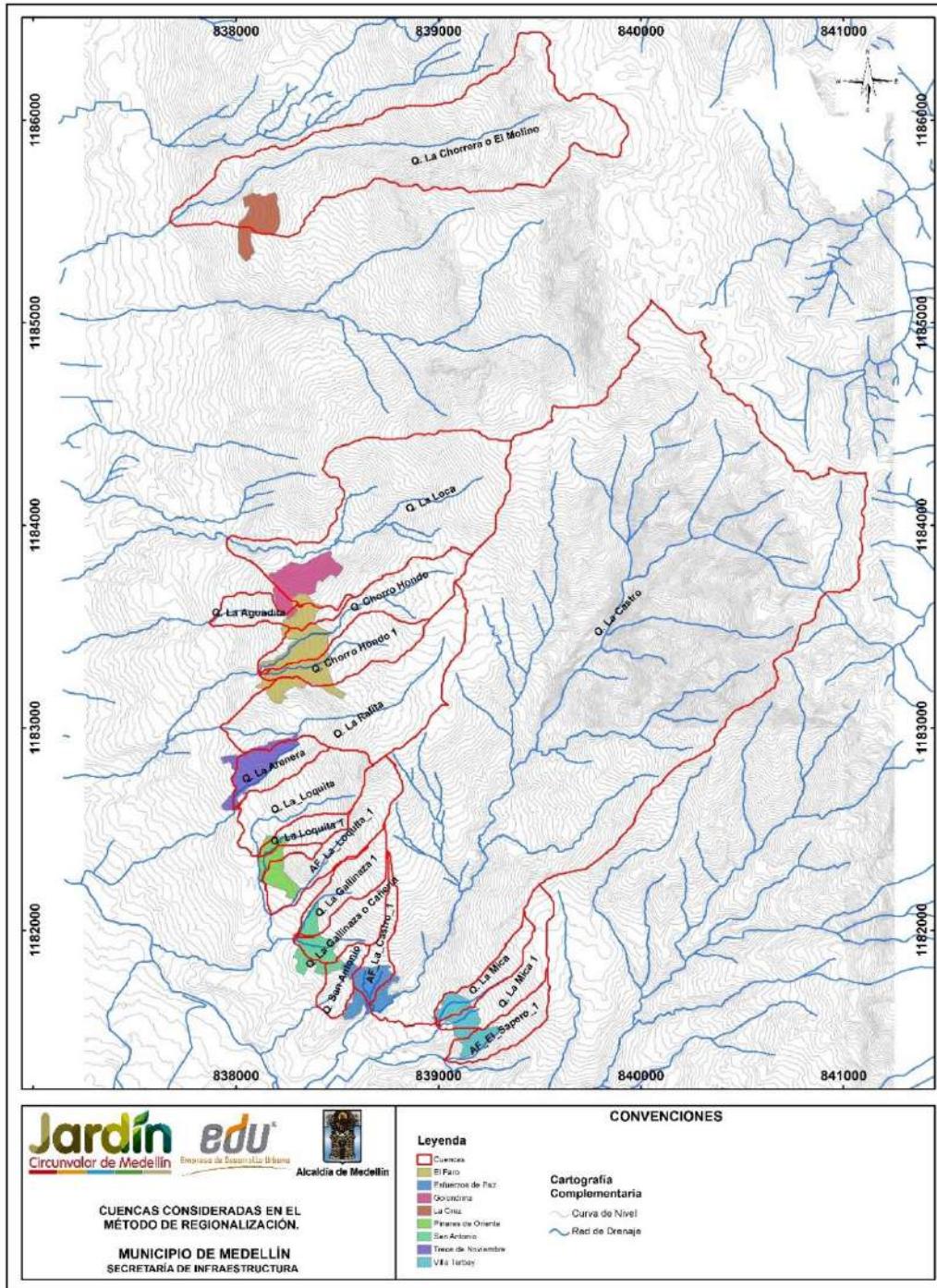
PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	ESTE	NORTE
1	Villa_Turbay	AF_El_Sapero_1	839027.36	1181360.25
2	Villa_Turbay	Q. La Mica	839003.36	1181520.59
3	Villa_Turbay	Q. La Mica 1	839003.36	1181520.59
4	Esfuerzos_de_Paz	Q. La Castro	838659.35	1181629.17
5	Esfuerzos_de_Paz	AF_La_Castro_1	838656.25	1181636.64
6	Esfuerzos_de_Paz	Q. San Antonio	838398.21	1181624.18
7	San_Antonio	Q. La Gallinaza o Cañería	838282.50	1181960.14
8	San_Antonio	Q. Gallinaza 1	838288.67	1181970.14
9	Pinares_de_Oriente	AF_La_Loquita_1	838172.89	1182080.72
10	Pinares_de_Oriente	Q. La Loquita 1	838110.36	1182364.25
11	Pinares_de_Oriente	Q. La Loquita	838108.32	1182367.83
12	Trece_de_Noviembre	Q. La Arenera	837992.14	1182599.25
13	Trece_de_Noviembre	Q. La Rafita	837922.50	1183003.64
14	EL_Faro	Q. Chorro Hondo 1	838112.50	1183265.64
15	El_Faro	Q. Chorro Hondo	838110.50	1183269.64
16	El_Faro	Q. La Aguadita	837868.50	1183519.64
17	Golondrinas	Q. La Loca	837957.23	1183937.37
18	La_Cruz	Q. La Chorrera o El Molino	837673.50	1185498.10

Dado de que las cuencas tienen áreas pequeñas, se decide adoptar el Método Racional puesto que las hipótesis de esta metodología se cumplen en las cuencas consideradas. Los parámetros morfométricos de cada cuenca y los parámetros empleados para el cálculo del caudal por el Método Racional se muestran en el Anexo 04.

A partir de la regionalización hecha, se obtuvieron los Parámetros α y θ para cada periodo de retorno considerado, los cuales se muestran en la **Tabla 43**, junto con el coeficiente de correlación.

Tabla 43. Resultados de regionalización de caudales máximos

Parámetro	Coeficientes de Regionalización			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
α	7.95	13.43	20.35	24.0020
θ	0.78	0.75	0.74	0.74
R2	0.96	0.96	0.96	0.97



**Mapa 28. Cuencas consideradas en el método de regionalización
(EFRCuencasConsideradasenelMetododeRegionalizacion_Medellin_C)**

11.5.5 Resumen de caudales

Los caudales calculados para cada cuenca, para cada periodo de retorno y para cada método empleado se presentan de la Tabla 44 a la Tabla 47.

Como se mencionó antes en este mismo capítulo, dado que el tamaño de las cuencas en estudio es inferior a 1 km², los resultados que se seleccionan para el análisis de la amenaza y el riesgo corresponden a los del Método Racional y la regionalización hecha, dado que esta permite analizar los caudales en caso de variaciones sobre las cuencas. Las cuencas analizadas, al ser pequeñas, cumplen satisfactoriamente las hipótesis del Método Racional. Por su parte, las metodologías de hidrógrafas unitarias cuentan con aceptación en cuencas de varios kilómetros cuadrados de área, y por ello se descartan sus resultados.

Tabla 44. Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. Chorro Hondo	0.67	0.65	0.68	1.81	1.68	2.12
Q. Chorro Hondo 1	0.66	0.65	0.69	1.40	1.25	1.62

Tabla 45. Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. Chorro Hondo	1.88	1.82	1.90	3.19	2.80	3.73
Q. Chorro Hondo 1	1.75	1.69	1.78	2.48	2.07	2.88

Tabla 46. Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. Chorro Hondo	3.38	3.24	3.39	4.94	4.28	5.74
Q. Chorro Hondo 1	3.03	2.93	3.06	3.86	3.16	4.44

Tabla 47. Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)					
	H.U. Williams-Hann	H.U. Snyder	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. Chorro Hondo	4.07	3.89	4.06	5.86	5.00	6.80
Q. Chorro Hondo 1	3.60	3.51	3.63	4.55	3.69	5.26

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
--	--	--

12. ASPECTOS HIDRÁULICOS

En este capítulo se describe y caracteriza desde el punto de vista hidráulico el sistema de drenaje natural que tiene influencia sobre el Polígono El Faro. En particular, se describe la metodología y se presentan los principales resultados de la evaluación hidráulica de los mismos.

12.1 REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA

Para el desarrollo del presente capítulo se empleó como información de referencia los estudios hidráulicos suministrados por la EDU, los cuales fueron ejecutados por INGEOCILCÓN (2014) y descritos ya en el Capítulo 11 de este informe.

Para el caso particular del Polígono El Faro, no fue necesario levantar información topográfica en los cauces de Quebrada Chorro Hondo y de la Quebrada Chorro Hondo 1, dado que la información de referencia contiene levantamientos topográficos de detalle actualizada en estos cauces.

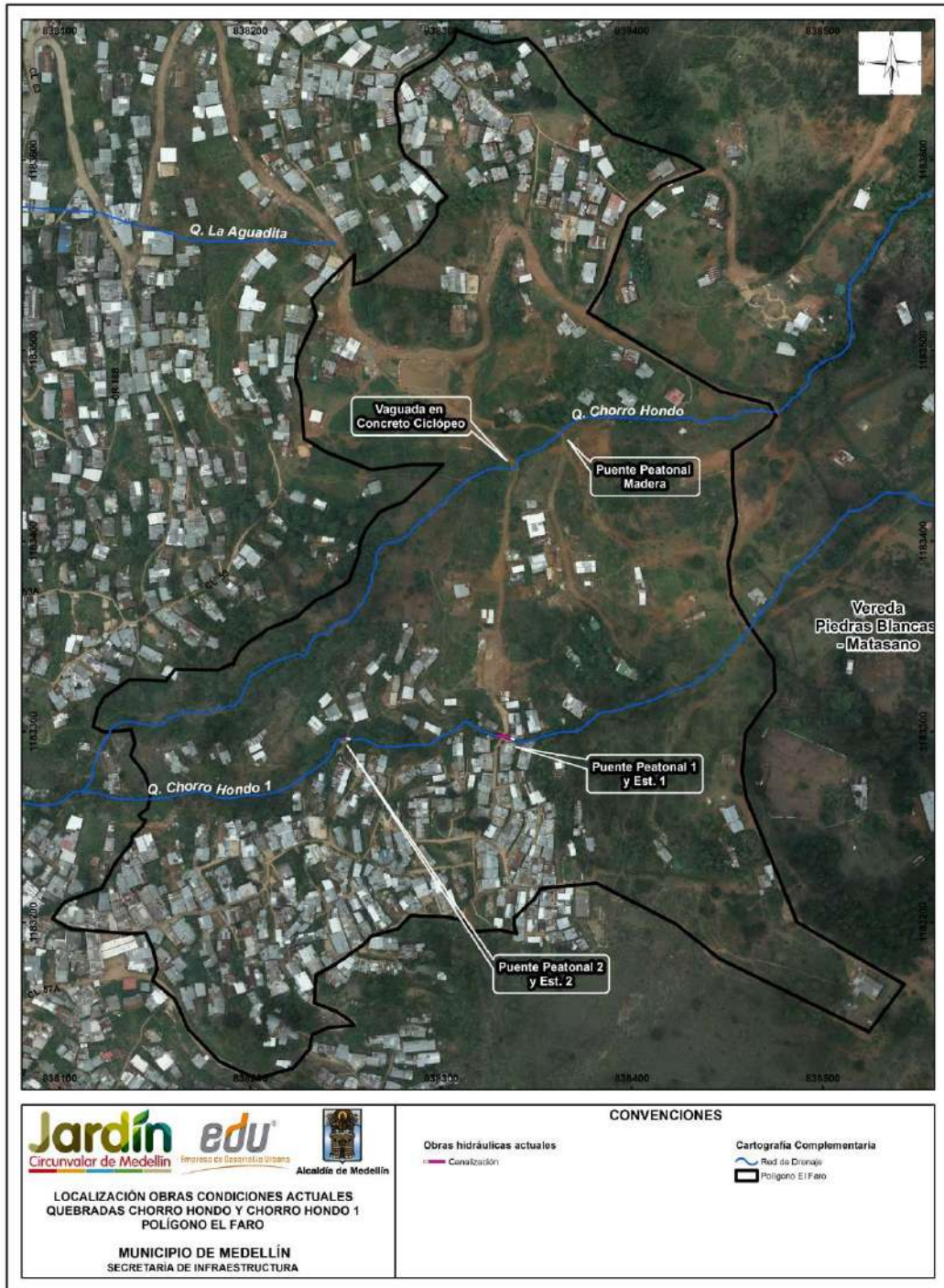
Dentro de la información básica también se cuenta con las observaciones realizadas durante la visita al sitio, en la cual se determinaron las condiciones actuales de las quebradas, sus características y algunos parámetros.

Se contó también con la información topográfica general del Polígono El Faro que fue levantada por la Empresa de Desarrollo Urbano.

12.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES

En el Numeral 5.3 se describió detalladamente lo relacionado con la morfodinámica regional de la zona de estudio y en el Numeral 5.4 lo correspondiente a la morfodinámica local. Dentro de este último, se establece que en lo que tiene que ver con procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI El Faro-Golondrinas, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, en las márgenes de las Quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (incluidos sus afluentes). Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas. El fenómeno de socavación lateral se evidenció en la Quebrada Chorro Hondo, justo aguas arriba de la intersección con el Polígono El Faro. Dicha socavación produce el desconfinamiento del material de las orillas y genera desgarres de 1 m de profundidad.

Como complemento al análisis de la dinámica de las corrientes de agua asociadas a la UMI El Faro-Golondrinas (dinámica fluvial), con la intención adicional de llevar a cabo los análisis hidrológicos e hidráulicos necesarios para la evaluación de los riesgos por inundación y avenidas torrenciales, se presenta en este numeral una descripción detallada de los cauces de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, drenajes asociados al Polígono El Faro (Mapa 29), haciéndose referencia a tramos característicos.



Mapa 29. Localización obras en el cauce de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (EFRLocalizacionObrasPoligonoEFR_Medellin_C)

12.2.1 Quebrada Chorro Hondo

El tramo analizado de la Quebrada Chorro Hondo alcanza una longitud aproximada de 420 m comprendida dentro del Polígono El Faro, cuya descripción inicia en la intercepción del cauce con la vía peatonal (límite del polígono) que comunica la Calle 59C (Vía Indígena) y el CAI Altos de la Torre. Este drenaje cruza de oriente a occidente el polígono y descarga en la Quebrada Santa Helena. En el Mapa 29 se muestra en planta la localización y se indica en ella las zonas que corresponden al cauce y/o las que corresponden a las estructuras hidráulicas. La descripción de la quebrada se realiza de aguas arriba hacia aguas abajo.



12.2.1.1 Tramo 1 (Canal Natural)

La descripción de la quebrada inicia en el extremo aguas arriba, en la intercepción de la vía peatonal con el límite del polígono, vía que comunica a la Calle 59C (Vía Indígena) y el CAI Altos de la Torre. En la Figura 164 se observa lo descrito anteriormente, mostrándose como el cauce atraviesa la vía peatonal, sin contarse con una estructura hidráulica para el transporte y evacuación del flujo hacia el cauce.



Figura 164. Inicio de la descripción Quebrada Chorro Hondo en la intercepción del cauce con límite del Polígono El Faro

La quebrada en su lecho presenta suelos residuales de tipo principalmente cohesivos perteneciente a las Dunitas de Medellín (JkuM). Este tramo comprende una longitud aproximada de 50 m, un ancho de canal que varía entre 0.5 m y 0.8 m con una sección transversal predominante en forma de “v”, presentando una pendiente entre el 20% y el 34% con promedio de 27% (ver Figura 1 del Anexo 05). En las márgenes hay presencia de vegetación con densidad baja, acompañada de árboles y plantaciones de los habitantes, en algunos puntos localizados se presentan focos menores de erosión por

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

intervención antrópica, así como la presencia de casas cercanas al cauce natural (Figura 165).



Figura 165. Canal natural Quebrada Chorro Hondo en el inicio del Tramo 1

Continuando hacia aguas abajo de lo descrito anteriormente, el canal presenta una longitud aproximada de 66 m, un ancho que varía entre 0.5 m y 0.8 m con una pendiente entre el 28% y 34% con promedio de 32% (ver Figura 1 del Anexo 05), el fondo del cauce presenta un material predominantemente cohesivo con fragmentos de roca de las Dunitas de Medellín (JkuM) de la Dunitas de Medellín (JkuM). En las márgenes, la densidad de la vegetación aumenta hasta el cruce del cauce con el primer puente peatonal ubicado en esta quebrada. Para este punto observamos focos más localizados y características del suelo con procesos antrópicos como construcción de viviendas que se encuentran a menos de un metro del cauce, las cuales funcionan como margen de la quebrada.

Después del cruce del puente peatonal construido en madera sobre el cauce, se presentan condiciones similares a las descritas en el párrafo anterior, con saltos naturales característicos de quebradas de alta montaña, como se puede observar en la Figura 166.



Figura 166. Canal natural Quebrada Chorro Hondo parte intermedia del Tramo 1 ubicado a 140 m desde la intercepción del cauce con el límite del Polígono El Faro

12.2.1.2 Tramo 2 (Batea Concreto Ciclópeo y Canal Natural)

En la Figura 167 se observa el cauce de la Quebrada Chorro Hondo cruzando por encima de un paso peatonal que forma una batea de ancho aproximado de 1.80 m en concreto ciclópeo en una longitud aproximada de 4 m.



Figura 167. Intercepción del cauce con sendero peatonal ubicado a 40 m desde puente peatonal aguas arriba y batea en concreto ciclópeo

Aguas abajo del cruce, el cauce continua hasta la confluencia donde se encuentra con la Quebrada Chorro Hondo 1, con una longitud aproximada de 340 m, un canal natural de ancho variable entre 0.5 m y 1.0 m y pendientes entre el 15% y el 69%, con un promedio del 35% (ver Figura 1 del Anexo 05), donde la sección predominante del cauce es en forma de “v”. El lecho de la quebrada presenta un material donde predomina un material cohesivo con presencia de fragmentos de roca asociado a las Dunitas de Medellín (JkuM), en este tramo también encontramos dos puntos localizados de Depósitos de Flujos de Lodos y Escombros. También se observa puntos localizados con presencia de una densa vegetación que cubre el lecho de la quebrada así como un flujo asociado a aguas residuales. En las márgenes contiguas al lecho se presentan coberturas densas de vegetación y árboles, además se presentan pequeños focos de erosión. Adicionalmente, en la parte más cercana a la confluencia, hay presencia de viviendas que interfieren en el flujo de la quebrada. Lo descrito anteriormente se observa en la Figura 168.



Figura 168. Características del tramo final de la Quebrada Chorro Hondo aguas abajo de batea en concreto ciclópeo

12.2.2 Quebrada Chorro Hondo 1

El tramo a describir de la Quebrada Chorro Hondo 1 comprende una longitud aproximada de 423 m dentro del Polígono El Faro. El tramo inicia en el costado suroriental, en los límites con el Polígono El Faro, a una distancia aproximada de 125 m a partir de la Quebrada Chorro Hondo en dirección sur, caminando por el sendero peatonal que comunica la Calle 59C (Vía Indígena) y el CAI Altos de la Torre. Este drenaje cruza de oriente a occidente el polígono y descarga a la Quebrada Chorro Hondo. En el Mapa 29 se muestra en planta la localización y se indica en ella las zonas que corresponden al cauce y/o las que corresponden a las estructuras hidráulicas. La descripción de la quebrada se realiza a continuación de aguas arriba hacia aguas abajo.

12.2.2.1 Tramo 1 (Canal Natural)

Este tramo inicia con la descarga de un canal rectangular en concreto, proyectado por el borde del paso peatonal ya mencionado, hasta una poceta. Esta poceta sirve como cambio de dirección, permitiendo transportar las aguas lluvias por medio de una tubería circular que funciona como obra de cruce a través del paso peatonal, para nuevamente incorporarse en un canal de sección rectangular de fondo escalonado y en piedra pegada que descarga en el cauce natural (Figura 169 y Figura 170).

El cauce natural presenta una longitud aproximada de 145 m hasta la primera estructura hidráulica (Est.1), presenta un ancho variable entre 0.5 m y 0.7 m y pendientes entre 24% y 48%, con promedio de 33.8% (ver Figura 2 del Anexo 05). El lecho de la quebrada en este tramo está constituido de suelos residuales de tipo principalmente cohesivos perteneciente a las Dunitas de Medellín (JkuM). Las márgenes contiguas al cauce presentan pendientes altas, acompañadas de una baja densidad de vegetación que aumenta hacia la parte baja de este tramo con presencia de árboles y arbustos. También se presentan puntos menores localizados de erosión antrópica.



Figura 169. Tramo en canal de concreto con fondo escalonado en piedra pegada de la Quebrada Chorro Hondo 1



Figura 170. Tramo inicial canal natural de la Quebrada Chorro Hondo 1 dentro de Polígono El Faro

12.2.2.2 Tramo 2 (Canal Natural y Estructuras Hidráulicas Est.1 y Est.2)

La descripción de este tramo inicia en la primera estructura hidráulica (Est.1) y finaliza aguas abajo, aproximadamente a unos 100 m, en la segunda estructura hidráulica (Est.2). Ambas estructuras corresponden a un canal de concreto con fondo escalonado.

La condición de entrada del flujo hacia el canal escalonado, denominada como Est.1, presenta obstrucciones. En la Figura 171 se pueden observar construcciones aledañas a la quebrada, cuyos muros actúan como márgenes, así como la existencia de tuberías en el fondo del cauce y en el canal. Esta estructura presenta una longitud en planta aproximada de 10 m, alturas de contra huella que varían entre 0.3 m y 0.7 m, longitudes de huella entre 0.9 m y 1.65 m y un ancho de secciones variables. En la entrada al canal, tiene un ancho aproximado de 0.9 m. En la parte central, donde se ubica el puente peatonal, el ancho es de 1.65 m, el cual disminuye gradualmente hasta descargar con un ancho aproximado de 1.30 m. Este canal cruza un puente peatonal, el cual tiene una altura aproximada de 1.30 m medido desde el fondo y un ancho igual o aproximado a la huella de 1.60 m (Figura 172).

Como se puede observar en la Figura 173, el flujo continúa por medio de un canal natural de una longitud aproximada de 90 m, con un ancho variable entre 0.5 m y 1.2 m, pendientes en un rango de 30.8% y 52.9% con un promedio de 39.8% (ver Figura 2 del Anexo 05). El fondo del cauce para este tramo presenta en su mayoría suelos residuales de tipo principalmente cohesivos perteneciente a las Dunitas de Medellín (JkuM) con un foco localizado asociado a un material de Lleno Antrópico. En las márgenes se observan expresiones altas de vegetación, así como la presencia de algunas viviendas cercanas al cauce concentradas en la descarga del canal escalonado (Est.1). En algunos puntos localizados de las márgenes, se presentan procesos menores de erosión y topografías antrópicas.

El flujo que permanece en el cauce para el tramo descrito, se encuentra asociado a descargas de aguas residuales, lo que indica que corresponde a una corriente efímera que conduce escorrentía solo cuando se presentan precipitaciones.



Figura 171. Condiciones de entrada del flujo hacia el canal de fondo escalonado (Est.1)



Figura 172. Entrada y descarga de canal de concreto con fondo escalonado (Est.1). Puente Peatonal 1



Figura 173. Cauce natural intermedio entre los canales (Est.1 y Est.2) de fondo escalonado. Quebrada Chorro Hondo 1

Finalizando el cauce natural descrito anteriormente se observa que el flujo es conducido por un canal escalonado. Esta estructura presenta una longitud en planta aproximada de 4.8 m, alturas de contra huella que varían entre 0.30 m y 0.50 m, longitudes de huella entre 0.9 m y 2.0 m y un ancho de sección promedio de 1.2 m. Este canal cruza un puente peatonal el cual tiene una altura aproximada de 1.0 m medido desde el fondo y un ancho perpendicular a la dirección de flujo, igual o aproximado a la huella de 2.0 m, ver Figura 174.



Figura 174. Entrada y descarga de canal en concreto de fondo escalonado (Est.2). Puente Peatonal 2

12.2.2.3 Tramo 3 (Canal Natural)

Luego de la descarga del canal escalonado (Est.2), se puede observar en la Figura 175 un canal natural, aproximadamente de 200 m de longitud hasta la confluencia donde descarga en la Quebrada Chorro Hondo. Este tramo presenta anchos de sección variable entre 0.5 m y 1.0 m, pendientes en un rango aproximado de 24% y 70% con promedio de 38.1% (ver Figura 2 del Anexo 05). En el fondo del cauce, para todo el tramo descrito, presenta un material predominantemente cohesivo con fragmentos de roca de las Dunitas de Medellín (JkuM). En las márgenes contiguas al cauce se presentan altas pendientes, en su mayoría se presenta una densidad más alta de vegetación acompañada de arbustos y árboles, así como puntos localizados de erosión menor y topografías antrópicas.

A lo largo de la Quebrada Chorro Hondo 1 hay dos pasos o puentes peatonales en concreto, estos se encuentran localizados en los canales de fondo escalonado Est.1 y Est.2, como se puede observar en la Figura 172 y en la Figura 174. En la Tabla 48 se muestran las coordenadas de localización de los puentes, estos también corresponden a las estructuras de canal con fondo escalonado. En la Tabla 49 se resumen las características de los canales.



Figura 175. Tramo final en cauce natural de Quebrada Chorro Hondo 1

Tabla 48. Coordenadas de los pasos peatonales y estructuras de canales. Quebrada Chorro Hondo 1

PUENTE	ESTE	NORTE	LUZ (m)	MATERIAL	APOYOS
1	838334.16	1183297.06	2.00	Concreto	Simples y Superficiales
2	833251.3	1183296.07	1.50	Concreto	Simples y Superficiales

Tabla 49. Resumen de estructuras quebrada Chorro Hondo 1

Estructura	Ubicación	Tipo Estructura	Tipo sección	Tipo Fondo	Material Paredes	Material Fondo	Dimensiones				
							Ancho (m)	Alto (m)	Z	Diám.	Longitud (m)
Est.1	Entre Calle 56fb y Carrera 18C	Canal	Rectangular	Escalonado	Concreto	Concreto	varía 0.9<a<1.6	1	0	NA	10
Est.2	m aguas abajo de la Est.1	Canal	Rectangular	Escalonado	Concreto	Concreto	1.2	0.8	0	NA	4.8

12.3 ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES

Una vez estimados los caudales máximos para cada una de los cauces principales que tienen influencia sobre el Polígono El Faro (Tabla 44 a Tabla 47), se procedió a realizar el modelo hidráulico. El objetivo de este modelo hidráulico es transitar los caudales máximos a través de los cauces y calcular diferentes variables de flujo, entre ellas, la velocidad y la profundidad. A partir de estas últimas, se delimitarán finalmente las manchas de inundación para cada uno de los periodos de retorno, las cuales servirán como punto de partida para la calificación de la amenaza. Para llevar a cabo el tránsito de las crecientes en los cauces, se empleó el Software FLO-2D PRO de FLO-2D Software INC, que permite analizar el flujo en las laderas, además del flujo en los cauces.

12.3.1 Descripción del Modelo FLO-2D

A través de los modelos de tipo unidimensional no es posible obtener una buena precisión al simular los flujos que ocurren en las laderas cuando se presenten vertimientos o derrames por incapacidad del cauce o por falla de una determinada estructura. Para considerar estas situaciones, se empleó el modelo FLO-2D, de tipo bidimensional en laderas, conservativo del volumen, que resuelve la ecuación de cantidad de movimiento incluyendo componentes de la onda cinemática, la onda difusiva y la onda dinámica. El Modelo FLO-2D permite además modelar flujo en cauces y canales, en laderas y calles y permite incluir estructuras hidráulicas, obstrucciones, edificaciones, entre otros. Como información de entrada, el FLO-2D requiere información topográfica, información de rugosidades de la superficie, información de lluvia o de caudales de entrada al sistema, secciones transversales al cauce y curvas de descarga de las estructuras hidráulicas.



FLO-2D es un modelo de diferencias finitas que emplea una malla uniforme de elementos cuadrados, para los cuales se tienen ocho direcciones posibles para el flujo. En esencia, es un modelo de volumen finito, que rastrea la distribución del volumen en todo el dominio con la finalidad de representar el movimiento de la onda de flujo. Para cada paso de tiempo, el modelo calcula el caudal que fluye en todas las ocho direcciones posibles de cada elemento de la malla, garantizando la conservación del momentum, a partir de la siguiente ecuación:

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} - \left(\frac{V_x}{g}\right)\left(\frac{\partial V_x}{\partial x}\right) - \left(\frac{1}{g}\right)\left(\frac{\partial V_x}{\partial t}\right)$$

Donde S_o representa la pendiente del cauce, $\partial h/\partial x$ representa el gradiente de presión, $(V_x/g)(\partial V_x/\partial x)$ representa la aceleración convectiva y $(1/g)(\partial V_x/\partial t)$ representa la aceleración local.

Dentro de las hipótesis y limitaciones que plantea el Modelo FLO2D se encuentran las siguientes:

- ✓ La elevación, la rugosidad y la profundidad de flujo están representadas y son uniformes al interior de cada celda que compone el dominio del modelo.
- ✓ Flujo permanente para cada paso de tiempo.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

- ✓ Flujo unidimensional al interior de los canales. En ellos no se consideran corrientes secundarias ni la distribución vertical de velocidades.

12.3.2 Caudales empleados en la modelación

Considerando que los cauces que tienen influencia sobre el polígono El Faro no son susceptibles a generar fenómenos de avenida torrencial como se describe en el Capítulo 15, no es necesaria una mayoración del 40% sobre el caudal de acuerdo con lo que establece el Acuerdo Metropolitano 09 de 2012. Así las cosas los caudales considerados en la modelación hidráulica son directamente los estimados en el Numeral 11.5 de hidrología por el método racional (ver Tabla 44 a Tabla 47).

12.3.3 Información topográfica

La información topográfica que se ingresó al Modelo FLO-2D corresponde al modelo digital del terreno generado a partir de la información topográfica de los polígonos y de los cauces. Adicionalmente, la geometría de los canales fue definida por secciones transversales, tomadas en forma perpendicular a la dirección de las líneas del flujo.

12.3.4 Tamaño de la malla

Para la selección del tamaño de la malla se partió de la siguiente relación entre el caudal pico Q_{pico} y el área de la celda A_{celda} recomendada por FLO2D para garantizar eficiencia en el proceso de modelación:



$$Q_{pico} / A_{celda} < 3m^3/s$$

Esta relación implica tamaños de celda del orden de 2.0 m de lado. Sin embargo, para garantizar una mayor representatividad y un mayor detalle en los resultados del modelo, se empleó un tamaño de celda de 1.0 m de lado, sin afectar notoriamente la eficiencia en el modelo.

12.3.5 Condiciones de Frontera

En el FLO-2D es posible trabajar con precipitaciones o con caudales como elemento de entrada al modelo. En el primer caso, el software modela procesos lluvia escorrentía para obtener los caudales en todos los puntos de la malla. En el segundo caso los caudales se ingresan de manera puntual en cualquier celda del modelo.

En este caso se ingresaron los caudales directamente en los puntos de interés de los cauces mediante una hidrógrafa triangular con caudal pico igual al caudal de diseño seleccionado (en éste caso el del método racional). El tiempo base del hidrograma se estableció de manera que el área bajo el hidrograma sea consistente con el volumen de escorrentía directa en la cuenca. La forma triangular del hidrograma fue seleccionada dado que se aproxima bien a las hidrógrafas reales en ambientes urbanos y es la forma base para la generación de hidrógrafas sintéticas como las del Soil Conservation Service.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

12.3.6 Condiciones Iniciales

Dadas las características efímeras de los cauces del polígono en estudio, se consideraron láminas de flujo nulas como condiciones iniciales, es decir, se partió de condiciones secas en todo el dominio del modelo.

12.3.7 Condiciones de estabilidad numérica

El modelo FLO-2D está sujeto a criterios estrictos de estabilidad numérica que se garantizan manteniendo pequeños intervalos o pasos de tiempo en la solución de las ecuaciones diferenciales para cada elemento de la malla del modelo. El modelo busca que el paso de tiempo empleado sea adecuado para que se cumplan los siguientes criterios de estabilidad:

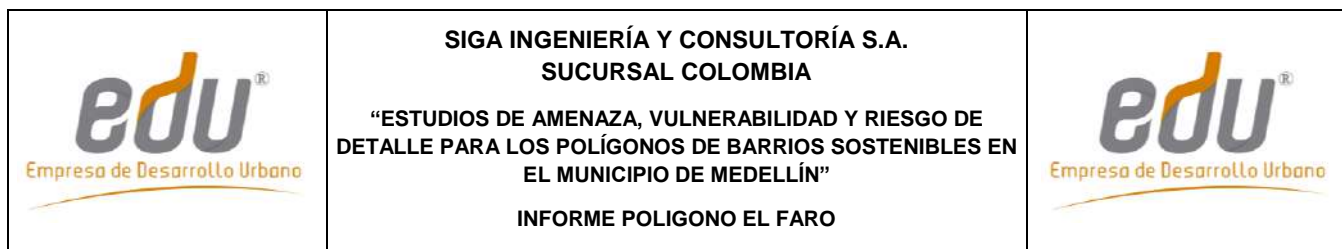
- ✓ Criterio del cambio de volumen (o de profundidad) en una celda entre cada paso de tiempo.
- ✓ Criterio de estabilidad de la onda dinámica que relaciona el paso de tiempo con el caudal específico para el canal, la pendiente del canal y el tamaño de los elementos del dominio computacional.
- ✓ Criterio de Número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) que relaciona el paso de tiempo con las velocidades de la onda simulada y el tamaño de los elementos del dominio computacional. Este es el criterio que recomienda FLO-2D, con un valor de 0.6 para el número CFL y que por tanto fue adoptado en la modelación.

12.3.8 Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad de Manning, n , para el cauce natural, se tomó con base en la comparación directa del material que conforma el lecho, las laderas del canal, la configuración del cauce, entre otros, con los valores propuestos en Ven Te Chow (1994). A su vez, los coeficientes de rugosidad de Manning empleados en las planicies de inundación se tomaron a partir de los valores recomendados en FLO-2D (2010) según el tipo de cobertura, los cuales corresponden a los recomendados por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos (1997). En la Tabla 1 del Anexo 05, se presentan los coeficientes de rugosidad base así como el mapa de coeficientes empleados para los cauces y zonas de inundación modeladas.

12.3.9 Estructuras hidráulicas

Para considerar las diferentes estructuras hidráulicas al interior de los cauces en el Modelo FLO-2D, se construyeron curvas elevación-caudal para cada uno de los tipos y dimensiones de obras existentes. Este proceso se realizó con la ayuda del Software HY-8 de la Federal Highway Administration Agency del U.S. Department of Transportation, el cual considera tanto control en la entrada como en la salida y determina la capacidad de la obra empleando la condición más desfavorable. Dada la alta pendiente de las estructuras y de los cauces, la capacidad de las estructuras al interior del Polígono El Faro está dada por control en la entrada.



Para considerar las posibles obstrucciones en la entrada de las estructuras hidráulicas, se ha considerado un porcentaje de obstrucción de acuerdo con las condiciones geométricas y los cambios de dirección en el encole de la estructura. En el caso particular de las estructuras hidráulicas existentes en los cauces del Polígono El Faro se ha considerado un 30% de obstrucción.

12.3.10 Resultados en la Quebrada Chorro Hondo (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada Chorro Hondo se presentan en el Mapa 31, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados. En general se puede establecer que dadas las altas pendientes del cauce, el flujo tiene altas velocidades con profundidades localizadas bajas asociadas a las magnitudes de los caudales.

En esta quebrada no juegan un papel importante las obras hidráulicas existentes en el cauce, tales como puentes peatonales en madera o la batea en concreto ciclópeo, dado que en caso de que se presente una probabilidad alta para que ocurra un evento extremo estas no representan un riesgo para las construcciones que se encuentren aledañas al cauce.

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la Quebrada Chorro Hondo, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico en las condiciones existentes del sitio.

12.3.10.1 Tramo 1 (Canal Natural)

El Mapa 30 al igual que el Mapa 31, presenta las manchas de inundación para los diferentes periodos de retorno pero sobrepuestas en la ortofoto del polígono de estudio. En dicho mapa se puede observar que este tramo tiene un comportamiento de vertimiento, donde el flujo en el canal natural cruza encima del paso peatonal y es restringido lateralmente por puntos más altos de esta. Sin embargo, hay una alta posibilidad de desbordamiento hacia los costados, aumentando la probabilidad de clasificar otras áreas dentro del polígono en riesgo, ya que no se posee una estructura hidráulica que transporte y descargue el flujo adecuadamente hacia el cauce natural.

Recorriendo el cauce de la Quebrada Chorro Hondo desde el límite del Polígono El Faro (cruce del cauce con vía peatonal) a una distancia aproximada de 100 m (puente peatonal en madera) observamos construcciones, las cuales se encuentran dentro de la mancha de inundación asociado a periodos de retorno mayores que 2.33 años que hacen parte de la sección hidráulica de canal natural. Las velocidades y profundidades asociadas a los diferentes periodos de retorno se muestran en la Tabla 50. En la Tabla 51 se resumen los valores para el puente peatonal mencionado, el cual presenta condiciones de control a la entrada.



 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	 edu [®] Empresa de Desarrollo Urbano
--	--	--

Tabla 50. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 1 (Cauce natural) de la Quebrada Chorro Hondo

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.21	1.25	0.24	1.47	0.28	1.86	0.30	2.29
Profundidad Llanura (m)	0.00	1.21	0.00	1.35	0.00	1.54	0.00	1.65
Velocidad Canal (m/s)	1.27	5.84	1.27	6.84	1.35	7.97	1.37	8.52
Velocidad Llanura (m/s)	0.00	4.91	0.01	5.98	0.02	6.87	0.02	7.19

Tabla 51. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el puente peatonal en madera de la Quebrada Chorro Hondo

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.57	2.27	1.08	2.87	1.86	3.48	2.29	3.89
Profundidad Llanura (m)	0.00	1.11	0.00	1.45	0.00	1.78	0.00	2.00
Velocidad Canal (m/s)	2.44	4.50	3.45	4.45	3.58	4.34	3.50	4.64
Velocidad Llanura (m/s)	0.14	3.63	0.03	4.28	0.10	5.11	0.05	5.54

Las condiciones de velocidad y profundidad tanto en el canal como en la llanura son similares, esto debido a que la sección hidráulica que predomina es en forma de “v” donde los taludes del canal tienen pendientes fuertes, características que predominan en quebradas de alta montaña.

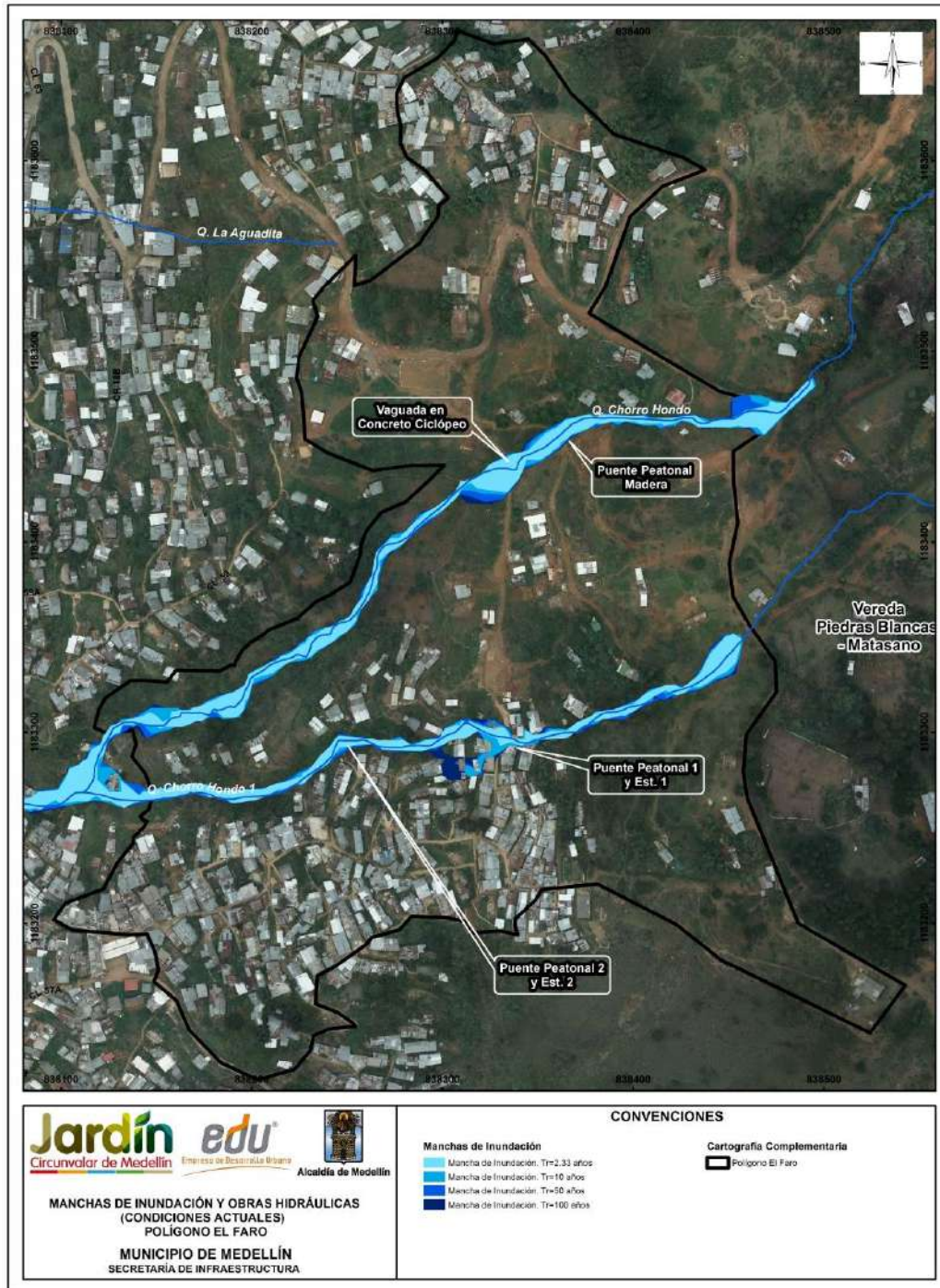
12.3.10.2 Tramo 2 (Batea Concreto Ciclópeo y Canal Natural)

En este tramo el flujo corre a través de la vía peatonal y luego en un tramo de batea en concreto ciclópeo. La mancha de inundación para todos los periodos de retorno evaluados cubre parte de esta, con tendencia hacia la margen izquierda, esto debido a una zona topográficamente plana. Luego el flujo vuelve a incorporarse hacia el cauce, esto se puede observar en el Mapa 30 apoyados con la imágenes mostradas en la Figura 176. El flujo que continúa en un cauce natural hasta el límite del polígono genera manchas de inundación que varían de ancho superficial, esto debido a los cambios de pendientes pronunciadas y suaves, así como zonas con secciones amplias donde el agua fácilmente inunda las zonas de llanura. Algunas construcciones ubicadas finalizando el tramo descrito que se encuentran en las márgenes aledañas al cauce se hallan en contacto con las manchas de inundación para todos los periodos de retorno evaluados. En la Tabla 52 se muestran el rango de velocidades y profundidades para este tramo.



Figura 176. Batea en concreto ciclópeo y margen izquierda respecto a la dirección del flujo
Tabla 52. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo2 (Cauce natural) de la
Quebrada Chorro Hondo

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.19	1.37	0.22	1.56	0.25	1.54	0.28	1.55
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.73	0.00	0.94	0.00	1.27	0.00	1.42
Velocidad Canal (m/s)	2.13	5.95	2.37	7.05	2.93	8.07	2.92	8.53
Velocidad Llanura (m/s)	0.00	6.26	0.02	7.26	0.02	8.26	0.02	8.67



Mapa 30. Mancha de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono E Faro.
(EFRManchasObrasCondiActuales_Medellin_C)

12.3.11 Resultados en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada Chorro Hondo 1 también se presentan en el Mapa 30 y el Mapa 31, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años. En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados.

En general se puede observar que dadas las altas pendientes del cauce, el flujo tiene altas velocidades con profundidades bajas asociadas a las magnitudes de los caudales. En esta quebrada juegan un papel importante las obras hidráulicas existentes tales como canales y cruces de puentes peatonales que actúan con control a la entrada, así como la construcción de viviendas que invaden a este.

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la Quebrada Chorro Hondo 1, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico en las condiciones existentes del sitio.

12.3.11.1 Tramo 1 (Canal Natural)

El inicio de este tramo no presenta estructuras y viviendas que presenten o estén en riesgo debido a la mancha de inundación asociada para los diferentes periodos de retorno. A medida que se recorre el cauce hacia aguas abajo, la pendiente longitudinal aumenta y un canal más incisivo se hace presente, aumentando las velocidades y disminuyendo las profundidades. Luego el comportamiento del flujo cambia debido a la presencia de viviendas que invaden el cauce y obstrucciones por la proyección tuberías en este y el fondo del canal escalonado (Est.1). En la Tabla 53 se presentan el rango de velocidades y profundidades para los periodos de retorno evaluados, antes de llegar al canal de fondo escalonado (Est.1).

Tabla 53. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 1 (Cauce natural) de la Quebrada Chorro Hondo 1

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.16	0.78	0.21	0.73	0.25	0.69	0.27	0.78
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.85	0.00	1.05	0.00	1.22	0.00	1.30
Velocidad Canal (m/s)	1.88	5.54	1.93	5.84	1.94	6.87	1.95	7.32
Velocidad Llanura (m/s)	0.00	3.87	0.02	4.63	0.00	5.27	0.01	5.56



Figura 177. Obstrucción en cauce e invasión por viviendas en la Quebrada Chorro Hondo 1

12.3.11.2 Tramo 2 (Canal Natural y Estructuras Hidráulicas Est.1 y Est.2)

Para el tramo donde se localiza el canal de fondo escalonado (Est.1) se presenta vertimiento hacia los costados, debido a las condiciones de obstrucción y diseño del canal. A partir de la modelación se determinó la cota de la superficie del agua en cada una de las zonas donde se ubican pasos peatonales, de esta manera se determinó que los puentes denominados 1 y 2 generan un control hidráulico ya que el nivel del agua en estas zonas se encuentra por encima de las cotas inferiores de los tableros para un periodo de retorno de 100 años en condiciones actuales (Ver Tabla 54).

Tabla 54. Verificación de las condiciones hidráulicas de los pasos peatonales o puentes en la Quebrada Chorro Hondo 1 para un $T_r=100$ años. Condiciones Actuales

PUENTE	Cota Inferior del tablero (m.s.n.m)	Cota Superficie de Agua (m.s.n.m)	Gálibo Disponible (m)
Puente 1	1993.75	1994.87	N/A
Puente 2	1961.15	1962.29	N/A

El Puente 1 que cruza el canal (Est.1), el cual no tiene capacidad hidráulica debido al galibo para evacuar eventos asociados a periodos de retorno mayores a los 10 años, también está relacionada con las dimensiones de la sección transversal a la entrada del canal que corresponden al tramo aguas arriba del puente con un ancho 0.8 m y altura de 0.6 m. En el Mapa 30 se observa como la mancha de inundación invade parte de la zona urbana y vuelve a confluir hacia el cauce. En la Tabla 55 se muestra el rango de velocidades y profundidades correspondientes a la ubicación del canal de fondo escalonado (Est.1).

Tabla 55. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 (Canal Fondo Escalonado Est.1) de la Quebrada Chorro Hondo 1

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.22	1.33	0.30	1.80	0.38	2.17	0.44	2.95
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.21	0.00	0.44	0.00	0.53	0.00	1.04
Velocidad Canal (m/s)	1.72	6.64	1.74	6.97	1.78	8.18	1.78	8.64
Velocidad Llanura (m/s)	0.11	0.88	0.04	1.36	0.08	1.71	0.03	3.45

En la parte intermedia de este tramo, que corresponde a un cauce natural entre las Estructuras Est.1 y Est.2, algunas de las construcciones aledañas al cauce se encuentran en contacto con la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años, generada por las condiciones aguas arriba que se presentan en el canal de fondo escalonado (Est.1). Para esta parte intermedia del Tramo 2 se tiene un rango de velocidades y profundidades que se muestran en la Tabla 56.

Tabla 56. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 (Canal natural) de la Quebrada Chorro Hondo 1

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.26	1.14	0.21	0.93	0.34	2.08	0.42	2.10
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.58	0.00	0.51	0.00	1.16	0.00	1.17
Velocidad Canal (m/s)	4.01	8.12	3.62	7.43	5.22	9.83	5.69	9.82
Velocidad Llanura (m/s)	0.03	1.61	0.03	1.70	0.03	2.18	0.01	2.13

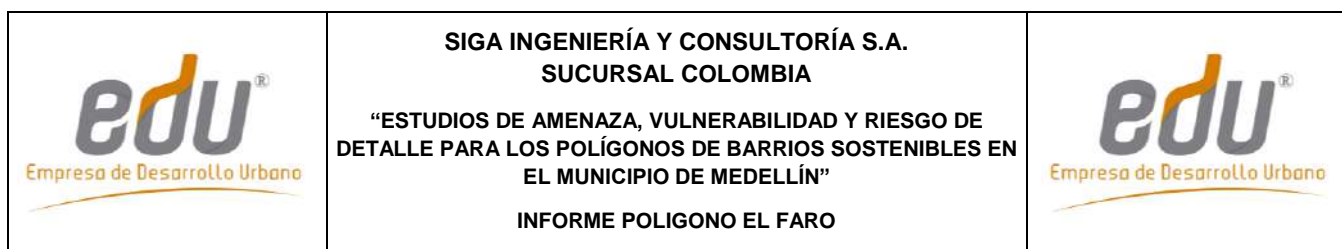
Finalizando este tramo, se encuentra un canal de fondo escalonado (Est.2), el cual cruza el Puente Peatonal 2 ubicado en la Servidumbre 16D-24 y tiene incapacidad hidráulica con control a la entrada debido que no tiene el galibo adecuada para transportar y evacuar eventos asociados a periodos de retorno mayores que 10 años, generando vertimiento hacia los costados y cruzando por encima del paso peatonal. Sin embargo, la mancha de inundación para 100 años de periodo de retorno, no genera riesgo para construcciones cercanas debido a ubicaciones topográficas más altas a las profundidades del flujo. En la Tabla 55 se muestra el rango de velocidades y profundidades correspondientes a la ubicación del canal de fondo escalonado (Est.2).

Tabla 57. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 2 (Canal Fondo Escalonado Est.2) de la Quebrada Chorro Hondo 1

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.37	1.58	0.38	1.93	0.67	3.01	0.50	3.09
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.32	0.02	0.54	0.00	1.06	0.00	1.11
Velocidad Canal (m/s)	1.61	5.74	1.61	5.69	1.61	7.21	1.61	7.60
Velocidad Llanura (m/s)	0.09	1.28	0.10	1.36	0.14	2.30	0.06	2.21

12.3.11.3 Tramo 3 (Cauce Natural)

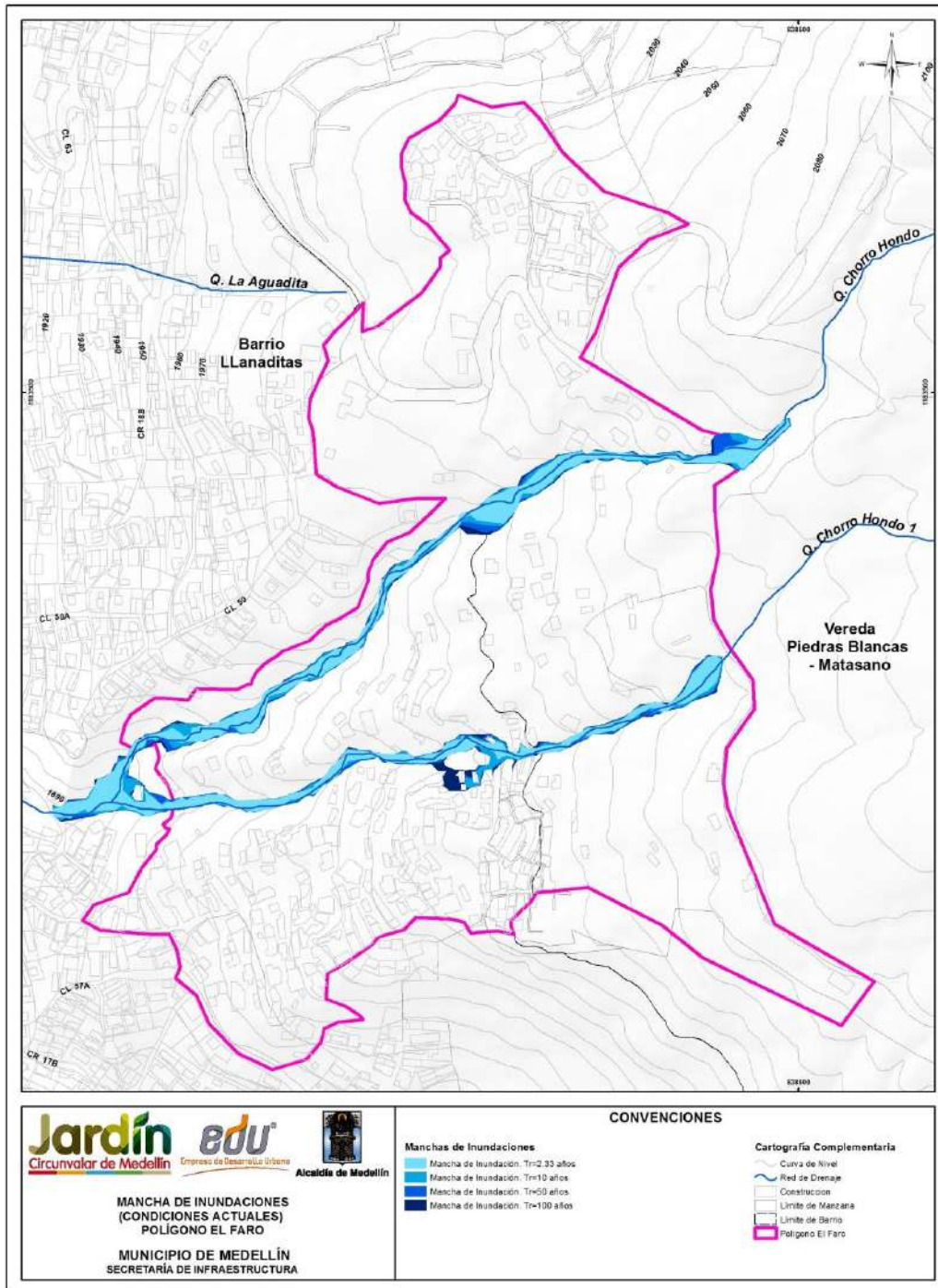
Este tramo inicia luego de la descarga de la Estructura Hidráulica Est.2, que continua en un canal natural confluyendo en la Quebrada Chorro Hondo. Las manchas de inundación





asociadas a los diferentes periodos de retorno no representan un riesgo para las construcciones aledañas al cauce contenidas dentro del polígono de estudio. También se observa que no hay una variabilidad en el ancho superficial, ya que para este tramo se presentan secciones transversales y pendientes constantes. El rango de velocidades y profundidades para los periodos de retorno evaluados se muestran en la Tabla 58.

