
	<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 POLÍGONO TRECE DE NOVIEMBRE</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 TRECE DE NOVIEMBRE**

MAYO DE 2018

VERSIÓN 9

	<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 POLÍGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

CONTROL DE VERSIÓN			
Versión	Fecha	Capítulo Modificado	Descripción
0	19/05/2015	No Aplica	Documento Inicial
1	22/06/2015	Todos	Revisión general y correcciones
2	16/07/2015	Todos	Revisión general y correcciones
3	14/08/2015	Todos	Documento Final
4	30/10/2015	Todos	Revisión del documento Final
5	17/11/2015	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
6	22/02/2016	Se incluyeron mapas en tamaño carta	Revisión del documento Final
7	08/03/2016	Se cambió el formato de algunas figuras por mapas tamaño carta	Revisión del documento Final
8	30/11/2017	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud del DAP, DAGRD y SMA.	Revisión del documento Final
9	23/05/2018	Se hicieron ajustes de acuerdo con solicitud de La Interventoría con base en requerimientos del DAP, DAGRD y SMA.	Revisión del documento Final



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

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: 23/05/2018	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.....	16
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	16
4.1.1 Llenos antrópicos (Qll)	16
4.1.2 Cenizas volcánicas (Qcv).....	18
4.1.3 Depósitos aluviotorrenciales (Qat)	18
4.1.4 Depósitos de deslizamiento (Qd)	18
4.1.5 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (QFIII, NFI, NQFII)	18
4.1.6 Cuerpos asociados al Batolito Antioqueño (KcdA)	19
4.1.7 Dunitas de Medellín (JKuM)	19
4.2 GEOLOGÍA LOCAL	20
4.2.1 Llenos antrópicos (Qll)	25
4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv)	28
4.2.3 Depósitos coluviales (Qcol).....	30

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---



4.2.4	Depósito de deslizamiento (Qd)	31
4.2.5	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e)	32
4.2.6	Dunitas de Medellín (JKuM)	33
5.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	37
5.1	GEOMORFOLOGÍA REGIONAL.....	37
5.1.1	Macrounidades geomorfológicas	37
5.1.2	Unidades Geomorfológicas.....	38
5.2	GEOMORFOLOGÍA LOCAL	42
5.2.1	Unidad Peldaño Alto PÑA	46
5.2.2	Unidad Peldaño Bajo PÑB	46
5.2.3	Unidad Picacho P	46
5.2.4	Unidad Escarpe Corto Semicircular ECSC	47
5.2.5	Unidad Escarpe Largo Semicircular ELSC.....	48
5.2.6	Unidad Lomo Amplio con Vertientes Suaves LAVS	49
5.2.7	Unidad Lomo Amplio con Vertientes Moderadas-LAVM.....	49
5.2.8	Unidad Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF	50
5.2.9	Unidad Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF	51
5.2.10	Unidad Lomeríos Estrechos LRE	51
5.2.11	Unidad Superficie Antrópica SA.....	51
5.2.12	Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI	52
5.2.13	Unidad Superficies con Baja Incisión SBI	52
5.2.14	Unidad Ladera Corta Escarpada LCE.....	53
5.2.15	Unidad Vertiente Larga Moderadamente Escarpada VLME	53
5.2.16	Unidad Vertiente Corta Poco Incisada VCPI	54
5.2.17	Unidad Vertiente Escarpada VE.....	54
5.2.18	Unidad Dolinas	55

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---



5.3	MORFODINÁMICA REGIONAL	57
5.4	MORFODINÁMICA LOCAL	62
6.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	70
6.1	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	70
6.2	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL LOCAL	70
6.2.1	Orientación y buzamiento	72
6.2.2	Espaciamiento	77
6.2.3	Continuidad.....	78
6.2.4	Abertura.....	79
6.2.5	Relleno	80
6.2.6	Alteración.....	81
6.2.7	Rugosidad	82
6.2.8	Agua	83
6.2.9	Resistencia de las paredes	84
6.3	ANÁLISIS ESTRUCTURAL	85
7.	EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA.....	92
7.1	ASPECTOS GENERALES	92
7.2	MAPA DE CRITICIDAD DE ZONAS HOMOGÉNEAS.....	93
7.3	MAPA DE CRITICIDAD MORFODINÁMICA	97
7.4	MAPA DE ZONIFICACIÓN DE APTITUD GEOLÓGICA.....	99
8.	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	104

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE </p>	
---	---	---



8.1	ASPECTOS GENERALES	104
8.2	LA RECTA METEÓRICA O RECTA DE CRAIG	106
8.3	EL GRADIENTE OROGRÁFICO	110
8.4	EL GRADIENTE NULO	113
8.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	118
8.5.1	Zonas de recarga.....	118
8.5.2	Caracterización del acuífero.....	119
8.5.3	Flujo regional y flujo local.....	119
8.5.4	Zonas de descarga	119
8.6	INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA	120
8.6.1	Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN- PZ-01D.....	123
8.6.2	Piezómetros P-TN-PZ-03A a P-TN- PZ-03D.....	124
8.6.3	Análisis de la instrumentación en función del modelo propuesto.....	125
8.7	AMENAZA POR MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL	127
9.	ASPECTOS SÍSMICOS.....	131
10.	ASPECTOS GEOTÉCNICOS.....	135
10.1	SONDEOS EXPLORATORIOS	135
10.1.1	Perforaciones.....	135
10.1.2	Líneas geofísicas.....	142
10.2	ENSAYOS DE LABORATORIO	156
10.2.1	Ensayos de clasificación.....	157
10.2.2	Ensayos de resistencia al corte.....	162

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



10.3	PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE DE LOS MATERIALES.....	168
10.3.1	Aspectos generales	168
10.3.2	Lleno antrópico	168
10.3.3	Depósitos de flujo de lodos y/o escombros	170
10.3.4	Depósitos coluviales	171
10.3.5	Suelos derivados de las Dunitas (Horizontes IB y IC)	172
10.3.6	Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte.....	174
11.	ASPECTOS HIDROLÓGICOS	175
11.1	GENERALIDADES.....	175
11.2	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA.....	175
11.3	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN.....	178
11.3.1	Estación Planta Villa Hermosa.....	180
11.3.2	Estación Mazo	180
11.3.3	Estación Miguel de Aguinaga.....	181
11.4	DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS	182
11.4.1	Parámetros morfométricos de las cuencas	185
11.4.2	Usos del suelo	185
11.4.3	Tiempos de concentración	187
11.5	CAUDALES MÁXIMOS.....	188
11.5.1	Intensidades de diseño	188
11.5.2	Método Racional.....	190
11.5.3	Hidrogramas sintéticos	191
11.5.4	Regionalización de caudales	195
11.5.5	Resumen de caudales	198

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---



12.	ASPECTOS HIDRÁULICOS	200
12.1	REVISIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA	200
12.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE CAUCES	200
12.2.1	Quebrada La Arenera	201
12.2.2	Quebrada La Rafita.....	206
12.3	ANÁLISIS HIDRÁULICO EN INUNDACIONES.....	208
12.3.1	Descripción del Modelo FLO-2D	208
12.3.2	Caudales empleados en la modelación.....	209
12.3.3	Información topográfica	209
12.3.4	Tamaño de la malla	209
12.3.5	Condiciones de frontera	210
12.3.6	Condiciones iniciales	210
12.3.7	Condiciones de estabilidad numérica.....	210
12.3.8	Coeficiente de rugosidad	211
12.3.9	Estructuras hidráulicas.....	211
12.3.10	Resultados en la Quebrada La Arenera (Condiciones Actuales).....	211
12.3.11	Resultados en la Quebrada La Rafita (Condiciones Actuales)	215
13.	AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	220
13.1	METODOLOGÍA.....	220
13.1.1	Objetivo y aspectos generales	220
13.1.2	Escenarios de análisis	220
13.1.3	Cálculo de los factores de seguridad	222
13.1.4	Cálculo de la probabilidad de falla	225
13.1.5	Implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG)	227
13.1.6	Criterios para calificar la amenaza	231

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

13.2	RESULTADOS	231
14.	AMENAZA POR INUNDACIÓN.....	242
14.1	ASPECTOS GENERALES	242
14.2	METODOLOGÍA.....	242
14.3	RESULTADOS	245
15.	AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES	248
15.1	ASPECTOS GENERALES	248
15.2	AVENIDAS TORRENCIALES POR MOVIMIENTOS EN MASA	248
15.3	AVENIDAS TORRENCIALES POR REMOCIÓN Y TRANSPORTE DEL MATERIAL DEL LECHO.....	249
15.4	RESULTADOS	251
16.	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	252
16.1	ASPECTOS GENERALES	252
16.2	VULNERABILIDAD PARA MOVIMIENTOS EN MASA.....	254
16.2.1	Metodología de análisis	254
16.2.2	Calibración de la metodología.....	260
16.2.3	Levantamientos de campo y análisis de la información.....	269
16.2.4	Determinación y zonificación de la vulnerabilidad física y de personas.....	282
16.3	VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES	292

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

16.4	SOPORTE FOTOGRÁFICO	304
17.	RIESGO POR MOVIMIENTO EN MASA	310
17.1	ASPECTOS GENERALES	310
17.2	CÁLCULO DEL RIESGO	310
17.3	RESULTADOS	311
18.	RIESGO POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	318
18.1	METODOLOGÍA.....	318
18.2	RESULTADOS	318
19.	ANÁLISIS DE REDES DE SERVICIOS PÚBLICOS.....	322
19.1	CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES.....	322
19.2	SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA.....	322
19.3	ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD DE LAS REDES	326
19.3.1	Tubería en concreto no reforzado (Clase 1 y Clase 2)	326
19.3.2	Tubería en concreto reforzado (Clase I y Clase III)	326
19.3.3	Tubería en hierro dúctil (HD).....	327
19.3.4	Tubería en Policloruro de Vinilo (PVC)	327
19.3.5	Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes	327
19.4	EVALUACIÓN DEL RIESGO DE LAS REDES	327
20.	PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN	329

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

20.1	OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA	329
20.2	OBRAS PARA RIESGO POR INUNDACIONES	334
20.2.1	Análisis de resultados en condiciones actuales y definición de obras	334
20.2.2	Análisis de resultados en condiciones proyectadas	336
21.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	342
22.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	352
23.	LIMITACIONES	359

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Zonificación de la UMI Trece de Noviembre (Sin Escala)	9
Figura 2.	Parte alta de la UMI Trece de Noviembre.....	11
Figura 3.	Parte media de la UMI Trece de Noviembre.....	12
Figura 4.	Carrera 23 como límite inferior de la UMI Trece de Noviembre	14
Figura 5.	Características relevantes del drenaje La Rafita.....	15
Figura 6.	Características relevantes del drenaje La Arenera	15
Figura 7.	Localización esquemática de la exploración cercana a la Perforación P-TN-PR-05 (Sin escala)	26
Figura 8.	Concreto detectado en la Perforación P-TN-PR-05	27
Figura 9.	Velocidades de onda de corte promedio Línea Geofísica 3 (INCIGAM, 2015)	28
Figura 10.	Ceniza volcánica removilizada	29
Figura 11.	Afloramiento de cenizas volcánicas removilizadas localizadas en la parte alta de la UMI en la unidad geomorfológica denominada Peldaño Alto PÑA (Superficies Suaves)	30
Figura 12.	Afloramiento de cenizas volcánicas retrabajadas sobre camino que conduce hacia el Cerro Pan de Azúcar y al camino Prehispánico.....	30
Figura 13.	Depósitos coluviales típicos de la zona	31
Figura 14.	Depósito de deslizamiento en la parte media de la UMI	32
Figura 15.	Depósito de deslizamiento (contorno amarillo) generado por el desprendimiento de bloques de roca del escarpe en roca ubicado en la parte alta del polígono	32
Figura 16.	Evidencias de dunita cizallada en la zona de estudio	34
Figura 17.	Suelo residual de dunita con alto contenido de nódulos de hierro localizado en la parte alta de la UMI	34
Figura 18.	Horizonte IC mostrando estructura milonítica de la dunita localizada en la parte alta de UMI.....	35
Figura 19.	A. Dunita exhibiendo planos de esquistosidad y B. Horizonte IIA-exhibiendo bloques rocosos expuestos por agua de escorrentía con matriz	36



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 20.	Perfil A-A' de unidades geomorfológicas	45
Figura 21.	Perfil B-B' de unidades geomorfológicas	45
Figura 22.	Perfil C-C' de unidades geomorfológicas.....	45
Figura 23.	Perfil D-D' de unidades geomorfológicas.....	45
Figura 24.	Unidad geomorfológica de Peldaño Alto PÑA	46
Figura 25.	Unidad geomorfológica de Picacho P.....	47
Figura 26.	Unidad de Escarpe Corto Semicircular en las inmediaciones del nacimiento de la Quebrada La Rafita	48
Figura 27.	Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC localizado en la parte alta del polígono	48
Figura 28.	Unidad geomorfológica de Lomo Amplio con Vertientes Suaves LAVS.....	49
Figura 29.	Unidad geomorfológica de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM	50
Figura 30.	Unidad geomorfológica de Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF.....	50
Figura 31.	Unidad geomorfológica de Lomeríos Estrechos LRE	51
Figura 32.	Superficie Antrópica SA encontrada en las inmediaciones del Colegio Sol de Oriente sobre la Quebrada La Arenera.....	52
Figura 33.	Unidades geomorfológicas de Superficies con Baja Incisión SBI y Escarpes Largos Semicirculares ELSC.....	53
Figura 34.	Unidad geomorfológica de Vertiente Larga Moderadamente Escarpada VLME	54
Figura 35.	Unidad geomorfológica de Vertiente Corta Poco Incisada VCPI y Escarpe Largo Semicircular ELSC	54
Figura 36.	Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007).....	56
Figura 37.	Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007).....	57
Figura 38.	Distribución de los fenómenos.....	60
Figura 39.	Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos.....	60
Figura 40.	Deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987	62
Figura 41.	Deslizamiento activo comprendido dentro del deslizamiento inactivo de mayor magnitud.....	66
Figura 42.	A. Macizo rocoso con discontinuidades que favorecen su caída y B. Bloques desconfiados por erosión	66



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 43.	Frentes de roca inestables	67
Figura 44.	Bloques en superficie (A) En pendientes suaves y (B) En pendientes altas	68
Figura 45.	Inclinación de los árboles por reptación.....	68
Figura 46.	Socavación en margen izquierda de la Quebrada La Rafita	69
Figura 47.	Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	74
Figura 48.	Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades.....	74
Figura 49.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD01-U-TN, MAD08-U-TN y MAD09-U-TN	76
Figura 50.	Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD03-U-TN, MAD04-U-TN, MAD16-U-TN, y MAD01-U-TN	77
Figura 51.	Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades.....	78
Figura 52.	Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades.....	79
Figura 53.	Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades	80
Figura 54.	Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades	81
Figura 55.	Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades	82
Figura 56.	Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Gonzales de Vallejo, 2002)	83
Figura 57.	Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades	83
Figura 58.	Análisis de la característica de agua en las discontinuidades.....	84
Figura 59.	Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades.....	84
Figura 60.	Ladera analizada en parte media de la UMI Trece de Noviembre	85
Figura 61.	Análisis cinemático Sección 1 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	87
Figura 62.	Análisis cinemático Sección 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	88
Figura 63.	Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	89



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 64.	Análisis cinemático Sección 4 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo .	90
Figura 65.	Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica.....	92
Figura 66.	Localización esquemática de las unidades geomorfológicas de interés hidrogeológico (Sin escala)	105
Figura 67.	Recta Meteórica para Colombia	106
Figura 68.	Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio	108
Figura 69.	Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental ...	109
Figura 70.	Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	111
Figura 71.	Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia	112
Figura 72.	Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	112
Figura 73.	Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental	113
Figura 74.	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).....	116
Figura 75.	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.....	118
Figura 76.	Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil	122
Figura 77.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN-PZ-01D.....	124
Figura 78.	Cotas piezométricas en Piezómetros P-TN-PZ-03A a P-TN-PZ-03D.....	125
Figura 79.	Líneas equipotenciales y de flujo para la UMI del Polígono Trece de Noviembre.....	126
Figura 80.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto con intervención antrópica (Skempton, 1964)	129
Figura 81.	Representación esquemática del mecanismo de falla propuesto sin intervención antrópica (Skempton, 1964)	130



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 82.	Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área urbana de Medellín, 1999).....	131
Figura 83.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre.....	138
Figura 84.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre (Continuación).....	139
Figura 85.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre (Continuación).....	140
Figura 86.	Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre (Continuación).....	141
Figura 87.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-TN-LG-01	144
Figura 88.	Dispersión y ajuste para la Línea P-TN-LG-01	144
Figura 89.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-TN-LG-01	144
Figura 90.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-TN-LG-01	145
Figura 91.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-TN-LG-02	146
Figura 92.	Dispersión y ajuste para la Línea P-TN-LG-02	146
Figura 93.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-TN-LG-02	146
Figura 94.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-TN-LG-02.....	147
Figura 95.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-14.....	148
Figura 96.	Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-14	148
Figura 97.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14	148
Figura 98.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14	149
Figura 99.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-15.....	150
Figura 100.	Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-15	150
Figura 101.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-15	150



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 102.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-15.....	151
Figura 103.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-01	152
Figura 104.	Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-01	152
Figura 105.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01	152
Figura 106.	Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-EF-LG-01	153
Figura 107.	Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EFG-LG-10	154
Figura 108.	Dispersión y ajuste para la Línea U-EFG-LG-10.....	154
Figura 109.	Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EFG-LG-10	154
Figura 110.	Perfil de velocidad de onda de corte línea 3 (Tomado de INCIGAM, 2015)	155
Figura 111.	Velocidades de onda de corte promedio Línea 3 (INCIGAM, 2015)	155
Figura 112.	Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande.....	159
Figura 113.	Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad	159
Figura 114.	Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.	160
Figura 115.	Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad	160
Figura 116.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-05-M7 a 6.00 m de profundidad	163
Figura 117.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M5 (1) a 4.80 m de profundidad	164
Figura 118.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M5 (2) a 4.80 m de profundidad	164
Figura 119.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M7 (1) a 6.80 m de profundidad	164
Figura 120.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M7 (2) a 6.80 m de profundidad	165
Figura 121.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-04-M5 a 4.20 m de profundidad	165



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 122.	Resultados corte directo muestra UTN2-M1 (1) a 1.0 m de profundidad ...	165
Figura 123.	Resultados corte directo muestra UTN2-M1 (2) a 1.0 m de profundidad ...	166
Figura 124.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-04-M8 (1) a 7.20 m de profundidad	166
Figura 125.	Resultados corte directo muestra P-TN-PR-04-M8 (2) a 7.20 m de profundidad	166
Figura 126.	Resultados ensayo de corte directo muestra UTN3-M1 a 1.0 m de profundidad	167
Figura 127.	Resultados ensayo de corte directo muestra UTN1-M1 a 1.0 m de profundidad	167
Figura 128.	Resultados ensayo de corte directo muestra UTN4-M1 a 1.0 m de profundidad	167
Figura 129.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico	169
Figura 130.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente	170
Figura 131.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos.....	172
Figura 132.	Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas	173
Figura 133.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa.....	180
Figura 134.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo	181
Figura 135.	Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga.....	181
Figura 136.	Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)	182
Figura 137.	Canal de arranque de la Quebrada La Arenera y cruce peatonal	203
Figura 138.	Empalme de canal en piedra pegada a canal escalonado en concreto y canal escalonado trapezoidal en concreto con margen derecha descubierta.....	203
Figura 139.	Terminación en llave de canal trapezoidal y cruce sobre Quebrada La Arenera	203
Figura 140.	Invasión de viviendas al cauce de la Quebrada La Arenera	204
Figura 141.	Box Culvert aguas arriba.....	207



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 142.	Box Culvert aguas abajo	207
Figura 143.	Condiciones generales parte central	208
Figura 144.	Tramo final zona de estudio	208
Figura 145.	Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar, Taylor (1948).....	223
Figura 146.	Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa	230
Figura 147.	Esquema de localización en planta de la sección analizada.....	240
Figura 148.	Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Chorrera	241
Figura 149.	Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo (Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003).....	243
Figura 150.	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)	244
Figura 151.	Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes lo largo de la Quebrada La Rafita.....	251
Figura 152.	Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa	255
Figura 153.	Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables.....	259
Figura 154.	Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa	260
Figura 155.	Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo...	261
Figura 156.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías	262
Figura 157.	Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973.....	263
Figura 158.	Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	265
Figura 159.	Comparación entre mapa de factor de intensidad (z) y derrame del deslizamiento Villatina como forma de validación de la metodología de estudio	268

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Figura 160. Zonificación de la vulnerabilidad en el Trece de Noviembre	271
Figura 161. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras	286
Figura 162. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones	294
Figura 163. Clasificación del riesgo para inundaciones según el grado de amenaza y de vulnerabilidad	318
Figura 164. Tubería de inclinómetros ranurada diametralmente.....	332
Figura 165. Disposición de los Sentidos A y B en los inclinómetros	333
Figura 166. Localización de inclinómetros propuestos para monitoreo de obras de mitigación del Polígono Trece de Noviembre	334
Figura 167. Estructura general de la información entregada	351

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rangos de pendientes para definición de la geomorfología local	42
Tabla 2.	Cantidad de fenómenos que ocurren en cada uno de los barrios que se encuentran al interior y cerca del Proyecto Barrios Sostenibles	59
Tabla 3.	Registro de los principales fenómenos ocurridos alrededor de la zona de estudio	61
Tabla 4.	Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor	62
Tabla 5.	Colores definidos para los procesos según año	65
Tabla 6.	Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio Microzonificación, 2006	70
Tabla 7.	Distribución de los datos tomados en las estaciones geomecánicas de campo	73
Tabla 8.	Familias de discontinuidades considerando todos los datos levantados en campo	73
Tabla 9.	Descripción del espaciamiento de las discontinuidades	78
Tabla 10.	Descripción de la continuidad de las discontinuidades	79
Tabla 11.	Descripción de la abertura de las discontinuidades	80
Tabla 12.	Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas.....	86
Tabla 13.	Resumen resultados análisis cinemático	91
Tabla 14.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas	93
Tabla 15.	Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas	94
Tabla 16.	Contenido isotópico en agua lluvia en las muestras tomadas como parte de este estudio.....	108
Tabla 17.	Contenido isotópico en muestras de manantiales tomadas como parte de este estudio de la ladera nororiental del Valle de Aburrá.....	109
Tabla 18.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá	110
Tabla 19.	Contenido isotópico en manantiales y quebradas de las laderas de los Valles de Aburrá y San Nicolás.....	113



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 20.	Perfiles de suelo típicos característicos de la Zona Homogénea 10	133
Tabla 21.	Coeficientes espectrales para los sismos de control de daño y diseños	134
Tabla 22.	Exploración geotécnica utilizada en la UMI Trece de Noviembre	137
Tabla 23.	Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI Trece de Noviembre	143
Tabla 24.	Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio	157
Tabla 25.	Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas	158
Tabla 26.	Resultados ensayos de corte directo modalidad CD	163
Tabla 27.	Parámetros de resistencia al cortante con sus respectivos análisis variacionales	174
Tabla 28.	Estaciones pluviográficas en la zona que son operadas por EPM (EPM, 2005) y precipitación total anual	178
Tabla 29.	Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca	185
Tabla 30.	Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en Trece de Noviembre	185
Tabla 31.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en Trece de Noviembre	187
Tabla 32.	Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración	188
Tabla 33.	Tiempos de concentración calculados para las cuencas	188
Tabla 34.	Valores de Parámetros C, H y M para curvas IDF de estaciones EPM (2005)	189
Tabla 35.	Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca	189
Tabla 36.	Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca	190
Tabla 37.	Coordenadas para los puntos de salida de las cuencas consideradas en la regionalización	196
Tabla 38.	Resultados de regionalización de caudales máximos	198
Tabla 39.	Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años	198
Tabla 40.	Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años	198
Tabla 41.	Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años	198
Tabla 42.	Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años	199
Tabla 43.	Coordenadas y características de los pasos peatonales o puentes sobre la Quebrada La Arenera en la zona de estudio	206



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 44.	Resumen de estructuras hidráulicas Quebrada La Arenera	206
Tabla 45.	Resumen de estructuras hidráulicas Quebrada La Rafita.....	207
Tabla 46.	Verificación de las condiciones hidráulicas de los pasos peatonales o puentes en la Quebrada La Arenera para un Tr=100 años. Condiciones Actuales	212
Tabla 47.	Qda. La Arenera: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del canal trapezoidal. Condiciones actuales.	213
Tabla 48.	Qda. La Arenera: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del Cauce Natural. Condiciones actuales.	215
Tabla 49.	Qda. La Rafita: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del Cauce Natural aguas arriba de la Carrera 17ª. Condiciones actuales.....	216
Tabla 50.	Qda. La Rafita: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del Cauce Natural aguas abajo de la Carrera 17A. Condiciones actuales.	217
Tabla 51.	Nivel de amenaza según los valores del factor de seguridad	231
Tabla 52.	Nivel de amenaza considerando la probabilidad de ruptura en 50 años	231
Tabla 53.	Asignación de la calificación de la Probabilidad de Inundaciones.....	243
Tabla 54.	Asignación de la calificación de la Intensidad de Inundaciones	243
Tabla 55.	Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono Trece de Noviembre.....	250
Tabla 56.	Clasificación de velocidad de fenómenos (Cruden & Varnes, 1996).....	256
Tabla 57.	Factor por tipo de estructura.....	257
Tabla 58.	Factor por altura de la estructura.....	257
Tabla 59.	Factor de estado de la estructura	258
Tabla 60.	Tipo de ocupación – Movimiento en Masa.....	274
Tabla 61.	Tipo de estructura – Movimiento en Masa	274
Tabla 62.	Estado de la estructura – Movimiento en Masa	274
Tabla 63.	Alturas de las estructuras – Movimiento en Masa.....	275
Tabla 64.	Tipo de cubierta – Movimiento en Masa	275
Tabla 65.	Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa	282





	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---



Tabla 66.	Categorización de la vulnerabilidad de las personas ante fenómenos de movimientos en masa	287
Tabla 67.	Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Trece de Noviembre	289
Tabla 68.	Factor de vulnerabilidad por Calidad de la Edificación para Inundaciones y Avenidas Torrenciales	292
Tabla 69.	Cálculo Índice de Vulnerabilidad Residencial (RvI) y la Vulnerabilidad Física a partir de BuV	293
Tabla 70.	Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	295
Tabla 71.	Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	295
Tabla 72.	Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales	296
Tabla 73.	Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales.....	296
Tabla 74.	Registro fotográfico en el Trece de Noviembre.....	304
Tabla 75.	Matriz de unificación del riesgo de estructuras y de personas para determinar el riesgo total.....	315
Tabla 76.	Categorización del riesgo total	315
Tabla 77.	Inventario de las estructuras en alto riesgo No Mitigable por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre.....	317

LISTA DE MAPAS



Mapa 1.	Localización general de los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles	6
Mapa 2.	UMI asociada al Polígono Trece de Noviembre.....	8
Mapa 3.	Usos generales del suelo rural UMI Trece de Noviembre (POT, 2014)	10
Mapa 4.	Usos generales del suelo urbano (POT, 2014)	13
Mapa 5.	Geología regional (Consorcio Microzonificación, 2006)	17
Mapa 6.	Geología local de UMI Trece de Noviembre	22
Mapa 7.	Perfil estratigráfico de la UMI Trece de Noviembre.....	23
Mapa 8.	Perfiles estratigráficos de la UMI Trece de Noviembre	24
Mapa 9.	Bloques o macrounidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	40
Mapa 10.	Unidades geomorfológicas de la zona de estudio.....	41
Mapa 11.	Análisis de pendientes de la UMI Trece de Noviembre.....	43
Mapa 12.	Unidades Geomorfológicas de la UMI Trece de Noviembre	44
Mapa 13.	Procesos morfodinámicos de UMI Trece de Noviembre	64
Mapa 14.	Estructuras encontradas en la UMI Trece de Noviembre.....	71
Mapa 15.	Criticidad geomorfológica UMI Trece de Noviembre.....	95
Mapa 16.	Criticidad de zonas homogéneas UMI Trece de Noviembre	96
Mapa 17.	Criticidad morfodinámica UMI Trece de Noviembre.....	98
Mapa 18.	Aptitud Geológica UMI Trece de Noviembre.....	101
Mapa 19.	Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)	102
Mapa 20.	Clasificación del suelo (POT, 2014).....	103
Mapa 21.	Localización en planta de los piezómetros de hilo vibrátil.....	121
Mapa 22.	Localización de la exploración directa e indirecta	136
Mapa 23.	Información cartográfica empleada en el estudio.....	177
Mapa 24.	Estaciones pluviográficas operadas por EPM 2005.....	179
Mapa 25.	Red hídrica en la UMI Trece de Noviembre.....	183

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---



Mapa 26.	Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI Trece de Noviembre	184
Mapa 27.	Usos del suelo en las cuencas de influencia en la UMI Trece de Noviembre	186
Mapa 28.	Cuencas consideradas en el método de regionalización	197
Mapa 29.	Localización obras en el cauce de la Quebrada La Arenera	202
Mapa 30.	Localización de los pasos peatonales o puentes sobre la quebrada la Arenera en la zona de estudio.....	205
Mapa 31.	Qda. La Arenera: resultados Inundación Tramo Cauce Natural en condiciones actuales	214
Mapa 32.	Qda. La Rafita: resultados Inundación Tramo Estructura 1 y Cauce Natural (TR100) en condiciones actuales	218
Mapa 33.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales.Polígono Trece de Noviembre.	219
Mapa 34.	Análisis del factor de seguridad de la UMI Trece de Noviembre en condiciones estáticas	234
Mapa 35.	Análisis del factor de seguridad de la UMI Trece de Noviembre en condiciones pseudo-estáticas con sismo de 0.25g	235
Mapa 36.	Análisis de probabilidad de falla de la UMI Trece de Noviembre en condiciones actuales y naturales.....	236
Mapa 37.	Análisis de probabilidad de falla de la UMI Trece de Noviembre en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años	237
Mapa 38.	Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI Trece de Noviembre en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g.....	238
Mapa 39.	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	239
Mapa 40.	Amenaza por inundaciones para condiciones actuales en las Quebradas La Arenera y La Rafita del Polígono Trece de Noviembre	246
Mapa 41.	Superposición de Vias de Acceso y Equipamientos sobre la amenaza por inundaciones	247
Mapa 42.	Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)	264

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Mapa 43.	Localización vías de acceso y equipamiento en el Polígono Trece de Noviembre.....	272
Mapa 44.	Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre	276
Mapa 45.	Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre	277
Mapa 46.	Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre	278
Mapa 47.	Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre	279
Mapa 48.	Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre	280
Mapa 49.	Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa	281
Mapa 50.	Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono Trece de Noviembre.....	283
Mapa 51.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre	284
Mapa 52.	Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso y equipamientos en el Polígono Trece de Noviembre.....	285
Mapa 53.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre	288
Mapa 54.	Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono Trece de Noviembre por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	290
Mapa 55.	Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Trece de Noviembre por movimientos en masa con el nuevo proyecto nuevo Proyecto Barrios Sostenibles	291
Mapa 56.	Localización espacial del tipo de estructura para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre	297
Mapa 57.	Localización espacial del estado de la estructura para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre	298
Mapa 58.	Localización espacial de la altura de las estructura para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre	299



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Mapa 59.	Localización espacial de la densidad de población para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre	300
Mapa 60.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en condiciones en el Polígono Trece de Noviembre	301
Mapa 61.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles.....	302
Mapa 62.	Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre para las Vías de Acceso y Equipamientos.....	303
Mapa 63.	Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre	312
Mapa 64.	Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre	313
Mapa 65.	Análisis de riesgo estructural de vías de acceso y equipamientos por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre	314
Mapa 66.	Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono Trece de Noviembre .	316
Mapa 67.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Trece de Noviembre para las viviendas y construcciones	320
Mapa 68.	Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Trece de Noviembre para las vías de acceso y equipamientos	321
Mapa 69.	Redes de servicios públicos sobre mapa de 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.....	323
Mapa 70.	Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por inundaciones.	325
Mapa 71.	Análisis de riesgo total por movimientos en masa para las condiciones proyectadas.....	331
Mapa 72.	Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas del Polígono Trece de Noviembre	338
Mapa 73.	Análisis de amenaza por inundaciones para condiciones proyectadas en las Quebradas La Arenera y La Rafita del Polígono Trece de Noviembre.....	339
Mapa 74.	Análisis de riesgo por inundaciones para las condiciones proyectadas	340
Mapa 75.	Retiro POT y retiro hidrológico para la quebrada La Arenera	341

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

LISTA DE MAPAS DEL ATLAS

- 01_TDNLocalizacionGeneral_Medellin_T
- 02_TDNLocalizacionUMI_Medellin_T
- 03_TDNGeomorfologiaRegional_Medellin_T
- 04_TDNGeologiaLocalUMI_Medellin_T
- 05_TDNPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 06_TDNPerfilesGeologicos_Medellin_T
- 07_TDNMacroUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 08_TDNUnidadesGeomorfologicas_Medellin_T
- 09_TDNPendientes_Medellin_T
- 10_TDNGeomorfologiaLocal_Medellin_T
- 11_TDNProcesosMorfodinamicos_Medellin_T
- 12_TDNGeologiaEstructural_Medellin_T
- 13_TDNExploracion_Medellin_T
- 14_TDNClasificaciondelSuelo_Medellin_T
- 15_TDNCategoriasSueloProteccionProduccionySuburbano_Medellin_T
- 16_TDNUsosdelSueloUrbano_Medellin_T
- 17_TDNUsosdelSueloRural_Medellin_T
- 18_TDNAptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T
- 19_TDNAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_T
- 20_TDNRedHidricaUMI_Medellin_T
- 21_TDNManchaInundaciones_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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

22_TDNManchaInundacionesCondProyecto_Medellin_T

23_TDNAmenazasInundaciones_Medellin_T

24_TDNAmenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_T

25_TDNTipodeEstructura_Medellin_T

26_TDNDesplantedeFundaciones_Medellin_T

27_TDNEstadodelaEstructura_Medellin_T

28_TDNTipodeCubierta_Medellin_T

29_TDNAAlturadelaConstruccion_Medellin_T

30_TDNMapadeResistencia_Medellin_T

31_TDNTipodeEstructura_Medellin_T

32_TDNEstadodelaEstructura_Medellin_T

33_TDNAAlturadelaConstruccion_Medellin_T

34_TDNDensidaddePoblacion_Medellin_T

35_TDNViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_T

36_TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T

37_TDNVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T

38_TDNVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T

39_TDNRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T



40_TDNRiesgoPersonasMovimientosenMasa_Medellin_T

41_TDNRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_T

42_TDNRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T

43_TDNRiesgoInundaciones_Medellin_T

44_TDNRiesgoInundacionesCondProyecto_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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

45_TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T

46_TDNVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T



47_TDNRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T

48_TDNRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T

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



LISTA DE PLANOS

P-2445-TN-OM-01	Pantallas de pilas, planta y perfil
P-2445-TN-OM-02	Pantallas de pilas, detalles
P-2445-TN-OM-03	Barrera Dinámica
P-2445-TN-OM-04	Obras Hidráulicas, planta, perfil y detalles
P-2445-TN-OM-05	Obras Hidráulicas, detalles

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</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 Trece de Noviembre. 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 Trece de Noviembre, 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 10 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 Barrio Sostenibles, ha permitido una depuración y perfeccionamiento de la metodología. Los resultados que finalmente deben tenerse en cuenta son los de esta Versión 10 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 metodología 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. Es importante aclarar en este punto que pese a las modificaciones efectuadas en esta Versión 10 del estudio del Polígono Trece de Noviembre, las obras de mitigación recomendadas en las versiones anteriores siguen siendo las necesarias para atender el nivel de riesgo obtenido.

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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, 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 nuevas 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, concentrándose uno de los primeros capítulos de este informe en los criterios para su definición y en la asignación de sus principales características.

De acuerdo con lo descrito hasta el momento 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 los polígonos del Proyecto Barrios Sostenibles y en este caso en particular el del Polígono Trece de Noviembre.

- ✓ 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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.

El análisis del riesgo integra 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 11 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 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.

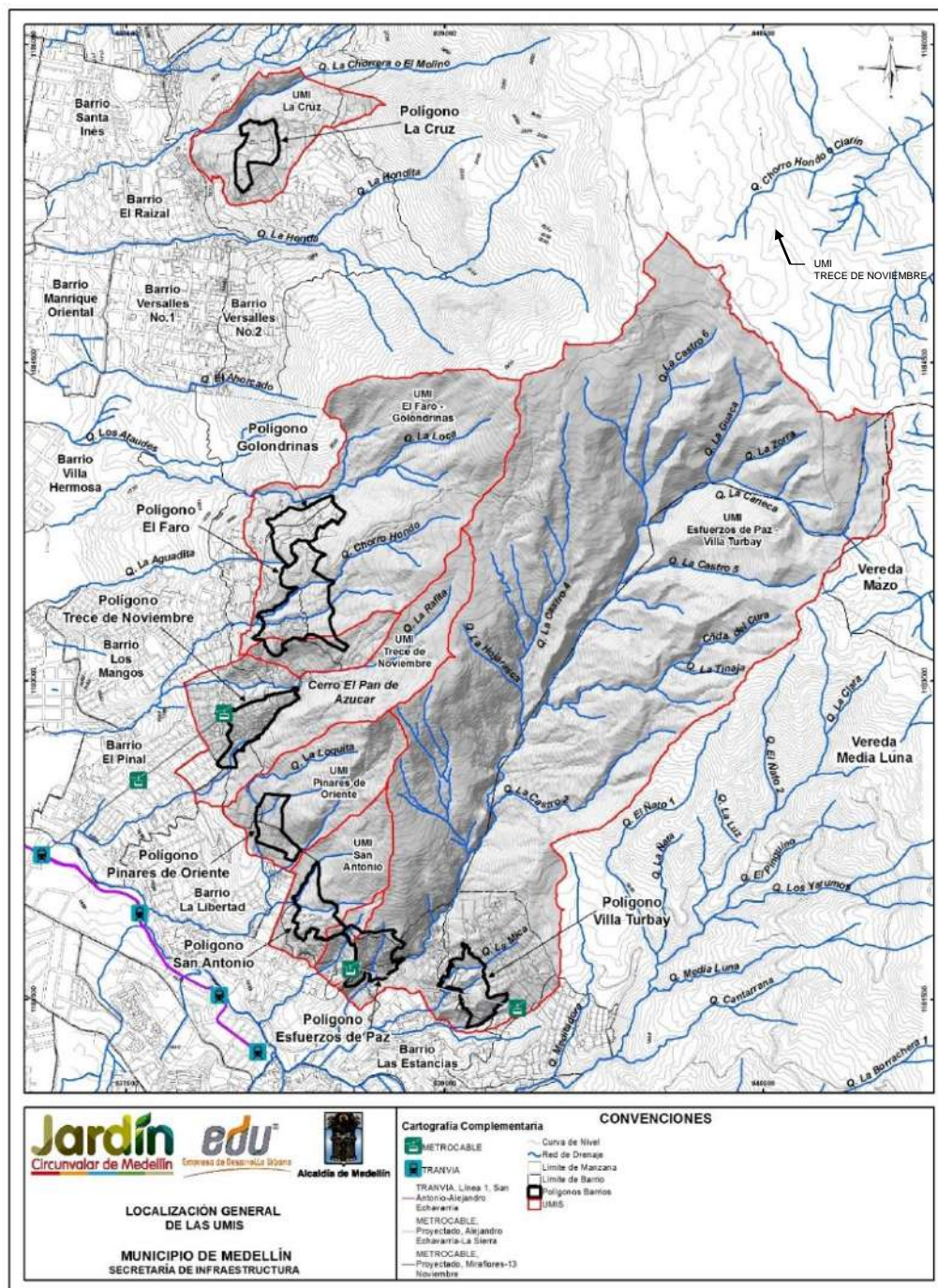
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

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 al interior de diferentes barrios en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique).

Los polígonos localizados al interior de la Comuna 8 son los ubicados dentro de 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 ubicado dentro del 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 Trece de Noviembre, objeto principal de este estudio, cuenta con un área total aproximada de 5.15 hectáreas y está delimitado en el noroccidente por la Calle 56FB desde la Carrera 23 hasta la Carrera 19, de la Carrera 56FC hasta la futura estación del Metrocable y por la Calle 56H hasta El Plan. El límite suroriental está definido por el cauce de la Quebrada La Arenera. El polígono de intervención incluye los sectores conocidos en la zona como La Arenera-Tres Esquinas y El Plan.



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

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

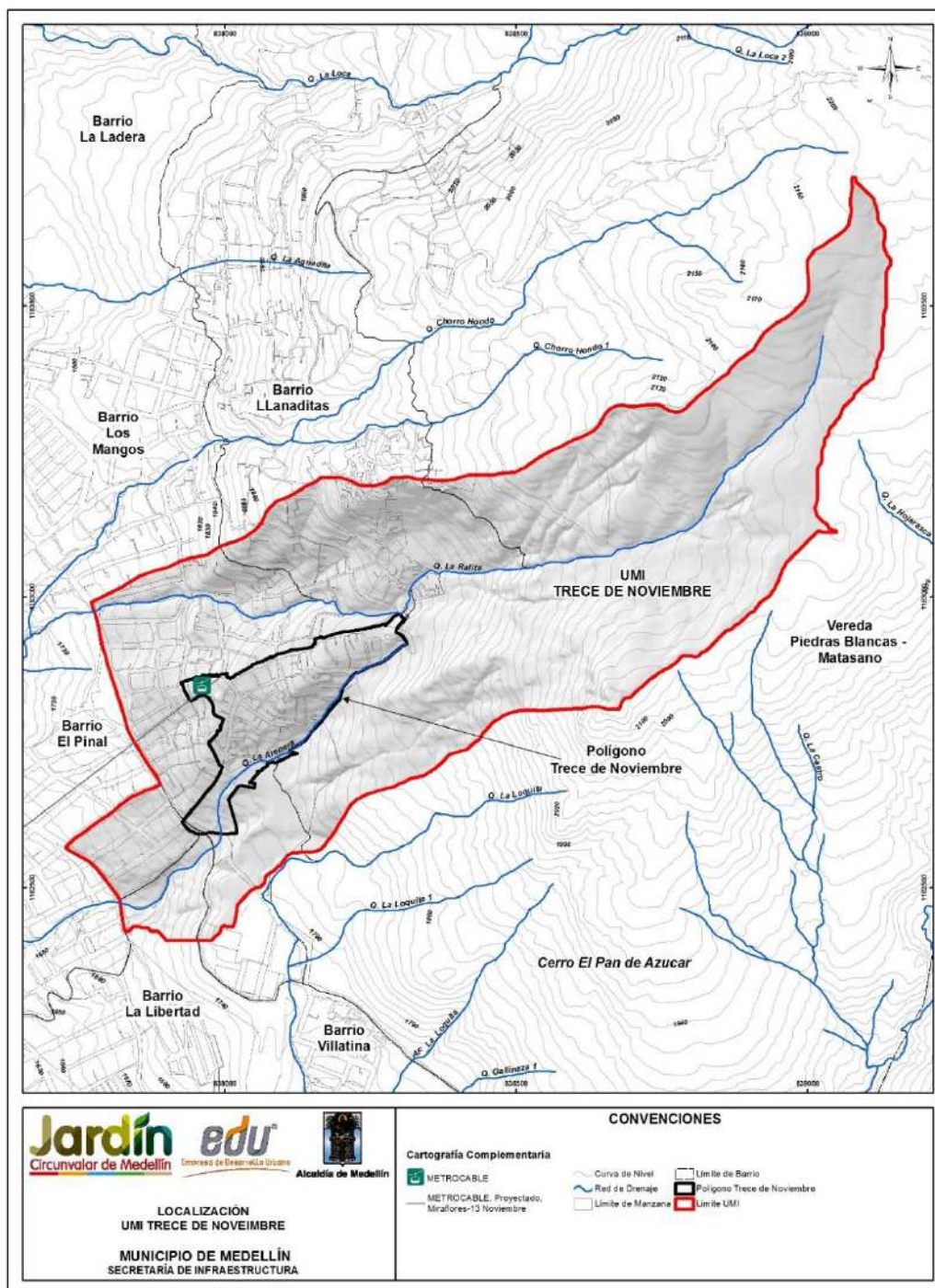
Se trata de un concepto de obligatorio cumplimiento para estudios de nuevos proyectos en las zonas de ladera del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, el cual es tratado de forma detallada en el conocido como Código de Laderas del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012). Según dicho código, 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 cada polígono de estudio dentro del Proyecto Barrios Sostenibles, específicamente la del Polígono Trece de Noviembre localizado la Comuna 8. Siguiendo los lineamientos del que se denominará en este informe como Código de Laderas del Valle de Aburrá (AMVA, 2012), 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 morfodinámico, potencial o existente pudiera afectar las estructuras programadas, bien fuera porque las impactara directamente o porque a través de las corrientes de agua pudiera llegar hasta la zona del proyecto.

La suma de todas las UMI de la Comuna 8 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.

En el Mapa 2 se presenta la UMI asociada al Polígono Trece de Noviembre, el cual tiene un área aproximada de 65 hectáreas. Esta UMI se localiza hacia el norte de la Comuna 8, entre las UMI definidas para los Barrios El Faro y Golondrinas al Norte y Pinares de Oriente al Sur.

En el numeral que sigue de este capítulo, se hace referencia a la UMI correspondiente al polígono ubicado dentro del Barrio Trece de Noviembre, la cual se seguirá denominando en este informe como UMI Trece de Noviembre o simplemente como la UMI. También se hará referencia al Polígono Trece de Noviembre, correspondiente al polígono objeto de estudio localizado en el barrio con el mismo nombre.



Mapa 2. UMI asociada al Polígono Trece de Noviembre
(02_TDNLocalizacionUMI_Medellin_C y 02_TDNLocalizacionUMI_Medellin_T)

3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

En la Figura 1 se presenta la UMI definida para el Polígono Trece de Noviembre, destacándose la división de la misma en tres zonas diferentes, delimitadas de acuerdo con sus pendientes, usos del suelo y condiciones de actividad morfodinámica. Se trata de la zona alta, la media y la baja, de las cuales se hablará con mayor detalle a continuación. Además se incluyen fotografías de cada una de estas zonas de interés, algunas de las cuales fueron tomadas durante los recorridos de campo efectuados por el personal del proyecto.

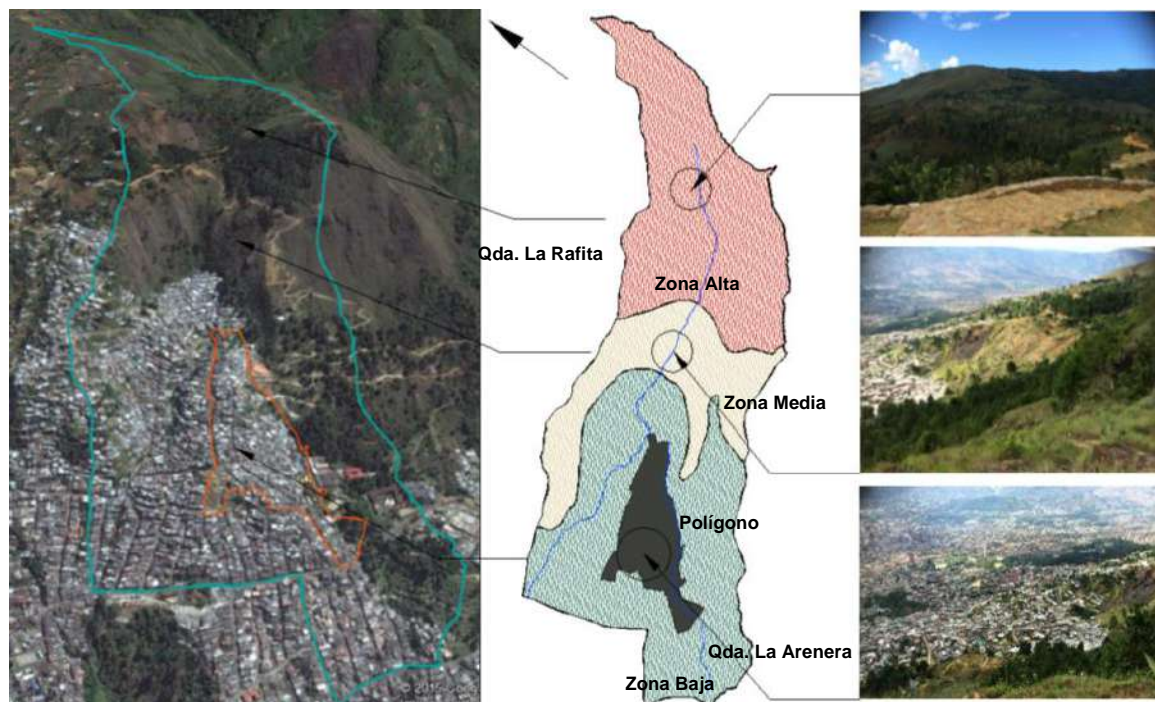
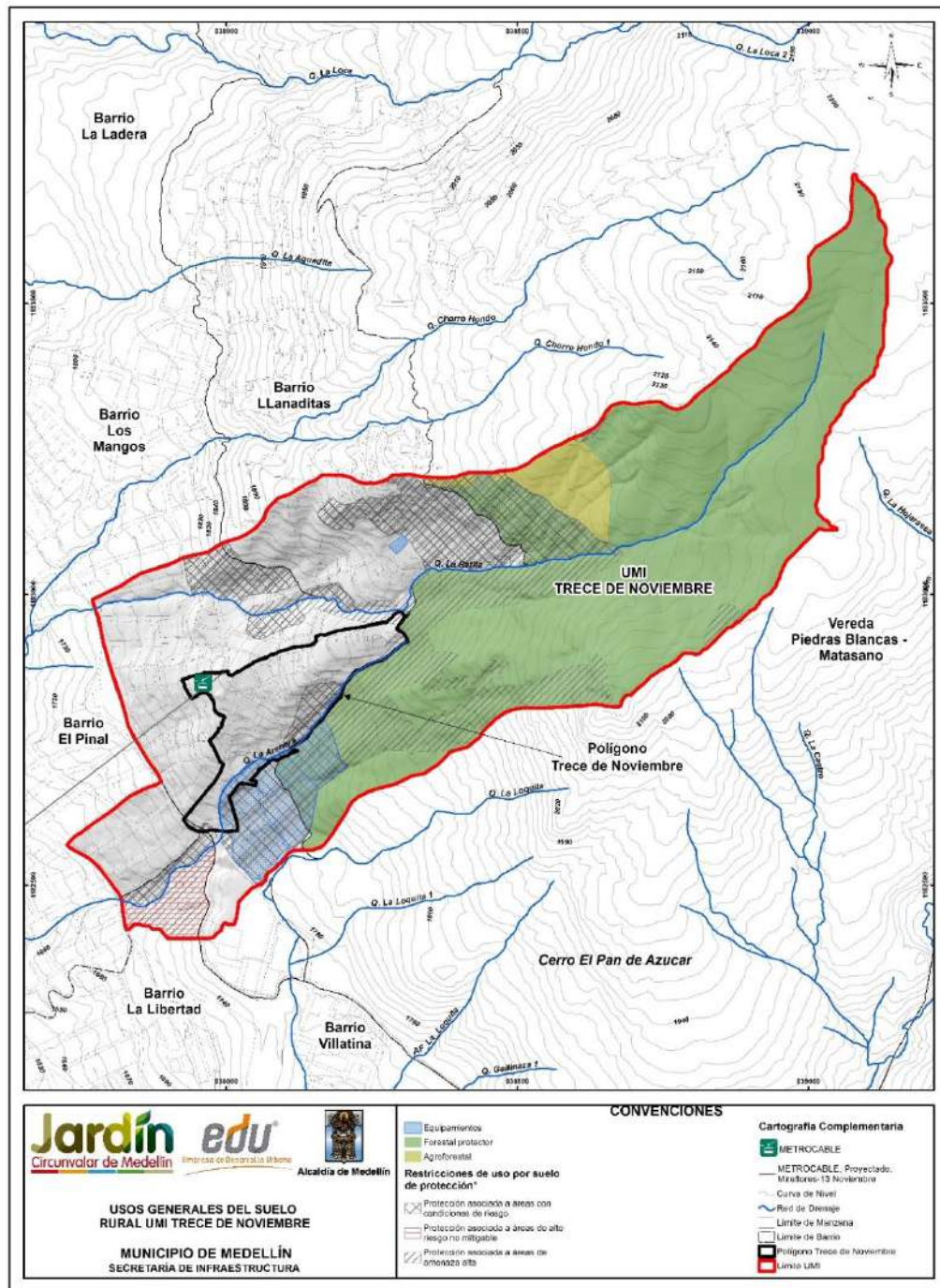


Figura 1. Zonificación de la UMI Trece de Noviembre (Sin Escala)

La zona alta pertenece a la parte rural, cuyo principal uso del suelo es agrícola y turismo ecológico y se encuentra dentro de la zona “forestal protector” (Mapa 3). Esta zona se destaca por corresponder a un terreno de pendientes suaves, no mayores que 30°, en el cual no se evidencia una actividad morfodinámica importante. Así las cosas, aunque se trata de un área sin mayores problemas de estabilidad, se tomó como parte de la UMI porque allí se encuentra el nacimiento de la cuenca de la Quebrada La Rafita, de manera que desde el punto de vista hidrológico e hidráulico se consideró necesario evaluar la influencia que este drenaje podría presentar en el polígono de interés por posibles fenómenos de inundación o avenidas torrenciales a través de su cauce. En la Figura 2 se presentan algunas imágenes de la zona alta de la UMI de interés.