Tabla 58. Velocidades y profundidades máximas de flujo en el Tramo 3 (Canal Natural) de la Quebrada Chorro Hondo 1

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal (m)	0.31	1.01	0.25	1.09	0.40	1.57	0.25	1.03
Profundidad Llanura (m)	0.00	0.57	0.00	0.51	0.00	0.93	0.00	0.65
Velocidad Canal (m/s)	4.36	8.33	5.46	8.44	5.78	10.27	5.78	9.82
Velocidad Llanura (m/s)	0.04	1.58	0.04	1.76	0.02	1.91	0.02	2.10



Mapa 31. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono El Faro.
(21_EFRManchalnundaciones_Medellin_C y 21_EFRManchalnundaciones_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

13. AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

13.1 METODOLOGÍA

13.1.1 Objetivo y aspectos generales

Con la metodología planteada se pretende implementar un método cuantitativo y fácilmente reproducible, que permita definir las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa. La metodología implementada es de reconocida validez, toda vez que ha permitido delimitar y caracterizar los diferentes niveles de amenaza (alta, media y baja) de la zona del “Proyecto Barrios Sostenibles”

De forma general, la metodología comprende el análisis de las condiciones de estabilidad determinándose el factor de seguridad a partir de una teoría de equilibrio límite. Posteriormente, se realizan los respectivos análisis para determinar la amenaza por movimientos en masa, mediante el cálculo de la probabilidad de falla, considerando la variabilidad intrínseca de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un factor detonante.

El proceso de determinar el factor de seguridad y la probabilidad de falla al interior de la UMI y del polígono, se realiza para ciertos escenarios que comprenden condiciones actuales y naturales de la ladera y bajo la acción de escenarios críticos como elementos detonantes, como por ejemplo la actuación del sismo. Finalmente, se realiza un análisis considerando las obras proyectadas, para lo cual, en el caso de la evaluación de la estabilidad, se recurre a análisis puntuales de secciones bidimensionales en las que igualmente se determinan las condiciones de amenaza.

Se hizo uso de toda aquella información básica útil y disponible desde el punto de vista geológico y geotécnico, como por ejemplo, la realización de exploración geotécnica, la caracterización de los materiales a través de los ensayos de laboratorio y la instrumentación geotécnica instalada. Finalmente, los resultados se presentan de forma regional o general sobre el área de estudio correspondiente a la UMI, a través de una Herramienta SIG.



Se resalta que la metodología mediante el uso de teorías de equilibrio límite, factor de seguridad y probabilidad de falla, sólo es aplicable para movimientos de remoción en masa como deslizamientos, flujos o desprendimientos de roca. Cualquier otro tipo de movimiento o problemática, como por ejemplo subsidencias y fenómenos erosivos, no pueden ser analizados de forma cuantitativa.

13.1.2 Escenarios de análisis

Para el análisis de la amenaza por movimientos en masa se consideraron básicamente cuatro escenarios, los cuales se explican de forma resumida a continuación.

13.1.2.1 Escenario 1

Este escenario corresponde a la situación actual y para los procesos por movimientos en masa identificados como parte del modelo geológico-geotécnico propuesto para el área

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

objeto de estudio, el cual fue presentado en el Capítulo 4 de este informe. En este escenario, se determinó el factor de seguridad y la probabilidad de falla considerando la variabilidad natural de los parámetros de resistencia al corte de cada uno de los materiales geológicos y geotécnicos que se encuentran al interior de la UMI.

Considerando lo encontrado a través de las perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, este análisis se realizó en condiciones secas. Esto porque para efectos de los cálculos solo con uno de los piezómetros de esta UMI fue posible interceptar el nivel de aguas subterráneas y este se encuentra profundo, en el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, sin que afecte entonces los cálculos de estabilidad.

13.1.2.2 Escenario 2

El segundo escenario corresponde a las condiciones normales de lluvia y también a las extremas de dicha variables. No obstante, en el caso particular de la UMI objeto de este estudio, la zona presenta varias características que conllevan a considerar a la lluvia como un elemento de poca relevancia en la detonación de movimientos en masa.



Inicialmente, es importante considerar un nivel de aguas subterráneo profundo, según los registros de perforaciones y el seguimiento de la instrumentación se puede hablar de un nivel de aguas subterráneo de 18.2 m de profundidad (Numeral 8.6.1).

Otro aspecto involucra las condiciones hídricas de la UMI por efecto de pendiente y el uso del suelo. En la UMI El Faro - Golondrinas se presentan pendientes en el terreno mayores que 30° y la presencia de dos drenajes naturales que funcionan como sistemas de canalización de las aguas de escorrentía. Los análisis de infiltración/escorrentía mostrados en el Capítulo 11, muestran coeficientes de escorrentía hasta de 42% para el caso de las lluvias más probables (TR 2.33 años) y de 58% para el caso de las lluvias más críticas (TR 100 años). Los tiempos de concentración promedio asociados a estas condiciones de pendiente son bajos, entre de 8.04 min y 10.48 min, lo que demuestra que la cuenca responde rápido en términos de drenaje.

En cuanto a los usos del suelo, la UMI El Faro - Golondrinas se caracteriza por poseer aproximadamente un 80% en uso forestal y el otro 20% en uso urbano.

Finalmente, se tiene lo que corresponde a las características físicas e hidráulicas de los materiales en superficie. Los suelos encontrados en la superficie de la UMI, clasifican principalmente como limos de alta plasticidad (MH) donde sus índices de plasticidad no superan 25%, los límites líquidos están entre 44% y 64% y los porcentajes de saturación son en promedio del 83%. Adicionalmente, la determinación de coeficientes de permeabilidad a través de ensayos de laboratorio de consolidación, realizados sobre algunas muestras de la zona arrojaron valores no menores de 1×10^{-9} m/s, lo que hace que se trate de materiales altamente impermeables. En este sentido vale la pena retomar lo anotado en el Numeral 8.5 y en particular en el Numeral 8.5.2 con respecto al regolito de la zona de estudio.

Teniendo en cuenta los anteriores argumentos, se considera improbable la creación de frentes húmedos superficialmente por efectos de infiltración, o el ascenso de niveles freáticos subterráneos que puedan afectar la estabilidad de las laderas.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

13.1.2.3 Escenario 3

El tercer escenario corresponde al sismo al que podrá estar expuesta el área de estudio, esto de acuerdo con la normativa en el Área Metropolitana de Valle de Aburrá. Para este caso se consideraron los criterios establecidos en el Capítulo 9 donde se establece la aplicación de un coeficiente espectral horizontal de 0.25g correspondiente 2/3 del coeficiente espectral máximo de diseño igual a 0.38 para un periodo de retorno de 475 años.

El análisis de probabilidad de falla contempla entonces el análisis considerando el sismo de 0.25g para 475 años, luego se encontrará la probabilidad de falla anual que será dividiendo la probabilidad de falla del análisis anterior por el periodo de retorno de 475 y finalmente la probabilidad de falla anual será llevada a una probabilidad de falla a 50 años a través de una función exponencial de probabilidad.

13.1.2.4 Escenario 4

El cuarto y último escenario corresponde a la situación generada por el cambio de la aptitud del uso (licencia de urbanización, parcelación, construcción de nuevas obras de urbanismo, y plan de construcciones más probables). Se tendrán en cuenta para cada caso cortes, excavaciones, rellenos, sobrecargas, modificaciones del drenaje, entre otros.

Estos análisis de estabilidad se realizan mediante análisis bidimensionales en las zonas donde se tengan proyectadas las obras del Proyecto Barrios Sostenibles y sus respectivas obras de mitigación una vez identificado el riesgo.

13.1.3 Cálculo de los factores de seguridad

El análisis de amenaza por movimientos en masa, considera la evaluación de los factores de seguridad de las laderas.

Los análisis de estabilidad se desarrollaron mediante teorías de equilibrio límite. Fenómenos de inestabilidad ocurridos en la zona y la hipótesis de la poca presencia de espesores de suelo en las zonas de alta pendiente, direccionan a un mecanismo de falla planar. Para esto, se utilizó entonces la Teoría de Taylor (1948), conocida como la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 178).

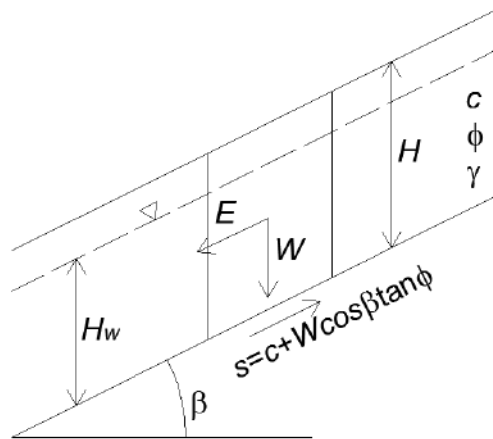


Figura 178. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar

Para condiciones estáticas normales, la teoría del talud infinito se determina con base en la siguiente expresión:



$$FS_{estático} = \frac{c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta \sin \beta}$$

Para condiciones pseudoestáticas normales, la teoría del talud infinito puede ser expresada como:

$$FS_{dinámico} = \frac{c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)}$$

Es así como para los análisis de estabilidad, el factor de seguridad está en función del espesor de la capa de suelo (H), la posición del nivel freático (H_w), la inclinación o pendiente de la ladera (β) y los parámetros de resistencia al cortante de los materiales, expresados estos últimos a través del ángulo de fricción interna (ϕ), la cohesión (c) y el peso unitario (γ). En el caso del análisis pseudoestático está en función adicional de la aceleración crítica horizontal (A_h).

En cuanto al espesor de la capa de suelo (H), vale la pena explicar la forma en que fue determinado. Como se presentó en el Capítulo 4 de este informe, la unidad geológica predominante en la zona de estudio corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv), depósitos de deslizamiento (Qd), depósitos coluviales, depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e). Además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. Considerando entonces las diferentes formaciones geológicas de la zona, se establecieron varios perfiles geológico geotécnicos que atraviesan la UMI El Faro - Golondrinas de un extremo al otro. Con estos perfiles, se pudo correlacionar y conformar un modelo tridimensional de espesores a través de superficies de cada uno de los materiales de suelo. Dichas

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

superficies fueron empleadas para programar con Herramientas SIG la forma en que debía entenderse el espesor H y los correspondientes parámetros de resistencia al corte γ , c y ϕ . Dicha herramienta hizo diferentes modelaciones del factor de seguridad con diferentes valores de H, variando desde 0 m hasta 10 m obteniéndose el mínimo factor de seguridad. Finalmente, es importante aclarar que el valor máximo considerado de 10 m corresponde a lo registrado históricamente en la zona, con procesos morfodinámicos cuyo espesor máximo comprometido es mucho menor que 10 m.

La expresión que acaba de presentarse para condiciones pseudoestáticas normales viene fundamentada por la teoría propuesta por Newmark (1965) para estimar el desplazamiento permanente generado por un movimiento sísmico en presas de tierra.

Vega (2013) resume la metodología de Newmark (1965) como un procedimiento donde se modela el talud como un bloque rígido de suelo que puede deslizarse a lo largo de un plano situado en su base bajo cierto grado de inclinación. El análisis de estabilidad con talud infinito es el método más común para modelar fenómenos de inestabilidad en un marco de escala de cuenca. Se basa en una geometría de deslizamiento de tierra simplificado, que asume una superficie de deslizamiento planar en una pendiente planar infinitamente extendida, tanto lateral como longitudinalmente. El análisis supone que la superficie de deslizamiento es paralelo a la superficie del suelo y coincidente con un sustrato impermeable. Este método analítico permite estimar las deformaciones de taludes y laderas ante la acción sísmica, y corresponde a un modelo simplificado en que el suelo se asume con respuesta rígida-plástica. Así mismo, se asume que el suelo no sufre deformaciones hasta cierto valor crítico de la fuerza solicitante y cuando ésta es superada se deforma plásticamente. Irregularidades en la pata y la cresta de la ladera pueden ser ignoradas y las propiedades del suelo y las presiones de poro en cualquier distancia dada por debajo de la superficie del suelo se suponen constantes (Graham 1984).

La fuerza crítica se asocia a una aceleración crítica (A_h) de la masa potencialmente deslizante y mientras las aceleraciones sean inferiores a esta, no se producen deformaciones debido a su comportamiento rígido. Cuando A_h es excedida, la masa se deforma irreversiblemente. Así mismo, la exactitud relativa de este método depende de la suposición de conducta rígida-plástica, pero el resto de problemas geotécnicos, derivados del análisis de las posibles superficies de falla y de las propiedades del material, está reunido en el factor de seguridad (FS). Es decir, es de aplicación general en cuanto a la geotecnia. Este método es aplicado cuando el bloque de masa de suelo se desliza en forma traslacional, pero con algunas modificaciones puede aplicarse a deslizamientos rotacionales.

Según Figueras et al. (2005), el análisis de Newmark, se ha venido usando en diseños de terraplenes antrópicos desde hace más de 15 años y recientemente se ha calibrado y comparado en los casos de fallas en taludes naturales inducidas por sismos demostrando su validez en la predicción de desplazamientos de un deslizamiento durante un movimiento sísmico.

13.1.4 Cálculo de la probabilidad de falla

Finalmente, una vez determinadas las condiciones de estabilidad de la zona reflejados de forma cuantitativa en el factor de seguridad, se procede con el cálculo de la probabilidad de falla.

La probabilidad de falla se determina como la probabilidad de que los valores considerados límites sean excedidos. En el caso del factor de seguridad (FS), la probabilidad de falla se determina como la probabilidad de que ese factor de seguridad sea menor que la unidad.

Para determinar entonces la probabilidad de que ocurra un deslizamiento en ladera, se recurre a los métodos probabilísticos que consisten en herramientas que introducen la incertidumbre en la formulación de los problemas para obtener la probabilidad de que un sistema o estructura no cumpla los requisitos de diseño o estabilidad. Utilizan técnicas de confiabilidad estructural, de estimación de probabilidades y de análisis de riesgos. Estos son los adoptados para modelar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos para estimar la probabilidad de falla de los taludes (Vega, 2013).

Los métodos probabilísticos más utilizados en el análisis de estabilidad y probabilidad de falla en geotecnia son:

- ✓ Método de las estimativas puntuales
- ✓ Método de primera orden segundo momento (FOSM)
- ✓ Método de primera orden momento de confiabilidad (FORM)
- ✓ Monte Carlo

Para este proyecto, la probabilidad de falla al deslizamiento será evaluada utilizando la metodología del índice de confiabilidad (β) el cual es una aplicación directa del método de Primera Orden y Segundo Momento (FOSM). Este método del índice de confiabilidad (β) será utilizado sobre las ecuaciones de resistencia (R) y la carga (C) que definen el factor de seguridad por equilibrio limite.

La diferencia entre la resistencia (R) y la carga (C) es lo que se denomina como margen de seguridad (M).

$$M = R - C$$

La resistencia y la carga manejan variaciones, por lo que estas dos magnitudes poseen momentos estadísticos como valores medios o esperados, desviaciones y covarianzas entre otros.

$$\mu_M = \mu_R - \mu_C$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_C^2 - 2\rho_{RC}\sigma_R\sigma_C$$

Donde μ_R y μ_C son las medias o esperanzas de la resistencia y la carga respectivamente, σ_R y σ_C son las desviaciones estándar de la resistencia y la carga respectivamente, elevadas al cuadrado, estas últimas correspondiendo a la $Var(R)$ y la $Var(C)$ respectivamente. Finalmente, ρ_{RC} es el coeficiente de correlación entre la carga y la resistencia.

El índice de confiabilidad (β) expresa la distancia que existe entre la media y en este caso el valor crítico del margen de seguridad expresado en unidades de desviación estándar. Si la carga y la resistencia no presentan correlación alguna, entonces:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_C}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_C^2}}$$

Partiendo de la definición de factor de seguridad al deslizamiento presentada en el numeral anterior, es posible reorganizar los términos de la definición y separar los esfuerzos resistentes y los esfuerzos actuantes causados por las fuerzas desestabilizadoras. Las variables que representan la resistencia (R) y la carga (C) siguen una distribución normal en los rangos de interés. Reorganizando los términos de la ecuación de factor de seguridad se tiene en el caso estático pseudo estático lo indicado a continuación:

Caso Estático

Media de la resistencia

$$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$$

Media de la carga

$$\mu_C = \gamma H \cos \beta \sin \beta$$

Caso Seudoestático

Media de la resistencia

$$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$$

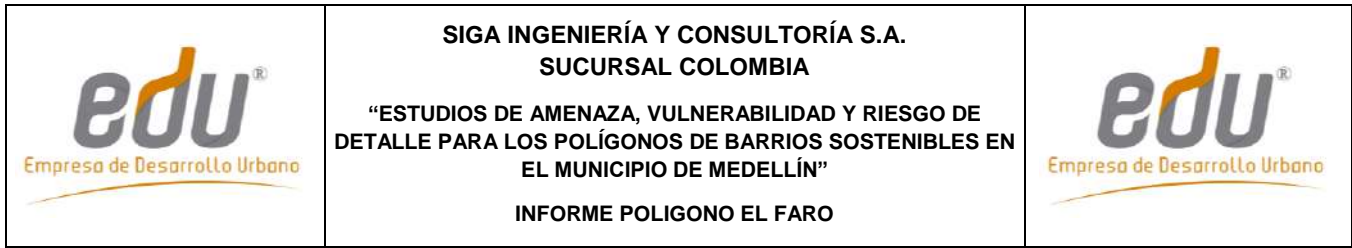
Media de la carga

$$\mu_C = \gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)$$

Para determinar las varianzas de la resistencia y de la carga (desviaciones estándar al cuadrado) de una variable definida por varias variables aleatorias X_i , en este caso la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) se hace:

$$\sigma_{R,C}^2 = Var(R, C) = \sum_{i=1}^n a_i^2 \cdot Var(X_i)$$

Luego entonces la varianza de la carga (C) y de la resistencia (R) se expresa en el caso estático como:



Caso Estático

Varianza de la resistencia

$$\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$$

Varianza de la carga

$$\sigma_C^2 = 0$$

Caso Seudoestático

Varianza de la resistencia

$$\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$$

Varianza de la carga

$$\sigma_C^2 = 0$$

En la varianza de la carga para ambos casos, este valor es cero, dado que dentro de él no se contempla ninguna variable aleatoria.

La probabilidad de falla, p_f , o la probabilidad que el factor de seguridad sea inferior a 1.0 se puede determinar mediante la expresión:

$$p_f = 1 - \Phi(\beta)$$

Donde $\Phi(\beta)$ es la función de distribución de probabilidad normal acumulada evaluada en el punto β que corresponde a la confiabilidad.



Finalmente, el resultado esperado es que en cada condición se tenga un valor del factor de seguridad con una probabilidad de falla o de ocurrencia. El siguiente paso corresponde a la agregación de dichas probabilidades y factores de seguridad empleando el teorema de probabilidad total.

$$P_{total} = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \dots \cup P_n$$

Donde P_1, P_2, P_3, P_n son un grupo de eventos mutuamente exclusivos que pueden corresponder por ejemplo, a la probabilidad de falla asociada al analizar las condiciones actuales del talud, o la probabilidad de falla en condiciones de nivel freático extremo o incluso, a la probabilidad de falla cuando ocurre el sismo.

13.1.5 Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Para Van Westen & Terlien (1996), la mayoría de los modelos deterministas son específicos del sitio y no tienen en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada. Los modelos que tienen en cuenta la distribución espacial de los parámetros de entrada se denominan "modelos distribuidos". Ahora bien, los modelos distribuidos deterministas, requieren mapas donde se tenga la distribución espacial de los datos de entrada. La aplicación de modelos deterministas para la zonificación de la amenaza al deslizamiento en áreas extensas, no ha llegado a un desarrollo más amplio, debido a la variabilidad regional de variables geotécnicas como la cohesión, ángulo de fricción interna, el espesor de las capas, o profundidad del nivel freático. Por otra parte, el cálculo de los factores de seguridad en zonas más extensas, implica una cantidad extremadamente grande de cálculos, que no podrían ser ejecutados sin el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

Actualmente, sólo el uso de modelos deterministas resulta en mapas reales de peligro, de acuerdo con la definición de Varnes (1984): “la amenaza significa la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un plazo determinado de tiempo y dentro de una zona determinada”. Los modelos deterministas, junto con la información de magnitud/frecuencia de eventos detonantes como las lluvias o los terremotos, hacen posible derivar una probabilidad de falla, que puede ser utilizado en estudios de riesgo.

Cualquier estudio de riesgo requiere de la información espacial de la superficie de la zona de estudio, sus características topográficas, la geología, la hidrología y los usos del suelo, entre otros. Para gestionar todo este volumen de información, se requiere disponer de Sistemas de Información Geográfica, ya que estas herramientas permiten administrar tal volumen de datos, de manera rápida y detallada, y permiten además la presentación gráfica de resultados. En la actualidad, la integración en un SIG con modelos matemáticos facilita procesos de simulación, y acelera el análisis espacial de las variables y de los parámetros requeridos (Vega, 2013). Estas herramientas permiten centralizar e integrar información normalmente dispersa en diferentes formatos, al igual que ofrece sistemas dinámicos de información, puesto que los datos pueden ser actualizados periódicamente para producir nueva información de acuerdo con las necesidades de diferentes aplicaciones y usuarios.

El uso de las herramientas SIG posibilitó en este caso efectuar evaluaciones multi amenazas, permitiendo combinar eficientemente varios conjuntos de datos espaciales en modelos y escenarios para diferentes grados de amenazas. En el caso de los movimientos en masa, la herramienta SIG facilita la obtención de los parámetros morfométricos necesarios para realizar estudios de deslizamientos superficiales mediante técnicas multivariantes, así como la evaluación de las condiciones de rotura e identificación de áreas potencialmente inestables, y las condiciones de movilidad del desplazamiento. (Lantada, 2007).

Según Xie et al. (2003), el cálculo de la estabilidad para la evaluación deslizamiento de tierra se puede realizar dentro o fuera del SIG. Si se realizan los cálculos fuera del SIG, este sólo se utilizaría como una base de datos espacial para almacenar, visualizar y actualizar los datos de entrada. La principal ventaja de este enfoque es que los modelos externos existentes pueden utilizarse sin perder tiempo en la programación de los algoritmos de modelo en el SIG. Una desventaja de hacer cálculos de los modelos fuera de los SIG, es la complicación causada por la conversión de datos hacia y desde modelos externos. La conversión de datos puede ser un problema importante porque la mayoría de los programas tienen su propio formato de datos, o en el caso más desfavorable, algunos tienen módulos de entrada especiales que sólo permiten el ingreso de datos de forma manual aumentando el tiempo de procesamiento y la probabilidad del error. Otra desventaja del uso de modelos externos es la representación de los resultados de los cálculos del modelo, que normalmente no se distribuyen espacialmente, en forma de mapas en un SIG. Para superar el problema de la conversión de datos, los cálculos del modelo deterministas pueden ser realizados dentro del SIG. La desventaja de este enfoque es, sin embargo, que sólo modelos simples se puede aplicar fácilmente debido a las limitaciones con respecto a la utilización de algoritmos complejos, procedimientos de

iteración y la tercera dimensión en el GIS convencional, de dos dimensiones. Xie et al. (2003) cita algunos trabajos utilizando la teoría de talud infinito, que permiten el cálculo del factor de seguridad para cada píxel individual, a través de la implementación del SIG (Aleotti & Chowdhury, 1999; Anbalagan, 1992; Carrara, 1995; Dai & Lee, 2001).

Según Van Westen & Terlien (1995), la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 178) es el método más adecuado para el uso de modelos deterministas en un entorno SIG citando trabajos como los de Ward et al. (1982) y Brass et al. (1989). Esta teoría, es el único modelo que calcula inestabilidad de la ladera sobre una base de píxel, y por lo tanto es muy adecuado para ser utilizado en un SIG. El modelo de pendiente infinita unidimensional describe la estabilidad de taludes en la forma más simple. Su limitante radica en que sólo podría ser aplicable para el cálculo de superficies de falla planares. La estabilidad de taludes se calcula para los píxeles en un mapa, utilizando la información combinada de varios mapas de entrada, tales como la pendiente del terreno, el espesor del suelo, la resistencia del suelo, y la profundidad del nivel freático. Los cálculos para cada píxel individual resultarán en valores del factor de seguridad, que pueden utilizarse para crear un mapa de amenaza (Figura 179).

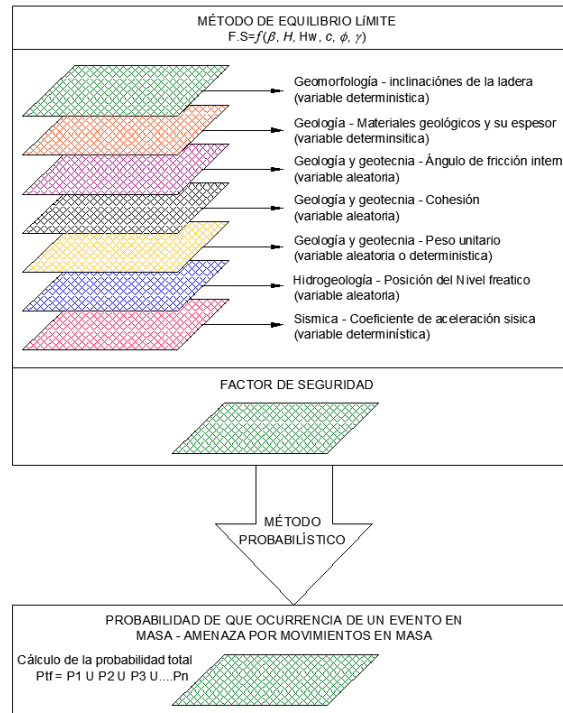


Figura 179. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa

A través de un método probabilístico, obtener la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno de inestabilidad que equivaldría en este caso, a la amenaza por un fenómeno de inestabilidad.

Para todos los escenarios, se elaboraron mapas de amenaza a escala 1:2.000 o de mayor detalle para el área urbana (1:1.000 o 1:500) y 1:5.000 o de mayor detalle para el área rural (1:1.000 o 1:500).

Finalmente, dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa también se considerará el efecto de la red hídrica, en particular lo relacionado con los procesos de socavación en los cauces que pudieran afectar la estabilidad de las laderas adyacentes. Debido a que estos deslizamientos o procesos son difíciles de modelar con una metodología regionalizable, se partió de los resultados de la estimación de la socavación en los cauces para evaluar los factores de seguridad a través de análisis de estabilidad convencionales bidimensionales. Dichos análisis se realizaron de forma local, sobre las secciones donde se manifiesten las mayores afectaciones por efectos de la dinámica fluvial.

13.1.6 Criterios para calificar la amenaza



La Ficha Técnica del Proyecto Barrios Sostenibles estableció unos criterios para juzgar el factor de seguridad y la probabilidad de falla que definen la amenaza por movimientos en masa. No obstante, esta oficina consideró que en el caso de los criterios de factor de seguridad, los mismos son estrictos y se alejan de las recomendaciones establecidas por algunas referencias de gran aceptación científica como lo son el Control Geotécnico de Hong Kong (GEO), el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Por lo anterior se consideró la propuesta de rangos de factor de seguridad mostrado en la Tabla 59. En la Tabla 60 se presentan los rangos en términos de probabilidad de falla expuestos por la ficha técnica mencionada, considerando que estos se aplican para un periodo proyectado de 50 años.

Tabla 59. Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad

Nivel de Amenaza	Factor de Seguridad (F.S)
Bajo	>1.5
Media	1.2 a 1.5
Alto	<1.2

Tabla 60. Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años

Nivel de Amenaza	Probabilidad de Falla (%P.F)
Bajo	0.00% a 3.20%
Media	3.20% a 5.50%
Alto	>5.50%

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

13.2 RESULTADOS

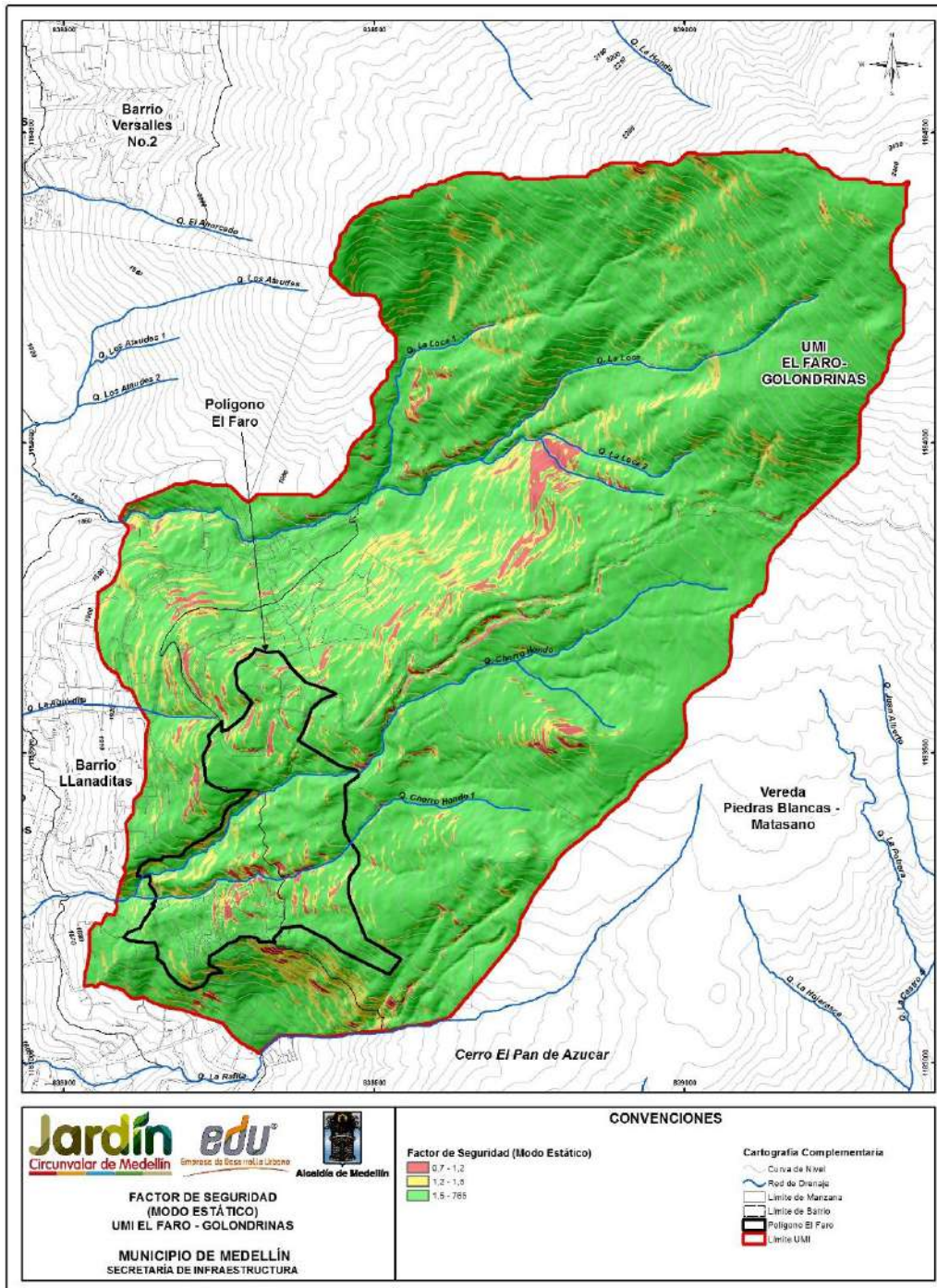
El Mapa 32 y Mapa 33 presentan los mapas de análisis de factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas, respectivamente.

El Mapa 34 muestra los resultados de los análisis de probabilidad de falla considerando las variaciones en los parámetros de resistencia al corte. El resultado obtenido es coherente con el resultado del mapa de aptitud geológica – geotécnica (Mapa 20). Esto se evidencia en el hecho de que las zonas de amenaza alta y media por movimientos en masa debido a la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte, corresponden a las zonas catalogadas en la aptitud geológica como zonas no aptas y las zonas clasificadas con amenaza baja se correlacionan con las zonas aptas y zonas aptas con restricciones.

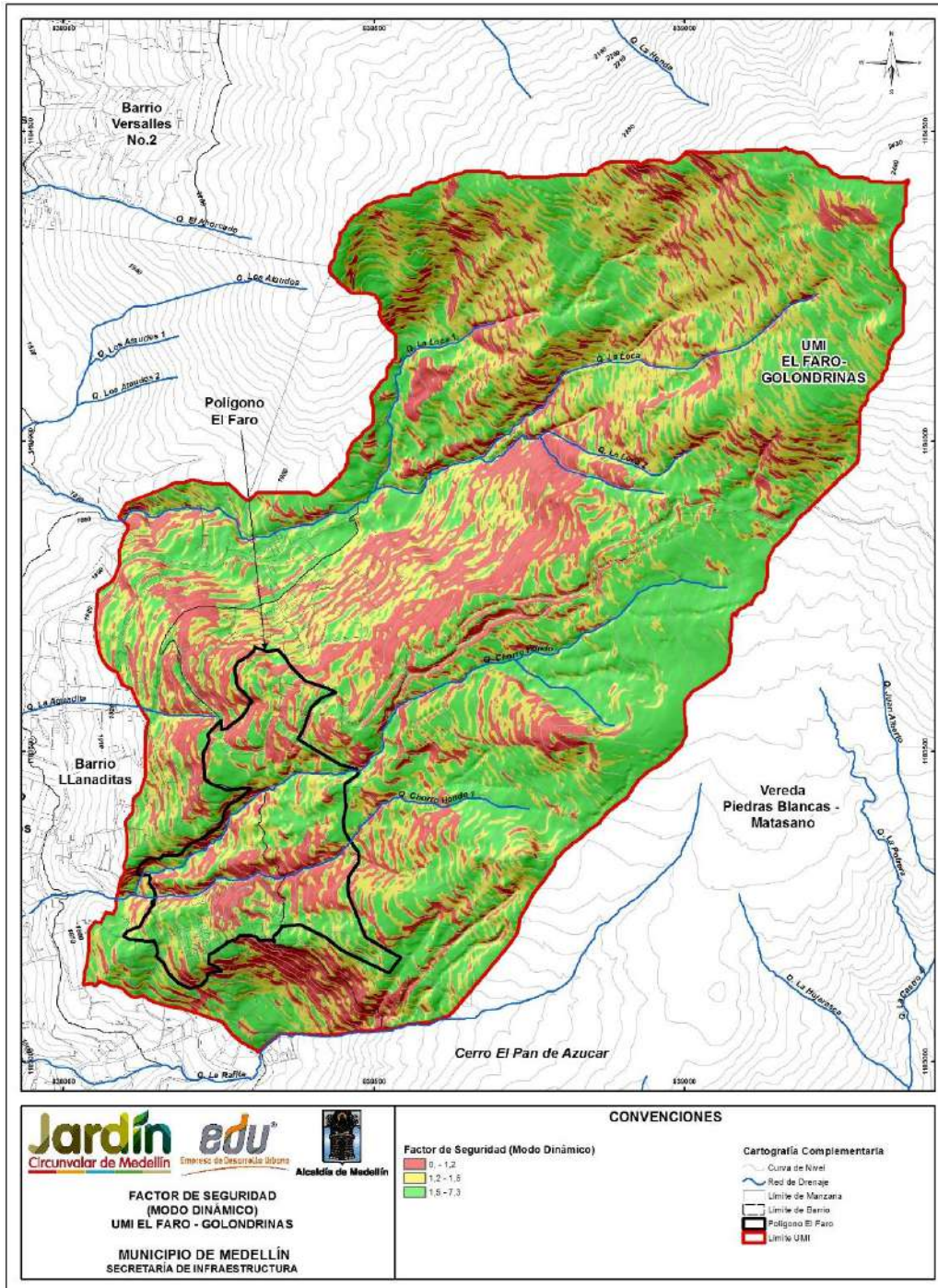
Posteriormente, se evaluó la probabilidad de falla considerando el efecto del sismo, con la actuación de un sismo de magnitud 0.25g que equivale a 2/3 de 0.38g para el cual se tiene un periodo de retorno de 475 años. Como se muestra en el Mapa 35, se evidencia la afectación de casi la totalidad de la zona con probabilidades de falla aproximadamente en un 80%. Es importante aclarar que este escenario es considerando que el sismo de periodo de retorno de 475 años podría actuar de forma inmediata.

Para efectos de encontrar la probabilidad de falla a 50 años de proyección, se procedió a analizar el efecto del sismo dividiendo los resultados obtenidos en el Mapa 35 por el respectivo periodo de retorno de 475 años. Esto permitió obtener el Mapa 36 que muestra la probabilidad de falla anualizada considerando la afectación del sismo de la zona. Posteriormente, para hacer la proyección de la probabilidad de falla a 50 años, que se considera es el periodo de exposición, se utilizó una función de probabilidad exponencial.

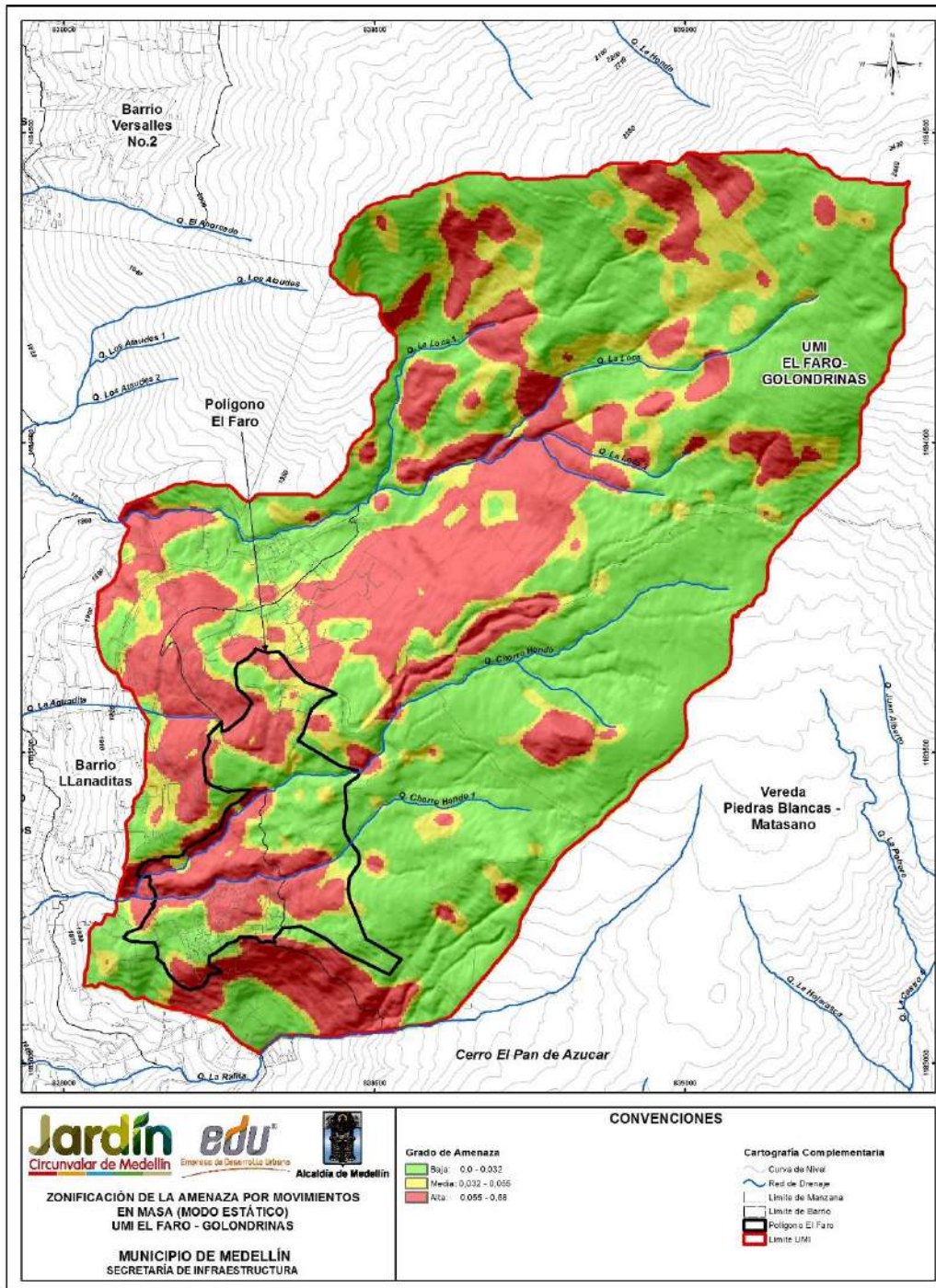
Finalmente, en el Mapa 37, se presenta el mapa de zonificación de la amenaza total considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte evaluado en el análisis del Mapa 34 y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. Considerándose éste el principal producto de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, se puede establecer que se obtienen zonas en los tres grados de amenaza considerados, baja (probabilidad de falla menor que el 3.2%), media (probabilidad de falla entre el 3.2% y el 5.5%) y alta (probabilidad de falla mayor que el 5.5%). Las áreas con probabilidad de falla baja predominan y se extienden a lo largo y ancho de la UMI.



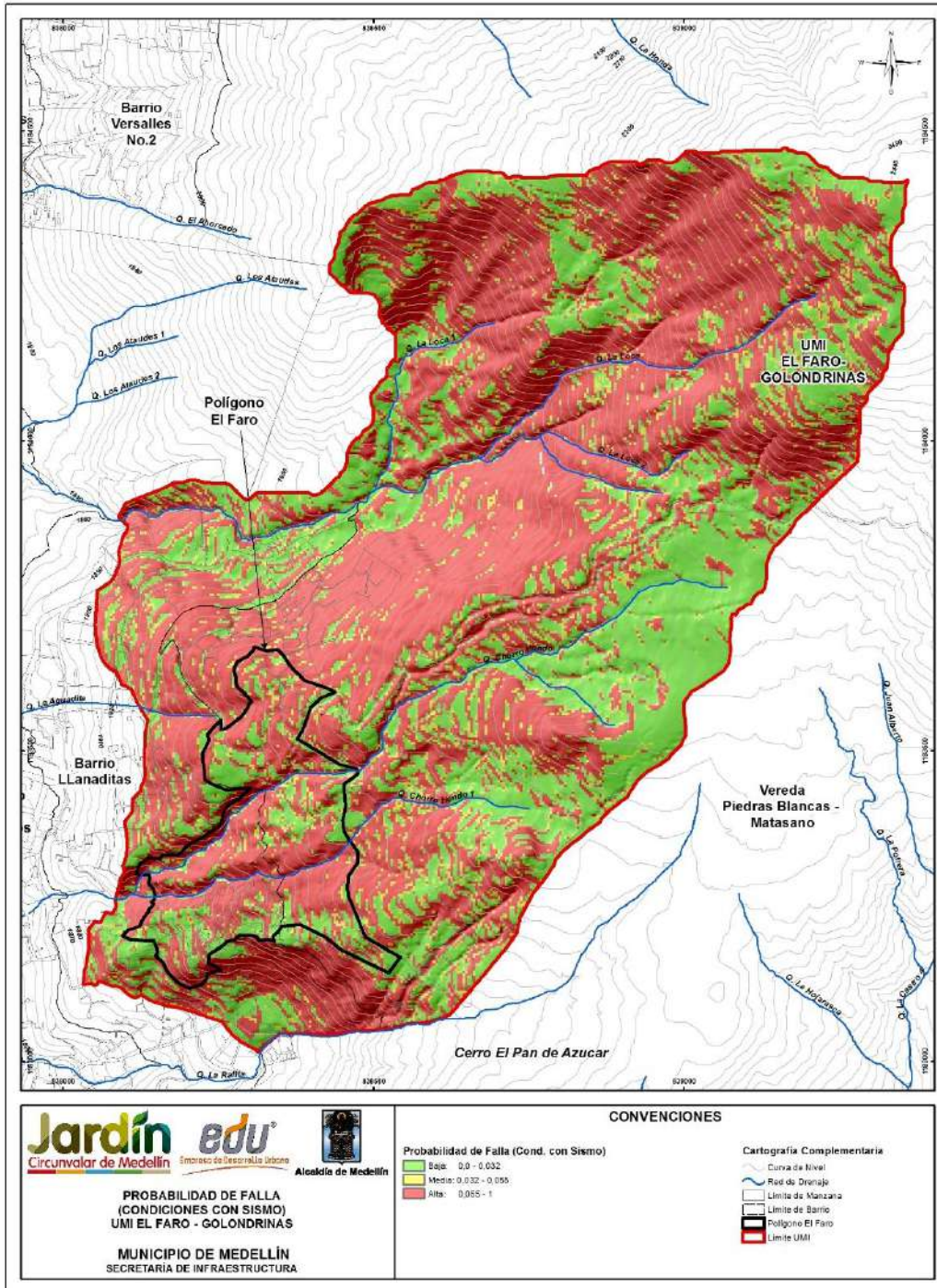
Mapa 32. Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones estáticas (EFRFactorSeguridadEstaticoUMI_Medellin_C)



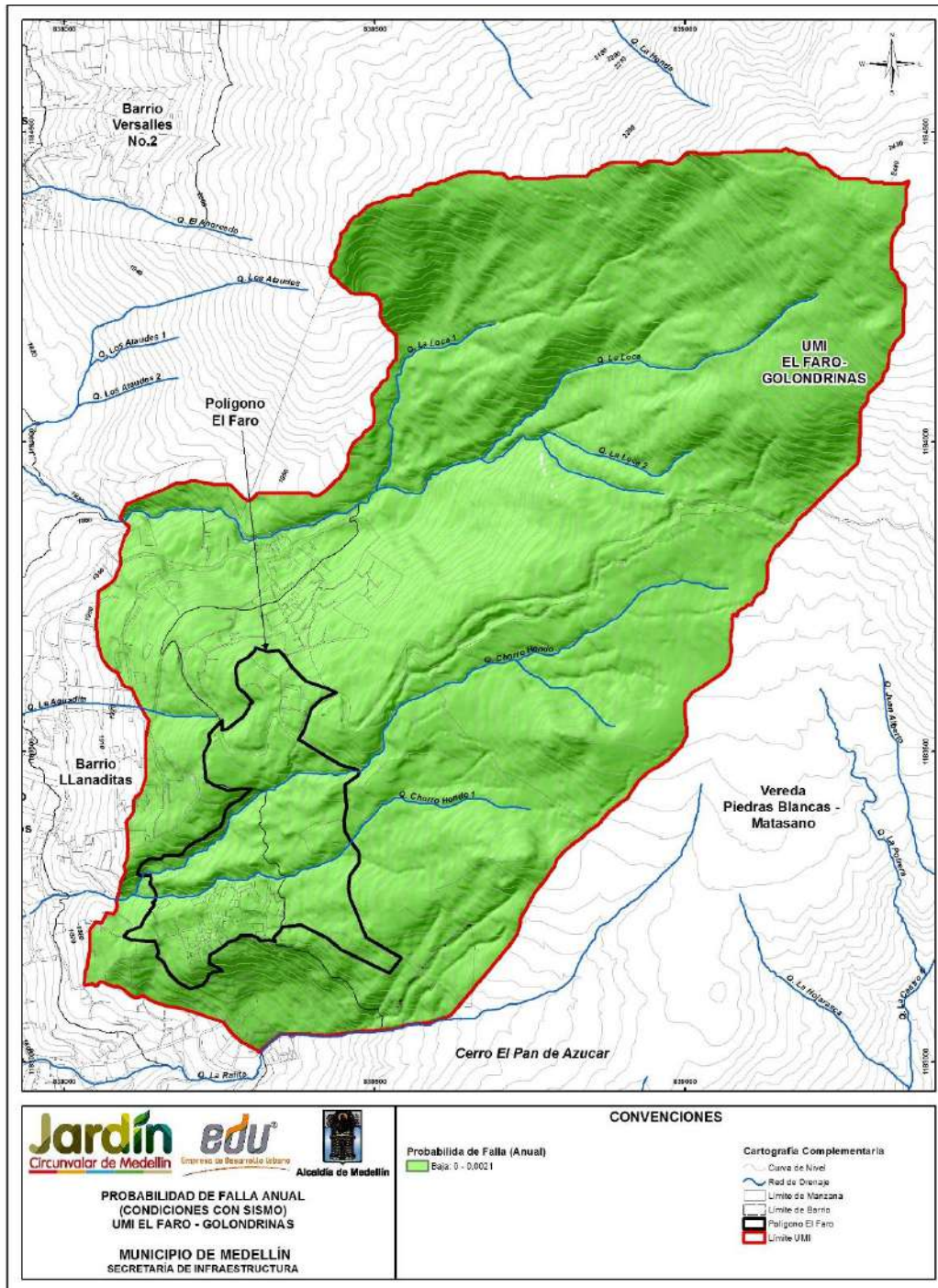
Mapa 33. Análisis del factor de seguridad de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudoestáticas con sismo de 0.25g (EFRFactorSeguridadDinamicoUMI_Medellin_C)



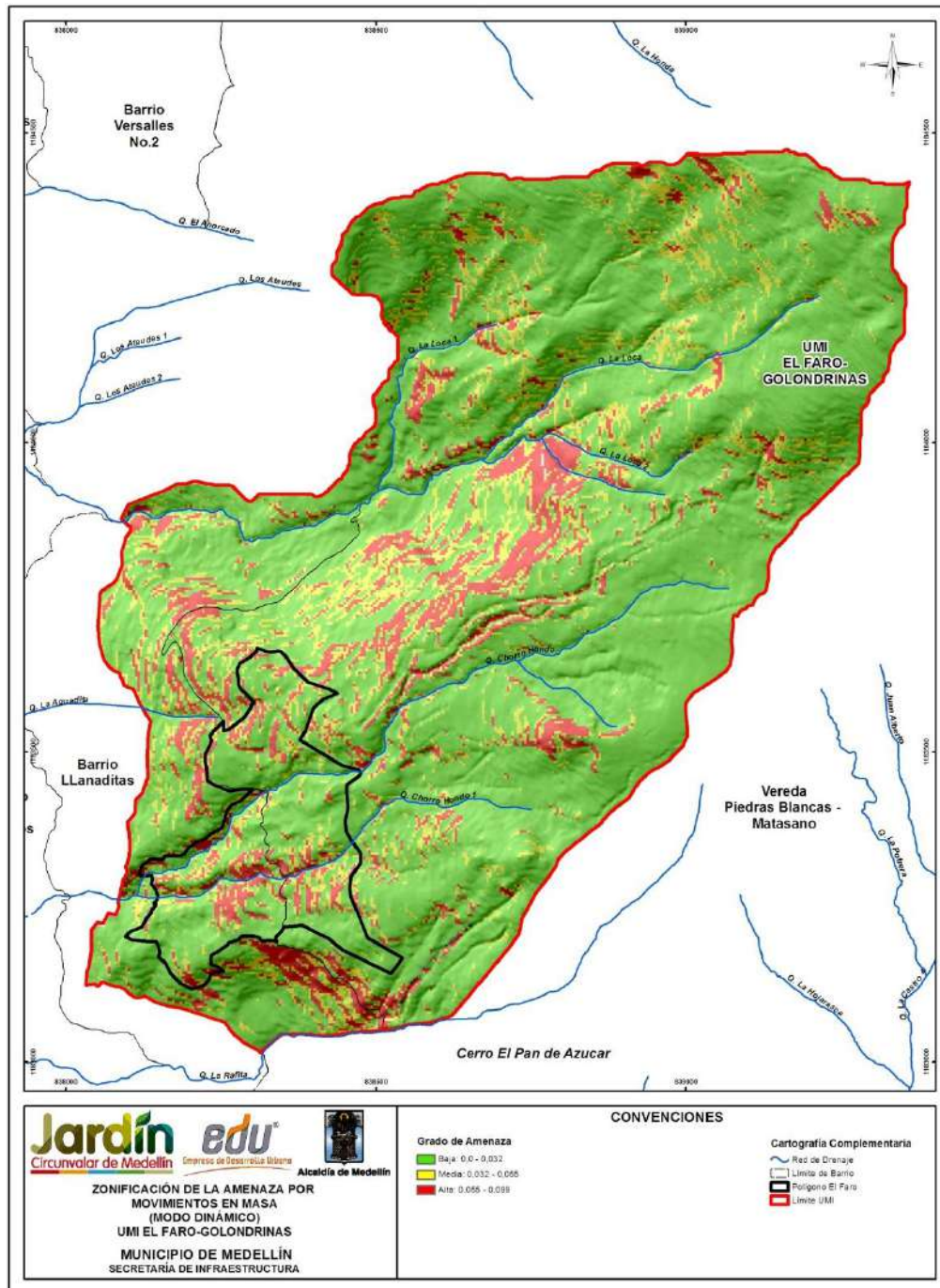
Mapa 34. Probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones actuales y naturales
(EFRProbabilidadFallaCondicionesActualesUMI_Medellin_C)



Mapa 35. Probabilidad de falla de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años (EFRProbabilidadFallaTotalUMI_Medellin_C)



Mapa 36. Probabilidad de falla anualizado de la UMI El Faro - Golondrinas en condiciones pseudoestático con un sismo 0.25g (EFRProbabilidadFallaAnualUMI_Medellin_C)



Mapa 37. Zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (19_EFRamenazaMovimientosenMasa_Medellin_C y 19_EFRamenazaMovimientosenMasa_Medellin_T)

Dentro del análisis de la amenaza por movimientos en masa, se tuvo en cuenta el efecto de los procesos de socavación en los cauces que pudieran desestabilizar las laderas adyacentes luego de sufrir una pérdida de pata por dichos procesos. La socavación general en los cauces naturales se estimó a partir de los resultados de la modelación hidráulica para un periodo de retorno de 100 años como se presenta en el Anexo 05. La Figura 180 muestra el perfil en planta en donde se analizó, de forma local, la sección que presentó los valores máximos de socavación.

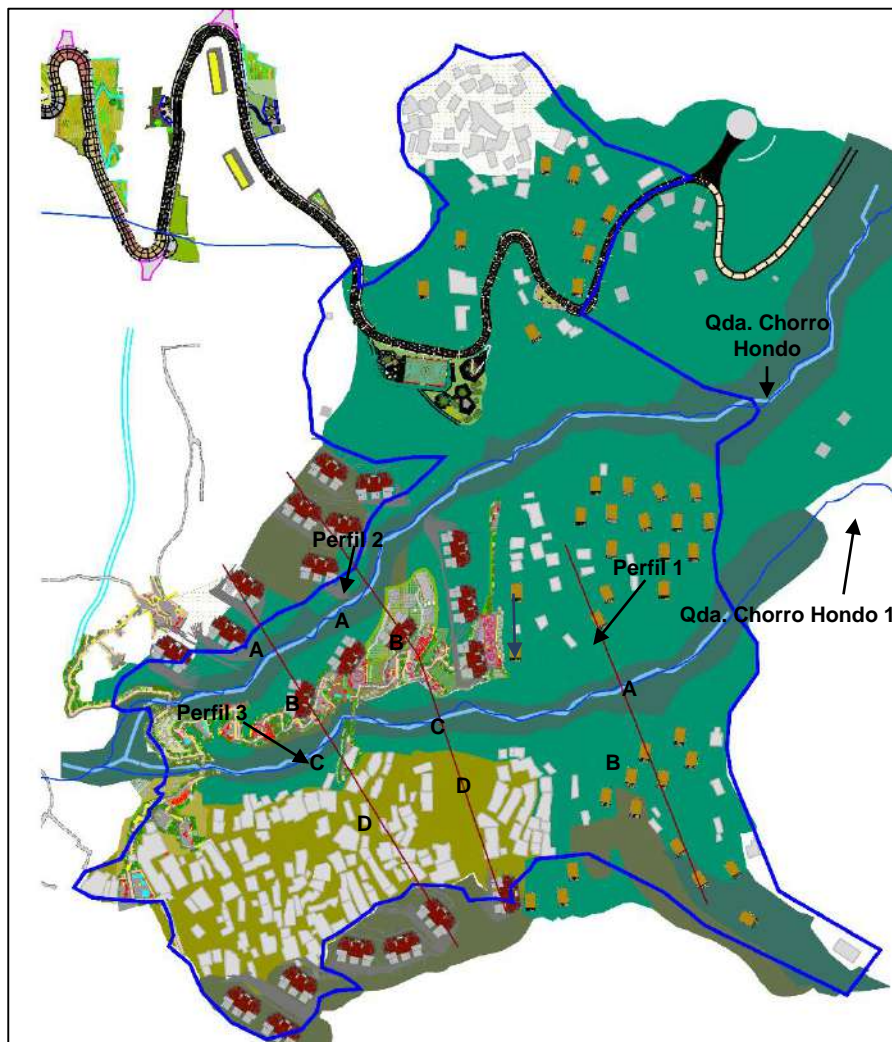


Figura 180. Esquema de localización en planta de la sección analizada

Para este polígono se han analizado tres perfiles, los cuales se han dividido según se indicó en la figura anterior, analizando ambas márgenes (derecha e izquierda de ambas quebradas). Los perfiles mencionados fueron analizados teniendo en cuenta el proceso de socavación y la variabilidad en parámetros de resistencia al corte y sismo. La

Figura 181 y la Figura 182 exhiben los resultados de los análisis de estabilidad efectuados para el Perfil 1, de la Figura 183 a la Figura 186 se presentan los resultados de los análisis de estabilidad efectuados para el Perfil 2. Por último, de la Figura 187 a la Figura 190 se presentan los resultados de los análisis de estabilidad efectuados para el Perfil 3. El valor de probabilidad de falla incluida en cada figura hace referencia a la obtenida con el software de análisis, pero normalizada para un periodo de 50 años.