Mapa 3. Usos generales del suelo rural UMI Trece de Noviembre (POT, 2014)
(17_TDUsosdelSueloRural_Medellin_C y 17_TDUsosdelSueloRural_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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---



Flanco Sur





Flanco Central



Flanco Izquierdo

Figura 2. Parte alta de la UMI Trece de Noviembre

La zona media, se caracteriza por ser un área con pendiente muy alta, que supera los 30°, completamente desprovista de vegetación, de mayor actividad morfodinámica y sin ningún tipo de urbanismo, excepto en la parte más baja, donde se tienen algunas viviendas. La presencia de una cárcava inactiva en su interior es la responsable del contraste de pendiente que existe en esta zona comparada con las otras dos. Se dan en su interior predominantemente afloramientos rocosos. Hacia el flanco norte se logran observar algunos procesos morfodinámicos superficiales, mientras que hacia el flanco sur hay una mayor cantidad de procesos asociados con el desprendimiento de bloques. Las condiciones de estabilidad mencionadas para esta área fueron entonces la razón fundamental que se tuvo en cuenta para incluirla dentro de la UMI. En la Figura 3 se presentan algunas imágenes de esta porción de la UMI de interés.

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



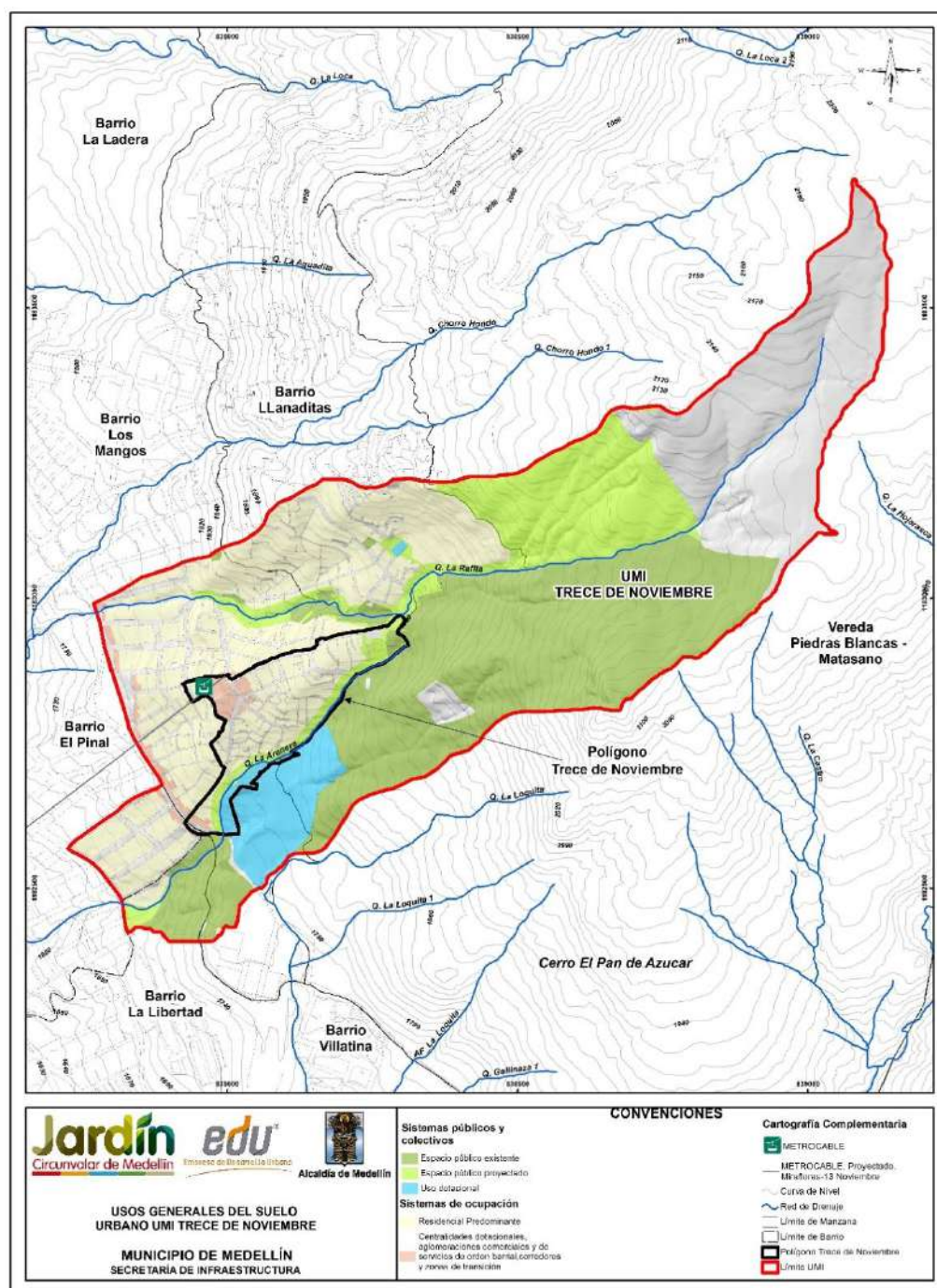
Flanco Norte





Flanco Norte y Central

Figura 3. Parte media de la UMI Trece de Noviembre

Finalmente, en la zona baja se encuentra el área urbana y es donde se localiza el Polígono Trece de Noviembre. Con base en el Mapa 4, el uso del suelo muestra un significativo urbanismo, donde aproximadamente el 80% del área se encuentra ocupada por viviendas, incluso, parte de ese urbanismo se concentra en las zonas de los drenajes que atraviesan los mismos. Se identifican algunos procesos morfodinámicos importantes, principalmente hacia el costado sur, en el límite con el Polígono Pinares de Oriente, tratándose de fenómenos tipo reptación. Los problemas más relevantes en términos de actividad morfodinámica se concentran en el límite entre la zona baja y la zona media, donde por efectos del cambio de pendiente y el urbanismo en zona de ladera ha provocado pequeños procesos de inestabilidad.



Mapa 4. Usos generales del suelo urbano (POT, 2014)
(16_TDNUsosdelSueloUrbano_Medellin_C y 16_TDNUsosdelSueloUrbano_Medellin_T)

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

La parte más baja de la UMI Trece de Noviembre finaliza sobre la Carrera 23, la cual es la vía principal y de acceso al polígono objeto de estudio (Figura 4). Esta vía se considera en condiciones estables y no evidencia problemas sobre su estructura, lo cual la hace un límite adecuado para la UMI. Se observa entonces que la denominada parte baja comprende zonas por debajo del Polígono Trece de Noviembre hasta la Carrera 23. Con esta extensión de la UMI por debajo del perímetro del polígono y hasta la Carrera 23, se pretende evaluar la amenaza por movimientos en masa y determinar posibles zonas afectadas por desconfinamiento cerca de las zonas perimetrales al polígono.



Figura 4. Carrera 23 como límite inferior de la UMI Trece de Noviembre

Desde los puntos de vista hidrológico e hidráulico, la UMI abarca las divisorias de las Quebradas La Rafita al norte y La Arenera al sur, habiéndose tomado la totalidad de la cuenca que los conforma. En la parte baja aparece el drenaje La Arenera hacia el borde sur del polígono y el drenaje de la Quebrada La Rafita se encuentra en el extremo opuesto con una dirección noroccidental alejándose del polígono de estudio.

El drenaje La Rafita desciende de la zona media sobre el terreno natural y justo en el límite con el polígono se encuentran dos estructuras tipo box culvert que lo canalizan (Figura 5), las cuales deben ser analizadas y verificadas hidráulicamente ya que pueden ser potencialmente causantes de inundaciones. Saliendo de dicho box culvert, la Quebrada La Rafita continua drenando sobre el terreno sin la presencia de ninguna estructura de canalización. A pesar de que se aleja paulatinamente del polígono en la medida que desciende, en la parte superior se encuentra muy cerca con un fuerte nivel de urbanismo, el cual ha provocado ligeras modificaciones antrópicas del drenaje y la manifestación de procesos sobre la margen izquierda, por lo que en este drenaje se deben evaluar los procesos por socavación potenciales (Figura 5).

El drenaje La Arenera desciende por el centro de la zona baja y actualmente se encuentra totalmente canalizado mediante un canal trapezoidal en concreto hasta cuándo se encuentra con el Colegio Sol de Oriente. En este punto cruza la zona a través de una cobertura lateral al colegio y pasa debajo de unos juegos infantiles donde las condiciones del terreno proyectan una actividad antrópica importante, evidenciado en la presencia de

llenos de gran espesor. Se debe hacer entonces la verificación hidráulica de esta estructura, la cual podría ser potencialmente causante de inundaciones.





Figura 5. Características relevantes del drenaje La Rafita



Figura 6. Características relevantes del drenaje La Arenera

En resumen, la UMI Trece de Noviembre está siendo limitada en la parte inferior por el límite físico correspondiente a la Carrera 23, vía principal de acceso a la zona de estudio y cuyas condiciones se consideran estables. Los límites laterales de la UMI, principalmente en la zona baja, coinciden con las divisorias de aguas de las quebradas La Rafita al norte y La Arenera al sur, áreas que deben ser consideradas teniendo presente que hacen parte del aporte hidrológico a los drenajes. Hacia la parte media, los límites involucran la actividad morfodinámica de la zona, considerando los procesos que se direccionan hacia el polígono. Finalmente, la UMI cierra en la zona alta con el nacimiento de la Quebrada La Rafita la cual debe ser considerada por efectos hidrológicos e hidráulicos para este drenaje.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 por 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, donde se observa que la UMI Trece de Noviembre se ubica sobre las unidades geológicas denominadas como Dunitas de Medellín (JKuM) y depósitos de flujos de lodos y/o escombros (NQFII).

A continuación, se describen en orden cronológico todas las unidades, 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.



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 (Consorcio 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 (Consorcio 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 (Consorcio 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 (Consorcio 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 (Consorcio Microzonificación, 2006).

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Están constituidos por flujos de varias generaciones, los cuales le confieren a los suelos un carácter viscoso, 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 que condice de Santa Elena a 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 Aburrá, 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 condiciones geotécnicas muy pobres 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 INCIGAM (2015), DEACIVIL (2014), TECNISUELOS (2013), TECNISUELOS - ICC (2010), INGEOCILCÓN (2009). En el Numeral 10.1.1 se presenta la información sobre 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”.

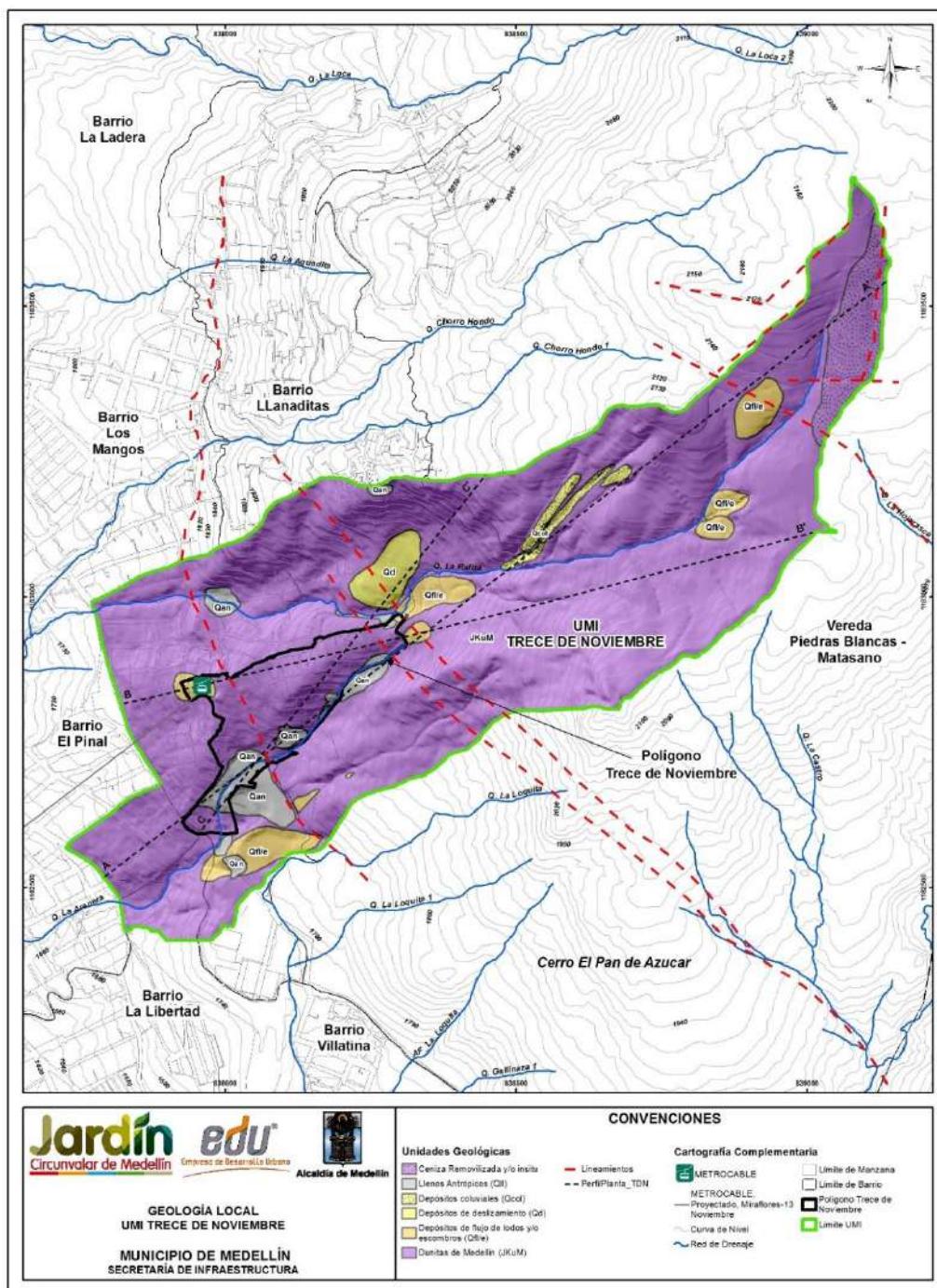
Después de correlacionar dichas perforaciones con la exploración directa e indirecta ejecutada para el presente estudio, de realizar los recorridos de campo y de utilizar herramientas como análisis multitemporal y geomorfológico, se obtuvo como resultado el

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

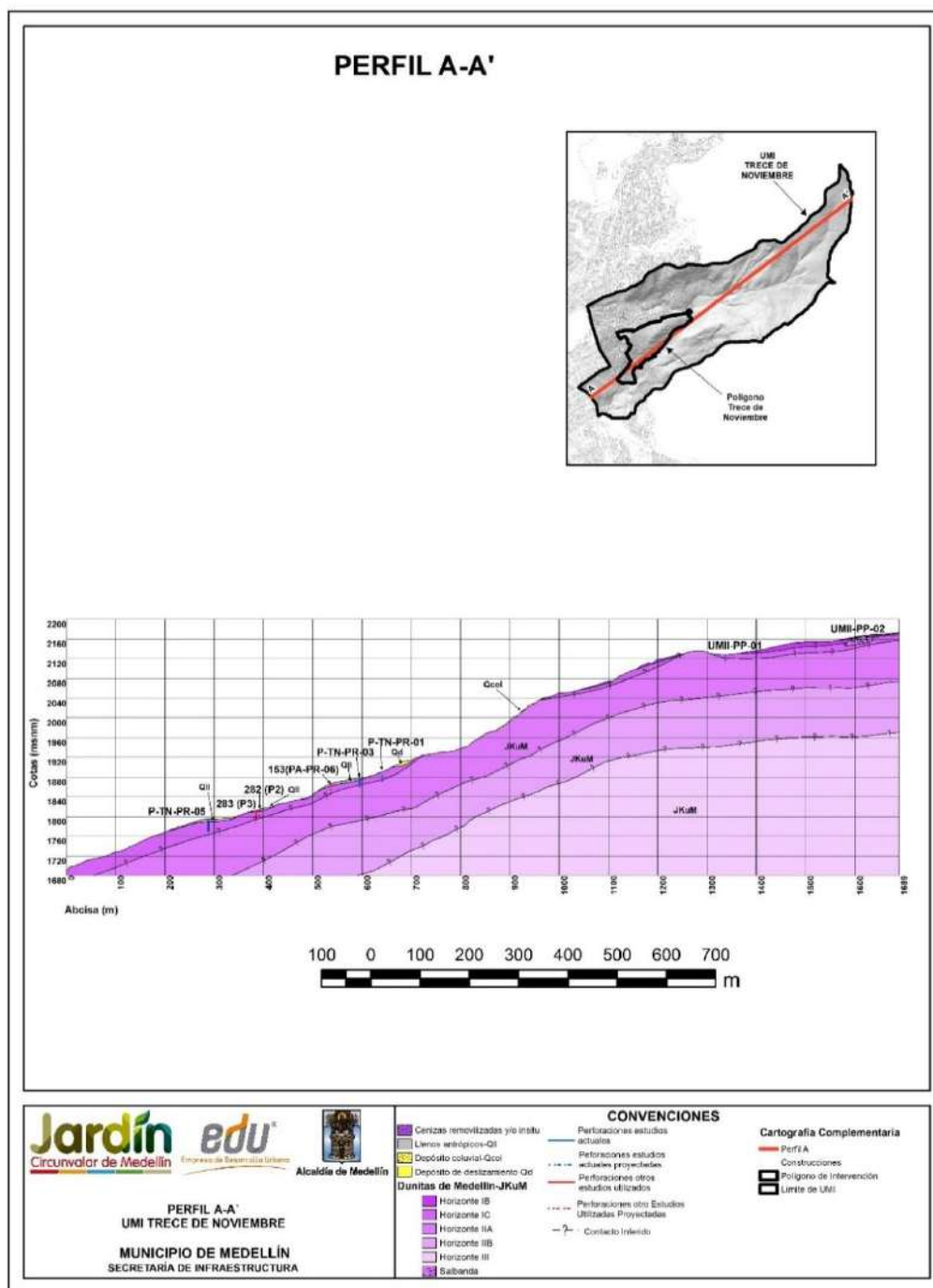
modelo geológico de la UMI San Antonio mostrado en planta (Mapa 6). Se puede observar que la unidad geológica predominante corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas (Qcv), depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos coluviales. Además, se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

En el Mapa 7 y en el Mapa 8 se presentan los perfil geológicos Perfil A-A', Perfil B-B' y Perfil C-C' determinados con base en la exploración disponible para la zona de estudio y el reconocimiento de campo. Se presentan los llenos antrópicos, los depósitos aluviotorrenciales, los depósitos de deslizamiento, los depósitos coluviales, los depósitos de vertiente y los Horizontes IB, IC, IIA, IIB y III de la Dunita de Medellín.

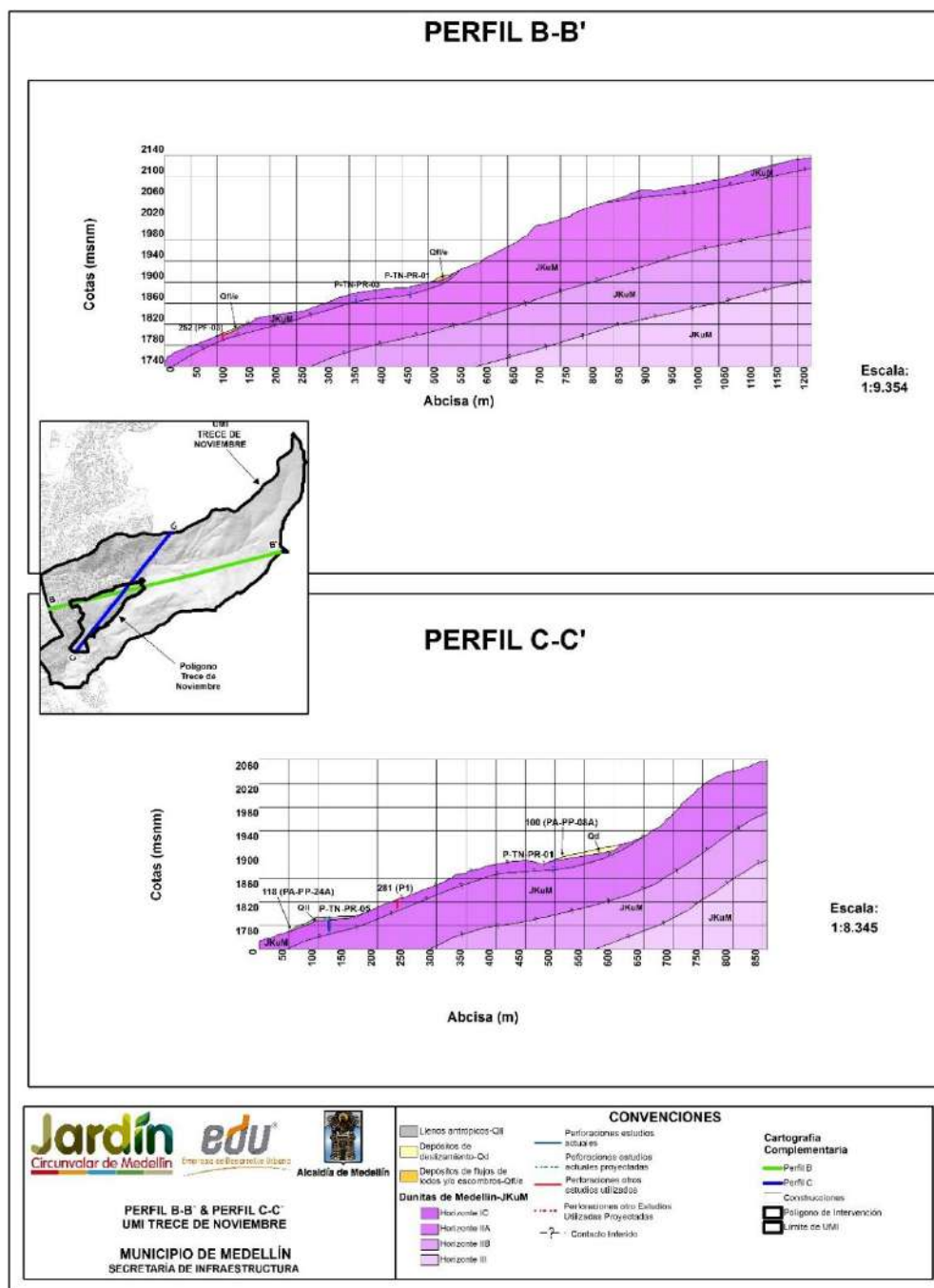
A continuación, en los Numerales 4.2.1 a 4.2.6 se hace una breve descripción de cada una de estas unidades, comenzando por la más reciente (llenos antrópicos) hasta la más antigua (Dunitas de Medellín).





Mapa 6. Geología local de UMI Trece de Noviembre
(04_TDNGeologiaLocalUMI_Medellin_C y 04_TDNGeologiaLocalUMI_Medellin_T)



Mapa 7. Perfil estratigráfico de la UMI Trece de Noviembre
(05_TDNPerfilesGeologicos_Medellin_C y 05_TDNPerfilesGeologicos_Medellin_T)



Mapa 8. Perfiles estratigráficos de la UMI Trece de Noviembre
(06_TDNPerfilesGeologicos_Medellin_C y 06_TDNPerfilesGeologicos_Medellin_T)

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

4.2.1 Llenos antrópicos (QII)

En la UMI del Trece de Noviembre se encuentran cuerpos que en superficie abarcan longitudes entre 30.0 m y 150.0 m y en profundidad alcanzan espesores típicamente variables entre 1.5 m y 5.0 m.

Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones 2015 denominadas como P-TN-PR-01, P-TN-PR-03, P-TN-PR-04 y P-TN-PR-05, suprayaciendo los suelos residuales de las Dunitas de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Además, se utilizaron las Perforaciones PA-PR-06 (153) y 118 (PA-PP-24A) de DEACIVIL (2014) y las Perforaciones 281 (P2), 282 (P2) y 283 (P3) de INCIGAM (2015) para la delimitación de dicha unidad.

El lleno antrópico encontrado en la Perforación P-TN-PR-01 tiene 4 m de espesor y está localizado en la margen izquierda de la Quebrada La Rafita. Las muestras recuperadas tienen relación matriz/fragmentos de 80/20. La matriz es limosa, parda, húmeda, consistencia blanda y tenacidad baja, con alto contenido de materia orgánica. Los fragmentos son de dunita, subangulares, frescos a levemente meteorizados, que miden entre 1 cm y 5 cm.

Por medio de la Perforación P-TN-PR-03 se caracterizó específicamente el lleno localizado en la canalización de la Quebrada La Arenera, en los alrededores del inicio del Jardín Circunvalar y en la placa deportiva del Barrio Trece de Noviembre. Este cuerpo está compuesto por una matriz limosa de color café y negra, consistencia blanda y tenacidad alta con raíces y alto contenido de materia orgánica dispersa. Los fragmentos son de Dunitas y rocas graníticas, que miden hasta 10 cm, están levemente meteorizados con superficies de oxidación.

En la Perforación P-TN-PR-04 el lleno tiene un espesor 1.5 m, tiene una relación matriz/fragmentos de 50/30 con 20% de materiales antrópicos. La matriz es limo arenosa de color pardo naranja proveniente del suelo residual de la dunita, húmeda, de consistencia firme y tenacidad baja y contiene raíces y madera. Los fragmentos de dunita presentan tamaños menores que 5 cm, con moderado grado de meteorización y subangulares y se encuentran también nódulos de hierro.

Hacia el suroccidente de la zona de estudio, en la parte inferior de la UMI, por medio de la Perforación P-TN-PR-05, se detectó un lleno antrópico que alcanza un espesor atípico de 24.0 m y está cerca de la zona donde la Quebrada La Arenera está canalizada. Debido a que este espesor es atípico, esto en comparación con el rango antes mencionado que va de 1.5 m a 5.0 m, se decidió hacer un análisis detallado que permitiera llevar a cabo una validación de este espesor y una aproximación a lo que sería su extensión. Se revisaron con especial cuidado los sondeos ubicados en los alrededores de la Perforación P-TN-PR-05 (Figura 7), encontrándose los resultados que se discuten a continuación.

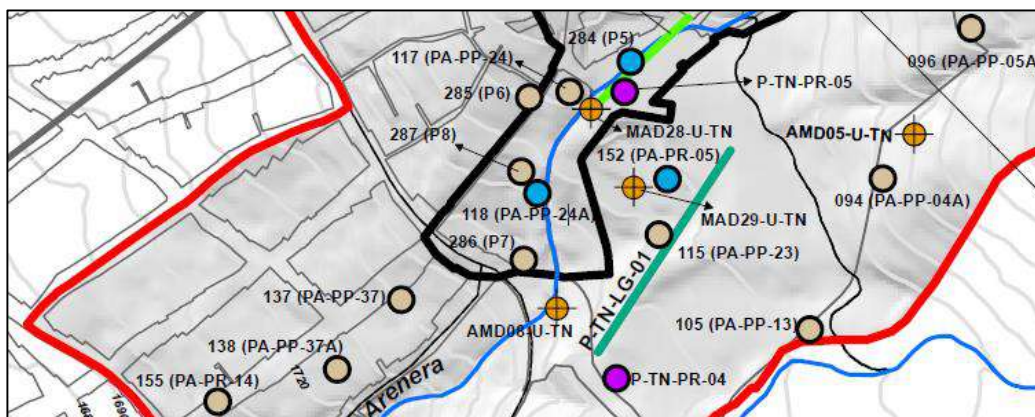


Figura 7. Localización esquemática de la exploración cercana a la Perforación P-TN-PR-05 (Sin escala)

En la Perforación P-TN-PR-05 este material tiene relación matriz/fragmentos de 75/15 y 10% de materiales antrópicos. La matriz es arcillosa, de color pardo amarillento, gris y negro, saturada a húmeda, la tenacidad es media y la consistencia es blanda. Los fragmentos son de dunita y rocas miloníticas (provenientes de la dunita) de color verde, con abundantes cloritas, tacto jabonoso, de hasta 10 cm de longitud, frescos, algunos fuertemente meteorizados, subangulares y con nódulos de hierro menores que 5 mm. Los materiales antrópicos corresponden a ladrillo, vidrio, plástico, tela y concreto, los cuales se encuentran entre 0 m - 2 m, 13 m - 15 m y 22 m - 23 m. En los intervalos comprendidos entre 13 m y 15 m y entre 22 m y 23 m se identificaron trozos de concreto que miden entre 1 cm y 5 cm de diámetro (Figura 8), lo que fue una de las mayores evidencias para determinar el espesor de este lleno en el sitio de la perforación. De igual manera, durante los recorridos de campo, los habitantes de la zona confirmaron que en este punto se generaron llenos antrópicos, ya que había un nacimiento de agua en donde el terreno colapsó, por lo que se vieron obligados a nivelarlo. Adicionalmente, los habitantes reportan que muy cerca del punto de la perforación, existía antes un pozo.

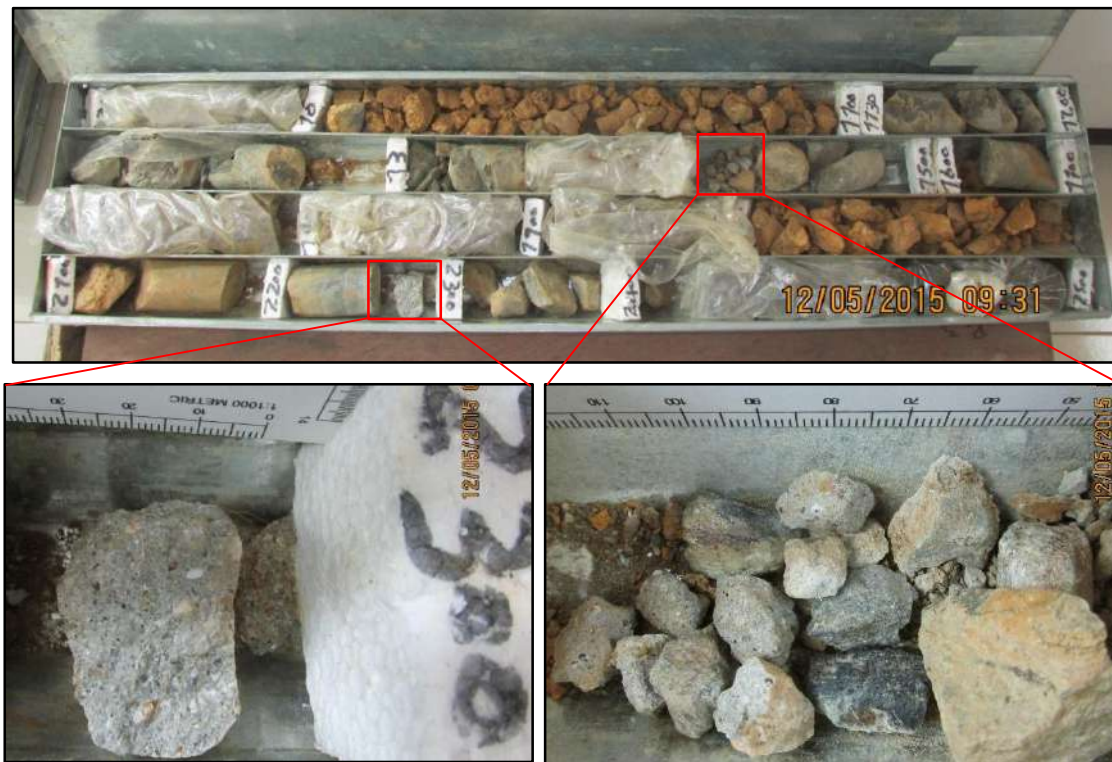


Figura 8. Concreto detectado en la Perforación P-TN-PR-05

En la Perforación 284 (P5), realizada por INCIGAM (2015) muy cerca de la Perforación P-TN-PR-05 (Figura 7), se reporta un lleno antrópico de 1.45 m, formado por material arenoso, suelto, de color gris amarillento, con escombros y fragmentos de roca, debajo del cual se encuentra una capa de materia orgánica de 3 m de espesor (de 1.45 m a 4.45 m de profundidad). Por las características del material, la escala de trabajo y la cercanía a la Perforación P-TN-PR-05 (con un lleno de 24 m de espesor), la capa orgánica mencionada es considerada como parte del lleno y se agrupa en el mismo cuerpo de la Perforación P-TN-PR-05.

Por otro lado, en la Línea Geofísica 3 (INCIGAM), localizada en la parte baja del polígono, cerca del parque que cubre la Quebrada La Arenera, se detectaron tres materiales, de los cuales el más superficial es una capa de 5 m de espesor que “es considerado como un lleno producto de la intervención antrópica de la quebrada, alcanzando una velocidad media de la onda de corte de 180 m/s” (INCIGAM, 2015). En la Figura 9 se muestra la gráfica de velocidades de ondas de corte de dicha línea, donde efectivamente se observa una capa de aproximadamente 5 m de espesor con velocidades de onda variables entre 154 m/s y 183 m/s, las cuales corresponden a materiales blandos que se pueden asociar con el lleno antrópico.

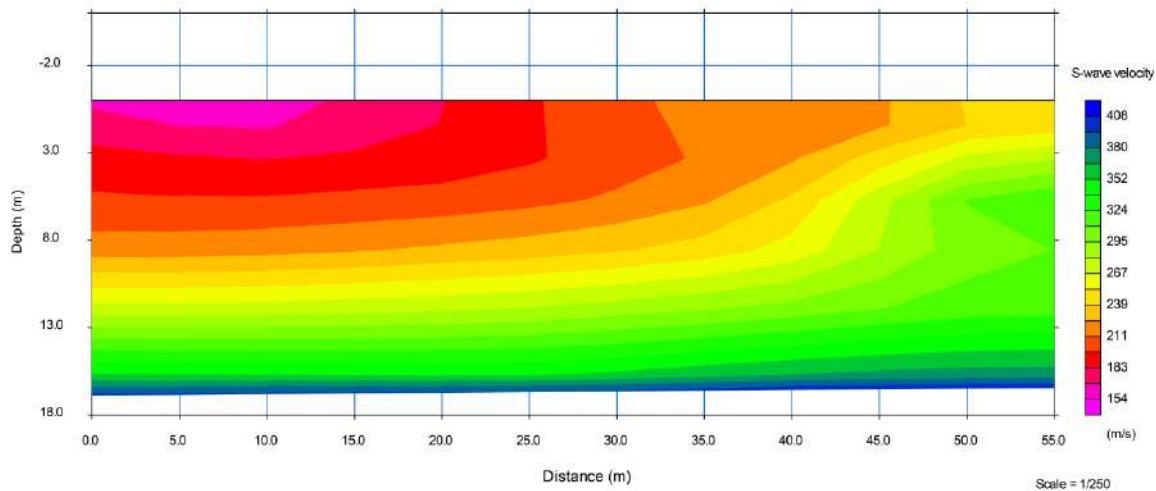


Figura 9. Velocidades de onda de corte promedio Línea Geofísica 3 (INCIGAM, 2015)

La Perforación 118 (PA-PP-24A) de DEACIVIL (2013) reporta un lleno formado por material limo arcilloso de color café oscuro, con aproximadamente 4 m de espesor, que también se asocia al cuerpo encontrado en la Perforación P-TN-PR-05.

Además, se consultó el estudio de Cimientos (1986), que se encuentra por fuera de la zona de estudio. Sin embargo, entre la exploración realizada el Apique 9 (AP-9) se encuentra cerca de la zona que comprende el lleno mencionado anteriormente. El apique tiene una profundidad de 4.2 m y presenta una capa vegetal formada por arcilla café oscura orgánica, seguida por arcilla arenosa de color café claro, y luego arcilla café clara amarilla. La descripción del material es hecha por su tipo y no es clasificado por su origen, por lo que no aporta mucha información a la geología de la zona y no es concluyente respecto a la existencia del lleno.

En síntesis, con respecto al lleno antrópico detectado por medio de la Perforación P-TN-PR-05, se considera que su espesor promedio es del orden de 5 m. El espesor de 24 m detectado por medio del sondeo mencionado, es local, asociado a lo indicado por los habitantes de la zona que reportan muy cerca del punto de la perforación un pozo.

Hacia el suroeste del lleno anterior, se encuentra el lleno descrito en la Perforación 152 (PA-PR-05) formado por material limo arcilloso de color café con escombros, de aproximadamente 5 m de profundidad. Comparando la cartografía del año 1972 con la del año 1998, se observan cambios en las curvas de nivel, lo que sugiere modificaciones antrópicas por urbanización en la zona y alrededores de la perforación.

4.2.2 Cenizas volcánicas removilizadas y/o in situ (Qcv)

En el peldaño encontrado en la parte alta de la UMI Trece de Noviembre se presenta una capa de cenizas volcánicas removilizadas e in situ (Figura 10). Estas cenizas cubren el perfil de suelo de la dunita y tiene un espesor de hasta 1.8 m. Generalmente tienen en la

parte más superficial un leve grado de removilización, encontrándose mezclada con suelo residual de dunita y materia orgánica, producto de la actividad agrícola y urbanística de la zona. Además, cabe resaltar que en la zona del proyecto, las capas de cenizas volcánicas se encuentran de forma discontinua y no siempre son cartografiables a la escala de este estudio.

Esta unidad fue caracterizada en las Perforaciones U-EFG-PP-01 y U-EP-PP-02, en las cuales se presenta una capa de dicho material mezclado con suelo residual de Dunitas de Medellín, nódulos de hierro con tamaños menores de 5 mm y materia orgánica, el tamaño de grano es principalmente limo, de color café anaranjado y húmedo.



Figura 10. Ceniza volcánica removilizada

La superficie suave donde se localiza la capa de ceniza volcánica removilizada presenta pendientes menores que 5° en la unidad geomorfológica denominada Peldaño Alto PÑA (Superficies Suaves), como se ilustra en Figura 11. Fue encontrada en la estación de campo AMD05-U-TN, sobre el camino que de la parte alta conduce hacia el Cerro Pan de Azúcar (Figura 12).



Figura 11. Afloramiento de cenizas volcánicas removilizadas localizadas en la parte alta de la UMI en la unidad geomorfológica denominada Peldaño Alto PÑA (Superficies Suaves)



Figura 12. Afloramiento de cenizas volcánicas re TRABAJADAS sobre camino que conduce hacia el Cerro Pan de Azúcar y al camino Prehispánico

4.2.3 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 Trece de Noviembre, esta unidad se concentra 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 del

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

año 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 la Dunita de Medellín, los cuales quedan expuestos en superficie por erosión hídrica y eólica (Figura 13).



Figura 13. Depósitos coluviales típicos de la zona

4.2.4 Depósito de deslizamiento (Qd)

En la zona de estudio, se encuentra un depósito de deslizamiento en la parte media de la UMI, al norte del extremo superior del Polígono Trece de Noviembre, cerca de las estaciones de campo MAD-02-U-TN y MAD-03-U-TN. Este depósito fue caracterizado en la Perforación 100 (PA-PP-08A) de DEACIVIL (2014) con un espesor superior a 5 m. Es angosto en la parte superior y se amplía en 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, de Dunitas moderadamente meteorizados y angulares (Figura 14).

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, la cual contiene 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. La parte

baja se encuentra cubierta por vegetación, en este sector el polígono empieza a tener intervención urbana, con viviendas y zonas de esparcimiento.



Figura 14. Depósito de deslizamiento en la parte media de la UMI





Figura 15. Depósito de deslizamiento (contorno amarillo) generado por el desprendimiento de bloques de roca del escarpe en roca ubicado en la parte alta del polígono

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

Se encuentran seis cuerpos distribuidos en la parte superior, central y baja de la UMI, en algunas partes cubiertos por llenos antrópicos. Tienen espesores variables entre 3 m y 7 m y variaciones en el predominio de la matriz y los clastos y fueron encontrados en las Perforaciones P-TN-PR-01, P-TN-PR-04 y P-TN-PR-05.

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 la Microzonificación Sísmica como QFIII, NFI y NQFII, cuya subdivisión fue hecha con herramientas de apoyo como datación, grado de incisión y madurez (grado de meteorización), objeto de estudio que no es el de este informe. 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 Qfl/e.

En la parte superior de la UMI, en la vertiente izquierda de la Quebrada La Rafita, se presentan dos depósitos, con forma ovalada. Fueron identificados en las fotografías aéreas y verificados por medio de los recorridos de campo. Son depósitos matriz soportados con relación matriz/fragmentos de 80/20 a 70/30, formados por material limoso principalmente.

En la parte central, sobre el extremo superior del polígono, se encuentran dos cuerpos, uno con forma redondeada y otro con forma ovalada alargada, reportado en la Perforación P-TN-PR-01 con 12 m de espesor. Se trata de un depósito matriz soportado, con relación matriz/fragmentos de 60/40 a 80/20, la matriz varía de limosa a limo arenosa de color pardo rojizo con gris y negro, con alto contenido de clorita, húmeda, de consistencia blanda. Los fragmentos son subangulares a angulares, de Dunitas y Dunitas milonitizadas, frescos a meteorizados con tamaños de 1 cm a 12 cm.

Hacia la parte occidental de la UMI, en el extremo occidental inferior del polígono, se encuentra un depósito con forma irregular, más ancho en la parte inferior que en la superior, identificado en los recorridos de campo en la estación MAD29-U-TN, cerca de la carrera 18 C con Calle 56HB, en el lote de construcción del Metrocable Miraflores y en la perforación 252 (PF3) de TECNISUELOS (2010) con un espesor de 4.5 m. Está formado por una matriz limosa de color amarilloso con zonas arcillosas de color blanco, húmedas, de consistencia blanda y tenacidad alta. Contiene 30% de fragmentos, subangulares a subredondeados, con tamaños de 0.5 cm a 5 cm, de Dunitas, tonalitas y Dunitas milonitizadas, que se encuentran meteorizados.

Continuando en la parte inferior, en el costado sur de la UMI, aparece un depósito matriz soportado en la Perforación P-RN-PR-05, alcanzando un espesor de 23 m. Presenta una relación matriz/fragmentos de 30/70, la matriz es limosa con variación de color entre café grisácea y naranja parduzca, está húmeda, presenta consistencia blanda, y tenacidad alta. Los fragmentos son subangulares, con tamaños menores a 20 cm, moderadamente meteorizados a completamente meteorizados, de Dunitas y Dunitas milonitizadas.

4.2.6 Dunitas de Medellín (JKuM)

Esta unidad 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-TN-PR-01,

P-TN-PR-03, P-TN-PR-04, P-TN-PR-05, U-EFG-PP-01, U-EP-PP-02 y U-EP-PP-03. 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 (Figura 16).



Figura 16. Evidencias de dunita cizallada en la zona de estudio

El Horizonte IB se encuentra en la parte alta de la UMI, de acuerdo con las Perforaciones U-EFG-PP-01 y U-EP-PP-03, con espesores variables entre 3.6 m y 5.85 m. Consiste en un suelo limoso de color pardo naranja con motas negras, húmedo a saturado, consistencia firme a blanda y tenacidad media a baja, que contiene raíces y micas. En los recorridos de campo hacia la parte alta de la UMI en la estación MAD20-U-TN, este horizonte presenta alto contenido de nódulos de hierro de color café oscuro con tamaños menores que 5 mm, mostrando el avanzado grado de meteorización que presenta este horizonte (Figura 17).



Figura 17. Suelo residual de dunita con alto contenido de nódulos de hierro localizado en la parte alta de la UMI

El Horizonte IC se encuentra en las Perforaciones U-EFG-PP-01, U-EP-PP-02, U-EP-PP-03 y P-TN-PR-03. En la Perforación P-TN-PR-03 tiene un espesor de 10 m, el suelo es limoso de color pardo naranja, húmedo, consistencia blanda y tenacidad media a alta, conserva la estructura milonítica heredada de la roca (Figura 18) la cual fue observada en la estación de campo MAD22-U-TN, compuesta por minerales tales como clorita y crisotilo. Contiene menos del 10% de bloques de dunita milonitizada que miden entre 1 cm y 5 cm.

En la Perforación U-EP-PP-02, el saprolito corresponde a la salbanda y su espesor no pudo ser determinado ya que la perforación finalizó sin encontrar el límite inferior de este horizonte. Es un suelo limoso, de color café y verde, húmedo, conserva la estructura milonítica, tiene tacto jabonoso y cristales de crisotilo de hasta 1 cm. Contiene bloques de dunita milonitizada, de color verde, tacto jabonoso que miden hasta 5 cm, subangulares, desde meteorizados hasta frescos.

En las Perforaciones U-EFG-PP-01 y U-EP-PP-03 el saprolito es limo arenoso, de color pardo naranja con manchas vino tinto, café y gris, está húmedo en la Perforación U-EP-PP-03 y saturado en la Perforación U-EPG-PP-01, consistencia blanda y tenacidad baja a media, conserva la estructura milonítica y se reconocen cloritas. Contiene menos del 10% de bloques levemente meteorizados, que miden hasta 4 cm.



Figura 18. Horizonte IC mostrando estructura milonítica de la dunita localizada en la parte alta de UMI

El Horizonte IIA se encuentra en las Perforaciones P-TN-PR-01 y P-TN-PR-04. En la Perforación P-TN-PR-01 corresponde a las cataclasitas, cuyo espesor no pudo ser determinado pues no se alcanzó el límite inferior del horizonte con la perforación. Consiste en unos bloques angulares de dunita milonitizada que miden hasta 2 cm, embebidos en un suelo limoso de color pardo, rojizo y gris, húmedo, de consistencia firme y tenacidad baja. Además, se encuentran bloques de dunita milonitizada, frescos a levemente meteorizados, diaclasados y fracturados con serpentización en las diaclasas (Figura 19A), que miden entre 1 cm y 60 cm y corresponden a una brecha tectónica con suelo lavado. La roca está muy fracturada y la recuperación está alrededor del 40%.

En la Estación AMD03-U-TN, el Horizonte IIA de la dunita presente en la zona de estudio presenta condiciones de meteorización muy particulares ya que se han encontrado bloques rocosos en abundante suelo residual como se observa en la Figura 19B.

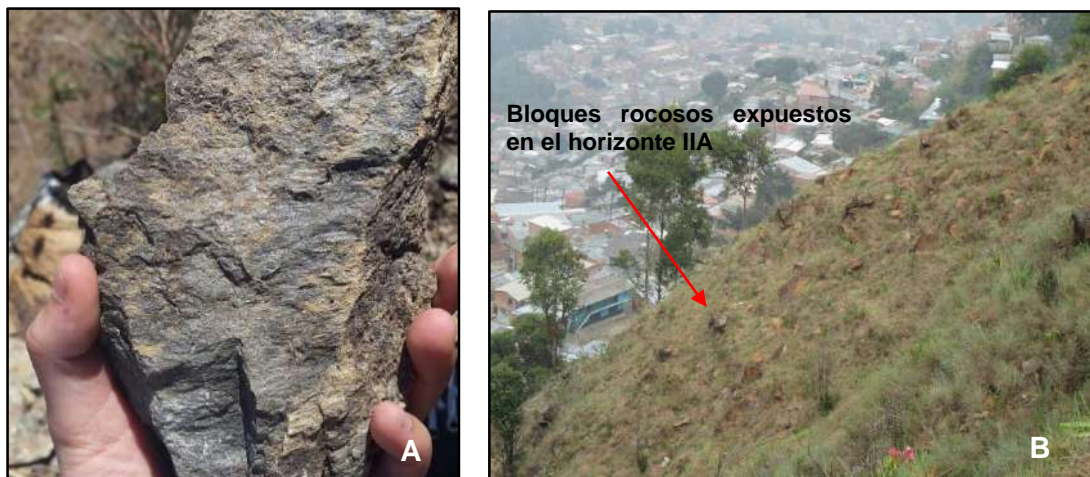




Figura 19. A. Dunita exhibiendo planos de esquistosidad y B. Horizonte IIA-exhibiendo bloques rocosos expuestos por agua de escorrentía con matriz

	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</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 Trece de Noviembre se ubica sobre las macrounidades Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA) y Valle Medio-Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB). 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 en el cual se 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 y se resaltan las correspondientes a la zona de estudio.



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 Trece de Noviembre se ubica sobre la Unidad de Lomos (L), la Unidad de Peldaños (PÑ) y la Unidad de Vertiente en suelos residuales moderadamente incisados (VSRMI). 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ 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. 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

Para la elaboración del mapa de unidades geomorfológicas, se procedió en primer lugar a elaborar el mapa de pendientes de la UMI Trece de Noviembre. 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).