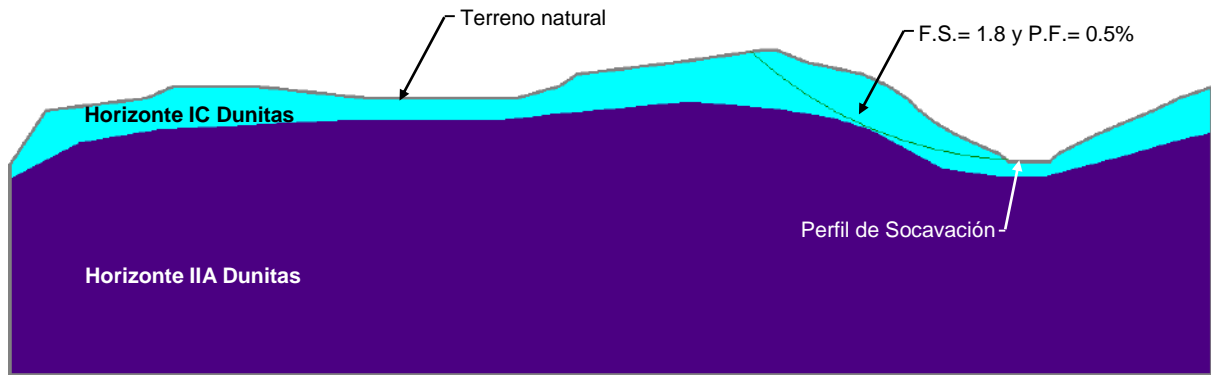


Figura 181. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 1-A)

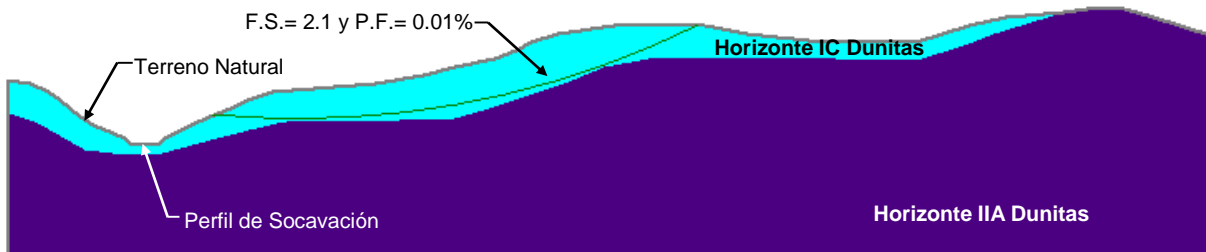


Figura 182. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 1-B)

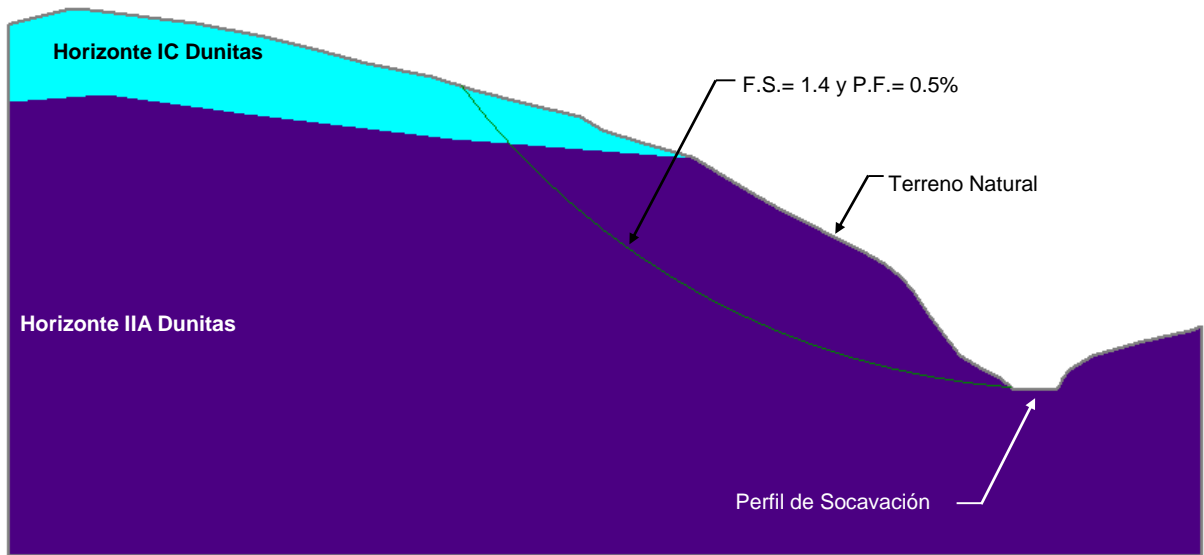


Figura 183. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 2-A)

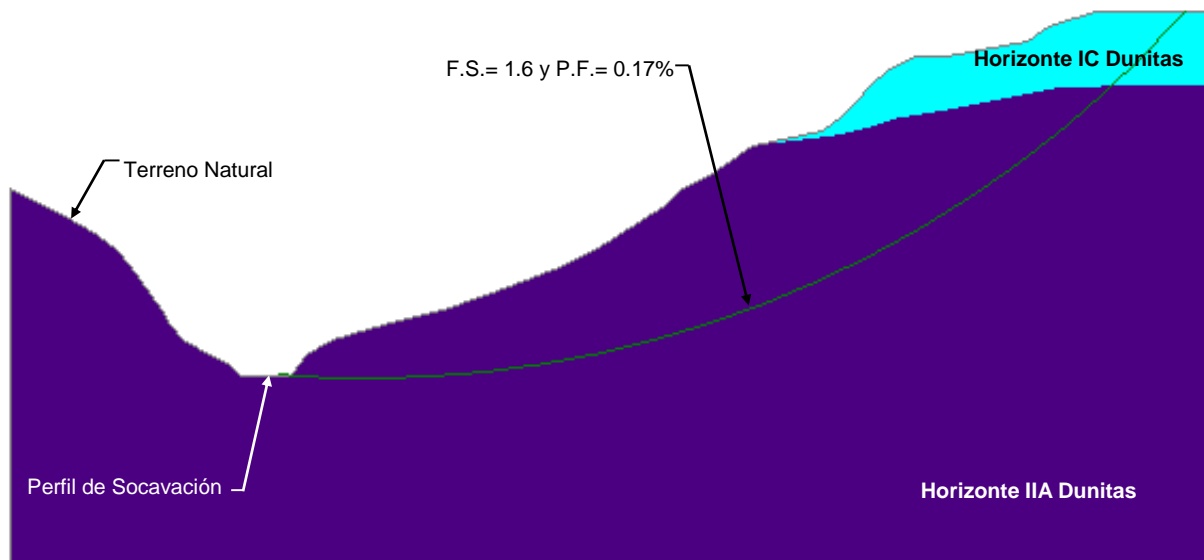


Figura 184. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 2-B)

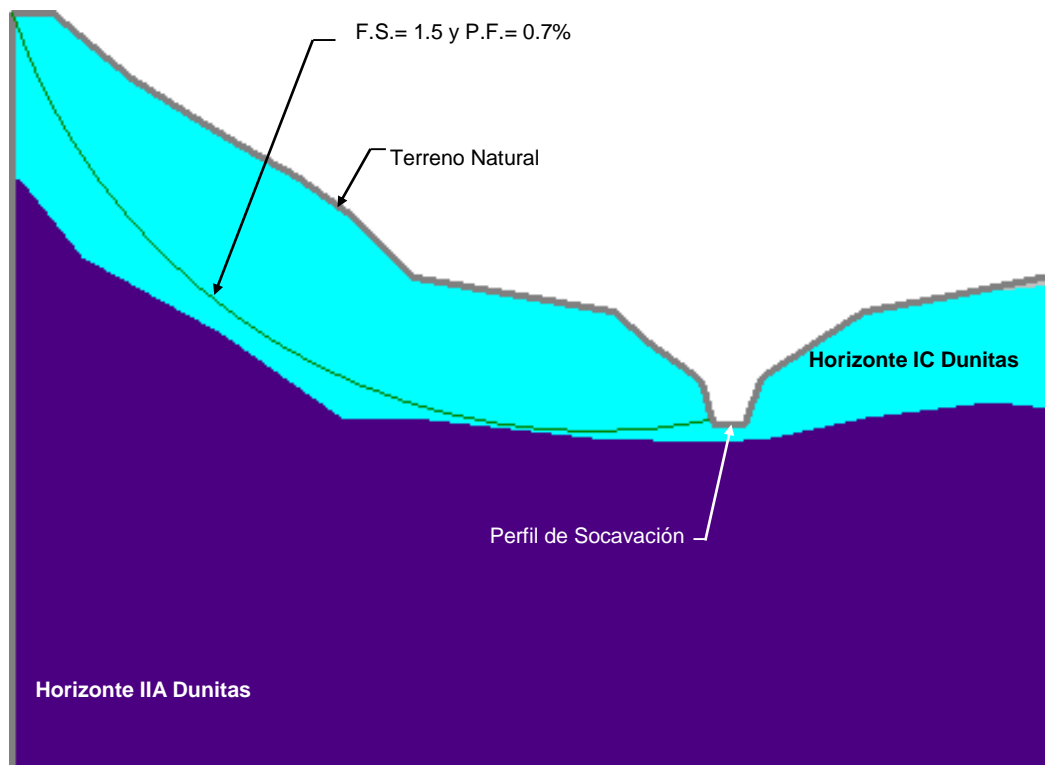


Figura 185. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 2-C)

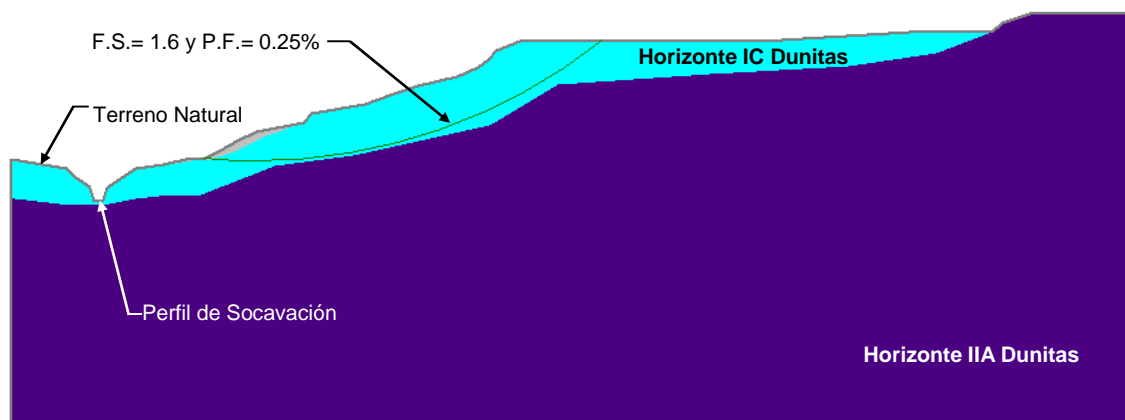


Figura 186. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 2-D)

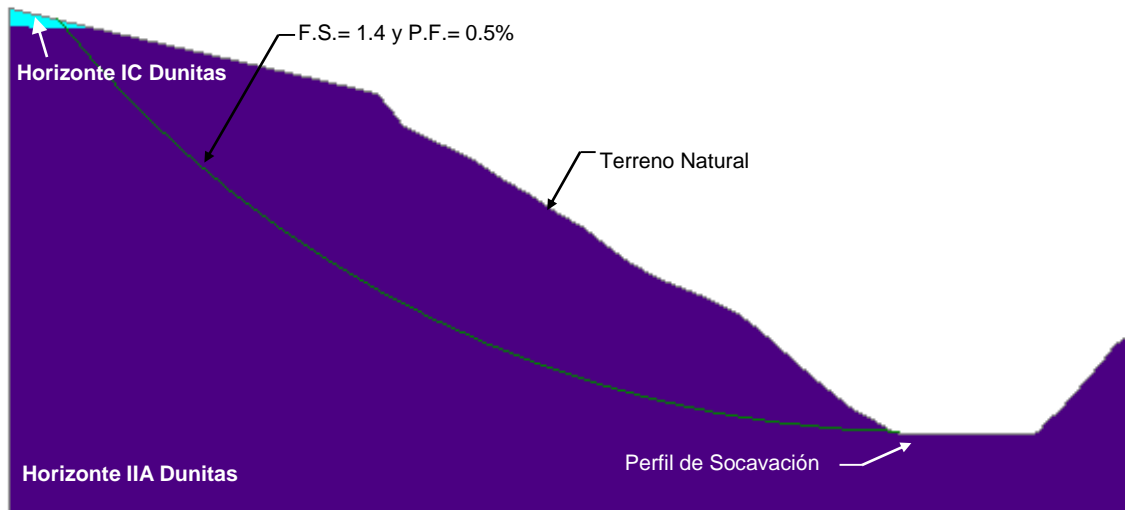


Figura 187. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 3-A)

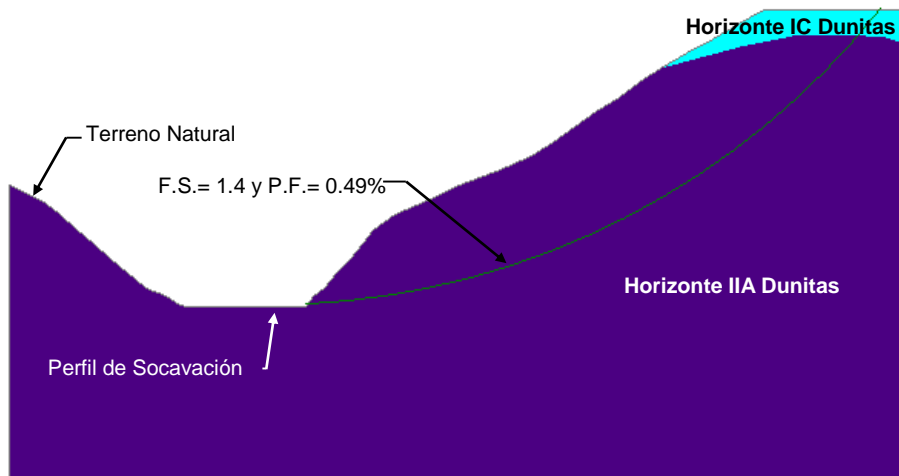


Figura 188. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo (Perfil 3-B)

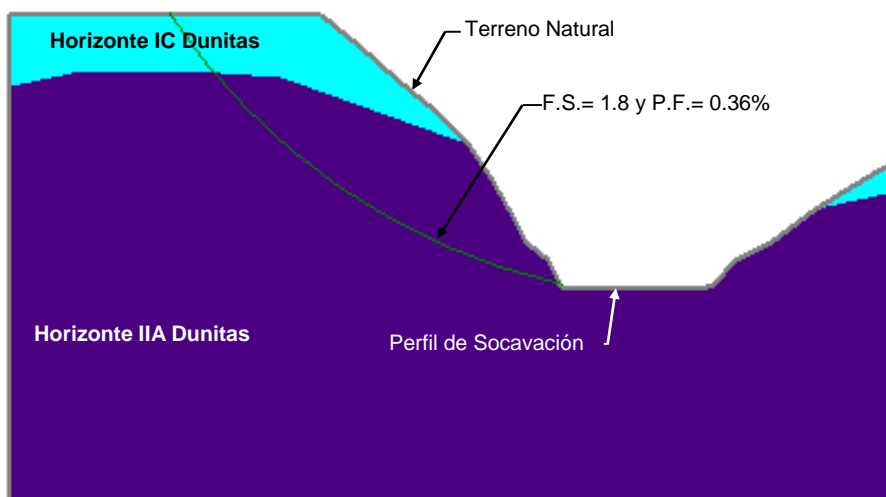


Figura 189. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 3-C)

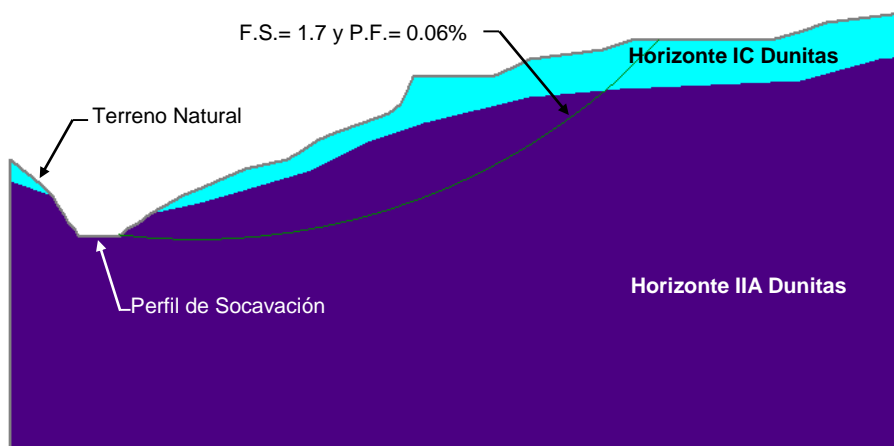




Figura 190. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada Chorro Hondo 1 (Perfil 3-D)

Se observa que la probabilidad de falla está en el rango de amenaza baja y el factor de seguridad en caso pseudoestático para todos los perfiles se encuentra por encima de 1.2. Estos resultados ratifican que el proceso de socavación no implica afectación en la estabilidad de la ladera.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

14. AMENAZA POR INUNDACIONES

14.1 ASPECTOS GENERALES

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce, superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (Flórez y Suavita, 1997; INETER y COSUDE, 2005, en AMVA et al, 2010)

Es importante aclarar que dentro del término inundaciones caben dos tipos de fenómenos diferenciados por la velocidad de ascenso de los niveles de agua. El primero corresponde a inundaciones lentas que son características de las zonas asociadas a llanuras aluviales donde la pendiente suave del terreno y los amplios valles permiten un almacenamiento temporal de un importante volumen de agua. El segundo corresponde a inundaciones rápidas donde el nivel del agua asciende rápidamente dado que la geomorfología de terreno facilita altas velocidades de flujo pero no permite almacenamientos importantes. De esta manera, el Polígono El Faro, cuyo terreno corresponde a una ladera de alta pendiente, es susceptible únicamente a inundaciones de tipo rápidas que traen consigo una alta energía del flujo por las altas velocidades de flujo y normalmente bajas profundidades de flujo.

En el análisis de la amenaza por inundación se incluyeron los fenómenos de inundación generados por desbordamientos e incapacidad de los principales cauces naturales y por incapacidad de aquellos naturales que se han convertido en artificiales por la construcción de canalizaciones y coberturas (alcantarillas, canales y box culverts) ubicados al interior y a lo largo de los cauces en el tramo de influencia.

14.2 METODOLOGÍA

Luego de haberse obtenido mediante el modelo hidráulico la magnitud de las variables hidráulicas como la velocidad y la profundidad de flujo, se procedió a calificar el grado de amenaza por inundaciones.

La asignación de la amenaza por inundaciones se realizó a partir de la combinación de la intensidad del fenómeno y de su probabilidad de ocurrencia de acuerdo con metodologías suizas y austriacas para evaluar la amenaza en general, por ejemplo, Ofee et al (1997) y Fiebiger (1997) en López y Courtel (2006) y en FLO-2D (2012). La intensidad del fenómeno está dada por los valores de la profundidad y la velocidad de flujo, mientras que la probabilidad de ocurrencia está directamente relacionada con el periodo de retorno de la creciente.

La categorización de la intensidad se realizó empleando la clasificación recomendada por la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Mi Rio (2003) para los diferentes tipos de daños posibles según diferentes combinaciones de velocidades y profundidades de

flujo (Figura 191). Se consideraron tres categorías de intensidad, alta, media y baja. Las zonas donde ocurran flujos con potencialidad de generar daños graves o pérdidas de vidas se asociaron a una intensidad alta. Por su parte, los flujos con potencialidad de generar daños moderados se consideraron de intensidad media. Finalmente, la intensidad baja fue asociada a aquellos flujos que presentan una combinación de profundidad y velocidad tal que tienen únicamente potencialidad de generar molestias.

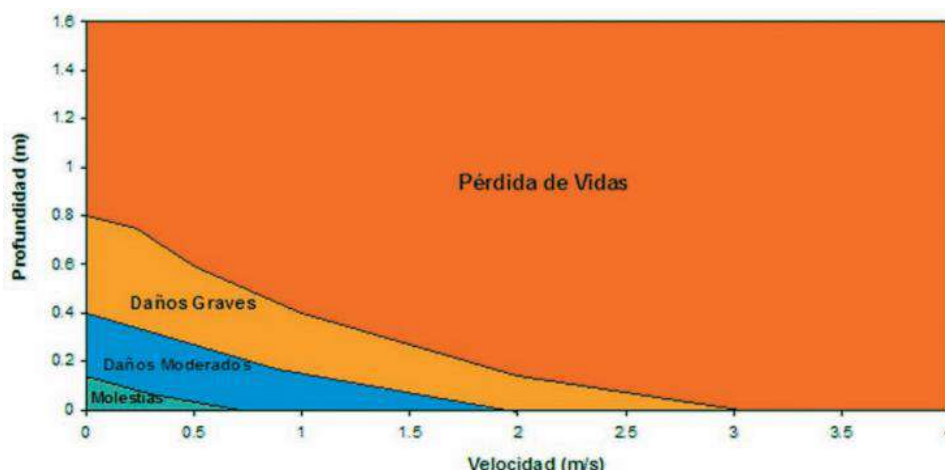


Figura 191. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)

Por su parte, para la probabilidad también se consideraron tres categorías, alta, media y baja. A los eventos generados por crecientes cuya probabilidad anual de excedencia es inferior al 2%, es decir aquellos asociados a periodos de retorno superiores a 50 años, se les asignó una calificación de probabilidad baja. Se calificaron con probabilidad media a aquellos eventos asociados a una probabilidad anual de excedencia entre el 2% y el 10%, es decir, con periodos de retorno superiores a 10 años e inferiores o iguales a 50 años. Finalmente, los eventos con una probabilidad anual de excedencia igual o superior al 10% se consideraron con una probabilidad alta, es decir a aquellos asociados a periodos de retorno de 10 años o menos. En la Tabla 61 y en la Tabla 62 se resume la clasificación de la probabilidad y la intensidad respectivamente según los criterios descritos.

Tabla 61. Asignación de la calificación de la probabilidad de inundaciones

Calificación de la Probabilidad	Periodo de retorno (Años)	Probabilidad de Excedencia (%)
Alta	TR \leq 10	10% \leq P
Media	10 < TR \leq 50	2% \leq P < 10%
Baja	50 < TR	P < 2%

Tabla 62. Asignación de la calificación de la intensidad de inundaciones

Calificación de la Intensidad	Tipo Potencial de Daños
Alta	Daños graves y pérdida de vidas
Media	Daños moderados
Baja	Molestias

Finalmente, la calificación de la amenaza se realizó a partir de la combinación de la intensidad y la probabilidad. Aquellos eventos que presentan una intensidad alta fueron calificados con amenaza alta, sin importar la probabilidad de ocurrencia. Los eventos con probabilidad media e intensidad media se calificaron con amenaza media, al igual que aquellos que presentan probabilidad alta e intensidad baja. Los eventos con amenaza baja son aquellos de intensidad baja y probabilidad media o baja y aquellos que presentan intensidad media pero que su probabilidad es baja. En la Figura 192 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza según la probabilidad y la intensidad.

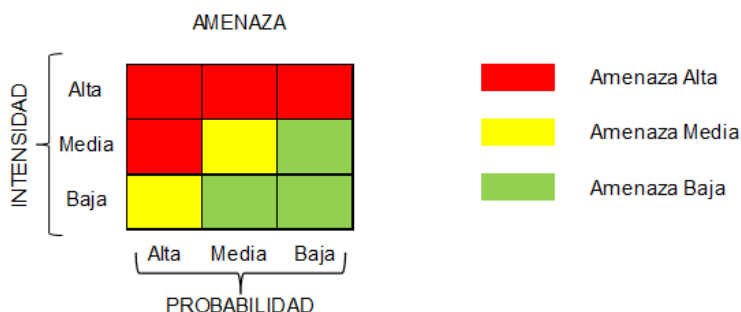




Figura 192. Asignación de la amenaza por inundación a partir de la intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006)

Es importante anotar que esta metodología es más general que la recomendada en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá, la cual indica que para la zona de cauces de montaña la totalidad del área cubierta por un caudal con un periodo de retorno de 100 años se considera zona de amenaza alta. La justificación de esto radica en que en este tipo de corrientes se presentan casi siempre velocidades altas de flujo que implican una alta energía y capacidad destructiva. Sin embargo, se considera que la metodología adoptada en este estudio permite obtener un mejor detalle en la zonificación de la amenaza dado que considera aquellas situaciones o zonas donde se presenten velocidades y profundidades asociadas a una intensidad media o baja a pesar de ocurrir en un evento de 100 años periodo de retorno. Finalmente, se comprobó que los resultados de la zonificación de la amenaza en las corrientes de este estudio son coherentes con lo planteado por el POMCA, lo cual sirve como validación a la metodología adoptada.

Dado el pequeño tamaño de las celdas que componen la malla del modelo hidráulico en relación con el tamaño de las viviendas, es posible que las edificaciones que están en contacto parcial o total con las manchas de inundación tengan en su perímetro de contacto con el flujo diversas asignaciones de la amenaza. En estos casos se asignó a

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

toda la zona cubierta con la edificación la mayor amenaza entre todas las amenazas de todas las celdas adyacentes a ella.

Con la misma idea se clasificaron las vías de acceso, las cuales corresponden a vías vehiculares y andenes, y los equipamientos como colegios, hospitales, parques, iglesias, etc. Para el caso de las vías se clasificó el grado de amenaza en los tramos de vías o andenes que estén dentro de la Amenaza por Inundación y para el caso de los Equipamientos se clasificó según el mayor grado de amenaza existente al interior del equipamiento o aledaño a él.

14.3 RESULTADOS

La evaluación de la amenaza por inundaciones generadas en condiciones actuales por las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, principales drenajes del Polígono El Faro, arrojó resultados que indican que la zona que corresponde al cauce principal de estas quebradas presenta una amenaza alta, dado que la intensidad (velocidad y/o profundidad) y frecuencia de los flujos de aguas que por allí transitan presentan valores altos.

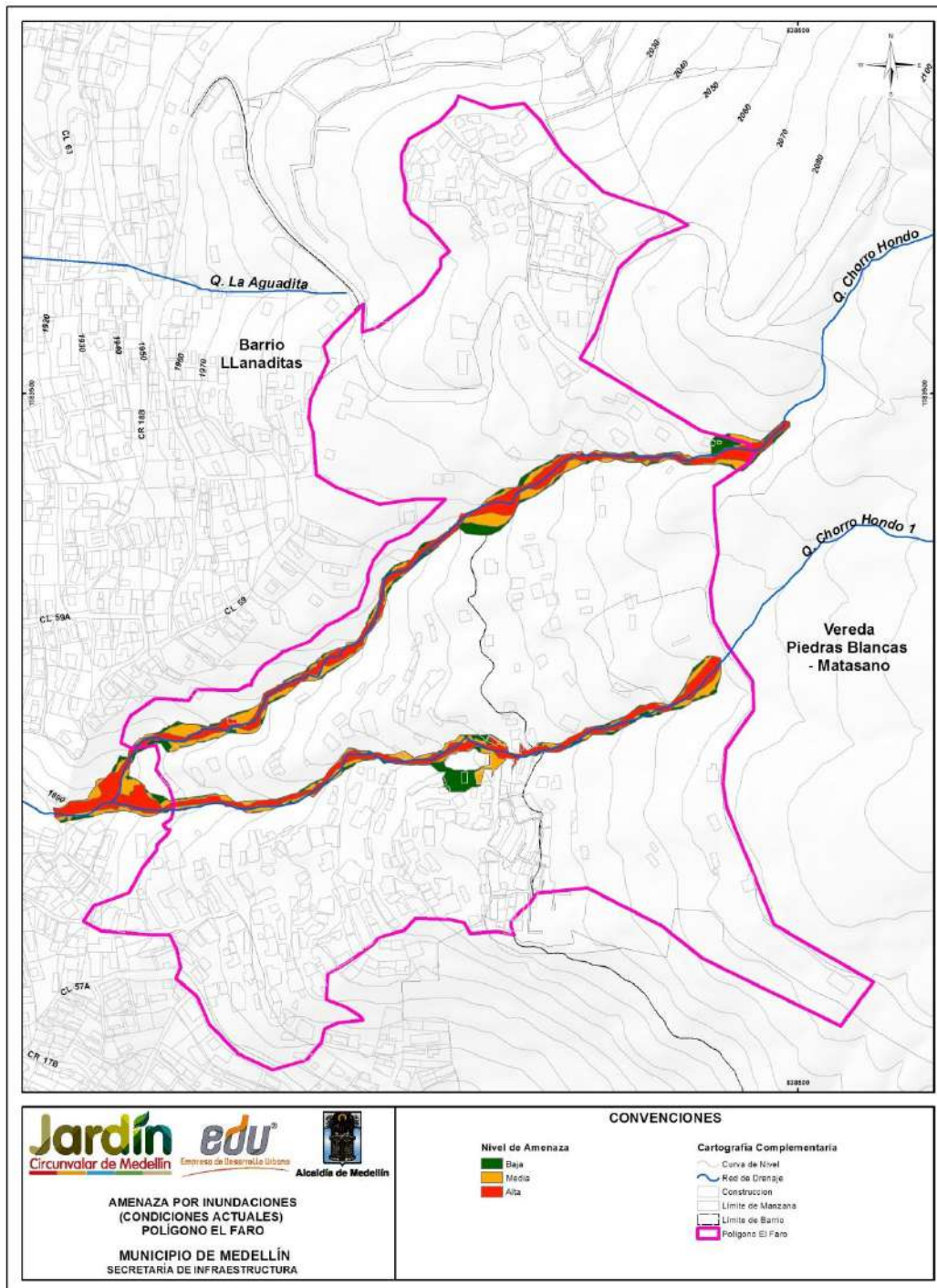
Para la Quebrada Chorro Hondo, la mayor parte de las viviendas e infraestructura que se encuentran inmediatamente al lado del cauce, están expuestas a una alta amenaza por eventos de inundaciones, también algunas de estas se clasifican en baja y media, ubicadas en el inicio y final de la quebrada descrita dentro del polígono de estudio.

Para la quebrada Chorro Hondo 1 las viviendas aledañas al cauce ubicadas finalizando el Tramo 1 y principio del Tramo 2 (Est.1) se encuentran en amenaza alta, media y baja, debido a las condiciones de obstrucción e incapacidad tanto del canal como del puente peatonal para evacuar periodos de retorno mayores a 10 años. Debido a la presencia de viviendas muy cercanas al cauce que hacen parte del comportamiento del flujo, otras áreas urbanizadas se encuentran clasificadas bajo los diferentes niveles de amenaza.

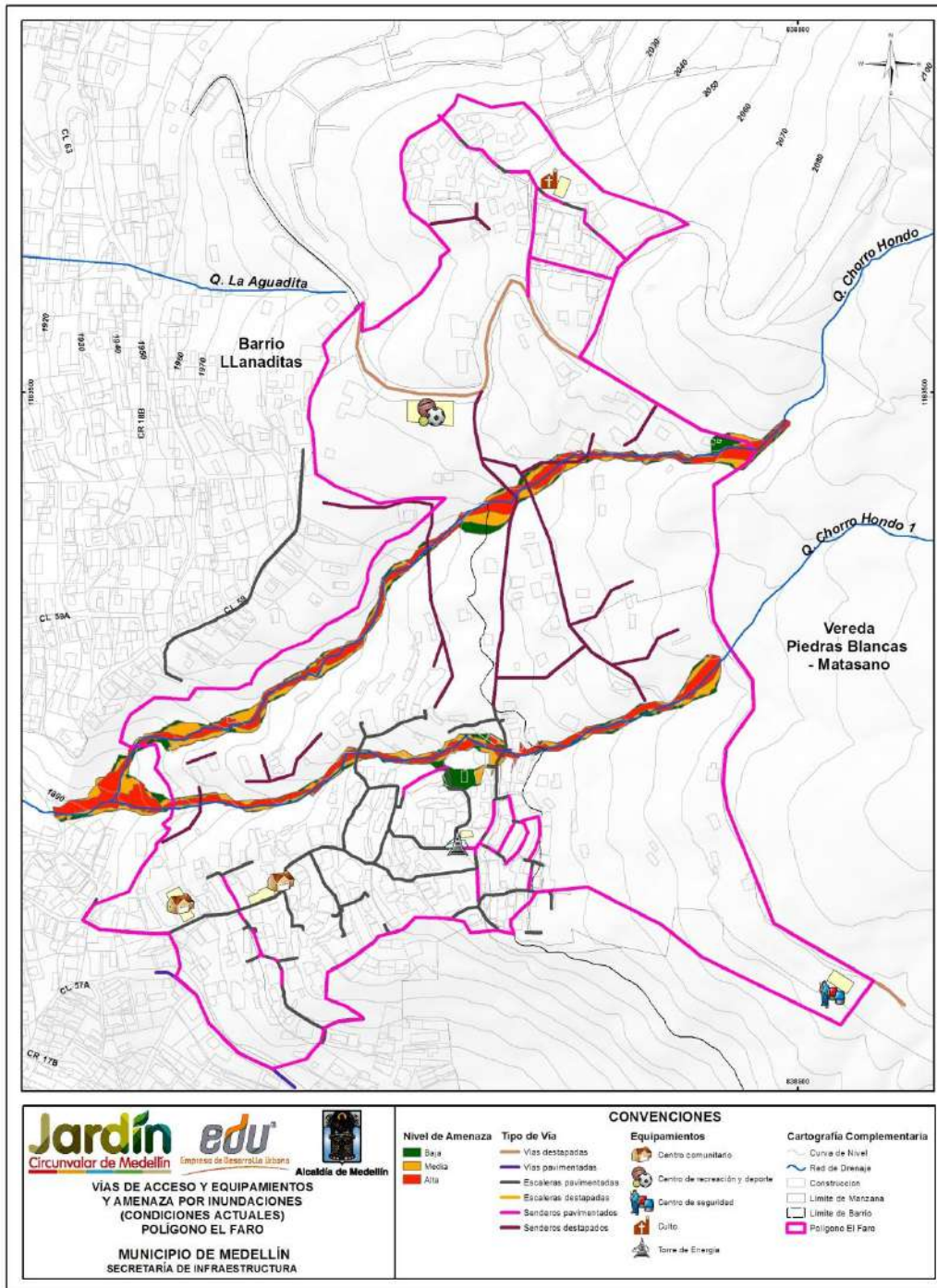
En el caso de la ubicación del canal de fondo escalonado, denominada Estructura Hidráulica Est.2, y que a su vez se encuentra el Puente Peatonal 2, las pocas viviendas aledañas al cauce no se clasifican en algún grado de amenaza, debido a la ubicación topográfica de estas.

En el Mapa 38 se presentan los resultados de la amenaza por inundaciones en condiciones actuales para las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 en el Polígono El Faro.



En el Mapa 39 se presenta el grado de amenaza en el que se clasificaron los tramos de vías o andenes. También, podemos observar la clasificación por amenaza para infraestructura especial (equipamientos), donde en ningún caso la mancha de inundación afecta dichas estructuras.



Mapa 38. Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 del Polígono El Faro
(23_EFRamenazasinundaciones_Medellin_C y 23_EFRamenazasinundaciones_Medellin_T)



Mapa 39. Superposición de Vías de Acceso y Equipamientos sobre la amenaza por inundaciones (EFRamenazaInundacionAccesosEquipamiento_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

15. AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES

15.1 ASPECTOS GENERALES

Las avenidas torrenciales que son analizadas como parte de este estudio corresponden a los flujos de una mezcla de agua y sedimento en altas concentraciones a través de los principales cauces que tienen influencia sobre el polígono de estudio. Este tipo de fenómenos pueden tener tres orígenes diferentes según Takahashi (2007): el primero, por remoción y transporte del material del lecho de los cauces durante una creciente, el segundo por deslizamientos que aportan material a los cauces el cual es finalmente arrastrado por una creciente, y el tercero por la falla de una presa. Los fenómenos de avenidas torrenciales a considerar en el presente estudio corresponden a aquellos cuyo origen está relacionado con la combinación de eventos de deslizamiento en las laderas de la cuenca que depositan material en el cauce y eventos de crecientes máximas en los cauces. Así mismo se analizó la posibilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales con origen en la remoción y transporte del material del lecho (segundo tipo de origen), pero se descartaron las avenidas torrenciales con origen en la falla de una presa (tercer tipo de origen) dada la inexistencia de estas estructuras en el polígono en estudio.



Así las cosas, la información básica para el estudio de las avenidas torrenciales corresponde a la misma empleada para el estudio de las inundaciones, en adición a los resultados del estudio de los movimientos en masa, en especial la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos y la caracterización de los fenómenos de inestabilidad, así como las características de los materiales que conforman el lecho de los cauces.

15.2 AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA

Del análisis de la amenaza por movimientos en masa en el polígono de estudio se dedujo que la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos que podrían alcanzar los cauces que ejercen influencia en el polígono presenta un valor del 10% en el periodo de análisis de 50 años. Por su parte, la probabilidad de ocurrencia de las crecientes analizadas en el escenario de amenaza por inundación tienen valores que oscilan entre el 100% para las crecientes de 2.33 años periodo de retorno hasta el 39.5% para las crecientes de 100 años periodo de retorno, considerando también un periodo de análisis de 50 años.

De acuerdo con los resultados del análisis de movimiento en masa ambos eventos pueden considerarse estadísticamente independientes, y por tanto la probabilidad de ocurrencia simultánea de ambos eventos formadores de la avenida torrencial oscila entre 4% y 10% en el periodo de 50 años.

En adición a la baja probabilidad de ocurrencia conjunta de eventos tipo deslizamiento y de crecientes en los cauces, la capacidad que presentan las corrientes del polígono de estudio para movilizar grandes volúmenes de material es baja, dado que los caudales máximos que transitan a través de ellos son inferiores a 6 m³/s para todos los periodos de retorno considerados, implicando con ello una baja capacidad erosiva.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

Si bien en la quebrada La Loca, que hace parte de la UMI El Faro-Golondrinas, es factible que se presentan fenómenos de avenidas torrenciales, las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 pertenecen a cuencas independientes que estarían aisladas de estos eventos en la quebrada La Loca. La geomorfología del terreno garantiza la no conexión de estos procesos entre las cuencas.

Con base en lo anterior, es posible afirmar que los eventos tipo avenidas torrenciales con origen en deslizamientos presentan una muy baja probabilidad de ocurrencia en el polígono de estudio. Este resultado es consistente con lo registrado en las actividades de exploración geológica donde no se detectaron depósitos de material torrencial a lo largo de los cauces investigados. Es consistente también con lo reportado en Desinventar.

15.3 AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN DEL MATERIAL DEL LECHO

En este apartado se hace un análisis de la posible ocurrencia de avenidas torrenciales cuyo origen está en la remoción y transporte del material del lecho. Este tipo de fenómeno se presenta cuando, a lo largo de una importante longitud del cauce, el flujo genera un esfuerzo cortante sobre el lecho tal que supera el esfuerzo resistente del material que la compone y remueve la suficiente cantidad de material para convertir la creciente en una avenida de tipo torrencial.

De acuerdo con Takahashi (2007), el esfuerzo resistente del material del lecho tiene dos componentes: una componente friccionante y una componente cohesiva, tal como se observa en la siguiente ecuación.

$$\tau_r = g \cos \theta \{ C_* (\sigma - \rho) a \} \tan \varphi + c$$

Donde:

- ✓ τ_r es el esfuerzo resistente.
- ✓ g es la gravedad.
- ✓ C_* es la concentración de equilibrio de partículas gruesas.
- ✓ σ es la densidad de partículas.
- ✓ ρ es la densidad del fluido.
- ✓ a es la distancia medida desde la superficie de la capa de sedimento.
- ✓ φ es el ángulo de fricción del material.
- ✓ c es la cohesión del material.

Por otro lado el esfuerzo que genera el flujo sobre el fondo del cauce en cada sección estudiada se encuentra dado por la siguiente expresión (Sotelo, 2002):

$$\tau = \gamma R_H \sin \theta$$

Donde:

- ✓ τ es el esfuerzo que genera el flujo.
- ✓ R_H es el radio hidráulico de la sección.
- ✓ γ es el peso específico del agua.
- ✓ θ es el ángulo de inclinación del fondo del cauce.

Con base en lo anterior se realizó un análisis comparativo entre el esfuerzo que genera el flujo sobre el lecho de los cauces y el esfuerzo resistivo de los materiales que componen el lecho. Para estimar el esfuerzo resistivo se emplearon los resultados del estudio de geología local y los resultados de la exploración y caracterización geológico-geotécnica de los materiales que actualmente conforman el cauce, en especial los parámetros de resistencia al corte, los cuales se resumen en la Tabla 63 para los cauces de la Quebrada Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.

Tabla 63. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono El Faro

EL FARO	ϕ' [°]	C' [kPa]	γ [kN/m ³]
Quebrada Chorro Hondo			
Depósitos de flujo de lodos y escombros	24,13	22,79	17,43
Dunitas de Medellín (JKuM)	26,50	24,20	16,71
Quebrada Chorro Hondo 1			
Lleno antrópico	26,90	13,05	16,90
Dunitas de Medellín (JKuM)	26,50	24,20	16,71

En la Tabla 63 puede observarse que los materiales de las corrientes estudiadas tienen cohesiones que varían entre 22,79 kPa y 24,2 kPa para la quebrada Chorro Hondo correspondiendo el primero a Depósitos de Flujo de Lodos y Escombros y el segundo a las Dunitas de Medellín (JKuM). Para la quebrada Chorro Hondo 1 las cohesiones varían entre 13,05 kPa y 24,20 kPa que corresponde a Llenos Antrópicos y Dunitas de Medellín (JKuM), respectivamente.

El esfuerzo ejercido por el flujo sobre el lecho en cada sección a lo largo de las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, se presentan en la Figura 193 y Figura 194, respectivamente. En estas figuras también se ha ubicado la menor cohesión existente de los materiales presentes en los cauce mencionados, y de manera comparativa puede observarse que para ambas quebradas en la totalidad del cauce analizado, el esfuerzo cortante que se transmite al lecho es inferior al valor de la cohesión de los materiales, con excepción de dos tramos no adyacentes aproximadamente de 1m para la quebrada Chorro Hondo 1.

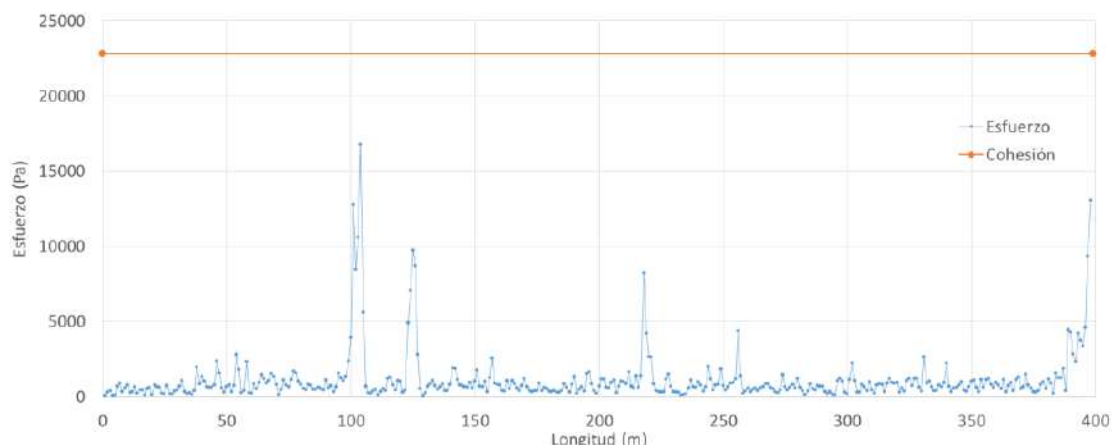


Figura 193. Variación del esfuerzo a lo largo de la Quebrada Chorro Hondo

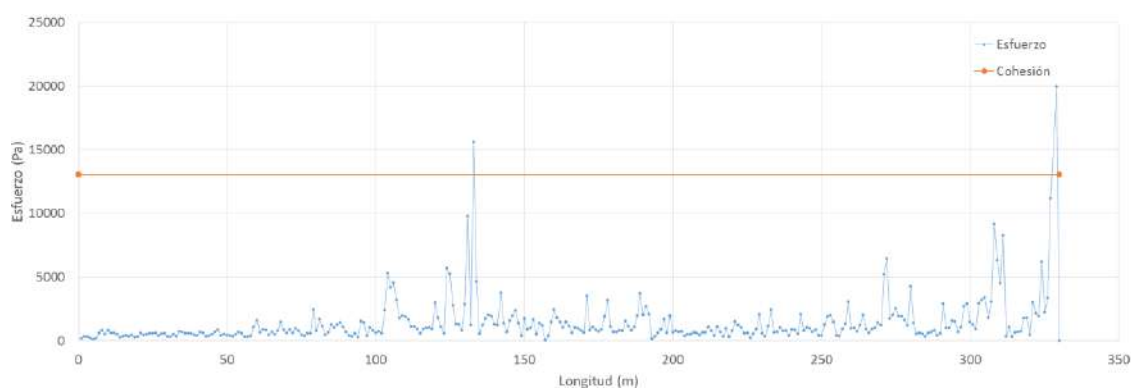




Figura 194. Variación del esfuerzo a lo largo de la Quebrada Chorro Hondo 1

El análisis realizado permite por tanto concluir que no es factible la ocurrencia de la remoción desde el lecho de un volumen de material suficiente para ocasionar una avenida torrencial en el polígono de estudio.

15.4 RESULTADOS

Por lo anotado en este capítulo, se concluye que el Polígono El Faro no presenta amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales. De esta manera, los caudales para la modelación hidráulica corresponden a los de aguas claras sin considerar las mayoraciones que estipula el Acuerdo 09 de 2012 para cuando existe amenaza de torrencialidad.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

16. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

16.1 ASPECTOS Y METODOLOGÍA GENERAL

Según el POT de Medellín 2014, la vulnerabilidad se define como la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.



Para entender la vulnerabilidad y los factores que lo controlan, es necesario dividir los elementos expuestos de las características que hacen que ese elemento sea vulnerable. Adicionalmente, debe incluirse en la medición o determinación de la vulnerabilidad, las capacidades de determinada comunidad el resistir a una amenaza en específico y a la capacidad de recuperarse en caso de que el evento ocurra. Es así entonces como los elementos de la vulnerabilidad pueden ser subdivididos en elementos expuestos, elementos resistentes y elementos resilientes:

- ✓ Los elementos expuestos están directamente asociados a la localización geográfica del elemento en relación a la amenaza.
- ✓ Elementos resistentes se asocian a las características de las edificaciones en el caso de la vulnerabilidad física.
- ✓ Elementos resilientes se asocian a la habilidad del elemento alcanzado por la amenaza de retomar sus capacidades.

Para este proyecto en especial, la vulnerabilidad se enfatizó en el análisis de la vulnerabilidad física al interior de los polígonos del proyecto Barrios Sostenibles y metodológicamente se enfocó en los siguientes aspectos primordiales:

Inicialmente se realizó un análisis de información básica. Para esto se consideraron varios aspectos importantes consignados en el documento técnico elaborado por la Universidad San Buenaventura (2014) bajo el contrato “*ESTUDIOS Y DIAGNÓSTICO FÍSICO PARA LA FORMULACIÓN DE LOS PROYECTOS BARRIOS SOSTENIBLES EN LOS SECTORES GOLONDRINAS, VERSALLES, RANCHO DE LATA AL INTERIOR DE LOS MACROPROYECTOS LLANADITAS, LA CRUZ Y EL PICACHO, DENTRO DEL MARCO DEL PROYECTO CINTURÓN VERDEMETROPOLITANO EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN*”.

Del estudio mencionado se tuvo en cuenta la información referente al número de niveles por vivienda (1 piso, 2 pisos, de 3 a 5 pisos o más de 6 pisos) y tipo de ocupación (residencial, comercial o mixta), entre otros. La localización espacial correspondiente a cada predio también es obtenida del estudio elaborado por la Universidad San Buenaventura (2014) y es presentada en el actual estudio, como parte de la geodatabase del proyecto. Dicha localización hace referencia al código COBAMA (Comunidad, Barrio y Manzana) que se relaciona con el polígono de construcción y al CBML (Cobama-Lote)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

que se refiere a la unión del COBAMA y el número del lote. Esta información se relaciona con la ficha de identificación de la estructura a través del Número de Formulario que corresponde al Número de Vivienda en dicha base de datos. Es importante aclarar en este punto que la geodatabase a través del Número de Formulario permite acceder a información detallada de la vivienda consignada en la información entregada como parte del estudio de la Universidad San Buenaventura (2014).

La información de la San Buenaventura (2014) fue posteriormente verificada y complementada a través de trabajos de campo. En los trabajos y visitas de campo efectuados por el personal especialista en estructuras del proyecto se levantó información adicional requerida para la valoración numérica de la vulnerabilidad como fue: el tipo de estructura (concreto y madera, madera o lata y cartón), estado y condiciones de las mismas (muy mala, mala, media, buena o muy buena), tipo de fundación (superficial o profunda), tipo de cubierta (teja de lata, teja de zinc, madera, losa de concreto o plástico), densidad habitacional entre otras, que se consideran importantes para este proyecto. Todas estas características que fueron de suma importancia para la valoración numérica de la vulnerabilidad física de las estructuras hacen parte de la ficha de identificación de cada uno de los predios y se presentan en el Anexo 06.

Además se identificaron y localizaron dentro de cada polígono del Proyecto Barrios Sostenible, los elementos de estructura física expuestos como son: líneas vitales (vías), equipamientos (equipamientos de salud, parques, plazas, plazoletas, plantas de tratamiento, terminales de transporte, metro, metrocable, tranvía y prevención y atención de desastres), equipamientos básicos sociales y comunitarios (salud, recreación y deporte, culturales, comunitarios, fuerza pública – seguridad, almacenamiento y distribución del sector primario); elementos de soporte ciudadano (patrimonio), elementos de soporte económico (industria, comercio y servicios), estructuras y población expuesta.

Para el análisis de la vulnerabilidad física se estableció una metodología para determinar las características de los elementos expuestos a las amenazas identificadas, en cuanto a: tipo de elemento, grado de exposición, resistencia que ofrece el elemento y distribución espacial entre otras. Se buscaron metodologías en el ámbito científico que lograran agrupar este tipo de requisitos, dividiéndose para el caso de las amenazas por movimientos en masa donde se consideró la metodología de Li et al (2010), Uzielli et al (2008) y Guimaraes (2015) y para el caso de las amenazas por inundaciones y avenidas torrenciales se estableció la propuesta de Thouret et al (2013).

Se deben identificar los diferentes tipos de daño o efecto esperado sobre los elementos expuestos que se pueden presentar como resultado del fenómeno natural. Esto solo se realizó para las estructuras identificadas al interior del polígono del proyecto Barrios Sostenibles.

Finalmente, toda esta información se zonificó en un mapa denominado de vulnerabilidad física, categorizando la vulnerabilidad de cada estructura en alta, media y baja, de acuerdo a las características de los elementos expuestos. De forma adicional, en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa se pudo determinar la vulnerabilidad de las

personas que habitan las viviendas y la misma también fue categorizada según el número de personas afectadas dentro de una estructura.

16.2 VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA

16.2.1 Metodología de análisis

La metodología utilizada para la evaluación de la vulnerabilidad física a movimientos en masa, se fundamentó en la propuesta establecida por Li et al. (2010) y Uzielli et al. (2008) además de otros trabajos existentes en la literatura científica. Este trabajo presenta una propuesta metodológica para determinar la vulnerabilidad ante la amenaza de movimientos en masa y propone un modelo cuantitativo para la determinación de la vulnerabilidad de las estructuras. Como parte adicional, el trabajo sugiere una función aproximada para estimar la vulnerabilidad de las personas que se encuentran dentro de las estructuras.

La base para determinar la vulnerabilidad física según Li et al. (2010), está soportada sobre la intensidad arrolladora que podría experimentar un fenómeno y la resistencia de los elementos físicos expuestos, lo anterior entonces se explica con que la vulnerabilidad es función de la intensidad y la resistencia.

La intensidad para este enfoque, se define como el conjunto de parámetros distribuidos espacialmente, que describe la capacidad arrolladora de un fenómeno natural (Hungry, 1997) en este caso un movimiento en masa. Según Amatruda et al. (2004), la intensidad podría estar expresada en términos de la energía del impacto, la velocidad media y la profundidad del suelo en las zonas potencialmente erodables.

En el trabajo específico de Li et al. (2010), la intensidad de la amenaza es definida como una función de dos variables: el factor de intensidad geométrico (I_{gem}) y el factor de intensidad dinámico (I_{din}).

El factor de intensidad geométrico tiene que ver con la posición o la proximidad de las estructuras con respecto a lo que se considera la zona de amenaza. Este factor considera entonces las características relacionadas con el tamaño del movimiento en masa. Cuando la estructura se encuentra al interior de la zona donde se podría generar un movimiento en masa, se podrían generar fenómenos de creeping. El factor de intensidad dinámico tiene como principal variable la velocidad del deslizamiento cuando ocurre el impacto contra la estructura localizada fuera del área donde ocurriría el movimiento en masa (Figura 195). Ambos factores son adimensionales y son calculados por medio de las siguientes expresiones:

$$I = \begin{cases} I_{gem} \cdot I_{dfm} & \text{Factor de intensidad geométrico, cuando las estructuras} \\ & \text{están dentro del movimiento en masa} \\ I_{din} \cdot I_{dpt} & \text{Factor de intensidad dinámico, cuando las estructuras están} \\ & \text{fuera del movimiento en masa} \end{cases}$$

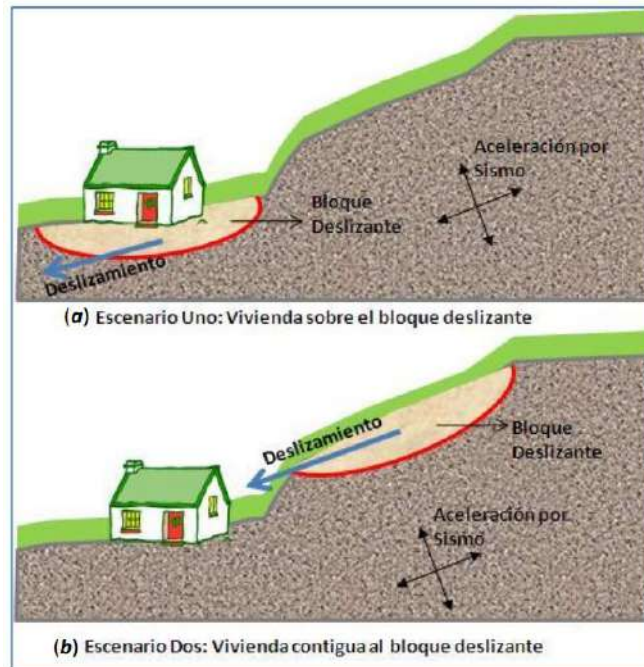


Figura 195. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa

En la expresión anterior, I_{gem} es el factor de intensidad geométrica e I_{dfm} es el factor que considera la deformación de las estructuras cuando se encuentran localizadas al interior del área del movimiento en masa y las cuales sufrirán la acción de deslizamientos con bajas velocidades de deslizamiento o creeping.

Por otro lado, I_{dpt} es el factor que considera el espesor de los detritos que llegan hasta la zona de las estructuras y que impactan las mismas. Este es utilizado para evaluar los elementos exteriores a las áreas de deslizamientos que ocurrieran con altas velocidades y se podría obtener con la ecuación:

$$I_{dpt} = 0.1 \cdot D_{dpt}$$

Finalmente, I_{din} es el factor que relaciona la velocidad de la amenaza con la estructura impactada. En el caso de que la velocidad del deslizamiento pueda superar los $5 \times 10^{-1} \text{ mm/s}$, Cruden & Varnes (1996) (Tabla 64) afirman que las estructuras serán destruidas y fuera de servicio. Para valores menores de $5 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$, las estructuras permanecerían intactas. Así las cosas, la intensidad dinámica podría ser calculada como:

$$I_{din-E} = \begin{cases} 0,00 & C \leq 5 \times 10^{-7} \quad (\text{mm} / \text{s}) \\ \frac{1}{36} (\text{Log}_{10} C + 6.30)^2 & C > 5 \times 10^{-1} \quad (\text{mm} / \text{s}) \end{cases}$$

Donde C es la velocidad en la que se podría desarrollar un fenómeno y para la cual Cruden & Varnes (1996) presentan una clasificación de los movimientos considerando la velocidad. Por ejemplo, para las estructuras fuera de un fenómeno que viaja de forma rápida, estas pueden ser afectadas por bloques de roca o flujo de escombros con alta velocidad. Para las estructuras dentro de la zona de incidencia del fenómeno que viaja lento, los daños pueden estar más asociados a fallos estructurales como deformaciones y desplazamientos de los elementos estructurales que podrían afectar el servicio de la misma.

Tabla 64. Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996)

CLASE	DESCRIPCIÓN	VELOCIDAD (mm/s)	PROBABLE NIVEL DE DESTRUCCIÓN
7	Extremadamente rapido	5×10^3	Desastre de gran violencia, estructuras destruidas por impacto del material desplazado, muchos muertos, improbabilidad de escape
6	Muy rapido	5×10^1	Algunas vidas perdidas, la velocidad supera la velocidad de escape de las personas.
5	Rapido	5×10^{-1}	Es posible escapar o evacuar las estructuras, posesiones y equipamientos destruidos.
4	Moderado	5×10^{-3}	Algunas estructuras temporales e insensibles pueden mantenerse temporalmente
3	Lento	5×10^{-5}	Medidas de remediación pueden ser adoptadas durante el movimiento. Las estructuras pueden mantenerse pero con trabajos frecuentes de mantenimiento.
2	Muy lento	5×10^{-7}	Algunas estructuras permanecen sin daños ante el movimiento
1	Extremadamente lento		No se tiene percepción del movimiento. Se hace necesario implementar instrumentos.

La resistencia refleja la capacidad de los elementos vulnerables para resistir la acción del fenómeno con un determinado grado de severidad. Para las personas, esta misma resistencia representaría la capacidad de reacción y evacuación. En el caso de las estructuras, la resistencia total es función de varios factores y en el trabajo de Li et al. (2010) estos factores son específicamente:

$$R = \left(\prod_{i=1}^{ns} \xi_i \right)^{1/ns}$$

Si se consideran los factores de fundación (ξ_{sfd}), los factores por el tipo de estructura (ξ_{sty}), el factor de mantenimiento o estado (ξ_{smn}) y el factor de altura o niveles de las estructuras (ξ_{sht}), la resistencia se podrá calcular como:

$$R = \left(\xi_{sfd} \cdot \xi_{est} \cdot \xi_{alt} \cdot \xi_{man} \right)^{1/4}$$

Para determinar el factor de fundación Ragozin and Tikhvinsky (2000) propusieron la siguiente ecuación en función de la profundidad de desplante de la fundación (D_{fun})

$$\xi_{sfd} = \left(\frac{D_{fun}}{10} \right)^{1/3} + 0.05$$

Con esta ecuación se podría establecer unos rangos de valores para determinadas profundidades de fundación.

$\xi_{sfd}=1.05$ Para $D_{fun} > 10$ m

$\xi_{sfd}=0.63$ Para $2 \text{ m} < D_{fun} < 10$ m

$\xi_{sfd}=0.5$ Para $D_{fun} < 2$ m

De la Tabla 65 hasta la Tabla 67 se presentan los demás factores que hacen parte de la evaluación de la resistencia de las estructuras propiamente.

Tabla 65. Factor por tipo de estructura

TIPO DE ESTRUCTURA	ξ_{est}
Muy ligera (lata y cartón)	0.1
Ligera (Madera)	0.2
Mixta (Concreto y madera-Prefabricada)	0.4
Mampostería	0.8
Concreto sin refuerzo	1.3
Concreto reforzado	1.5

Tabla 66. Factor por altura de la estructura

ALTURA DE LA ESTRUCTURA	ξ_{alt}
Un solo piso	0.1
De 2 pisos	0.4
De 3 a 5 pisos	0.9
Más de 6 pisos	1.5

Tabla 67. Factor de estado de la estructura

ESTADO DE LA ESTRUCTURA	ξ_{man}
Muy mala	0.1
Mala	0.4
Media	0.8
Buena	1.2
Muy Buena	1.5

Para determinar la vulnerabilidad, Li et al. (2010) proponen expresiones en función de la intensidad de la amenaza (I) asociada a los elementos expuestos y de la resistencia (R) de esos elementos para soportar esa amenaza.

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - \frac{2(R-I)^2}{R^2} & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} > 1.0 \end{cases}$$

Guimaraes (2015) estableció a través de aplicaciones de la metodología de Li et al. (2010) en la Región Serrana de Rio de Janeiro donde se presentan algunas condiciones similares a Medellín en cuanto a ambientes geotécnicos se refiere, que la misma presenta dificultades en la obtención de algunos parámetros fundamentales para el cálculo de la vulnerabilidad física por movimientos en masa. Algunos de esos elementos son por ejemplo la determinación del factor D_{dpt} , ya que se trata de una variable que involucra el espesor de los detritos dejada por el movimiento en masa, la velocidad del deslizamiento C , para el cual tampoco se cuenta con información suficiente, y el I_{dfm} el cual involucra la deformación de las estructuras que se encuentran al interior del movimiento en masa.

Los anteriores factores requerirían entonces que el usuario deba esperar que el evento pase y observar dichas variables, o tener herramientas avanzadas que le permitan hacer simulaciones previas para determinar analíticamente o numéricamente dichos valores, lo que torna poco practica la metodología.

Considerando dichas dificultades, Guimaraes (2015) elaboró una metodología de cálculo para estimar la vulnerabilidad de las estructuras ante movimientos en masa, utilizando parámetros de fácil acceso aplicados sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de la estructura con la localización respecto al movimiento en masa. Teniendo en cuenta lo anterior, Guimaraes (2015) considera dos variables determinadas

geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, fue considerada la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 196 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la distancia (d) y la altura (h) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad $Z=h/d$.

Finalmente, Guimaraes (2015) llegó a establecer una intensidad definida a partir de la relación de los parámetros geométricos de la amenaza y de la resistencia de las estructuras impactadas. Así entonces, la vulnerabilidad estructural física se definió matemáticamente como:

$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

La anterior ecuación tiene sentido físico cuando se observa que la vulnerabilidad estructural física (V_e) es la inversa de la capacidad de resistencia (R) de las estructuras.

La Figura 197 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por movimientos en masa.

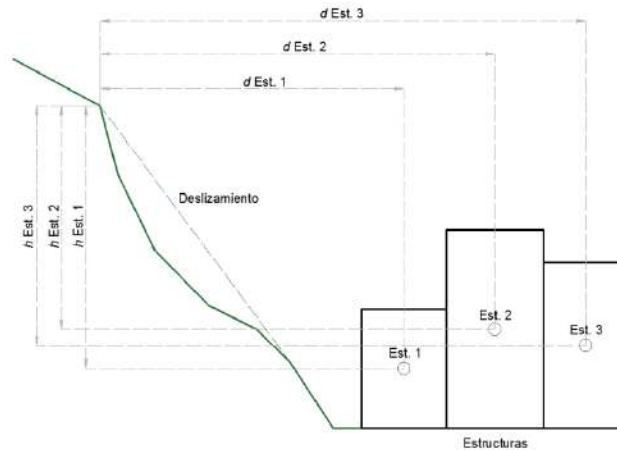


Figura 196. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables

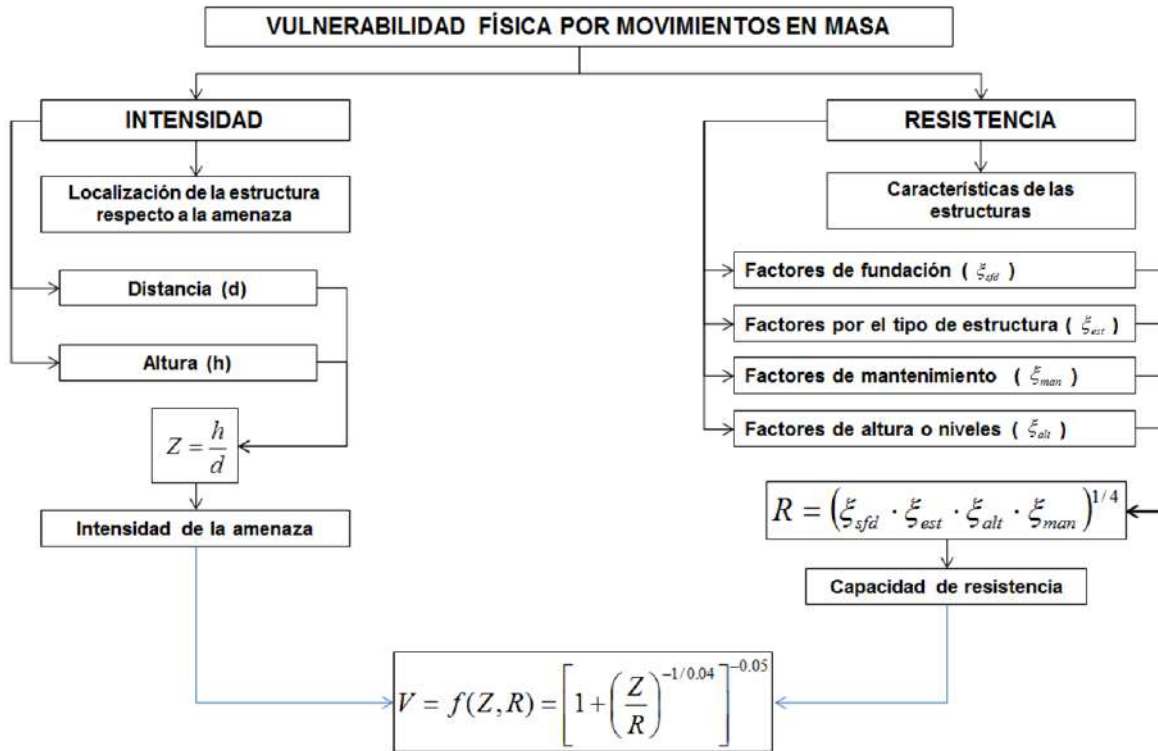


Figura 197. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa

16.2.2 Calibración de la metodología

La metodología presentada en el numeral anterior y explicada en detalle en el Informe I 2445 01 Rev7, fue calibrada a partir del proceso de inestabilidad ocurrido el 27 de septiembre de 1987 en el Cerro Pan de Azúcar, en la ciudad de Medellín. Dicho deslizamiento que terminó impactando parte del Barrio Villatina, en la Comuna 8, provocó la muerte de alrededor de 500 personas, la destrucción de unas 100 viviendas aproximadamente y cerca de 2400 personas damnificadas, por lo que fue considerado como una de las grandes tragedias ocurridas en la ciudad y hasta el 2007 como uno de los 10 desastres urbanos más importantes del mundo según Coupé et al. (2007).

16.2.2.1 Polígono asociado al Deslizamiento Villatina

En la UMI delimitada para el Polígono San Antonio, también objeto de estudio en el Proyecto Barrios Sostenibles (SIGA, 2018), se presentó el conocido como deslizamiento Villatina, el cual generó una mancha de deslizamiento clave para la calibración de la metodología de trabajo usada para evaluar el riesgo por deslizamiento en todos los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles.

Con el objetivo de hacer tal calibración, se procedió al trazado de la que debió ser en su momento la mancha o polígono asociado al Deslizamiento Villatina. Se ha construido sobre la cartografía del año 1973, de tal manera que siendo previa a la ocurrencia del deslizamiento permite ejecutar un análisis del tipo retrogresivo “back analysis”.

Como insumo para definir el polígono, se utilizaron registros fotográficos del deslizamiento, tomados desde diferentes ángulos, la descripción del movimiento en masa según los expertos del tema, la información recopilada durante la campaña de campo que hizo parte de este estudio y la interpretación de fotografías aéreas. Esta última actividad permitió identificar la corona y algunos puntos de referencia claves.

Dentro de los puntos que sirvieron como guía para establecer el posible límite de la mancha, se identificó una geoforma denominada en el capítulo de geomorfología del Estudio del Polígono San Antonio (SIGA, 2018) como Peldaño Tectónico, ubicado en la parte SSW del deslizamiento, un drenaje ubicado en el límite occidental y las vías con nomenclatura Calle 56 EE, Calle 56 D y Carrera 16 (Figura 198).

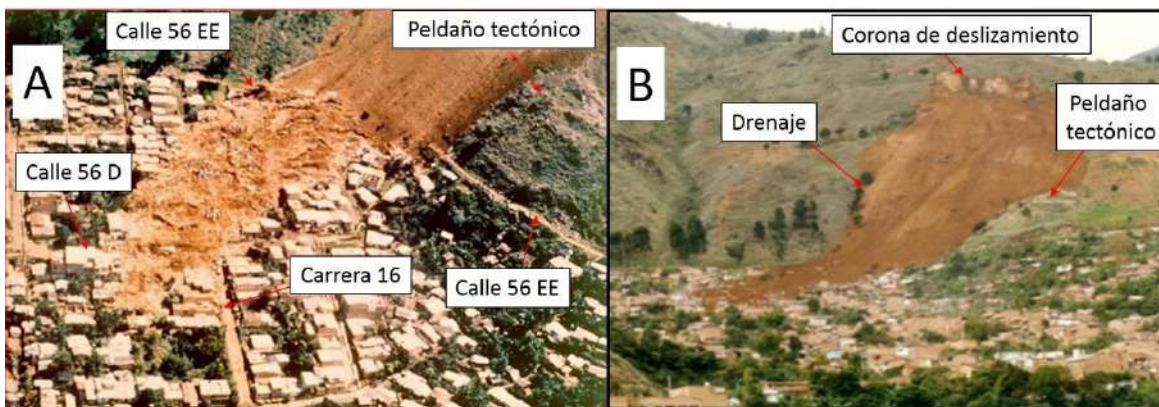


Figura 198. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo

Con la identificación de las referencias mencionadas anteriormente, que se localizan en partes externas del movimiento, y con la interpretación de la cartografía, se demarcó el polígono asociado al evento denominado deslizamiento Villatina (Figura 199).

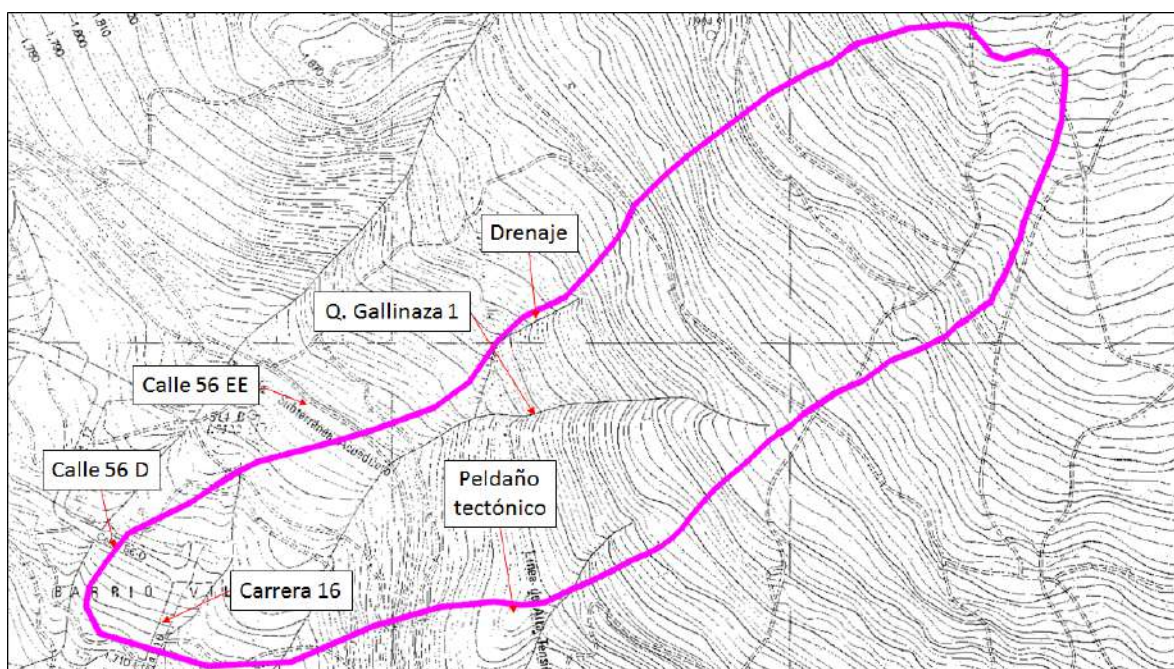


Figura 199. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías

La Figura 200, a continuación, muestra de nuevo el polígono asociado al deslizamiento mencionado, partiendo de su escarpe de tipo acorazonado y llegando hasta la zona conocida como Campo Santo. En el Mapa 40 y la Figura 201 se presentan las unidades geomorfológicas y el Perfil A-A, trazado en parte de la zona del deslizamiento Villatina; de la UMI San Antonio. La explicación en detalle de dichas unidades geomorfológicas se presenta en el Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales para el Polígono San Antonio (Siga, 2018).

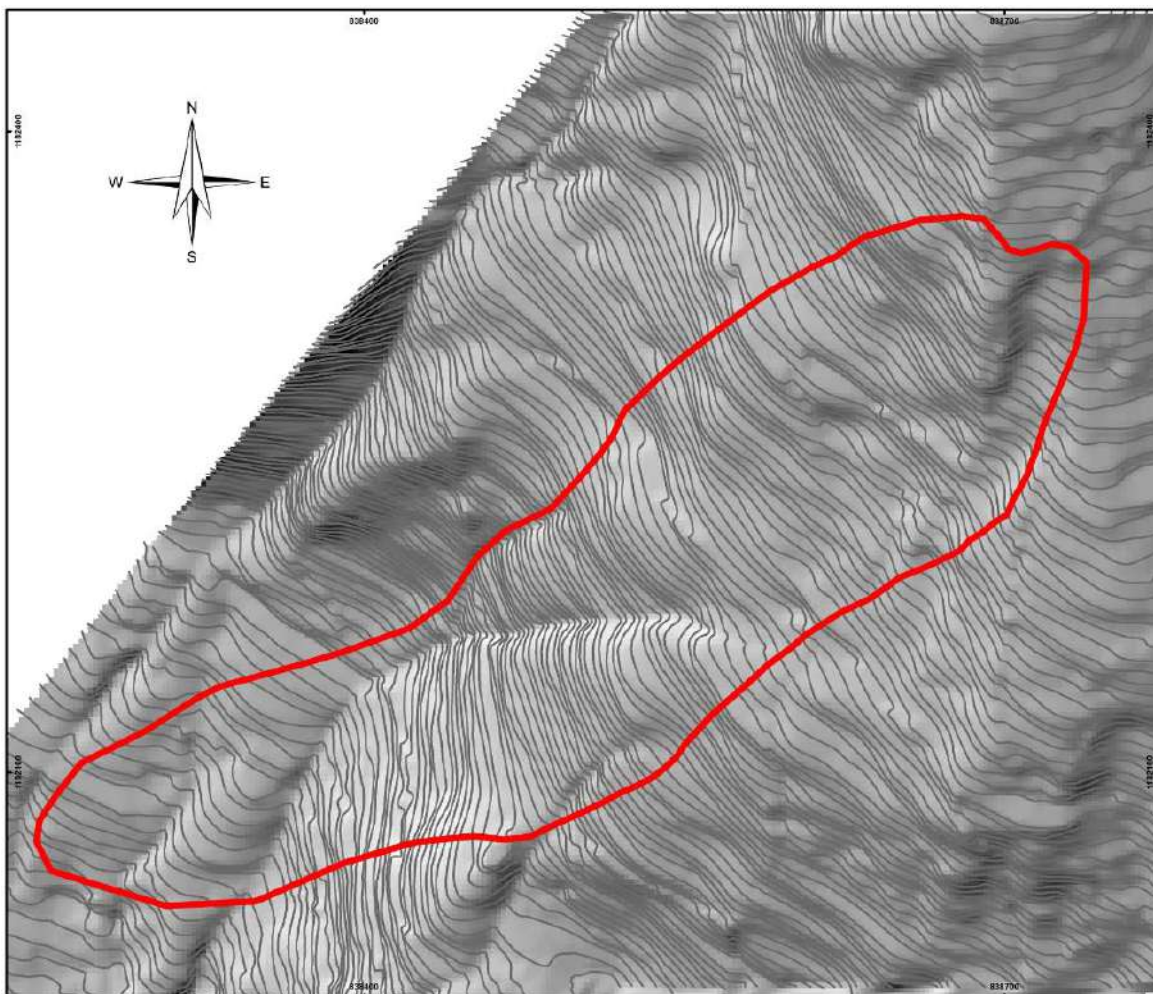
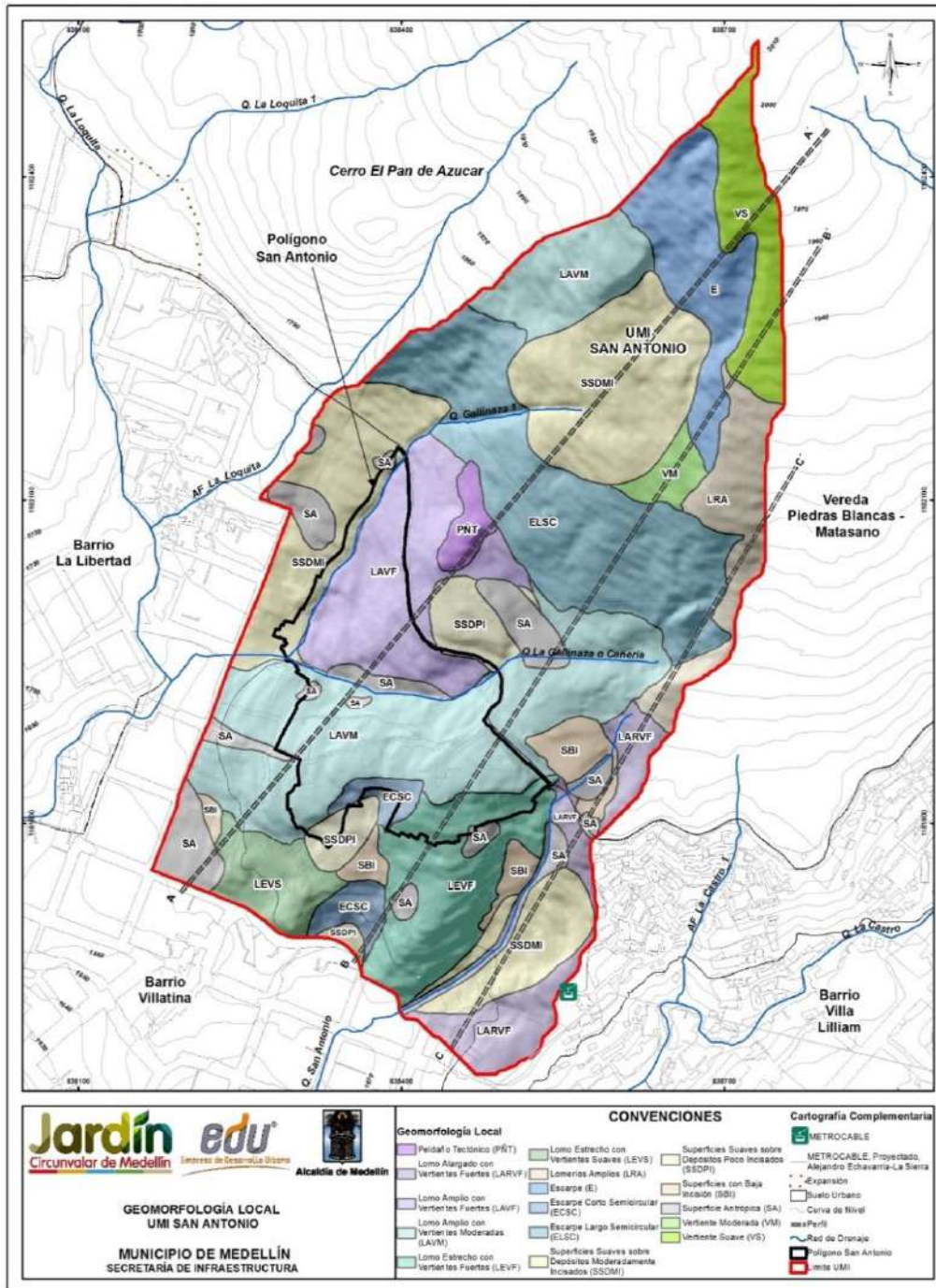


Figura 200. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973



Mapa 40. Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

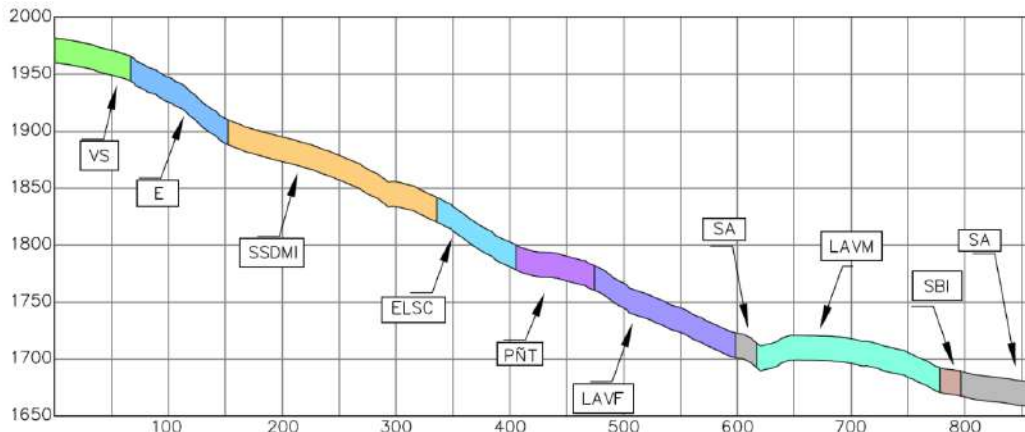




Figura 201. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

El movimiento del material se da desde la unidad de escarpe (E) donde la pendiente es muy alta (mayor a 30°), continua sobre la unidad de superficies suaves sobre depósitos moderadamente incisados (SSDMI) que tiene pendientes predominantemente altas (15°-30°) y controlado por las geoformas cóncavas (vaguadas) presentes en esta unidad. Nuevamente entra en una zona de pendientes muy altas asociadas a la unidad de escarpe largo semicircular (ELSC) donde se encuentra el inicio de la cuenca de la Quebrada Gallinaza 1, que por su valle estrecho y abrupto facilita la movilidad de materiales en su cauce y que marca la división entre las unidades geomorfológicas de superficies suaves sobre depósitos moderadamente incisados (SSDMI) al occidente y la unidad de lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), esta última con pendiente muy alta. En este punto, debido a la diferencia en la geomorfología del sector, el deslizamiento se comporta distinto al occidente y al oriente.

El movimiento se extiende hacia el oriente hasta la unidad geomorfológica peldaño tectónico (PNT) que sirve como barrera que desvió el material hacia el occidente. Este desvío junto a la pendiente de la unidad lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), provocan que el material aumente la velocidad y se movilice en dirección al cauce de la Quebrada Gallinaza 1 e incluso la sobrepase.

En la margen occidental a la altura de la unidad escarpe largo semicircular (ELSC), el material se encausa tanto en el cañón de la Quebrada Gallinaza 1 como en el cañón de una quebrada que se observa claramente en la cartografía del IGAC (1973) y en las fotografías planteadas en la Figura 198. Este suceso sumado a la cantidad de material y velocidad del mismo, provocan que continúe en dirección SSW hacia el escarpe del lomo amplio con vertientes fuertes (LAVF), que actúa como barrera, ocasionando el rebote hacia el suroccidente y llegando a depositarse hasta la esquina de la carrera 16 con calle 56 D (Figura 198). Es importante mencionar que el drenaje utilizado como referencia, no hace parte de la red hidrográfica de la cartografía actual del POT (2014), siendo este un cambio morfológico importante ocurrido después del fenómeno Deslizamiento Villatina.



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

16.2.2.2 Factor de intensidad

Se habló en el Numeral 16.2.1 de este informe sobre una formulación matemática que simula el comportamiento de una estructura de acuerdo con la localización respecto a un probable movimiento en masa. Según Guimaraes (2015) se consideran dos variables determinadas geoméricamente. En primer lugar, la altura del deslizamiento (h) calculada por la diferencia entre la cota máxima del deslizamiento (cota de la corona) y la cota donde se ubica el centro de gravedad de la estructura. Adicionalmente, se tiene en cuenta la distancia real recorrida entre el punto de partida del deslizamiento (corona del deslizamiento) y el centro de masa de la estructura. La Figura 196 ilustra las anteriores variables de distancia (d) y altura (h). La relación entre la altura (h) y la distancia (d) se consideró como la función de intensidad de la amenaza o del evento para el cálculo de la vulnerabilidad $Z=h/d$.

La metodología para llegar a la definición de esta variable de vulnerabilidad Z es como se indica a continuación. Para mayores detalles se recomienda consultar el Informe I-2445-01A-Metodología SIG.

- ✓ Se crean puntos críticos (focos de deslizamiento) con el objetivo de determinar cuáles sitios tienen los valores más altos de probabilidad de ocurrencia de deslizamiento. Para facilitar esta búsqueda, el archivo raster se convierte a puntos y luego se seleccionan aquellos más críticos. Los valores umbral cambian para algunos polígonos, pero de manera general se consideraron como críticos aquellos puntos cuyo valor superó a 0,097724987.
- ✓ Se calcula de distancia (d) desde cualquier punto del territorio hasta el foco más cercano. Con los puntos críticos definidos se procede a generar una superficie de distancia con respecto a ese punto, pero esta superficie tiene la propiedad de considerar la inclinación del terreno.
- ✓ Se genera un raster de altura de referencia para generar así otro raster que sirva como referencia para establecer la diferencia de alturas entre el punto crítico y cualquier punto del territorio. Este raster es una malla con un único valor, el valor de altura para el punto crítico.
- ✓ Se determina la diferencia de alturas de cada sitio del territorio con respecto al foco (h). En la sentencia para generar esta nueva superficie se hacen nulas aquellas celdas cuyo valor de altura está por encima del punto crítico, es decir, el modelo está considerando que existe afectación por desprendimiento de materiales sólo para las zonas que están por debajo del punto crítico.
- ✓ Se calcula un raster de Intensidad (Z) para cada punto, lo cual consiste en generar una superficie que denota el grado de intensidad de un movimiento en masa. Este raster está en función de la distancia al punto crítico y de la diferencia de alturas entre el sitio evaluado y la altura del punto crítico. La ecuación que se ingresa al cuadro de diálogo del es (h/d) .

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

- ✓ Se genera un raster de intensidad máxima (Z) que es el resultado de tomar los raster de intensidad de cada punto crítico y para cada ubicación evaluar cuál es máximo valor y asignarle ese a la superficie definitiva.

El cálculo del factor de intensidad (Z) en comparación con el polígono del numeral anterior se considera entonces la mejor manera de darle validez a la metodología usada, es decir, la forma de hablar de una correcta calibración del modelo.

16.2.2.3 Comparación de factor de intensidad con polígono de deslizamiento

La Figura 202, a continuación, presenta en una misma imagen el mapa del modelo geológico de las UMI's San Antonio y Pinares de Oriente obtenido con la cartografía del 2014 tomada del POT y el factor de intensidad (z) calculado con la cartografía del IGAC (1973), en la zona aferente al deslizamiento Villatina, la cual es cercana al Polígono San Antonio. Se ha incluido además el polígono asociado al deslizamiento según los geólogos de esta oficina, el cual se había mostrado y explicado ya en el Numeral 16.2.2.1 de este mismo informe.

Es importante aclarar que el polígono rojo de la Figura 202 al ser trazado sobre la cartografía del IGAC (1973) da lugar a lo que se denomina en el área de la geotecnia un “back analysis”. Esto último por cuanto corresponde a lo que sería la mancha más importante generada por el deslizamiento en una cartografía previa a la de generación del deslizamiento. Se resalta el foco del deslizamiento y la zona que los geólogos mapearon como depósito de deslizamiento, en este caso el asociado al deslizamiento Villatina, el cual queda contenido en polígono rojo calculado según la metodología.

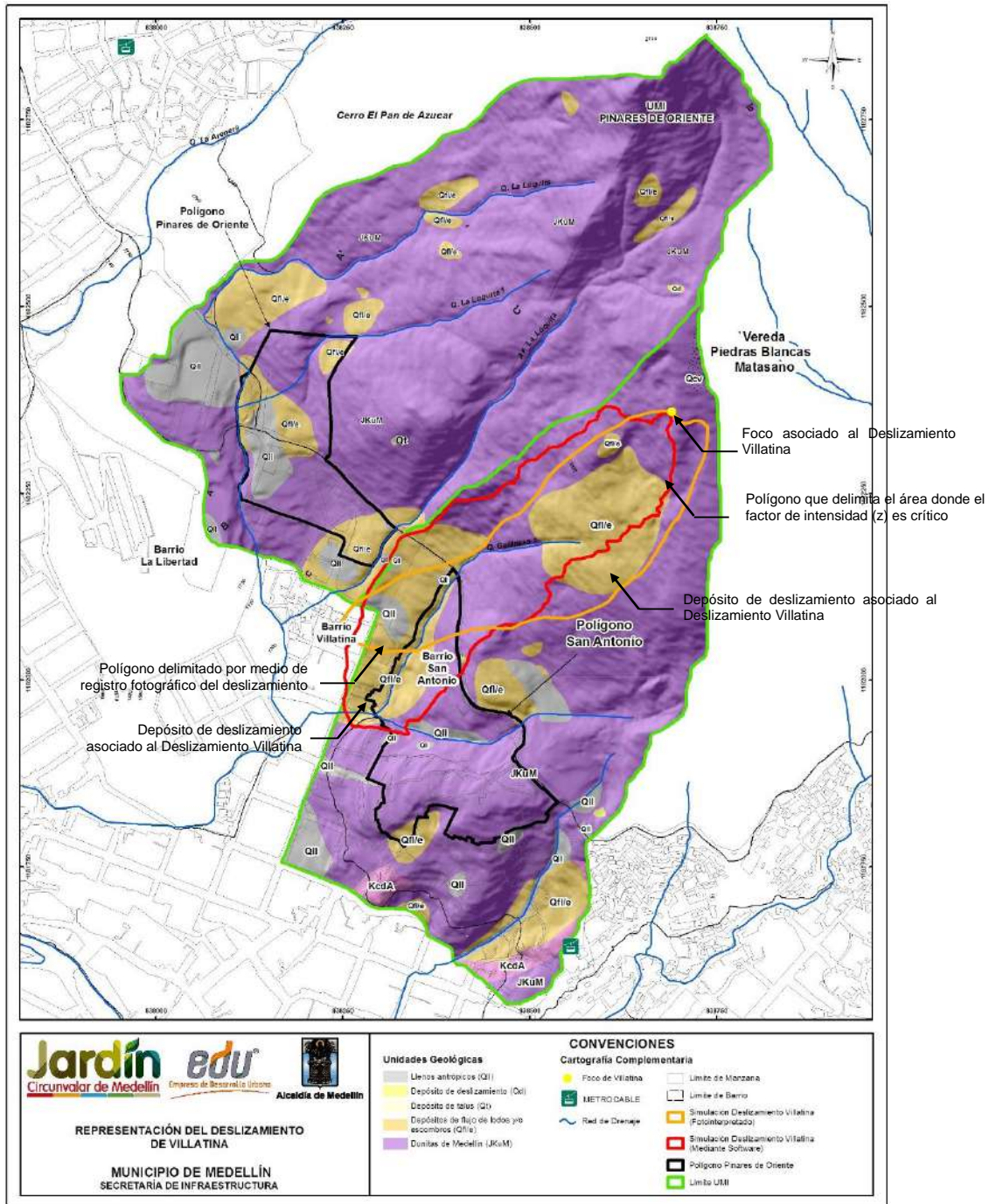




Figura 202. Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---



Se destacan varios hechos importantes que hacen que con este ejercicio se pueda dar validez a la metodología usada en este estudio para evaluar el riesgo por deslizamiento teniendo en cuenta el factor de intensidad.

- ✓ En primer lugar, se tiene que el polígono delimitado por medio de registro fotográfico del deslizamiento está contenido, en términos prácticos, dentro del polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico. Las zonas que del primer polígono quedan por fuera del segundo son pocas y se asocian simplemente a la corona amplia acorazonada que tuvo del deslizamiento Villatina, en comparación con el foco único que la metodología considera para determinar el área donde el factor de intensidad (z) es crítico.
- ✓ Ambos polígonos llegan a lo que se conoce hoy con el nombre de Campo Santo y cubren el drenaje principal (Quebrada Gallinaza 1) y el secundario al oeste del primero. Se tiene entonces de esta forma una trayectoria muy similar del deslizamiento Villatina según ambos polígonos. La extensión de ambos polígonos es casi la misma, lo cual es muestra clara de que el factor de intensidad (z) considerado como crítico es el adecuado.
- ✓ Ambos polígonos explican la localización de las formaciones geológicas denominadas flujos de lodos y escombros asociadas al deslizamiento Villatina. Incluso el polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico es un poco más amplio en la parte baja y cubre todo lo que en este sector se ha denominado flujos de lodos y escombros, mostrando así que la metodología puede ser conservadora en lugar de liberal, en cuanto al no cubrimiento de áreas susceptibles de ser impactadas con deslizamientos.

No se debe olvidar que el modelo correspondiente asume condiciones ideales que gobiernan los fenómenos físicos modelados, por lo tanto es una aproximación de la realidad. Bajo este criterio es necesario entender que los resultados obtenidos no deben considerarse como valores invariantes, sino que corresponden a órdenes de magnitud que incluyen las incertidumbres con las cuales se conforman los modelos respectivos y son, por consiguiente, las herramientas que permiten apoyar la toma de decisiones. Por tal motivo es normal que se presenten algunas diferencias. Sin embargo, para efectos de la calibración de la metodología de trabajo, se considera que la similitud obtenida entre el polígono delimitado por medio de registro fotográfico del deslizamiento y el polígono que delimita el área donde el factor de intensidad (z) es crítico es racionalmente precisa. Finalmente, se puede concluir con base en el ejercicio efectuado que la metodología usada en este estudio es la adecuada.

16.2.3 Levantamientos de campo y análisis de la información

Para hacer cumplir la metodología anteriormente expuesta, se recolectó información primaria de los componentes relevantes para el análisis. El trabajo inicio con la revisión de la información básica y posteriormente se realizaron visitas de campo donde a través de la implementación de fichas y registros fotográficos se levantaron las estructuras.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

Para la ejecución de los trabajos de campo de forma ordenada, se realizó previamente una zonificación de los polígonos en función de las manzanas físicamente formadas con el objetivo de distribuir los trabajos en campo.

El polígono de intervención fue dividido en cuatro zonas (Figura 203), y para la delimitación de éste se utilizaron los siguientes referentes físicos. El área de intervención se concentra en los sectores El Faro y Altos de la Torre, ubicados en la vertiente de la microcuenca de la quebrada Chorro Hondo, cercanas están las vertientes de la quebrada La Loca en el sector de Golondrinas y la quebrada la Rafita en el Sector El Pacífico.

En este capítulo se presentan los resultados de la recolección e inventario de toda la información referente a los componentes físicos relevantes para el cálculo de la vulnerabilidad estructural de acuerdo a la metodología presentada. Los componentes principales inspeccionados fueron: tipo de ocupación, tipo de estructura, estado o condiciones de la estructura, altura de la estructura (número de niveles por edificación) y tipo de cubierta. Se realizó el levantamiento, inspección e inventario completo del Polígono El Faro, con un total de 341 estructuras. Las respectivas fichas de análisis para este polígono se presentan en el Anexo 06. El Mapa 41 presenta las vías de acceso y equipamientos del Polígono El Faro.

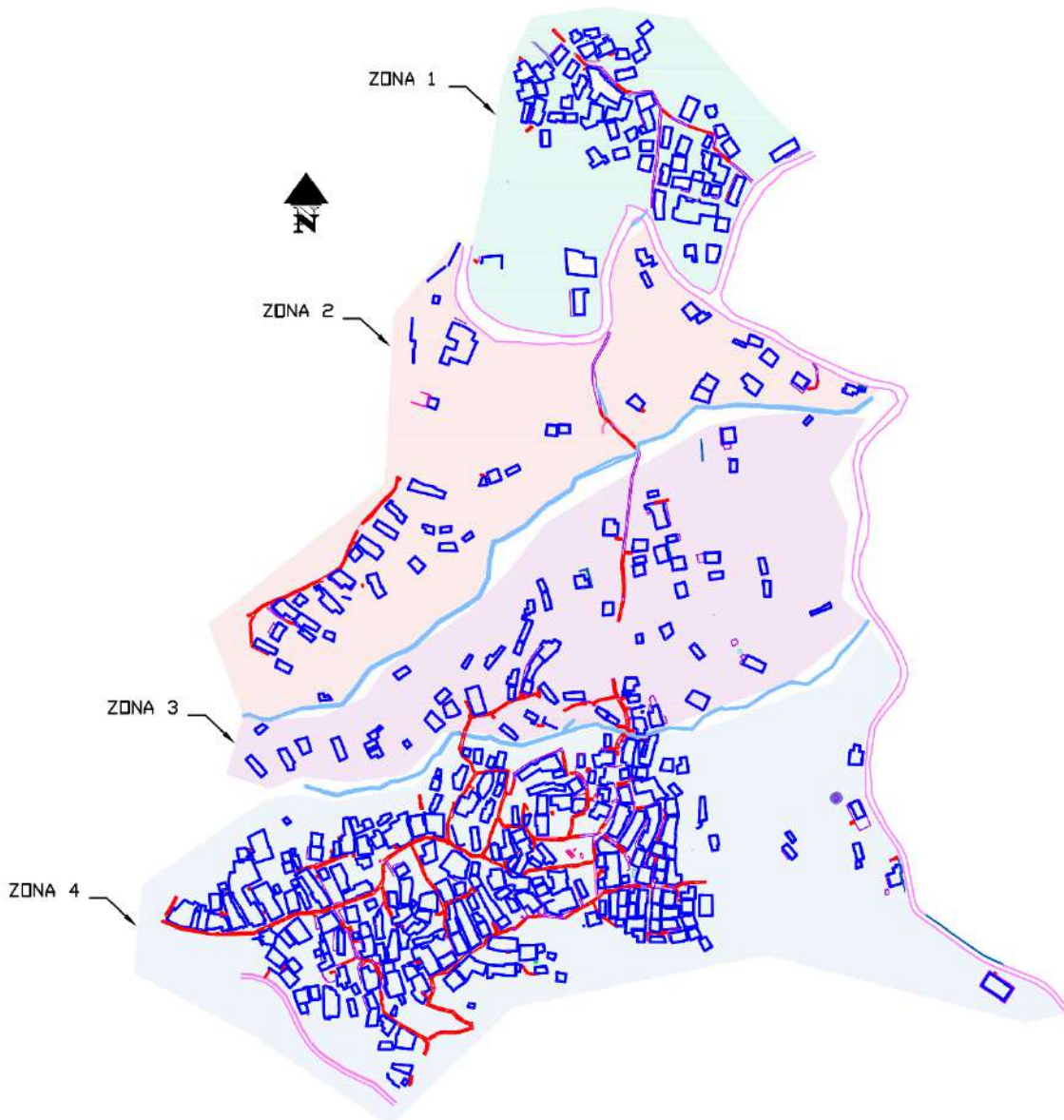
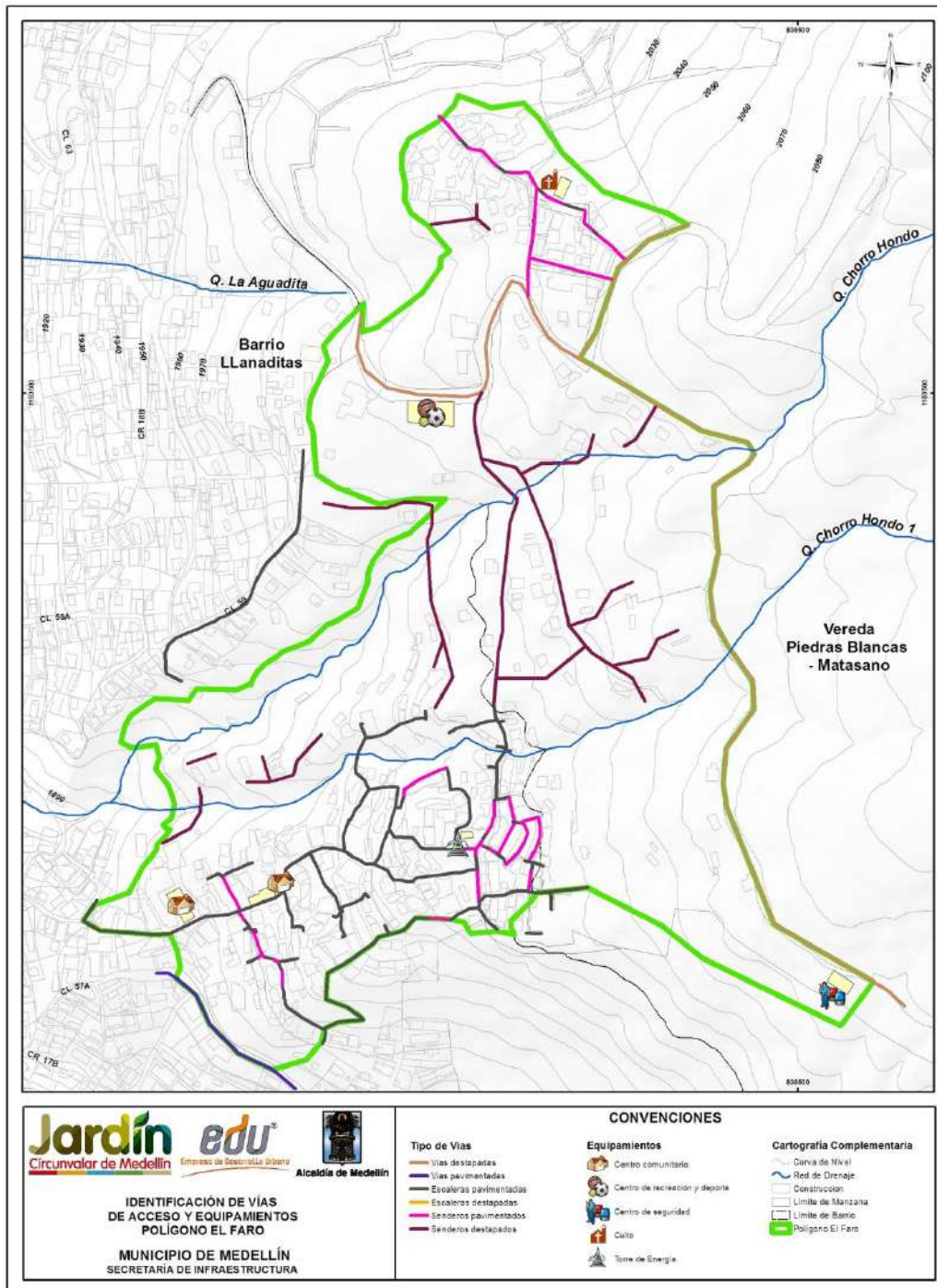




Figura 203. Zonificación para análisis de la vulnerabilidad en el Polígono El Faro



Mapa 41. Localización de vías de acceso y equipamientos en el Polígono El Faro (35_EFRViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_C y 35_EFRViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

Luego de recopilada la información de campo, ésta es analizada mediante la conformación inicial de una base de datos con la numeración y atributos de cada estructura. Con esta base de datos se realizó un análisis estadístico mediante la implementación de diagramas circulares (Tabla 68 a Tabla 72) para facilitar la interpretación de los resultados.

De forma general, las estructuras que predominan en el polígono son en mampostería en un estado medio que hace referencia a un estado entre Bueno y Malo. No se considera una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no tienen confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. También se observaron estructuras en mampostería en un estado bueno, dándole esta calificación debido a que estaban mejor estructuradas e incorporaban en su concepción elementos como columnas y vigas de concreto reforzado con una esbeltez proporcional entre ancho y altura. Además, se encontraron estructuras en madera en un estado con notable deterioro.

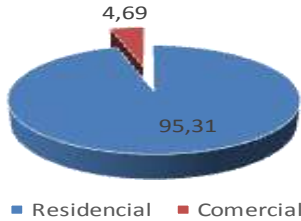
Las fundaciones de las estructuras son superficiales no convencionales dado que existe una gran cantidad de construcciones en las que sus cimentaciones son troncos de madera, terreno natural, delgadas losas en mampostería y/o concreto o simplemente estructuras con una esbeltez no proporcional entre altura y ancho.

Específicamente en el polígono de El Faro se tiene las siguientes características principales:

- ✓ El uso predominante en el polígono El Faro tiene un tipo de ocupación residencial, con un 95.31%. El porcentaje restante corresponde a una ocupación comercial con un 4.69% (Tabla 68).
- ✓ Casi la mitad de las estructuras del polígono tienen un tipo de estructura en mampostería con un 49.56%. También se evidencia un porcentaje considerable de estructuras en madera (Ligera) con un 41.35%. En menores porcentajes se encontraron estructuras Muy ligeras y Mixtas con el 8.5% y 0.59% (Tabla 69).
- ✓ El Polígono El Faro, en general el estado que predomina en las construcciones inspeccionadas se ubica en Malo, con un 39%. Pero también se encuentra un buen porcentaje en estado Medio y Muy malo con un 32.84% y 28.15 (Tabla 70).
- ✓ Un poco más de la mitad de las construcciones tiene Teja de zinc con un 65.69%, le siguen las cubiertas en Eternit con un 32.55%. Las cubiertas en Losa y Otro tipo se encuentran en menores porcentajes con el 1.47% y 0.29%, respectivamente (Tabla 71).
- ✓ La mayoría de las viviendas del polígono El Faro cuentan con un solo nivel construido, con un 92.96%. Le siguen las edificaciones de dos niveles y de tres a cinco niveles, con un 6.45% y un 0.59% respectivamente (Tabla 72).
- ✓ En el caso particular de las estructuras al interior del Polígono El Faro, se identificó que el 100% de las estructuras poseen fundaciones superficiales a través de sistemas de encepados en concretos ciclópeos conformados por piedra y mortero.