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

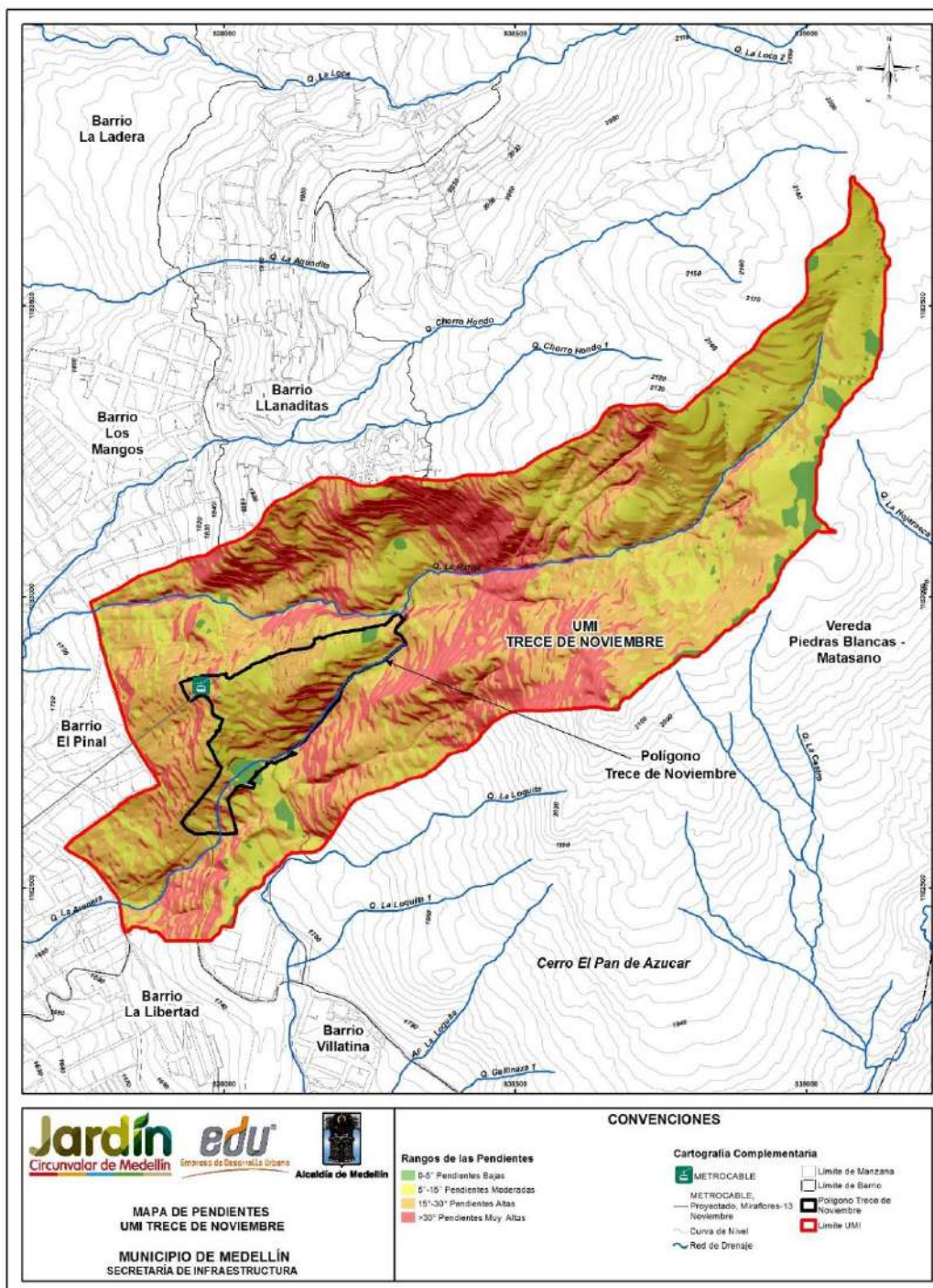
Rango	Clasificación	Rasgo Geomorfológico	Tipo de Proceso
0° a 5°	Baja	Planicies	Erosión Superficial
5° a 15°	Moderada	Superficies Suaves	Erosión Superficial
15° a 30°	Alta	Superficies Moderadas	Movimientos en Masa y Erosión Superficial
> 30°	Muy Alta	Laderas Empinadas	Movimientos en Masa y Caída de Rocas

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:

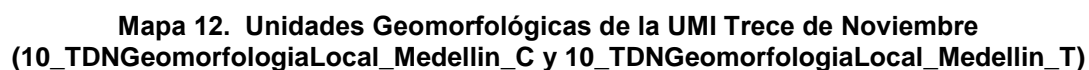
- ✓ Las zonas resaltadas en color verde son las de pendientes bajas (0° a 5°), correspondientes a planicies. Se encuentran localizadas en la parte alta donde, nace la Quebrada La Rafita y en la parte baja las cuales han sido asociadas a rasgos tectónicos denominados como peldaños o descansos. También se encuentran en la parte baja del en lugares de explanación antrópica, en las cercanías del Colegio Sol de Oriente.
- ✓ Las zonas con pendientes moderadas (5° a 15°) y altas (15° a 30°) corresponden a las sombreadas de colores naranja y amarillo respectivamente. Son las predominantes en la UMI. Corresponden a superficies suaves y moderadas modeladas por la incisión de las quebradas y sus afluentes.
- ✓ Las zonas con pendientes mayores que 30°, tratándose de las sombreadas con color rojo, son caracterizadas por presentar laderas empinadas generadas por procesos de socavación asociados a la Quebradas La Arenera y La Rafita y además a laderas escarpadas en roca, las cuales se encuentran cubiertas hoy día por la vegetación, como es el caso del Cerro Pan de Azúcar (CPA) y una cárcava inactiva localizada en la parte superior del polígono.

Posteriormente, teniendo en cuenta el análisis del mapa de pendientes, los recorridos de campo, la geología local y la actividad morfodinámica de la zona de estudio, se lograron definir las diecisiete unidades geomorfológicas que se describen detalladamente en los Numerales 5.2.1 a 5.2.17 de este capítulo.

En el Mapa 12 se presentan las unidades geomorfológicas de la UMI Trece de Noviembre y de la Figura 20 a la Figura 23 se muestran los perfiles esquemáticos de las unidades más representativas.



Mapa 11. Análisis de pendientes de la UMI Trece de Noviembre
(09_TDNPendientes_Medellin_C y 09_TDNPendientes_Medellin_T)



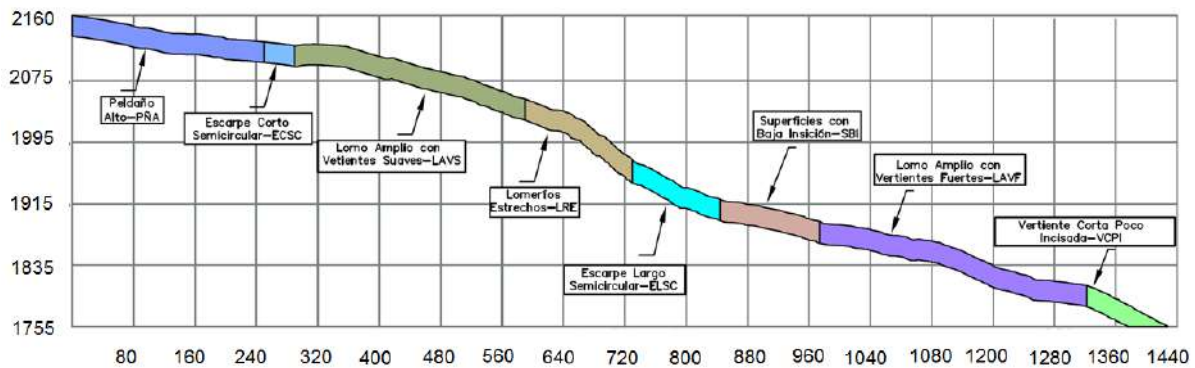


Figura 20. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas

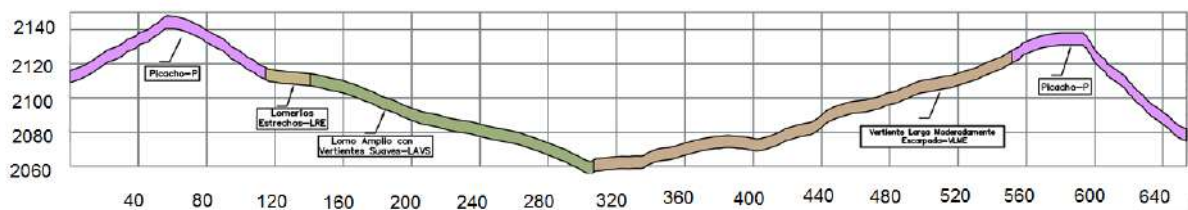


Figura 21. Perfil B-B' de unidades geomorfológicas

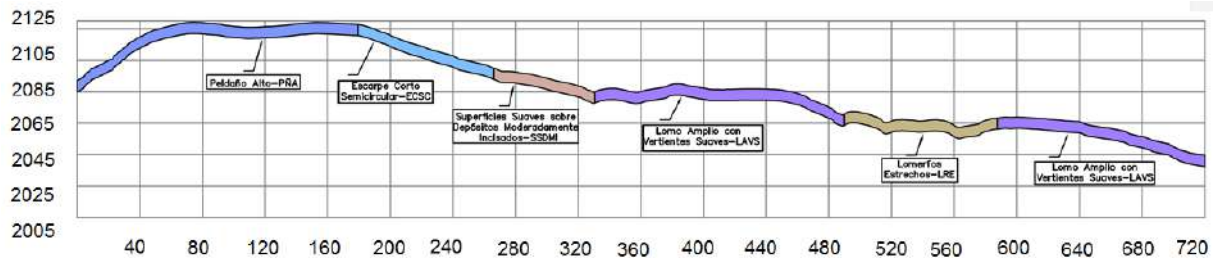


Figura 22. Perfil C-C' de unidades geomorfológicas

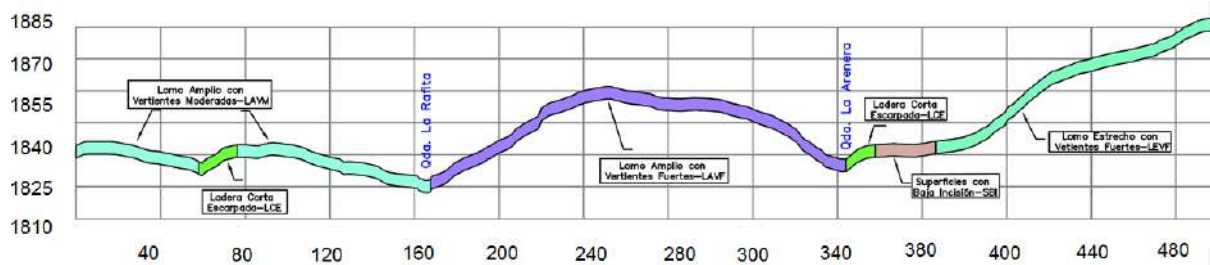


Figura 23. Perfil D-D' de unidades geomorfológicas

5.2.1 Unidad Peldaño Alto PÑA

Se localiza hacia la parte alta de la UMI en dirección NE, en el nacimiento de la Quebrada La Rafita entre las cotas 2118 msnm y 2204 msnm. Esta geoforma se encuentra relacionada con rasgos estructurales asociados a descansos de falla, ya que se encuentra limitada tanto en la parte superior como inferior por laderas escarpadas y lineamientos de gran continuidad observados en quiebres de pendiente y lomos deflectados. Presentan 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 24 se resalta sombreada dicha unidad.





Figura 24. Unidad geomorfológica de Peldaño Alto PÑA

5.2.2 Unidad Peldaño Bajo PNB

Esta unidad se encuentra localizada hacia la parte baja de UMI y del polígono, en las cercanías del Colegio Sol Oriente y la Terminal de Transportes del Barrio Sol de Oriente, entre los polígonos Trece de Noviembre y Pinares de Oriente. Se encuentra entre las cotas 1772 msnm y 1800 msnm limitado por lineamientos asociados a quiebres de pendiente y lomos deflectados. Esta unidad presenta forma irregular, se desarrolla sobre depósitos de flujos de lodos y/o escombros de poco espesor y suelo residual de las Dunitas de Medellín. Esta unidad geomorfológica fue identificada con la ayuda de análisis multitemporal en fotografías aéreas y el mapa de pendientes, no fue posible obtener una imagen representativa de la misma debido a la alta intervención antrópica en la zona.

5.2.3 Unidad Picacho P

Se encuentra en la parte media de la UMI, a esta unidad pertenece el Cerro Pan de Azúcar (CPA) y un conjunto de cerros aislados (Figura 25). Se caracteriza por

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

encontrarse en el rango de pendientes mayores que 30° , son cerros que alcanzan cotas desde 2138 msnm a 2148 msnm, siendo muy distinguibles en el relieve. Presentan formas desde ovaladas, alargadas hasta redondas, sus vertientes son fuertes a escarpadas con topes convexos y planos para el caso del CPA. 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.

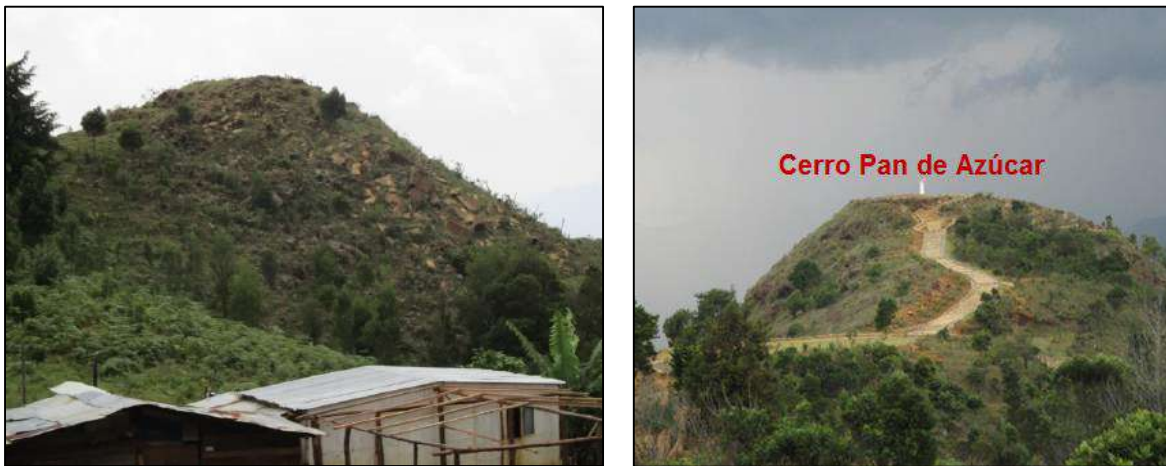


Figura 25. Unidad geomorfológica de Picacho P

5.2.4 Unidad Escarpe Corto Semicircular ECSC

Se encuentra ubicado en la parte alta de la UMI, limitado en la parte superior por la unidad de peldaño alto (PÑA). Esta unidad se encuentra entre las cotas 2132 msnm a 2100 msnm. Se caracteriza por presentar pendientes entre 15° y 30° , sus laderas son cortas escarpadas de aproximadamente 140 m de alto, con forma semicircular muy característica, presenta bajo grado de incisión (Figura 26). Litológicamente esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín. Sobre esta unidad se tienen cicatrices de deslizamiento cubiertas de vegetación.





Figura 26. Unidad de Escarpe Corto Semicircular en las inmediaciones del nacimiento de la Quebrada La Rafita

5.2.5 Unidad Escarpe Largo Semicircular ELSC

Se encuentra ubicado en la parte media de la UMI y parte superior del polígono. 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 27), con forma semicircular muy característica, con 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 27. Unidad de Escarpe Largo Semicircular ELSC localizado en la parte alta del polígono

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

5.2.6 Unidad Lomo Ampio con Vertientes Suaves LAVS

Se encuentra en la parte alta de la UMI, delimitada por las unidades de peldaños altos (PÑA), picacho (P) y escarpe de longitud corta y con forma semicircular (ECSC). Esta unidad se caracteriza por presentar topes suaves convexos de 130 m de ancho, con pendientes menores que 15°, laderas con pendientes cortas y moderadas entre 15° y 30° de inclinación. Esta geoforma presenta evidencias de tener un control estructural debido a un leve cambio de tendencia de NS en su parte más alta a NE en su parte baja, asociado a un lineamiento evidenciado en la orientación que presenta la unidad de picachos y al cambio de dirección que muestra la Quebrada La Rafita cerca de esta unidad geomorfológica. Litológicamente se desarrolla sobre suelo residual de la Dunita de Medellín. En la Figura 28 se resalta con un sombreado claro esta unidad de lomo amplio con vertientes suaves.



Figura 28. Unidad geomorfológica de Lomo Ampio con Vertientes Suaves LAVS

5.2.7 Unidad Lomo Ampio con Vertientes Moderadas-LAVM

Se localiza en la parte baja de la UMI, sobre la margen izquierda de la Quebrada La Arenera. Limita en la parte superior por la unidad de escarpes largos semicirculares e inferior por unidades antrópicas. Se caracteriza por presentar topes subangulosos con pendientes entre 15° y 30°, laderas cortas con pendientes moderadas a fuertes, presenta forma irregular con moderado grado de incisión. Se observaron procesos morfodinámicos lentos como reptación. Litológicamente, esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín. En la Figura 29 se resalta con un sombreado claro esta unidad de lomo amplio con vertientes moderadas.

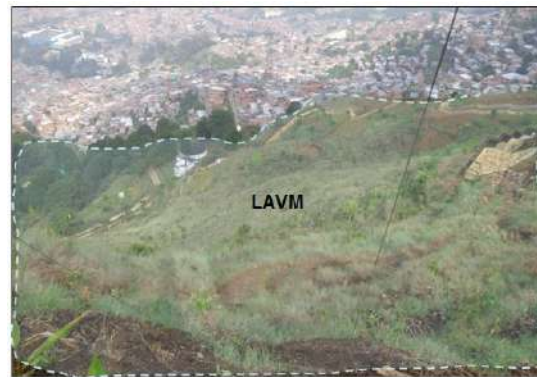


Figura 29. Unidad geomorfológica de Lomo Amplio con Vertientes Moderadas LAVM

5.2.8 Unidad Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF

Esta unidad conforma más del 50% del polígono del Trece de Noviembre. Se encuentra entre las quebradas La Rafita (Margen Izquierda) y la Quebrada La Arenera (Margen Derecha). Esta geoforma presenta evidencias de tener un control estructural debido a un leve cambio de tendencia de NE-NNE, además se encuentra entre dos lineamientos observados en las fotografías aéreas y por la tendencia de los drenajes (Quebradas La Rafita y La Arenera). Esta unidad se caracteriza por presentar en la parte superior topes suaves con inclinaciones menores que 5° y en la parte baja el tope se vuelve subanguloso con pendientes cortas de forma recta entre 15° y 30° de inclinación. Sus laderas presentan pendientes fuertes a escarpadas con inclinaciones mayores que 30° . Litológicamente se desarrolla sobre suelos residuales de las Dunitas de Medellín. En la Figura 30 se resalta con un sombreado claro esta unidad de lomo amplio con vertientes fuertes.

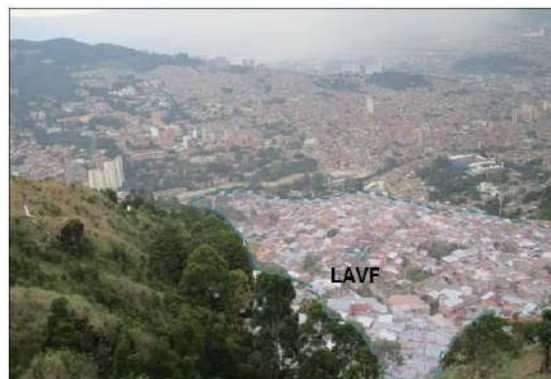


Figura 30. Unidad geomorfológica de Lomo Amplio con Vertientes Fuertes LAVF

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

5.2.9 Unidad Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes LEVF

Se encuentra en la parte baja de la UMI sobre la margen derecha de la Quebrada La Rafita. Presenta topos estrechos subangulosos con pendientes fuertes entre 15° y 30° . Sus laderas son largas y escarpadas con pendientes mayores que 30° , de formas rectas. Litológicamente esta geoforma está compuesta por material rocoso de los Horizontes IIA, IIB y III de las Dunitas de Medellín. Esta unidad geomorfológica fue identificada con la ayuda de análisis multitemporal en fotografías aéreas y el mapa de pendientes, por lo cual no fue posible obtener una imagen representativa de la misma.

5.2.10 Unidad Lomeríos Estrechos LRE

Se encuentra localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Rafita en la parte media de la UMI. Esta geoforma se caracteriza por presentar topos estrechos subredondeados con pendientes variables entre 5° y 15° de inclinación y longitudes menores de 50 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. Sobre esta unidad geomorfológica se concentran fragmentos de roca de la Dunita de Medellín producto de procesos de inestabilidad asociados a caídas de rocas de la parte superior de la geoforma donde se encuentra la unidad de picacho. Litológicamente esta unidad se compone de los denominados depósitos coluviales (Figura 31).





Figura 31. Unidad geomorfológica de Lomeríos Estrechos LRE

5.2.11 Unidad Superficie Antrópica SA

Localizada en la parte baja de la zona de estudio, corresponde a superficies explanadas con formas irregulares modificadas antrópicamente. Presenta pendientes suaves, variables entre 0° y 5° de inclinación.

Una de las superficies antrópicas localizada en la parte baja de la Quebrada La Arenera, sobre la margen izquierda, alcanza espesores promedio de 5 m y espesores puntuales de hasta 23 m, debido a la posible existencia de un pozo y/o un nacimiento de agua que

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

generó colapsos en la zona por lo que los habitantes del sector nivelaron el terreno con la acumulación de materiales antrópicos, tal como se explicó en el Numeral 4.2.1. En la Figura 32 se muestra la Superficie Antrópica SA encontrada en las inmediaciones del Colegio Sol de Oriente sobre la Quebrada la Arenera.



Figura 32. Superficie Antrópica SA encontrada en las inmediaciones del Colegio Sol de Oriente sobre la Quebrada La Arenera

5.2.12 Unidad Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados SSDMI

Localizada en la parte alta de la UMI, sobre la margen izquierda de la Quebrada La Rafita. Esta geoforma se caracteriza por presentar pendientes menores que 15° y forma ovalada, laderas cortas poco incisadas y topos suaves. Es el resultado de un proceso de inestabilidad generado en la unidad geomorfológica denominada escarpes cortos semicirculares (ECSC). Litológicamente se encuentra sobre depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Esta unidad geomorfológica fue identificada con la ayuda de análisis multitemporal en fotografías aéreas, por lo cual no fue posible obtener una imagen representativa de la misma.

5.2.13 Unidad Superficies con Baja Incisión SBI

Localizada en la parte superior del polígono del Trece de Noviembre, sobre la margen derecha e izquierda de la Quebrada La Rafita. Presenta topos suaves con pendientes menores que 5° , sus laderas son cortas con pendientes moderadas menores que 15° de inclinación con bajo grado de incisión. Esta geoforma 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 33).



Figura 33. Unidades geomorfológicas de Superficies con Baja Incisión SBI y Escarpes Largos Semicirculares ELSC

5.2.14 Unidad Ladera Corta Escarpada LCE

Localizada sobre la margen derecha de la Quebrada La Rafita y sobre la margen izquierda de la Quebrada La Arenera. Presenta laderas escarpadas cortas y rectas con pendientes mayores que 30° de inclinación y de aproximadamente 20 m de longitud. Esta unidad se desarrolla sobre el Horizonte IC de las Dunitas de Medellín. En esta unidad no fue posible obtener una fotografía representativa debido a la alta densidad urbanística que se observó en la zona, esta geoforma fue identificada con la ayuda de fotografías aéreas y el mapa de pendientes.

5.2.15 Unidad Vertiente Larga Moderadamente Escarpada VLME

Se encuentra en la parte central de la UMI sobre la margen izquierda de la Quebrada La Rafita. Esta geoforma se caracteriza por presentar laderas con pendientes fuertes, variables entre 15° y 30° de inclinación, son largas rectas de aproximadamente 200 m de longitud y de forma irregular. Esta unidad se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín (Figura 34).

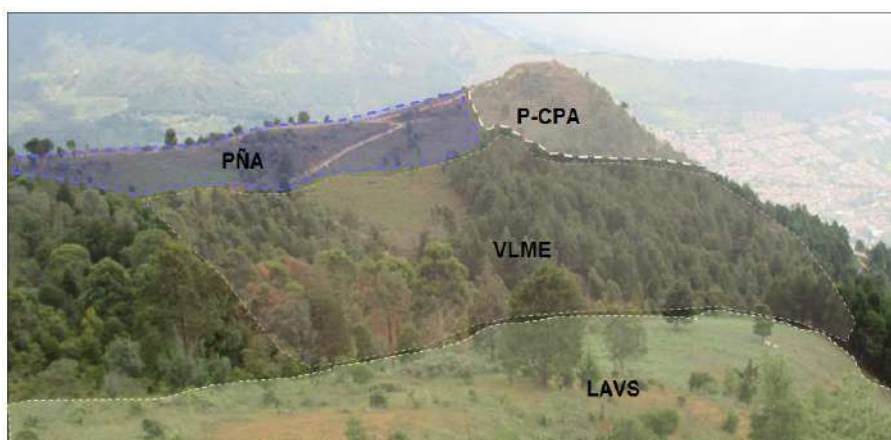


Figura 34. Unidad geomorfológica de Vertiente Larga Moderadamente Escarpada VLME

5.2.16 Unidad Vertiente Corta Poco Incisada VCPI

Se localiza en la parte baja de la UMI. Se caracteriza por presentar laderas largas fuertes y escarpadas con pendientes mayores de 15° de inclinación, con bajo grado de incisión; está completamente urbanizada. Esta geoforma se desarrolla sobre suelo residual de las Dunitas de Medellín, depósito de flujo de lodos y/o escombros y lleno antrópico (Figura 35).



Figura 35. Unidad geomorfológica de Vertiente Corta Poco Incisada VCPI y Escarpe Largo Semicircular ELSC

5.2.17 Unidad Vertiente Escarpada VE

Se localiza en la parte baja de la UMI. Se caracteriza por presentar laderas cortas con pendientes fuertes a escarpadas e inclinaciones mayores de 15° con bajo grado de incisión; completamente urbanizada. Esta geoforma se desarrolla sobre suelo residual de

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

las Dunitas de Medellín y llenos antrópicos. En esta unidad no fue posible obtener una fotografía representativa debido a la alta densidad urbanística, sin embargo en la Figura 35 se puede observar que parte de ella se encuentra en el costado sur de la unidad de Vertiente Corta Poco Incisada-VCPI.

5.2.18 Unidad 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 36), 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.

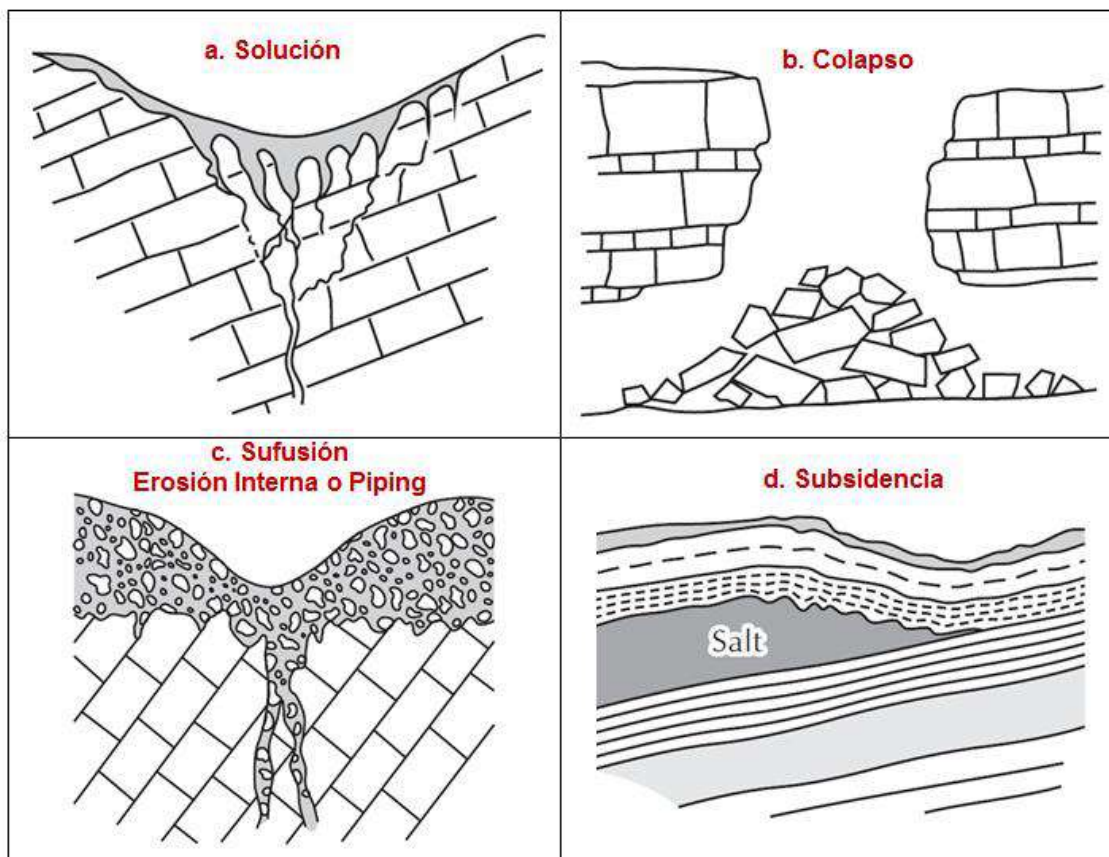


Figura 36. Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007)

Las opciones a, b y c de la Figura 36, son los procesos de formación que se asocian a las dolinas reportadas en la UMI. Esto se debe al fuerte control estructural, evidenciado en lineamientos, geofomas 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 37). Estos factores ponen en evidencia la conjugación de procesos que dan origen al paisaje pseudokarstico en las Dunitas de Medellín.





Figura 37. Principales formaciones genéticas de una dolina (Huggett, 2007)

En la UMI Trece de Noviembre, esta geoforma presenta formas variables las cuales van desde circulares a elipsoidales, asociadas a procesos kársticos. Fueron identificadas a través del análisis multitemporal, principalmente. Aunque la dolina localizada hacia el suroccidente de la UMI se identificó de acuerdo al análisis multitemporal realizado con las cartografías de los años 1972 y 1998, en el cual se pudo observar el cambio en las geoformas. En año 1972 había una depresión asociada a la Quebrada La Arenera y en el año 1998 se encuentra que la zona ha sido intervenida antrópicamente evidenciado en el cambio en las curvas de nivel. Adicionalmente, se pudo corroborar con las narraciones de la gente de la zona, que años atrás había en este lugar un nacimiento de agua cristalina y que posteriormente hubo un colapso en el terreno.

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 mensuales 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 estrecha relación directa de las condiciones hidrometeorológicas, como factor detonante, de los fenómenos naturales que ocurren en el Valle de Aburrá (Aristizabal & 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

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

la ocurrencia de este tipo de eventos, tales como los retiros y las zonas inundables de las quebradas (Aristizabal & 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 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 1989 (Aristizabal & 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 Aburra (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 caídos 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 a los polígonos.

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
Caidas 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%

Por su parte la Figura 38 y la Figura 39 presentan un análisis de frecuencia de ocurrencia de los principales fenómenos y cuáles son los barrios más afectados por los mismos. Se puede observar que los deslizamientos son los fenómenos más recurrentes en la zona de estudio, seguidos de los fenómenos de inundación tal como lo describió Aristizabal & 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 39 muestra que los barrios más afectados por diferentes fenómenos según los registros encontrados son Villa Tina, 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 objeto de estudio.

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 1989 (Figura 40). 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”.

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 de tierra detonados por lluvias en el sector de Villa Turbay durante el primer fin de semana del mes de abril, provocaron el colapso de cuatro viviendas y el fallecimiento de cuatro personas.

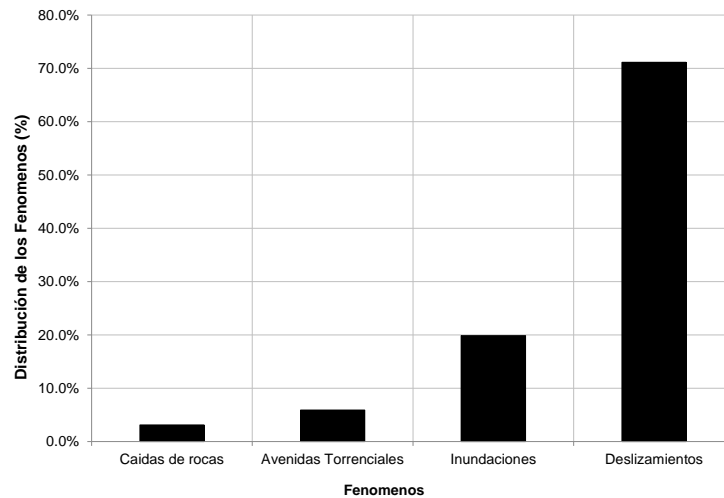


Figura 38. Distribución de los fenómenos

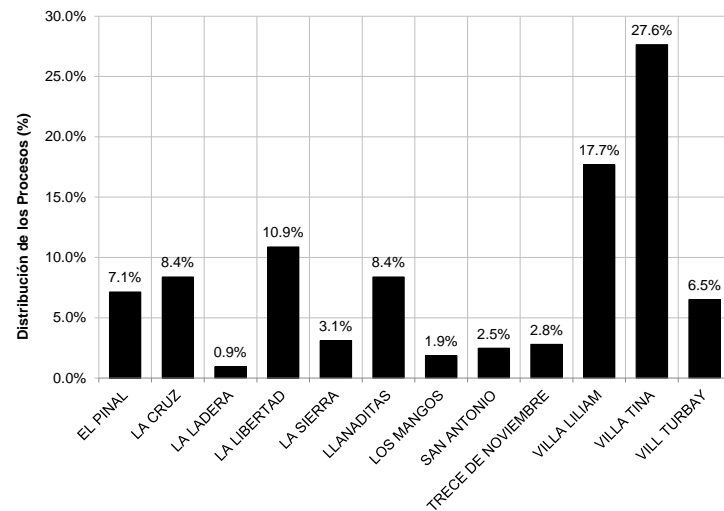


Figura 39. Análisis de los barrios más afectados por los fenómenos

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

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 Mirlas	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



**Figura 40. Deslizamiento de Villatina en septiembre de 1987
(Periódico El Mundo, 8 de octubre de 1987)**

5.4 MORFODINÁMICA LOCAL

Como parte del análisis morfodinámico de la UMI Trece de Noviembre, se llevó a cabo el análisis multitemporal con la fotointerpretación de las 103 fotografías aéreas recopiladas, correspondientes a 15 líneas de vuelo para el período comprendido entre 1959 y 2004 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
1976	FD-87	3	29-35	1 : 10.000
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
1987	Geovial-18	22	252-257	1 : 5.300



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

Tabla 4. Listado de fotografías aéreas recopiladas por el consultor

Año	Vuelo	Faja	Fotos	Escala
1994	Geovial 65/3	32	156-160	
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
2004		2	726-729	1 : 10.700
2004		3	985-987	1: 19.900

En el Mapa 13 se muestran los procesos morfodinámicos de la UMI Trece de Noviembre, los cuales fueron definidos con base en la fotointerpretación de las fotografías aéreas mencionadas anteriormente, análisis cartográficos y la identificación en campo, los cuales fueron clasificados por año como se muestra en la Tabla 5. 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.



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

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 inactivos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión, dolinas y reptación.

Los deslizamientos y las caídas de rocas son generados por procesos de inestabilidad en las vertientes con pendientes moderadas y altas. En la zona de estudio del Proyecto Barrios Sostenibles, se encuentra que los deslizamientos se concentran en mayor proporción en el área comprendida entre la parte media y alta de la UMI. El mecanismo de falla de estos materiales varía entre superficies de falla planares y/o rotacionales, principalmente inactivos, tienen coronas con anchos que varían entre 5 m y 200 m y escarpes que pueden llegar a ser de hasta 10 m principalmente sobre los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín.

En la UMI Trece de Noviembre se encuentra que dentro del deslizamiento inactivo de mayor magnitud de la zona, se localiza el deslizamiento activo identificado en campo, el cual tiene una corona de 15 m de ancho, el cual obedece a un mecanismo de falla del tipo planar y se genera sobre el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín (Figura 41).

Las caídas de rocas son evidenciadas principalmente en las unidades geomorfológicas denominadas como Escarpes Largos Semicirculares ELSC, Laderas Largas Moderadamente Escarpadas y la Unidad de Picacho P específicamente en el Cerro Pan de Azúcar (CPA), donde aflora el Horizonte IIA de las Dunitas Milonitizadas. 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 42B). 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 43). La tercera causa que incide en la ocurrencia de este fenómeno de inestabilidad, 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 42A).



Figura 41. Deslizamiento activo comprendido dentro del deslizamiento inactivo de mayor magnitud



Figura 42. A. Macizo rocoso con discontinuidades que favorecen su caída y B. Bloques desconfiados por erosión



Figura 43. 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 se hallan en la parte alta de la UMI, al oriente de la zona de estudio, alcanzan longitudes de hasta 200 m y se generan sobre las cenizas volcánicas removilizadas. Los bloques en superficie se encuentran tanto en pendientes suaves como altas, siendo estos últimos los más susceptibles a generar caídas de rocas como se observa en la Figura 44.



Figura 44. Bloques en superficie (A) En pendientes suaves y (B) En pendientes altas

La reptación se evidenció en la unidad geomorfológica denominada como Lomos Amplios con Vertientes Moderadas LAVM, generando ondulaciones en el terreno e inclinaciones en los árboles como se muestra en la Figura 45.



Figura 45. Inclinación de los árboles por reptación

Respecto a procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI Trece de Noviembre, se identificó la presencia de un proceso morfodinámico activo asociado a la socavación en la margen izquierda de la Quebrada La Rafita (Figura 46). El proceso afecta aproximadamente 4 m de longitud del cauce de la quebrada y se encuentra removiendo materiales antrópicos. A partir de la fotointerpretación se encontraron cicatrices de movimientos en masa en las márgenes de esta quebrada, los cuales pueden estar asociados a socavación lateral del cauce.



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



Figura 46. Socavación en margen izquierda de la Quebrada La Rafita

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 (Consorcio 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 (Consorcio Microzonificación, 2006).

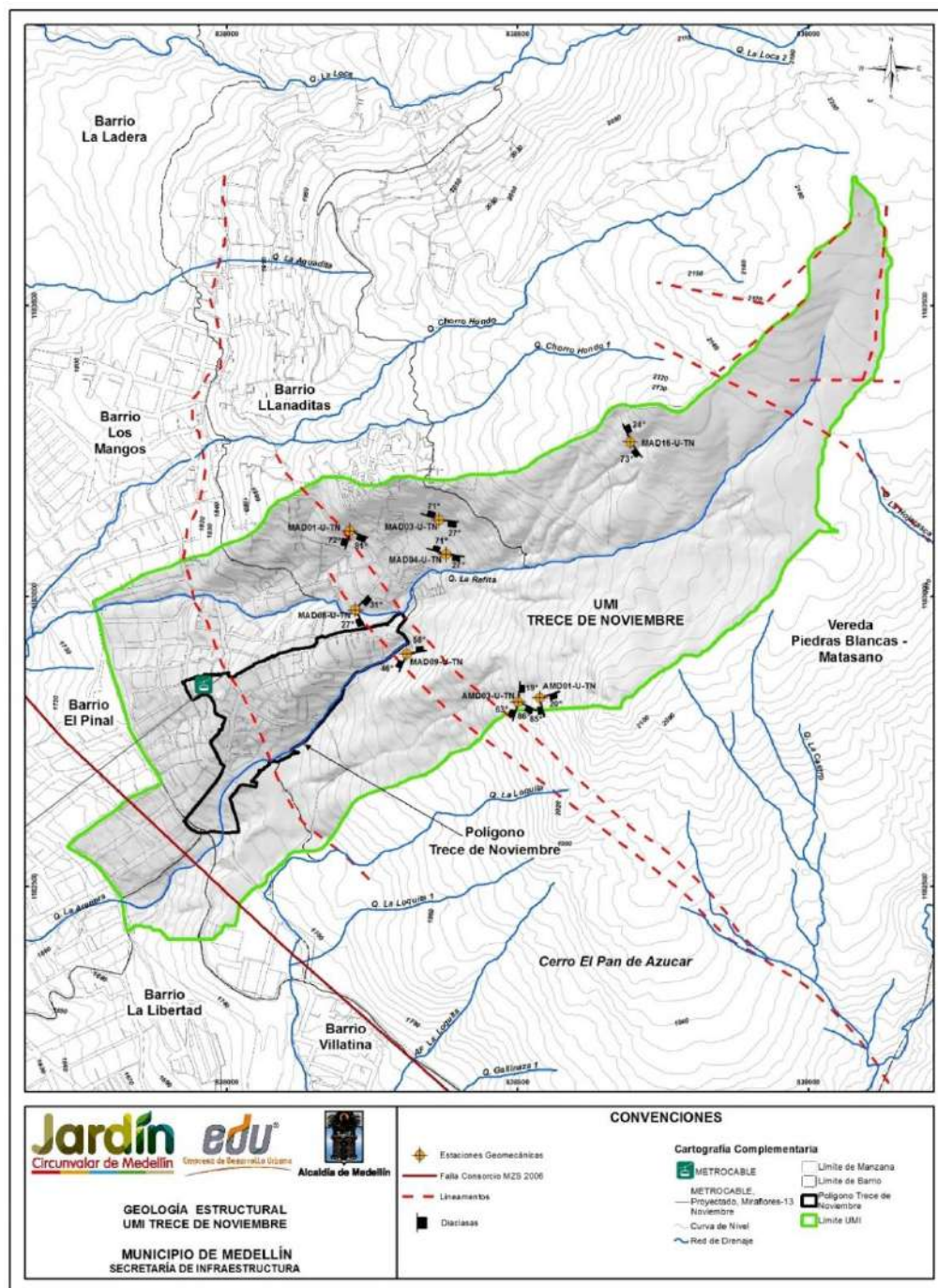
En la zona de estudio, el Consorcio Microzonificación (2006) reporta estructuras geológicas para las Dunitas de Medellín, tales como diaclasas, cizallas y fallas, cuyos datos de rumbo/buzamiento fueron tomados en el municipio de Envigado y en el corregimiento de Santa Elena, tal y como se muestra en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

Tabla 6. Estructuras en las Dunitas de Medellín reportadas por Consorcio 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 Trece de Noviembre se encontraron estructuras tales como lineamientos geológicos y discontinuidades, las cuales se muestran el Mapa 14.



Mapa 14. Estructuras encontradas en la UMI Trece de Noviembre
(12_TDNGeologiaEstructural_Medellin_C y 12_TDNGeologiaEstructural_Medellin_T)

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

Los lineamientos se identificaron a través de los análisis geomorfológicos y fotogeológicos, encontrando tendencias N-S, NE y NW. La primera de estas tendencias se relaciona con la dirección del contacto Anfibolitas Dunitas de Medellín (Falla Rodas) y la segunda coincide con la fuerte tendencia encontrada en la Quebrada La Castro. Además, cabe resaltar la posible relación de estos lineamientos geológicos con las evidencias de falla reportadas antes en este informe, lo cual lleva a concluir que las Dunitas de la zona de estudio están cizalladas.

Para la caracterización de los afloramientos del macizo rocoso evidenciado en el Polígono Trece de Noviembre, fue importante llevar a cabo el estudio del sistema de discontinuidades encontradas en cada afloramiento.

El análisis de discontinuidades, inició con el levantamiento manual en campo de los planos de discontinuidades evidenciados en las zonas de los afloramientos rocosos. 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 Trece de Noviembre.

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 descripción breve 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 Trece de Noviembre, se midieron la orientación y el buzamiento de los planos de discontinuidad. La orientación fue tomada con la notación buzamiento/dirección de buzamiento. En total se recolectaron 123 datos distribuidos en ocho estaciones geomecánicas, como se indica en la Tabla 7. 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.

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. De esta forma, se pretende entender inicialmente el patrón de fracturamiento general del macizo que aflora en la UMI del Trece de Noviembre para poder juzgarlo en función de la tectónica regional.

Posteriormente, se hizo un análisis local, comenzando con cada una de las estaciones geomecánicas. De esta forma se quiere entender si el patrón de fracturamiento general se puede particularizar por zonas.

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

Estación	Coordenadas		Numero de Datos
	Norte	Este	
MAD01-U-TN	838211.417	1183113.173	11
MAD08-U-TN	838221.625	1182977.048	16
MAD09-U-TN	838309.611	1182901.258	18
MAD03-U-TN	838364.974	1183131.887	13
MAD04-U-TN	838377.173	1183072.517	5
MAD16-U-TN	838693.932	1183266.079	9
AMD04-U-TN	838501.451	1182818.700	40
AMD01-U-TN	838538.922	1182825.883	12

La Figura 47 presenta el diagrama de polos y en la Figura 48 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.

Tabla 8. Familias de discontinuidades considerando todos los datos levantados en campo

Familia	Buzamiento/Dirección Buzamiento	Rumbo/Buzamiento	Concentración
1	18/124	N34°E/18°SE	>3.42
2	58/287	N17°E/58°NW	2.83 – 3.42
3	85/204	N66°W/85°SW	>3.42
4	78/246	N24°W/78°SW	2.83 – 3.42

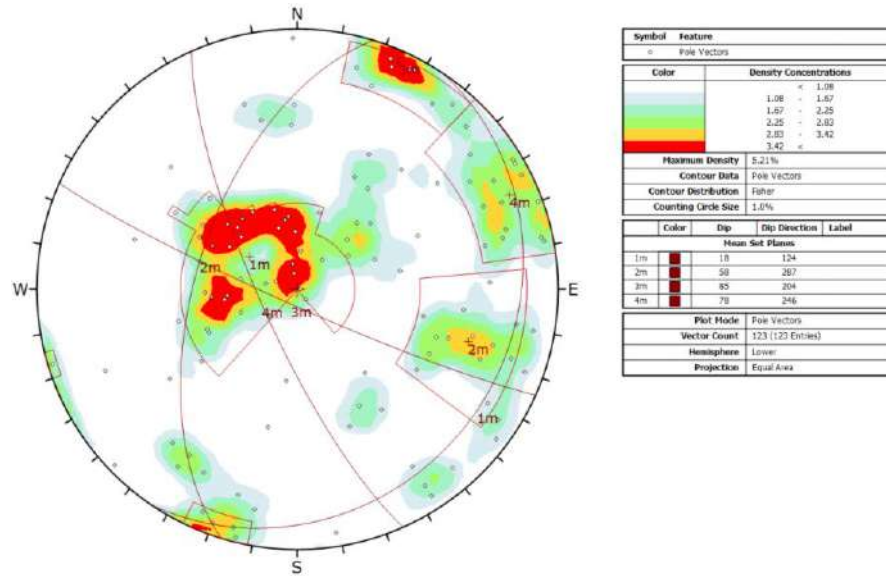


Figura 47. Diagrama de polos con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

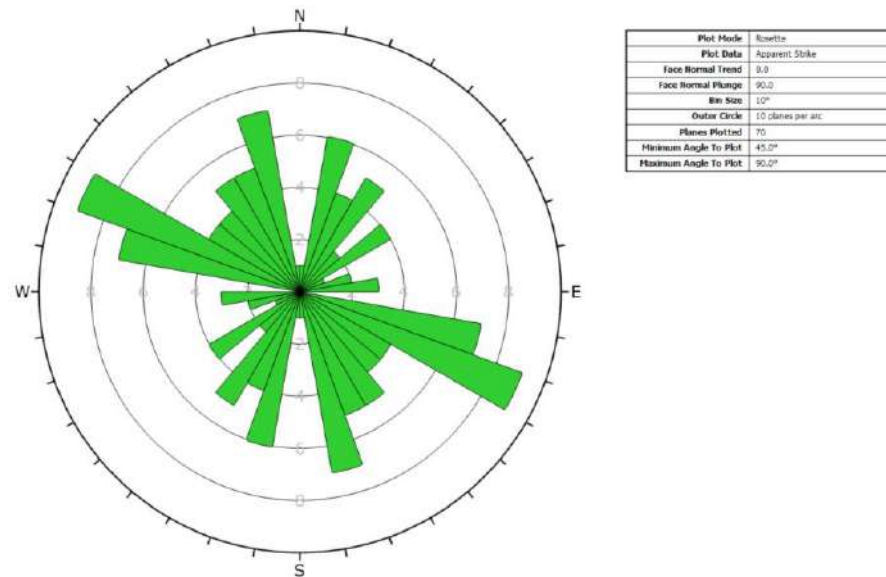




Figura 48. Diagrama de rosas con todos los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades

Los resultados indican que la zona de estudio está dominada por las familias de discontinuidades mostradas en la Tabla 8, siendo la Familia 3 la de mayor predominancia, además de poderse anotar lo siguiente:

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ Las Familias 1 y 4 no se relacionan de forma directa con las estructuras geológicas reportadas a nivel regional en las Dunitas, lo que indica que corresponden a estructuras locales del macizo rocoso. Las discontinuidades regionales reportadas por el Consorcio Microzonificación (2006) se relacionan fuertemente con la Falla Rodas que marca el contacto Dunita - Anfibolita en el sector norte del Valle de Aburrá.
- ✓ La Familia 2 (N17°E/58°NW) es semejante a la cizalla (N10°E/65°W) reportada por el Consorcio Microzonificación (2006) en la Vereda Pericos del municipio de Envigado.
- ✓ La Familia 3 (N66°W/85°SW) presenta semejanzas con el contacto fallado entre la Dunita y la Anfibolita en la zona de Santa Elena, el cual ha sido reportado por Consorcio Microzonificación (2006) con disposición N80°W/45°SW.

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 espacial en algunas de las familias principales observadas en el análisis general.

Para efectos del análisis y para considerar medidas representativas, en algunos casos se sumó la información de las estaciones más cercanas siendo este el caso de las Estaciones MAD03-U-TN y MAD04-U-TN y las Estaciones AMD04-U-TN y AMD01-U-TN. Los diagramas de polos para cada una de las estaciones geomecánicas se muestran en la Figura 49 y en la Figura 50.

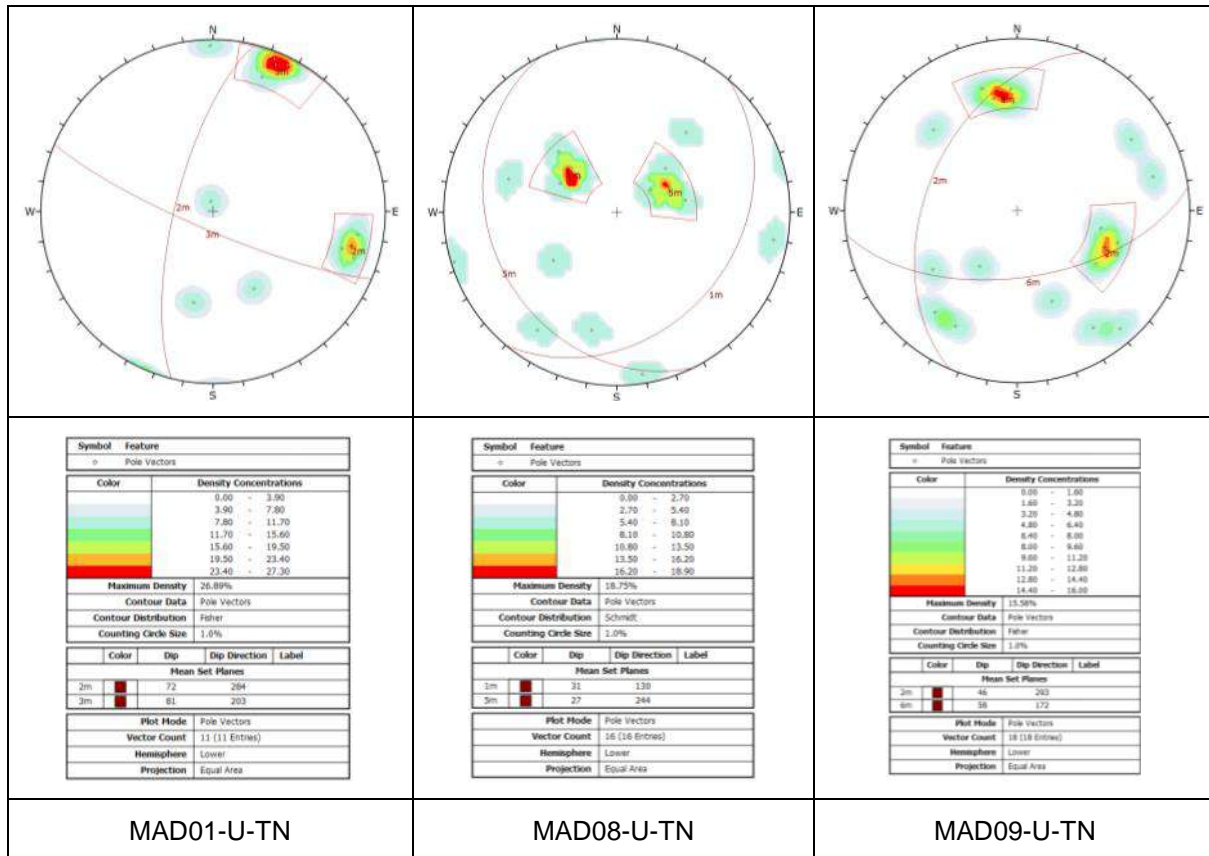


Figura 49. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD01-U-TN, MAD08-U-TN y MAD09-U-TN

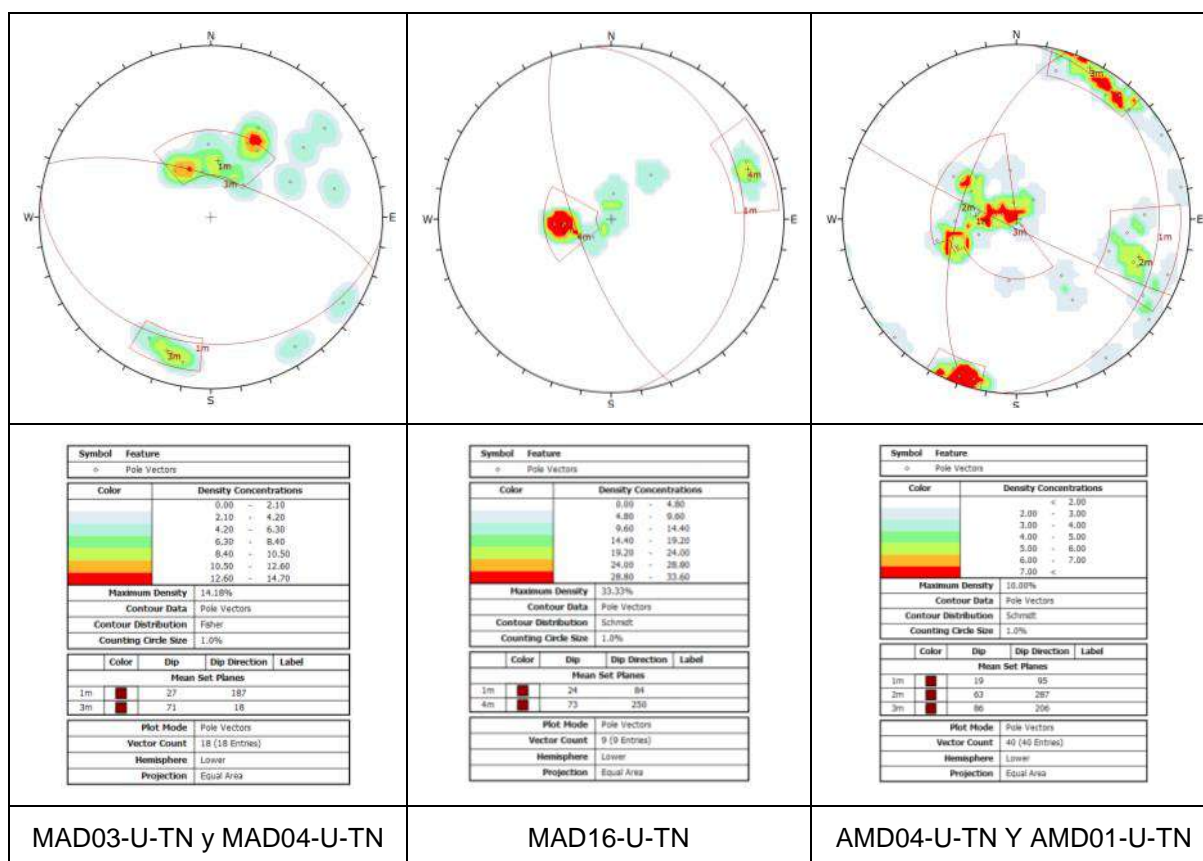


Figura 50. Diagrama de polos con los datos obtenidos en el levantamiento de discontinuidades en las Estaciones MAD03-U-TN, MAD04-U-TN, MAD16-U-TN, y MAD01-U-TN

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 9 y en la Figura 51 los respectivos resultados.

Tabla 9. 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

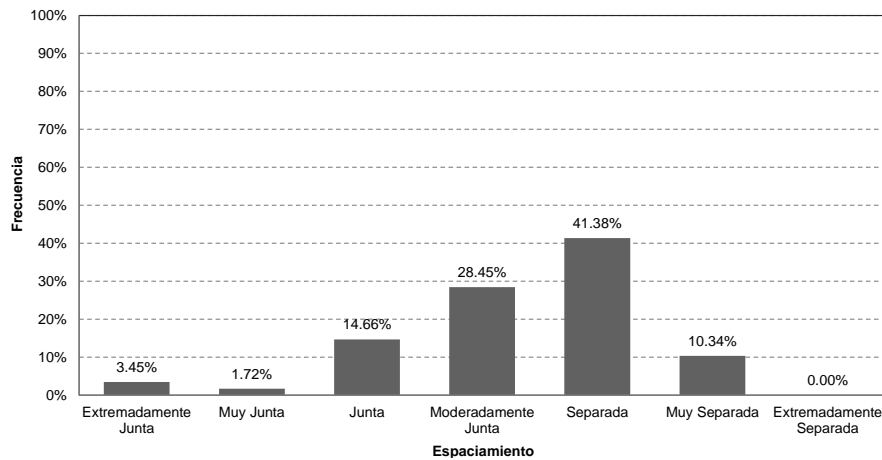


Figura 51. Análisis de la característica de espaciamiento de las discontinuidades

En los levantamientos realizados predominan discontinuidades entre moderadamente juntas y separadas las cuales acaparan el 70% de la totalidad de los levantamientos. No obstante también se puede observar que casi el 50% de las discontinuidades presentan un espaciamiento entre extremadamente junto a moderadamente junto lo que permite inferir de que se trata de un macizo con un nivel de fracturamiento importante.

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 10. Se obtuvieron finalmente los resultados que se muestran en la Figura 52.

Tabla 10. 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

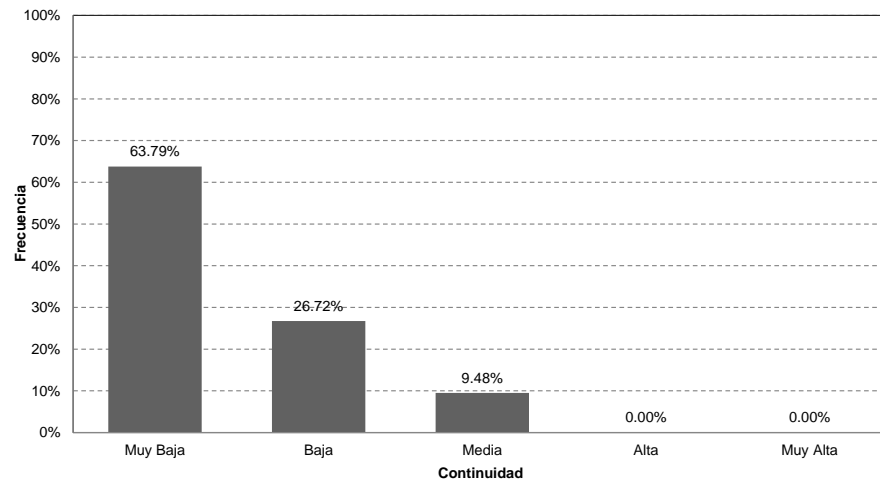


Figura 52. Análisis de la característica de continuidad de las discontinuidades

En términos de la continuidad, el 64% de las discontinuidades levantadas presentaron una continuidad muy baja la cual corresponde a planos con longitudes de hasta 1.0 m. El 36% restante presentaron continuidades bajas y medias, es decir entre 1.0 m a 10 m.

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 11, con base en los cuales se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura 53.

Tabla 11. 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

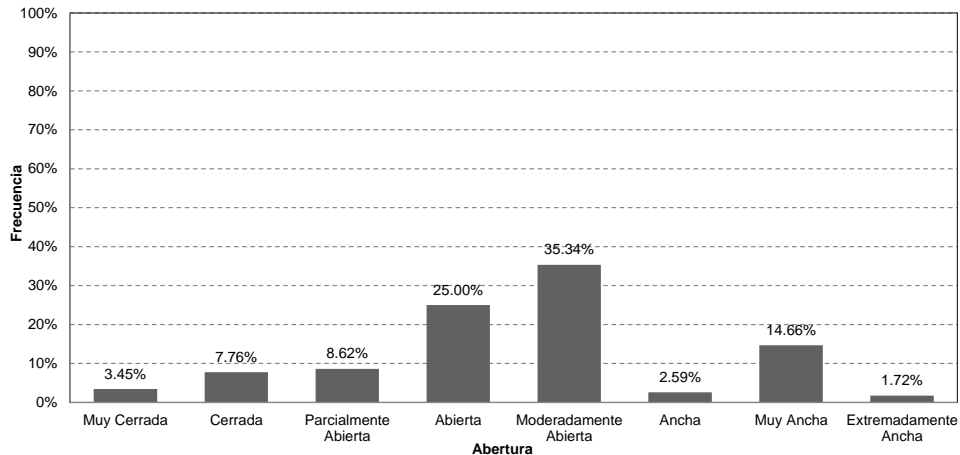


Figura 53. Análisis de la característica de abertura de las discontinuidades

Las discontinuidades se presentaron predominantemente abiertas 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 favorece la abertura de estos planos se asocian a la meteorización y disolución en la roca que amplían la zona discontinua.

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 Trece de Noviembre se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 54.

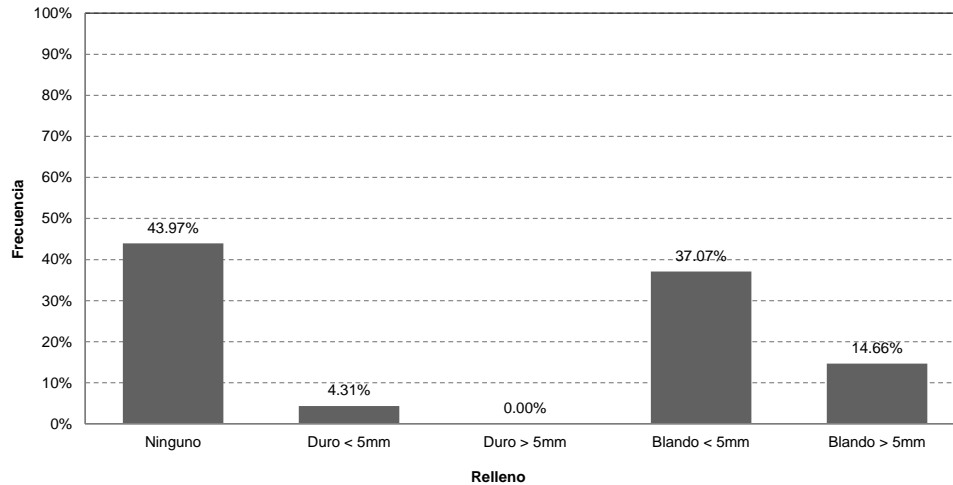


Figura 54. Análisis de la característica de relleno de las discontinuidades

En lo que respecta al relleno, la mayoría de las discontinuidades conformada por más del 55%, presentan algún tipo de relleno al interior de la abertura. Este relleno puede tener más o menos de 5 mm y generalmente se presenta como un material limoso u arcilloso muy húmedo y plástico que debe ser producto de la meteorización y precipitación del suelo. Finalmente, el 44% restante de las discontinuidades no presentaron ningún tipo de relleno.

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 Trece de Noviembre se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 55.

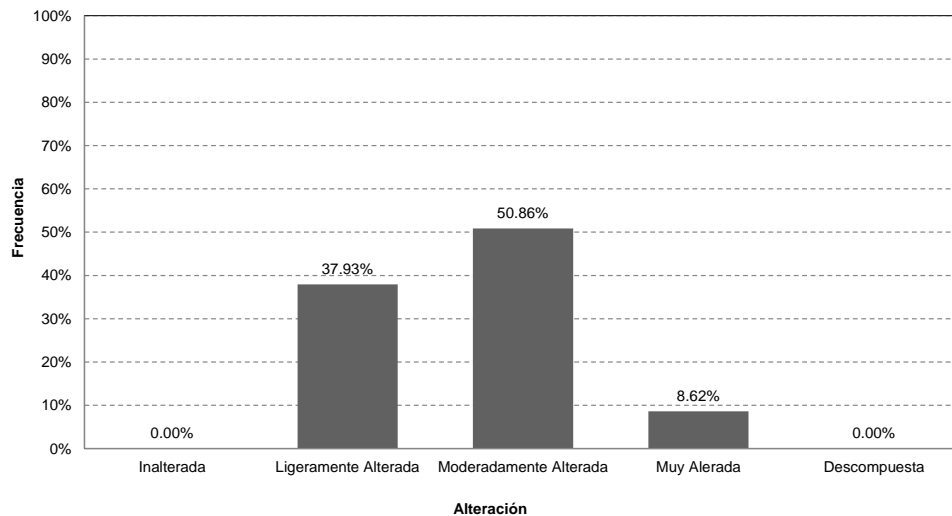


Figura 55. Análisis de la característica de alteración de las discontinuidades

Las 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 56. 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 Trece de Noviembre se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 57. En términos de la rugosidad las discontinuidades se presentaron predominantemente onduladas con un 45%, planas con un 33% y escalonadas con un 22%. Entre los tres tipos se resalta que la mayoría de las discontinuidades se presentan rugosas.

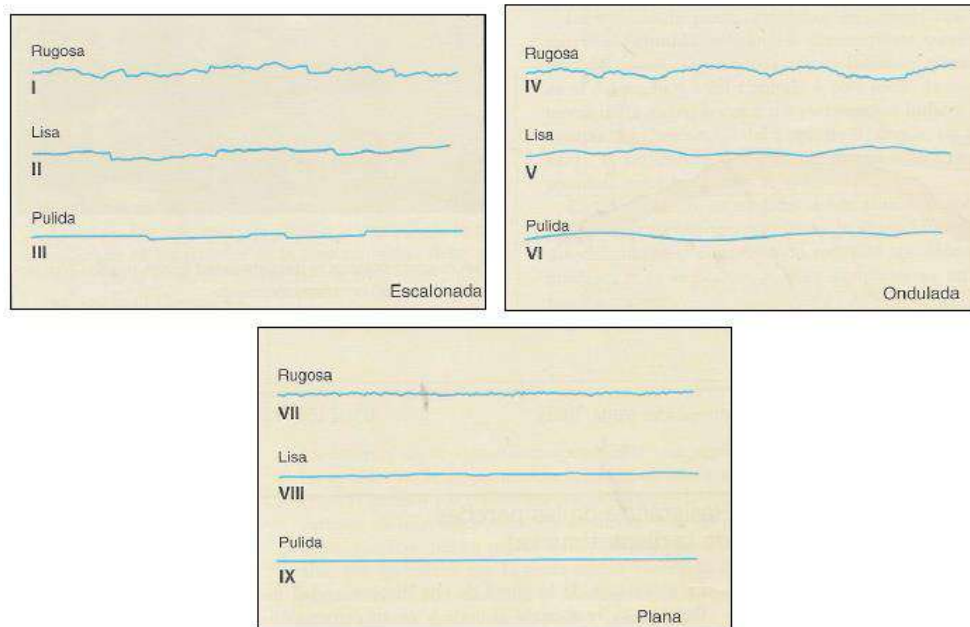


Figura 56. Esquema para calificar la rugosidad de una discontinuidad (Gonzales de Vallejo, 2002)

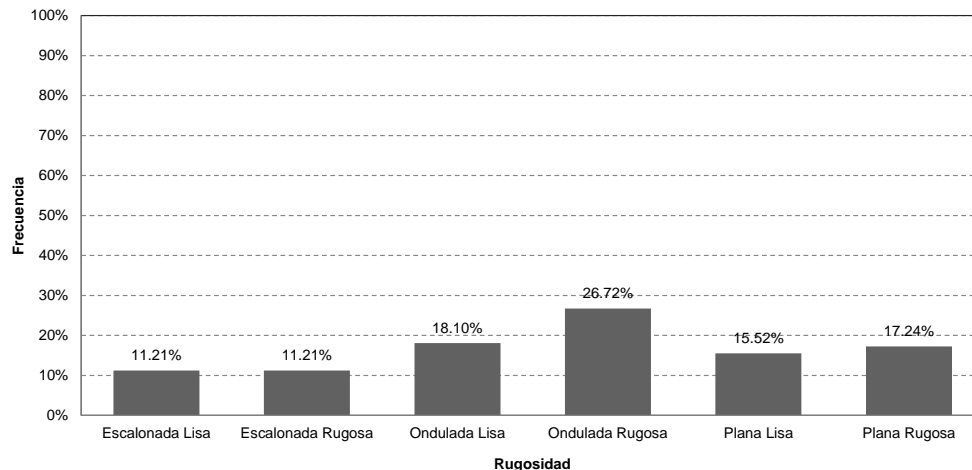


Figura 57. Análisis de la característica de la rugosidad de las discontinuidades

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 Trece de Noviembre se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 58.

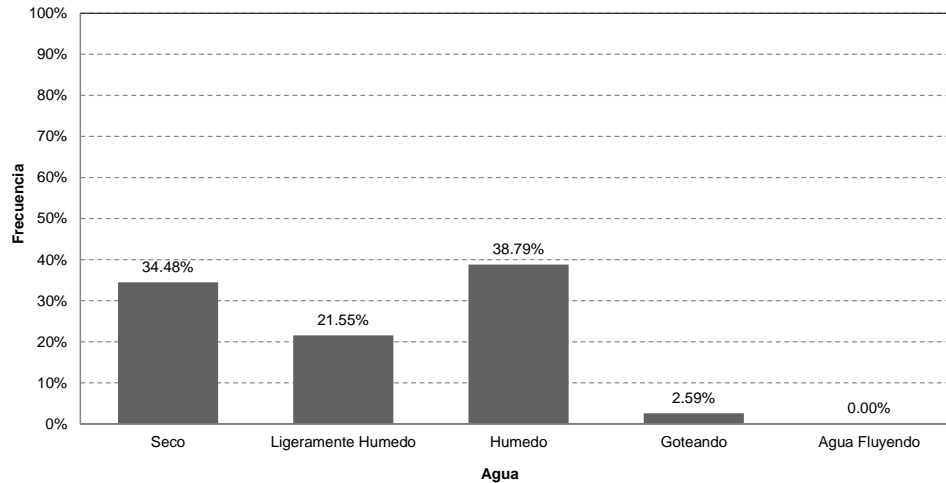


Figura 58. Análisis de la característica de agua en las discontinuidades

Desde el punto de vista de las condiciones de humedad identificadas en las discontinuidades, la mayoría de las mismas presentaron condiciones húmedas y ligeramente húmedas. Las demás discontinuidades se encontraron completamente secas.

6.2.9 Resistencia de las paredes

Es la resistencia a la compresión confinada, 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 Trece de Noviembre se obtuvieron los resultados que se presentan en la Figura 59.

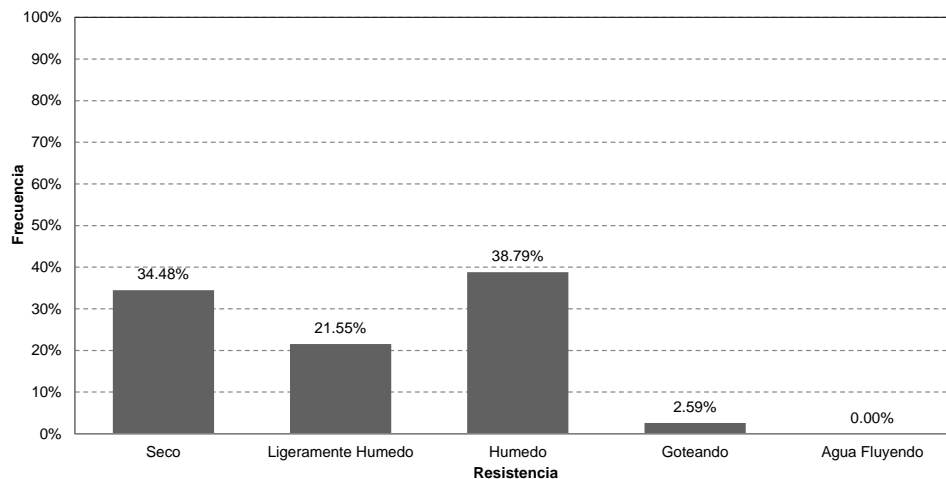


Figura 59. Análisis de la característica de resistencia de las paredes de las discontinuidades

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 la ladera posterior a la parte más alta del polígono analizado, ubicada en la parte media de la UMI, tal como se muestra en la Figura 60 y en la Tabla 12. Se seleccionó esta ladera considerando que en las visitas de campo se observó evidencia de caídas de bloques en la zona.

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.

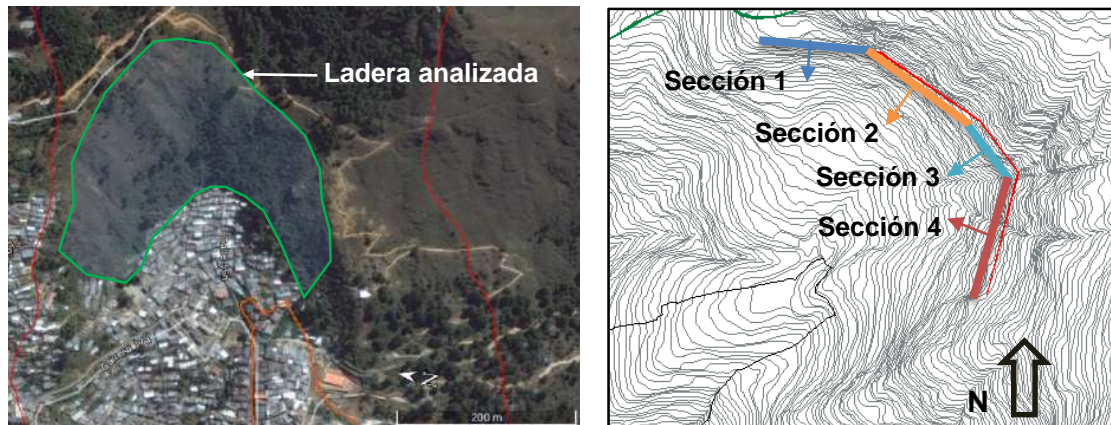


Figura 60. Ladera analizada en parte media de la UMI Trece de Noviembre

Tabla 12. Buzamiento y dirección del buzamiento de las secciones analizadas

Sección	Buzamiento	Dirección del Buzamiento
1	32	186
2	45	215
3	40	233
4	36	285

Los resultados gráficos de los análisis realizados se muestran de la Figura 61 a la Figura 64, mientras que los resultados numéricos se presentan en la Tabla 13. En las observaciones de la tabla se incluyen las probabilidades de falla para las familias más críticas de cada mecanismo.

Como se puede observar en el resumen de resultados (Tabla 13), el mecanismo de falla predominante para las cuatro secciones de la ladera analizadas es el volcamiento por la base, con probabilidades que van del 6% al 15%, de acuerdo con los datos recolectados para la UMI Trece de Noviembre.

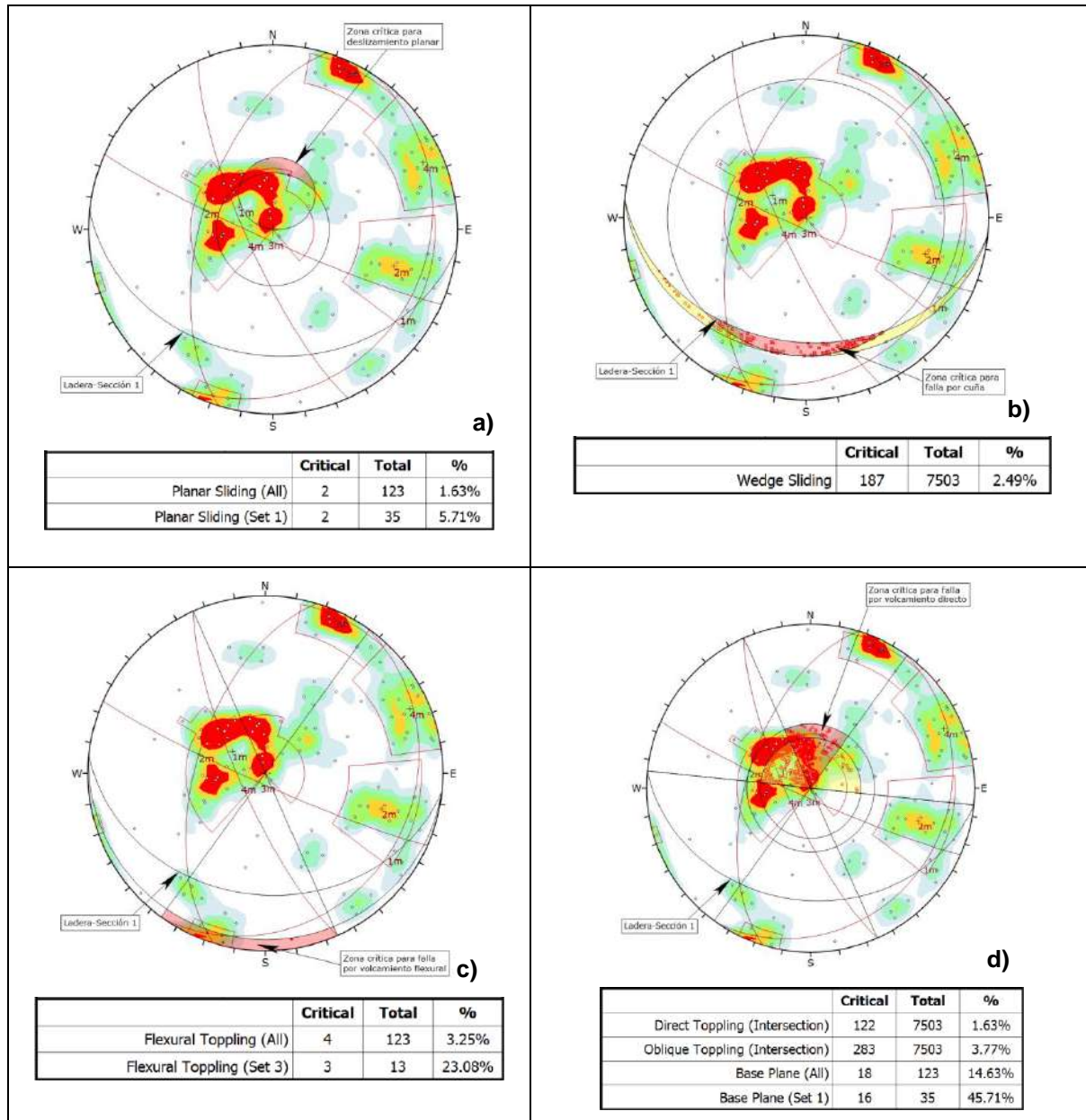


Figura 61. Análisis cinemático Sección 1 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

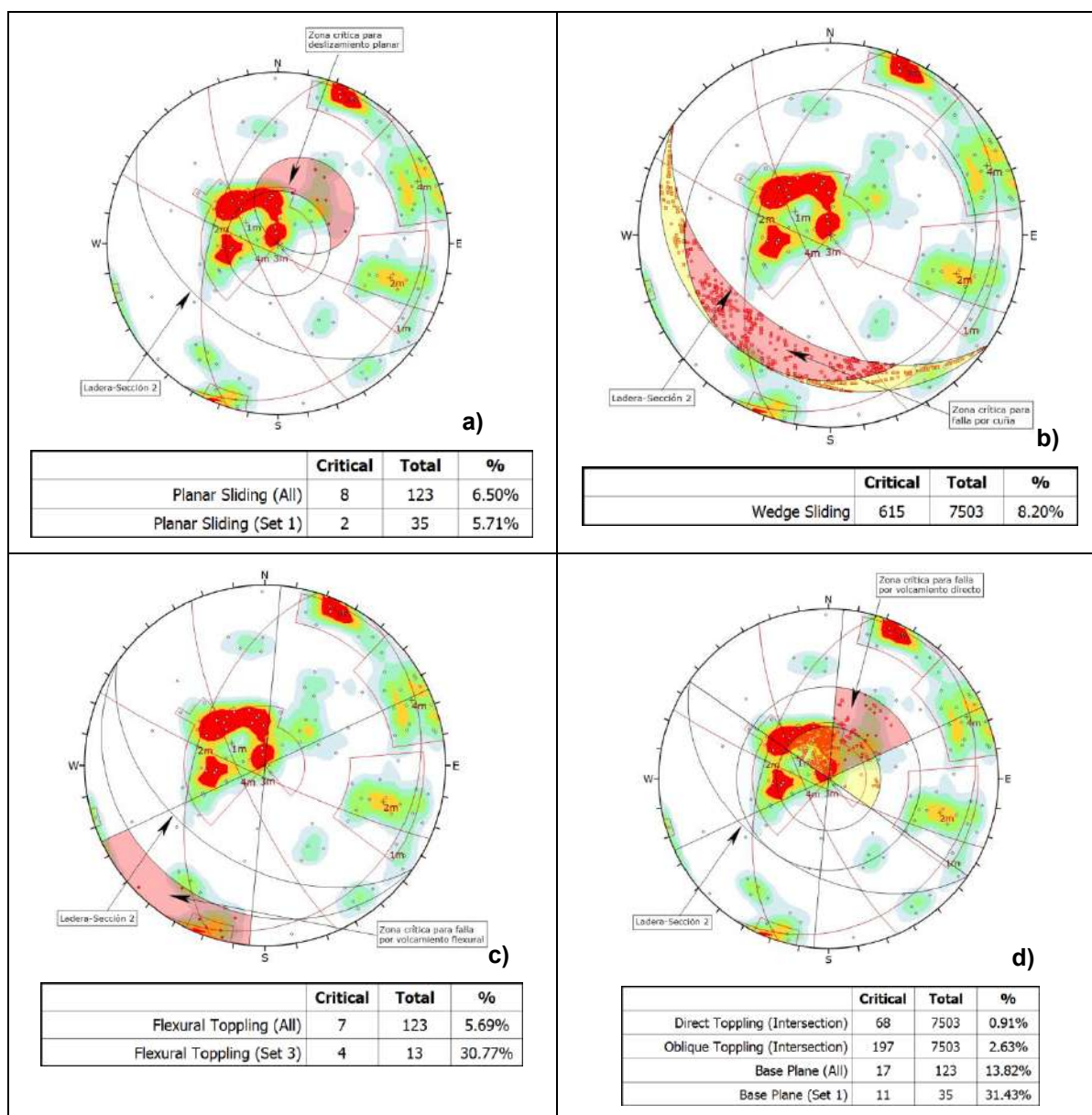


Figura 62. Análisis cinemático Sección 2 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

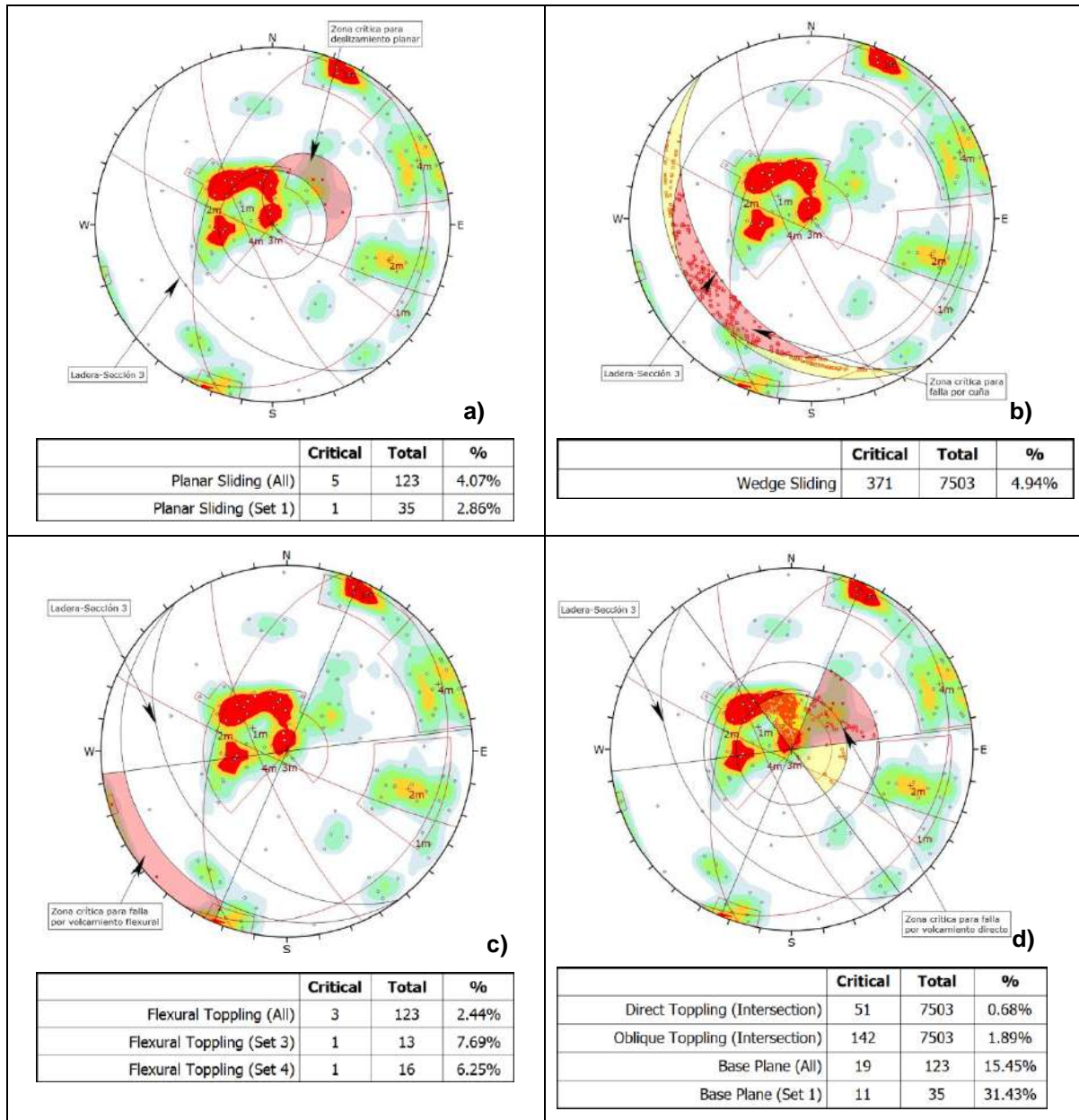


Figura 63. Análisis cinemático Sección 3 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

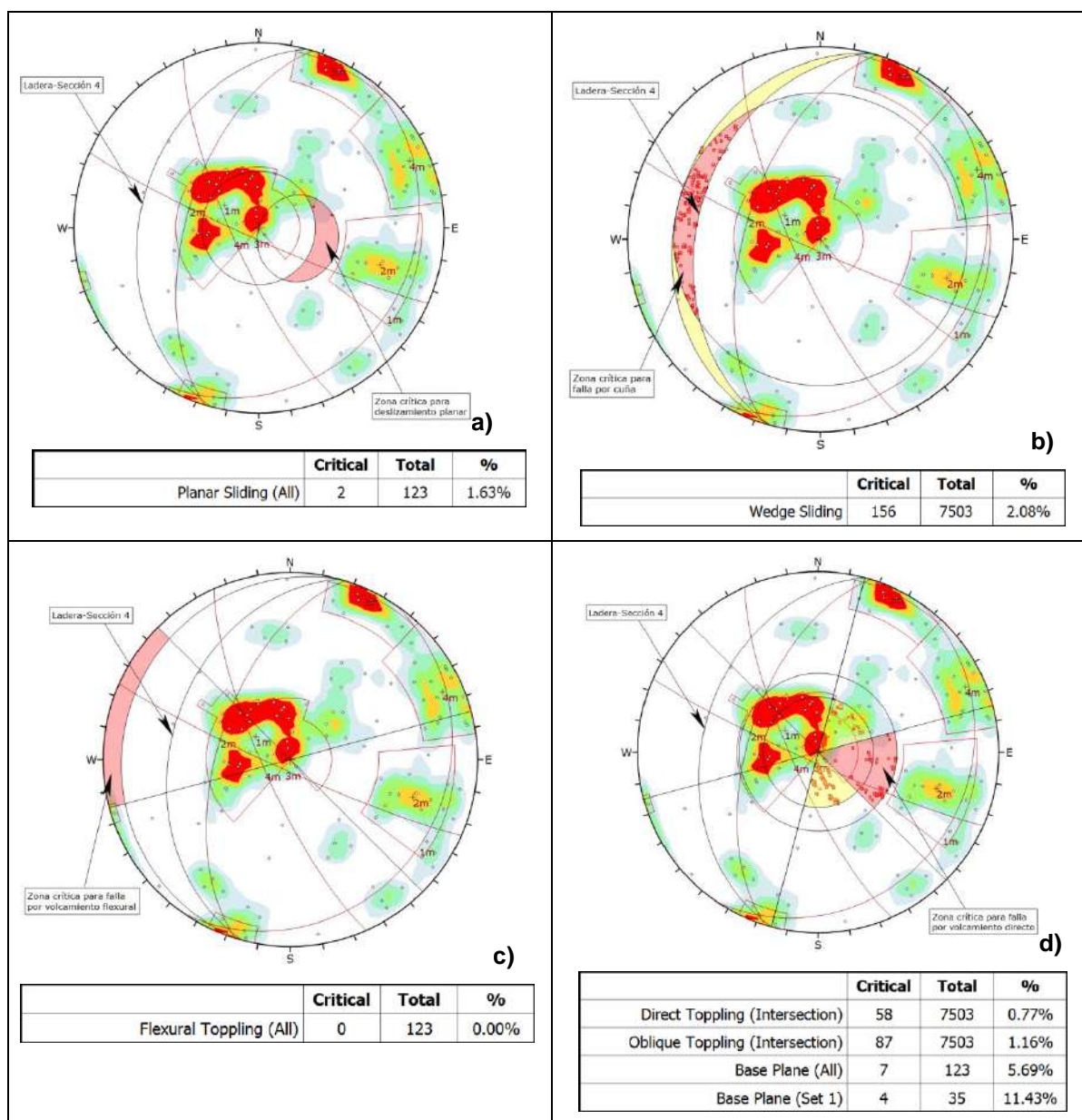


Figura 64. Análisis cinemático Sección 4 de la ladera analizada. a) Deslizamiento planar, b) Falla por cuña, c) Volcamiento flexural y d) Volcamiento directo

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

Tabla 13. Resumen resultados análisis cinemático

Sección	Falla planar	Falla por cuña	Volcamiento flexural	Volcamiento directo	Volcamiento oblicuo	Volcamiento por base	Observaciones
1	1.63%	2.49%	3.25%	1.63%	3.77%	14.63%	Falla planar familia 1 (5.71%), Volcamiento Flexural familia 3 (23.08%), Volcamiento por base familia 1 (45.71%).
2	6.50%	8.20%	5.69%	0.91%	2.63%	13.82%	Falla planar familia 1 (5.71%), Volcamiento flexural familia 3(30.77%), Volcamiento por base familia 1 (31.43%).
3	4.07%	4.94%	2.44%	0.68%	1.89%	15.45%	Falla planar familia 1 (2.86%), Volcamiento flexural familia 3 (7.69%) y familia 4 (6.25%), Volcamiento por base familia 1 (31.43%).
4	1.63%	2.08%	0%	0.77%	1.16%	5.69%	Volcamiento por base familia 1 (11.43%)

De acuerdo con los resultados obtenidos para el análisis cinemático de la UMI Trece de Noviembre (Tabla 13) se puede concluir lo siguiente:

- ✓ El mecanismo de falla predominante para las cuatro secciones de la ladera analizadas es el volcamiento (mecanismo por la base), con probabilidades que van del 6% al 15%. La sección 3 es la más crítica para este tipo de falla.
- ✓ El otro mecanismo de falla predominante es el de falla por cuña, con probabilidad entre 2% y 8%, siendo la sección 2 la más crítica.
- ✓ El mecanismo de falla planar presenta probabilidades entre 1% y 6%, siendo la sección 2 la más crítica.

7. EVALUACIÓN DE LA APTITUD GEOLÓGICA

7.1 ASPECTOS GENERALES

Basados en el Código de Laderas (AMVA, 2012), el cual propone que una vez realizados los estudios geológicos y geomorfológicos para la UMI de estudio, se proceda a la realización del mapa de zonificación de la aptitud geológica de la UMI Trece de Noviembre.

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 resume además en la Figura 65.

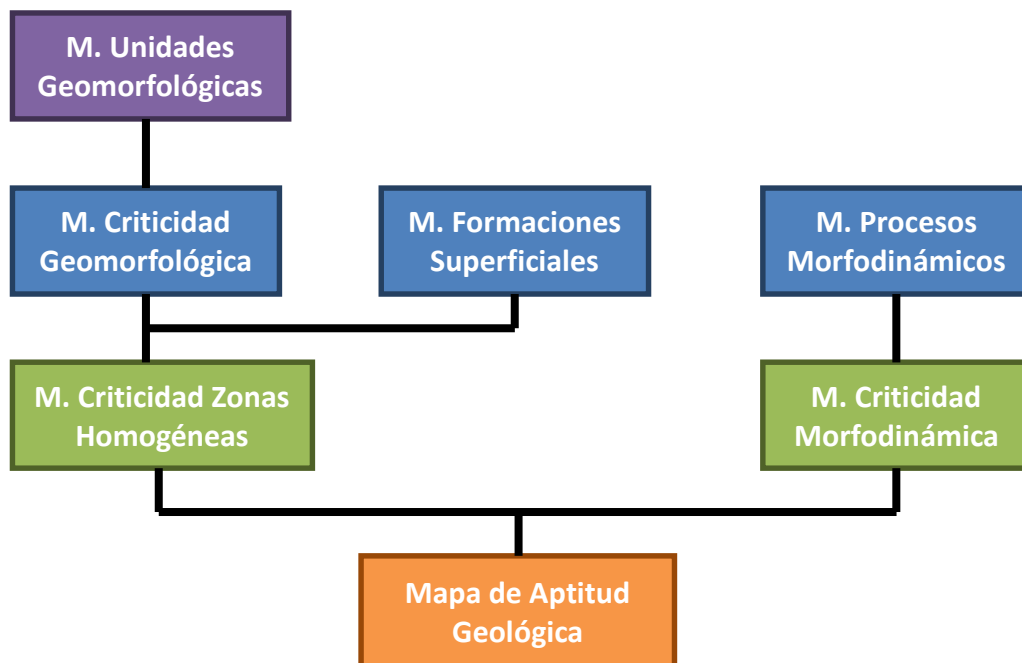


Figura 65. Metodología utilizada para elaboración de Mapa de Aptitud Geológica

Como se observa en la Figura 65, 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 por último 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 14). 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).

Tabla 14. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Unidades Geomorfológicas

Unidad Geomorfológica	Nivel de Criticidad
Peldaño Alto	1
Peldaño Bajo	1
Escarpe Corto Semicircular	3
Escarpe Largo Semicircular	3
Lomo Amplio con Vertientes Fuertes	3
Lomo Estrecho con Vertientes Fuertes	3
Ladera Corta Escarpada	3
Vertiente Larga Moderadamente Escarpada	3
Lomo Amplio con Vertientes Suaves	2
Lomo Amplio con Vertientes Moderadas	2
Lomeríos Estrechos	2
Picacho	3
Superficie Antrópica	1
Superficies Suaves sobre Depósitos Moderadamente Incisados	1
Superficies con Baja Incisión	1
Lomeríos Estrechos	2
Vertiente Corta Poco Incisada	2
Vertiente Escarpada	3

En el Mapa 15 se muestra el análisis de la criticidad geomorfológica finalmente obtenido para la UMI Trece de Noviembre.

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 15.



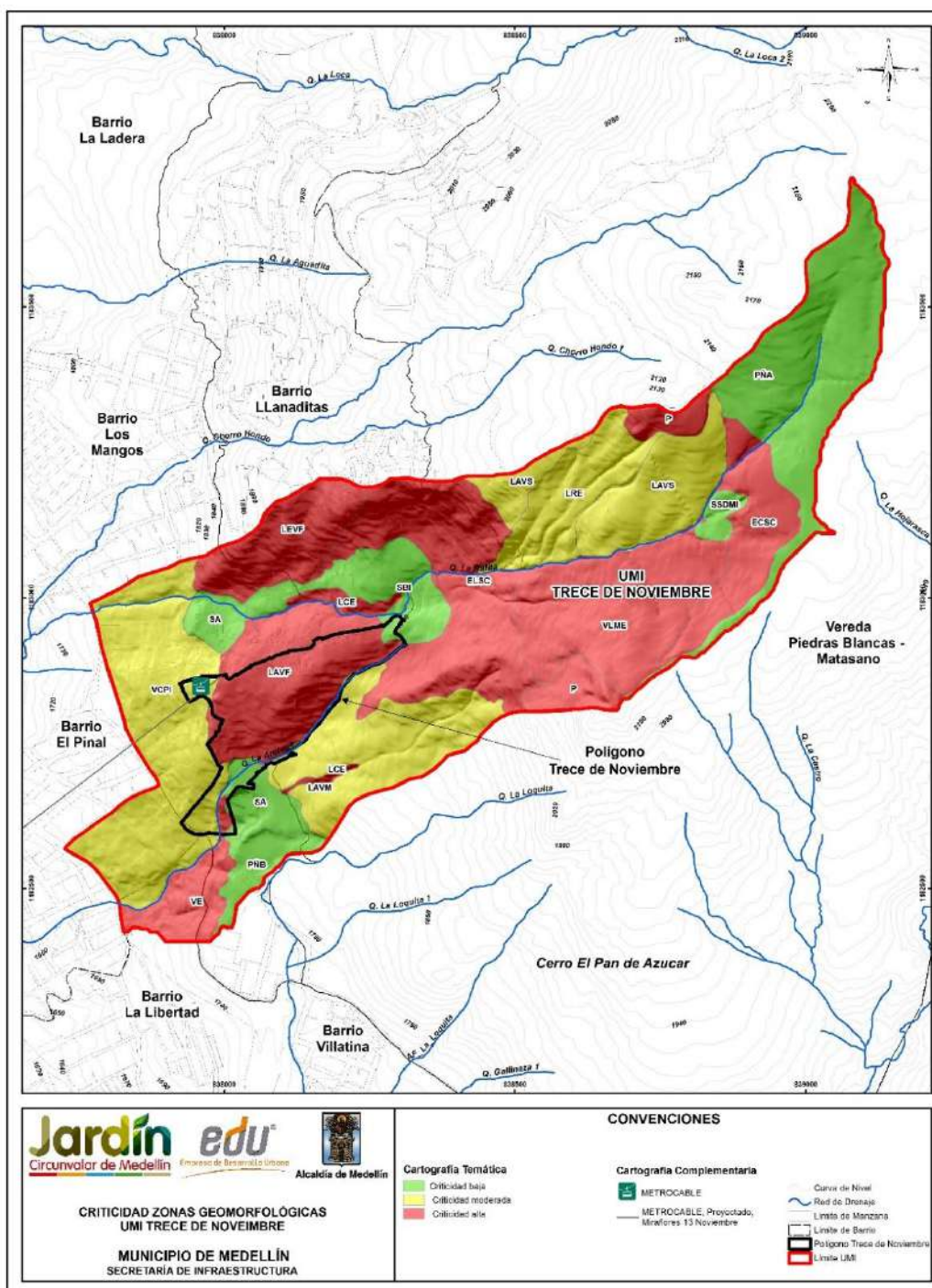
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

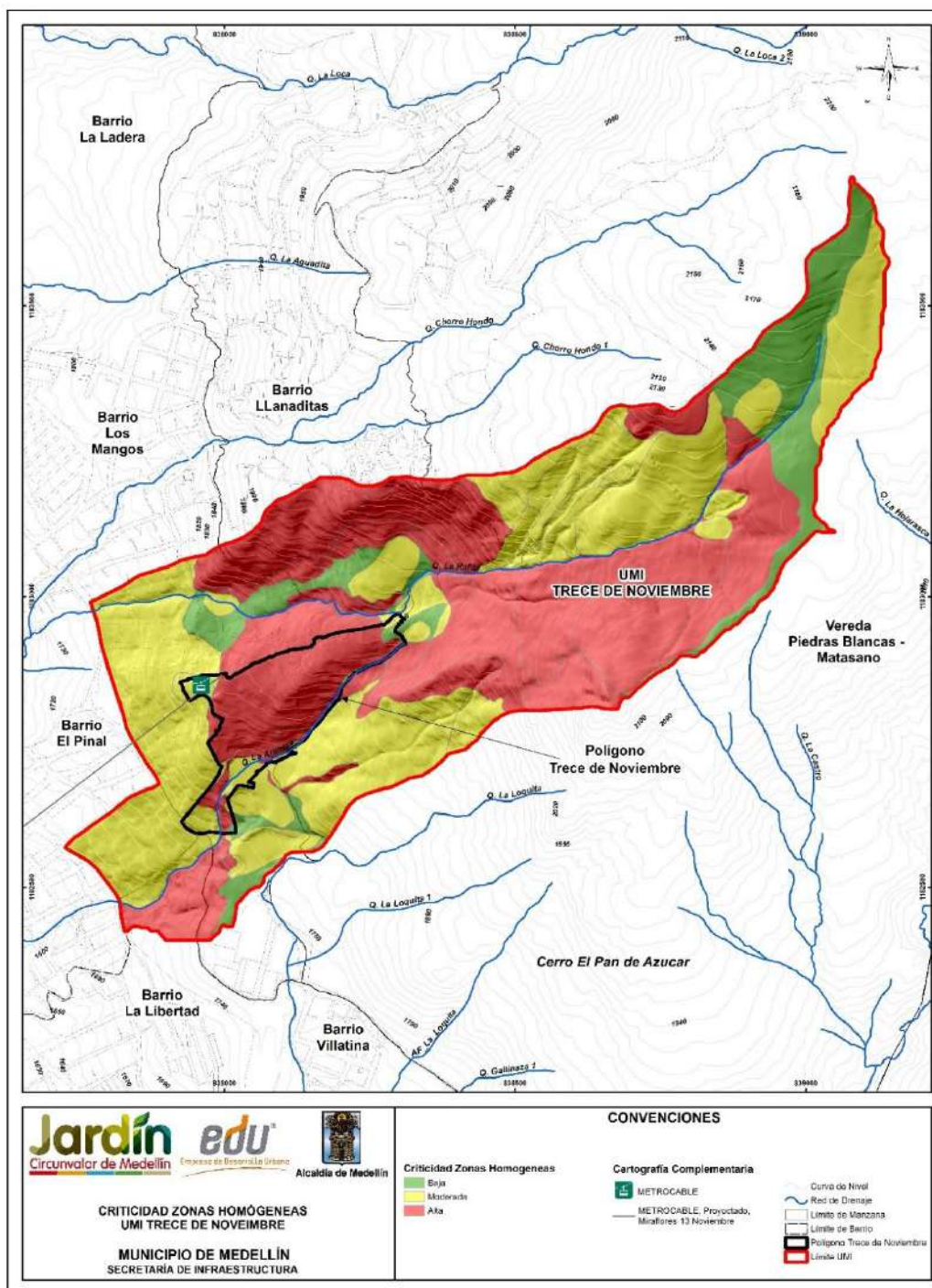
Tabla 15. Matriz de valoración de niveles de criticidad de las Zonas Homogéneas

Criticidad Unidad Geomorfológica	Formación Superficial	Criticidad Zona Homogénea
1	Lleno Antrópico	2
	Depósitos de vertientes (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	2
	Suelo Residual de Dunitas	1
	Horizonte IIA de Dunitas	2
2	Lleno Antrópico	3
	Depósitos de vertientes (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	2
	Suelo Residual de Dunitas	2
	Horizonte IIA de Dunitas	2
3	Lleno Antrópico	3
	Depósitos de vertientes (deslizamiento, coluvial, flujo de lodos y/o escombros)	3
	Suelo Residual de Dunitas	3
	Horizonte IIA de Dunitas	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 15. Criticidad geomorfológica UMI Trece de Noviembre
(TDNCriticidadZonasGeomorfológicas_Medellin_C)



Mapa 16. Criticidad de zonas homogéneas UMI Trece de Noviembre
(TDNCriticidadZonasHomogeneas_Medellin_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

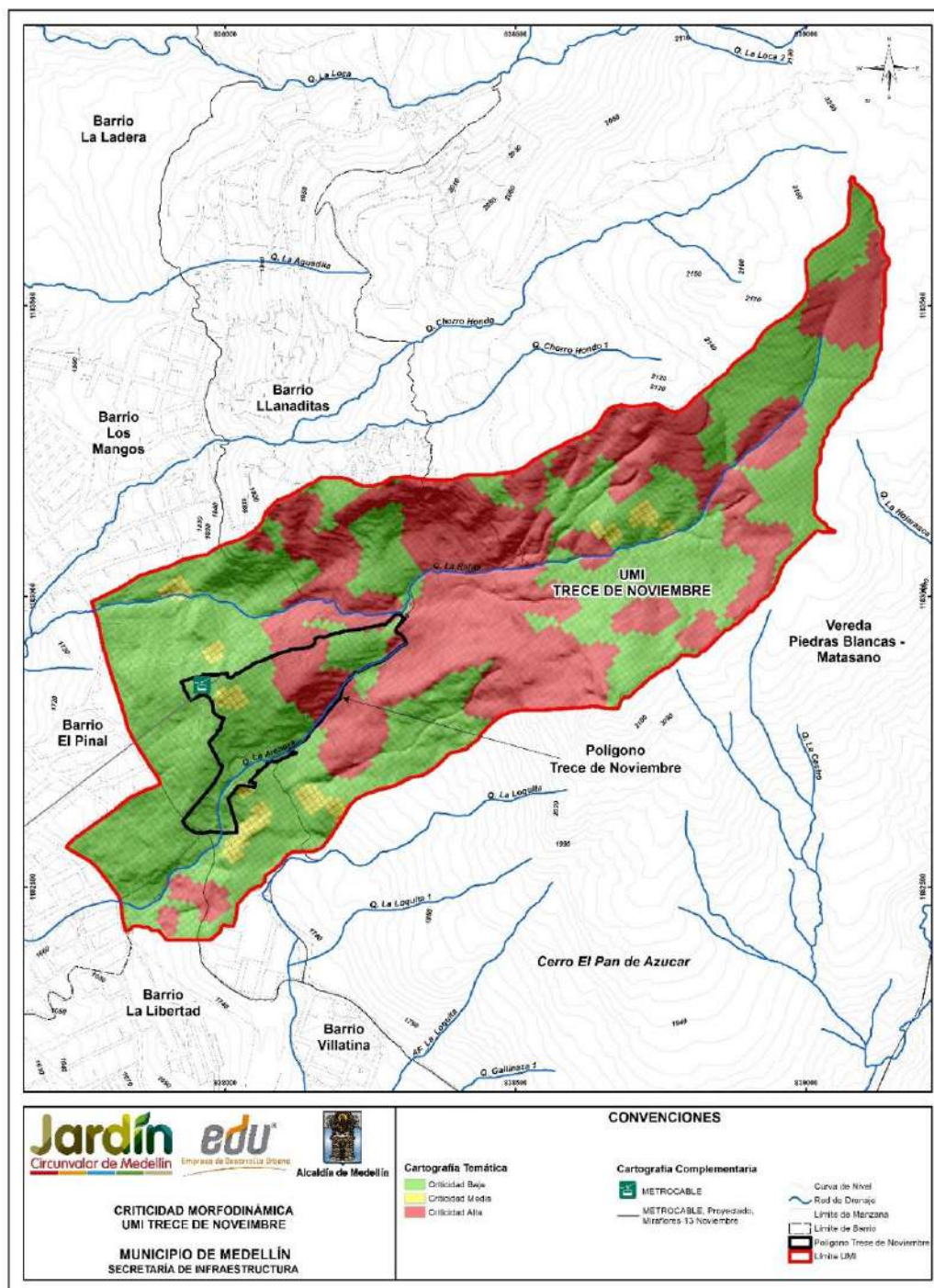
- ✓ Densidad baja cuando se tiene menos que un proceso morfodinámico dentro de la UCT.
- ✓ Densidad moderada cuando se tiene un proceso morfodinámico dentro de la UCT.
- ✓ Densidad alta cuando se tiene más de un proceso morfodinámico dentro de la UCT.