Tabla 68. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa

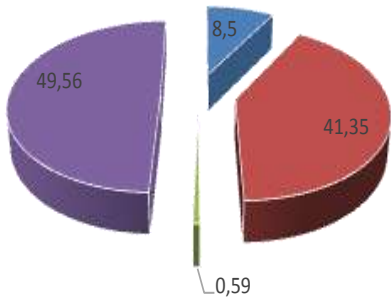
Ocupación	Total Viviendas	%
Residencial	325	95.31
Comercial	16	4.69
Total	341	100



■ Residencial ■ Comercial

Tabla 69. Tipo de estructura – Movimiento en Masa

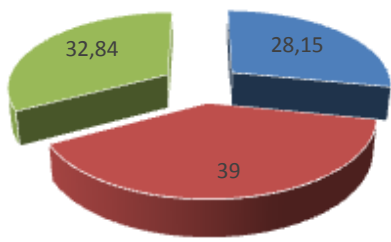
Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Muy ligera	29	8.5
Ligera	141	41.35
Mixta	2	0.59
Mampostería	169	49.56
Total	341	100



■ Muy ligera ■ Ligera ■ Mixta ■ Mampostería

Tabla 70. Estado de la estructura – Movimiento en Masa

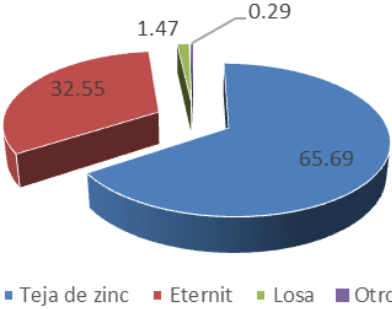
Estado de la estructura	Total Viviendas	%
Muy mala	96	28.15
Mala	133	39
Media	112	32.84
Total	341	100



■ Muy mala ■ Mala ■ Media

Tabla 71. Tipo de cubierta – Movimiento en Masa

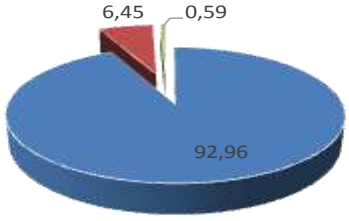
Tipo Cubierta	Total Viviendas	%
Teja de zinc	224	65.69
Eternit	111	32.55
Losa	5	1.47
Otro	1	0.29
Total	341	100



■ Teja de zinc ■ Eternit ■ Losa ■ Otro

Tabla 72. Alturas de las viviendas – Movimiento en Masa

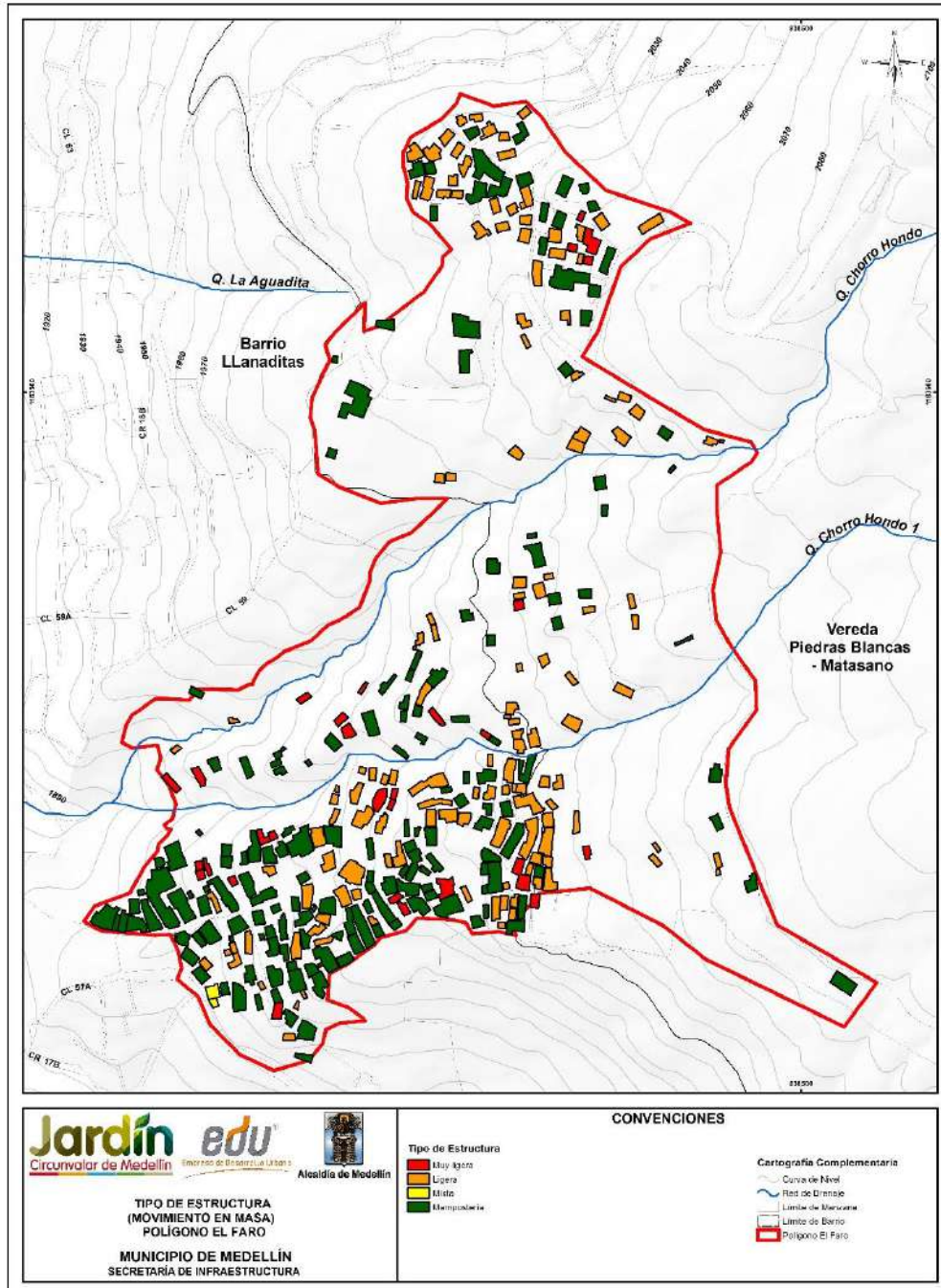
Altura Estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	317	92.96
De 2 pisos	22	6.45
De 3 a 5 pisos	2	0.59
Total	341	100



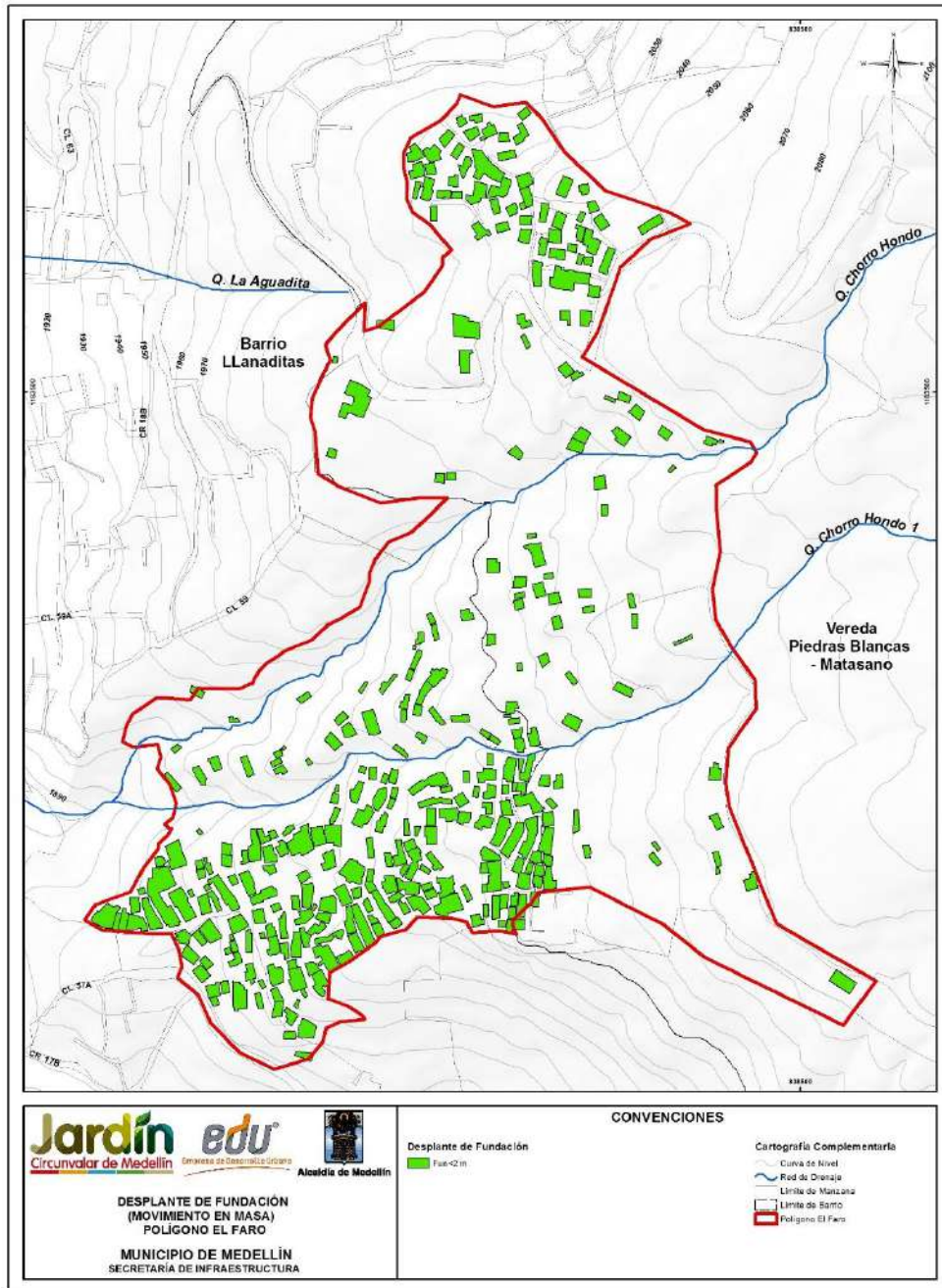
■ Un solo piso ■ De 2 pisos ■ De 3 a 5 pisos

Además de los análisis estadísticos se realizaron mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, los cuales se presentan del Mapa 42 al Mapa 46.

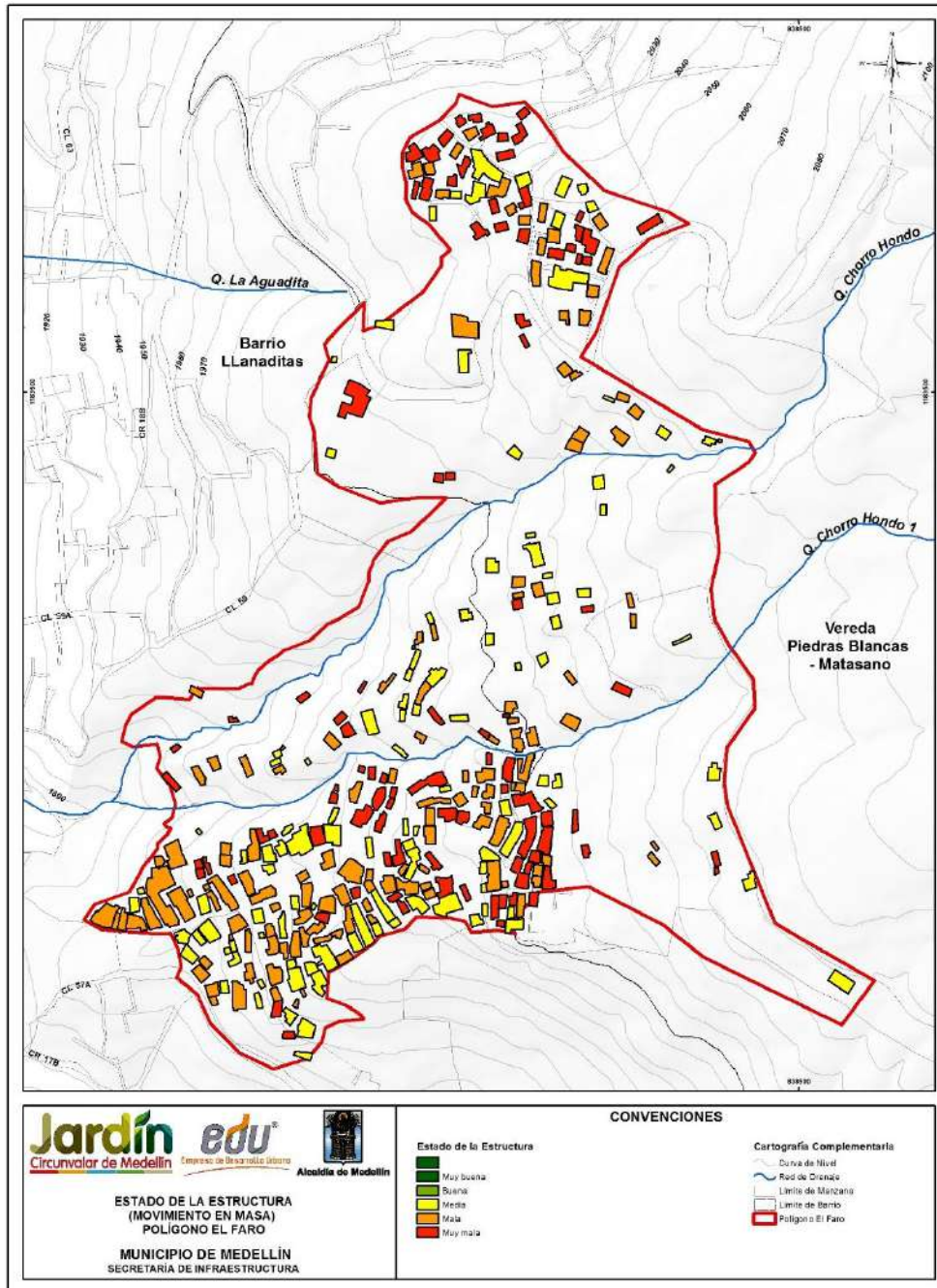
Con la información presentada y la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, se determinó el factor de resistencia cuantitativa de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta. El Mapa 47 presenta la distribución del factor resistencia donde un factor de resistencia de 1.0 corresponde a una estructura de máxima resistencia. En éste se muestra que en el Polígono no se presentan estructuras de alta resistencia y de las 341 estructuras, 89 de ellas presentan resistencia baja (26.1%) y las restantes, 252 presentan resistencia media (73.9%). Las construcciones de resistencia media, que son las que prevalecen en el polígono, corresponden en su gran mayoría a estructuras de mampostería de un solo piso.



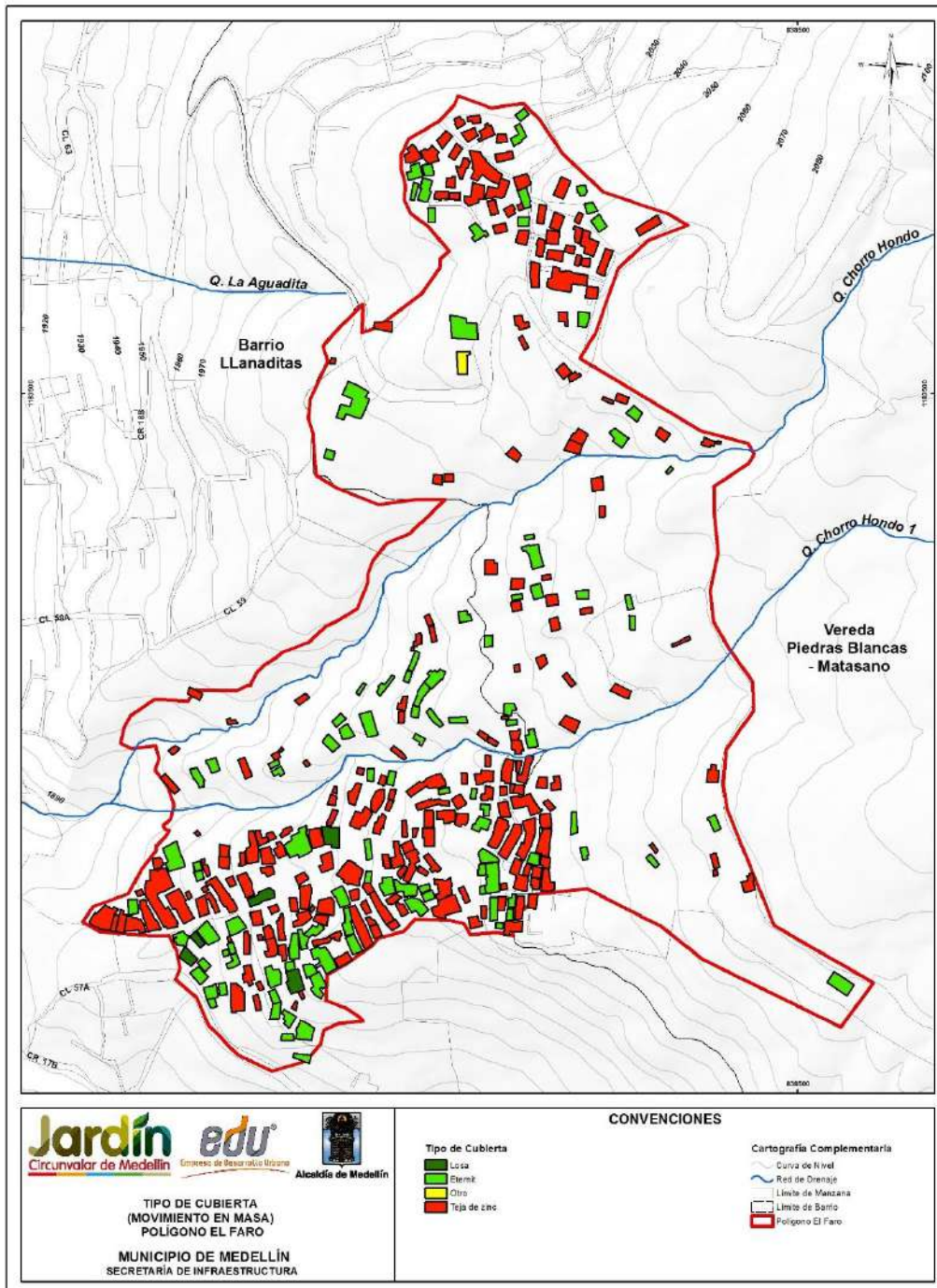
Mapa 42. Localización espacial del tipo de estructura por movimientos en masa en el Polígono El Faro
(25_EFRTipodeEstructura_Medellin_C y 25_EFRTipodeEstructura_Medellin_T)



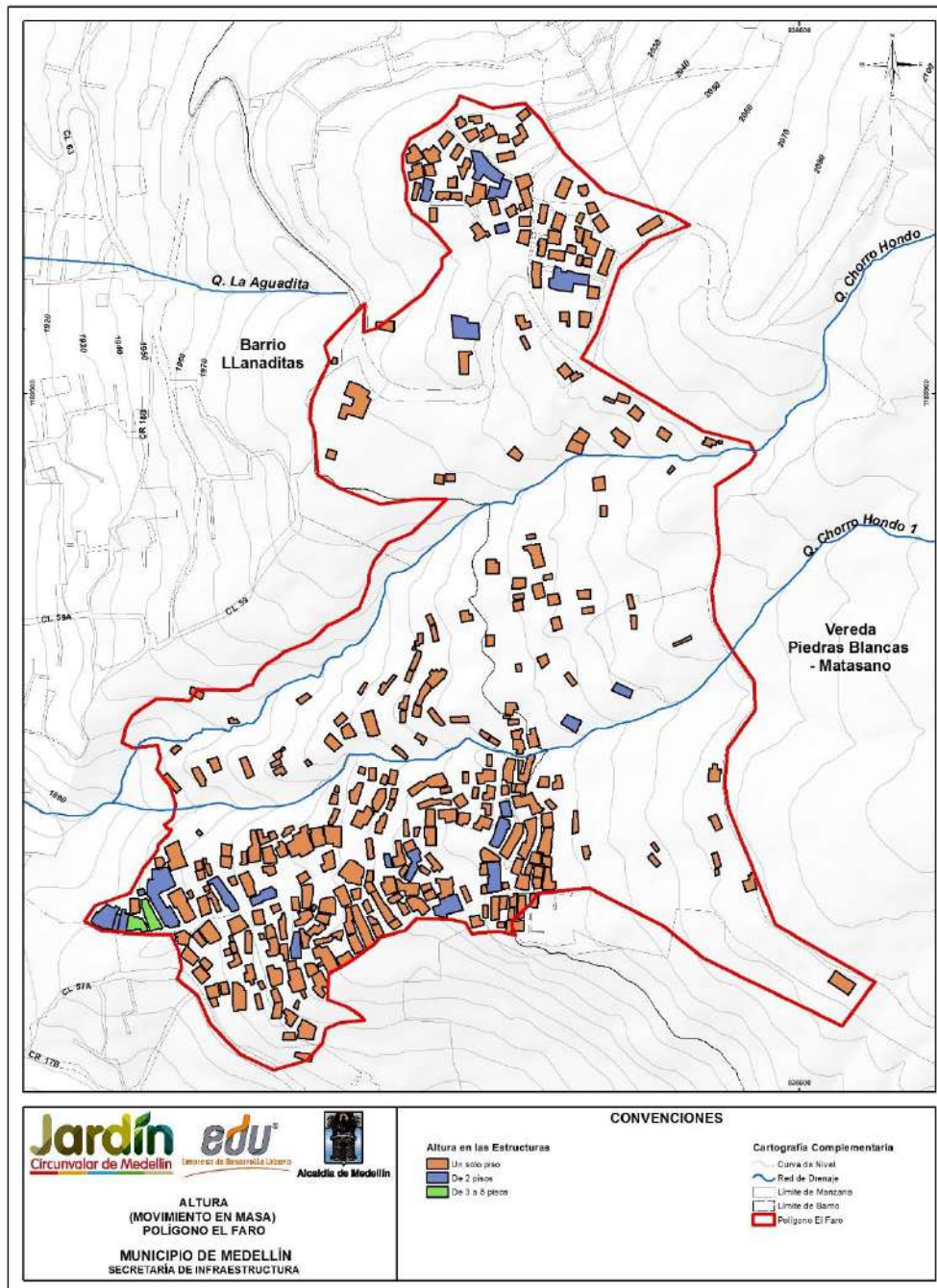
Mapa 43. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimientos en masa en el Polígono El Faro
(26_EFRDesplantedeFundaciones_Medellin_C y 26_EFRDesplantedeFundaciones_Medellin_T)



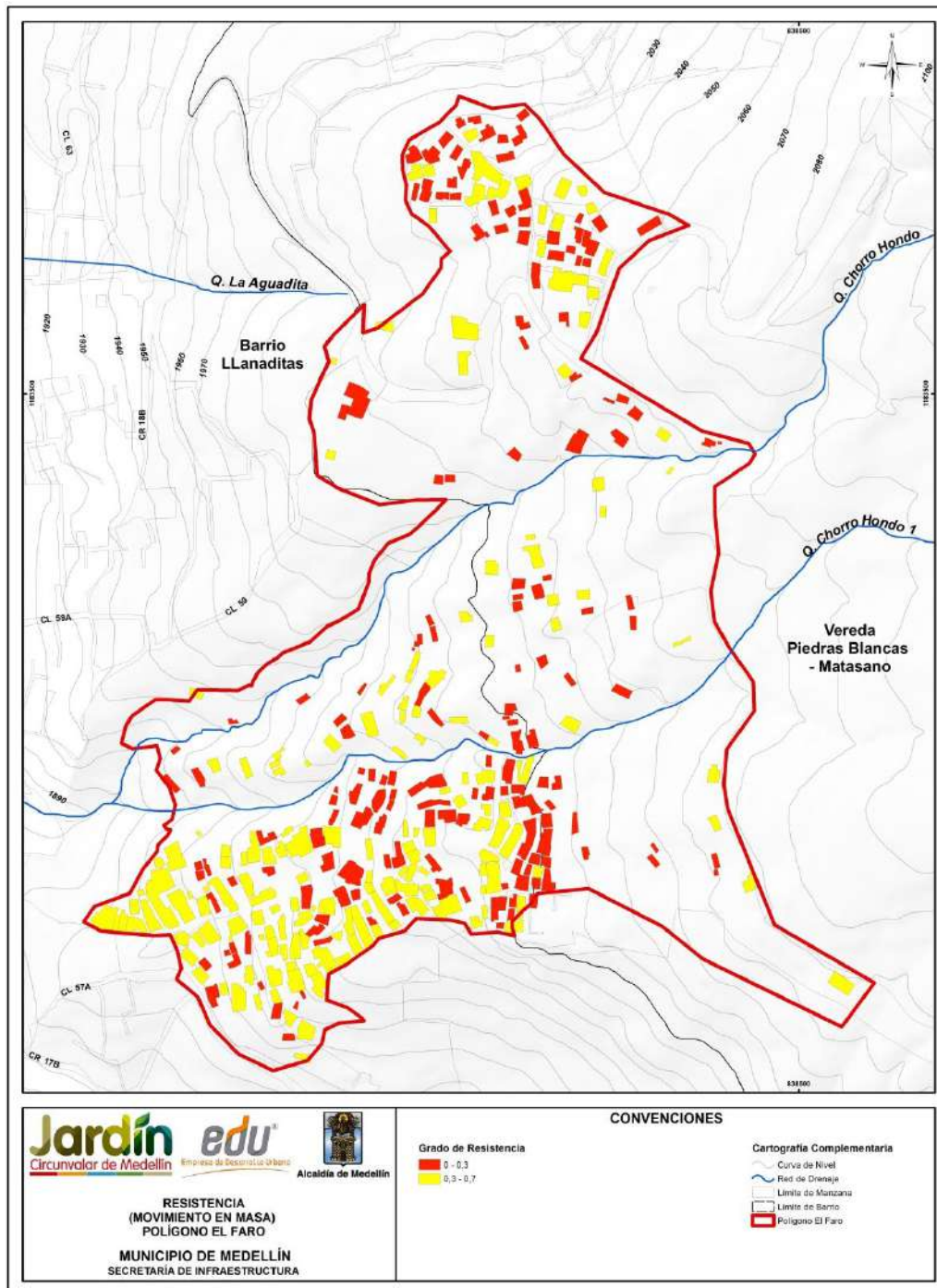
Mapa 44. Localización espacial del estado de estructura por movimientos en masa en el Polígono El Faro
(27_EFREstadodelaEstructura_Medellin_C y 27_EFREstadodelaEstructura_Medellin_T)



Mapa 45. Localización espacial del tipo de cubierta por movimientos en masa en el Polígono El Faro
(28_EFRTipodeCubierta_Medellin_C y 28_EFRTipodeCubierta_Medellin_T)



Mapa 46. Localización espacial de la altura de estructura por movimientos en masa en el Polígono El Faro
 (29_EFRAlturadelaConstruccion_Medellin_C y 29_EFRAlturadelaConstruccion_Medellin_T)



Mapa 47. Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa (30_EFRMapadeResistencia_Medellin_C y 30_EFRMapadeResistencia_Medellin_T)

16.2.4 Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas

Teniendo en cuenta la propuesta de Guimaraes (2015) y considerando la obtención del factor resistencia de cada una de las estructuras (R) al interior del polígono El Faro, observado en el Mapa 47, se procedió a determinar el factor intensidad (z) a través de los focos de los movimientos en masa más probables que podrían afectar la zona del Polígono El Faro.

Para determinar el factor intensidad (z) en cada polígono, se partió del mapa de amenaza por movimientos en masa a 50 años (Mapa 37). En este mapa se determinaron las zonas de máxima probabilidad de falla y se evaluó su proximidad al polígono en estudio. El factor intensidad (z) de los movimientos en masa más probables, se determinó mediante la relación entre la diferencia de altura (h) y la distancia real del terreno (d), ambas medidas entre el foco del deslizamiento y el centroide de las estructuras. Finalmente, se obtuvo el factor de intensidad mostrado en el Mapa 48, por efecto del movimiento en masa y su localización respecto a su foco más probable, que en conjunto con la resistencia (R), permitía obtener la vulnerabilidad estructural de cada elemento:

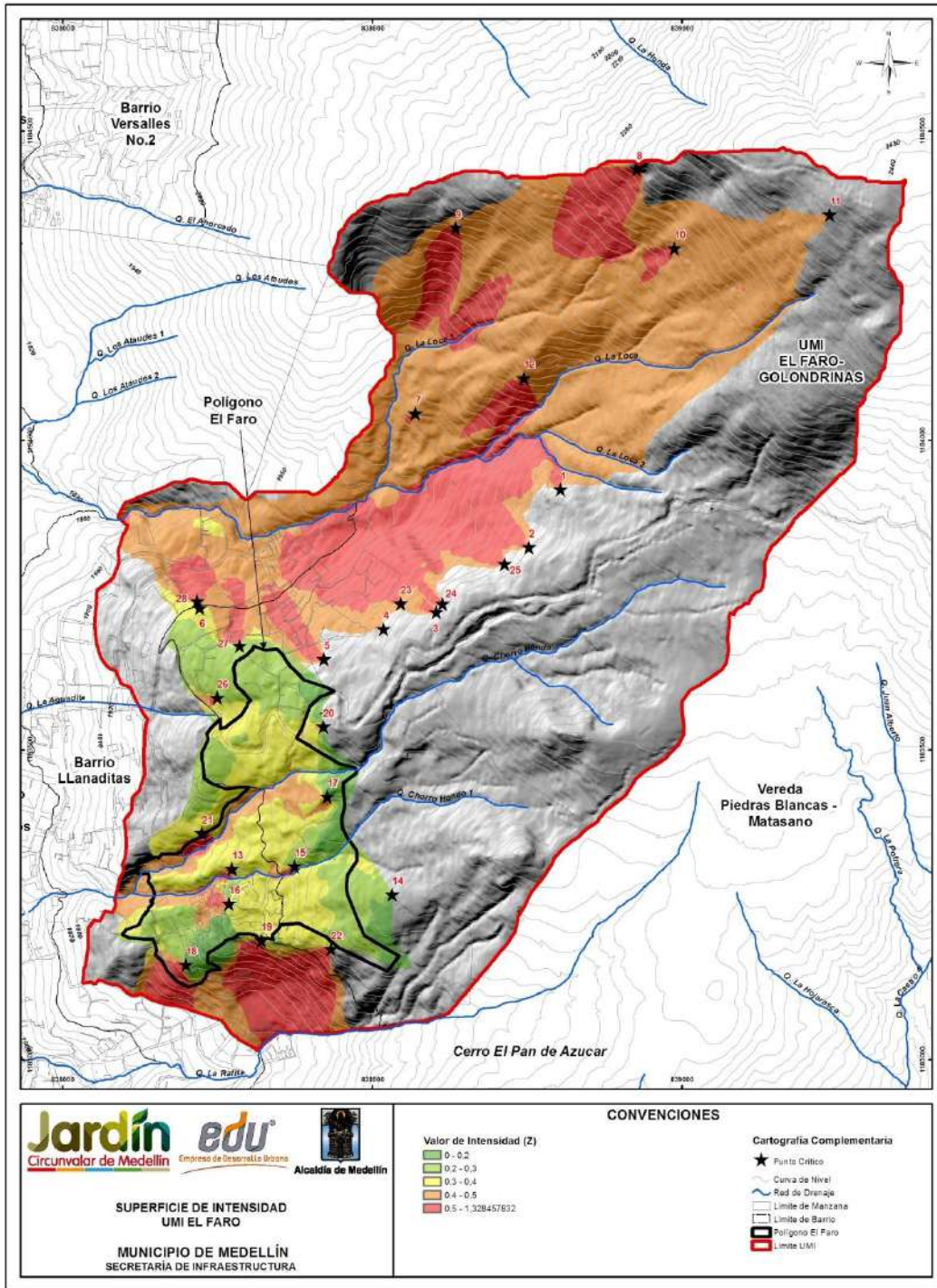
$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

La vulnerabilidad estructural se expresa en esta metodología como un número adimensional que varía entre 0 y 1, donde 1 es el valor de máxima vulnerabilidad estructural, valor que bien puede representar un factor de daño. La Tabla 73 presenta la clasificación de la vulnerabilidad física estructural establecida para este proyecto.

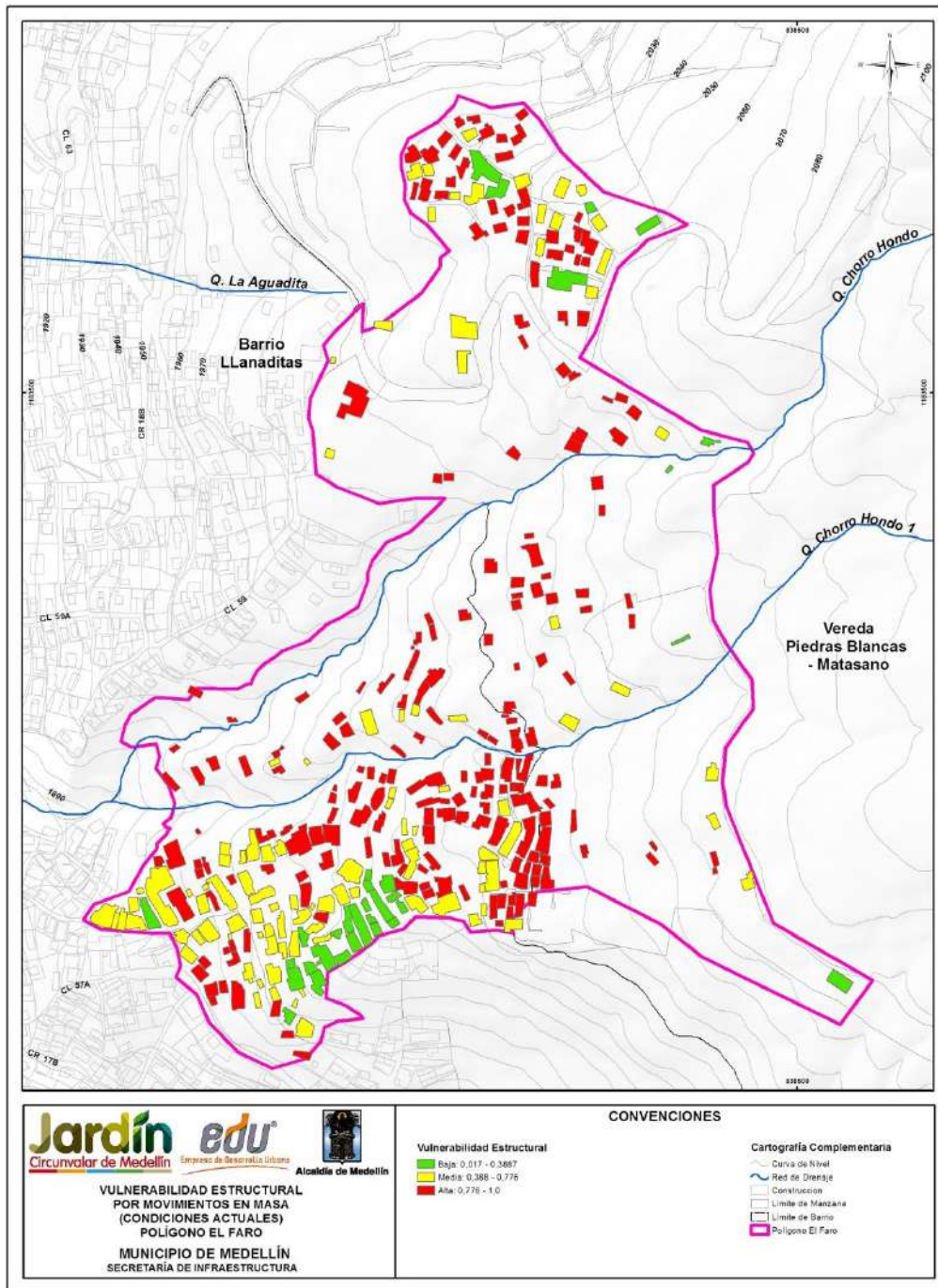
Tabla 73. Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa

Categoría de la Vulnerabilidad	Rango de la Vulnerabilidad	Descripción
Baja	0.0 – 0.388	Estructuras que presentarían condiciones de servicio con ligeros daños los cuales pueden ser solucionados con labores de mantenimiento y repotenciación
Media	0.388 – 0.776	Destrucción parcial de la estructura. Pérdida del servicio de las estructuras. A pesar de que las mismas puedan quedar en pie, el sistema estructural se verá seriamente afectado. Pérdida de elementos de estructurales y de apoyo.
Alta	0.776 – 1.0	Destrucción total de la estructura

El Mapa 49 y el Mapa 50 presentan el análisis de la vulnerabilidad estructural de las viviendas y de las vías de acceso y equipamientos del Polígono El Faro con su respectiva clasificación entre baja, media y alta según el criterio de la Tabla 73.

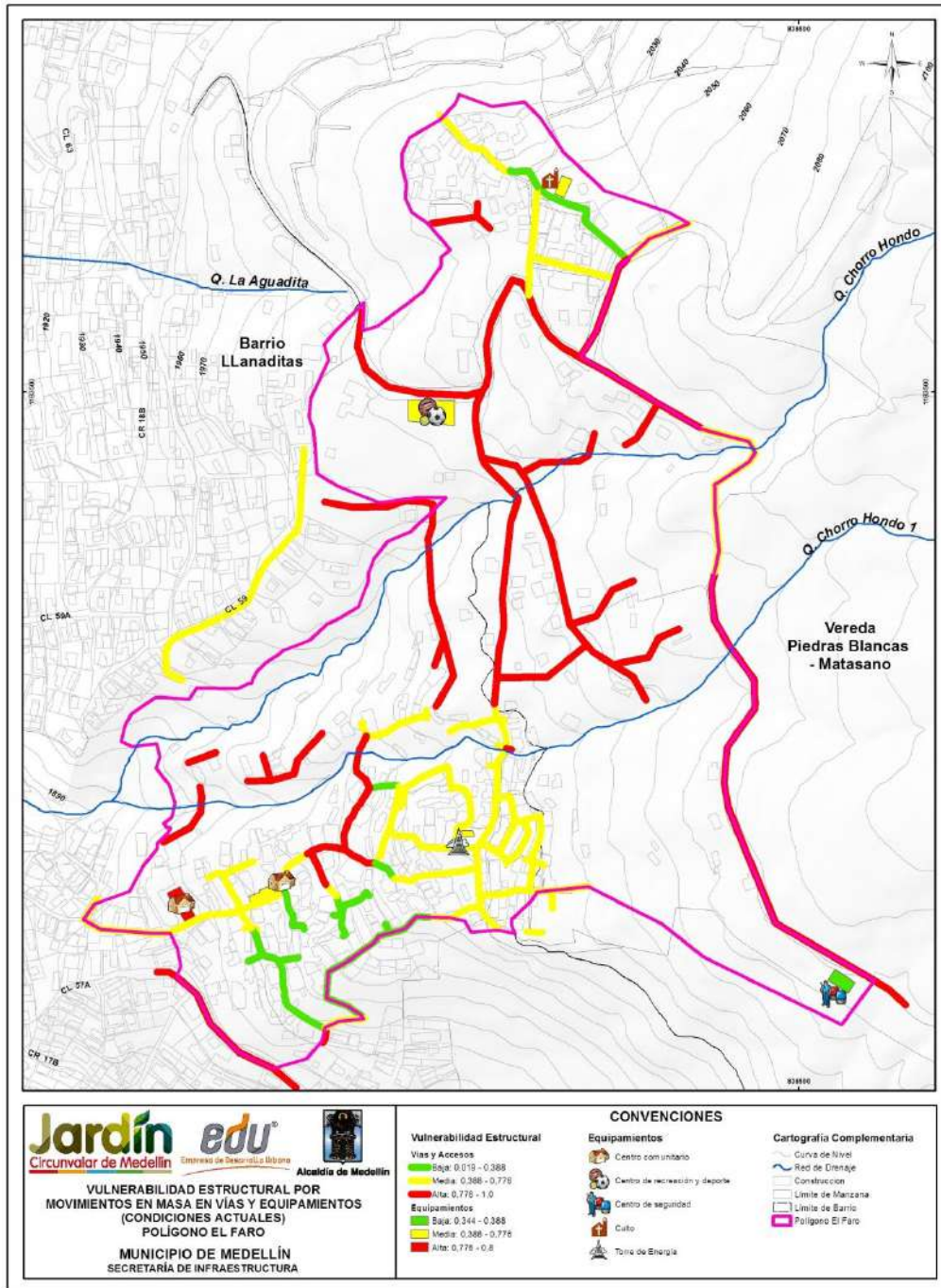


Mapa 48. Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono El Faro (EFRSuperficieIntesidadesZUMI_Medellin_C)



Mapa 49. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono El Faro por movimientos en masa

(36_EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 36_EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 50. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso y equipamientos en el Polígono El Faro
(45_EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_Cy
45_EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

La Figura 204 muestra la distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras por movimientos en masa presentada en el Mapa 49. Se ilustra que cerca de un 29% de las estructuras presentes al interior del Polígono El Faro presentan una vulnerabilidad media, el 10% presentan una vulnerabilidad baja y el 61% aproximadamente presentan una vulnerabilidad alta. Las estructuras con vulnerabilidad alta se concentran principalmente en las zonas 1 y 4 del polígono, con viviendas en su gran mayoría de un solo piso construidas en madera (48.0%) y en mampostería (41.5%).

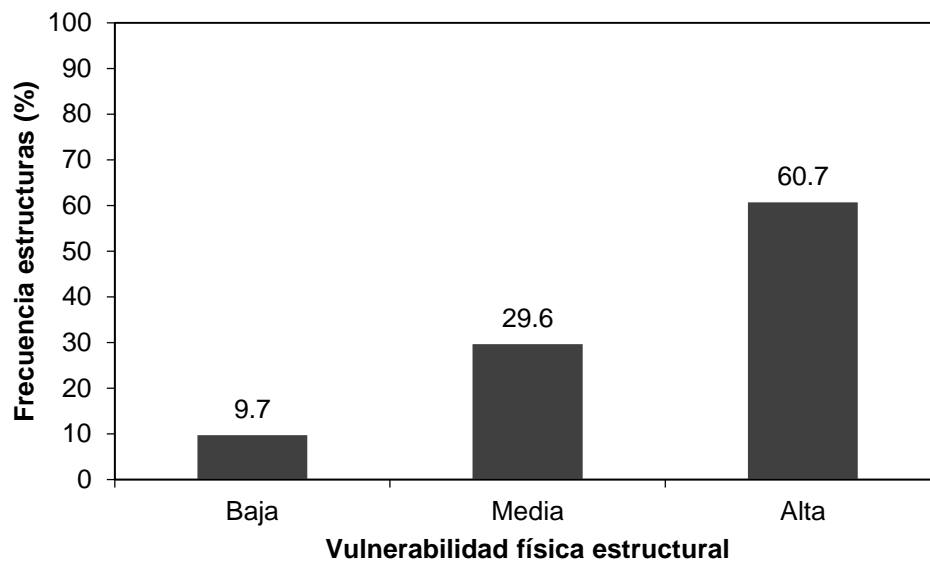


Figura 204. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras

Además de la vulnerabilidad física estructural, la metodología propuesta por Uzielli (2006) permite estimar la vulnerabilidad de las personas (V_p) que se encuentran al interior de las estructuras, en función de la vulnerabilidad estructural (V_e) mediante la expresión:

$$V_p = f(V_e) = 0.0014 \cdot e^{6.07 \cdot V_e}$$

La vulnerabilidad de las personas se expresa en como un numero adimensional que varía entre 0 y 0.6, donde 0.6 es el valor de máxima vulnerabilidad de las personas. Finalmente, la vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras por efectos de movimientos en masa, se podrá categorizar como se muestra en la Tabla 74.

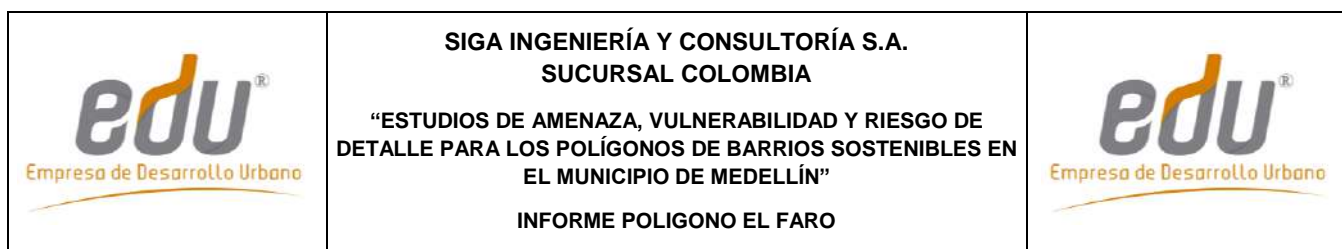
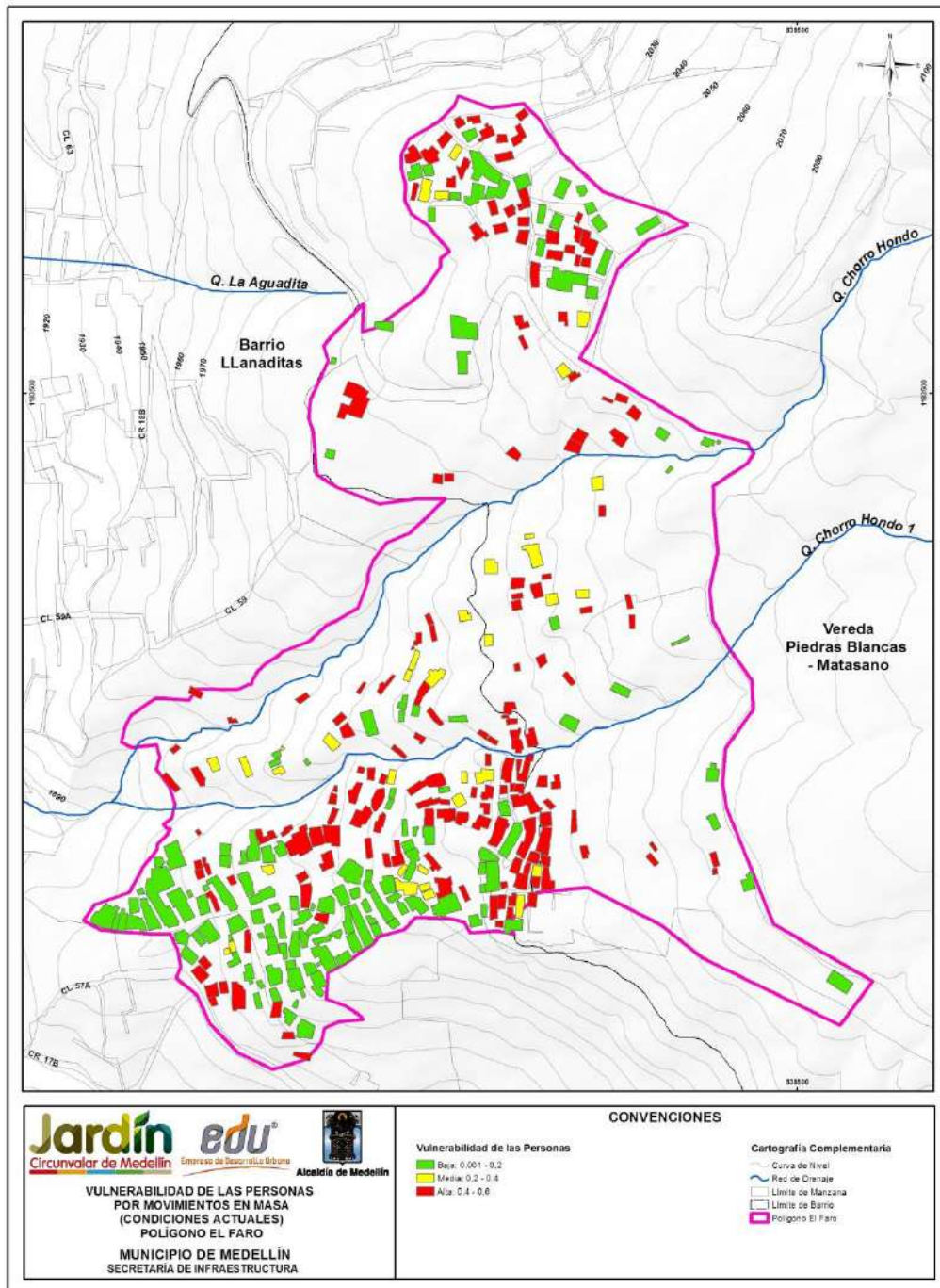




Tabla 74. Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa

Categoría de la Vulnerabilidad	Rango de la Vulnerabilidad	Descripción
Baja	0.0 – 0.2	Lesiones leves en las personas. A pesar de las lesiones, las personas se mantienen conscientes de lo sucedido y pueden mantenerse en pie sin ningún tipo de asistencia.
Media	0.2 – 0.4	Lesiones moderadas a graves en las personas. Las personas pueden perder ligeramente la conciencia o entrar en estados de shock temporales. Las lesiones pueden ir entre cortes y fracturas pueden requerir de asistencia médica que dejan a la persona sin capacidad de movilizarse de forma temporal.
Alta	0.4 – 0.6	Lesiones muy graves como invalides o pérdida de miembros corporales. Pérdida de vida por efecto del deslizamiento.

El Mapa 51 presenta el mapa de análisis de vulnerabilidad de las personas del Polígono El Faro por movimientos en masa con su respectiva clasificación entre baja, media y alta. Se observa que de las 341 estructuras, 165 presentan alta vulnerabilidad de personas (49%), 141 presentan vulnerabilidad de personas baja (41%) y 35 presentan vulnerabilidad media (10%). Las estructuras que presentan una alta vulnerabilidad de personas coinciden con las que presentan una alta vulnerabilidad física, y se concentran en las áreas de máximas pendientes en el polígono. Considerando el estado de las estructuras, se tiene que el 85.4% de las estructuras que presentan alta vulnerabilidad de personas se caracterizan por estar construidas en madera (ligera), lata y cartón (muy ligera).



Mapa 51. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono El Faro por movimientos en masa
 (37_EFRVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y
 37_EFRVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)

	SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO	
---	--	---

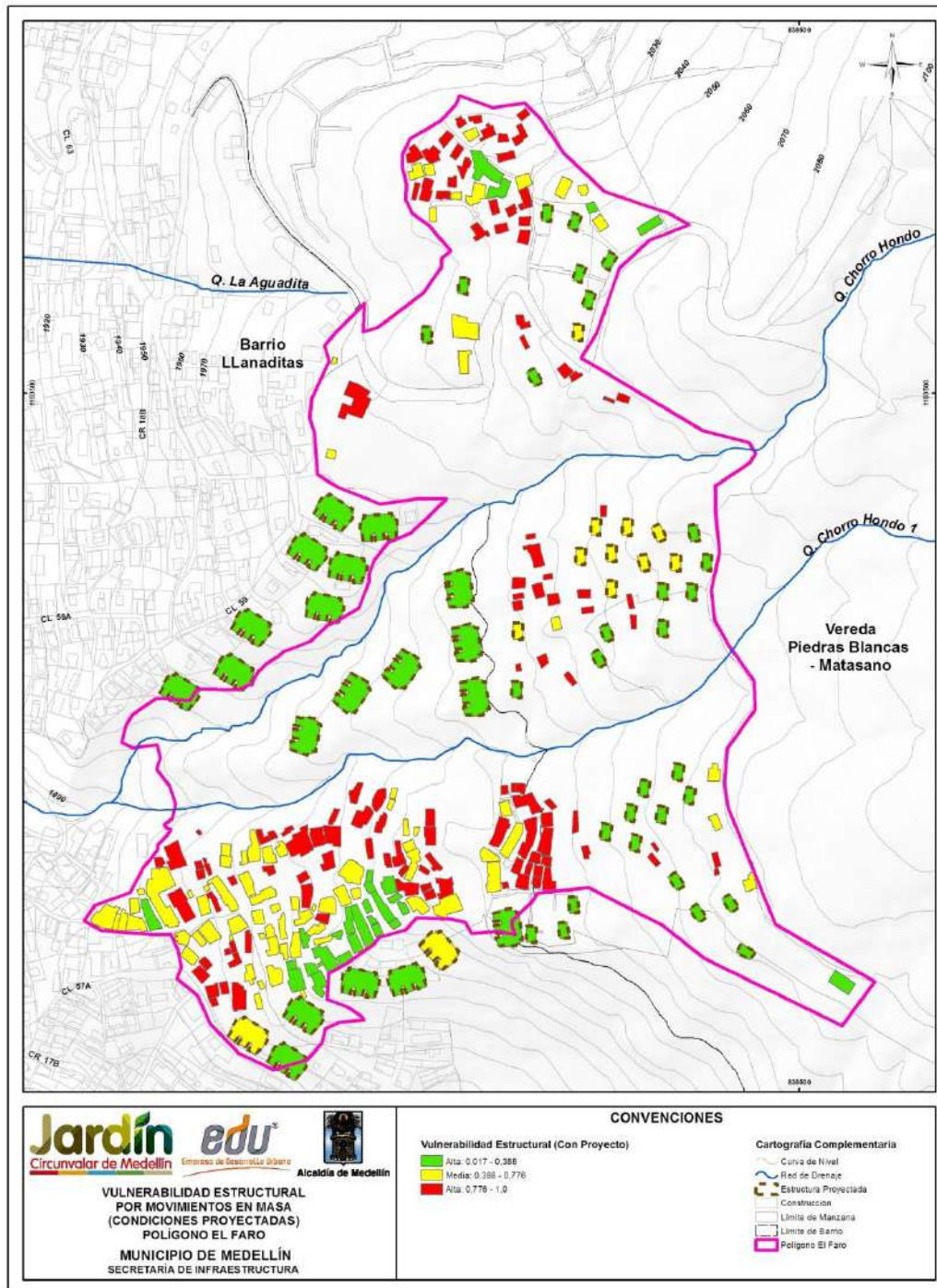
Para esta modelación se consideraron dos tipos de nuevas estructuras que serán construidas en el Polígono, las que se localizan en la zona urbana y las de la zona rural. En caso de las estructuras urbanas, éstas estructuras tendrán características mejores que las existentes, al considerar que se tratan de edificaciones de muy buen estado con más de tres niveles en concreto reforzado que cumplirán las respectivas normas técnicas, entre ellas la Norma NSR-10 y que adicionalmente deberán estar cimentadas sobre fundaciones profundas de más de 10 m de profundidad. En caso de las estructuras rurales, éstas tendrán características similares a las urbanas al considerar que serán estructuras de muy buen estado construidas en concreto reforzado. Además se consideran estructuras de uno y dos pisos cimentadas entre 2 m y 10 m de profundidad.

Por tal motivo y considerando las calificaciones de la metodología propuesta para el análisis de vulnerabilidad, las nuevas estructuras de Barrios Sostenibles presentan las siguientes características (Tabla 75).

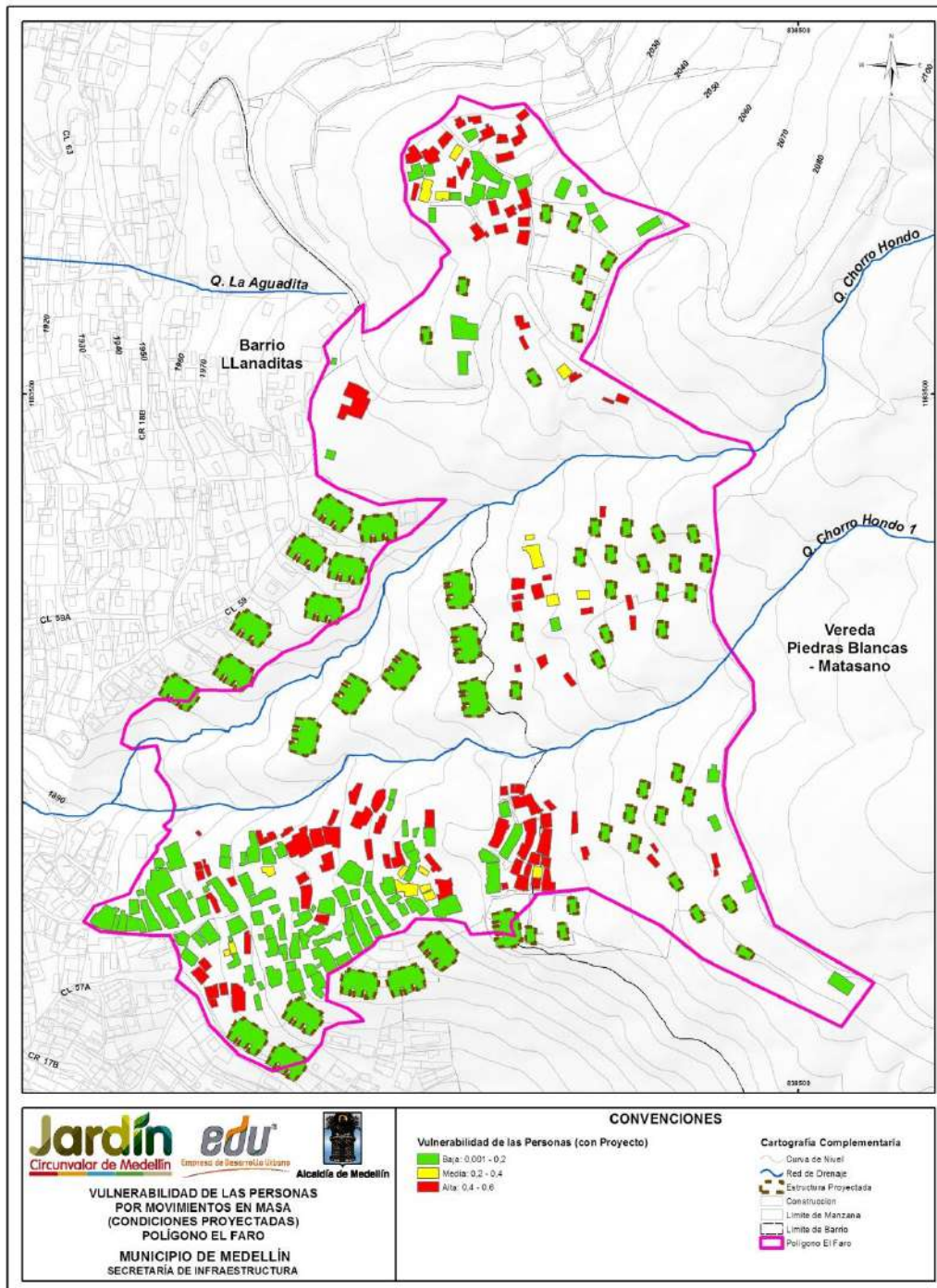
Tabla 75. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Polígono El Faro

Factores de vulnerabilidad estructural	Calificación Estructura Urbana	Calificación Estructura Rural
Estado de la estructura (ξ_{man})	1.5	1.5
Altura de la estructura (ξ_{alt})	0.9	0.1 – 0.4
Nivel de fundación de la estructura (ξ_{sfd})	1.05	0.63
Tipo de estructura (ξ_{est})	1.5	1.5

Teniendo en cuenta lo anterior, el factor de resistencia (R) para las estructuras urbanas es de 1.20. A este factor se le aplicó un factor de seguridad de 1.20, considerando cualquier factor constructivo y de diseño, enfocado en tener un factor de resistencia conservador, finalmente el valor de resistencia usado fue de 1.0 para todas las estructuras. En el caso de las estructuras rurales el factor de resistencia (R) considerado fue de 0.71. El Mapa 52 y el Mapa 53 presentan el resultado de la vulnerabilidad estructural y de las personas respectivamente, considerando los mismos factores de intensidad del Mapa 48 y el Proyecto Barrios Sostenibles. Se observa que las nuevas estructuras serán distribuidas en todo el Polígono, considerando la normatividad en cuanto a los retiros de las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1.