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 siguientes criterios de decisión:

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). El Mapa 17 presenta el análisis de la criticidad morfodinámica de la UMI Trece de Noviembre 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 morfolodinámica UMI Trece de Noviembre
(TDNCriticidadMorfolodinamica_Medellin_C)

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 (A) 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 (ARM), 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 (ARA), 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 (NA), 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.

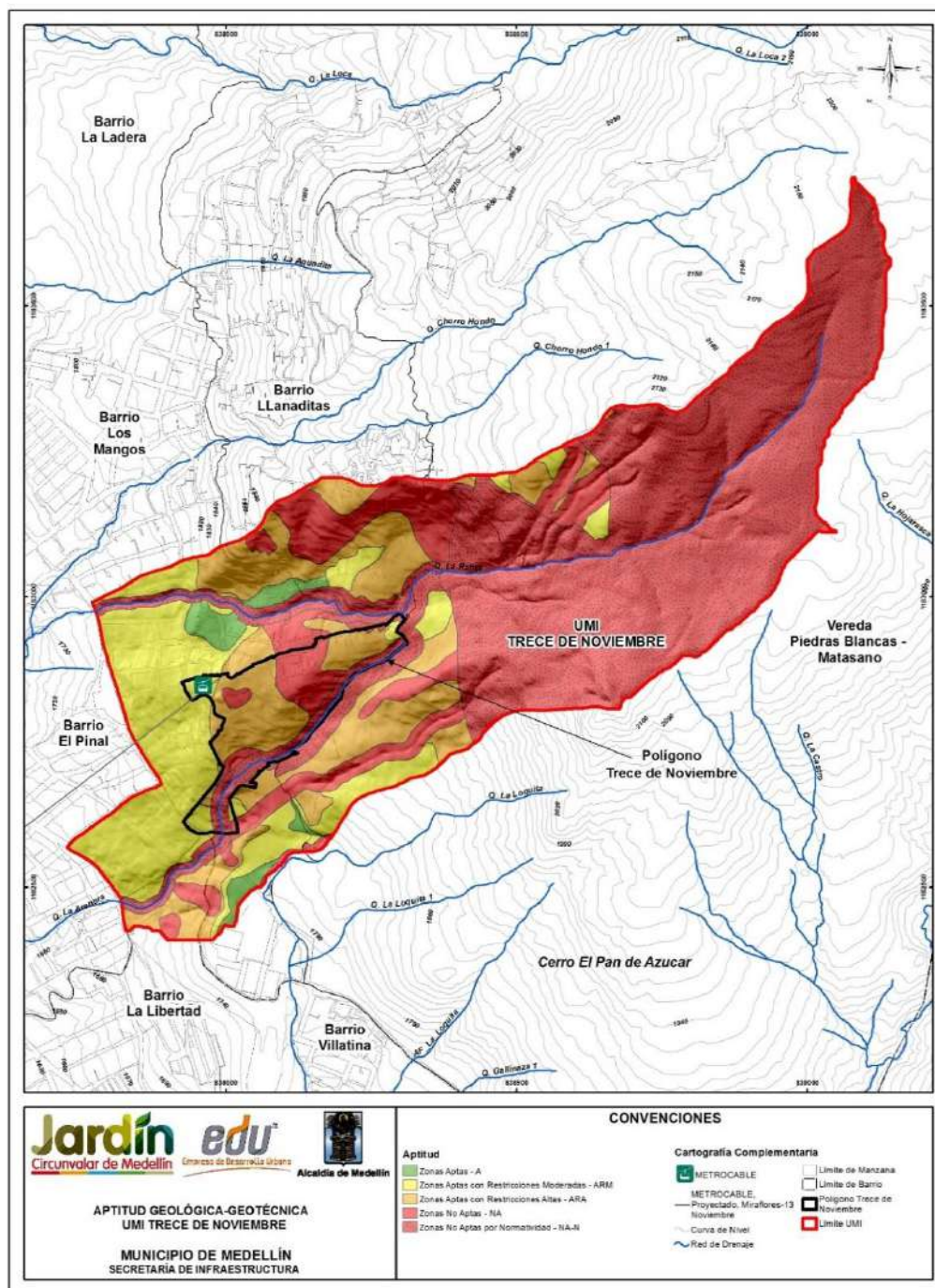
En el Mapa 18 se presenta el mapa de aptitud geológica de la UMI Trece de Noviembre obtenido con la metodología descrita anteriormente. Este mapa está refinado con base en lo observado en campo y teniendo en cuenta las áreas que por norma tengan restricción, como lo son las áreas protegidas y los retiros a corrientes de agua, según las especificaciones del POT (2014) del municipio de Medellín, como se muestran en el

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

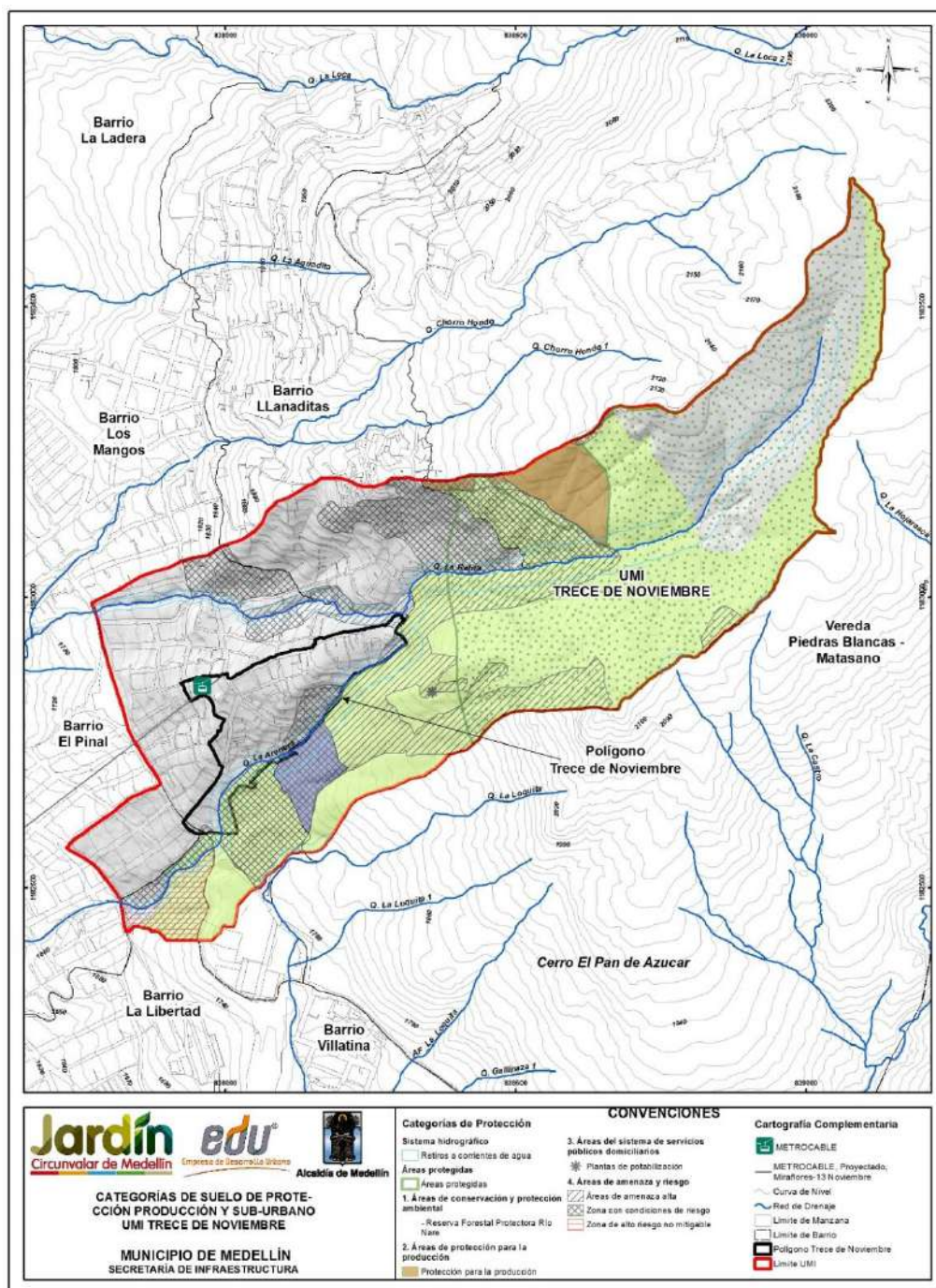
Mapa 19 y Mapa 20. Además, se delimitaron otros retiros de quebradas que no han sido reportados en el Mapa de Estructura Ecológica del Acuerdo 48 de 2014, debido a la escala de trabajo.

De acuerdo con el mapa finalmente obtenido, se tienen entonces las siguientes observaciones:

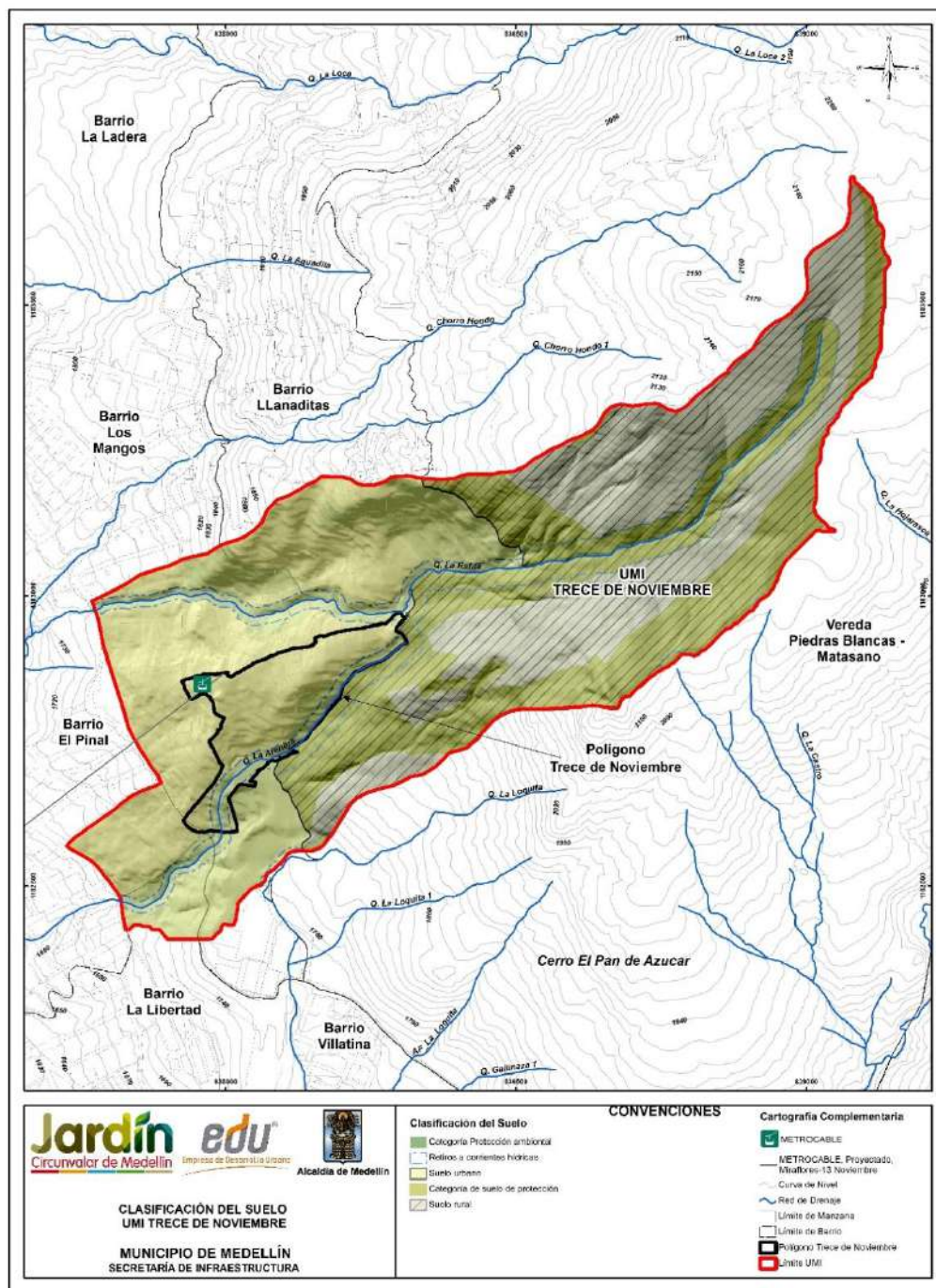
- ✓ Las zonas aptas se encuentran hacia el sector occidental y suroccidental de la UMI.
- ✓ Las zonas aptas con restricciones moderadas son las que más predominan en la UMI y ocupan el nororiente y occidente del límite del Polígono Trece de Noviembre.
- ✓ Las zonas aptas con restricciones altas se encuentran distribuidas en gran parte del área de interés y corresponden a la mayor parte de ocupación del polígono en estudio.
- ✓ Las zonas no aptas se concentran en la parte media de la UMI y hacia el suroccidente del polígono. Dentro de estas zonas se consideraron también los retiros de algunas vaguadas que no se presentaban en el POT (2014), dándoles una franja total de 30 m.
- ✓ Las zonas no aptas por normatividad se encuentran en la parte alta de la UMI, hacia el nororiente del sitio en estudio y en los alrededores de las Quebradas La Rafita y La Arenera. Estas zonas corresponden a la Reserva Forestal Protectora Río Nare y retiros de Quebradas La Rafita y La Arenera, definidas por el POT (2014) del Municipio de Medellín según el Acuerdo 48 de 2014, como se identifica en el Mapa 19 y Mapa 20. El retiro de la quebrada La Rafita es de 20 m en los 270 m de trayecto en la parte baja de la UMI y de 45 m en la parte media y alta de la UMI. El retiro de la quebrada La Arenera presenta tres franjas diferentes, en la parte baja de la UMI tiene 20 m de retiro a lo largo de 175 m, luego a lo largo de un tramo de 190 m tiene un retiro total de 30 m y 305 m de trayecto en la parte media de la UMI tiene una franja de retiro total de 45 m.



Mapa 18. Aptitud Geológica UMI Trece de Noviembre
(18_TDNaptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_C y
18_TDNaptitudGeologicaGeotecnica_Medellin_T)



Mapa 19. Categorías de suelo de protección, producción y suburbano (POT, 2014)
(15_TDN Categorias Suelo Proteccion Produccion y Suburbano_Medellin_C y
15_TDN Categorias Suelo Proteccion Produccion y Suburbano_Medellin_T)



Mapa 20. Clasificación del suelo (POT, 2014)
(14_TDNClasificaciodelSuelo_Medellin_C y 14_TDNClasificaciodelSuelo_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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 66 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 66. Localización esquemática 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 67 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:

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

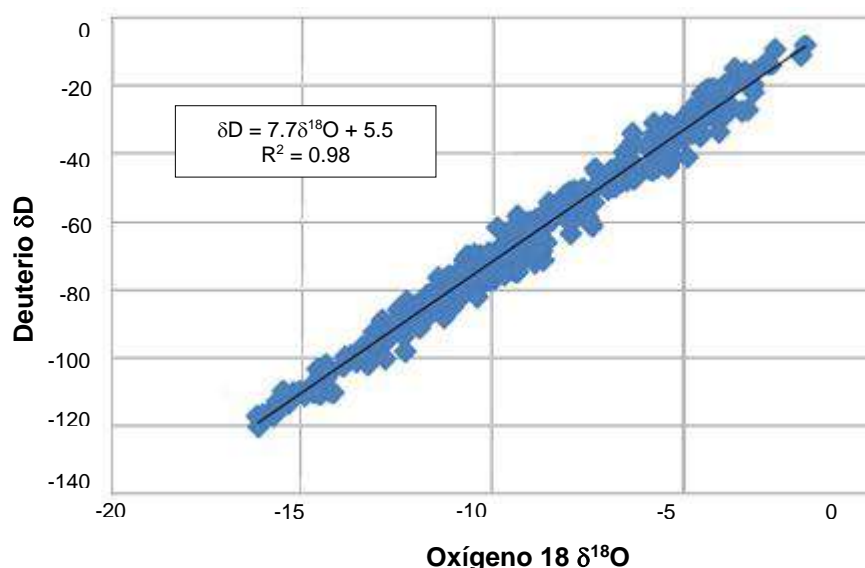


Figura 67. Recta Meteórica para Colombia

Existen otras versiones (Rodríguez, 1990) de la ecuación de la Recta Meteórica para Colombia, aunque se prefiere la presentada 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 68). Las muestras de agua de manantiales fueron colectadas durante un lapso seco al finalizar el mes de junio de 2015.

Específicamente en la Tabla 16 y en la Tabla 17 se presenta la información obtenida por medio de las muestras ensayadas en este proyecto. El gráfico de la Figura 69 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 67 vs. Figura 69). 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 68. Pluviómetros instalados alrededor de la zona de estudio

Tabla 16. 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 17. 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
EDU-09	03/07/15	838772.26	1182739.33	1950	-78.7	-10.96
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

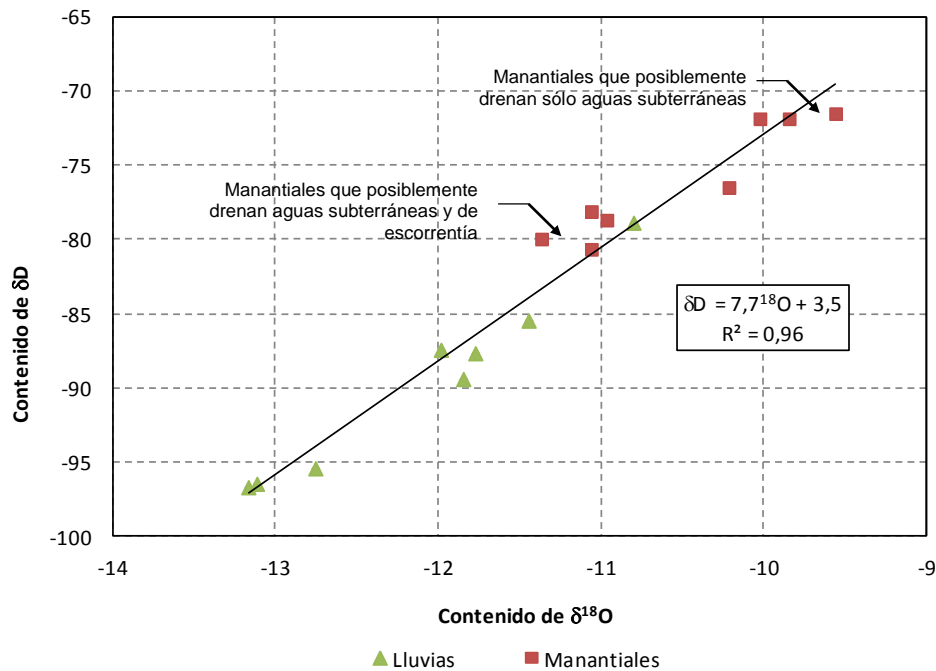


Figura 69. Relación Deuterio : Oxígeno 18 en muestras de la Comuna Nororiental

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 equinociales 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 70 y la Figura 71 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 17 y complementados con los de la Tabla 18. A partir de la información de dichas tablas fueron elaboradas la Figura 72 y la Figura 73.

Tabla 18. 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

Tabla 18. Contenido isotópico en manantiales y quebradas de la ladera nororiental del Valle de Aburrá

Muestra	Fecha	Este	Norte	Cota	‰δD	‰δO18	Observaciones
OPB05	26/05/14	837340.15	1186344.78	1655	-82.6	-11.53	Escorrentía en cuenca de Qda. La Bermejala
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 este mismo capítulo.

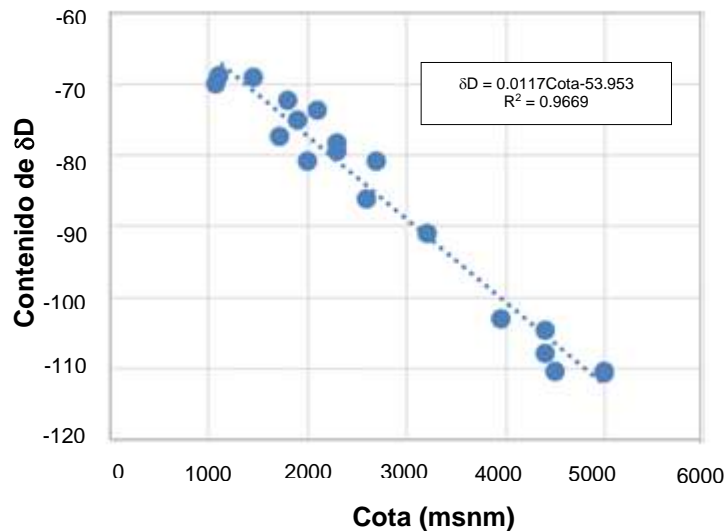


Figura 70. Variación del contenido de Deuterio en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

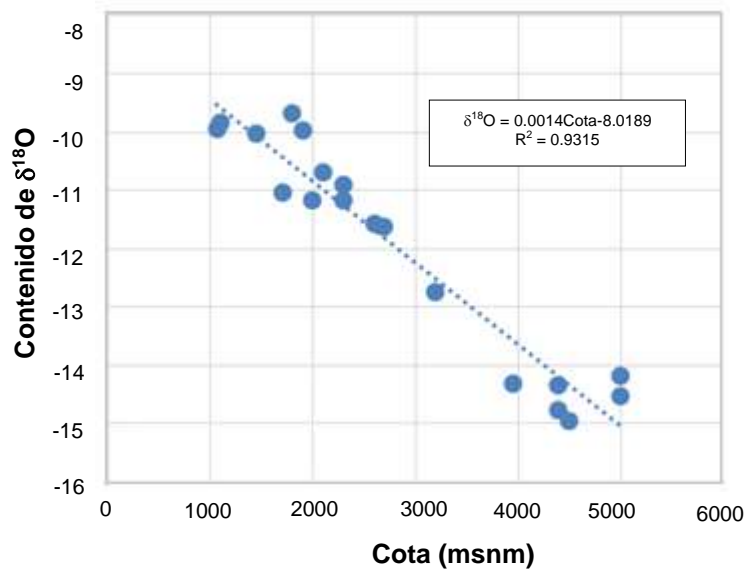


Figura 71. Variación del contenido de Oxígeno 18 en el agua lluvia con la altura de precipitación en Colombia

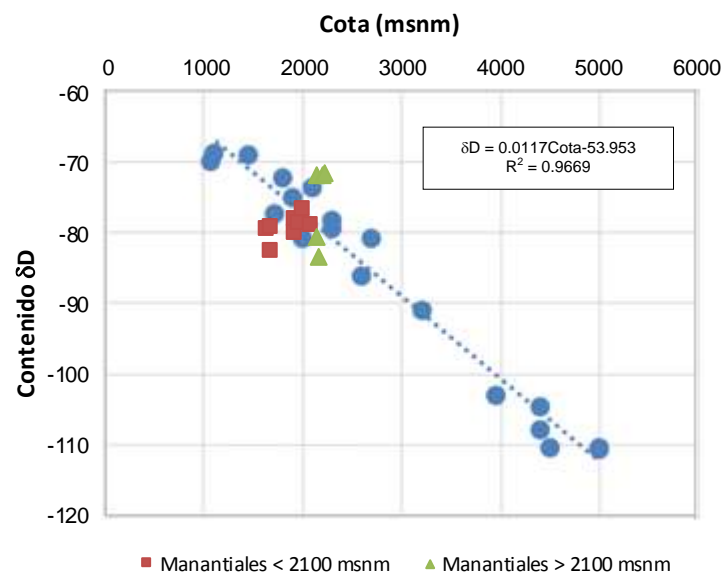


Figura 72. Variación del contenido de Deuterio con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

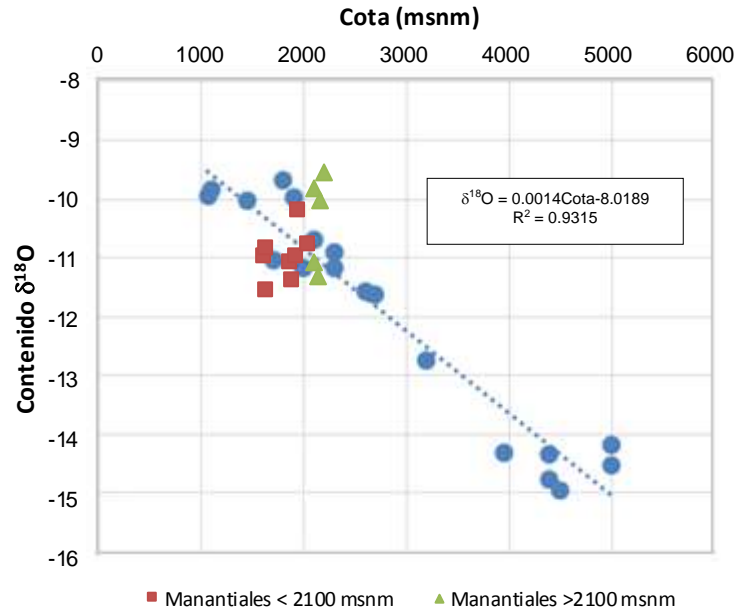


Figura 73. Variación del contenido de Oxígeno 18 con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en la Comuna Nororiental

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 19 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 19. 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	

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
--	---	--

Tabla 19. 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-06	06/09/12	841774.04	1179529.16	2346	-82.4	-11.49	Amagamiento con aporte de agua de 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°	-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° 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 19. 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-297		839410.99	1180180.91	1880	-78.3	-10.85	Vía Medellín Rionegro
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 74 se presenta un gráfico preparado con los datos presentados en la Tabla 19 junto con los de este proyecto presentados en la Tabla 17. 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.

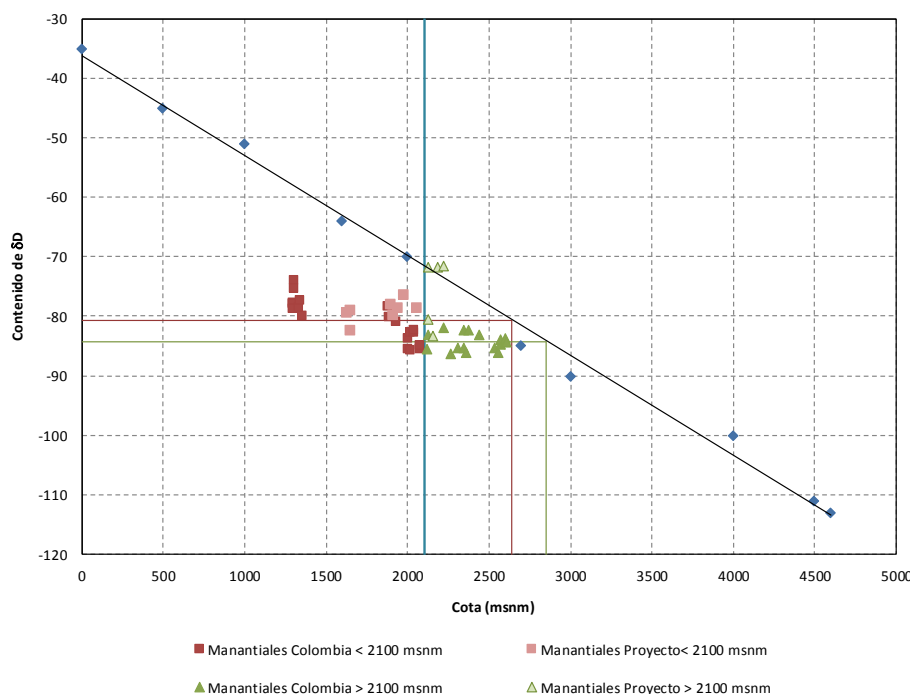




Figura 74. Variación del contenido de Deuterio en agua subterránea con la altura de precipitación en Colombia combinada con contenido de Deuterio en manantiales en el Valle de Aburrá (Hoyos, 2012)

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 74 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 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.

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 75. 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.

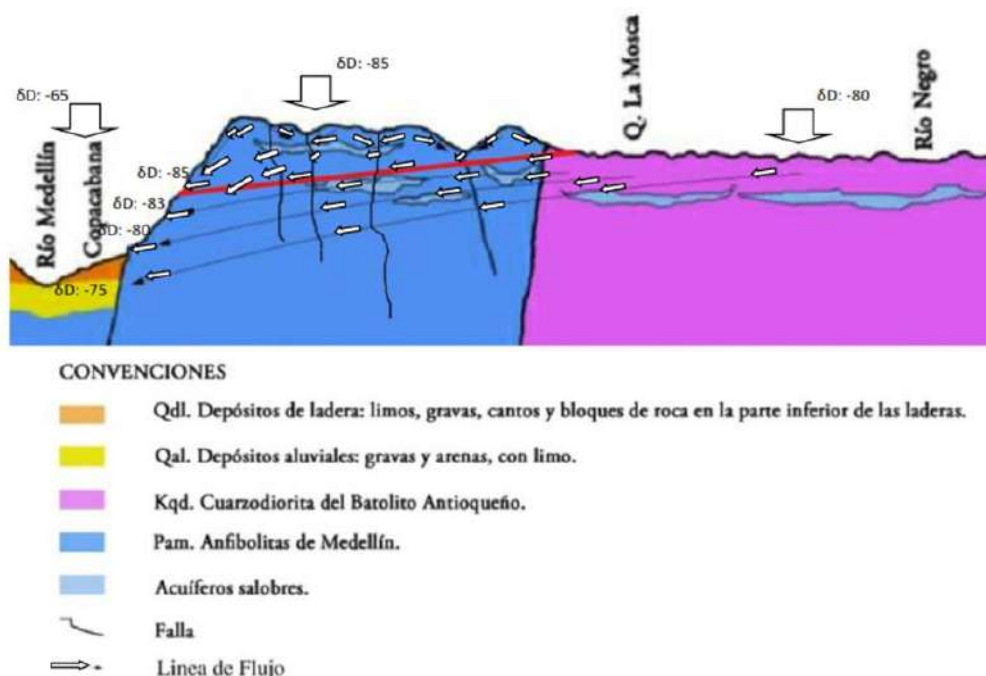


Figura 75. Modelo conceptual de la recarga, flujo local y regional y descarga del agua subterránea en el sistema hidrogeológico Planalto de Santa Elena, Valle de San Nicolás, Valle de Aburrá

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

8.5.2 Caracterización del acuífero

El agua subterránea en este sistema se encuentra en las discontinuidades del macizo rocoso formado por anfíbolitas, 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. 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 del Aburrá que permita presentar un patrón de descarga del agua subterránea y su relación con los rasgos

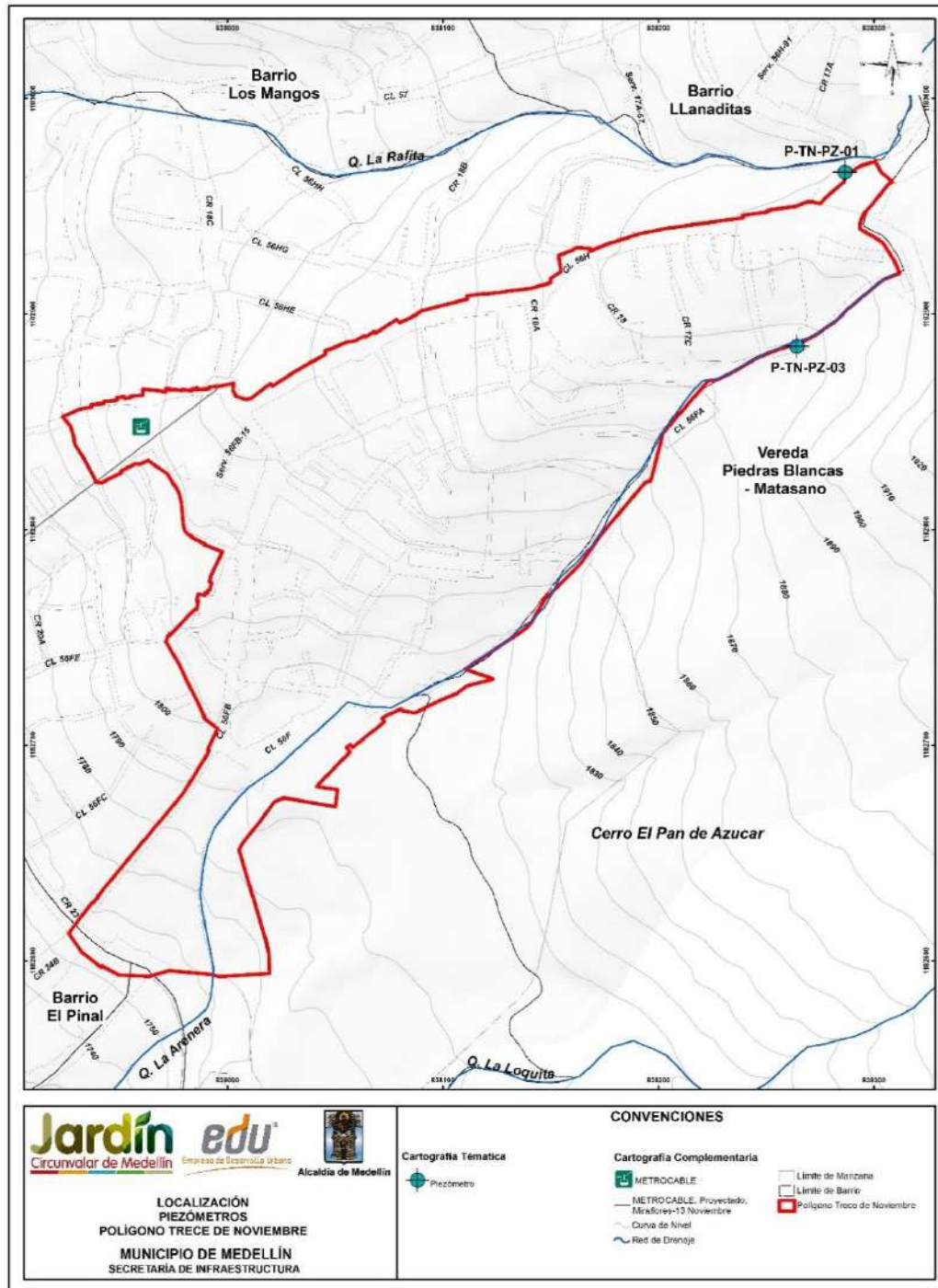
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 Trece de Noviembre, se hicieron recorridos de campo detallados con el fin específico de levantar los manantiales existentes. Fue posible levantar dos, uno cerca de la cota 2100 msnm y otro más bajo cerca de la cota 1940 msnm. De esta forma, es posible determinar que en la zona se tienen estos dos manantiales, en los cuales se aflora desde el punto de vista geológico al Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.

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 para la UMI Trece de Noviembre fueron localizados ubicados en las Perforaciones P-TN-PR-01 y P-TN-PR-03 realizadas en el Polígono Trece de Noviembre (Mapa 21). Se escogieron estas perforaciones dado que se encuentran cerca de la zona de cambio de pendiente entre la zona alta y media y la parte baja de la UMI. Adicionalmente, se instalaron cerca de la zona de drenaje de las Quebradas La Arenera y La Rafita.



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

Los piezómetros instalados son del tipo múltiple y fueron denominados como Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN-PZ-01D y P-TN-PZ-03A a P-TN-PZ-03D respectivamente Figura 76.

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.

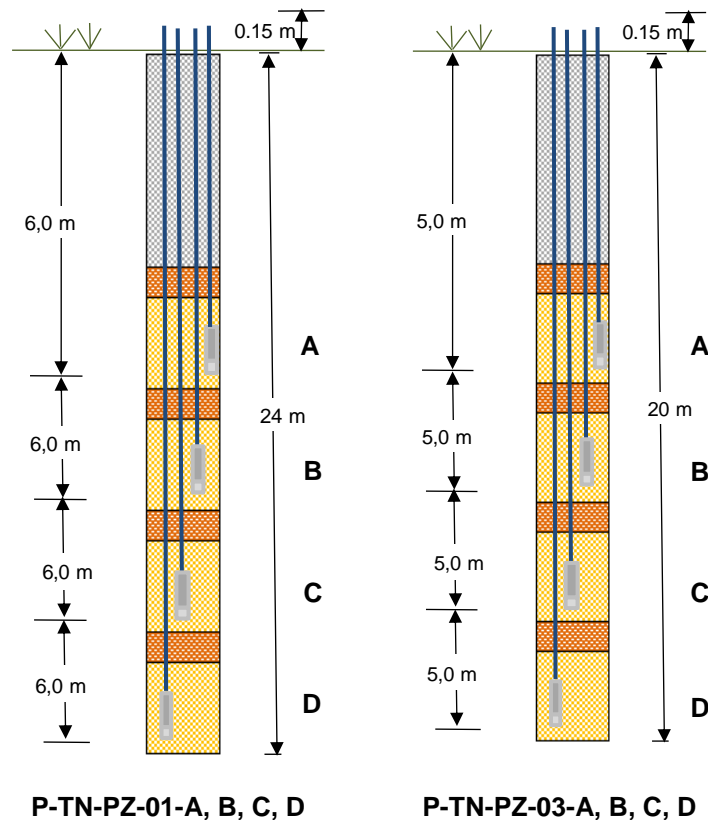




Figura 76. Esquema de localización en profundidad de los piezómetros de hilo vibrátil

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):

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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. A continuación se presentan y discuten las gráficas de variación de las cotas piezométricas con el tiempo para cada uno de estos piezómetros, agrupados de acuerdo con la perforación dentro de la cual fueron instalados. 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 Trece de Noviembre.

8.6.1 Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN- PZ-01D

La Figura 77 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN-PZ-01D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fueron instalados estos equipos.

Se puede observar que los Piezómetros P-TN-PZ-01A y P-TN- PZ-01B se instalaron superficiales, en el depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros, mientras que los Piezómetros P-TN-PZ-01C y P-TN- PZ-01D se instalaron profundos, en el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín.

Con respecto al sondeo en que fueron instalados estos equipos, la Perforación P-TN-PZ-01, vale la pena destacar el hecho de que no fue detectado nivel freático.

En general, puede establecerse un nivel de aguas subterráneo profundo, acorde con las cotas piezométricas registradas por el Piezómetro P-TN-PZ-01D. Basados en las lecturas obtenidas, se puede hablar de un nivel de aguas subterráneo aproximadamente en la cota 1869 msnm, a unos 22 m de profundidad.

Adicionalmente, según lo registrado por los Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN- PZ-01C, se puede hablar de un nivel freático superficial colgado, muy posiblemente favorecido por la presencia del depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros que subyace al lleno antrópico.¹

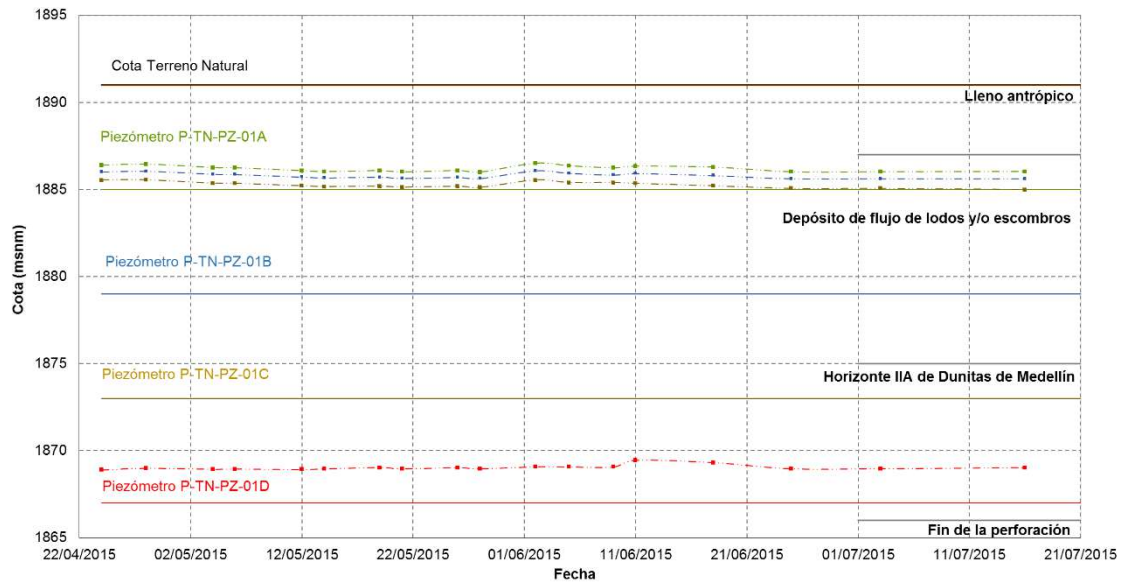


Figura 77. Cotaciones piezométricas en Piezómetros P-TN-PZ-01A a P-TN-PZ-01D

8.6.2 Piezómetros P-TN-PZ-03A a P-TN-PZ-03D

La Figura 78 presenta los registros obtenidos con los Piezómetros P-TN-PZ-03A a P-TN-PZ-03D, mostrándose además la estratigrafía correspondiente a la perforación dentro de la cual fueron instalados estos equipos.

Se puede observar que los Piezómetros P-TN-PZ-03A y P-TN-PZ-03B se instalaron superficiales, en el Horizonte IC, mientras que los Piezómetros P-TN-PZ-03C y P-TN-PZ-03D se instalaron profundos, en el Horizonte IIA.

Con respecto al sondeo en que fueron instalados estos equipos, la Perforación P-TN-PZ-03, vale la pena destacar el hecho de que las medidas del nivel freático en las mañanas fueron registradas siempre como “en seco”, razón por la cual se asumió que no hay presencia del nivel freático en el sondeo.

De acuerdo con lo registrado por los piezómetros, no puede establecerse un nivel de aguas subterráneo único. Los Piezómetros P-TN-PZ-03A y P-TN-PZ-03B muestran cabezas de presión de unos 4 m y 8 m, que se asocian a un nivel freático colgado. Especialmente el Piezómetro P-TN-PZ-03D registra cabezas de presión bajas pero que dan cuenta de un nivel de aguas subterráneas establecido en los alrededores de este equipo.

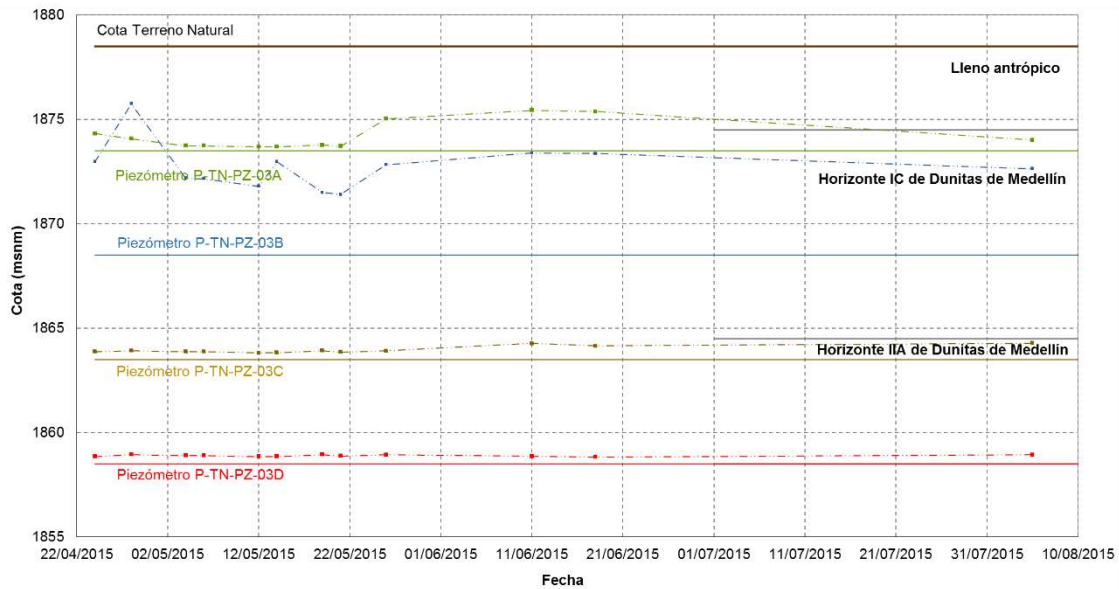


Figura 78. Cotas piezométricas en Piezómetros P-TN-PZ-03A a P-TN-PZ-03D

8.6.3 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 Trece de Noviembre, aunque limitada por el número de perforaciones que fue posible ejecutar, parece haber ratificado estas afirmaciones. Los Piezómetros P-TN-PZ-01D y P-TN-PZ-03D, correspondientes a los instalados a mayor profundidad en las perforaciones, dentro del Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, interceptaron el flujo subterráneo regional. Por otro lado, los Piezómetros P-TN-PZ-01A, P-TN-PZ-01B, P-TN-PZ-03A y P-TN-PZ-03B, correspondientes a los instalados a menor profundidad en las perforaciones, dentro del regolito, interceptaron el flujo subterráneo local.

Así las cosas, las condiciones de flujo del agua subterránea en la UMI Trece de Noviembre pueden ser esquematizadas en la red de flujo que se presenta esquemáticamente en la Figura 77 y en la Figura 78.