Mapa 52. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono El Faro por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (EFRVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)



Mapa 53. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono El Faro por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (EFRVulnerabilidadPersonasMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)

16.3 VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES

Para el caso de inundaciones, la vulnerabilidad física se estima tomando como fundamento la metodología empleada por Thouret et al. (2013) para la evaluación del riesgo por este tipo de fenómenos en Arequipa, Perú. Se considera aplicable esta metodología en la zona del presente estudio dada la gran similitud en tipología estructural que existe en ambos sitios, así como la similitud en los fenómenos estudiados.

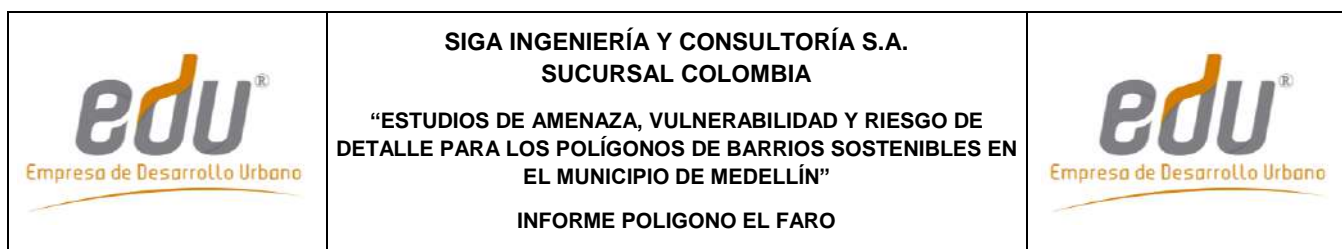
Según esta metodología, la vulnerabilidad física está definida a partir del Índice de Vulnerabilidad Residencial (RVI, por sus siglas en inglés), el cual a su vez está definido según el Índice de Vulnerabilidad de la Edificación (BUV, por sus siglas en inglés). Este último depende estrictamente de las características de las edificaciones, considerando los siguientes tres criterios principales: el tamaño de la edificación, la calidad y/o mantenimiento de su construcción, y la densidad poblacional.

El tamaño del edificio es evaluado a partir del número de niveles y la calificación de su vulnerabilidad es mayor para aquellas edificaciones que presentan un número de niveles menor. Así, para un edificio de cuatro o más niveles, su Factor de Vulnerabilidad por Tamaño de Edificación (FVT) será de 1, para uno de tres niveles será de 2, para uno de dos niveles será de 3 y, finalmente, para uno de un nivel será de 4, el mayor de todos.

Por su parte, en Thouret et al. (2013) el factor de vulnerabilidad por la calidad de la construcción (FVC) es evaluada de 1 a 3 según el grado de mantenimiento que presente la edificación. Se asigna una calificación de 1 a aquellas construcciones que tengan buen mantenimiento, 2 a aquellas que tengan un mantenimiento aceptable o medio y 3 a aquellas que presenten un mantenimiento deficiente. Para el caso en estudio, se considera para la calidad de la construcción el tipo de material de la vivienda y el estado de la estructura, dado que estos elementos representan con mayor fidelidad el grado de resistencia de la estructura frente a los fenómenos estudiados en la zona. La calificación a adoptar para cada combinación del tipo de material-estado se presenta en la Tabla 76.

Tabla 76. Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales

TIPO DE ESTRUCTURA	ESTADO DE LA ESTRUCTURA	FACTOR DE VULNERABILIDAD POR CALIDAD DE LA ESTRUCTURA (FVC)
Muy ligera (lata y cartón) o Ligera (Madera)	Muy mala a Mala	3
	Media	3
	Buena o Muy Buena	2
Media (Concreto y madera) o Mampostería	Muy mala a Mala	3
	Media	2
	Buena o Muy Buena	2
Concreto (con o sin refuerzo)	Muy mala a Mala	2
	Media	2
	Buena o Muy Buena	1



Para el factor por Densidad de Población (FVD), en Thouret et al. (2013) se emplea una calificación de 1 a 4. Se adopta un valor de 4 para altas densidades, de 3 para densidades medias, de 2 para densidades bajas y de 1 para densidades muy bajas.

A partir de estos tres factores, FVT, FVC y FVD, se estima el Índice de Vulnerabilidad de la Edificación (BuV) según la siguiente expresión, el cual tomará valores entre 1 y 48:

$$\text{BuV} = \text{FVT} \times \text{FVC} \times \text{FVD}$$

A partir del Índice BuV se estima el Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI), tal como se presenta en la Tabla 77.

Finalmente, para efectos del presente estudio, la vulnerabilidad será clasificada en alta, media y baja, reuniendo los RVI 1 y 2 en Vulnerabilidad Baja, el RVI 3 en Vulnerabilidad Media, y los RVI 4 y 5 en Vulnerabilidad Alta.

Tabla 77. Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV

BuV	RvI	Vulnerabilidad Física
1 a 3	1	Baja
4 a 6	2	Baja
7 a 12	3	Media
13 a 24	4	Alta
25 a 48	5	Alta

Para el caso de inundaciones las etapas son las anteriormente descritas. La diferencia consiste en que se incluye un atributo adicional para cada estructura, que es la densidad habitacional. Este atributo fue extraído del documento técnico elaborado por la San Buenaventura (2014) para la EDU.

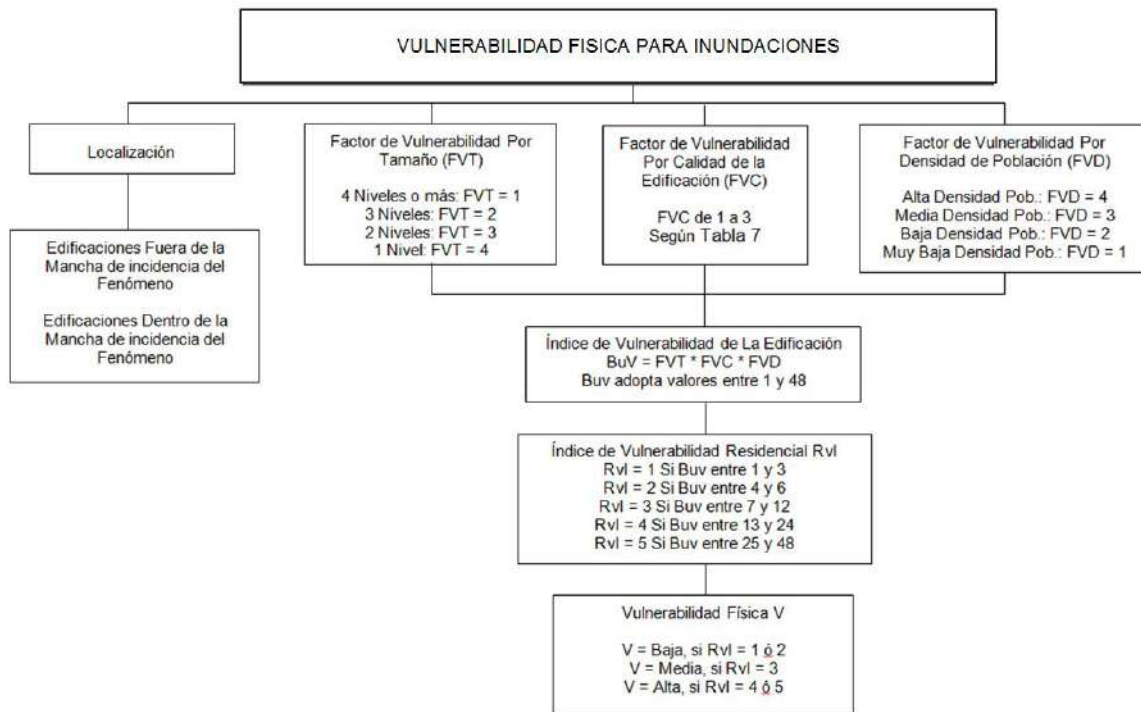


Figura 205. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones

Para el caso de inundaciones y avenidas torrenciales, las etapas son las anteriormente descritas. La diferencia consiste en que se incluye un atributo adicional para cada estructura, que es la densidad habitacional. Este atributo fue extraído del documento técnico elaborado por la UPB para la EDU.

Del Mapa 54 al I Mapa 58 se presentan los mapas de atributos para cada estructura, los cuales corresponden a Tipo de Estructura, Estado de la Estructura, Altura de la Construcción, Densidad de Población y Grado de Vulnerabilidad a Inundación.

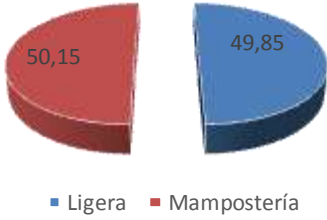
Del análisis e interpretación de la información existente en la base de datos, se pueden hacer entonces las siguientes anotaciones:

- ✓ En el Polígono El Faro, Un poco más de la mitad de las viviendas del polígono tienen un tipo de estructura en Mampostería con un 50.15%. El porcentaje restante corresponde a las estructuras Ligeras con un 49.85%. En menores porcentajes se encontraron estructuras Muy ligeras y Mixtas con el 8.5% y 0.59% (Tabla 78).
- ✓ El Polígono El Faro presenta en general el estado que predomina en las construcciones inspeccionadas se ubica en Malo, con un 67.16%. El porcentaje restante corresponde a las estructuras en estado Medio con un 32.84% (Tabla 79).

- ✓ En el Polígono de El Faro la mayoría de las viviendas del polígono El Faro cuentan con un solo nivel construido, con un 92.96%. Le siguen las edificaciones de dos pisos y de tres pisos, con un 6.45% y 0.59% respectivamente (Tabla 80).
- ✓ En casi la mitad de las estructuras presentes en el polígono de El Faro Un poco más de la mitad de las construcciones presenta una densidad Muy baja con un 61.88%. Le siguen las estructuras con densidad Baja con un 32.55%. En menores porcentajes se encuentran las estructuras con densidades Medias y Altas con un 3.81% y 1.76% respectivamente (Tabla 81).

Tabla 78. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

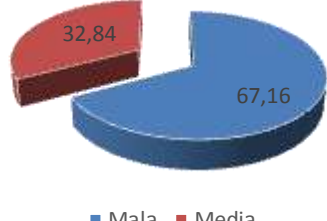
Tipo de estructura	Total Viviendas	%
Ligera	170	49.85
Mampostería	171	50.15
Total	341	100



■ Ligera ■ Mampostería

Tabla 79. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Estado de la estructura	Total Viviendas	%
Mala	229	67.16
Media	112	32.84
Total	341	100



■ Mala ■ Media

Tabla 80. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Altura de la estructura	Total Viviendas	%
Un solo piso	317	92.96
De 2 pisos	22	6.45
De 3 pisos	2	0.59
Total	341	100

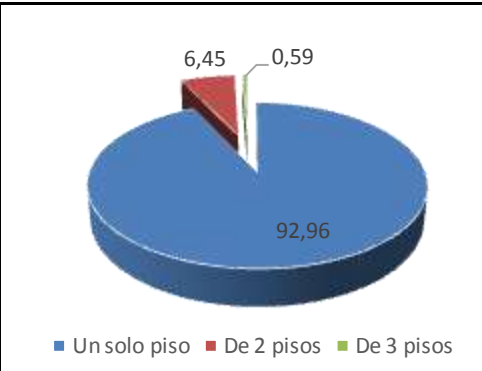
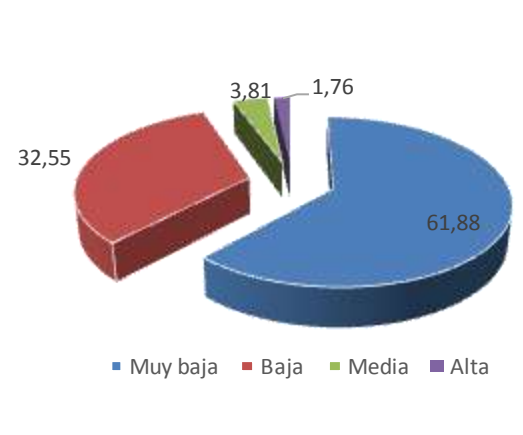


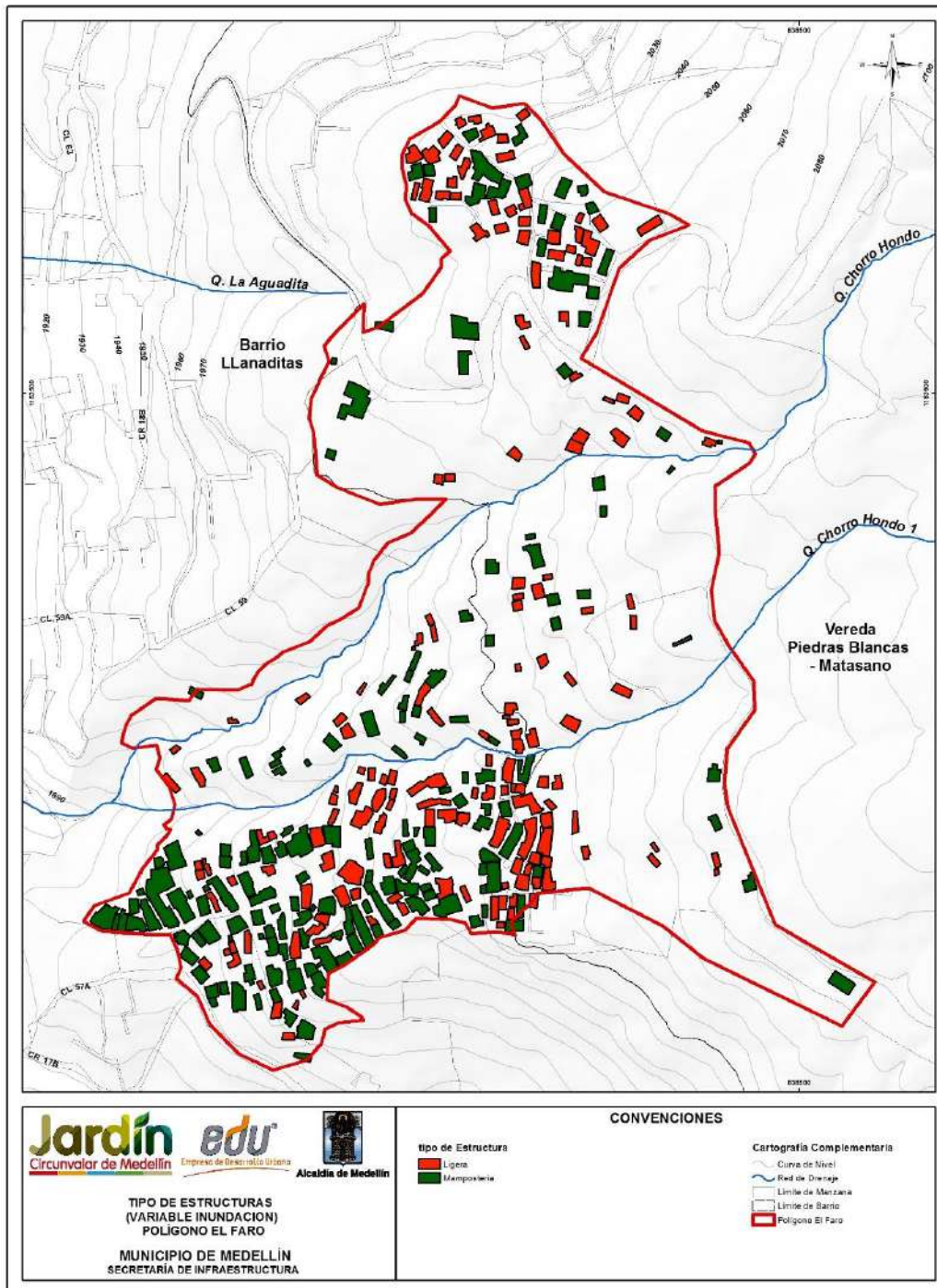
Tabla 81. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales

Densidad de población	Total Viviendas	%
Muy baja	211	61.88
Baja	111	32.55
Media	13	3.81
Alta	6	1.76
Total	341	100

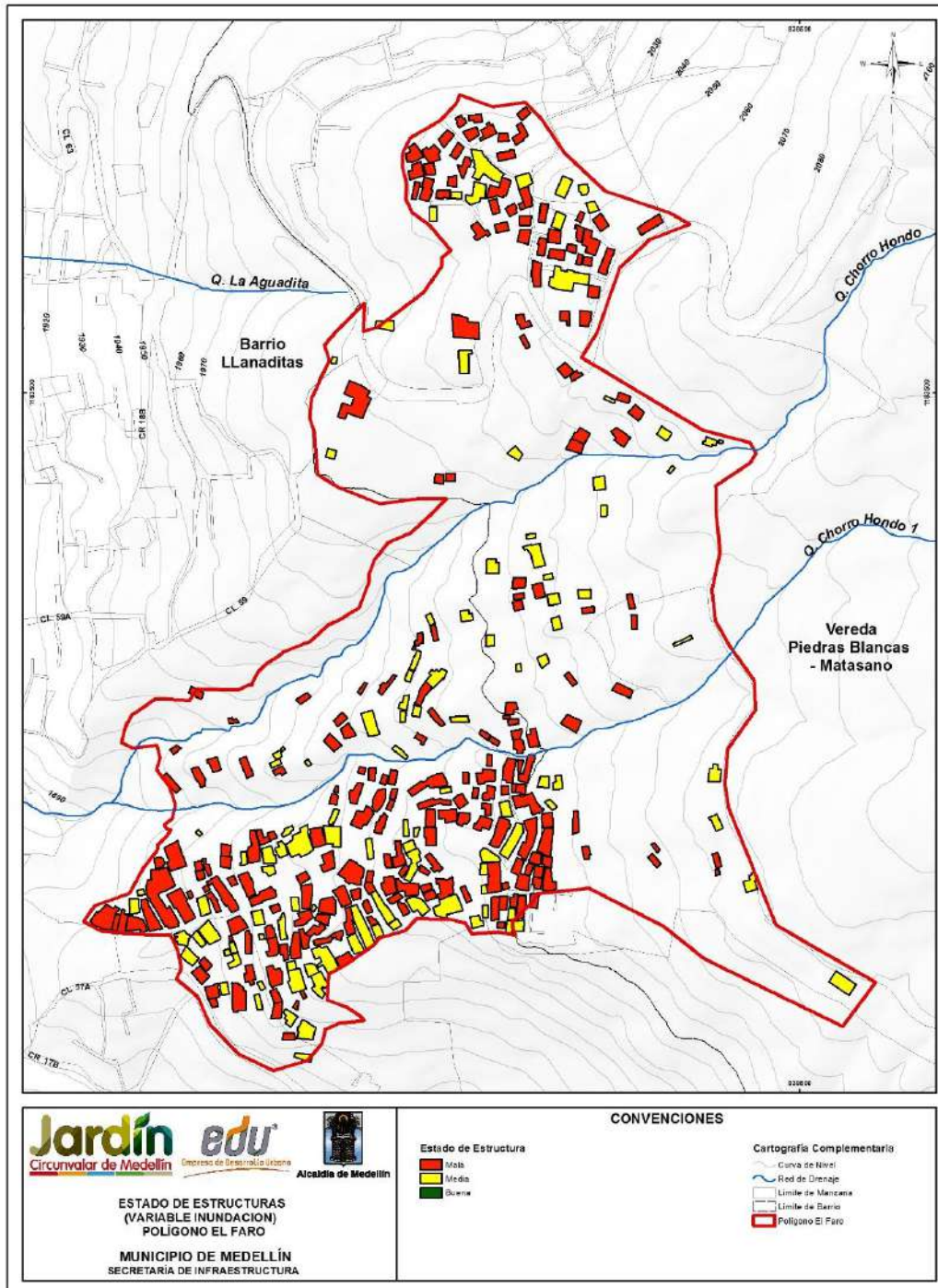


Finalmente con la información y con la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por inundaciones y avenidas torrenciales, se determinó el índice de vulnerabilidad residencial de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta (Mapa 58). El Mapa 59 presenta el índice de vulnerabilidad de las estructuras ante inundaciones, considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles

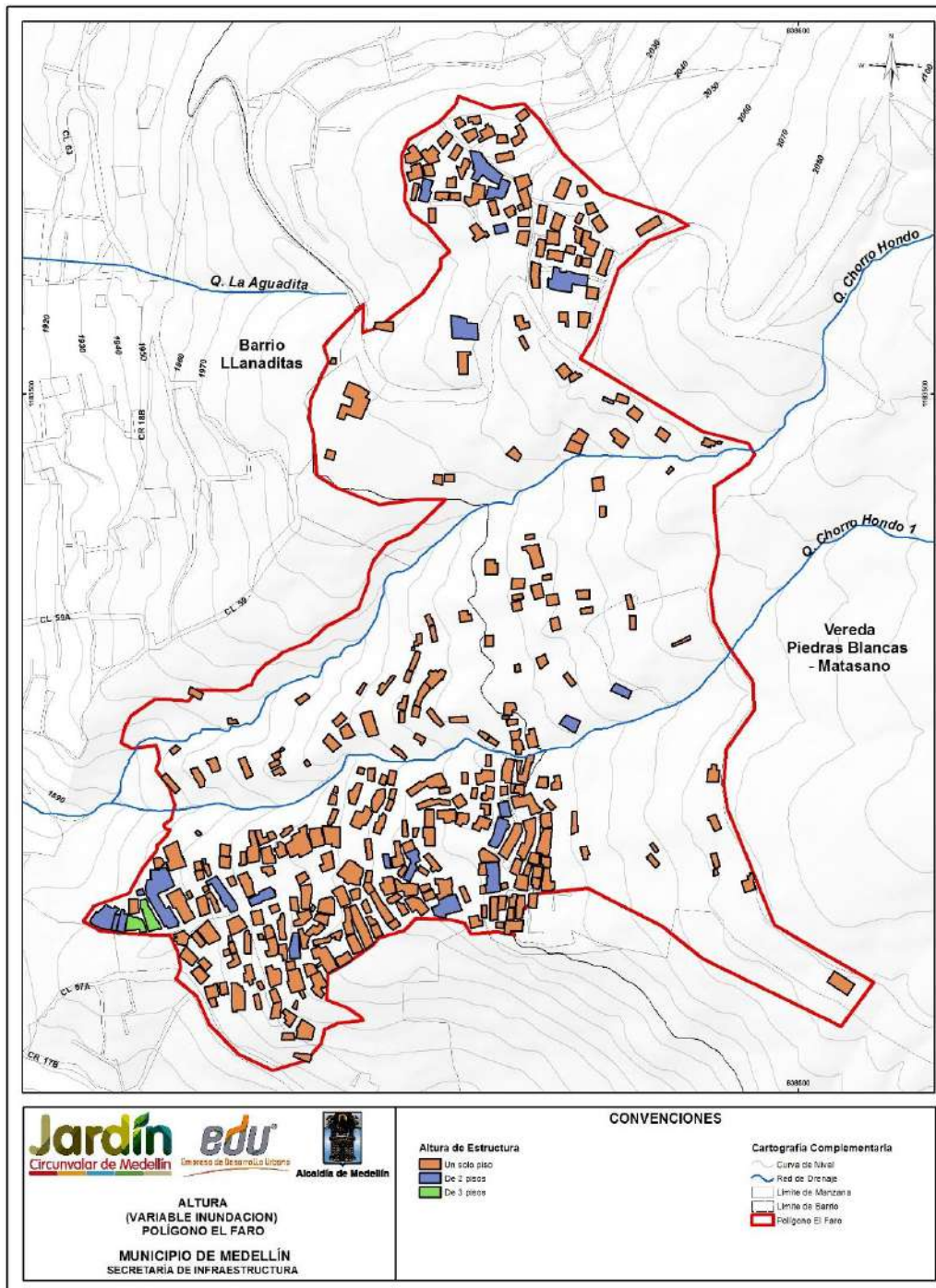
De igual forma, se evaluó la vulnerabilidad para las vías de acceso y equipamientos dentro del Polígono El Faro. Para el caso de las vías, se tiene que el Factor de Vulnerabilidad por Densidad (FVD) y el Factor de Vulnerabilidad por Tamaño (FVT) son constantes con los valores 4 y 4 respectivamente, asociados a Alta Densidad debido a la circulación de personas y vehículos y considerando que son estructuras de una planta. Para el caso de los equipamientos, su grado de vulnerabilidad sigue siendo el indicado por la misma metodología y factores aplicados en el análisis de vulnerabilidad de las edificaciones. En el Mapa 60 se presenta el mapa resultado del análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones para el Polígono El Faro.



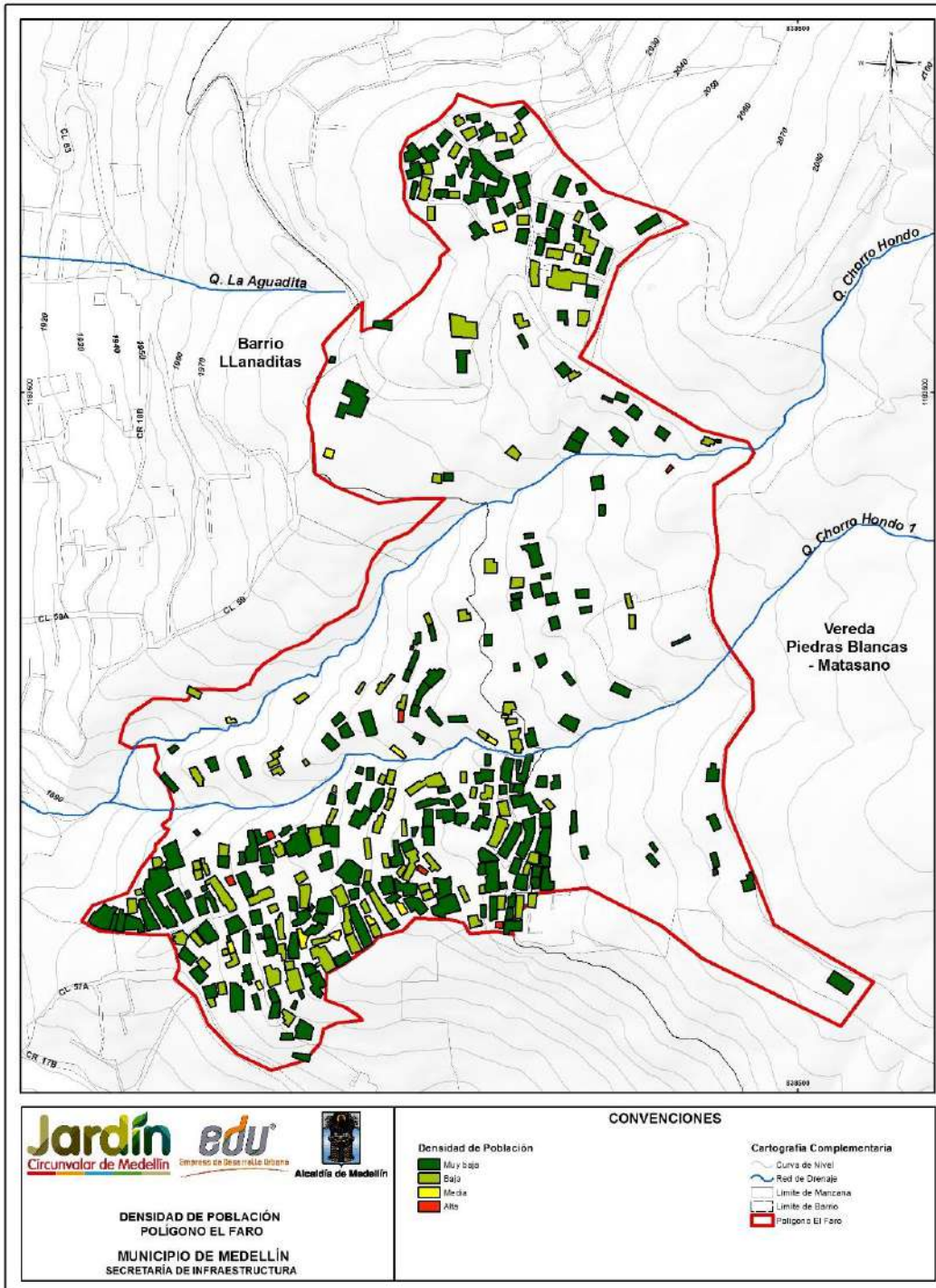
Mapa 54. Localización espacial del tipo de estructura por inundación en el Polígono El Faro (31_EFRTipodeEstructura_Medellin_C y 31_EFRTipodeEstructura_Medellin_T)



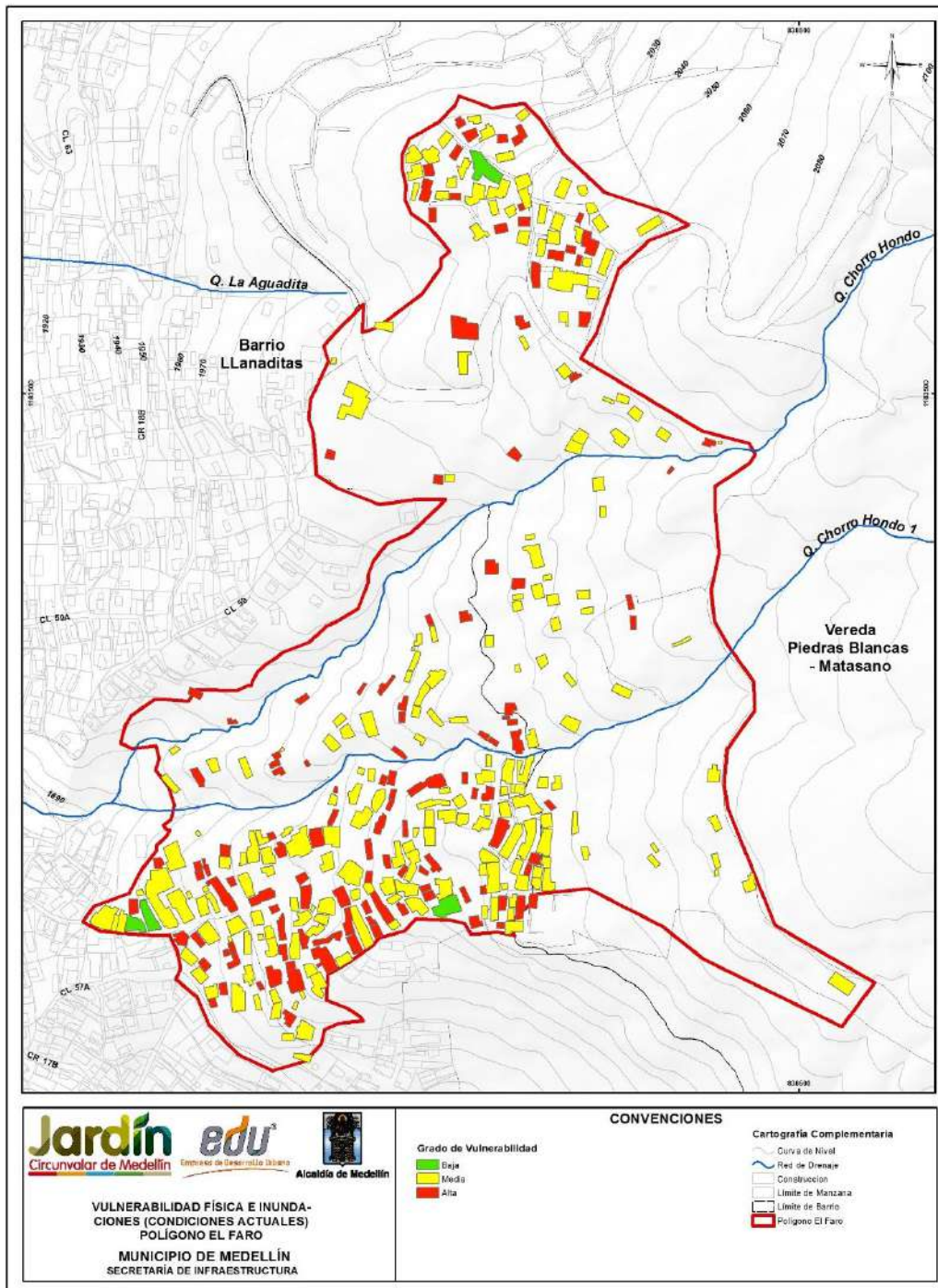
Mapa 55. Localización espacial del estado de estructura por inundación en el Polígono El Faro
 (32_EFEstado de la Estructura_Medellin_C y 32_EFEstado de la Estructura_Medellin_T)



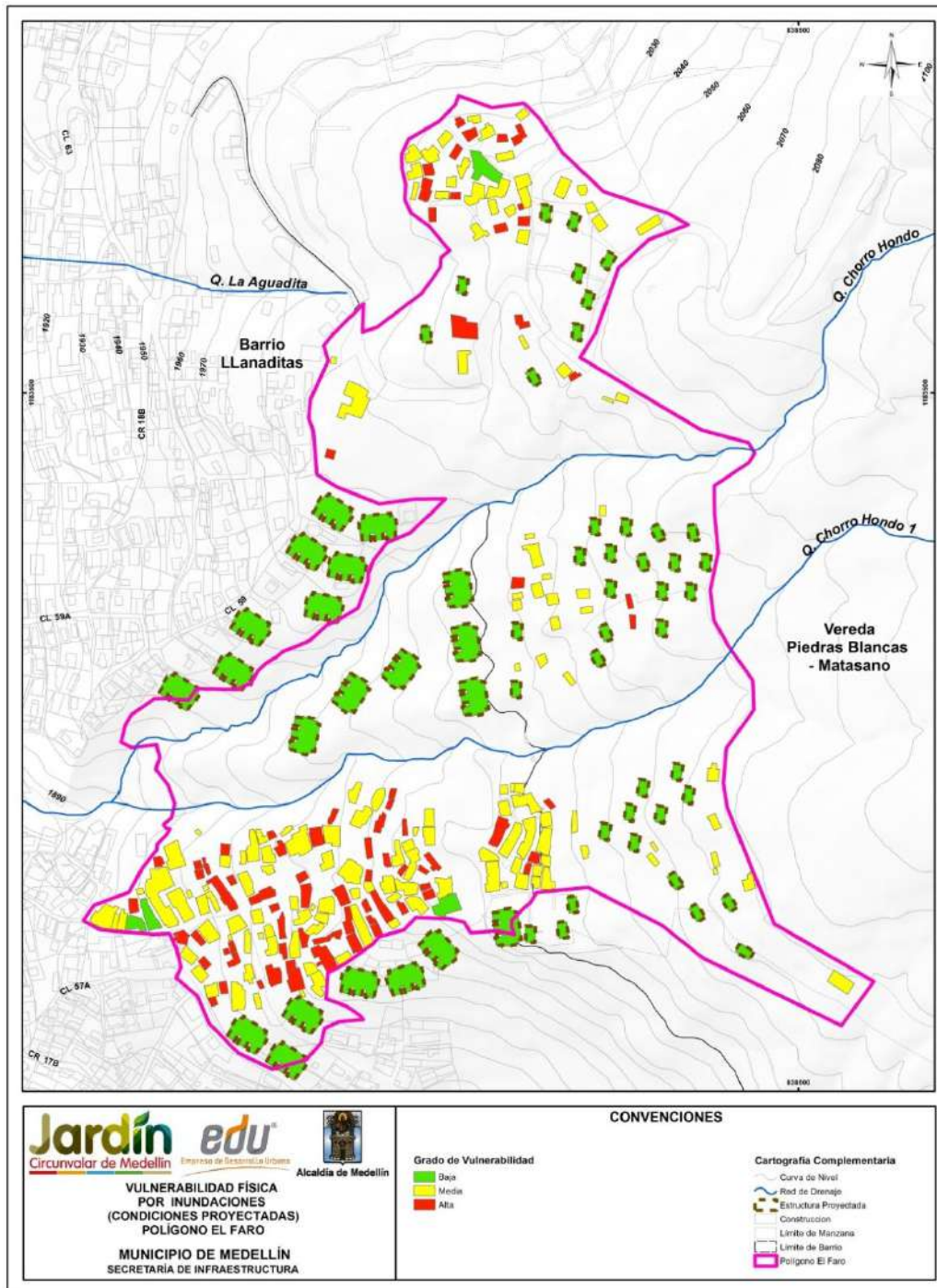
Mapa 56 Localización espacial de la altura de estructura por inundación en el Polígono El Faro
(33_EFRAlturadelaConstruccion_Medellin_C y 33_EFRAlturadelaConstruccion_Medellin_T)



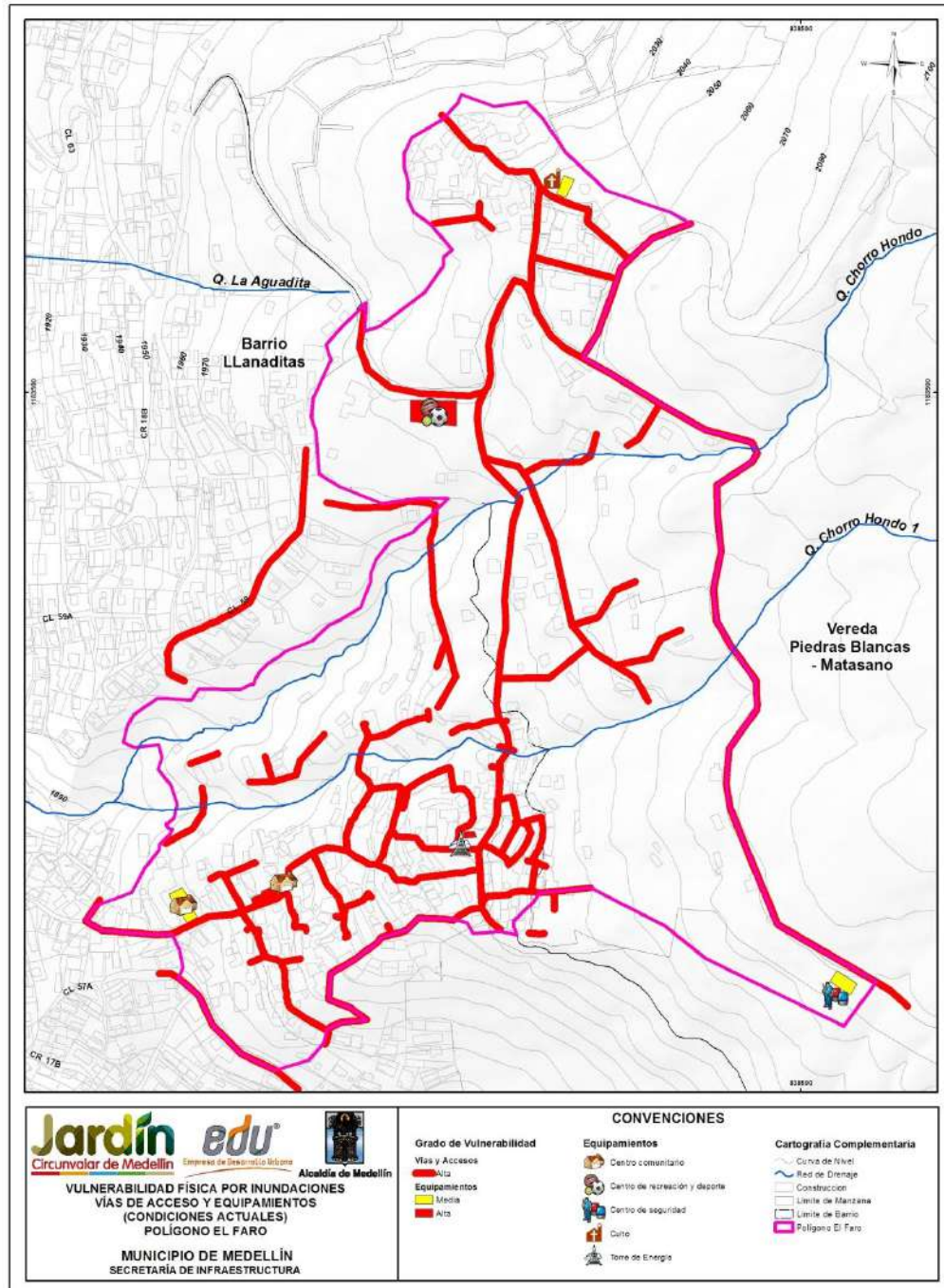
Mapa 57. Localización espacial la densidad de la población en el Polígono El Faro (34_EFRDensidaddePoblacion_Medellin_C y 34_EFRDensidaddePoblacion_Medellin_T)



Mapa 58. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones para el Polígono El Faro
 (38_EFRVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_C y
 38_EFRVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T)



Mapa 59. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono El Faro con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (EFRVulnerabilidadFisicaporInundacionesProyecto_Medellin_C)



Mapa 60. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono El Faro para las Vías de Acceso y Equipamientos
(46_EFRVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C y 46_EFRVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T)

16.4 SOPORTE FOTOGRÁFICO PANORAMA GENERAL DE LAS ESTRUCTURAS

La Tabla 82 y la Tabla 83 presentan el registro fotográfico tomado durante los recorridos de campo en el Polígono El Faro.

Tabla 82. Registro fotográfico en el Polígono El Faro

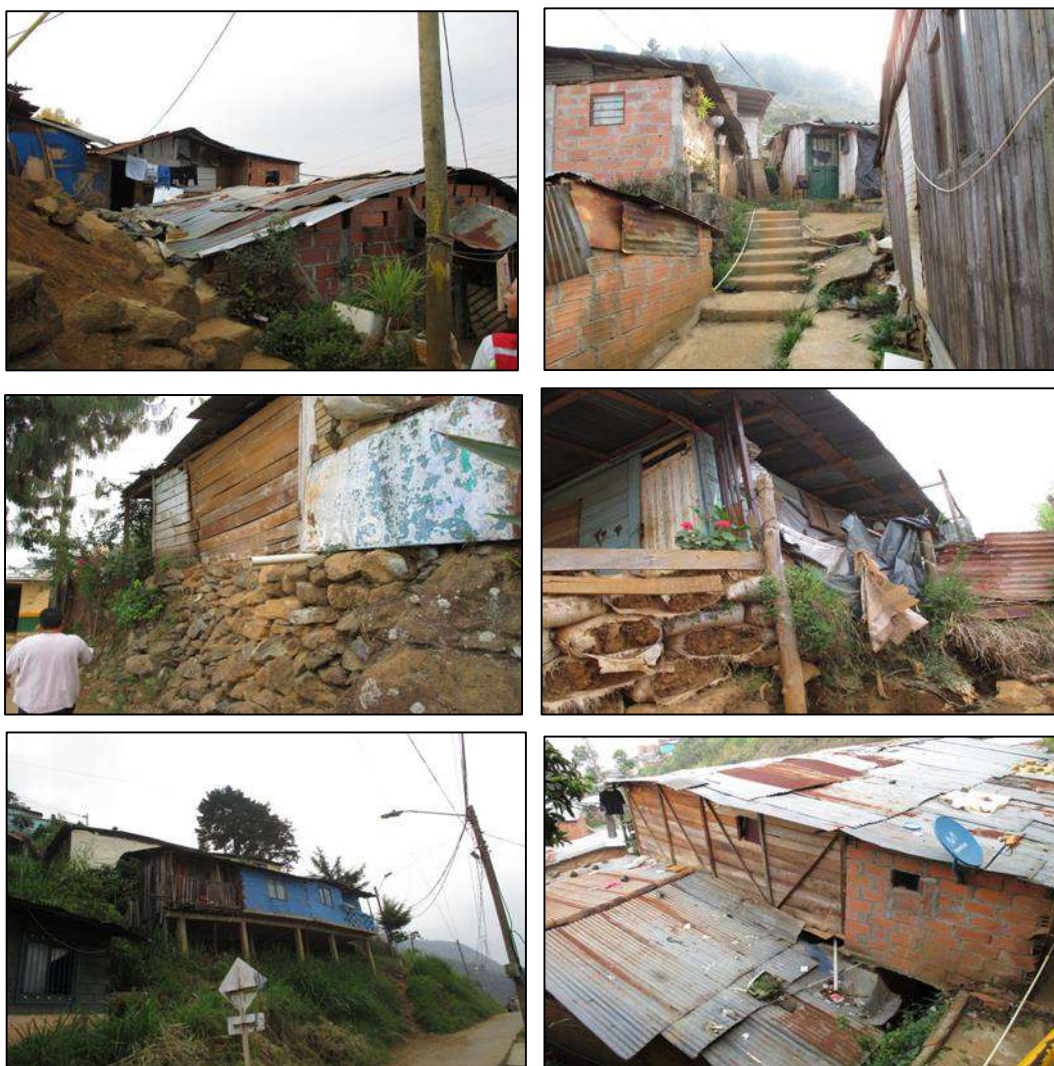
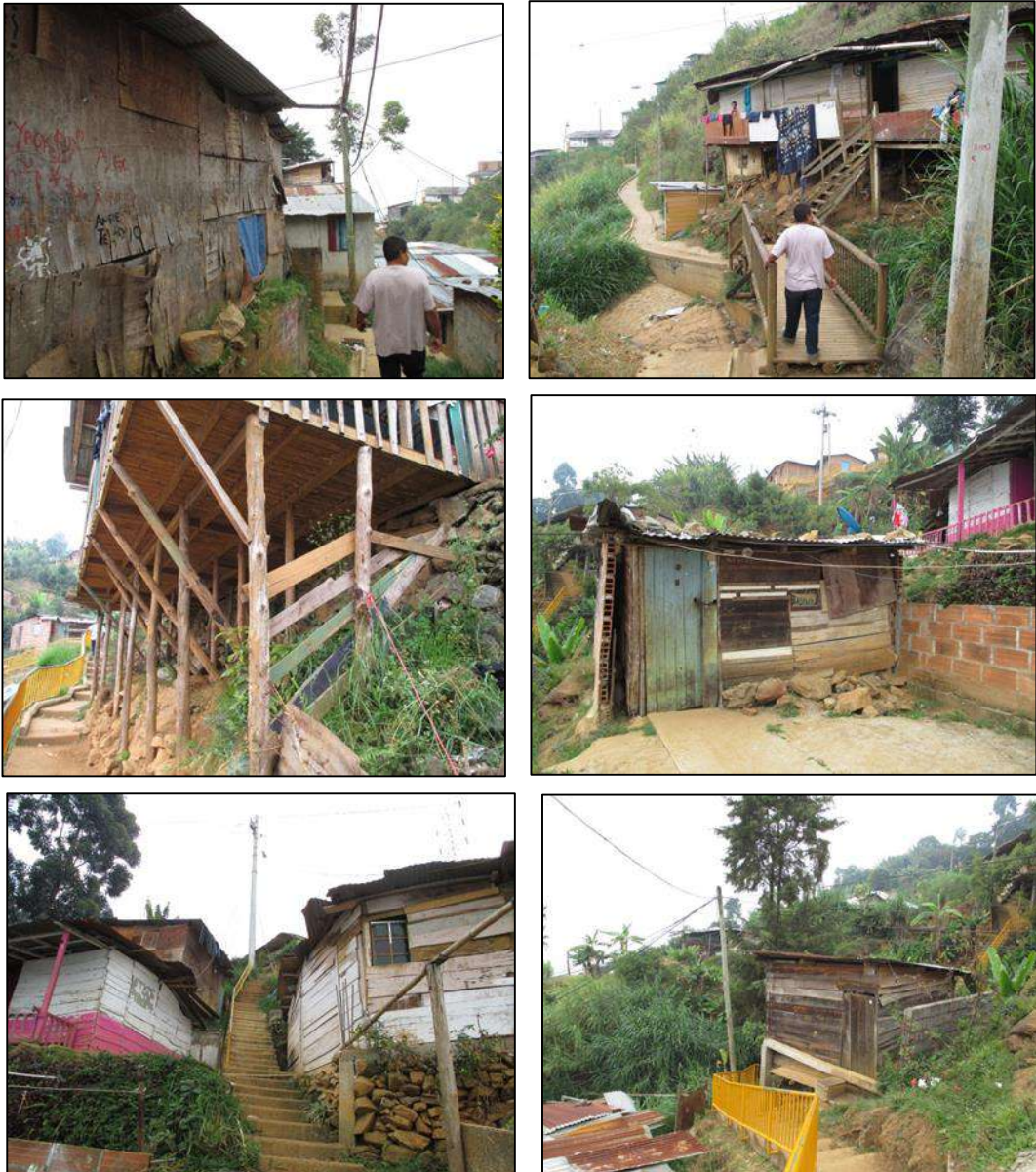




Tabla 83. Registro fotográfico en el Polígono El Faro (Continuación)



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

17. RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

17.1 ASPECTOS GENERALES

Se entiende como riesgo aceptable aquel nivel en que los individuos o comunidades se muestran dispuestos a aceptar sin invertir recursos para la contención del mismo. El riesgo admisible o tolerable, por otro lado, es el nivel de riesgo hasta el cual el individuo o la comunidad están dispuestos a aceptar a cambio de ciertos beneficios o con cierta cantidad de inversión.

En el caso del Proyecto Barrios Sostenibles, el riesgo aceptable será el requerido para comparar cuando se tenga la evaluación de las condiciones actuales de la ladera, mientras que el riesgo admisible será aquel que sirva de comparación para cuando se tengan las condiciones de mitigación a través de la implementación de las medidas estructurales y no estructurales.



Actualmente, en Medellín no se tiene una categorización en términos de lo que corresponde a riesgo aceptable o admisible y en el mundo estos valores pueden variar dependiendo, por ejemplo, de la importancia de la obra y la vida útil de la misma. Whitman (1987) cuestionó la existencia de padrones o niveles para establecer el riesgo admisible, y en caso de que los mismos se fijen, podría resultar peligroso establecer un criterio inflexible que podría implicar durante la etapa de diseño la ejecución de análisis con precisiones posiblemente fuera de la realidad.

17.2 CÁLCULO DEL RIESGO

El riesgo está relacionado con la probabilidad de que se den consecuencias negativas desde el punto de vista de vidas y la infraestructura, de manera que se hace necesario su estimación cuantitativa para la toma de decisiones. Estos análisis pueden llevarse a cabo, por ejemplo, en forma determinística, de modo que la estimación del impacto probable se hace con base en un evento o escenario o aleatorio, integrando el análisis de escenarios múltiples, cada uno con una frecuencia de ocurrencia dada, para obtener así una estimación genérica del riesgo (Yamín et al., 2013).

Las cuantificaciones son claves, puesto que permiten hacer determinaciones de una manera objetiva y reproducible, con resultados que se pueden comparar en distintas zonas. Más aún, ayudan a identificar vacíos en los datos de entrada y las posibles debilidades o falencias de los análisis empleados. La cuantificación es también útil para gestión del riesgo, debido a que permite integrar análisis de costo-beneficio y proporciona la base para la priorización de acciones de mitigación y designación de recursos. Además, facilita la comunicación entre profesionales, propietarios y tomadores de decisiones (Corominas et al., 2014). Analíticamente, el riesgo específico se podrá calcular con base en la siguiente expresión:

$$R = P(H_i) \cdot V \cdot E$$

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

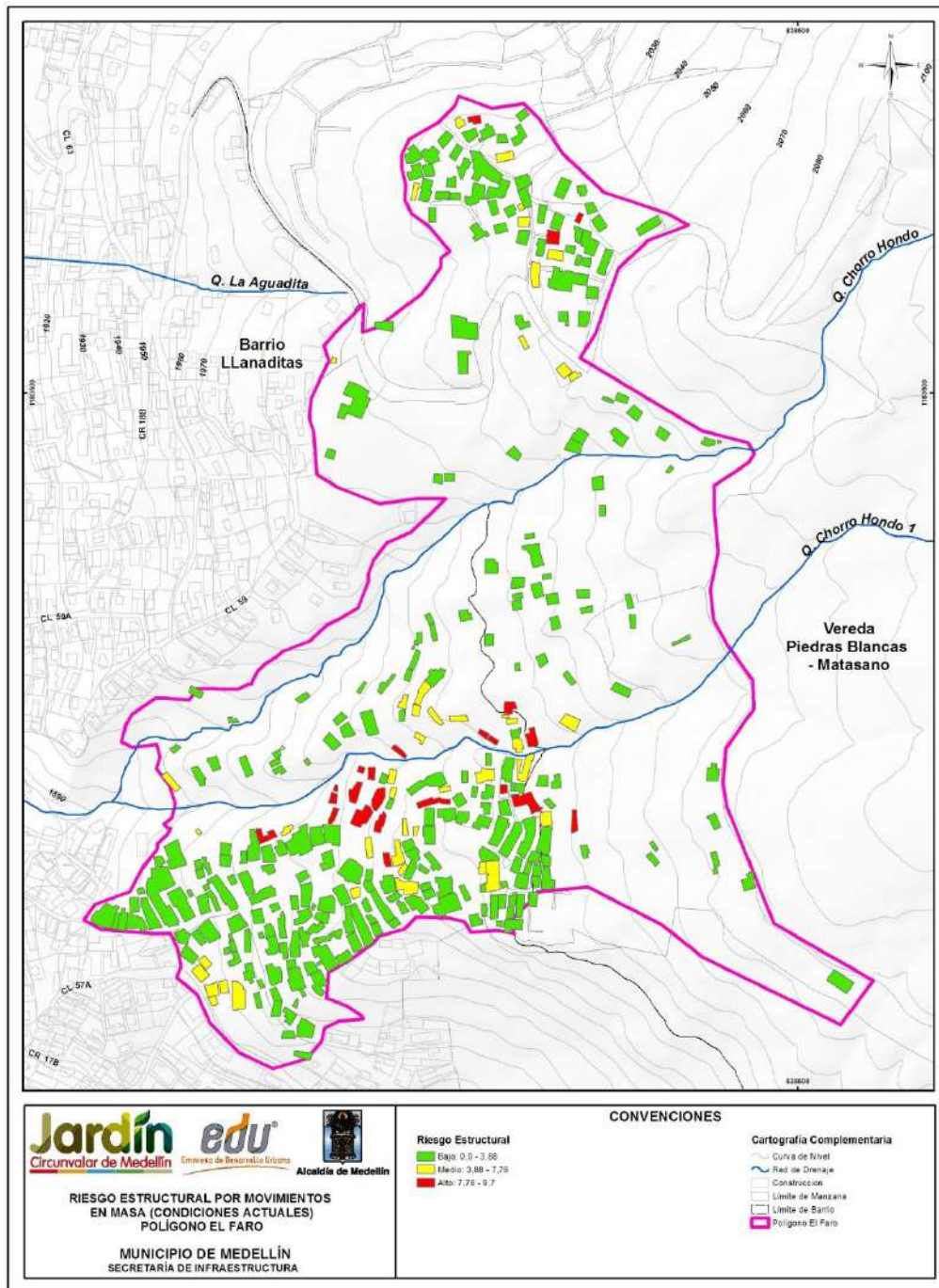
Donde, R es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (Hi), que ha ocurrido en un área específica y en un tiempo dado. En este caso los escenarios de amenaza son el de movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales. P(Hi) es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, inundación u avenida torrencial, con una magnitud o intensidad específica (Hi) en un tiempo dado y en un área específica. V es vulnerabilidad del elemento expuesto o la proporción de E probablemente afectada en forma negativa por el evento de magnitud (Hi) expresada en una escala entre 0 y 1 como en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa. E es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por la amenaza; para el caso de personas.