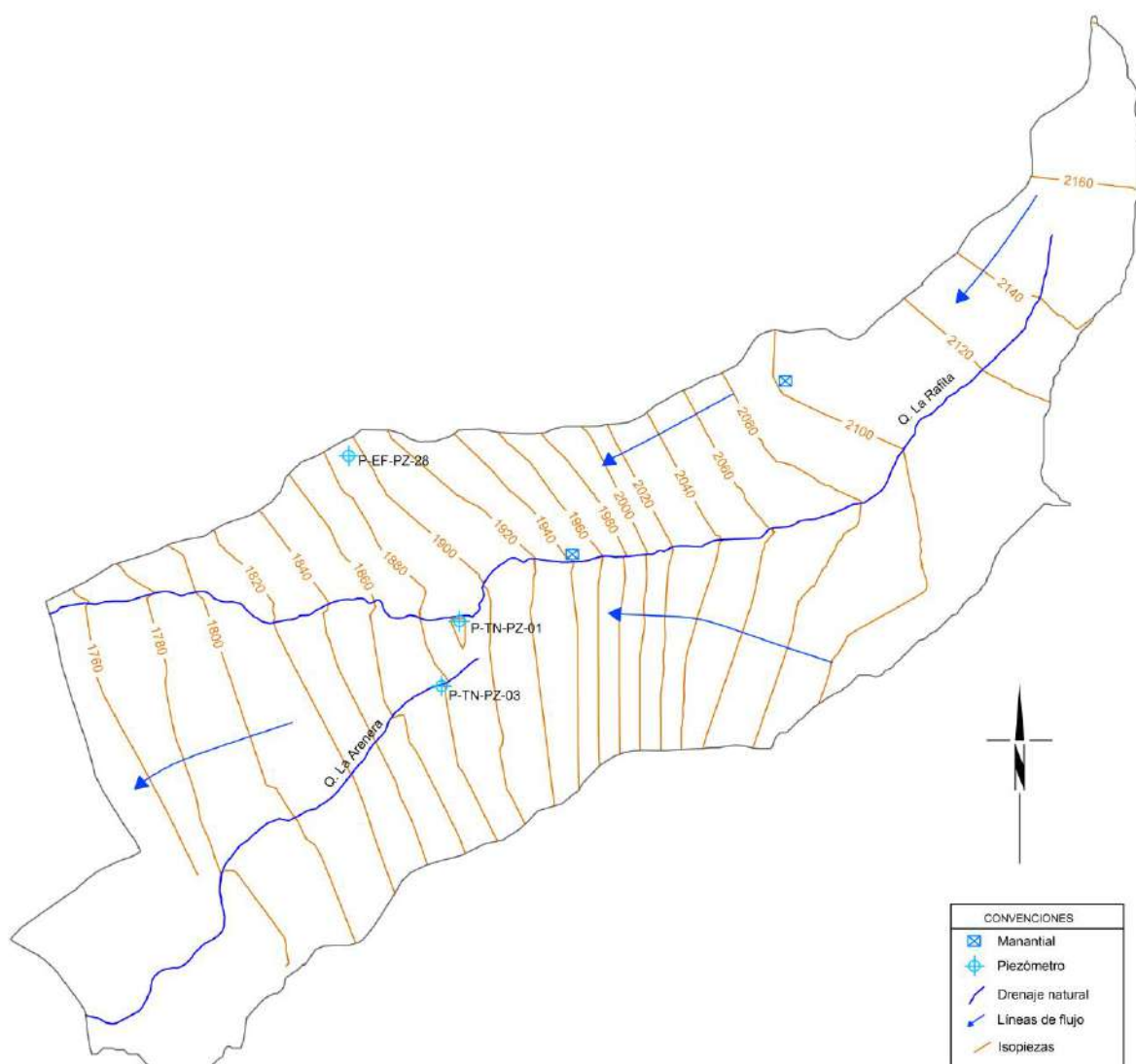




Figura 79. Líneas equipotenciales y de flujo para la UMI del Polígono Trece de Noviembre

Las líneas equipotenciales presentadas en la Figura 79, en el caso fueron definidas a partir de los manantiales levantados en esta UMI y las líneas de drenaje superficial con corrientes permanentes (Quebradas La Rafita y La Arenera), bajo la suposición razonable de que ellas corresponden a la intersección del nivel freático con la superficie del terreno. También se tuvieron en cuenta los datos obtenidos con los piezómetros, específicamente las cotas piezométricas más profundas. 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 acuicludo 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.



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 la Figura 80 y en la Figura 81. 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ 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).
- ✓ 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 Trece de Noviembre, la amenaza por deslizamientos producto del modelo hidrogeológico propuesto se descarta. En primer lugar, porque en los dos puntos donde fueron levantados manantiales el material presente desde el punto de vista geológico es el Horizonte IIA de las Dunitas de Medellín, de manera que el regolito no existe, y en estos puntos se presenta una liberación de la presión del agua. En segundo lugar, porque las presiones generadas por el flujo subterráneo según los registros de los piezómetros que lograron interceptar el flujo regional es muy baja, comparada con la de la carga que representa el regolito.

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 que tanto 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



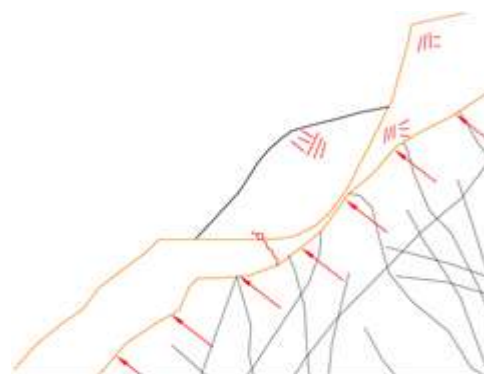
Cambio en las condiciones de equilibrio

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 80. 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



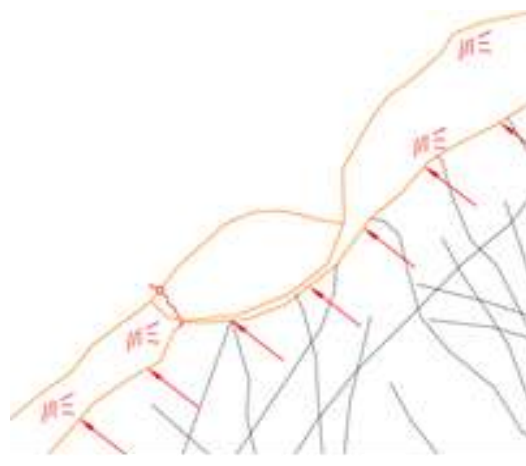
Cambio en las condiciones de equilibrio

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

9. ASPECTOS SÍSMICOS

La Figura 82 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 Trece de Noviembre.

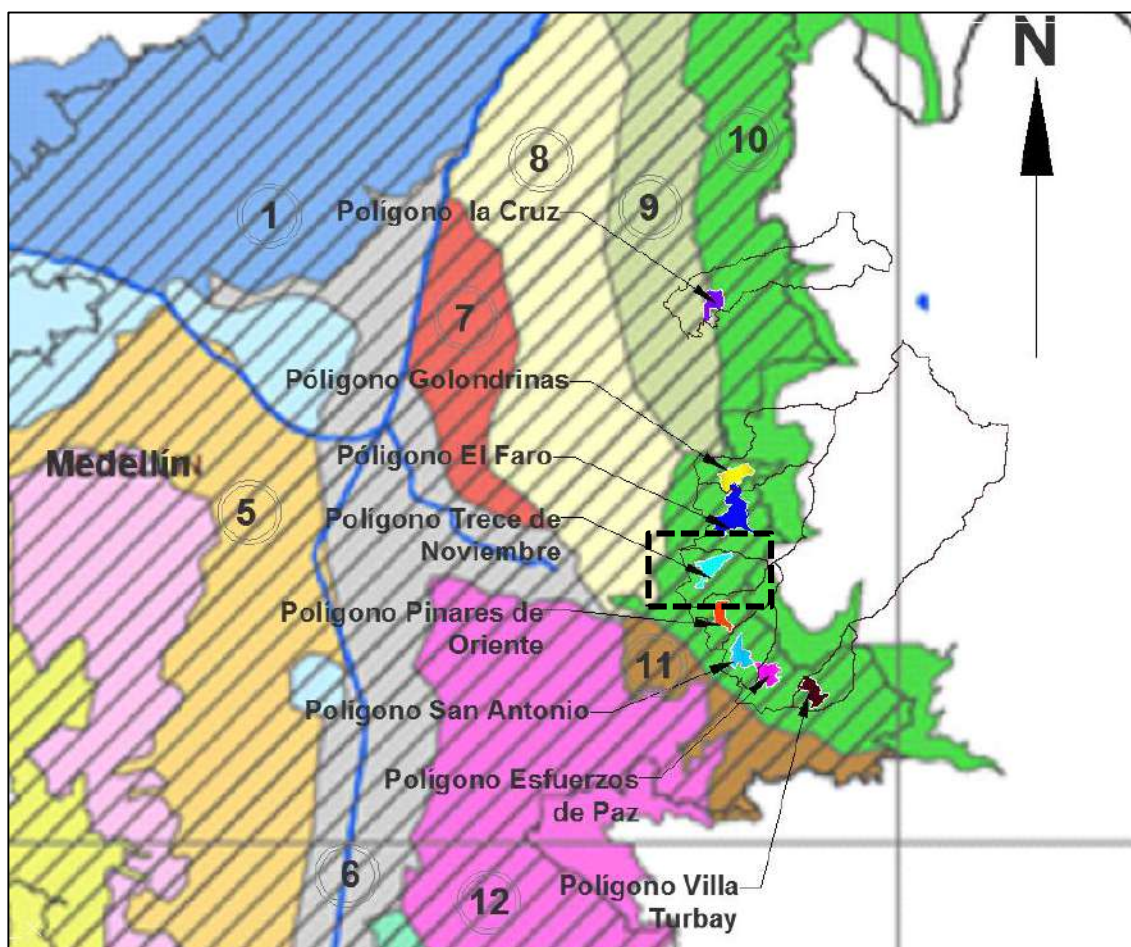




Figura 82. Localización de los polígonos dentro de las zonas homogéneas (Microzonificación Sísmica del Área urbana de Medellín, 1999)

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. El Polígono La Cruz, que también hace parte del proyecto de Barrios Sostenibles, se

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

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 Trece de Noviembre, 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 de mayo 2011, 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 4.2), 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 20 presenta los perfiles típicos que caracterizan la Zona Homogénea 10 según la Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (1999). En la UMI Trece de Noviembre, la unidad geológica predominante corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas (Qcv), depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos coluviales. Además, se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana. En los Mapa 7 y Mapa 8 de este informe se presenta el perfil geológico general determinado

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

con base en la exploración disponible para la zona de estudio y el reconocimiento de campo, en el cual se presentan los llenos antrópicos, los depósitos aluviotorrenciales, los depósitos de deslizamiento, los depósitos coluviales, los depósitos de vertiente y los Horizontes IB, IC, IIA, IIB y III de la Dunita de Medellín. Así las cosas, se puede establecer que el perfil geológico general de la UMI Trece de Noviembre se puede asociar principalmente con el denominado Perfil I de la Microzonificación Sísmica.

Tabla 20. 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 21).

Tabla 21. 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_{amax}/I	T_0	T_C	α	a_{Smax}	F_a	S_{amax}/I	T_0	T_C	α
1	0.05	4.50	0.23	0.10	0.50	1.43	0.27	2.60	0.70	0.10	0.60	1.34
2	0.08	2.80	0.22	0.10	0.30	1.17	0.34	2.35	0.80	0.10	0.40	1.17
3	0.07	3.57	0.25	0.10	0.50	1.48	0.30	2.66	0.80	0.20	0.70	1.52
4	0.05	3.60	0.18	0.10	0.60	1.46	0.23	2.17	0.50	0.10	0.65	1.22
5	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
6	0.05	2.81	0.14	0.10	0.40	1.11	0.20	2.50	0.50	0.10	0.50	1.07
7	0.06	3.66	0.22	0.10	0.50	1.42	0.20	3.00	0.60	0.10	0.60	1.26
8	0.08	2.25	0.18	0.10	0.65	1.52	0.23	2.40	0.55	0.10	0.75	1.37
9	0.06	3.75	0.23	0.10	0.40	1.31	0.26	2.70	0.70	0.10	0.55	1.28
10	0.09	2.78	0.25	0.10	0.40	1.35	0.38	2.10	0.80	0.10	0.50	1.29
11	0.06	3.75	0.23	0.10	0.50	1.43	0.26	2.88	0.75	0.10	0.65	1.43
12	0.06	4.16	0.25	0.10	0.65	1.67	0.26	3.07	0.80	0.15	0.70	1.52
13	0.06	4.16	0.25	0.10	0.40	1.35	0.26	3.07	0.80	0.10	0.50	1.29
14	0.05	2.81	0.14	0.10	0.50	1.23	0.20	3.00	0.60	0.10	0.55	1.21

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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

10. ASPECTOS GEOTÉCNICOS

10.1 SONDEOS EXPLORATORIOS

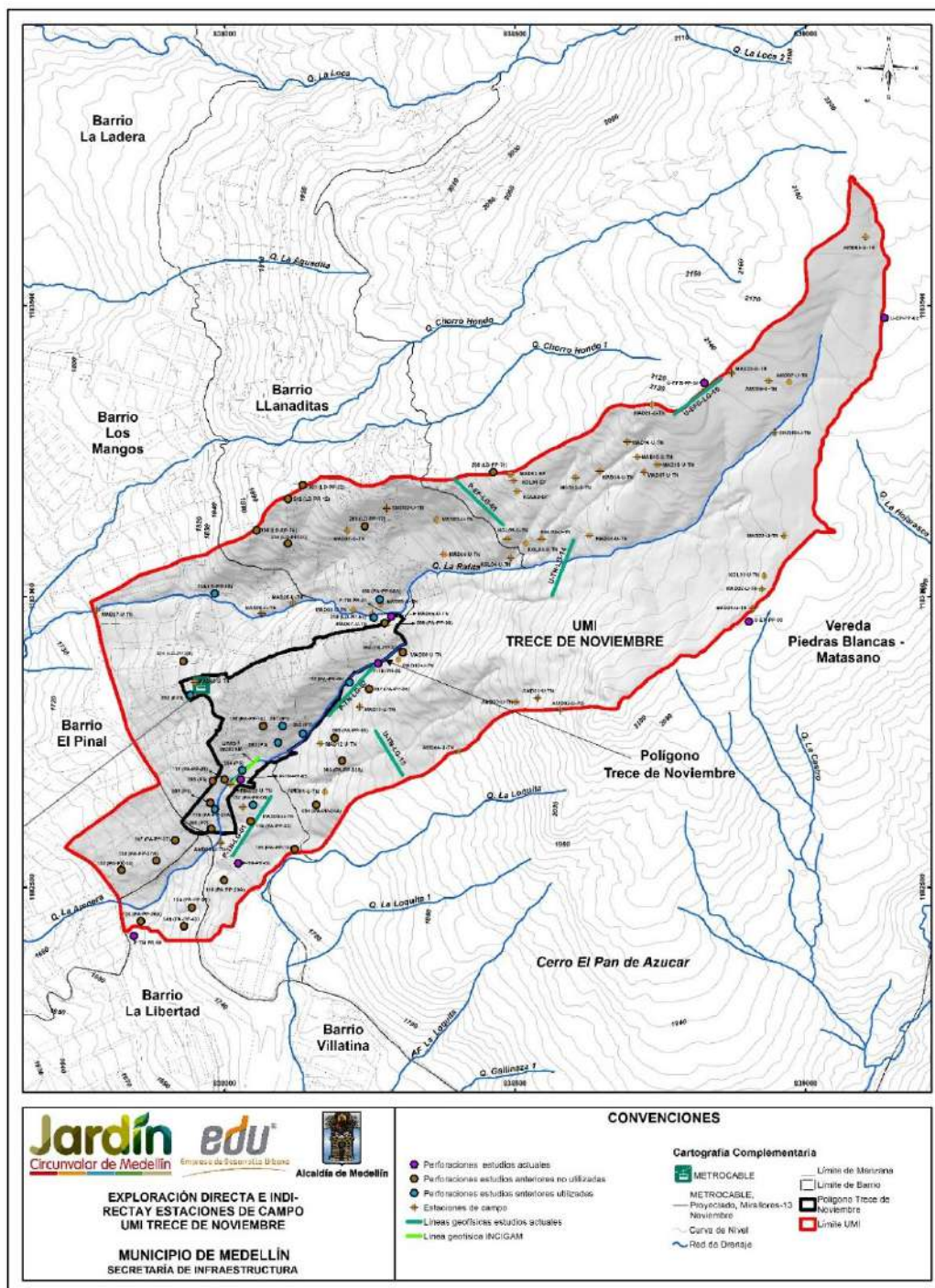
Para la caracterización de los materiales presentes en el área de estudio, se ejecutaron cinco perforaciones y cuatro líneas geofísicas, los cuales fueron localizados en función del modelo geológico-geotécnico que debía determinarse. Se tuvo en cuenta además la ubicación de los sondeos existentes en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

El Mapa 22 presenta la localización de la exploración considerada para la UMI Trece de Noviembre. 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 total se realizaron cinco perforaciones a rotación dentro de la UMI Trece de Noviembre, correspondiente a las Perforaciones P-TN-PR-01, P-TN-PR-03, P-TN-PR-04, P-TN-PR-05 y P-TN-PR-09.

Para la caracterización de los materiales al interior de esta UMI fue considerada la información obtenida de tres perforaciones realizadas por el proyecto en la UMI de Esfuerzos de Paz y El Faro – Golondrinas, U-EP-PP-02, U-EP-PP-03 y U-EFG-PP-01, ya que se encuentran muy cercanas a los límites de la UMI Trece de Noviembre. También se tuvo en cuenta la información obtenida de cinco perforaciones realizadas en estudios anteriores por DEACIVIL (2014), TECNISUELOS e ICC (2010) e INCIGAM (2015), correspondientes a las Perforaciones 100 (PA-PP-08A), 118 (PA-PP-24A), 153 (PA-PR-06), 252 (PF3) y 281 (P1), 282 (P2) y 283 (P3). En el Anexo 02 se presenta la descripción detallada de los sondeos realizados por el proyecto y de los estudios anteriores que fueron considerados. En la Tabla 22 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_TDNEExploracion_Medellin_C y 13_TDNEExploracion_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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 22. Exploración geotécnica utilizada en la UMI Trece de Noviembre

Perforación		Prof. (m)	Prof. NF (m)	Cota Terreno (msnm)	Coordenada Este	Coordenada Norte
proyecto (2015)	P-TN-PR-01	25.00	No Reporta	1891.0	838286.690	1182965.870
	P-TN-PR-03	18.00	Seco	1878.5	838264.430	1182885.040
	P-TN-PR-04	25.00	No Reporta	1772.0	838023.420	1182541.390
	P-TN-PR-05	25.00	7.00	1794.0	838027.430	1182685.780
	P-TN-PR-09	25.00	2.00	1706.0	837850.519	1182414.244
	U-EFG-PP-01	12.45	Seco	2132.0	838822.871	1183370.963
	U-EP-PP-02	13.45	Seco	2166.0	839116.142	1183484.140
	U-EP-PP-03	9.90	Seco	2120.0	838902.453	1182956.968
Deacivil (2014)	100 (PA-PP-08A)	4.45	No Reporta	1896.0	838267.120	1182995.290
	118 (PA-PP-24A)	9.45	No Reporta	1771.0	837983.397	1182634.697
	153 (PA-PR-06)	20.00	No Reporta	1866.0	838214.904	1182852.469
Tecnisuelos-ICC (2010)	252 (PF3)	15.00	7.50	1805.0	837940.610	1182830.810
Incigam (2015)	281 (P1)	15.00	Seco	1826.0	838099.910	1182777.410
	282 (P2)	15.00	No Reporta	1814.0	838134.900	1182764.560
	283 (P3)	15.00	No Reporta	1811.0	838091.990	1182748.980

De la Figura 83 a la Figura 85 se presentan las gráficas de variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad para todos los sondeos. Se exceptúan las Perforaciones 153 (PA-PR-06), 252 (PF3) y 281 (P1), en las cuales no se realizó el ensayo de resistencia a la penetración estándar. Adicionalmente, se ha incluido la estratigrafía y la profundidad del nivel freático donde fue detectado.

Luego de presentadas estas figuras, se hacen algunos comentarios generales de interés sobre la estratigrafía que pudo ser determinada con base en estos sondeos. La descripción efectuada corresponde con la descripción geológica de los materiales presentada en el Numeral 4.2 de este informe.

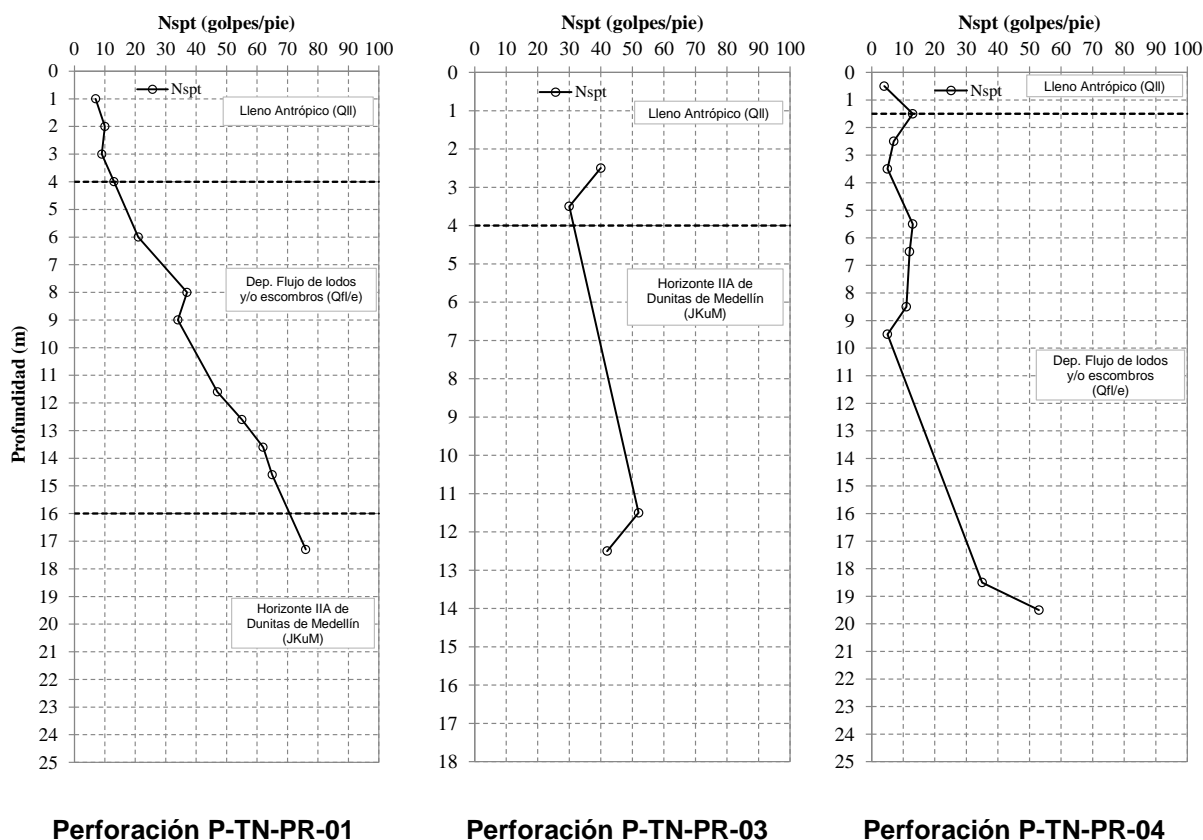
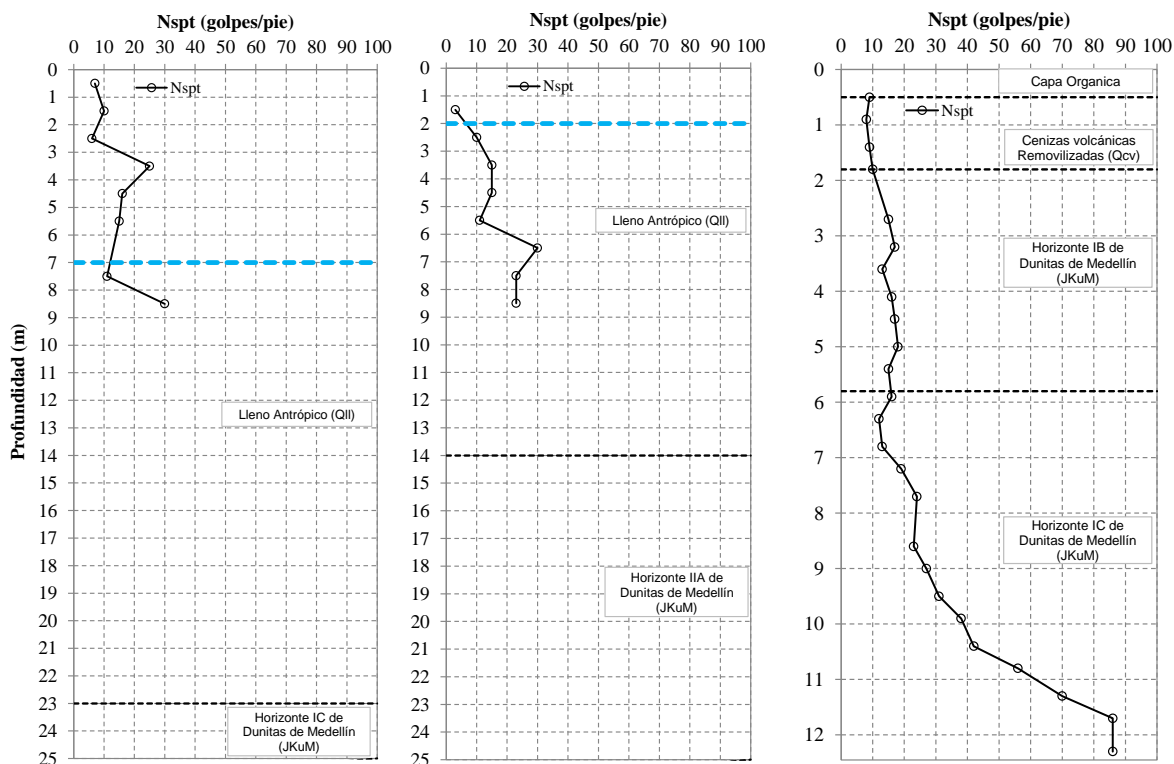


Figura 83. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre

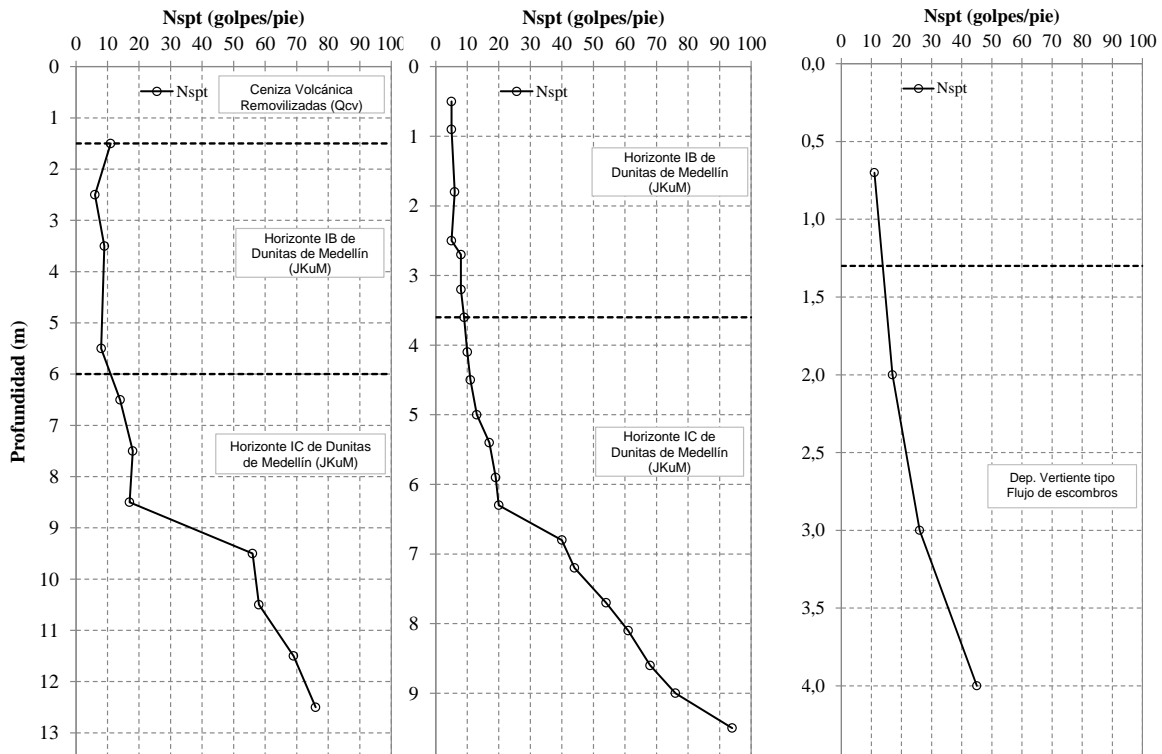


Perforación P-TN-PR-05

Perforación P-TN-PR-09

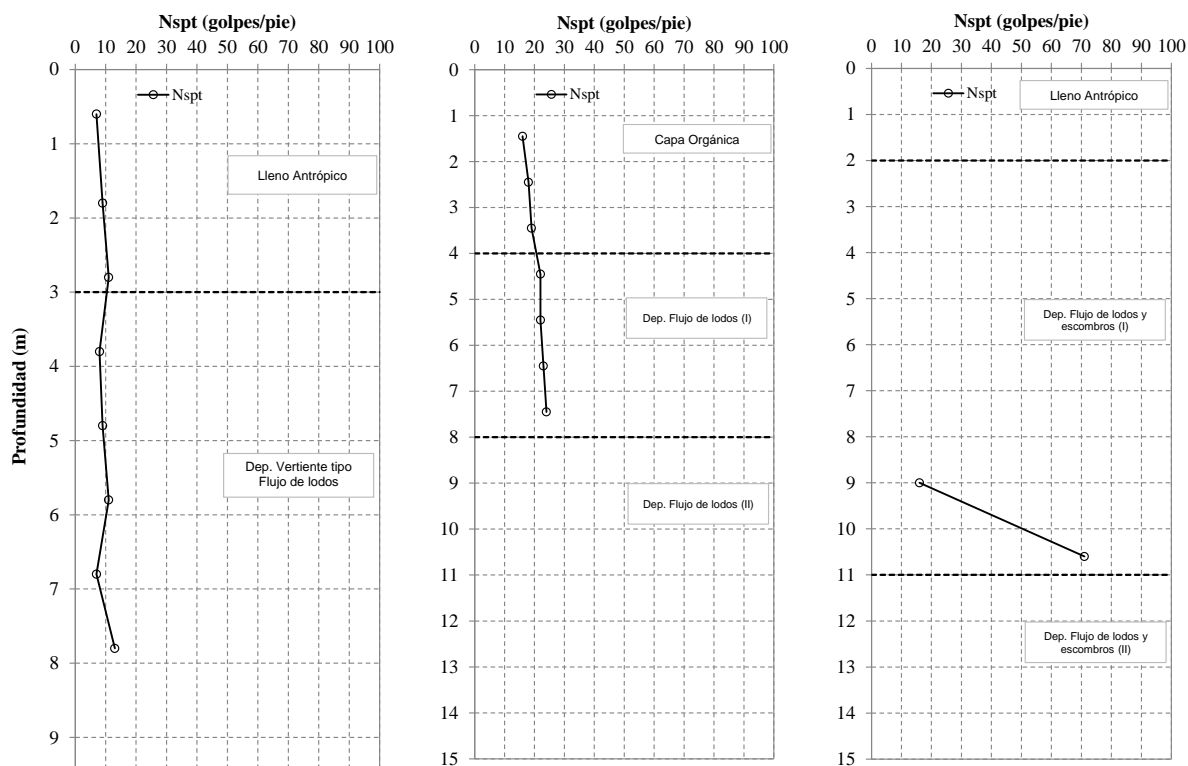
Perforación U-EFG-PP-01

Figura 84. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre (Continuación)



Perforación U-EP-PP-02 Perforación U-EP-PP-03 Perforación 100 (PA-PP-08A)

Figura 85. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre (Continuación)



Perforación 118 (PA-PP-024A)



Perforación 282 (P2)

Perforación 283 (P3)

Figura 86. Gráficos de variación de la resistencia a la penetración estándar en perforaciones del Trece de Noviembre (Continuación)

En la UMI del Trece de Noviembre se encuentran cuerpos de llenos antrópicos que en superficie abarcan longitudes entre 30 m y 150 m y en profundidad alcanzan espesores variables entre 1.5 m y 5.0 m. Estos llenos fueron caracterizados en las Perforaciones P-TN-PR-01, P-TN-PR-03, P-TN-PR-04 y P-TN-PR-05, suprayaciendo los suelos residuales de la Dunita de Medellín y los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. El lleno antrópico tiene espesor de 4.0 m en las Perforaciones P-TN-PR-01 y P-TN-PR-03 y de 1.5 m en la Perforación P-TN-PR-04. Solamente en la Perforación P-TN-PR-05 se encontró que el lleno antrópico tiene un espesor de 24.0 m, el cual se considera de tipo local, tal como se anotó en el Numeral 4.2.1 de este informe. Este material presenta resistencias a la penetración estándar muy variables, entre 7 golpes/pie e incluso 40 golpes/pie.

Por debajo de los llenos antrópicos o aflorando en superficie se tienen los depósitos de vertiente. Se encuentran seis cuerpos distribuidos en la parte superior, central y baja de la UMI. Estos depósitos fueron identificados en las Perforaciones P-TN-PR-01 y P-TN-PR-05. La resistencia a la penetración aumenta con la profundidad, llegando a ser en la Perforación P-TN-PR-01 de 40 golpes/pie a los 14.5 m de profundidad y en la

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

Perforación P-TN-PR-01 de 53 golpes/pie a los 19.5 m de profundidad. En este último sondeo los primeros 8 m del depósito son realmente de resistencia constante, equivalente a resistencias a la penetración estándar menores que 10 golpes/pie.

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-TN-PR-01, P-TN-PR-03, P-TN-PR-04, P-TN-PR-05, U-EFG-PP-01, U-EP-PP-02 y U-EP-PP-03. 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 los primeros 3 m de esta formación las resistencias más bajas, menores que 20 golpes/pie. Luego la resistencia aumenta, llegando incluso a casi 100 golpes/pie.



10.1.2 Líneas geofísicas

En la UMI Trece de Noviembre se realizaron cuatro líneas geofísicas, denominadas P-TN-LG-01, P-TN-LG-02, U-TN-LG-14, U-TN-LG-15. En cada una se realizó el ensayo geofísico ReMi (Refraction Microtremor) y la localización en planta se muestra en el Mapa 22 de este informe y en el Mapa 13_TDNEExploracion_Medellin_C. Adicionalmente, para complementar el análisis geológico geotécnico se utilizaron las Líneas Geofísicas P-EF-LG-01 y U-EFG-LG-10 realizadas por el proyecto en la UMI Faro – Golondrinas y la Línea 3 realizada por INCIGAM (2015).

Para esta UMI se hizo necesaria la implementación de una línea adicional correspondiente a la denominada como U-TN-LG-14, la cual se hizo en la parte alta de la UMI cerca de la zona del escarpe para poder determinar y/o correlacionar los espesores aproximados de suelo. Esta línea se comparó posteriormente con la Línea P-EF-LG-01 para la definición del modelo geológico geotécnico final.

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).

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

En la Tabla 23 se presentan las coordenadas de los puntos inicial y final de los ensayos ReMi ejecutados, en origen MAGNA-SIRGAS.

Tabla 23. Coordenadas de las líneas realizadas en la UMI Trece de Noviembre

Nomenclatura	Coordenada inicial		Cota Inicial	Coordenada final		Cota Final
	ESTE	NORTE		ESTE	NORTE	
P-TN-LG-01	838080.43	1182656.42	1795.99	838014.08	1182554.84	1772.04
P-TN-LG-02	838260.99	1182884.58	1878.43	838179.58	1182795.93	1837.31
U-TN-LG-14	838600.32	1183096.86	2046.42	838563.68	1183001.96	2026.75
U-TN-LG-15	838260.01	1182768.75	1880.14	838306.28	1182693.10	1883.70
P-EF-LG-01	838479.41	1183123.55	2015.70	838395.38	1183202.05	2016.17
U-EFG-LG-10	838854.78	1183374.45	2135.00	838773.80	1183313.28	2141.58

En la Figura 87 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-TN-LG-01. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 88, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 89 presenta el perfil promedio de velocidad de propagación de Ondas S a lo largo de la línea geofísica de 70 m de longitud. En la Figura 90 se presenta la tomografía obtenida para la Línea P-TN-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 13.3 m con velocidad de propagación de Ondas S menores a 382 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia media firme.
- ✓ Una capa intermedia entre 13.3 m y 19.4 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 518 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media a dura.
- ✓ Una capa más profunda desde los 19.4 m de profundidad en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S de 895 m/s, la cual puede definirse como una roca.

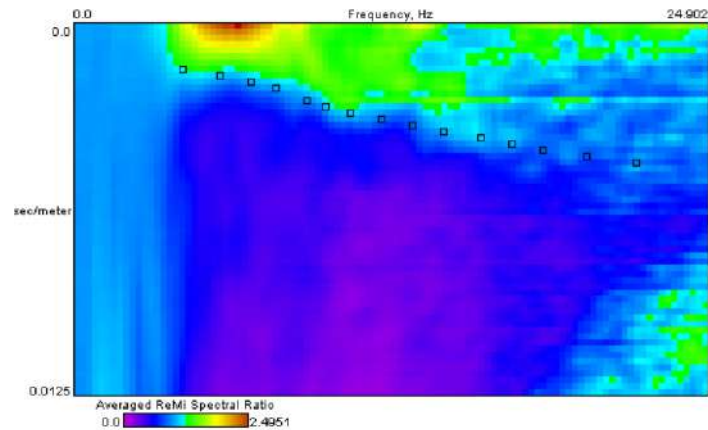


Figura 87. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-TN-LG-01

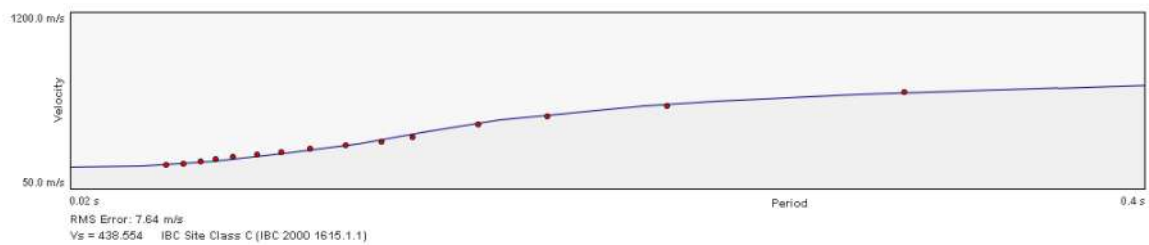


Figura 88. Dispersión y ajuste para la Línea P-TN-LG-01

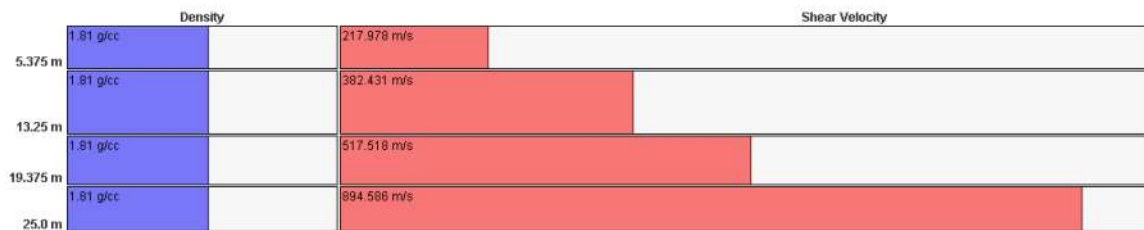
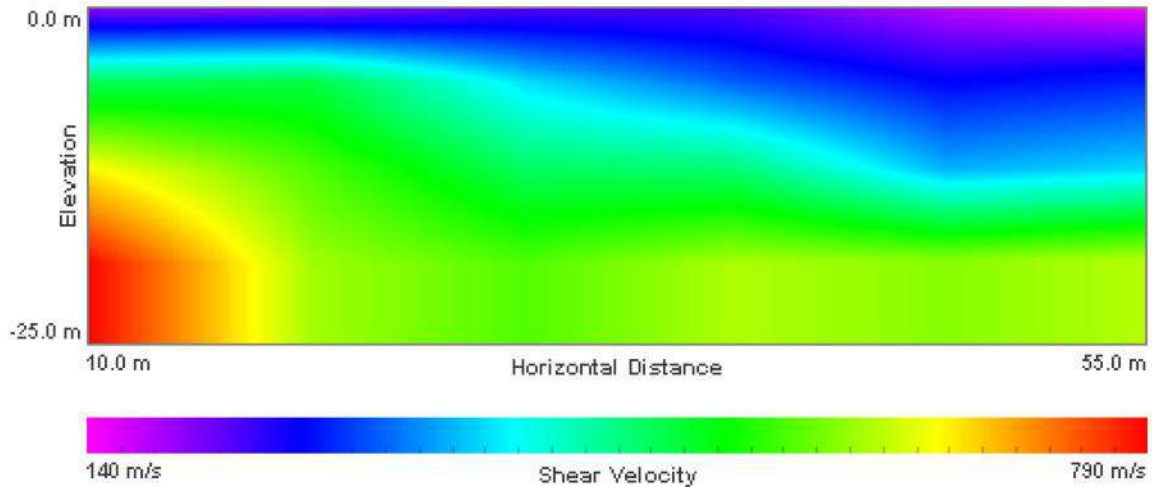


Figura 89. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-TN-LG-01



**Figura 90. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-TN-LG-01**

En la Figura 91 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-TN-LG-02. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 92 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 93 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 94 se presenta la tomografía obtenida para la línea P-TN-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 4.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 192 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda, asimilable al lleno antrópico.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.0 m hasta los 15.0 m de profundidad, con velocidad de propagación de Ondas S de 576 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia media.
- ✓ Una capa intermedia entre 15.0 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 771 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia firme a muy firme.

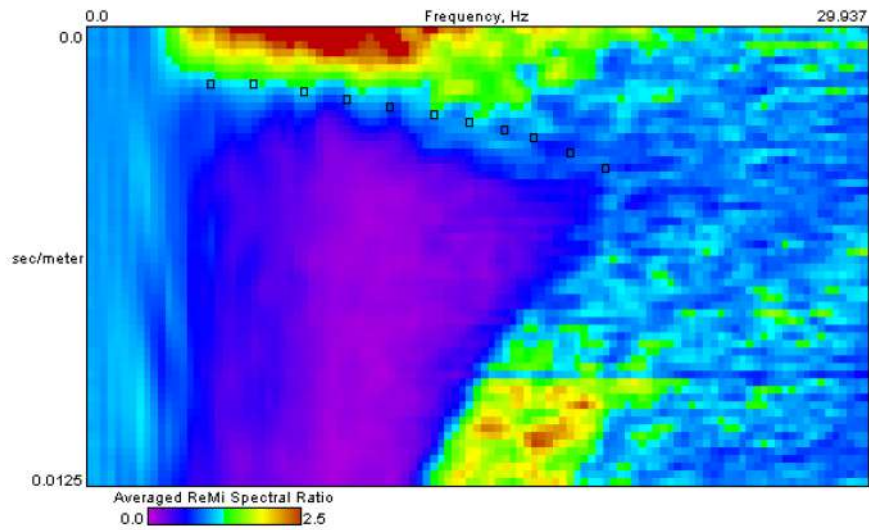


Figura 91. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-TN-LG-02

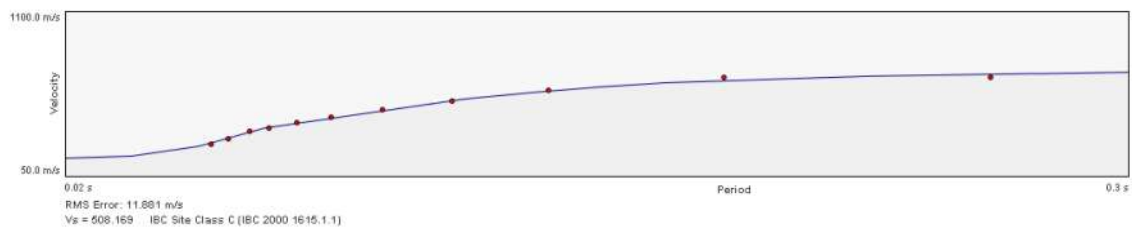
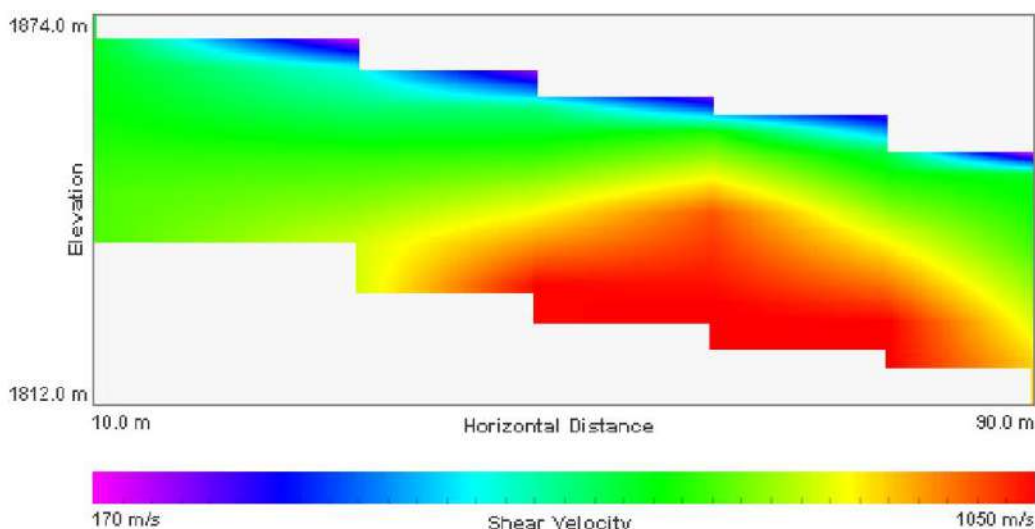


Figura 92. Dispersión y ajuste para la Línea P-TN-LG-02

	Density	Shear Velocity
4.0 m	1.81 g/cc	192.135 m/s
	1.81 g/cc	576.251 m/s
15.0 m		
	1.81 g/cc	771.246 m/s
32.6 m		
	1.81 g/cc	869.918 m/s
40.0 m		

Figura 93. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea P-TN-LG-02



**Figura 94. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-TN-LG-02**

En la Figura 95 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 96 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 97 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 98 se presenta la tomografía obtenida para la línea U-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 firme.
- ✓ Una segunda capa desde los 4.8 m en adelante donde las velocidades de onda de corte superaron los 517 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy denso y podría ser asimilable al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

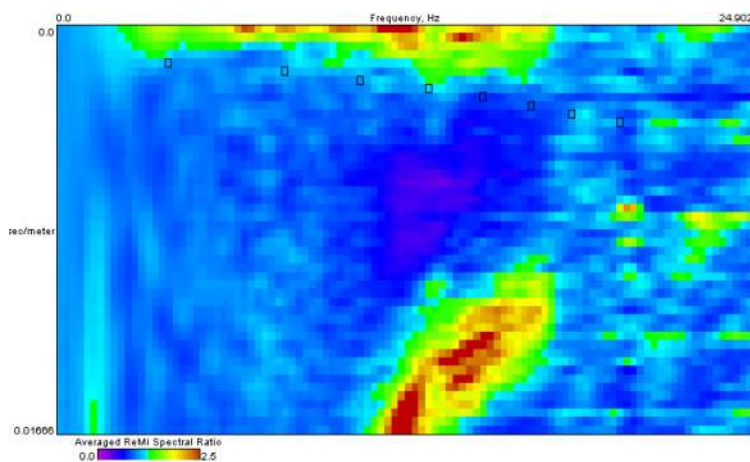


Figura 95. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-14

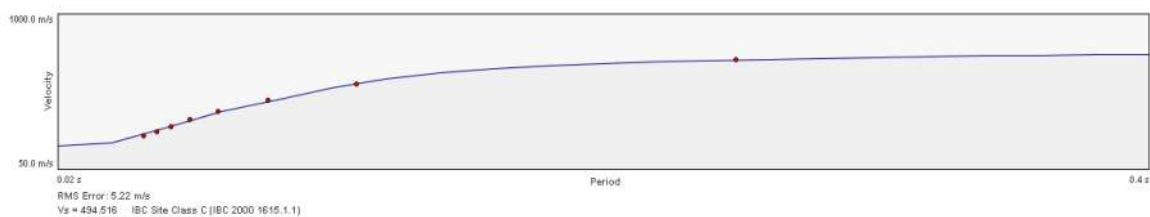


Figura 96. Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-14

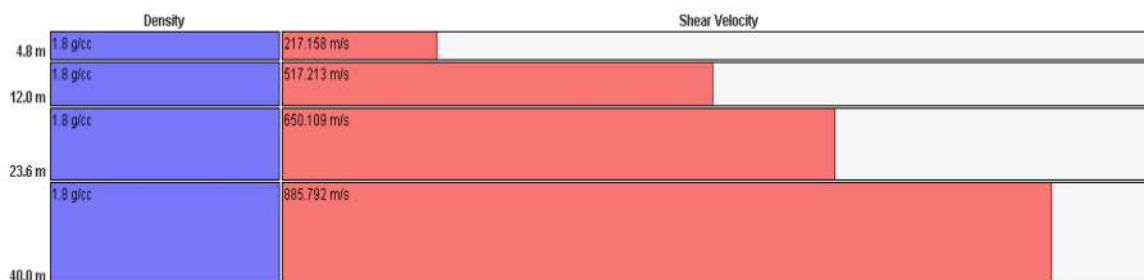


Figura 97. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14

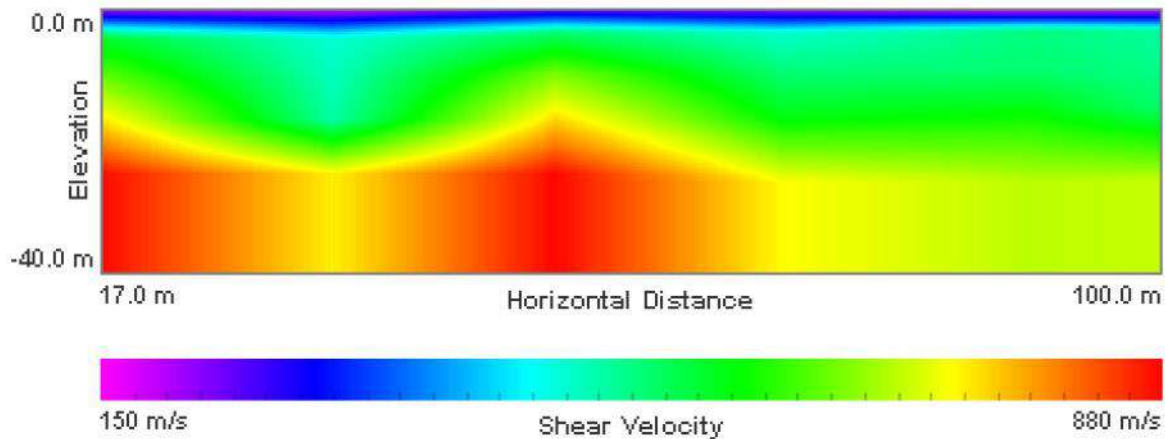


Figura 98. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-14

En la Figura 99 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-15. Empleando los puntos seleccionados de dispersión se realiza el ajuste presentado en la Figura 100 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 101 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 102 se presenta la tomografía obtenida para la línea U-TN-LG-15 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 155 m/s, la cual corresponde a un suelo de consistencia blanda.
- ✓ Una segunda capa desde los 3.6 m en adelante, con velocidad de propagación de Ondas S que superan los 822 m/s, la cual puede definirse como un suelo de consistencia muy densa que podrían asimilarse al Horizonte IIA de Dunitas de Medellín.

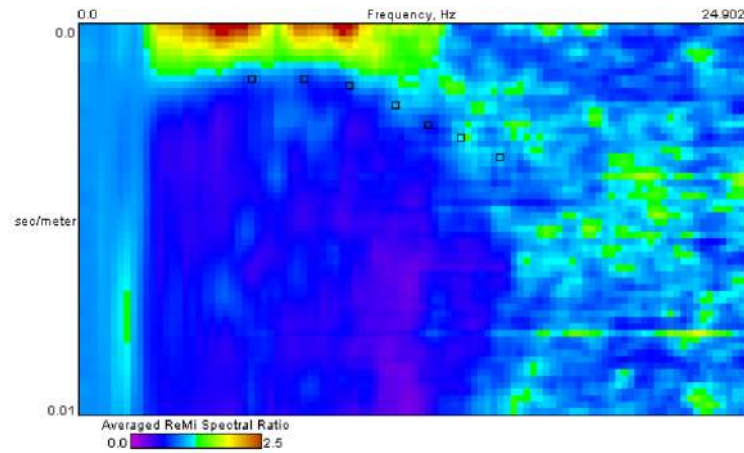


Figura 99. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-TN-LG-15

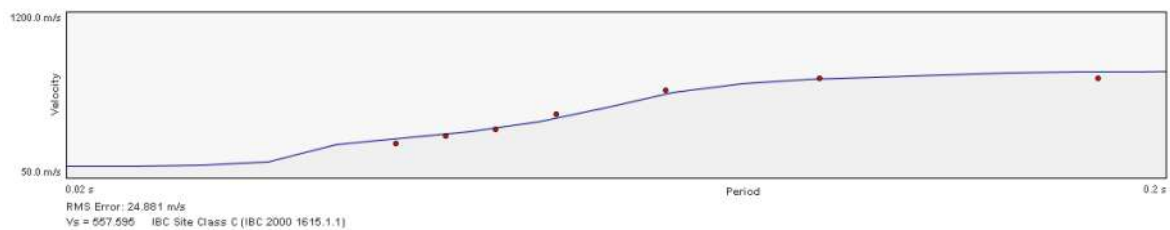
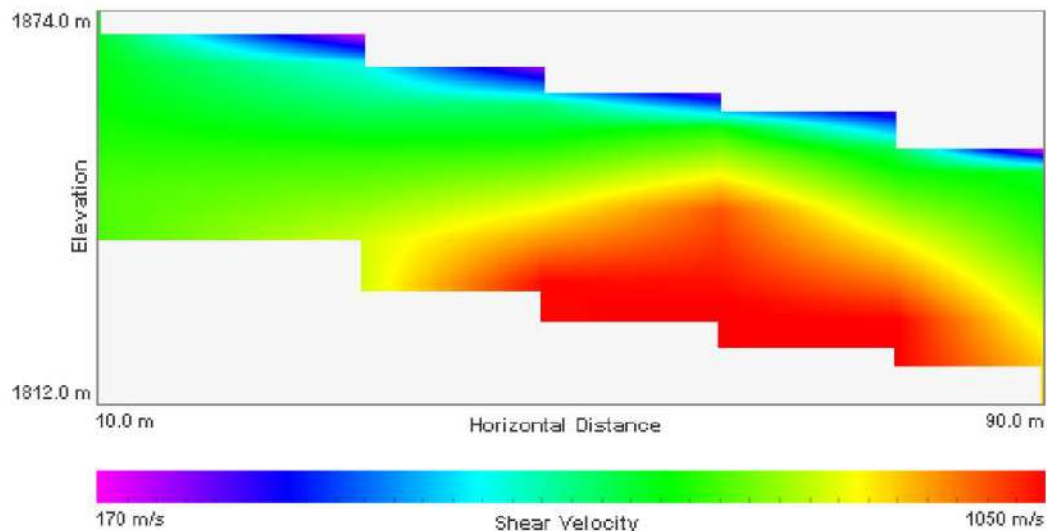


Figura 100. Dispersión y ajuste para la Línea U-TN-LG-15

	Density	Shear Velocity
3.6 m	1.81 g/cc	154.545 m/s
	1.81 g/cc	821.757 m/s
16.6 m	1.81 g/cc	886.364 m/s
28.8 m	1.81 g/cc	941.573 m/s
40.0 m		

Figura 101. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U-TN-LG-15



**Figura 102. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea U-TN-LG-15**

En la Figura 103 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 88, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 89 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 90 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.

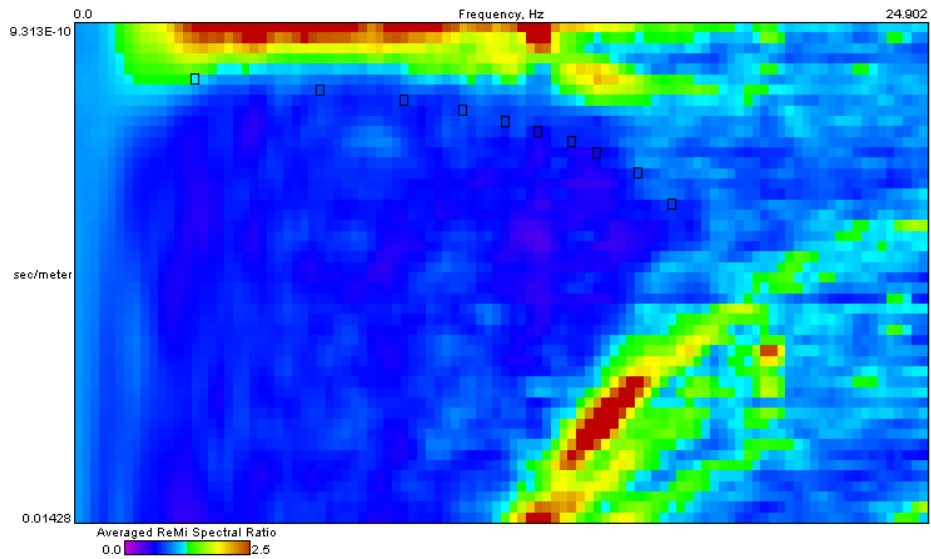


Figura 103. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea P-EF-LG-01

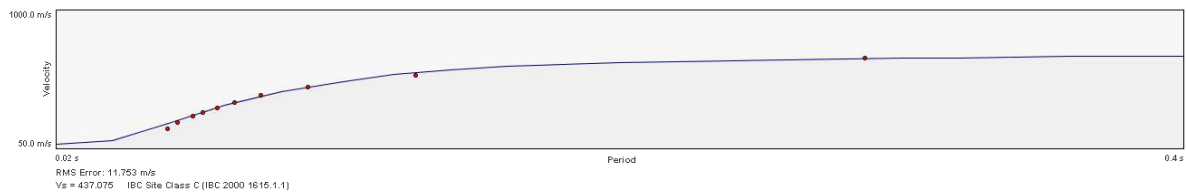
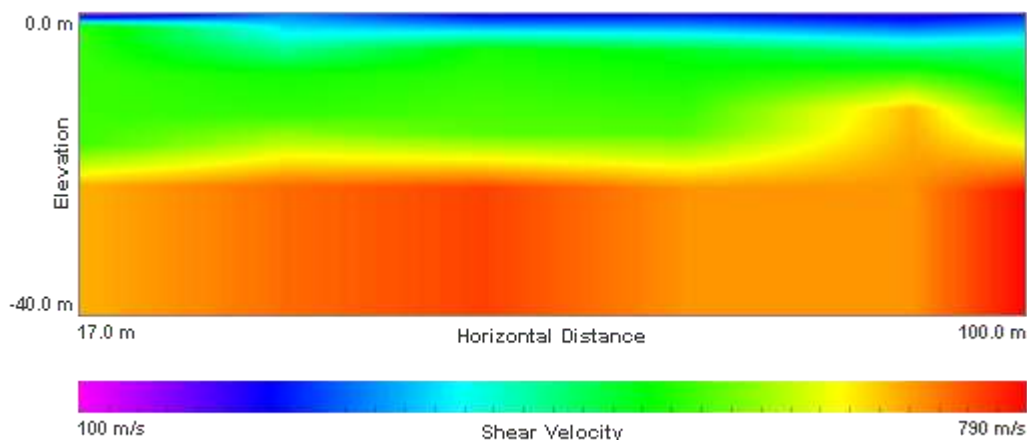


Figura 104. Dispersión y ajuste para la Línea P-EF-LG-01

	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	

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



**Figura 106. Tomografía - Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S)
Línea P-EF-LG-01**

En la Figura 107 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 108 mostrada a continuación, con el fin de establecer el perfil de velocidad de propagación de Ondas S. La Figura 109 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.

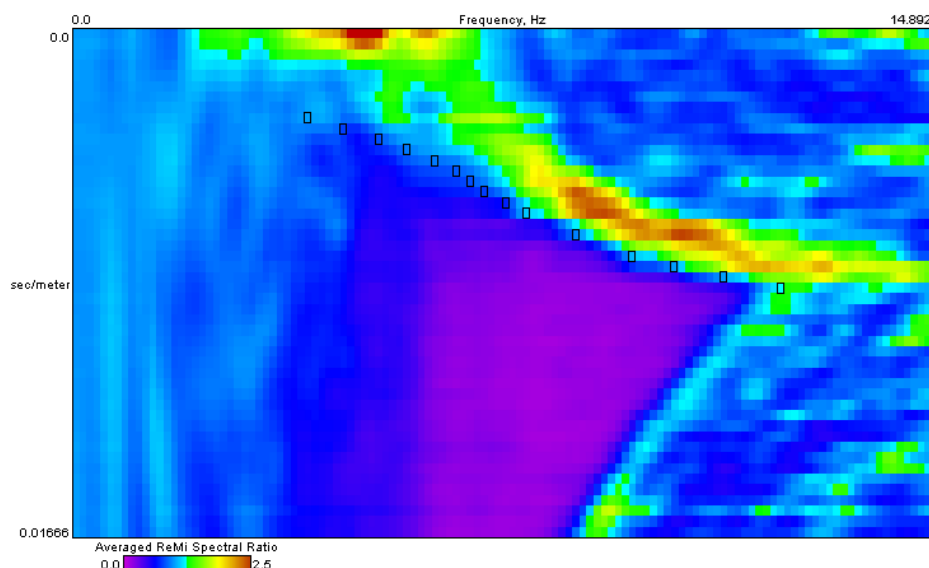


Figura 107. Gráfico fase frecuencia (p-f) Línea U-EFG-LG-10

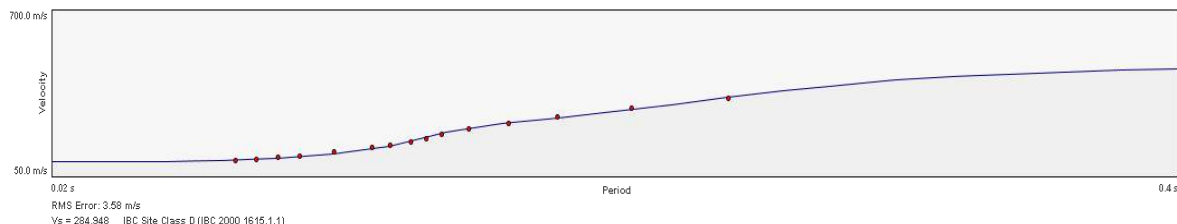


Figura 108. Dispersión y ajuste para la Línea U-EFG-LG-10

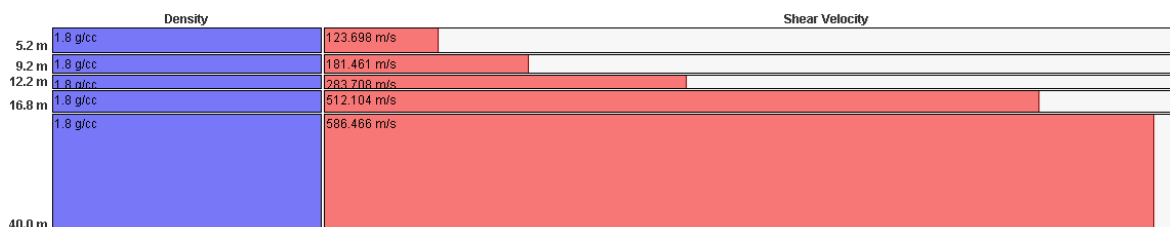


Figura 109. Perfil de velocidad de propagación de onda de corte (S) Línea U EFG-LG-10

Finalmente, la Línea 3 realizada por INCIGAM S.A.S se dispuso con una longitud de 57.5 m y se usaron 24 geófonos espaciados 2.5 m entre sí. En la Figura 127 y en la Figura 128 se presentan los resultados obtenidos con esta línea.

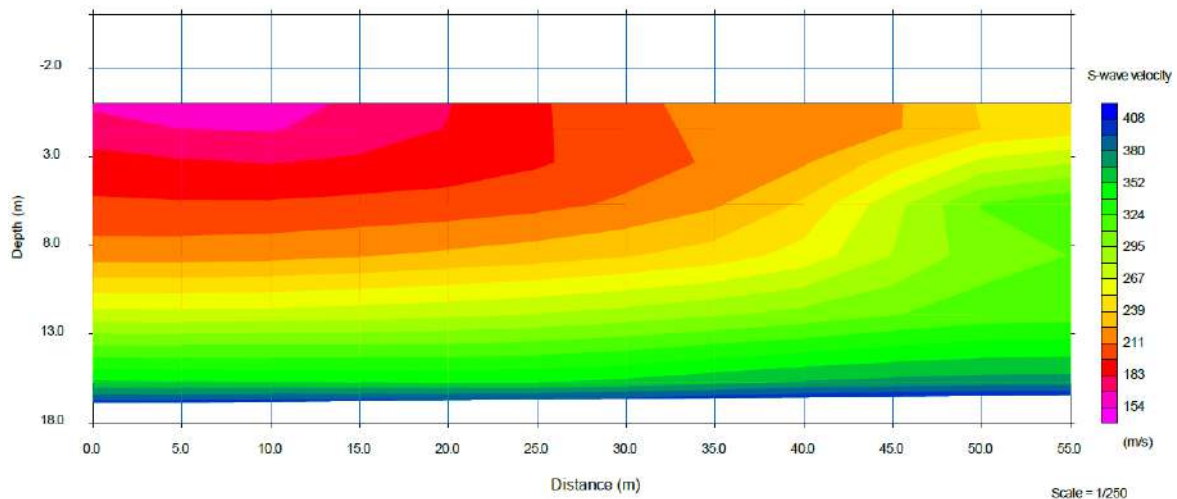


Figura 110. Perfil de velocidad de onda de corte línea 3 (Tomado de INCIGAM, 2015)

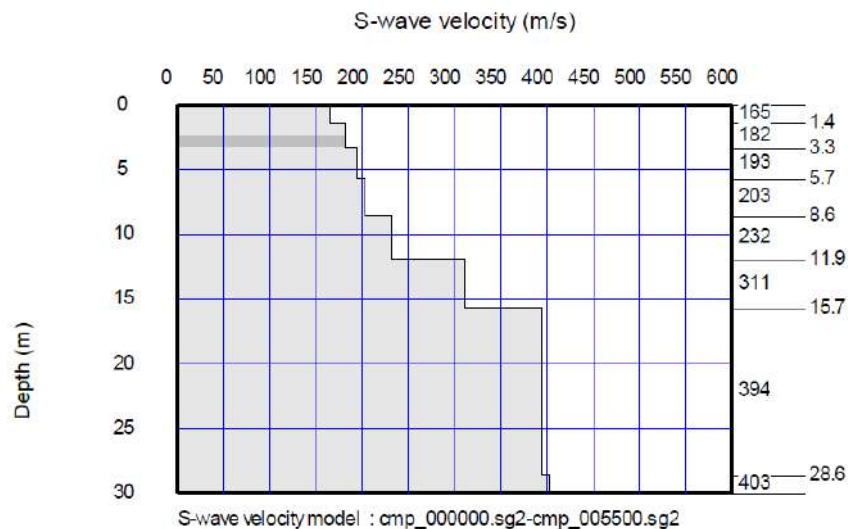




Figura 111. Velocidades de onda de corte promedio Línea 3 (INCIGAM, 2015)

En general, los resultados obtenidos con Línea 3 realizada por INCIGAM S.A.S permitieron determinar la siguiente estratigrafía (INCIGAM, 2015):

- ✓ Una capa superficial desde la superficie del terreno hasta los 5.0 m, que se extiende hacia la parte baja de la vertiente, con velocidad de propagación de Ondas S de 180 m/s. esta capa fue considerada como un lleno producto de la intervención antrópica de la quebrada.
- ✓ Una segunda capa desde los 5.0 m hasta los 10.0 m con velocidad de propagación de Ondas S de 220 m/s, la cual tiene su mayor espesor hacia el norte.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ Una capa más profunda desde 10.0 m hasta los 17.0 m, profundidad alcanzada por el ensayo, con velocidad de propagación de Ondas S de 330 m/s.

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. 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 24 presenta el resumen de los resultados de los ensayos de clasificación y en la Tabla 25 se presentan las variables de estado de algunas de las muestras tomadas durante la campaña exploratoria.

Tabla 24. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-TN-PR-01	M3	2.55-3.00	Lleno antrópico	40.0	52.0	13.0	0.9	3	35	62	MH
P-TN-PR-03	M3	3.00-3.45	Lleno antrópico	17.1	35.0	11.0	1.6	63.0	26.0	11.0	GP-GC
P-TN-PR-04	M2	1.00-1.50	Lleno antrópico	27.2	57.0	13.0	2.3	7.0	31.0	63.0	MH
P-TN-PR-05	M3	2.00-2.45	Lleno antrópico	42.0	57.0	11.0	1.4	5	26	69	MH
P-TN-PR-05	M8-M9	7.00-8.50	Lleno antrópico	42.0	50.0	12.0	0.7	12	33	55	ML
P-TN-PR-05	M13	11.00-11.30	Lleno antrópico	32.0	49.0	7.0	2.4	8	35	57	ML
P-TN-PR-05	M6	5.00-5.45	Lleno antrópico	44.1	57.0	18.0	0.7	17.0	22.0	61.0	MH
P-TN-PR-05	M20	17.00-17.45	Lleno antrópico	53.2	63.0	12.0	0.8	22.0	14.0	64.0	MH
P-TN-PR-09	M5	5.00-5.50	Lleno antrópico	36.5	63.0	23.0	1.2	38.0	22.0	40.0	GM
P-TN-PR-09	M9	9.00-9.50	Lleno antrópico	19.1	51.0	20.0	1.6	64.0	17.0	19.0	GM
P-TN-PR-09	M1	1.00-1.45	Lleno antrópico	38.8	60.0	27.0	0.8	69.0	16.0	15.0	GM
P-TN-PR-09	M3	3.00-3.45	Lleno antrópico	29.3	57.0	18.0	1.5	11.0	27.0	62.0	MH
P-TN-PR-09	M6-M7	6.00-7.45	Lleno antrópico	41.3	59.0	29.0	0.6	67.0	25.0	8.0	GP-GC
P-TN-PR-09	M10-M11	11.00-12.30	Lleno antrópico	17.1	-	-	-	74.0	21.0	4.3	GP
P-TN-PR-01	M8	7.55-8.00	Depósito	32.0	53.0	9.0	2.4	9	37	54	MH
P-TN-PR-01	M14	13.00-13.45	Depósito	39.0	52.0	10.0	1.3	1	30	69	MH
P-TN-PR-01	M12	11.00-11.60	Depósito	56.8	52.0	-	-	3.0	32.0	65.0	ML
P-TN-PR-01	M6	5.60-6.00	Depósito	58.3	42.0	1.0	-16.3	7.0	29.0	64.0	ML
P-TN-PR-04	M3	2.00-2.45	Depósito	33.9	50.0	15.0	1.1	4.0	30.0	66.0	ML
P-TN-PR-04	M6	5.00-5.45	Depósito	33.0	68.0	27.0	1.3	6.0	31.0	63.0	MH
P-TN-PR-04	M10	9.00-9.45	Depósito	55.5	77.0	38.0	0.6	0.0	19.0	81.0	MH
P-TN-PR-04	M19	18.00-18.50	Depósito	37.8	66.0	22.0	1.3	18.0	47.0	35.0	SM
UNT3	M2	1.10	Residual (IB-IC)	40.3	47.0	2.0	3.4	8.0	27.0	65.0	ML



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 24. Resumen de los resultados de los ensayos de laboratorio

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	LL [%]	IP [%]	IC	% Gravas	% Arenas	% Finos	USCS
P-TN-PR-05	M27	24.00-24.45	Residual (IB-IC)	97.1	68.0	15.0	-1.9	0.0	14.0	86.0	MH
P-TN-PR-03	M15	13.00-13.45	Residual (IB-IC)	41.0	54.0	13.0	1.0	16	27	57	MH
P-TN-PR-03	M8	6.50-7.00	Residual (IB-IC)	46.0	60.0	19.0	0.7	1.0	19.0	80.0	MH
P-TN-PR-01	M19	17.00-17.30	Transición (IIA)	43.0	60.0	15.0	1.1	9	36	55	MH

Tabla 25. Variables de estado de algunas de las muestras ensayadas

Sondeo	Muestra	Profundidad [m]	Estrato	w [%]	Gs	e	S [%]
P-TN-PR-01	M3	2.55-3.00	Lleno antrópico	40	2.991	1.52	78.7
P-TN-PR-09	M1	1.00-1.45	Lleno antrópico	38.8	2.98	1.49	77.7
P-TN-PR-09	M6-M7	6.00-7.45	Lleno antrópico	41.3	2.887	1.46	81.9
P-TN-PR-04	M6	5.00-5.45	Depósito	33.0	2.932	1.29	75.0
P-TN-PR-04	M19	18.00-18.50	Depósito	37.8	2.858	1.31	82.2
UNT3	M2	1.10	Residual (IB-IC)	40.3	3.311	1.66	80.1
P-TN-PR-05	M27	24.00-24.45	Residual (IB-IC)	97.1	2.693	2.72	96.2
P-TN-PR-03	M15	13.00-13.45	Residual (IB-IC)	41	2.781	1.24	90.9
P-TN-PR-01	M19	17.00-17.30	Transición (IIA)	43	2.831	1.52	80.5

Para el análisis de esta información se trazaron las gráficas que se presentan en la Figura 112 hasta la Figura 115. 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.

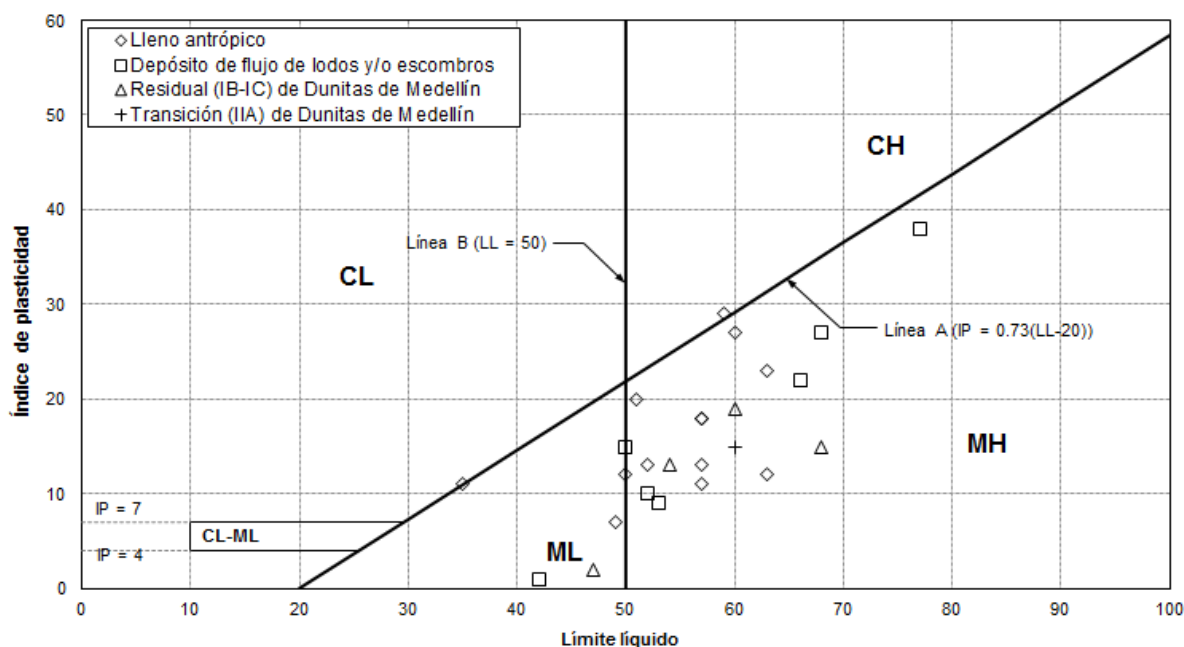


Figura 112. Ensayos de clasificación en Carta de Plasticidad de Casagrande

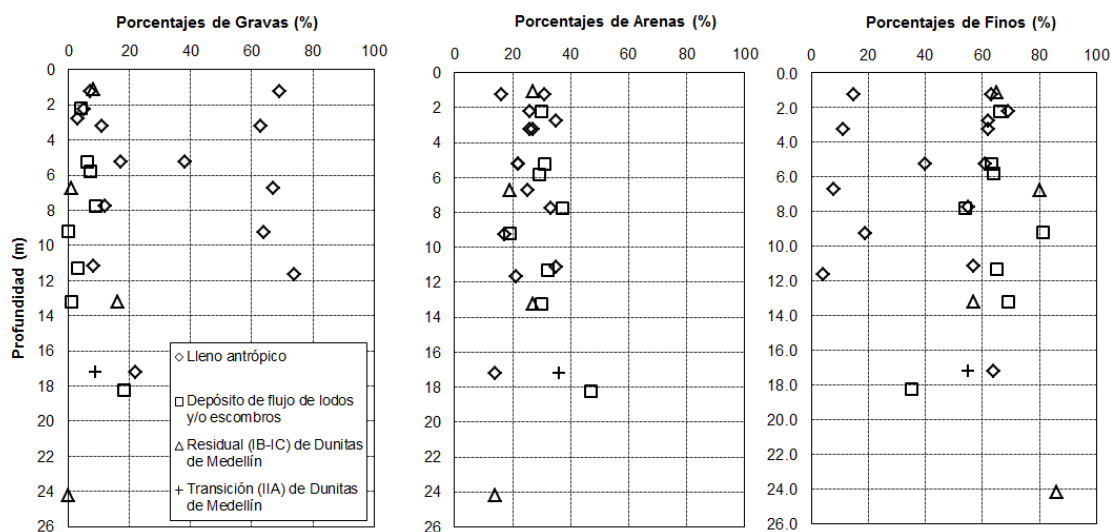


Figura 113. Porcentajes de gravas, arenas y finos variando con la profundidad

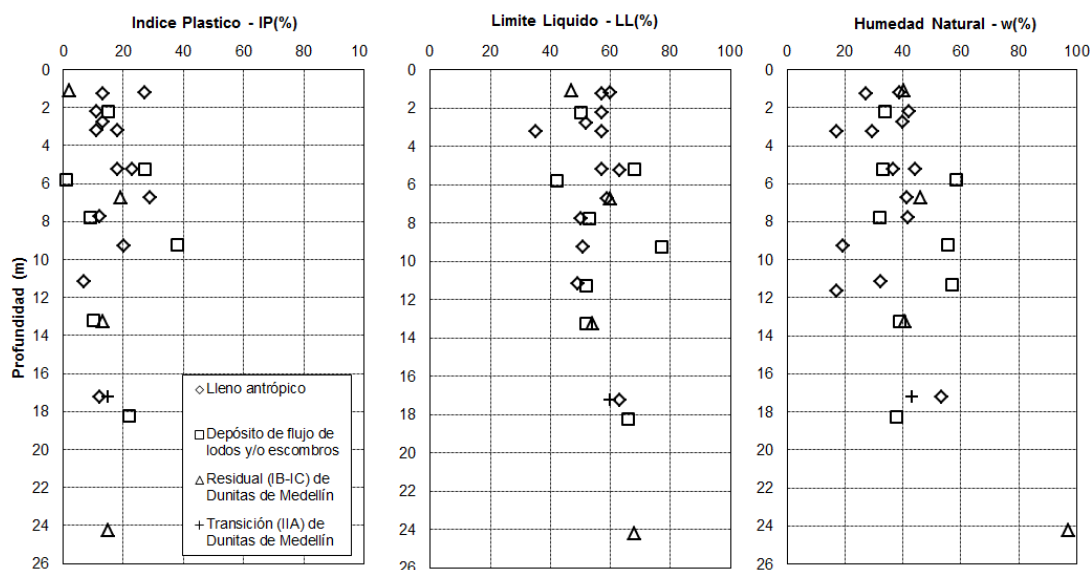


Figura 114. Índice plástico, límite líquido y humedad natural variando con la profundidad.

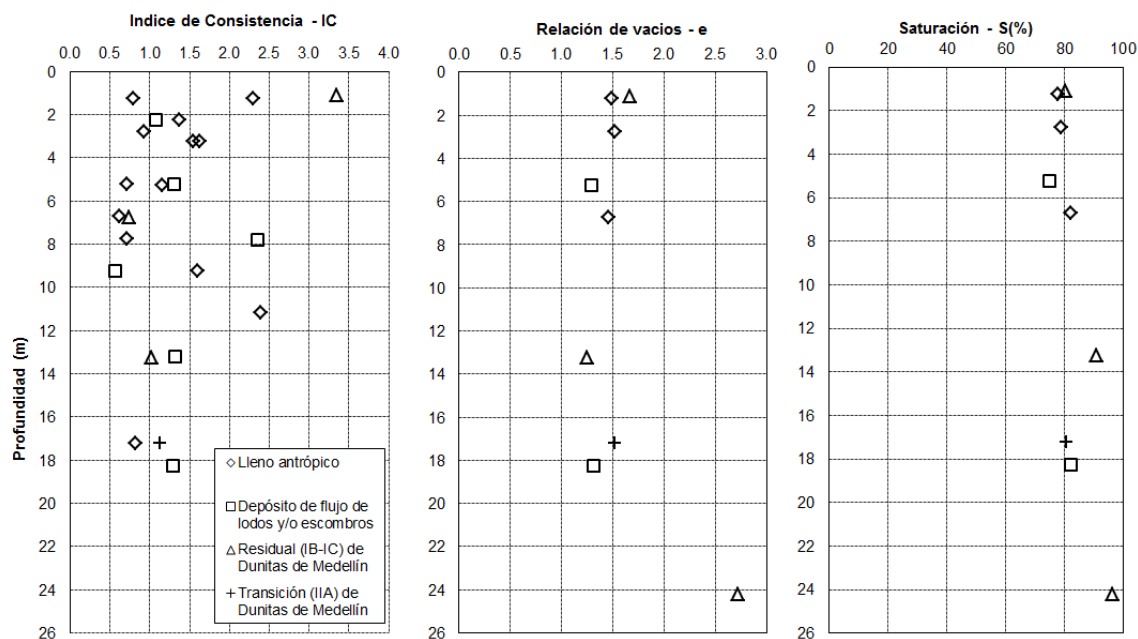




Figura 115. Índice de consistencia, relación de vacíos y saturación variando con la profundidad

En los llenos antrópicos predomina la fracción fina, con un contenido de gravas entre 3% y 22%, un contenido de arenas variando de 14% a 35% y una fracción fina del 55% al 69%. En general, la fracción fina de los llenos antrópicos caracterizados presenta límites

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---



líquidos por encima de 50, límites plásticos variando entre 24 y 51, e índices de plasticidad entre 24 y 51, de manera que se está ante materiales altamente plásticos. Por su parte, la gravedad específica de estos materiales es en promedio 2.9, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados en la composición del estrato, mientras que las relaciones de vacíos cercanas a 1.5 indican que se está ante materiales porosos, y finalmente la saturación de los materiales se encuentra en valores cercanos al 80%. La consistencia de estos materiales varía de blanda a dura, de acuerdo con la humedad natural al momento de realizar los ensayos de clasificación.

De acuerdo con lo anterior, los llenos antrópicos se caracterizan por ser materiales granulométricamente heterogéneos (variando de gravas a limos) y porosos, lo cual es de esperarse debido a su mismo origen. Desde el punto de vista de la plasticidad exhiben un comportamiento parecido, con una matriz fina que en la mayoría de los casos clasificó como limo de alta plasticidad MH, al igual que los suelos residuales de la zona, ello posiblemente debido a que los llenos se componen de una combinación de materiales antrópicos (adobes, vidrios, plástico) y suelo superficial de la zona.

En los depósitos de flujos de lodos y/o escombros predominó la fracción fina, con un contenido entre el 35% y el 81% de finos, del 19% al 47% de arenas, y entre 0 y 18% para las gravas. La fracción fina de las muestras se caracterizó por tener límites líquidos superiores a 50 (lado derecho de línea B), un límite plástico medio de 43, e índices de plasticidad que van de 1 hasta 38, quedando por debajo de la línea A. De acuerdo con lo anterior, las muestras analizadas clasificaron como limos de alta plasticidad (MH) en la mayoría de los casos, según el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos. La gravedad específica de los materiales tiene un valor promedio de 2.9, indicando la presencia de minerales pesados, por su parte se tiene una relación de vacíos promedio de 1.30 y saturaciones cercanas al 80%. La consistencia fue dura en la mayoría de los casos.

En los suelos residuales (IB-IC) de las Dunitas predominó la fracción fina, con un contenido entre 57% y 86% de finos, 14% a 27% de arenas y 0% a 16% 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 2 a 19 (debajo de la línea A). De acuerdo con lo anterior, las muestras analizadas clasificaron como limos de alta plasticidad (MH), con base en el Sistema de Clasificación Unificada de Suelos. La gravedad específica de los materiales varía de 2.7 a 3.3, lo cual permite inferir la presencia de minerales pesados. Por su parte, se tienen relaciones de vacíos entre 1.2 y 2.8, 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 55% de finos, 36% de arenas y 9% de gravas. El límite líquido tiene un valor de 60 (a la derecha de la línea B), el límite plástico es de 45, obteniendo un índice plasticidad de 15 (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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

un valor de gravedad específica de 2.8, una relación de vacíos de 1.52, 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. En el Polígono Trece de Noviembre se pudieron ejecutar trece ensayos de corte directo modalidad CD.

- ✓ Una muestra P-TN-PR-04-M5, a 4.20 m de profundidad en depósito de flujo de lodos y/o escombros.
- ✓ Dos muestras P-TN-PR-04-M8, a 7.20 m de profundidad en depósito de flujo de lodos y/o escombros.
- ✓ Dos muestra P-TN-PR-01-M5, a 4.80 m de profundidad en depósito de flujo de lodos y/o escombros.
- ✓ Dos muestra P-TN-PR-01-M7, a 6.20 m de profundidad en depósito de flujo de lodos y/o escombros.
- ✓ Una muestra P-TN-PR-05-M5, a 6.00 m de profundidad en depósitos de llenos antrópicos.
- ✓ Dos muestras UTN1-M1, a 1.0 m de profundidad en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.
- ✓ Una muestra UTN2-M1 a 1.0 m de profundidad en depósitos de vertiente flujo de lodos y/o escombros
- ✓ Una muestra UTN3-M1 a 1.0 m de profundidad en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.
- ✓ Una muestra UTN4-M1 a 1.0 m de profundidad en residual (IB-IC) de las Dunitas de Medellín.

En la Tabla 26 se presenta un resumen de las propiedades y parámetros de resistencia al corte de las muestras ensayadas y de la Figura 116 a la Figura 128 se presentan las

envolventes de los resultados de cada uno de los ensayos de corte directo realizados para las muestras en el Trece de Noviembre.

Tabla 26. 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' [°]
P-TN-PR-05-M7	6.00	Lleno Antrópico	55.0	16.3	10.4	2.99	1.80	89.00	0.00	20.00
P-TN-PR-01-M5 (1)	4.80	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	45.0	15.8	11.7	2.94	1.70	80.00	55.00	21.00
P-TN-PR-01-M5 (2)	4.80	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	38.0	16.6	12.0	2.94	1.40	79.00	18.00	25.00
P-TN-PR-01-M7 (1)	6.80	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	52.0	15.5	10.5	2.80	1.70	86.00	15.00	20.00
P-TN-PR-01-M7 (2)	6.80	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	38.0	15.6	11.3	2.80	1.44	74.00	26.00	21.00
P-TN-PR-04-M5	4.20	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	37.0	19.2	13.9	3.01	1.20	77.00	48.00	20.00
UTN2-M1 (1)	1.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	33.0	17.0	12.7	2.92	1.25	77.00	28.00	29.00
UTN2-M1 (2)	1.00	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	31.0	16.7	12.7	2.92	1.24	72.00	24.00	28.00
P-TN-PR-04-M8 (1)	7.20	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	34.0	17.4	13.2	3.00	1.20	81.00	17.00	22.00
P-TN-PR-04-M8 (2)	7.20	Depósito de flujo de lodos y/o escombros.	34.0	16.9	12.7	3.00	1.30	79.00	20.00	24.00
UTN3-M1	1.00	Residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín	38.0	17.0	12.2	3.29	1.63	77.00	14.00	31.00
UTN1-M1	1.00	Residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín	33.0	18.8	13.1	2.93	1.24	80.00	113.00	24.00
UTN4-M1	1.00	Residual (IB-IC) de las dunitas de Medellín	29.0	15.7	12.3	3.11	1.46	63.00	26.00	25.00

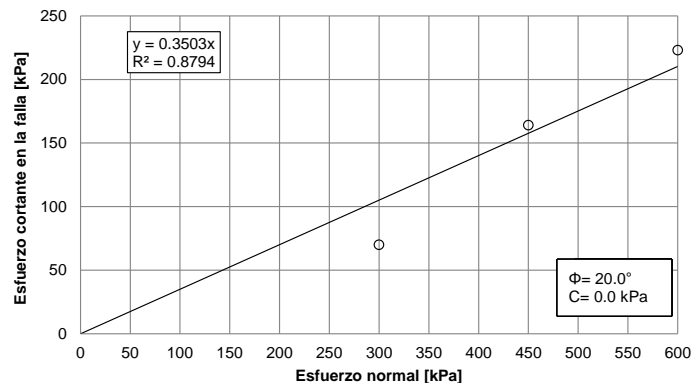


Figura 116. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-05-M7 a 6.00 m de profundidad

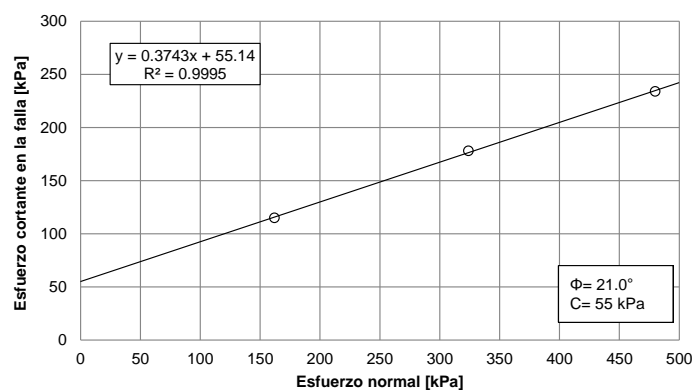


Figura 117. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M5 (1) a 4.80 m de profundidad

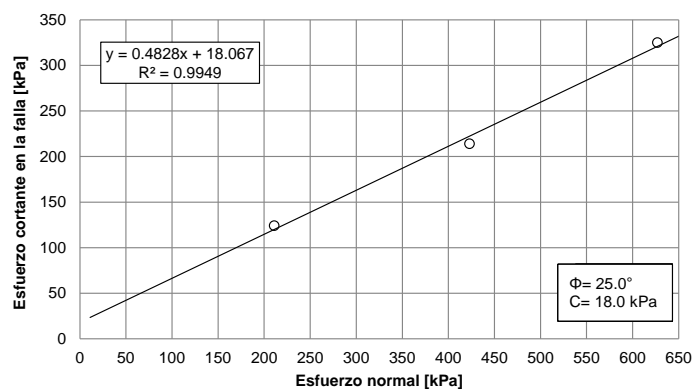


Figura 118. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M5 (2) a 4.80 m de profundidad

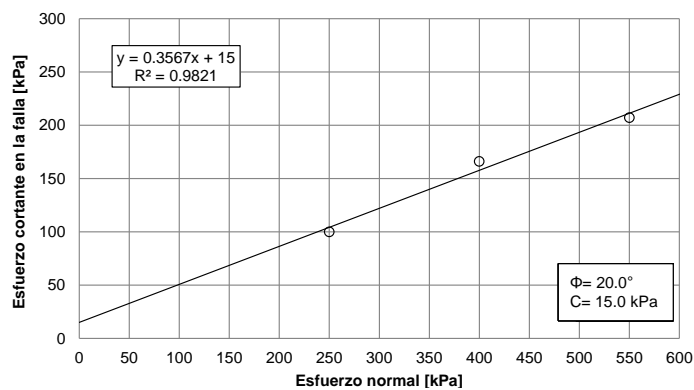


Figura 119. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M7 (1) a 6.80 m de profundidad

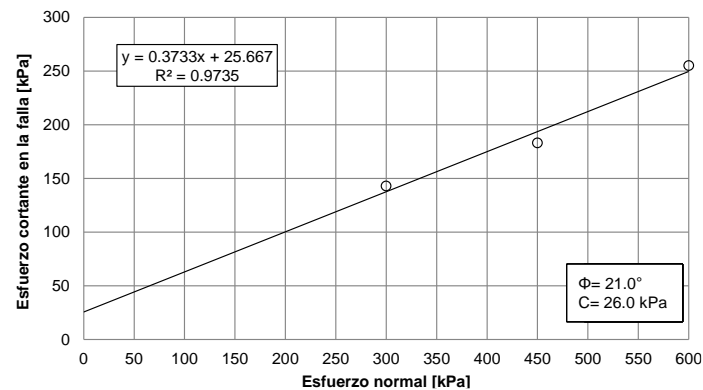


Figura 120. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-01-M7 (2) a 6.80 m de profundidad

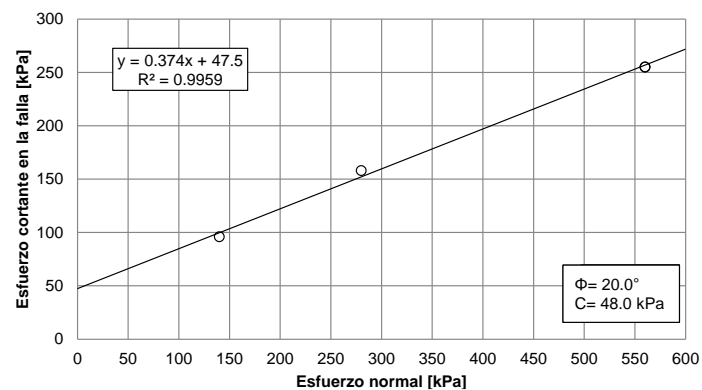


Figura 121. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-04-M5 a 4.20 m de profundidad

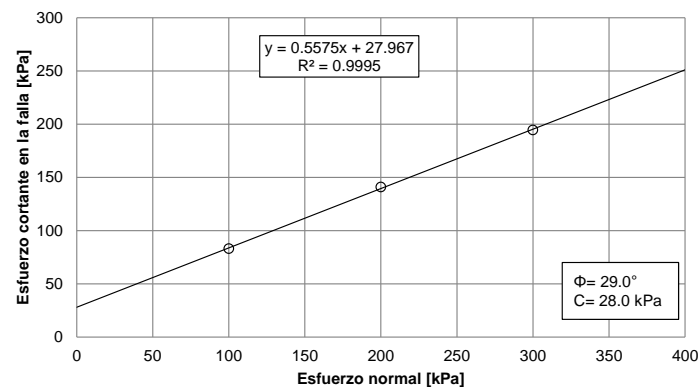


Figura 122. Resultados corte directo muestra UTN2-M1 (1) a 1.0 m de profundidad

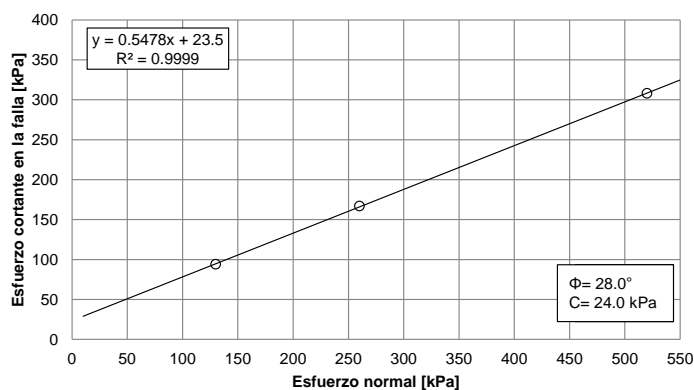


Figura 123. Resultados corte directo muestra UTN2-M1 (2) a 1.0 m de profundidad

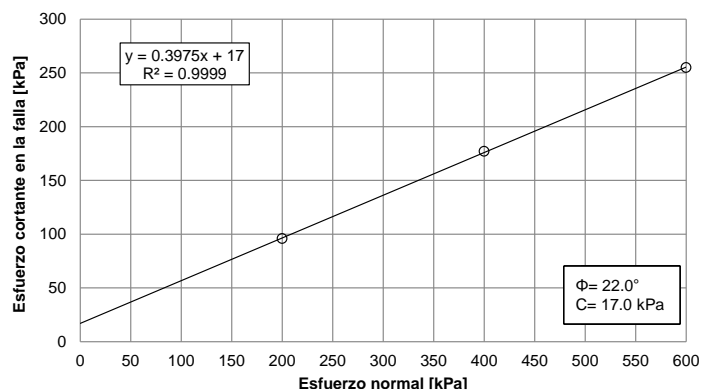


Figura 124. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-04-M8 (1) a 7.20 m de profundidad

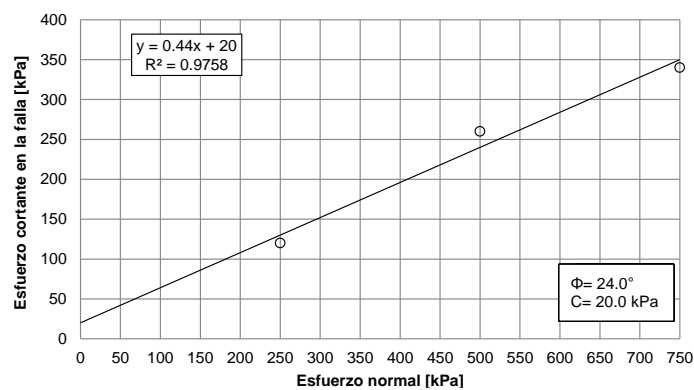


Figura 125. Resultados corte directo muestra P-TN-PR-04-M8 (2) a 7.20 m de profundidad

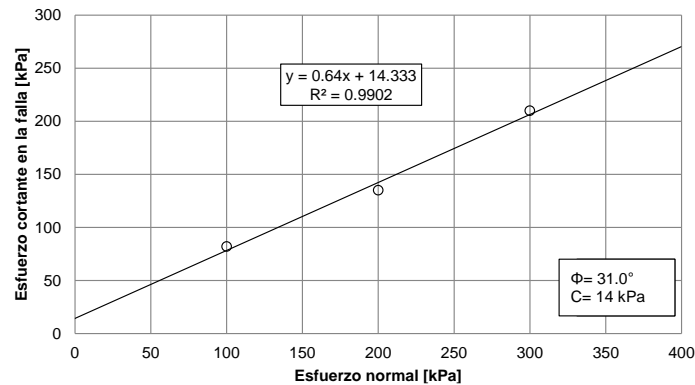


Figura 126. Resultados ensayo de corte directo muestra UTN3-M1 a 1.0 m de profundidad

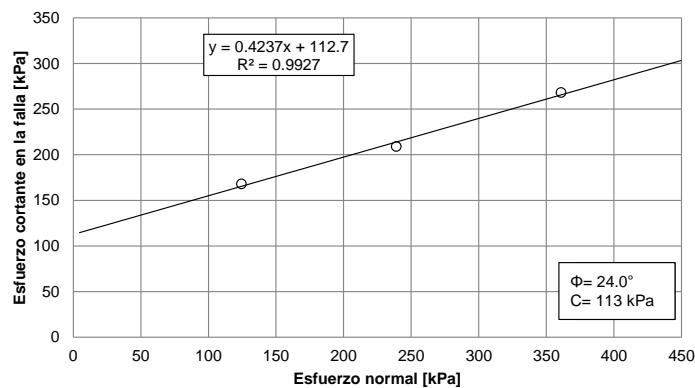


Figura 127. Resultados ensayo de corte directo muestra UTN1-M1 a 1.0 m de profundidad

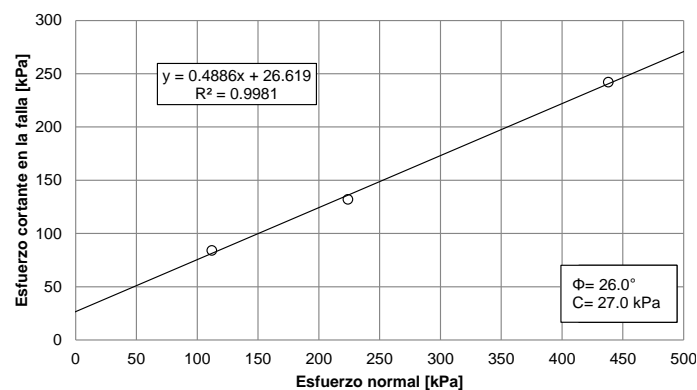




Figura 128. Resultados ensayo de corte directo muestra UTN4-M1 a 1.0 m de profundidad

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 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

El análisis de los parámetros de resistencia al corte, obtenidos a partir de los ensayos de corte directo recopilados para el lleno antrópico, se presenta en la Figura 130.