Teniendo en cuenta lo anterior, los términos a los que se quiere llegar con los análisis de riesgo, son análisis materializados bien sea representados en porcentajes de perdidas, costos económicos o en pérdidas de vida. De esta forma se tendrá un valor tangible del riesgo que permitirá la toma de decisiones en cuanto al proyecto.

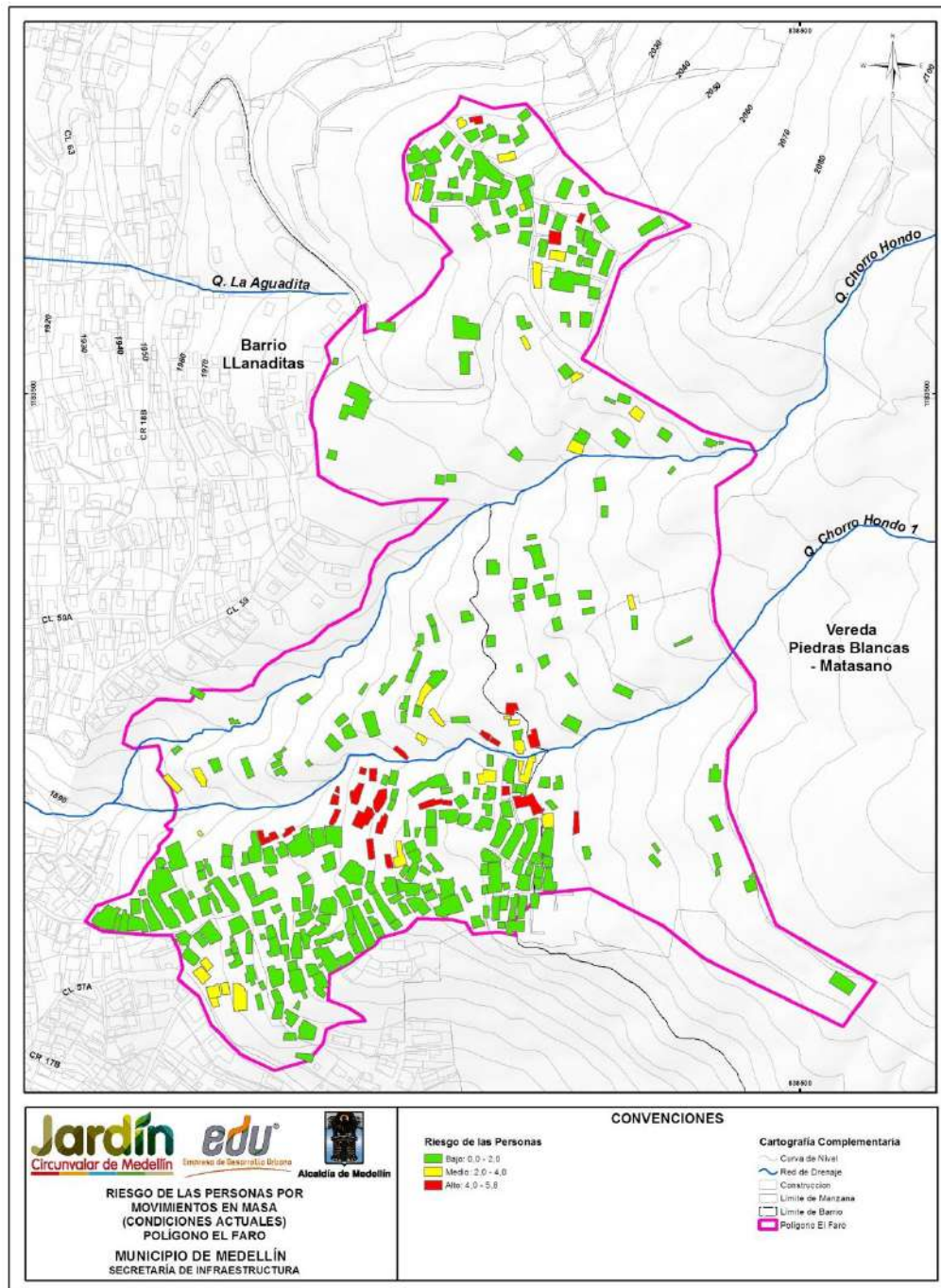
17.3 RESULTADOS

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años (Mapa 37), donde se consigna la probabilidad de falla total considerando la variabilidad de los parámetros y la actuación del sismo en 50 años, y los mapas de vulnerabilidad estructural y de personas analizados en el Numeral 16.2.4.

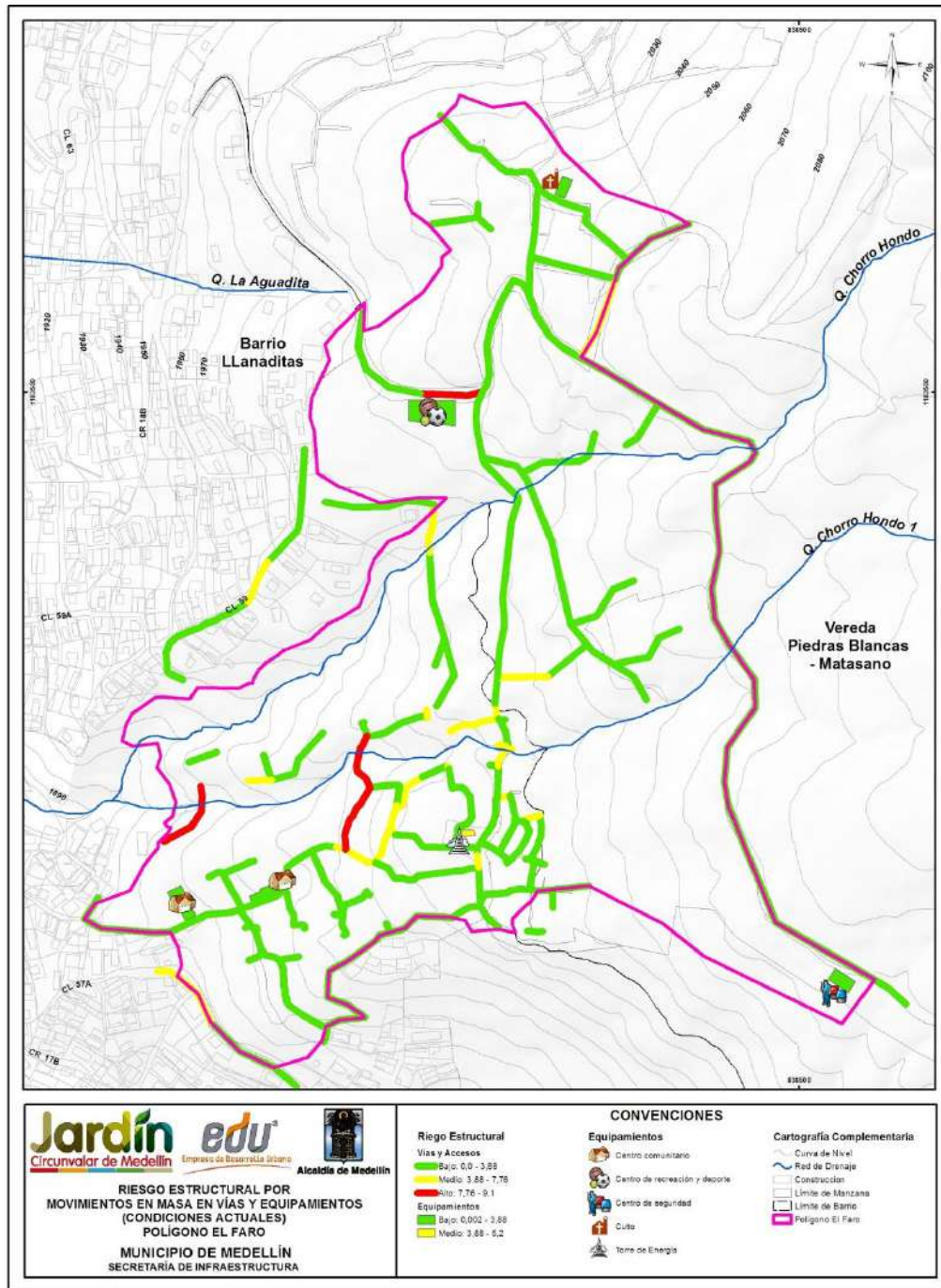
En el Mapa 61 y el Mapa 62 se presentan los resultados de los análisis de riesgo considerando las condiciones actuales de las viviendas, en términos de porcentaje de pérdidas económicas y en términos de porcentaje de pérdidas de vidas, respectivamente. El Mapa 63 presenta la categorización del riesgo por movimiento en masa de las vías de acceso y equipamientos del polígono, clasificándolo en riesgo bajo, medio y riesgo alto mitigable y no mitigable. Se puede observar que es más crítico el resultado del riesgo en términos de porcentaje de pérdidas económicas y da lugar a un número determinado de viviendas y vías de acceso con riesgo alto, principalmente alrededor de la Quebrada Chorro Hondo 1. El riesgo alto se debe a la amenaza por movimientos en masa que se presenta al interior del polígono.



Mapa 61. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono El Faro
 (39_EFRRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y
 39_EFRRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 62. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono El Faro
(40_EFRRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C y 40_EFRRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 63. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso y equipamientos por movimientos en masa en el Polígono El Faro
(47_EFRRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C y 47_EFRRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se generó un mapa de riesgo total que consistió en la unificación del riesgo estructural y el riesgo de las personas. Este mapa de riesgo total se hizo basados en la propuesta del Servicio Geológico Colombiano (SGC), en su Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa (2015).

Tabla 84. Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total

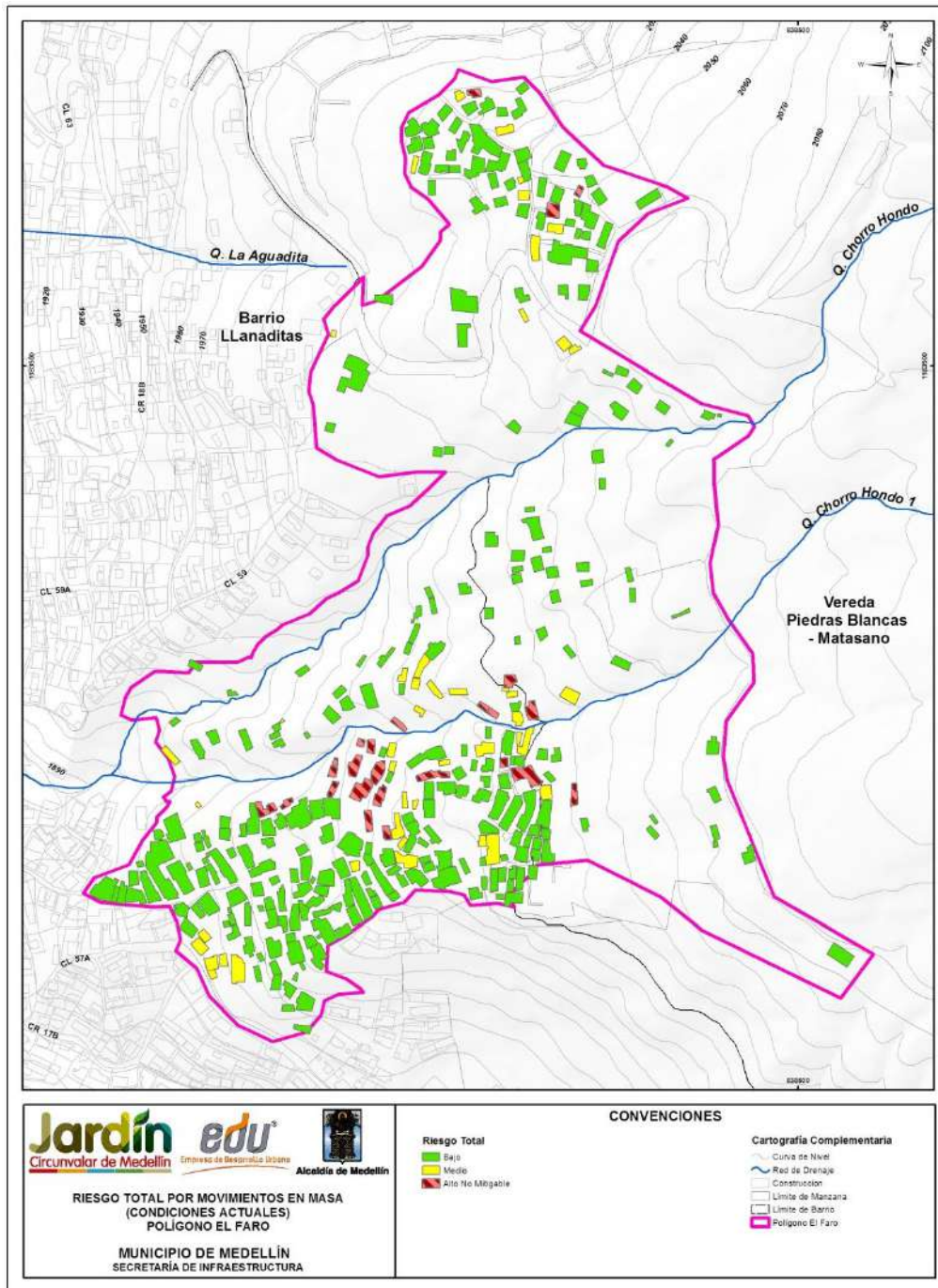
RIESGO ESTRUCTURAS	RIESGO DE PERSONAS		
	BAJO	MEDIO	ALTO
BAJO	B	B	M
MEDIO	M	M	A
ALTO	M	A	A

Finalmente fue posible categorizar el riesgo en un solo mapa entre bajo, medio y alto donde la descripción de cada categoría se indica en la Tabla 85.

Tabla 85. Categorización del riesgo total

ALTO (A)	Alta probabilidad de víctimas fatales y lesiones serias en la población. La implementación de medidas de intervención es prácticamente inviable desde el punto de vista técnico. Se debe hacer una evaluación económica detallada para establecer la posibilidad de mitigación y disminución del nivel de riesgo. Las pérdidas por materialización de la amenaza superan en todos los casos los valores económicos de los bienes.
MEDIO (M)	Lesiones moderadas muy frecuentes, con alguna probabilidad de víctimas fatales. Se requiere evitar que el nivel de riesgo aumente, pero las medidas de intervención son en todo caso viables técnica y económicamente.
BAJO (B)	Probabilidad de víctimas fatales prácticamente nula. Es un riesgo aceptable y requiere tan solo medidas de prevención.

Adicionalmente, la categoría de riesgo alto fue subcategorizada en riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura exceden los costos de las alternativas de intervención propuestas, se considera que el riesgo es mitigable. Si por el contrario, los beneficios de la reubicación de asentamientos e infraestructura representan la mejor opción económica, se deduce que el riesgo es no mitigable. En el Mapa 64 se presenta finalmente la clasificación del riesgo considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable. Se muestra que de las 341 estructuras, 271 presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (79%), 44 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (13%) y 26 presentan riesgo alto ante movimientos en masa (8%), las cuales fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable.



Mapa 64. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono El Faro (41_EFRRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_C y 41_EFRRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T)

En la Tabla 86 se presenta la descripción de cada una de las estructuras que presentan riesgo alto no mitigable ante movimientos en masa. En el Capítulo 20 se exponen las consideraciones tenidas en cuenta para la clasificación de las estructuras como riesgo alto no mitigable.

Tabla 86. Inventario de las estructuras en alto riesgo No Mitigable por movimientos en masa en el Polígono El Faro

Estructura (Formulario)	COBAMA	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura
119	0806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Dos piso
136	806014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
137	806014	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
139	806014	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
145	806014	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
154	0806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
156	9008004	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
159	806014	Residencial	Ligera	<2 m	Media	Un piso
160	0806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
165	0806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
167	806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
168	9008004	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
169	806014	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
173	806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy Mala	Un piso
174	9008004	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
178	806014	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
186	0806014	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
188	806014	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
200	9008005	Residencial	Mampostería	<2 m	Media	Un piso
203	9008005	Residencial	Mampostería	<2 m	Mala	Un piso
206	9008005	Residencial	Muy ligera	<2 m	Mala	Un piso
208	9008005	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso
220	9008005	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
290	9008025	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
299	9008025	Residencial	Muy ligera	<2 m	Muy mala	Un piso
331	9008008	Residencial	Ligera	<2 m	Muy mala	Un piso

18. RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

18.1 METODOLOGÍA

A partir de los resultados de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad por inundaciones y avenidas torrenciales, es posible evaluar finalmente el riesgo existente en el Polígono El Faro ante este tipo de fenómenos.

De acuerdo con lo presentado en los capítulos de amenaza por inundaciones, la amenaza evaluada trae implícito la calificación de la intensidad del fenómeno y la magnitud de los daños potenciales. A su vez, la evaluación de la vulnerabilidad considera la densidad habitacional y la resistencia de las estructuras frente a este tipo de fenómenos.

Con base en esto, la asignación del riesgo se realizó de manera cualitativa combinando los resultados de los niveles de amenaza y los niveles de vulnerabilidad según el esquema mostrado en la Figura 206.

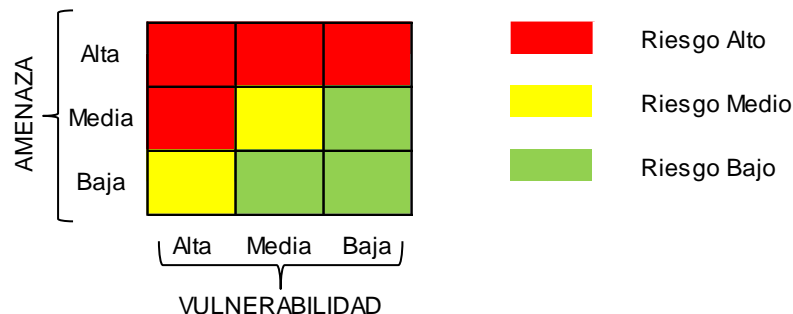




Figura 206. Clasificación del riesgo para inundaciones según el grado de amenaza y de vulnerabilidad

18.2 RESULTADOS

Luego de aplicar la metodología para la calificación del nivel del riesgo ante fenómenos de inundación, se obtuvieron los resultados que se presentan en el Mapa 65. Se clasifica cada zona del polígono en categorías de riesgo alto, medio y bajo para las condiciones actuales. Aquellas zonas no clasificadas corresponden a las que no están bajo riesgo alguno por inundaciones, específicamente porque en ellas no se presenta amenaza.

Se considera como riesgo alto no mitigable aquel bajo el cual se encuentran las estructuras que por su cercanía al cauce su carácter de riesgo alto no puede ser reducido sin modificar sustancialmente las condiciones del cauce, de la corriente y de la estructura misma, y porque además se encuentran ubicadas parcial o totalmente al interior de la zona de retiro hidrológico. Por su parte, las estructuras clasificadas como riesgo alto mitigable corresponden a aquellas que bajo condiciones actuales se ven afectadas por insuficiencia hidráulica de obras existentes y cuya condición de riesgo alto puede

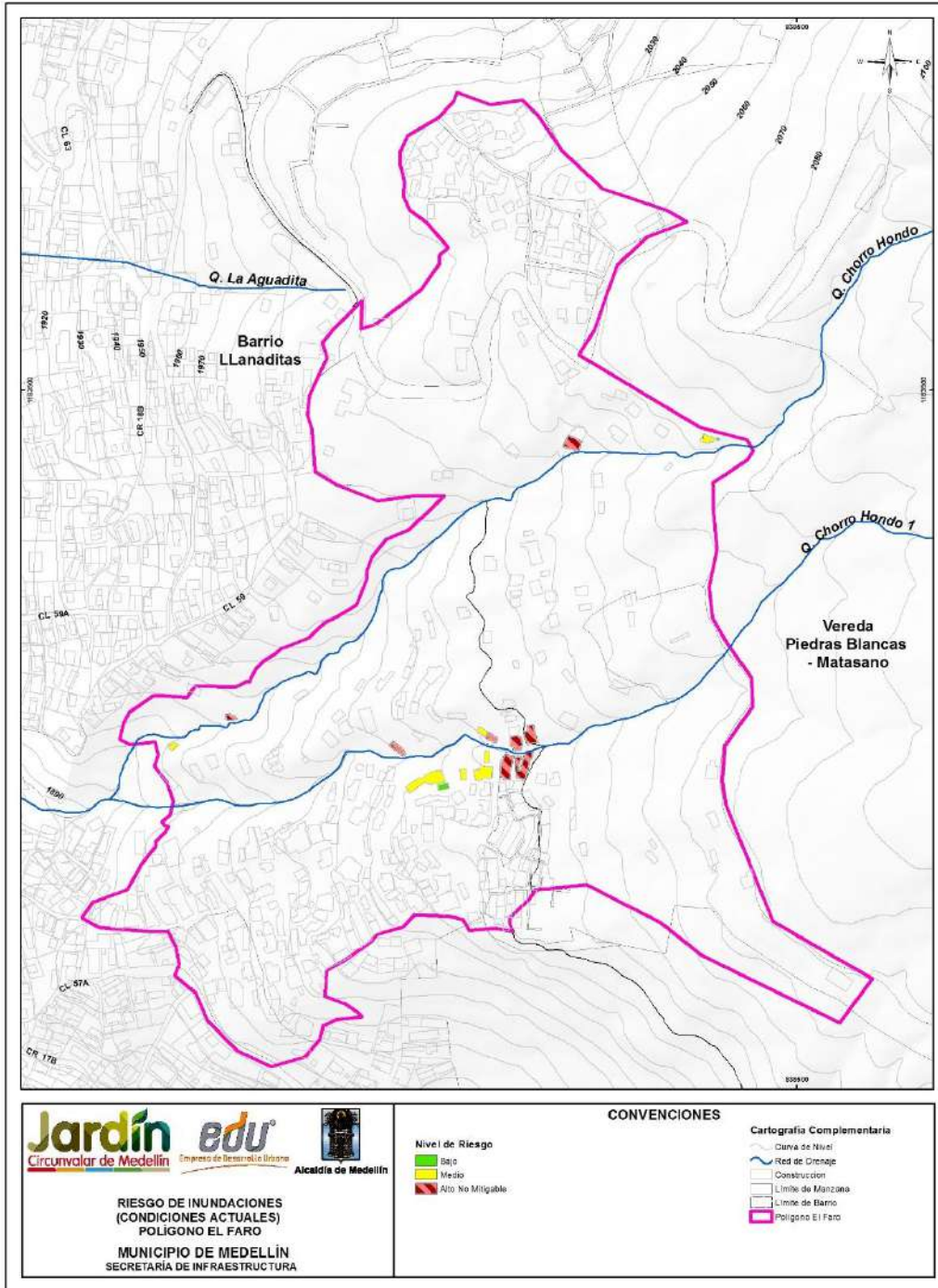
	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

eliminarse mediante algunas adecuaciones o ampliaciones de la capacidad hidráulica de estas obras.

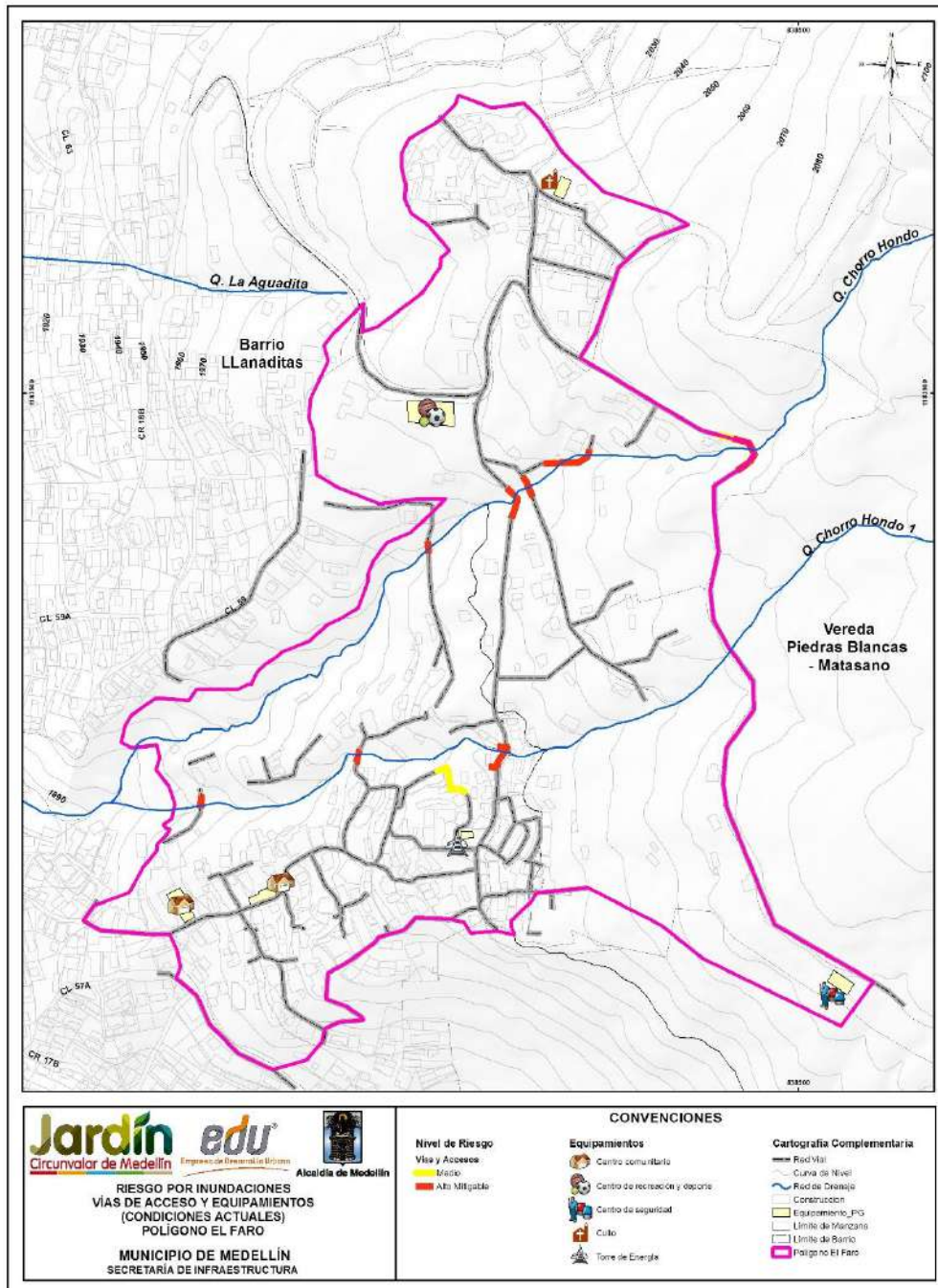
En particular para el Polígono de estudio, los resultados de la evaluación del riesgo indican que algunas viviendas aledañas a la quebrada Chorro Hondo presentan Riesgo Alto No Mitigable por Inundaciones por estar ubicadas en zona de amenaza alta ante este tipo de fenómenos. Por otra parte, las viviendas cercanas a la estructura “Est.1” ubicada en la quebrada Chorro Hondo 1 presentan Riesgo Alto No Mitigable dado que están ubicadas en la zona que se ve afectada por vertimientos generados por insuficiencia de una obra hidráulica existente, y asociada también a invasiones del cauce natural.

De igual manera, en el Mapa 66 se puede observar el nivel de riesgo para las vías de acceso. En aquellos tramos de corredores o vías de acceso donde la mancha de inundación asociada a un periodo de retorno de 100 años, en las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, interseca estos corredores se generan condiciones de amenaza alta y de riesgo alto (según su vulnerabilidad). Por tanto, corresponde a un riesgo intrínseco a la ubicación del corredor respecto de la corriente hídrica. Las vías de acceso que se encuentran bajo un alto riesgo por inundaciones al interior del Polígono El Faro corresponden a corredores viales y en la intercepción aguas arriba de la quebrada Chorro Hondo con el límite del polígono El Faro, una sección de la vía vehicular se encuentra en riesgo alto.



De acuerdo con lo expuesto en el Numeral 15.4, en el polígono de estudio no se presenta riesgo por avenidas torrenciales.



Mapa 65. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono El Faro para viviendas y construcciones
 (43_EFRRiesgolnundaciones_Medellin_C y 43_EFRRiesgolnundaciones_Medellin_T)



Mapa 66. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono El Faro para las vías de acceso y equipamientos (48_EFRRiesgolnundaciones_ViasEquipamientos_Medellin_C y 48_EFRRiesgolnundaciones_ViasEquipamientos_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

19. ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS

En este capítulo se presenta el análisis complementario efectuado considerando la presencia de redes de servicios públicos al interior del Polígono El Faro. Para llevar a cabo este análisis, se superpusieron dichas redes, según la información entregada por La EDU a SIGA, en los mapas de amenaza por movimientos en masa y por inundaciones. Posteriormente se hizo una valoración de la vulnerabilidad de las estructuras correspondientes a las redes y con base en estos dos aspectos se hicieron análisis sobre el riesgo al que finalmente están expuestas las redes.

19.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES

A partir del análisis de la información recibida por parte de La EDU, es posible afirmar que en el Polígono El Faro no existe cobertura alguna de redes de acueducto, de alcantarillado ni de gas de Empresas Públicas de Medellín (EPM), tal como puede observarse del Mapa 67 al Mapa 69.



Sin embargo, la información topográfica suministrada por La EDU para este polígono contiene un conjunto de cámaras de inspección ubicadas al interior del Polígono El Faro que según lo observado en campo hacen parte de un sistema de alcantarillado combinado localizado en la Quebrada Chorro Hondo 1. A lo largo de la Quebrada Chorro Hondo, en el interior del polígono de estudio, no se observó la presencia de cámaras o indicio de alguna red existente. Con respecto a los materiales y diámetros de estas redes, la información topográfica no presenta dicha información, pero según lo observado en campo las tuberías corresponden principalmente a policloruro de vinilo (PVC) y sus diámetros son generalmente inferiores que 300 mm. Se desconoce entonces el origen de este sistema y su operador.

Adicionalmente, no se descarta la existencia de líneas de tuberías o mangueras instaladas por la comunidad para el suministro de agua para el polígono, las cuales quedan por fuera del alcance general del presente estudio.

19.2 SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA

En el Mapa 37 se presenta la zonificación de la amenaza considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. En el Mapa 67 se presenta este mismo pero sobre él se han superpuesto cámaras de inspección consignadas en la información topográfica suministrada por La EDU.

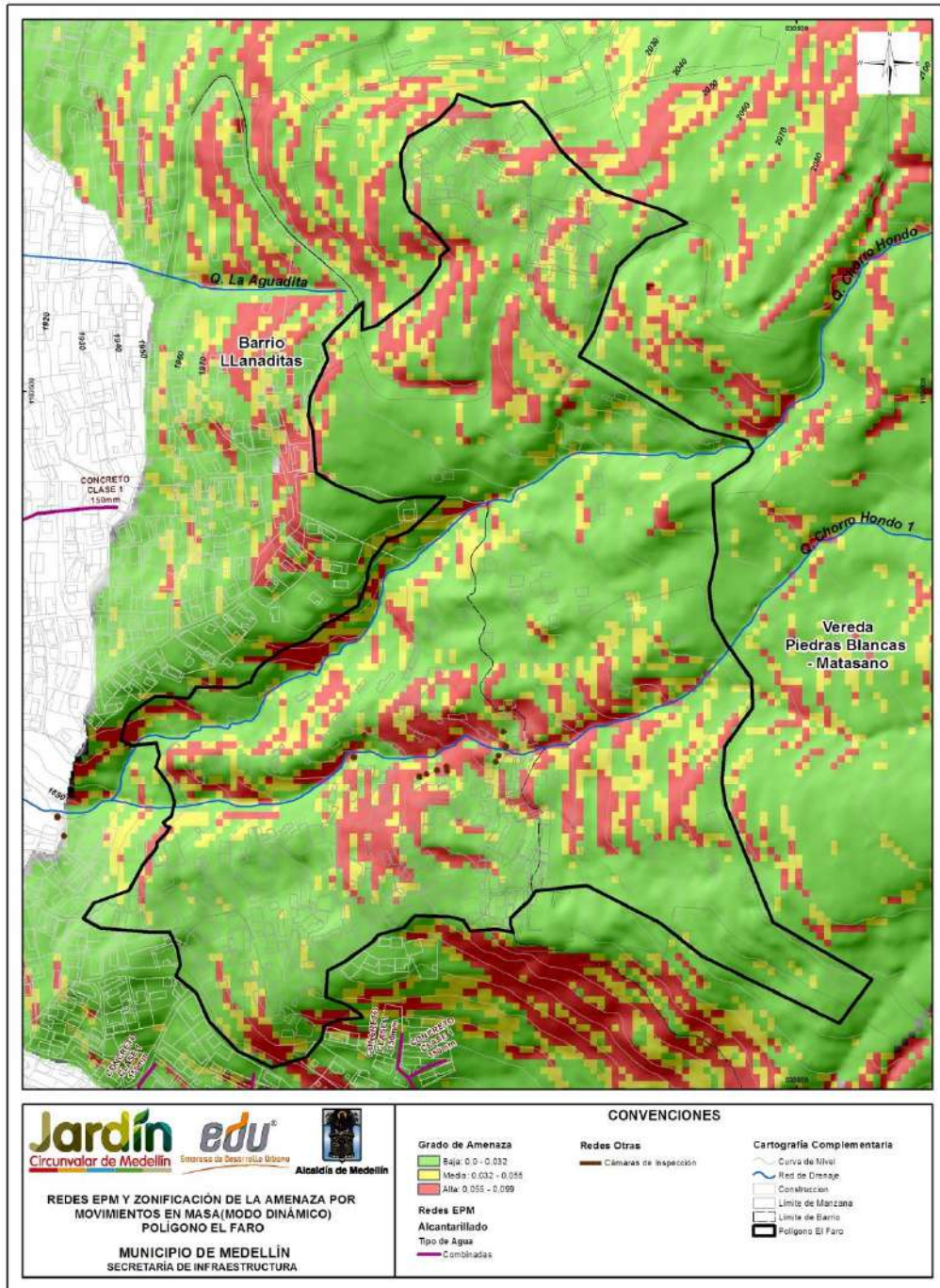
La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa, mostrada en el Mapa 67, permite ver la localización de las cámaras de inspección con respecto a la zonificación de la amenaza por movimiento en masa, realizada dentro del polígono y proyectada para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y la acción de un sismo de 0.25g. Resultan especialmente importantes de analizar los tramos de redes que se encuentran en zonas de amenaza alta, al interior del polígono como tal. En este sentido, se resaltan los tramos de redes

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

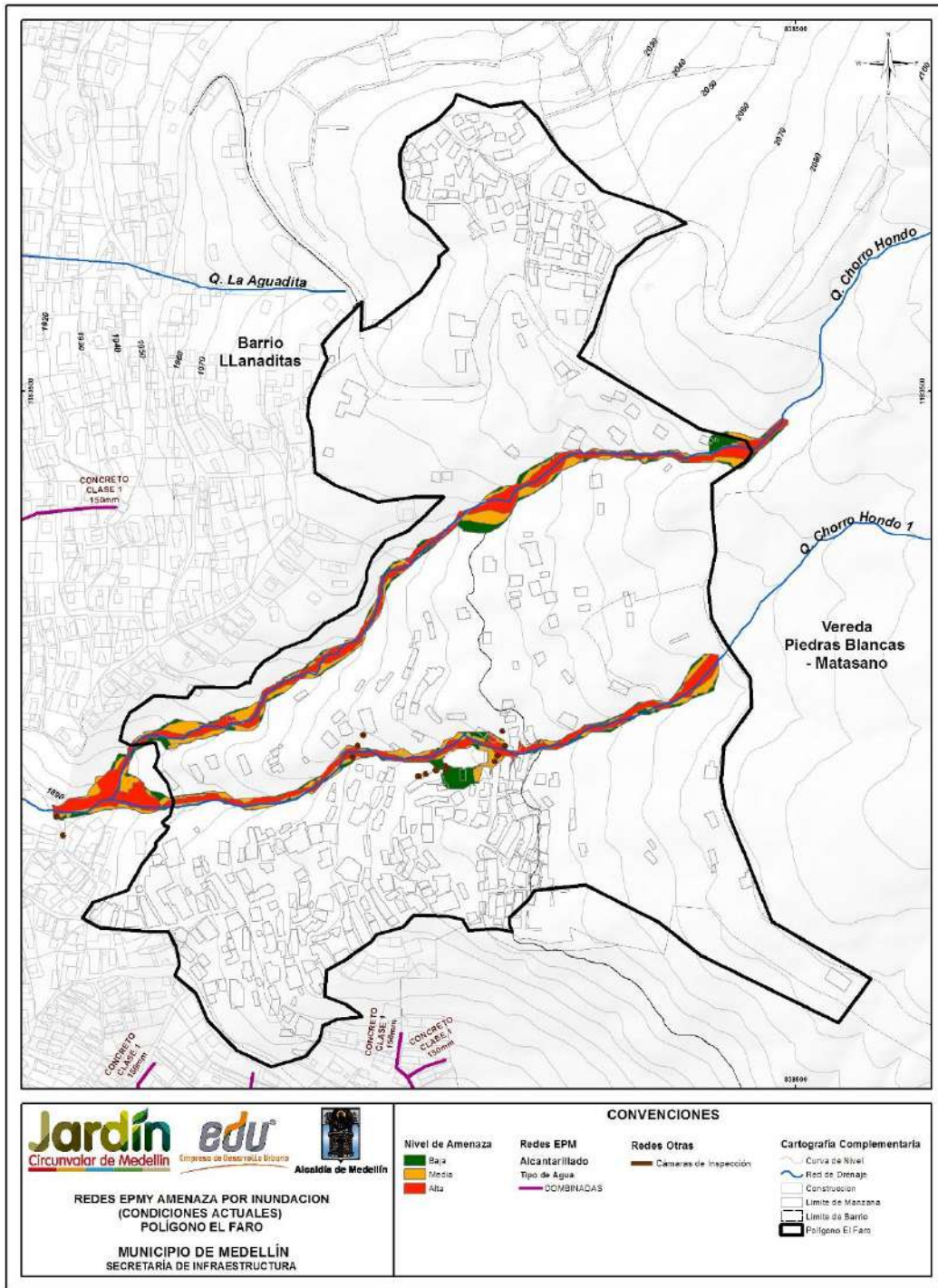
construidos por la comunidad, que se encuentran en una zona de amenaza alta. Dichos tramos se localizan en el centro del polígono, sobre la margen izquierda de la Quebrada Chorro Hondo 1.

En el Mapa 38 se presenta la amenaza por inundaciones en el Polígono El Faro bajo condiciones existentes. En el Mapa 68 se presenta este mismo pero sobre él se han superpuesto las cámaras de inspección. En el Capítulo 15 se demostró que el Polígono El Faro no presenta amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales. Por esto, los análisis de las redes de servicios públicos no se han llevado a cabo considerando este tipo de amenaza.

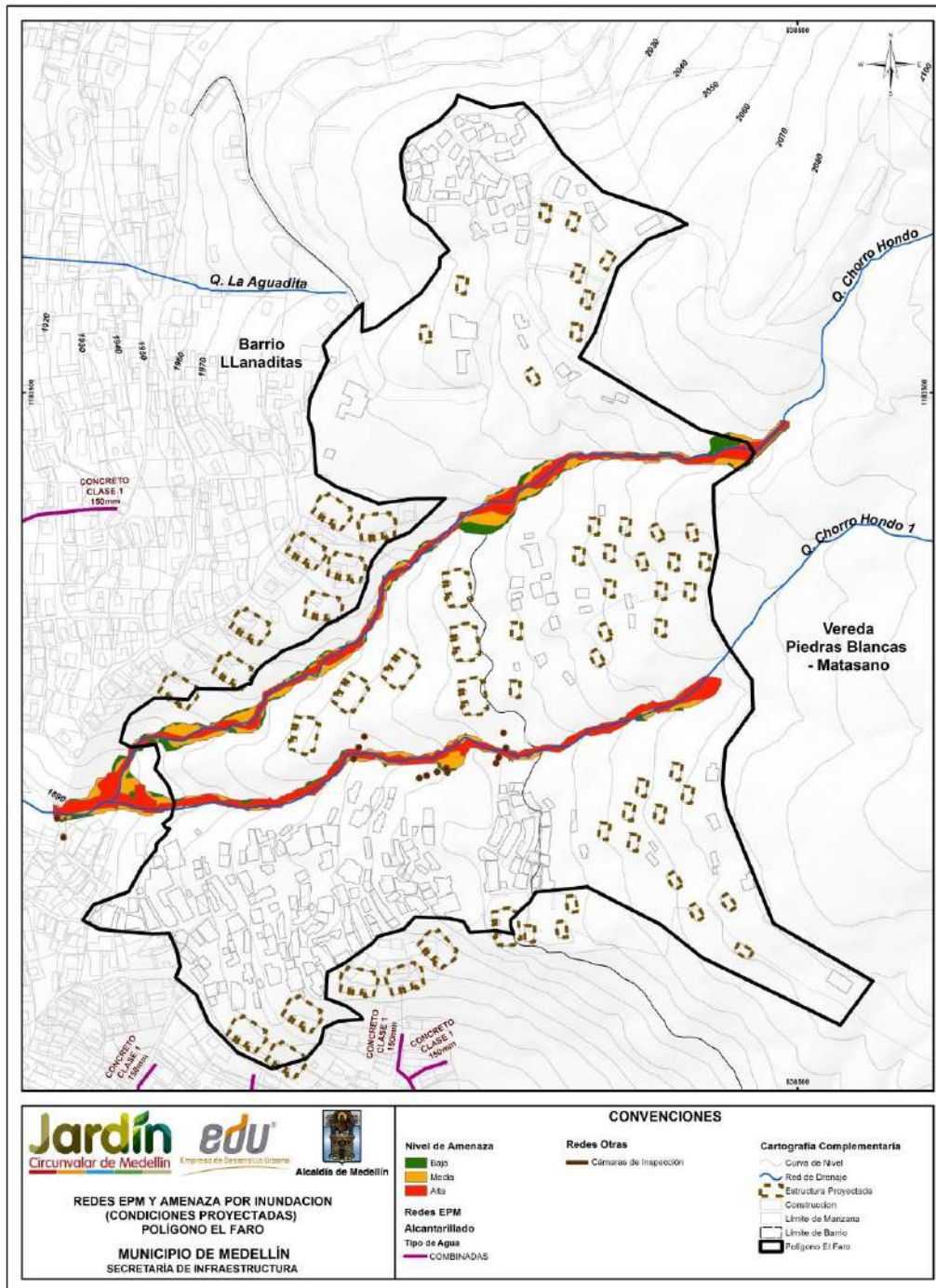
La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por inundaciones, mostrada en el Mapa 68, permite determinar que alrededor del 50% de las redes de servicios públicos existentes al interior del Polígono El Faro se encuentran dentro de las zonas de amenaza alta por inundaciones. También es de mencionar que en condiciones proyectadas, las obras de mitigación para inundaciones no permiten eliminar las zonas de amenaza alta donde existen actualmente estas redes (Mapa 69) dado que corresponden a las zonas del cauce específicamente.





Mapa 67. Redes de servicios públicos sobre mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (EFRRedesEPMY AmenazaMovimientos en Masa_Medellin_C)



Mapa 68. Superposición de Redes de servicio público sobre la amenaza por inundaciones. (EFRRedesEPM_Medellin_C)



Mapa 69. Redes de servicios públicos analizadas desde el mapa de amenaza por inundaciones para condiciones proyectadas. Polígono El Faro. (EFRRedesEPMCondicionesProyectadas_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

19.3 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES

La vulnerabilidad de las redes depende del tipo de tubería que se esté usando. Para este sitio en particular, en el alcantarillado y en el acueducto se han encontrado tuberías en policloruro de vinilo (PVC). Algunas características de las tuberías en PVC son mostradas a continuación.



Los tramos de PVC en las tuberías de acueducto, generalmente presentan un comportamiento bueno, normalmente cuando se presentan daños por fugas, éstas ocurren en las conexiones. Por ésta razón, la parte más vulnerable ante los efectos en masa son las conexiones.

Según la descripción anterior, las conexiones de las tuberías en PVC tienen una baja capacidad de deformación diferencial horizontal y se concluye entonces que estas son altamente vulnerables ante un movimiento en masa. Este tipo de estructuras también es vulnerable a un lavado del material de fundación debido a una inundación o a una avenida torrencial cerca de los cauces de quebrada.

19.4 EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES

Teniendo en cuenta la alta vulnerabilidad de las redes de servicios públicos, como se explicó en el numeral anterior, se concluye que el riesgo en el cual se encuentran las redes ubicadas justo en las zonas de amenaza alta por deslizamiento es también alto.

En relación con el riesgo de las redes de servicios públicos por inundaciones al interior del Polígono El Faro, en los apartados anteriores se concluyó que cerca del 50% de las redes de servicios se encuentran en la zona de amenaza alta, por lo que es posible afirmar también que en la misma proporción estas redes se encuentran dentro de riesgo por inundaciones.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

20. PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN DEL RIESGO

En los Capítulos 17 y 18 de este informe se presentaron los resultados de las evaluaciones del riesgo por movimientos en masa y por inundaciones y avenidas torrenciales. En este capítulo se presenta lo relacionado con el planteamiento de las obras de mitigación dirigidas a control de los factores de riesgo detectados y presentados en los capítulos mencionados.

Para lograr lo anterior, se diseñaron fichas de análisis de alternativas de solución, las cuales se presentan como anexo a este informe. Se trata de dos fichas, una en la cual se evalúan las alternativas de mitigación del riesgo por movimientos en masa y otra en la que se evalúan las alternativas de mitigación del riesgo por inundaciones y avenidas torrenciales.



Cada una de las fichas contiene una descripción general de la problemática, incluyendo esta descripción un registro gráfico, el riesgo, la vulnerabilidad y la amenaza, además de una directriz general sobre las soluciones analizadas. Luego se presentan las alternativas evaluadas, mostrándose de cada una de ellas las características, el esquema, las ventajas, las desventajas y el costo aproximado. Después se muestra la valoración de cada una de las soluciones considerando los aspectos técnico, económico, socio ambiental y mantenimiento. A estos aspectos se les dio una importancia de 40%, 20%, 30% y 10%, en su orden, de manera que juntos constituyen el 100%. Cada aspecto fue subdividido y puntuado, de manera que se da una valoración final de cada solución que es el resultado de sumar los productos del porcentaje asignado a cada subdivisión efectuada por la puntuación otorgada. La mejor solución para mitigación del riesgo es la que mayor valor obtenga luego de hacerse la operación descrita.

Las fichas para el análisis de las respectivas obras de mitigación por movimientos en masa e inundaciones se presentan en el Anexo 07.

20.1 OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

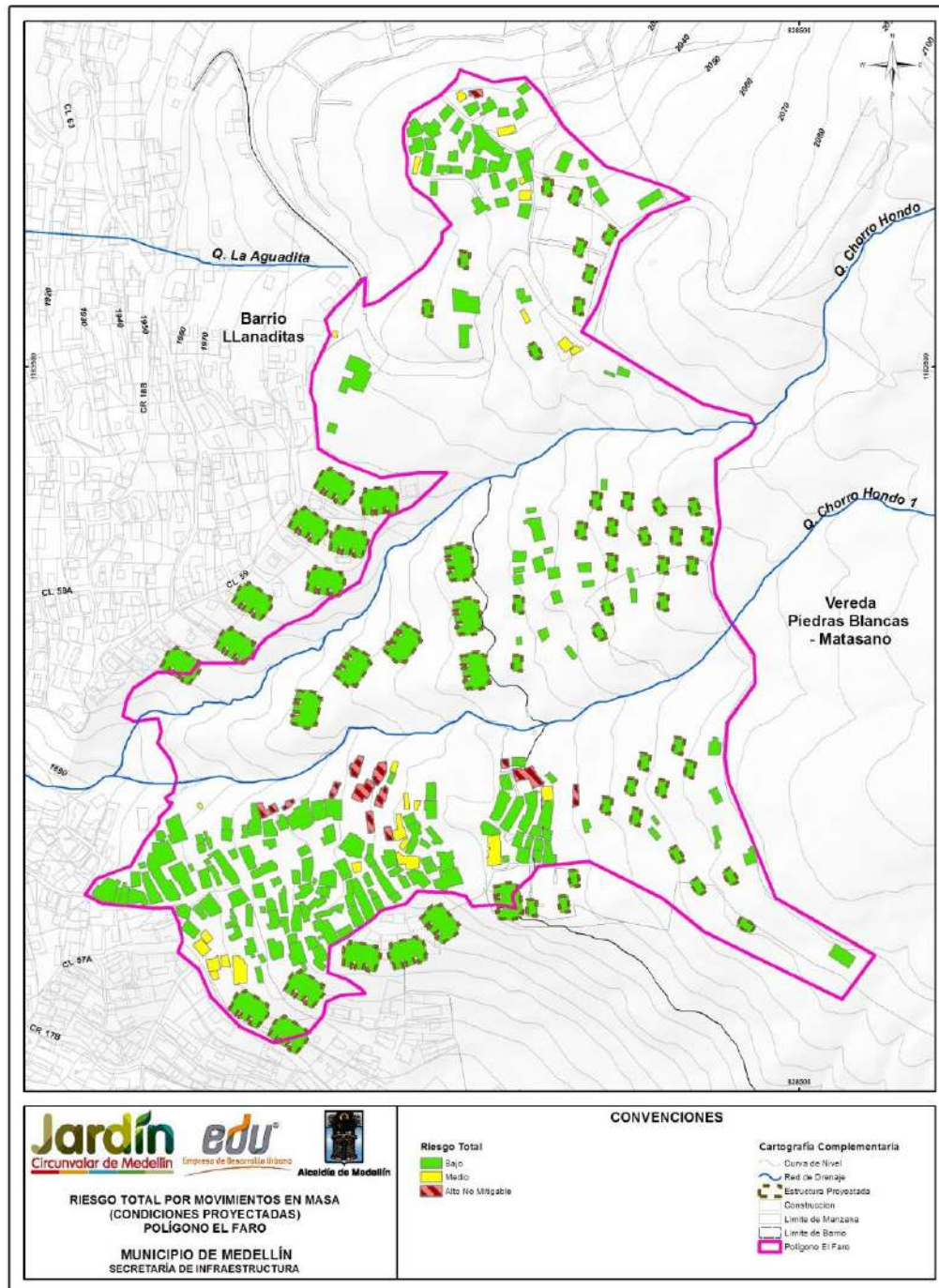
Luego del análisis del riesgo por movimientos en masa, se observa que en el Polígono El Faro se presentan 26 estructuras en riesgo alto, las cuales fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable (Mapa 61).

Como alternativa de mitigación del riesgo se considera la combinación de obras estructurales y no estructurales, que implican reconfiguración de las zonas de amenaza alta, la implementación de estructuras de contención y la utilización de sistemas de drenaje. Sin embargo, dada la dispersión de las viviendas en alto riesgo, se recomienda la reubicación de éstas, ya que se localizan en zonas de amenaza alta y el estado estructural en el que se encuentran es de medio a malo, dado que la gran mayoría están construidas en madera, lata y cartón. Además, estas viviendas se encuentran dentro de la zona de retiro de Quebrada Chorro Hondo 1.



	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

Se recomienda que todos los proyectos que se tengan planteados en este sector consideren la implementación de las cimentaciones apropiadas para las condiciones de amenaza que se presenten.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis general del riesgo con las condiciones proyectadas considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles y las respectivas obras de mitigación, en este caso el mejoramiento de las cimentaciones de las estructuras implicadas. Los resultados de este análisis se presentan en el Mapa 70.



Mapa 70. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono El Faro (42_EFRRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_C y 42_EFRRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

20.2 OBRAS PARA RIESGO POR INUNDACIONES

20.2.1 Análisis de resultados en condiciones actuales

En el Mapa 31 y en el Mapa 38 se presentan las manchas de inundación y las condiciones de amenaza por inundación para las condiciones actuales. Por otro lado, el Mapa 65 presenta las condiciones de riesgo por inundaciones en condiciones actuales.



En la Quebrada Chorro Hondo se presentan casos donde el flujo pasa por encima de pasos peatonales o hay presencia de estructuras de control que funcionan como obstrucción al flujo debido a que no presentan capacidad hidráulica para periodos de retorno mayores que 2.33 años, donde estas generan comportamientos de flujo como el aumento del ancho superficial. Al realizarse una comparación de las construcciones actuales que están clasificadas en algún grado de amenaza, con las construcciones proyectadas donde se contemplan la reubicación o retiro de viviendas, se observa que aquellas que estaban en algún grado de riesgo por inundación y donde se clasificaban como “mitigables” y “no mitigables” como se muestra en el Mapa 65, serán retiradas, por lo anterior, no se realizó la proyección de obras hidráulicas para mitigar el riesgo por inundaciones.

En la Quebrada Chorro Hondo 1 se presentan dos puntos críticos, los cuales corresponden a las denominadas Estructuras Hidráulicas Est.1 y Est.2. Dichas estructuras cruzan los Pasos o Puentes Peadonales 1 y 2. Ambos puntos críticos presentan condiciones de obstrucción e incapacidad hidráulica descritas en los Numerales 12.2.2 y 12.3.11. Debido a que las condiciones son similares, la solución planteada cumple para ambos puntos.

La solución contempla el retiro de las estructuras de fondo escalonado (Est.1 y Est.2) y los puentes peatonales existentes (Puente 1 y Puente 2) en la Quebrada Chorro Hondo 1. Estos serán reemplazados por pasos elevados que permiten el adecuado comportamiento del flujo asociado a los diferentes periodos de retorno. Con el retiro de las estructuras tipo canal, se busca también adecuar la sección y el perfil de cauce a unas condiciones naturales que permitan el adecuado transporte de los caudales de diseño, que a su vez cumplan su objetivo de reducir el riesgo por inundación.

Finalmente en el Plano P-2445-EF-OM-01 se presentan los diseños de estas estructuras mencionadas que dan solución a la problemática de riesgo alto para casi la totalidad de las viviendas del polígono. Las viviendas que permanecen en riesgo alto por inundaciones en condiciones proyectadas corresponden a algunas que se encuentran invadiendo los cauces, por lo que se consideraron con riesgo alto no mitigable.

Los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo para condiciones existentes se incluyen en el Anexo 12 donde se presenta la geodatabase del proyecto.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

20.2.2 Análisis de resultados en condiciones proyectadas

Los análisis en condiciones existentes se encuentran descritos en la evaluación hidráulica, donde se especifican los resultados de las diferentes variables hidráulicas y se muestran las manchas de inundación, a partir de las cuales, se plantearon las diferentes obras de mitigación.

Las manchas de inundación, así como la zonificación de la amenaza y del riesgo por inundaciones en condiciones proyectadas se presentan respectivamente en el Mapa 71, el Mapa 72 y el Mapa 73. En el Mapa 74 se muestra el retiro a la quebrada planteado por el POT (2014) y el retiro hidrológico en condición proyectada obtenido del presente estudio.

Los resultados obtenidos para estas condiciones proyectadas indican que las obras propuestas cumplen con las condiciones geométricas que permiten la solución a la problemática asociada a las inundaciones mostradas en las condiciones existentes. A continuación se muestran los resultados asociados a 2.33 años y 100 años periodo de retorno, para la quebrada chorro Hondo 1, dado que las condiciones proyectadas para la quebrada Chorro Hondo son iguales a las existentes.

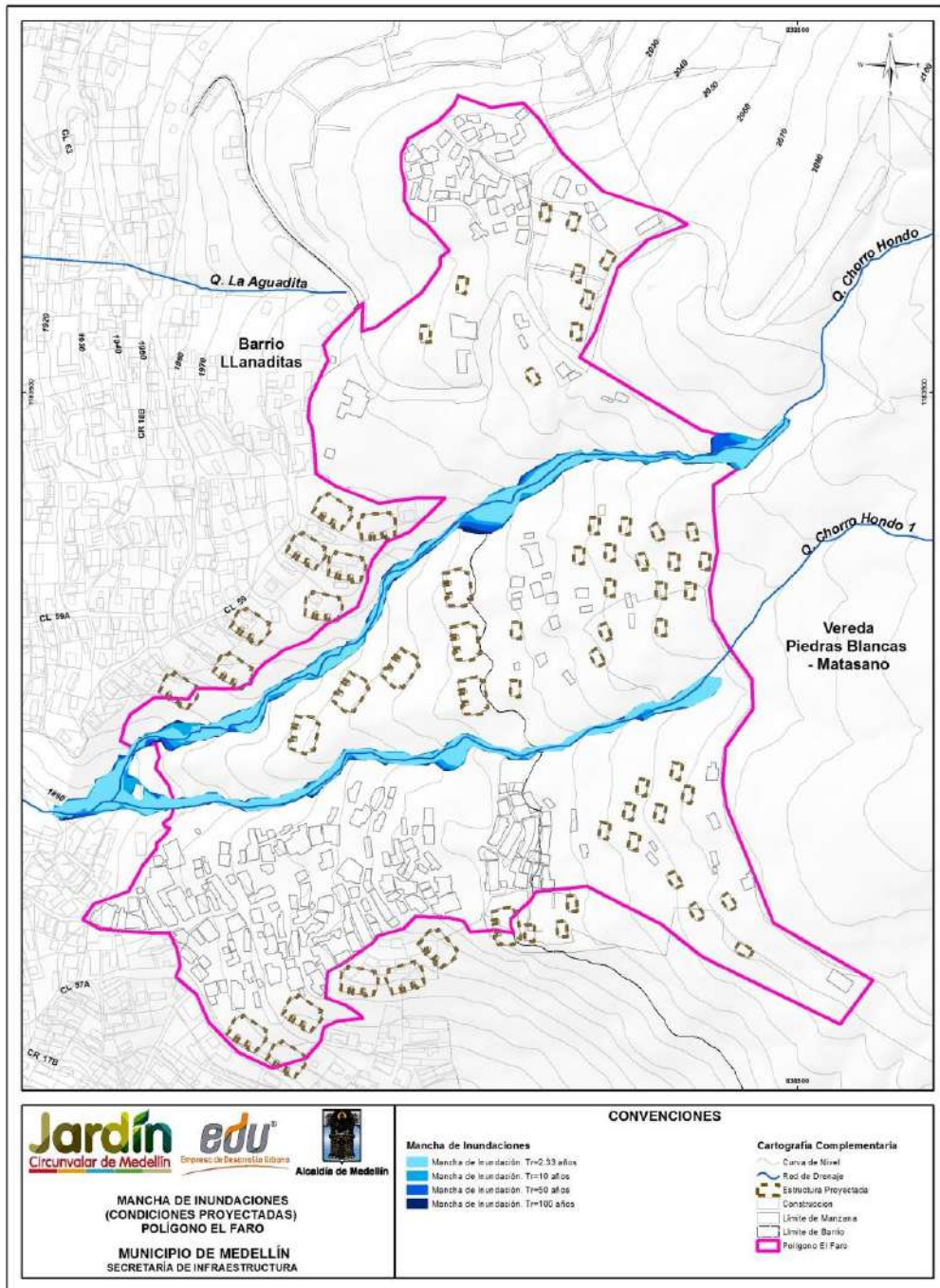
La profundidad máxima asociada a un periodo de retorno de 2.33 años para la obra del puente 1 es 0.76 m y el puente 2 de 1.36 m, mientras que para 100 años periodo de retorno las profundidades son de 0.98 m para el puente 1 y de 1.53 m para el puente 2.

En el caso de las velocidades máximas, se encuentran del orden de 5.41 m/s para el Puente 1 y de 5.67 m/s para el puente 2 asociados a un periodo de retorno de 2.33 años, mientras que para 100 años las velocidades en el puente 1 es de 7.28 m/s y para el Puente 2 de 7.85 m/s.

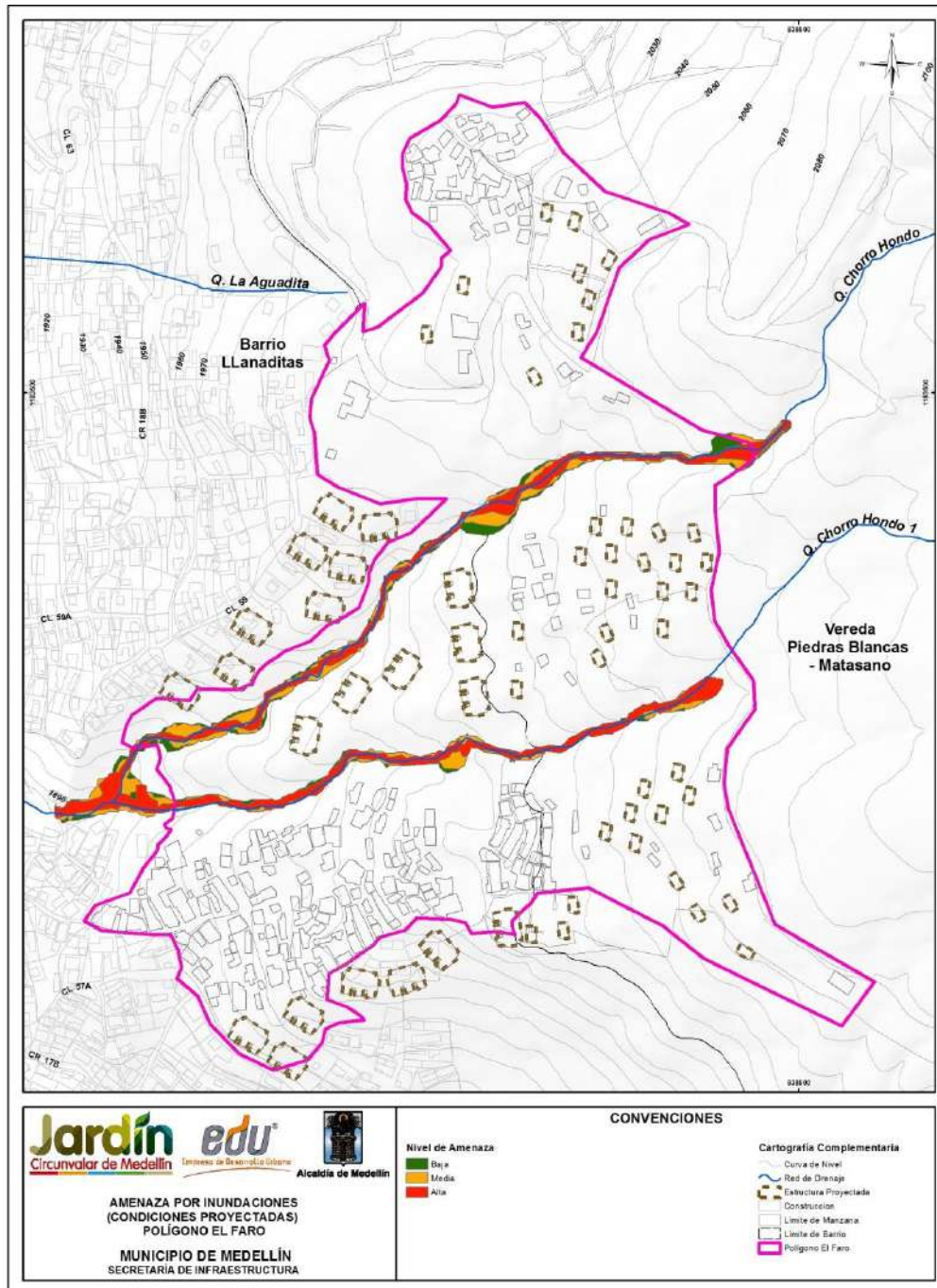
Al comparar los resultados obtenidos en condiciones actuales con las proyectadas se observan que no existe un cambio en la dinámica de la quebrada que pueda afectar las condiciones aguas abajo de la misma, por tanto se elimina la mancha de inundación y se mejoran las condiciones de amenaza por inundación.

En el Mapa 74 se puede apreciar que una parte de la infraestructura de viviendas proyectadas se encuentra dentro de la zona de retiro a corrientes hídricas establecida por el POT (2014), cuya franja de retiro total se construye a partir de la envolvente de las franjas de retiros parciales establecidas para cubrir aspectos hidrológicos, geológicos, entre otros. A partir de los resultados del presente estudio puede concluirse que la infraestructura de viviendas proyectadas está por fuera de los límites de la mancha de inundación asociados a 100 años periodo de retorno, es decir, se encuentran fuera de lo que sería la franja de retiro hidrológico que se delimitaría a partir de los resultados del presente estudio.

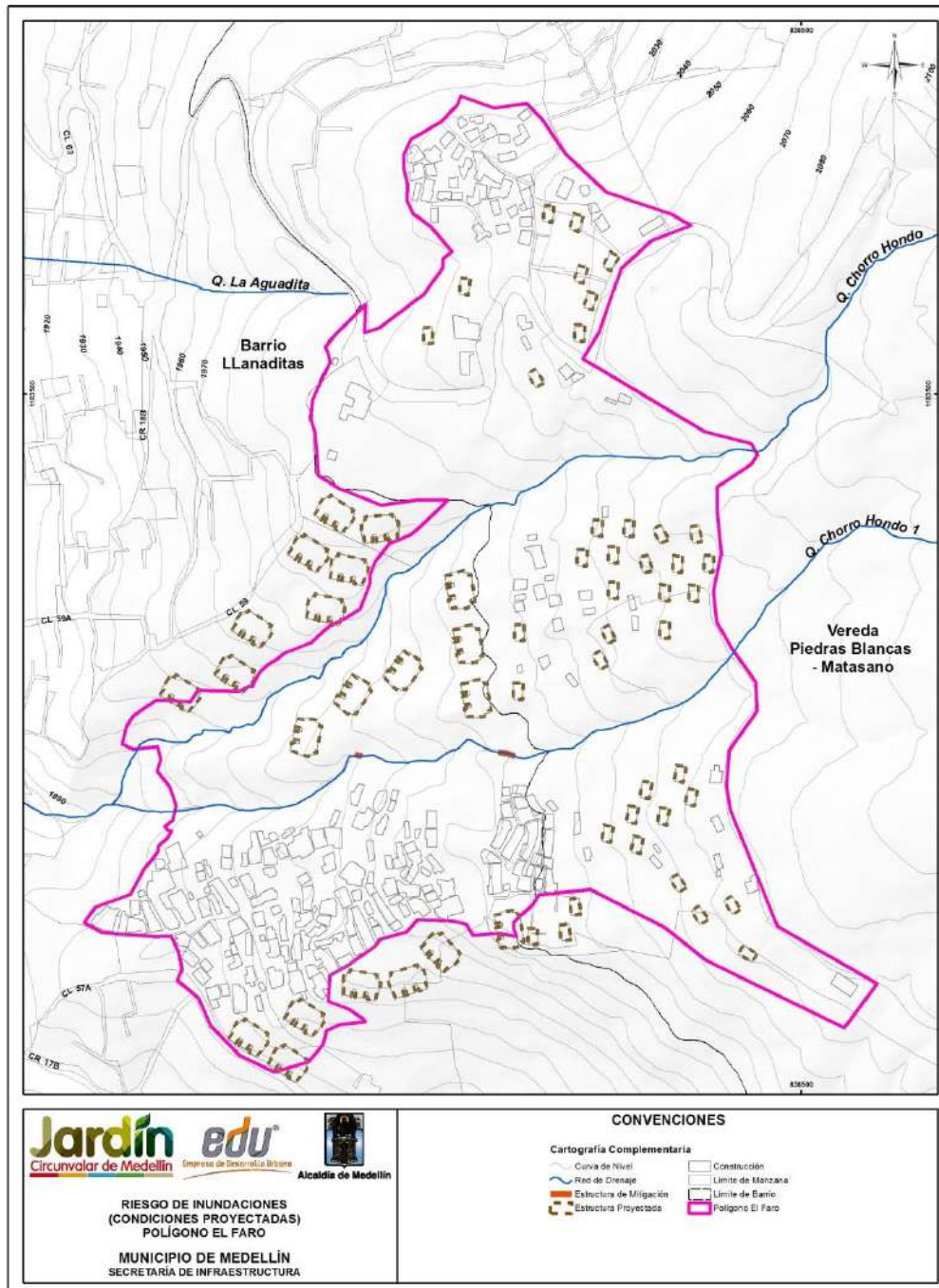
Los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo para condiciones proyectadas se incluyen en el Anexo 12 donde se presenta la geodatabase del proyecto.



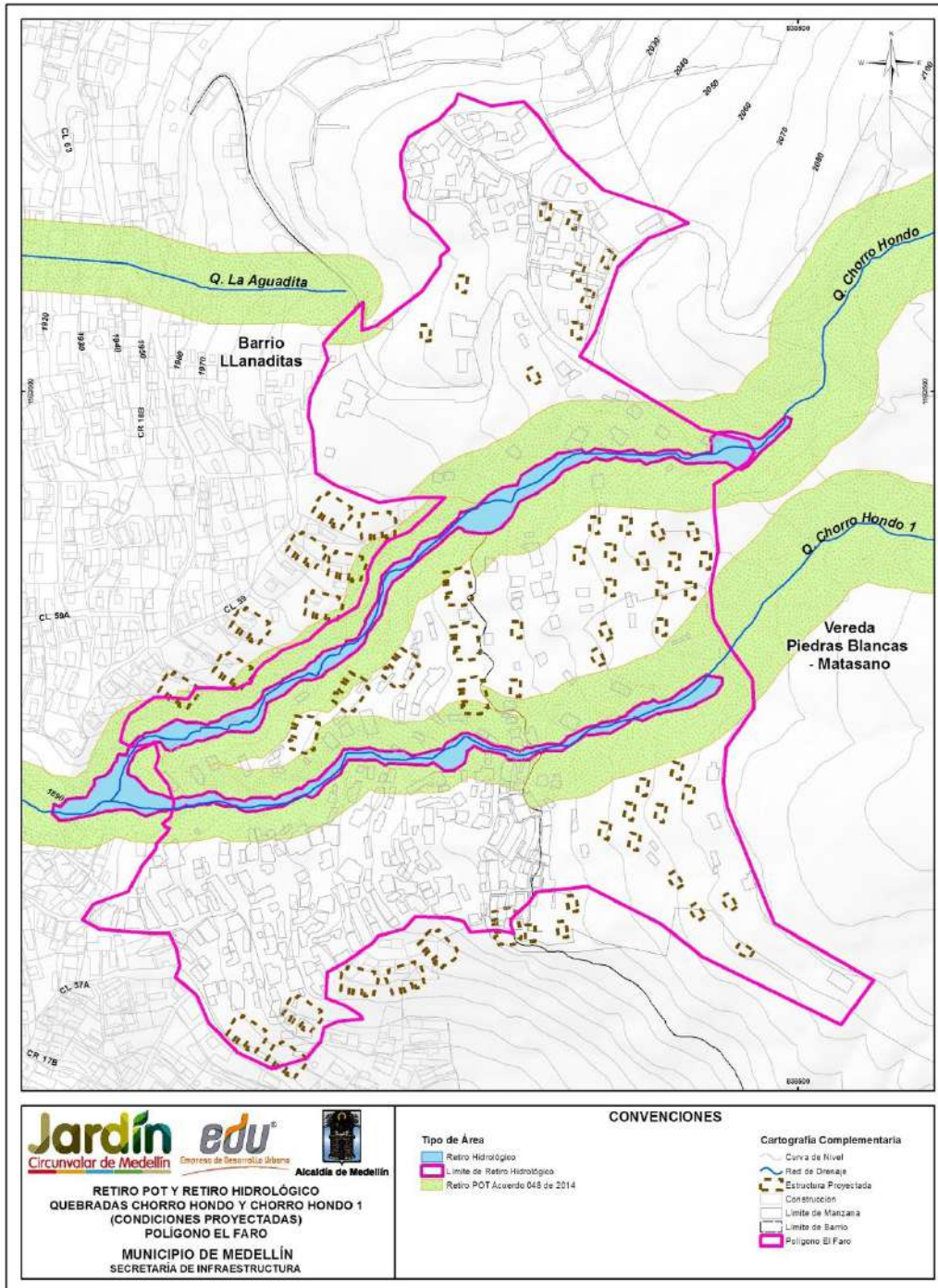
Mapa 71. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas para el Polígono El Faro.
(22_EFRManchalnundacionesCondProyecto_Medellin_C y 22_EFRManchalnundacionesCondProyecto_Medellin_T)





Mapa 72. Análisis de amenaza por inundaciones en condiciones proyectadas en las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1. Polígono El Faro (24_EFR Amenazas Inundaciones Cond Proyecto_Medellin_C y 24_EFR Amenazas Inundaciones Cond Proyecto_Medellin_T)



Mapa 73. Análisis de riesgo por inundaciones para viviendas y construcciones en condiciones proyectadas en el Polígono El Faro
(44_EFRRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_C y
44_EFRRiesgoInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 74. Retiro POT y retiro hidrológico para las quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (EFRRetiroPOT-RetiroHidrologicoyGeologico_Medellin_C)

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

21. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El denominado Polígono El Faro, objeto principal de este estudio, tiene un área aproximada de 10.83 hectáreas. Se encuentra ubicado en el Barrio Llanaditas y sus sectores Golondrinas, El Faro, Altos de la Torre y El Pacífico. Además, ocupa una parte de la zona rural del corregimiento de Santa Elena, en las Veredas Piedras Blancas-Matasano, Media Luna y una pequeña porción de Mazo. A su vez, ocupa sectores de las cuencas de las Quebradas La Castro, Chorro Hondo, La Aguadita, La Loca, El Ahorcado y una pequeña fracción de la quebrada El Ñato.

El área de intervención del Polígono El Faro se concentra en los sectores El Faro y Altos de la Torre, ubicados en la vertiente de la microcuenca de la Quebrada Chorrohondo, cercanas están las vertientes de la Quebrada La Loca en el sector de Golondrinas y la Quebrada La Rafita en el sector El Pacífico.

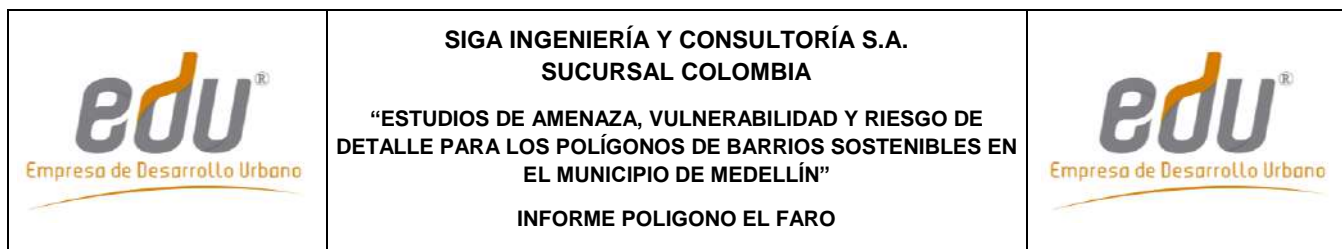
De este polígono, se ha efectuado el estudio de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable dentro del mismo. Se tuvieron en cuenta tres escenarios de amenazas enfocados desde el punto de vista geológico, geotécnico, hidrológico e hidráulico, que podrían afectar a las comunidades que habitan el Polígono El Faro, pudiéndose entonces resaltar lo siguiente:

En cuanto a la **Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)** dentro de la cual se enmarca el estudio:

La UMI asociada al polígono de estudio en el Barrio El Faro, comparte UMI con el Polígono Golondrinas. La inclusión de los Polígonos El Faro y Golondrinas dentro de una misma UMI, resulta como consecuencia de su proximidad. La selección inicial de cada UMI para estos polígonos generó que ambas presentaran una intercepción mayor al 80% en su área de influencia, es decir más de la mitad del área de una UMI consideraba el área de la UMI vecina, con procesos en común para ambas UMI. Por lo anterior, para efectos de optimizar los trabajos de análisis, ambas UMIS se unificaron. Finalmente la denominada en este estudio como UMI El Faro - Golondrinas tiene un área aproximada de 158 hectáreas aproximadamente y corresponde a los Polígonos El Faro y Golondrinas.

Así las cosas, la selección de la UMI de Faro - Golondrinas partió del análisis de las condiciones morfométricas, morfodinámicas, hidráulicas e hidrológicas de la zona. Se enfoca en atender las evaluaciones de movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones que podrían afectar directamente las estructuras al interior del denominado Polígono El Faro.

De forma general, la UMI se localiza en el centro de la Comuna 8 y se posiciona en el extremo norte del Proyecto Barrios Sostenibles, limitando al sur con la UMI del Polígono Trece de Noviembre, al oriente con la UMI Esfuerzos de Paz y Villa Turbay y hacia la zona occidental con el Barrio Llanaditas. Desde el punto de vista de sus límites, la UMI se



encuentra acotada principalmente en sus flancos sur, norte y oriente por la presencia física de algunas divisorias de aguas.

En lo relacionado con los **Aspectos Geológicos y Geomorfológicos** tanto de la UMI como del polígono:

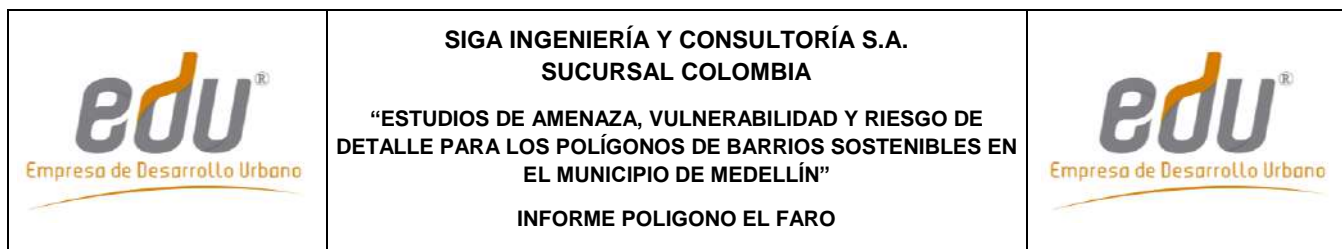
Las unidades geológicas de rocas cristalinas presentes en la UMI El Faro - Golondrinas corresponden a las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales se presentan en los horizontes de meteorización IC y IIA. Estas unidades están suprayacidas por depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósito de deslizamiento (Qd), cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ. Además, se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

Las unidades geomorfológicas predominantes de la UMI El Faro - Golondrinas son las unidades de lomos tales como Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM y Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF.

Los procesos morfodinámicos identificados son predominantemente activos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión y socavación lateral. Los deslizamientos y las caídas de rocas son generados por procesos de inestabilidad en las vertientes con pendientes moderadas y altas. Así mismo, los bloques del macizo que sobresalen en superficie y que se encuentran muy fracturados son propensos a desprenderse. Los resultados del análisis cinemático de los datos estructurales tomados en la UMI del Polígono El Faro indican que el mecanismo de falla con mayor probabilidad es el volcamiento (mecanismo por la base) con un 13%.

En lo que tiene que ver con procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI El Faro - Golondrinas, a partir de la fotointerpretación se identificaron cicatrices de movimientos en masa y cárcavas, en las márgenes de las Quebradas La Loca, Chorro Hondo y Chorro Hondo 1 (incluidos sus afluentes). Los procesos observados pueden estar asociados a socavación del cauce de las quebradas. El fenómeno de socavación lateral se evidenció en la Quebrada Chorro Hondo, justo aguas arriba de la intersección con el Polígono El Faro. Dicha socavación produce el desconfinamiento del material de las orillas y genera desgarres de 1 m de profundidad. Sin embargo, al interior del Polígono El Faro las expresiones existentes de procesos de socavación o erosión son menores y de tipo local en todas las quebradas del Polígono.

El mapa de aptitud geológica-geotécnica indica que la proporción de las zonas aptas con restricciones moderadas, aptas con restricciones altas, no aptas y no aptas por normatividad es similar en toda la UMI. Al interior del Polígono El Faro dominan las zonas no aptas y aptas con restricciones altas. Las zonas aptas son las de menor ocurrencia en la UMI El Faro – Golondrinas y no se tiene este tipo de zonas al interior del polígono.



En lo relacionado con los **Aspectos Geotécnicos** tanto de la UMI como del polígono, refiriéndose estos principalmente a la caracterización de los materiales determinados por medio de la exploración del subsuelo:



Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron pruebas de laboratorio sobre las muestras alteradas e inalteradas recuperadas por medio de los sondeos exploratorios. El programa de ensayos de laboratorio se realizó con el objetivo de determinar propiedades índice del suelo fundamentales para determinar las condiciones de estado de los materiales clasificándolos mediante el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos para propósitos ingenieriles, y para realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los mismos. Algunas de las muestras alteradas fueron destinadas a ensayos de clasificación como son humedad natural, límites de consistencia, granulometría por tamizado y lavado sobre la malla 200 y gravedad específica. Sobre las muestras inalteradas, se realizaron ensayos de resistencia al corte para determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo. Se realizaron ensayos de corte directo para condiciones consolidadas drenadas. La revisión de la información básica también jugó un papel importante en la caracterización de los materiales.

Todos los ensayos recopilados sugieren, como era de esperarse, una variabilidad considerable de las propiedades geotécnicas de los materiales. Por esto, se realizó un análisis estadístico de las propiedades de los materiales que conformando el perfil geotécnico típico, representan mayor amenaza para el proyecto. Estos análisis son necesarios para la aplicación de cualquier método probabilístico que permita encontrar la probabilidad de falla de una ladera, objetivo primordial de este estudio. Por tal razón, se requiere una gran cantidad de información en términos de parámetros de resistencia, por lo que se consideró conveniente unir todos aquellos ensayos de las diferentes UMI o polígonos que caracterizarán los diferentes estratos u horizontes del proyecto.

Se identificaron primero las variables que generan incertidumbre siendo estas la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo. Fue asumida una función de distribución de probabilidad normal para cada uno de estos parámetros. Luego se determinaron los momentos estadísticos de bajo orden, es decir, la media y la desviación estándar. Adicionalmente, fue calculado la covarianza o coeficiente de variación (COV) de cada uno de los parámetros.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Movimientos en Masa** específicamente para el polígono:

Se generó el mapa de zonificación de la amenaza total por deslizamiento considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años. Considerándose éste el principal producto de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, se puede establecer que se obtienen zonas en los tres grados de amenaza considerados, baja (probabilidad de falla menor que el 3.2%), media (probabilidad de falla entre el 3.2% y el 5.5%) y alta (probabilidad de falla mayor que el 5.5%). Las áreas con probabilidad de falla baja predominan y se extienden a lo largo y ancho de la UMI.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años que acaba de mencionarse. El mapa final de riesgo consistió en la unificación del riesgo estructural y el riesgo de las personas. Fue posible categorizar el riesgo en un solo mapa entre bajo, medio y alto. Adicionalmente, la categoría de riesgo alto fue subcategorizada en riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura exceden los costos de las alternativas de intervención propuestas, se considera que el riesgo es mitigable. Si por el contrario, los beneficios de la reubicación de asentamientos e infraestructura representan la mejor opción económica, se deduce que el riesgo es no mitigable. Se obtuvo que en el Polígono El Faro se presentan 26 estructuras en riesgo alto que fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable. Para dichas estructuras en alto riesgo se recomienda su reubicación debido al estado estructural en las que se encuentran actualmente, ya que la gran mayoría están construidas en madera, lata y cartón, además éstas se localizan en zonas de amenaza alta y la mayoría de ellas se encuentran dentro de la zona de retiro de quebrada.



Se recomienda que todos los proyectos que se tengan planteados en este sector deban considerar la implementación de las cimentaciones apropiadas para las condiciones de amenaza que se presenten.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Inundación y Avenidas Torrenciales** específicamente para el polígono:

La evaluación de la amenaza por inundaciones generadas por las Quebradas Chorro Hondo y Chorro Hondo 1, principales drenajes del Polígono El Faro, arrojó resultados que indican que la zona que corresponde al cauce principal de estas quebradas presenta una amenaza alta, dado que la intensidad (velocidad y/o profundidad) y frecuencia de los flujos de aguas que por allí transitan presentan valores altos.

En la Quebrada Chorro Hondo, las viviendas que se encuentran clasificadas en algún grado de amenaza, corresponde a aquellas que hacen parte del régimen de flujo, donde estas actúan como margen del cauce o que se encuentran dentro de la mancha de inundación generada por los diferentes periodos de retorno evaluados. En algunos puntos localizados de la quebrada se observa anchos mayores superficiales de la amenaza por inundación, esto debido a obras de control o condiciones donde el flujo del cauce pasa por encima de pasos peatonales.

En la Quebrada Chorro Hondo 1, hay mayor número de viviendas que se encuentran clasificadas en los diferentes grados de amenaza, debido a las condiciones de obstrucción e incapacidad hidráulica que presentan las obras existentes. Esta amenaza se concentra en el costado sur al cauce, en la primera estructura u obra de control denominada “Est.1” o la ubicación del Puente Peatonal 1, las condiciones allí presentes como la presencia de viviendas que hacen parte del régimen de flujo o la falta de capacidad hidráulica de las obras para evacuar periodos de retorno mayores a 10años, conllevan a vertimientos.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

En este polígono de estudio se presenta un número importante de viviendas con riesgo alto por inundaciones, debido a la cercanía de estas al cauce o por insuficiencia hidráulica de las estructuras existentes. Se plantean diversas obras que buscan incrementar la capacidad del sistema de drenaje al interior del polígono. Todas las estructuras se definieron a partir de un análisis de alternativas. Se consideraron diversos aspectos como costos, grado de solución del problema entre otros.



- ✓ En el caso de la Quebrada Chorro Hondo, no se proyectan obras hidráulicas, ya que las viviendas que se encuentran clasificadas en riesgo Alto, Medio o Bajo, serán retiradas según los diseños urbanísticos proyectados. A lo anterior se suma el hecho de que la mayoría de viviendas que se encuentran en riesgo por inundación se clasifican en “No Mitigables”, ya sea porque invaden el cauce o se encuentran en la mancha de inundación generada por los diferentes periodos de retorno evaluados.
- ✓ En el caso de la quebrada Chorro Hondo 1, se plantea el retiro de todas las estructuras y puentes peatonales que se encuentran a lo largo de la quebrada comprendida dentro del polígono de estudio. Estas obras contemplan la proyección de puentes peatonales, así como la adecuación de la sección del cauce y perfil en unas condiciones naturales. El puente peatonal 1, ubicado en la obra existente denominada Est.1, será reemplaza por un puente peatonal con una luz de 5.0 m y un ancho de 2.3 m y para el puente peatonal 2, ubicado en la obra existente denominada Est.2, se reemplazara por un puente con una luz de 6.0 m y ancho de 2.3m.

Las viviendas que permanecen en riesgo alto por inundaciones en condiciones proyectadas corresponden a algunas que se encuentran invadiendo los cauces, por lo que se consideraron con riesgo alto no mitigable y deben ser retiradas para no cambiar las condiciones de flujo y aumentar la probabilidad de clasificar otras áreas del polígono en riesgo.

Por otro lado, se concluye que el Polígono El Faro no presenta amenaza ante fenómenos de avenidas torrenciales.

Según la superposición realizada a la capa de edificaciones proyectadas por la EDU, y la capa de retiros a corrientes hídricas establecidos por el POT (2014), se observó que algunas edificaciones están dentro de los límites de la franja de retiro. A partir de los resultados del presente estudio de detalle puede concluirse que la infraestructura de viviendas proyectadas está por fuera de los límites de la mancha de inundación asociados a 100 años periodo de retorno, es decir, se encuentra fuera de lo que sería la franja de retiro hidrológico que se delimitaría a partir de estos resultados. Es importante mencionar que la delimitación de la envolvente de retiro total a la corriente hídrica se encuentra fuera del alcance del presente estudio.

Así las cosas, finalmente se puede concluir que se logró el alcance definido desde el principio para el Polígono El Faro. Se llegó hasta definición de las condiciones de riesgo ante fenómenos de movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales y la evaluación de las zonas que se consideran de riesgo mitigable y no mitigable, por medio

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

de métodos cuantitativos y fácilmente reproducibles. Al interior de las zonas con riesgo mitigable se llegó hasta el establecimiento de las medidas de estabilización que puedan ayudar a la mitigación de dicho riesgo. En el Anexo 08 se presentan las memorias de diseño de las obras de mitigación. En el Anexo 11 se presentan las cantidades de obra, presupuesto y especificaciones.

Los Planos P-2445-EF-OM-01 a P-2445-EF-OM-03 del Anexo 09, contienen los diseños de las estructuras que dan solución a la problemática de riesgo del polígono. Se trata entonces de las obras para mitigación del riesgo por inundaciones, toda vez que se determinó que en el Polígono El Faro se presentan 21 estructuras en riesgo alto que fueron clasificadas en riesgo alto no mitigable. Para dichas estructuras en alto riesgo se recomienda su reubicación debido a que las condiciones estructurales en las que se encuentran actualmente son las más precarias, ya que están construidas en madera, lata y cartón. De las 21 viviendas solo dos están construidas en mampostería, sin embargo, una de ellas se encuentra dentro de la zona de retiro de quebrada por lo que se recomienda su reubicación y la otra estructura, aunque presente resistencia estructural media su vulnerabilidad es alta, ya que se encuentra en una zona de afectación por un eventual movimiento en masa que pueda generarse en la parte alta, por lo tanto, también se recomienda su reubicación.

La solución contempla el retiro de las estructuras de fondo escalonado (Est.1 y Est.2) y los puentes peatonales existentes (Puente 1 y Puente 2) en la Quebrada Chorro Hondo 1. Estos serán reemplazados por pasos elevados que permiten el adecuado comportamiento del flujo asociado a los diferentes periodos de retorno. Con el retiro de las estructuras tipo canal, se busca también adecuar la sección y el perfil de cauce a unas condiciones naturales que permitan el adecuado transporte de los caudales de diseño, que a su vez cumplan su objetivo de reducir el riesgo por inundación. Así las cosas, se considera que todas las intervenciones deben llevarse a cabo de forma simultánea. No puede establecerse que alguna de ellas sea de mayor relevancia que otra.

Finalmente, el Anexo 12 contiene la información correspondiente a la metodología del trabajo en SIG con el manual de usuario y con las rutinas que se implementaron para generar los mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, además de las bases de datos, los archivos de mapa, los archivos raster y complementarios. La información se localiza en una carpeta (directorio) llamada *Proy_Riesgos_EDU*, y al interior de ésta, 14 subdirectorios que contienen la información requerida por los usuarios del proyecto y que son los necesarios para el entendimiento de la información, y a su vez al interior de algunos de estos subdirectorios, se ubicaron otras carpetas que dan cuenta de diversos aspectos de la información geográfica (Figura 207).

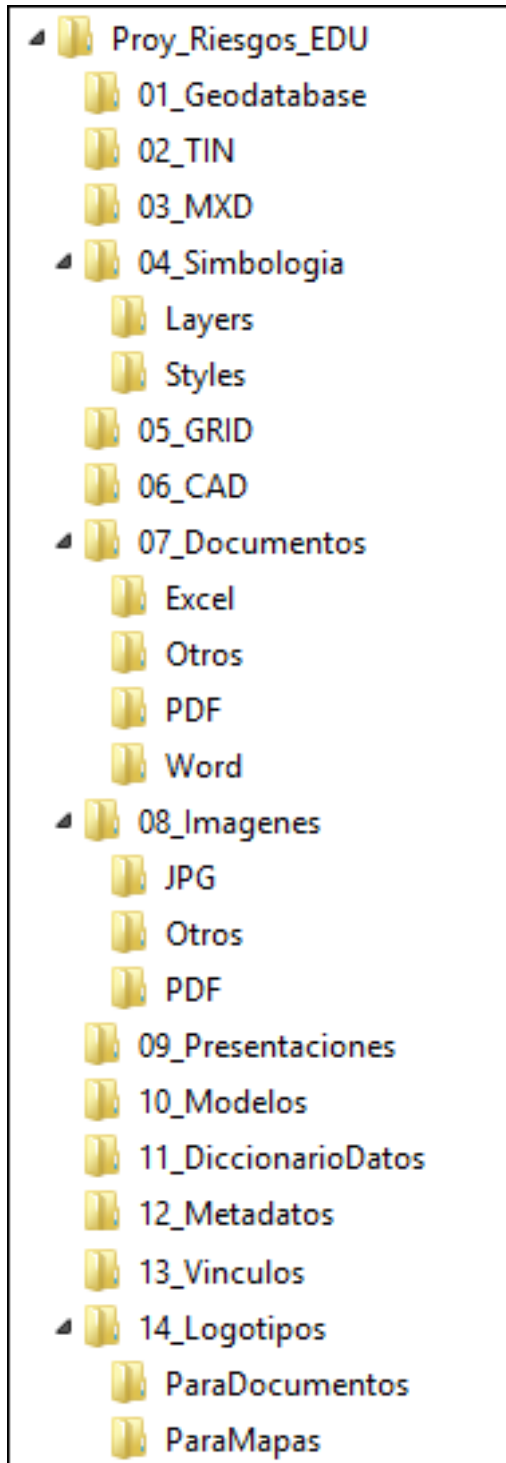
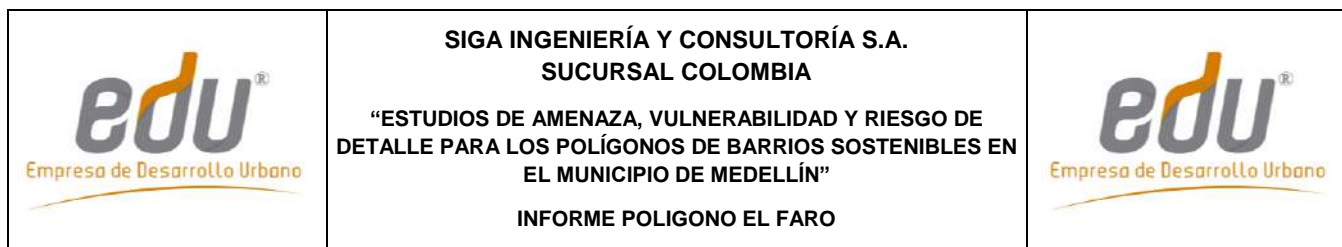


Figura 207. Estructura general de la información entregada



22. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMVA, CORNARE, CORANTIOQUIA, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. (2005). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá. Convenio de Cooperación No. 652 de 2005.

AMVA, (2007). Microzonificación y evaluación del Riesgo Sísmico del Valle de Aburrá (Publicación Institucional No. 29 ed.). Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, (2009). Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión (Vol. Libro II). (C. y. Proyecto en conjunto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con los municipios de Medellín y Envigado, Ed.) Medellín: Área metropolitana del Valle de Aburrá.

AMVA, (2012). Directrices y lineamientos para la elaboración de los estudios geológicos geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera, en el Valle de Aburrá. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Aleotti P., Chowdhury R., (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review And New Perspectives[J]. Bull. Eng. Env., 58:21-44.

Amatruda G., Bonnard C., Castelli M., Forlati F., Giacomelli M., Morelli M., Paro L., Piana F., Pirulli M., Polino R., Prat P., Ramasco M., Scavia C., Bellardone G., Campus S., Durville J.L., Poisel R., Preh A., Roth W., Tentschert E.H., (2004). A key approach: the IMIRILAND project method. In: Bonnard C, Forlati F, Scavia C (eds) Identification and mitigation of large landslide risks in Europe—advances in risk assessment. European Commission Fifth Framework Program. Balkema, Rotterdam, pp 13–44.



Anbalagan, D., (1992). Landslide Hazard Evaluation And Zonation Mapping In Mountainous Terrain [J]. Engineering Geology, 32; 269 - 277.

Aristizábal, E. & Gómez, J. (2007). Inventario de emergencias y desastres en el Valle de Aburrá. Originados por fenómenos naturales y antrópicos en el periodo 1880-2007.

Barton, N., R. Lien, and J. Lunde (1974). “Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support.” Rock Mechanics. Vol 6, No. 4, Vienna, Austria, Dec., pp. 417-440.

Brass. A., Wadge, G. and Reading, A. J., (1989). ‘Designing a Geographical Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies’, Proc. Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonic Regions, University College, London, 3-7 April 1989, 13pp.

Carrara A., (1995). GIS Technology In Mapping Landside Hazard [A]. In: CARRARA A, GUZZETTI F (eds.). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards[C]. Dordrecht: Kluwer Acad. Pub1., 135 - 176.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

Case, J.E., Duran, L.G., López, A., Moore, W.R., (1971). Tectonic investigations in western Colombia and Eastern Panamá. Geological Society of America Bulletin 82, 2685-2712.

Chow, Ven Te; Maidment, David R.; Mays & Larry W., (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill.

Chow, Ven Te.(1994). Hidráulica de Canales Abiertos. McGraw-Hill.

Consortio Microzonificación, (2006). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Informe Final para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. 745 P.

Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S. & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73(2), 209-263.

Coupé F., Arboleda E. & García C., (2007). Villatina: Algunas reflexiones 20 años después de la tragedia. Gestión y Ambiente. Volumen 10 – No. 2. Medellín, agosto de 2007.

Cruden, D.M. & Varnes, D.J., (1996). Landslide types and processes. Landslide investigation and mitigation, TRB Special Report 247. National Academy Press, Washington, DC, pp. 36–75.

Daí, F. C. & Lee, C. F., (2001). Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study[J]. Can. Geotech. J., 38:911-923.

DEACIVIL (2014) “Estudios de Microzonificación Geológico – Geotecnia, de Suelos, E Hidrológicos y Análisis de Estabilidad de Laderas para la Recuperación de Zonas de Riesgo en Sectores del Cerro Pan De Azúcar Influenciadas por los Proyectos del Cinturón Verde Metropolitano en la Ciudad De Medellín”.

Deere, D. U. & Patton, F. D., (1971). Slope stability in residual soils. En Proc. Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Puerto Rico. Vol. 1. Pg. 87-170. 1971.

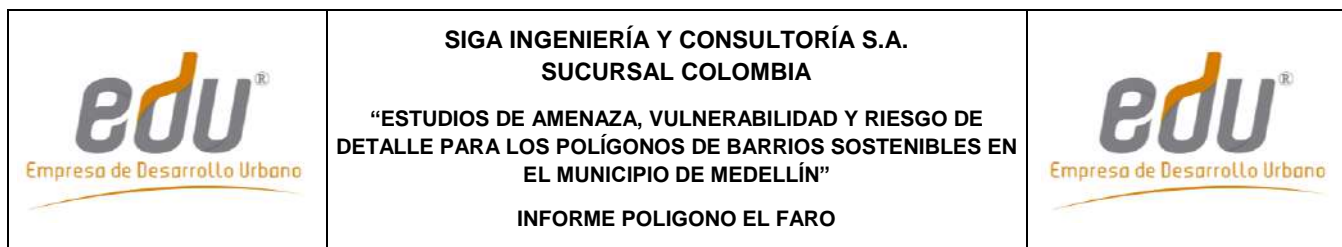
Duncan, J. M. (2000) Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 130(10), 985–1003.

Empresas Públicas de Medellín, (2005). Revista Hidrometeorológica. Volumen 1. Número 1.

El-Ramly, H., N.R. Morgenstern, e Cruden, D.M. (2006) Lodalen slide: a probabilistic assessment. Canadian Geotechnical Journal, 43: 956–968.

Figueras, S., Macau, A., Goula, X., Gonzalez, M.(2005) “Aplicación del método de Newmark para el estudio de los movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra”. VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Valencia – España. 21-24.

FLO-2D, (2010). Reference Guide and GDS Manual.



FHWA, (2012). Hydraulic Design of Highway Culverts. Third Edition.

García, R.; Rodríguez, J.J.; O'Brian, J.S., (2004). Hazard Zone Delineation for Urbanized Alluvial Fans.

González H., (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Boletín Geológico Volumen 23, No. 1. Ingeominas.

Graham, J. (1984). Methods Stability Analysis. Slope Instability. Ed. D. Brunsten & D.B. Prior. 6:171-215, John Wiley & Sons Ltd, London.

Grosse, E., (1926). Mapa geológico de la parte occidental de la cordillera central entre el río Arma y Sacaoyal. Escala 1:50000. El Terciario Carbonífero de Antioquia. Berlín.

Guimaraes, M.T. (2015), Avaliação Quantitativa da Vulnerabilidade Física Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas. Departamento De Engenharia Civil E Ambiental. Teses Doctoral. Universidad de Brasilia, Brasilia

Hidalgo, C. & Hoyos, F., (1998). Recarga de acuíferos y corrientes superficiales en la ladera occidental del Valle de Aburrá, trabajo dirigido de grado, 54 p, Facultad de Minas, Medellín.

Hoyos, F., (1985). Régimen de aguas subterráneas en suelos residuales profundos derivados de rocas cristalinas en la Cordillera Central, II Simposio Colombiano de Hidrogeología, Memorias, p. 107-125, Bogotá.

Hoyos, F., (1990). Efecto de infiltraciones distantes en la inestabilidad de laderas. I Curso Internacional de Zonificación Geológica y Geotécnica de Laderas de Alta Pendiente. Facultad de Minas. Medellín, 1990. Boletín de Vías, v XVII, n 71, pp 97-128. Universidad Nacional. Manizales.

Hoyos, F., (1992). Variación regional en la composición isotópica del agua lluvia en Colombia, Memorias del XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena.



Hoyos, F., (1994). The Moses Rod: groundwater in generation of deep seated landslides. Bulletin of the Association of Engineering Geologists v XXXI, n 1. pp 133-149.

Hoyos, F., (1998). Recarga de acuíferos en la Cordillera Central de Colombia determinada mediante isótopos ambientales. XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica - Memorias. Montevideo.

Hoyos, F., (2000). Evaluación hidrogeológica del Corredor del Túnel Aburra-Oriente, Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente, 47 p., Medellín.

Hoyos, F., (2001). Precipitaciones y deslizamientos, elementos hidrológicos e hidrogeológicos en el análisis de estabilidad de laderas, III Seminario Panamericano de deslizamientos, Memorias, 327-336, Cartagena.

Hoyos, F., (2007). Elementos hidrológicos e hidrogeológicos en el análisis de estabilidad de laderas. www.academia.edu.co Hoyos, F., 2009, Mina Conasfaltos.

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

Bello - Copacabana. Hidrogeología de los depósitos aluviales del río Medellín en su zona de influencia. Informe. 65 p. Medellín.

Hoyos, F., (2012). Discriminación de flujos subterráneos hacia el Valle de Aburrá desde el Planalto de Santa Elena y los Valles de San Nicolás. Informe a Concesión Túnel Aburra Oriente. 26 p. Medellín

Hoyos, F. & Arnason, B., (1994). Claves isotópicas en la hidrogeología de alta montaña, Boletín de Vías, XXI, 90, 51-64.

Hoyos, F. & Arnason, B., (1995). Stable isotopes for high mountain hydrogeology in Colombia. IAEA Symposium on Water Resources Management. Viena.

Hoyos, F. & Arnason, B., (1996). El caso del gradiente cero: hidrología isotópica en la zona central de Antioquia. Seminario Nacional de hidráulica. Memorias pp195-206. Bogotá.

Hoyos P., F. & Arnason, B., (1996). El caso del gradiente cero: hidrología isotópica en la zona central de Antioquia. Seminario Nacional de hidráulica. Memorias pp195-206. Bogotá 1996

Hoyos P., F., Arnason, B. & Salazar, B., (1996). Del altiplano al valle: una conexión hidráulica inferida a partir de información isotópica. Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Memorias pp 379-389. Guayaquil 1996.

Huggett R. J., (2007). Fundamentals of geomorphology, second edition, New York. pp 184-219.

Hungr, O., (1997). Some Methods of Landslide Intensity Mapping. In: Cruden, D.M., Fell, R. (Eds.), Landslide risk assessment — Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, 19–21 February 1997. Balkema, Rotterdam, pp. 215–226.

INGEOCILCÓN LTDA (2014). “Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano”.



INGEOMINAS (2005). Mapa Geológico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1:50.000, Memoria explicativa. Ingeominas 314p.

INTEGRAL (2010). Estudio hidrogeológico del Túnel de Oriente. Informe a la Concesión Túnel Aburrá Oriente, 49 p. Medellín.

INTEINSA (2013). Estudio geológico geotécnico para la reubicación del tanque de almacenamiento Llanaditas. Preparado para EPM. I-2300-011-ELL-03, Informe Final.

INTEINSA (2011). Estudio geológico - geotécnico para la ubicación de un tanque de impulsión en el municipio Medellín en el sector Llanaditas. Preparado para EPM. I-2189-ELL-02, Informe Final.

Lantada, M. N, (2007) Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral Universitat Politècnica

	<p>SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p>“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p>INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	--	---

de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona – España. 2007.

Li. Z., Nadim F., Huang H., Uzielli M., Lacasse S., (2010). Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. Springer Verlag. Landslides 7:125-134.

Louie, J. N. (2001). Faster. Better: shear-wave velocity to 100 meter depth from refraction microtremor arrays, Bull. Seism. Soc. Am. 91, 347-364.

López, Jose L. Courtel Francois, (2008). An Integrated Approach for Debris-Flow Risk Mitigation in the North Coastal Range of Venezuela.

Newmark N (1965). “Effects of earthquakes on dams and embankments”. Géotechnique, 15.2. pp 139-159.

Posada, P. Blanca Olivia (2000). Sensores remotos y SIG en la cartografía de cenizas volcánicas. Tesis de Maestría. Universidad EAFIT.

POT (2014). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín. Acuerdo 48 de 2014.

Ragozin, A.L., Tikhvinsky, I.O. (2000). Landslide hazard, vulnerability and risk assessment. In: Bromhead, E., Dixon, N., Ibsen, M.-L. (Eds.), Landslides. In: Research, Theory and Practice. Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides, Cardiff, 26–30 June 2000, pp. 1257–1262.

Restrepo, J.J. y Toussaint, J.F., (1974). Obducción cretácea en el Occidente Colombiano. Anales Fac. Minas, Univ. Nacional, Medellín, N. 58, pp 73-105

Restrepo, J. J., Toussaint, J. F., (1984). Unidades Litológicas de Los Alrededores de Medellín en: Memorias de la I Conferencia Sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. pp 1-26

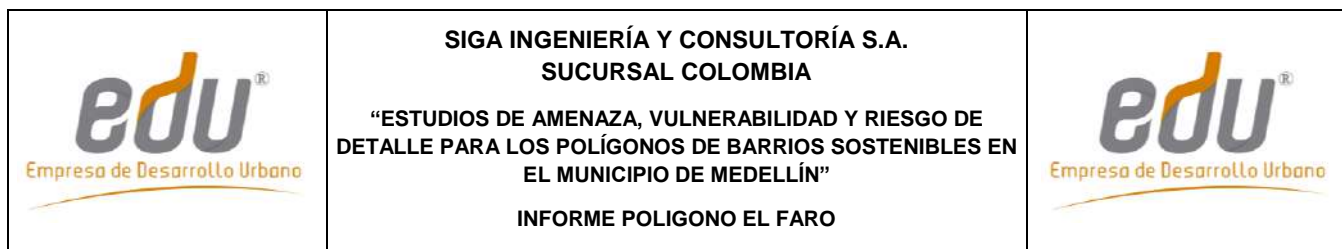
Rodríguez, C., (1990). Hidrología isotópica en Colombia, Universidad Nacional, 45 p. Bogotá.

Rosgen, Dave (1994). Applied River Morphology. Second Edition.

San Buenaventura (2014). “Estudios y diagnóstico físico para la formulación de los proyectos barrios sostenibles en los sectores Golondrinas, Versalles, Rancho de lata al interior de los macroproyectos Llanaditas, La Cruz y El Picacho, dentro del marco del proyecto cinturón verde metropolitano en la ciudad de Medellín”. Polígono de Intervención Altos de la Torre. Barrios Sostenibles. Documento Técnico de Soporte Fase de Diagnóstico. Contrato de Asociación 63 de 2014. Universidad San Buenaventura, Mayo 2014.

SGC (2015). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.

SIGA (2018). Proyecto “Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo de Detalle para los Polígonos de Barrios Sostenibles en el Municipio de Medellín”. Informe de Amenaza,



Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas Torrenciales. Contrato No: 0286 de 2014. Polígono San Antonio, Abril de 2018.

Skempton, W., (1964). Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, 14, 75-101.

Takahashi, Tamotsu (2007). *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Taylor & Francis Group, London, UK.

Taylor, D.W., (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. Wiley, New York.

Thouret, J.C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., Arguedas, A., and Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru.

Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *Journal of Geophysical Research*, 67, 4375^o-4387.

Universidad Nacional de Colombia (1997). Evaluación hidrogeológica preliminar para los municipios de El Retiro, Rionegro, La Ceja, El Carmen de Viboral, Guarne y Marinilla, Medellín.

Universidad Nacional de Colombia (2000). Investigación de aguas subterráneas en la región Valles de San Nicolás, Medellín.

Uzielli, M. (2006). Risk and Vulnerability for Geohazards – Probabilistic Estimation of Regional Vulnerability to Landslides. ICG report 2006-2-7, Oslo.

Uzielli, M., Nadim, F., Lacase, S., Kaynia, A.M. (2008). A conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides. *Engineering Geology* 102. 251-256

Van Westen C J, Terlien M T J, (1996). An Approach Towards Deterministic Landslide Hazard Analysis in GIS: A Case Study From Manizales (Colombia) [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 853 - 868.



Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Natural Hazard. Vol. 3: 63, UNESCO Press.

Vega, J. A. (2013). Estimación del riesgo por deslizamientos de laderas generados por eventos sísmicos en la ciudad de Medellín usando herramientas de la Geomática. Caso aplicado a edificaciones urbanas. La Plata - Argentina. 2012. pp51.

Vélez, M.V.; Smith, R. (1997). *Hidrología de Antioquia*.



Ward, T. J., Ruh-Ming, L. and Simons, D. B. 1982. ‘Mapping landslide hazards in forest watershed’, *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108(GT2), 3 19-324.

Whitman, R. V. (1984). Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. *Journal of Geotechnical Engineering*, 110 (2): 144-188

	<p align="center"> SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO EL FARO </p>	
---	--	---

XIE MO-wen, ZHOU G, ESAKI T, (2003).GIS Component Based 3D Landslide Hazard Assessment System: 3DSLOPEGIS. Chinese Geographical Science, Volume 13, Number 1. Science Press, Bijing China. pp 66-72.

Yamín, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D. & Ordaz, M. G. (2013). Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastres: el caso de Bogotá, Colombia. Banco Mundial, Universidad de los Andes.

	<p style="text-align: center;">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p style="text-align: center;">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p style="text-align: center;">INFORME POLIGONO EL FARO</p>	
---	---	---

23. LIMITACIONES

El presente informe se fundamenta en las condiciones del terreno encontradas durante los trabajos de exploración en campo, la información básica recopilada, y posteriormente, en los análisis efectuados.

Lo estimado son proyecciones aplicando la “buena práctica profesional”, haciendo un esfuerzo razonable en términos de recursos y de la aplicación del conocimiento para proponer soluciones a los problemas planteados. Sin embargo, la naturaleza es aleatoria en cuanto a la intensidad y frecuencia en la ocurrencia de los fenómenos, por lo que el ingeniero puede estimar más no predecir la ocurrencia de los eventos naturales que pueden afectar una obra de ingeniería.