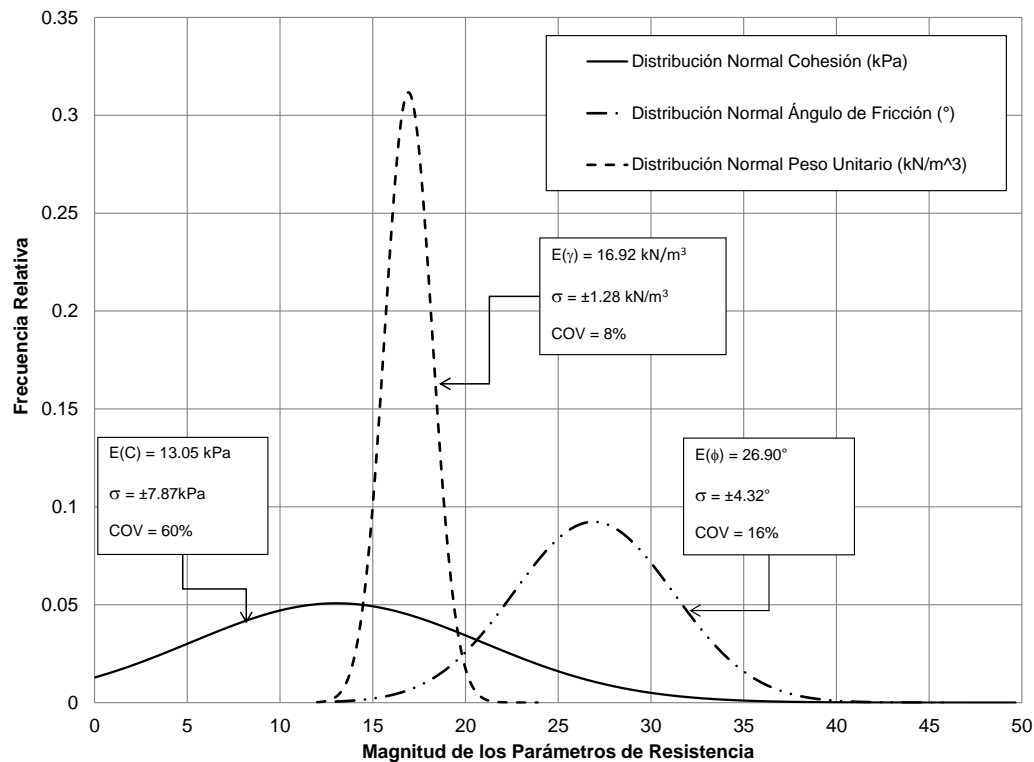


Figura 129. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del lleno antrópico

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 .

10.3.3 Depósitos de flujo de lodos y/o escombros

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de vertiente tipo flujo de lodos y/o escombros se presenta en la Figura 130.

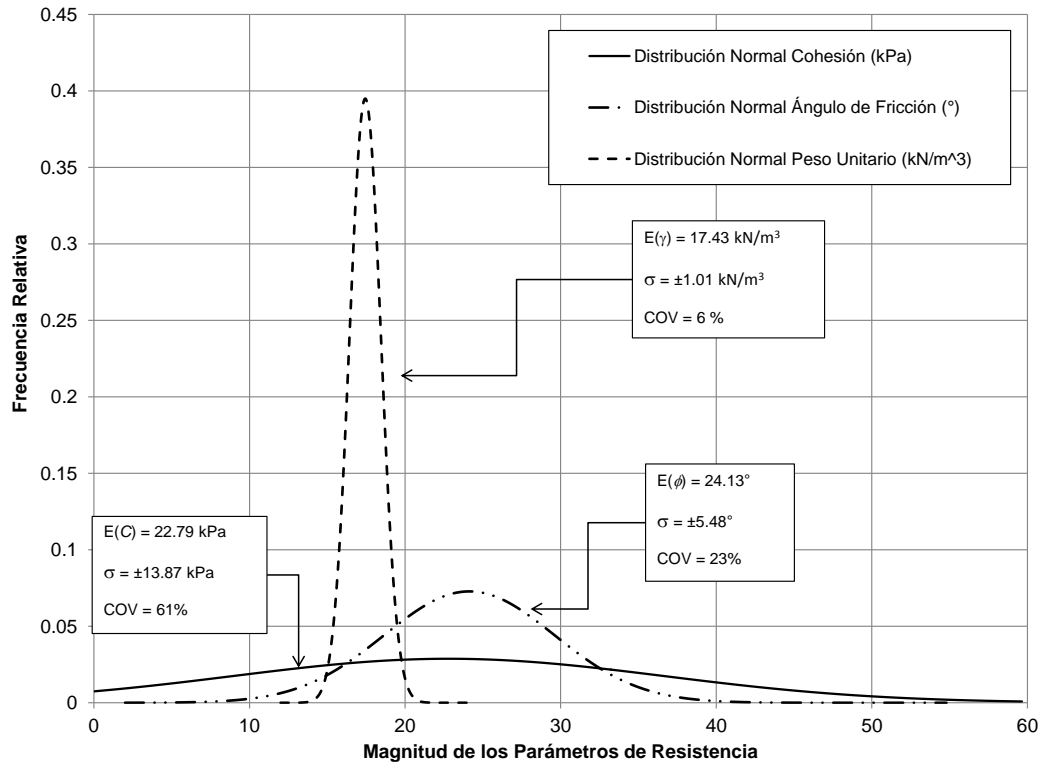




Figura 130. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente

Se observa que para estos materiales los parámetros se tornan friccionantes, consecuencia del aporte por contacto entre los materiales más gruesos que superan la matriz de suelo, teniéndose 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ 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 coluviales

Debido a la naturaleza de este material y que no se cuenta con ensayos de resistencia al corte, se asumen los parámetros similares a los de los depósitos de flujo de lodos. El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el depósito de flujo de lodos, que se asumirá de forma conservadora para el depósito coluvial, se presenta en la Figura 130.

Se observa que para estos materiales los parámetros se tornan cohesivos, consecuencia del aporte por contacto entre los materiales más gruesos que superan la matriz de suelo, teniéndose las siguientes particularidades:

- ✓ La cohesión presenta una media de 19.575 kPa con una desviación estándar asociada de $\pm 9.928 \text{ kPa}$. El coeficiente de variación es de 50.72%, 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 23.320° y una desviación estándar de $\pm 2.755^\circ$, 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 17.442 kN/m^3 con una desviación estándar asociada de $\pm 1.236 \text{ kN/m}^3$. 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 .

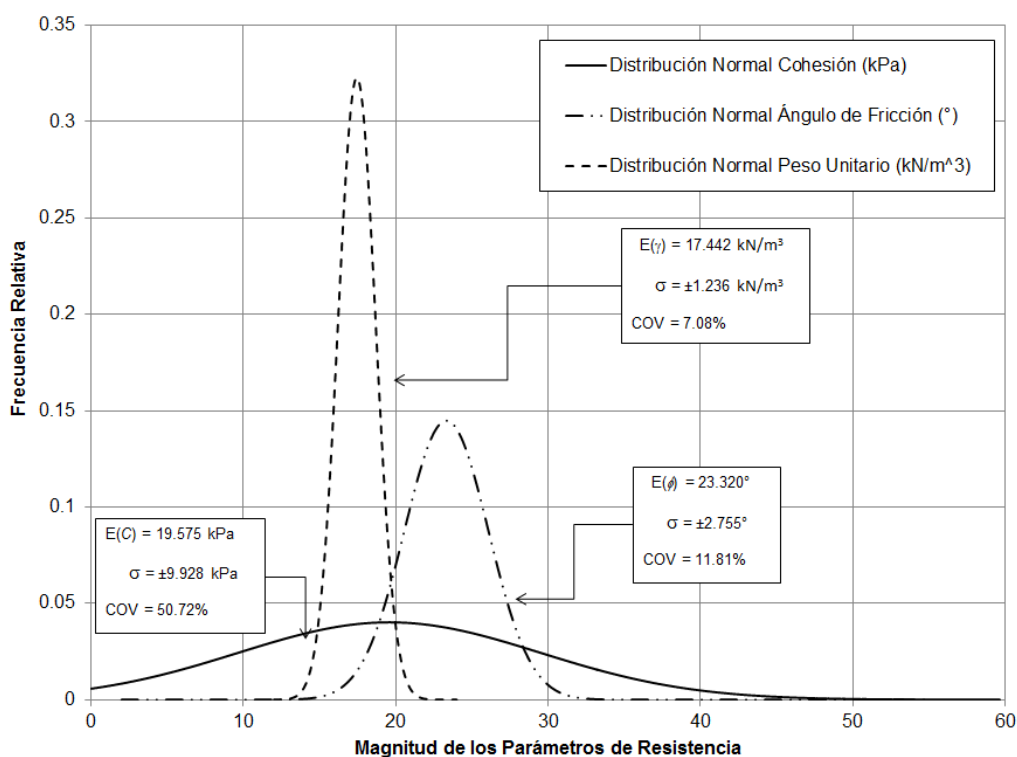


Figura 131. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte del depósito de vertiente tipo flujo de lodos

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

El análisis de los parámetros de resistencia al corte para el Residual de la Dunita de Medellín se presenta en la Figura 132.

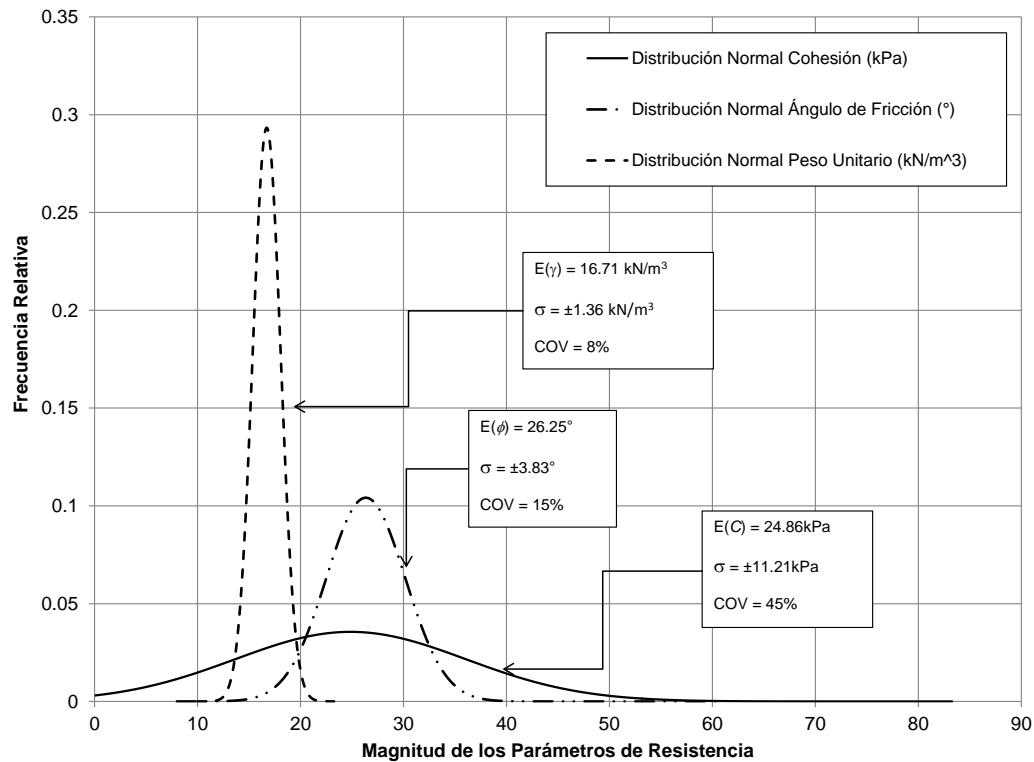


Figura 132. Análisis estadístico parámetros de resistencia al corte de los suelos residuales derivados de las Dunitas

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

- ✓ La cohesión presenta una media de 24.86 kPa con una desviación estándar asociada a ± 11.21 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/m³ con una desviación estándar asociada de ± 1.43 kN/m³. 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/m³ hasta 21 kN/m³.

10.3.6 Análisis variacional de los parámetros de resistencia al corte

En la Tabla 27 se presenta el resumen de los parámetros obtenidos para los diferentes materiales.

Tabla 27. 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	19.57	9.93	51	23.32	2.75	11.81	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

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 45% y el 63%. El-Ramly (2006) reporta coeficientes de variación de la cohesión efectiva, para materiales en general igual al 22%.
- ✓ En el caso del parámetro de ángulo de fricción interna, el coeficiente de variación para todos los materiales oscilo entre 11% y 16%. 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 describe y caracterizan desde el punto de vista hidrológico las cuencas de drenaje natural que tienen influencia sobre el Polígono Trece de Noviembre, así como el régimen de precipitaciones que caracteriza a la Unidad Morfodinámica Independiente Trece de Noviembre. 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 2015.

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
--	---	--

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.

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 siguiente información:

- ✓ 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).

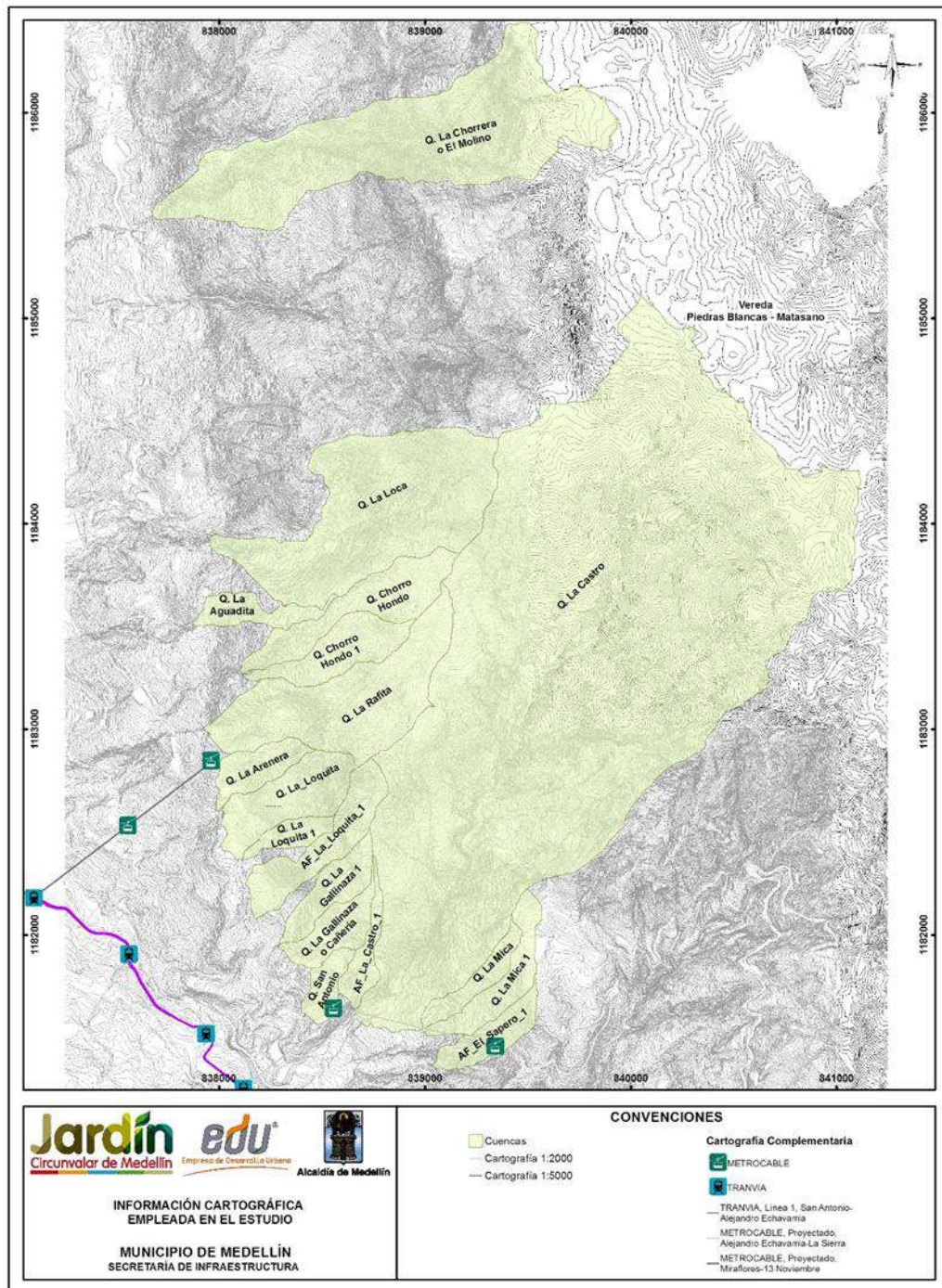
Como insumo importante para este estudio, la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU) suministró estudios previos relacionados con hidrología e hidráulica en algunos de los cauces que son objeto del presente estudio. Los estudios suministrados por la EDU corresponden a los siguientes:

- ✓ Estudios y diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales de los cauces influenciados por los proyectos del piloto Cinturón Verde metropolitano, realizados por INGEOCILCON (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 INGEOCILCON, se encuentran los análisis hidrológicos e hidráulicos para 17 quebradas del llamado Cinturón Verde. De estas 17 corrientes, las Quebradas Chorro Hondo, La Loca, El Molino y La Aguadita, intervienen en los polígonos objetos de este estudio.

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

De esta manera, de cada una de las corrientes mencionadas se tiene un estudio hidráulico e hidrológico realizado por INGEOCILCON 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 INGEOCILCON 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
(TDNInformacionCartograficaEmpleadaenelEstudio_Medellin_C)

11.3 ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

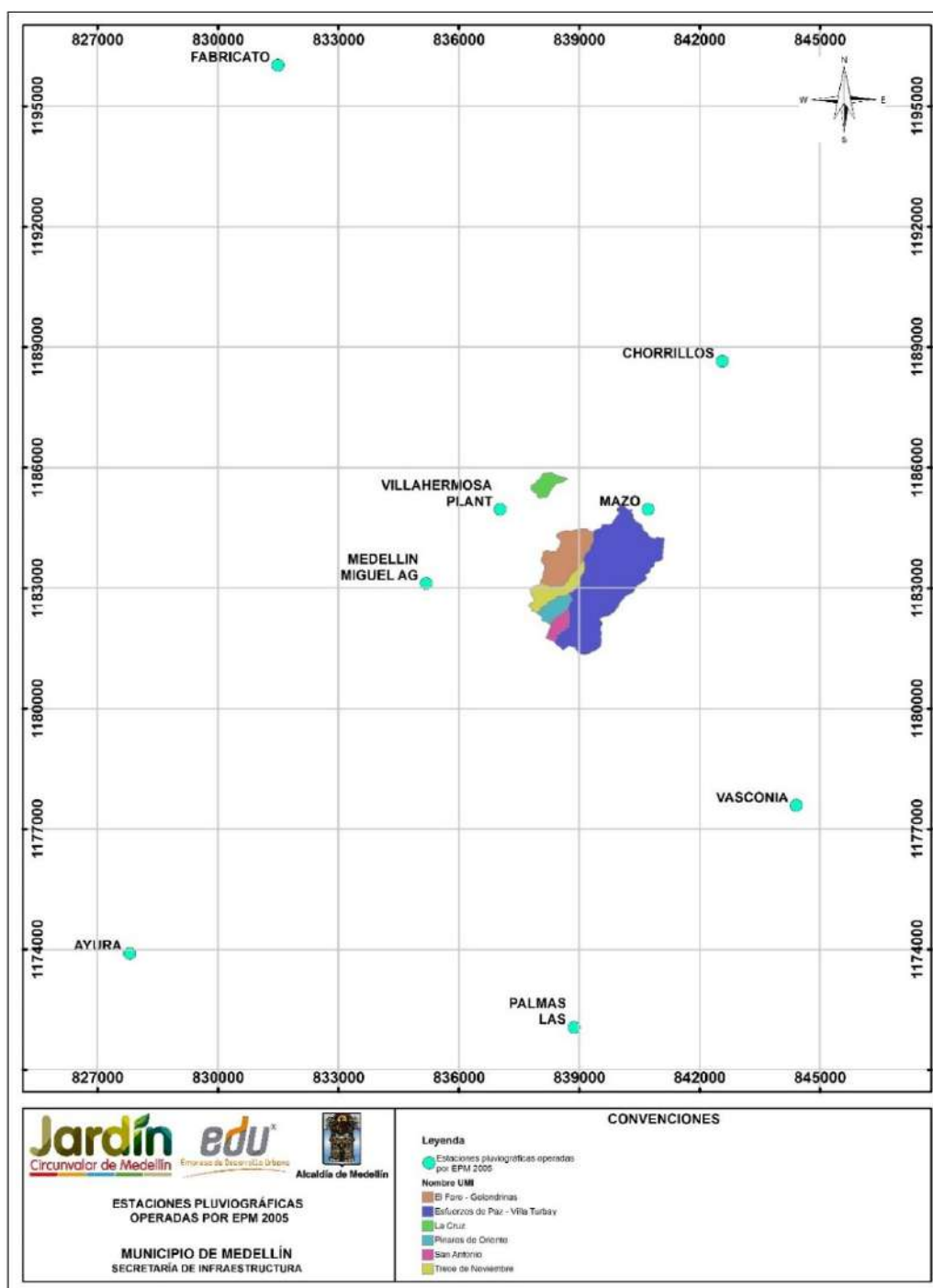
En la zona de estudio o cerca de ella se encuentran instaladas diversas estaciones pluviométricas que han registrado las precipitaciones durante años. Las entidades que operan actualmente estas estaciones son: Empresas Públicas de Medellín (EPM), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales 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 28 se presenta un listado de las estaciones consideradas y en el Mapa 24 se observa la ubicación 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 28). En el Anexo 04, en el cual se incluyen todas las memorias hidrológicas, se presenta el mapa con la variación de la precipitación media multianual.

Tabla 28. 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
(TDNEstacionesPluviograficasOperadasEPM2005_Medellin_C)

11.3.1 Estación Planta Villa Hermosa

En la gráfica de la izquierda de la Figura 133 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 133 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.

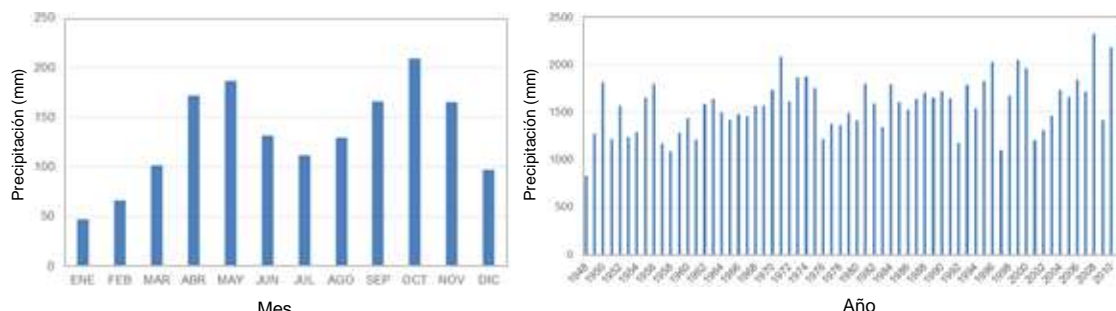


Figura 133. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Planta Villa Hermosa

11.3.2 Estación Mazo

En la gráfica a la izquierda de la Figura 134 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la Estación Mazo para el periodo comprendido entre 1948 y 2011. En ella 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 134 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 de La Niña con un valor del índice comprendido entre -16,8 y -0,09.

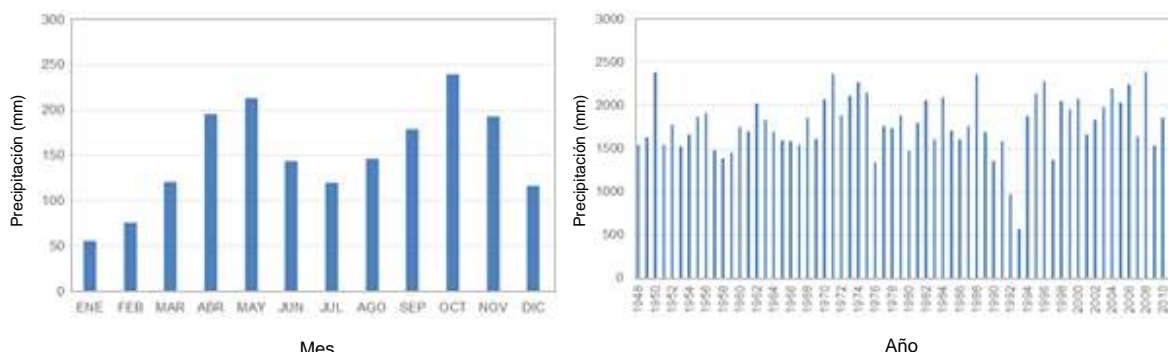


Figura 134. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Mazo

11.3.3 Estación Miguel de Aguinaga

En la gráfica a la derecha de la Figura 135 se muestran las precipitaciones medias mensuales en la estación Miguel de Aguinaga para el periodo comprendido entre 1954 y 2013. En ella 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 135 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, durante ese año se presentó el Fenómeno de La Niña.

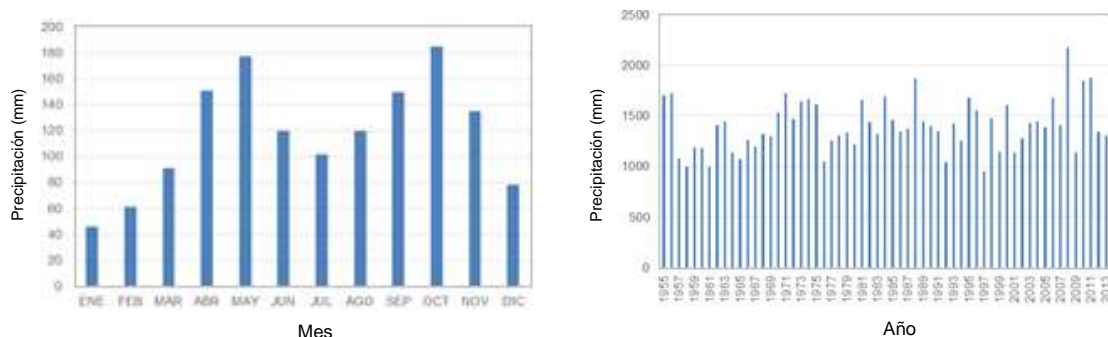


Figura 135. Precipitación media mensual y precipitaciones anuales en la Estación Miguel de Aguinaga

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.

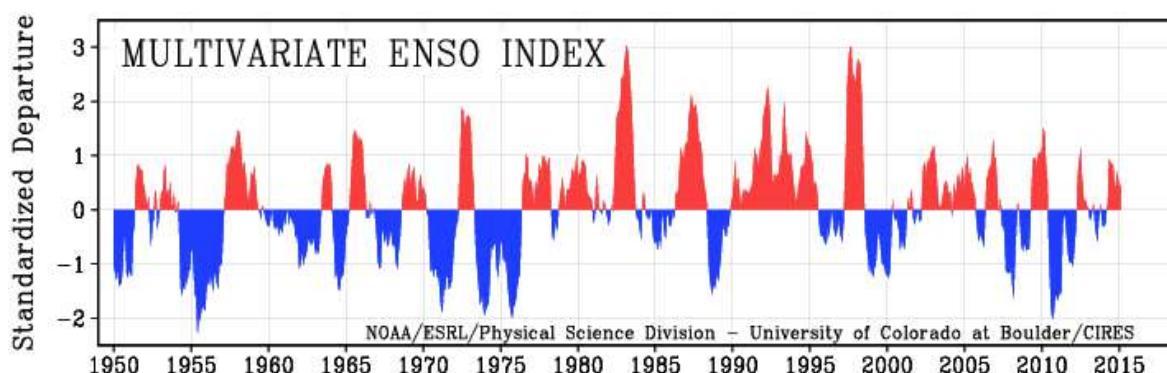


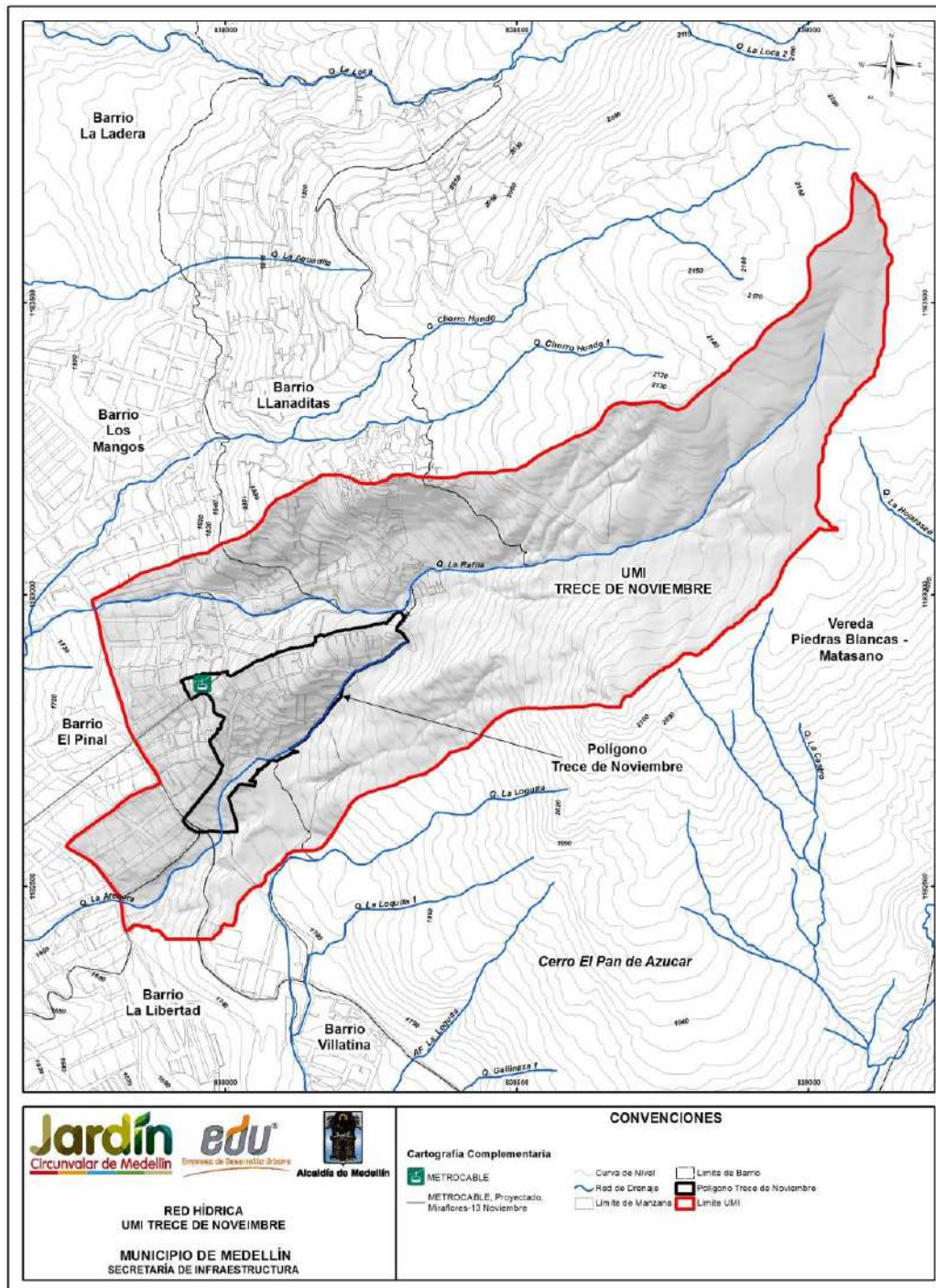
Figura 136. Índice Multivariado del ENSO (Fuente: NOAA)

11.4 DELIMITACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS

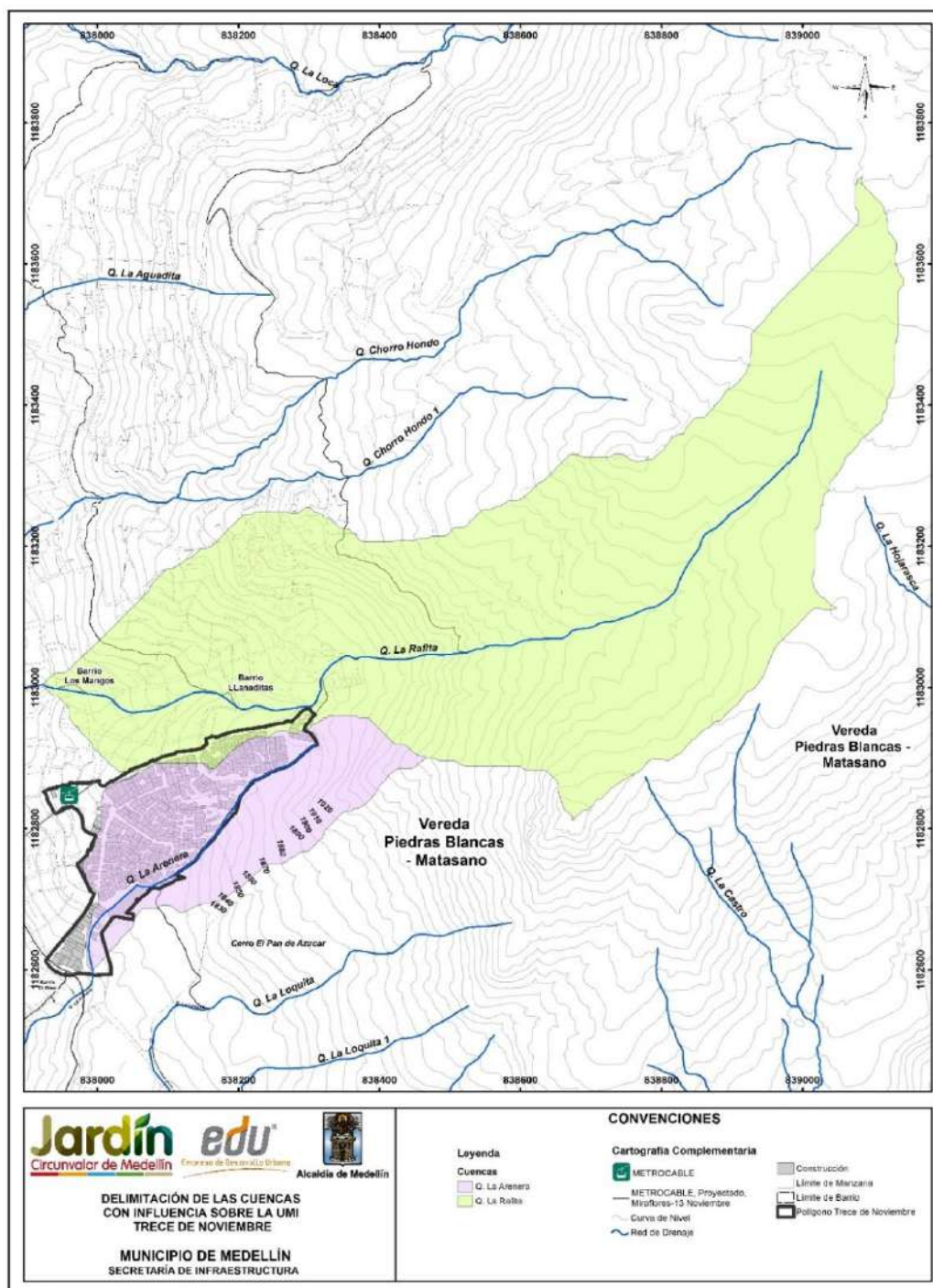
En el Mapa 25 se presenta la red hídrica de la UMI Trece de Noviembre. Esta red fue establecida a partir del modelo digital del terreno generado con la información cartográfica, incluyendo los cauces naturales que tienen influencia sobre cada uno de los ocho polígonos de interés para el presente estudio. Se sometió a revisión y validación con respecto a la red hídrica del Plan de Ordenamiento Territorial (POT, 2014) del Municipio de Medellín 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 (2014) como base para la elaboración del presente estudio.

En el Mapa 26 se presenta esta misma red de drenaje, además de las cuencas asociadas a las corrientes de agua que tienen influencia sobre el Polígono Trece de Noviembre. En particular para el Polígono y para la UMI Trece de Noviembre, las corrientes naturales que tienen influencia corresponden a las Quebrada La Rafita y La Arenera. La primera corre por el costado norte del polígono y la segunda corre por el costado sur.

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 Trece de Noviembre, las cuales fueron nombradas de acuerdo con la corriente a la cual pertenecen.



Mapa 25. Red hídrica en la UMI Trece de Noviembre
(20_TDNRedHidricaUMI_Medellin_C y 20_TDNRedHidricaUMI_Medellin_T)



**Mapa 26. Delimitación de las cuencas con influencia sobre la UMI Trece de Noviembre
(TNDDelimitacionCuencasUMI_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 los polígonos objeto de este estudio. De esta manera, se presentan en la Tabla 29 las coordenadas de los puntos de salida del flujo para las Quebradas de La Arenera y La Rafita. En la Tabla 30 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 29. Coordenadas de los puntos de salida del flujo en cada cuenca

PUNTO	POLÍGONO	CUENCA	X	Y
1	Trece_de_Noviembre	Q. La Arenera	837992.14	1182599.25
2	Trece_de_Noviembre	Q. La Rafita	837922.50	1183003.64

Tabla 30. Parámetros morfométricos de las cuencas de influencia en Trece de Noviembre

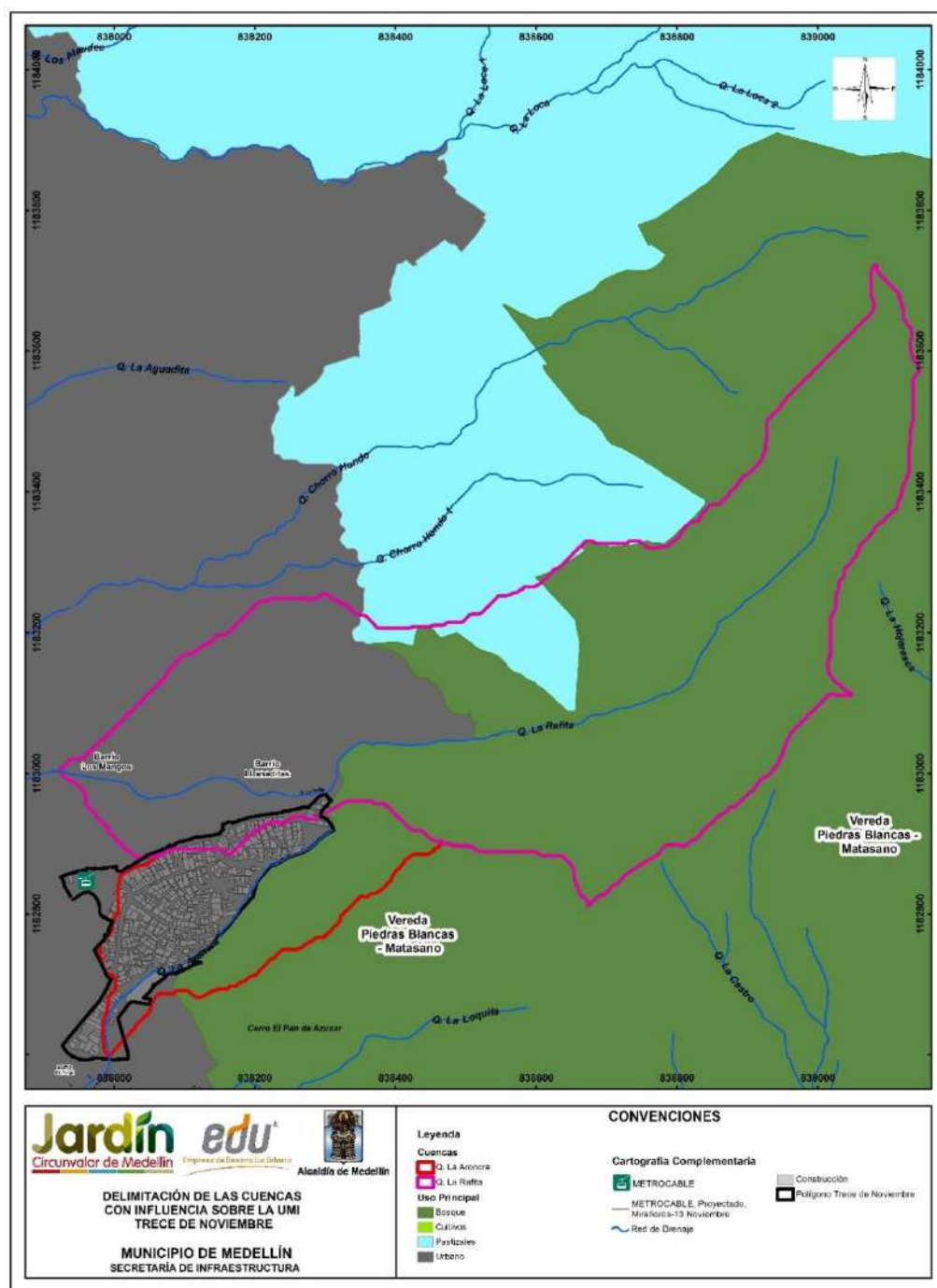
Cuenca	Area (m2)	Pendiente media de la cuenca (%)	Perimetro (m)	Altura media de la Cuenca (msnm)	Cota max cuenca (msnm)	Cota min cuenca (msnm)	Longitud de la cuenca (m)	Ancho de la cuenca (m)	Longitud del cauce (m)	Pendiente del cauce (%)
Q. La Arenera	78176	47	1429	1857	1996	1762	562	139	663	32
Q. La Rafita	412460	40	3735	2071	2202	1786	1367	302	1693	23

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 que es indicada en el POT (2014) y la cual es presentada en los Mapas del Atlas 14_TDNClasificaciondelSuelo_Medellin_T al 17_TDNUsosdelSueloRural_Medellin_T para la UMI Trece de Noviembre. 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 31 se muestra un resumen para cada cuenca.

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 Trece de Noviembre
Modificado del POT (2014)
(TNDUsosSuelosCuencasUMI_Medellin_C)

	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</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. Por ejemplo, en la Tabla 31 puede observarse que la cuenca de la Quebrada La Arenera se encuentra urbanizada en más del 50%.

Tabla 31. Usos del suelo en las cuencas de influencia en Trece de Noviembre

CUENCA	Usos del Suelo (%)			
	Forestal productor	Agroforestal	Forestal protector	Urbano
Q. La Arenera	0%	0%	49%	51%
Q. La Rafita	5%	0%	67%	28%

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 32 se presentan los diferentes modelos empleados para la estimación del tiempo de concentración y en la Tabla 33 se presentan los resultados del cálculo del tiempo de concentración para las cuencas de influencia en el Polígono Trece de Noviembre.



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

Tabla 32. Modelos empleados en el cálculo del tiempo de concentración

Método	Ecuación	Parametros
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 33. Tiempos de concentración calculados para las cuencas

Nombre cuenca	Tiempo de concentración (min)										Desv. Est.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Promedio	Tc tomado
	Kirpich	Temez	F.A.A.	Pilgrim	Clark	California Culvert Practice	Passini I	California USBR	Giandotti	Promedio					
Q. La Arenera	4.5	6.9	16.1	17.3	6.2	3.6	4.3	4.5	10.8	8.2	5.3	13.5	3.0	5.8	5.8
Q. La Rafita	10.6	14.9	28.9	32.6	18.4	8.0	12.0	10.5	19.5	17.3	8.6	25.8	8.7	14.3	14.3

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

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

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 34 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 (Memorias Hidrológicas).

Finalmente, en la Tabla 35 se presentan las intensidades medias en cada una de las cuencas que tienen influencia sobre el Polígono Trece de Noviembre.

Tabla 34. 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 35. Intensidades de precipitación en mm/h para cada cuenca

CUENCA	Intensidades de Diseño (mm/h)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Arenera	99.8	156.2	212.3	235.9
Q. La Rafita	78.8	117.9	156.1	172.2

11.5.2 Método Racional

Este método es uno de los de mayor empleo debido a su sencillez. Presenta validez para 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 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 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 36.

Tabla 36. Coeficientes de escorrentía calculados para cada cuenca

Nombre cuenca	Coeficientes de Escorrentía (Adimensional)			
	TR2.33	TR10	TR50	TR100
Q. La Arenera	0.56	0.63	0.71	0.75
Q. La Rafita	0.47	0.53	0.61	0.65

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 escurrimiento directa. Aunque en particular para las cuencas del Polígono Trece de Noviembre 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).

$$n = 1 + \left\{ \frac{1}{2(K/T_p)} + \left[\frac{1}{4(K/T_p)^2} + \frac{1}{4(K/T_p)^2} \right]^{1/2} \right\}^2$$

Las expresiones propuestas por Williams y Hann para determinar la forma del hidrograma unitario son las siguientes, donde U es el caudal unitario y T_p es el tiempo al pico.

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

$$U = U_p \left(\frac{t}{T_p} \right)^{n-1} e^{\left[(1-n) \left(\frac{t}{T_p} - 1 \right) \right]} \quad \text{Para } t \leq t_0$$

$$U = U_0 e^{\left[\frac{t_0 - t}{K} \right]} \quad \text{Para } t_0 < t \leq t_1$$

$$U = U_1 e^{\left[\frac{t_0 - t}{3K} \right]} \quad \text{Para } t > t_1$$

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 U_p es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario, A_c es el área de la microcuenca en millas cuadradas y T_p es el tiempo al pico en horas.

El SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago, T_R y el tiempo de concentración, T_C , como:

$$T_C = \frac{5}{3} T_R$$

El tiempo de rezago, T_R , puede calcularse con base en la siguiente expresión, donde L_C es la longitud del canal principal en pies, S_C es la pendiente promedio de la microcuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas.

$$T_R = \frac{L_c^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * S_c^{0.5}}$$

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.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
--	---	--

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:

$$P_e = \frac{(P_{tacum} - I_a)^2}{P_{tacum} - I_a + S} \quad I_a = 0.2 * S \quad S(mm) = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4$$

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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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, y 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%.

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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 37 se puede observar que para la regionalización fueron empleadas 18 cuencas, además de las coordenadas de cada uno de sus puntos de salida.

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.



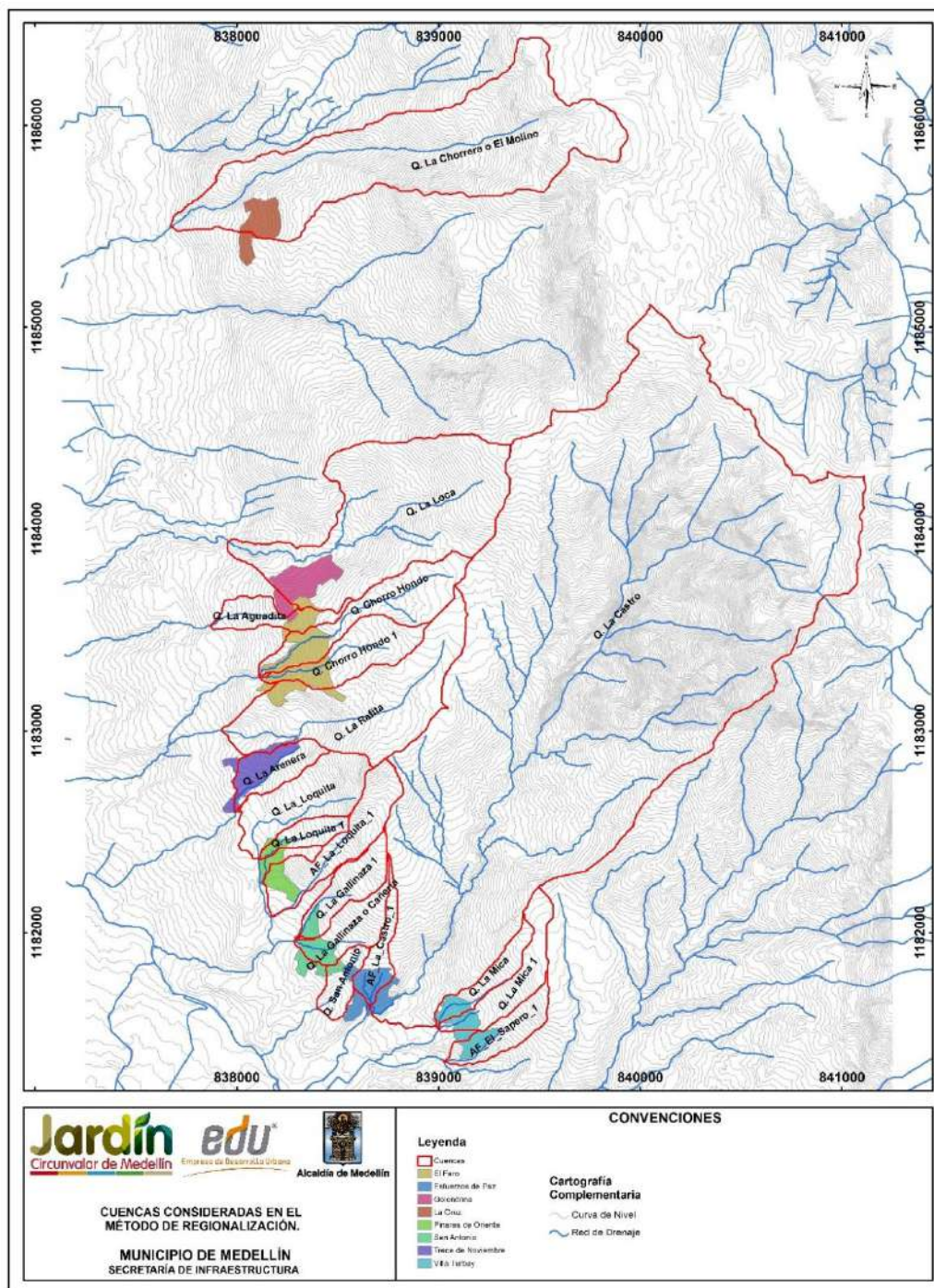
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA “ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN” INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 37. Coordenadas para los puntos de salida de 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

En la Tabla 37 y en el Mapa 28, se muestran las cuencas tenidas en cuenta para la regionalización. 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 38 junto con el coeficiente de correlación.



Mapa 28. Cuencas consideradas en el método de regionalización
(TDNCuencasparaMetodoRegionalizacion_Medellin_C)



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

Tabla 38. 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

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 39 a la Tabla 42. 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 de 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 39. Resumen de Caudales Máximos para TR 2.33 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)				
	H.U. Williams-Hann	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Arenera	0.30	0.32	1.20	0.81	1.10
Q. La Rafita	2.31	2.08	4.20	3.39	3.99

Tabla 40. Resumen de Caudales Máximos para TR 10 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)				
	H.U. Williams-Hann	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Arenera	0.90	0.94	2.12	1.34	1.97
Q. La Rafita	5.35	4.81	7.17	5.69	6.89

Tabla 41. Resumen de Caudales Máximos para TR 50 Años

CUENCA	Qmax (m3/s)				
	H.U. Williams-Hann	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Arenera	1.66	1.71	3.26	2.03	3.05
Q. La Rafita	8.89	7.88	10.84	8.71	10.52



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

Tabla 42. Resumen de Caudales Máximos para TR 100 Años

CUENCA	Qmax (m ³ /s)				
	H.U. Williams-Hann	H.U. SCS	Racional	Regionalización (Ingeocilcon)	Regionalización (Propia)
Q. La Arenera	2.01	2.07	3.85	2.38	3.62
Q. La Rafita	10.52	9.26	12.79	10.20	12.44

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 Trece de Noviembre. 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 Empresa de Desarrollo Urbano que fueron ejecutados por CÓNCAVAS (2013), los cuales fueron descritos en el capítulo de Aspectos Hidrológicos.

Para el caso particular del Polígono Trece de Noviembre fue necesario levantar información topográfica en los cauces de la Quebrada La Rafita y la Quebrada La Arenera, dado que la información secundaria mencionada no representa ya las condiciones actuales del cauce o no cuenta con el detalle requerido para los propósitos de este proyecto.



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 Trece de Noviembre 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 hace referencia a la dinámica fluvial de los drenajes asociados a la UMI Trece de Noviembre, citándose la presencia de un proceso morfodinámico activo asociado a la socavación en la margen izquierda de la Quebrada La Rafita (Figura 46). El proceso afecta aproximadamente 4 m de longitud del cauce de la quebrada y se encuentra removiendo materiales antrópicos. A partir de la fotointerpretación se encontraron cicatrices de movimientos en masa en las márgenes de esta quebrada, los cuales pueden estar asociados a socavación lateral del cauce.

Como complemento al análisis de la dinámica de las corrientes de agua asociadas a la UMI Trece de Noviembre (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 La Arenera y La Rafita.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

12.2.1 Quebrada La Arenera

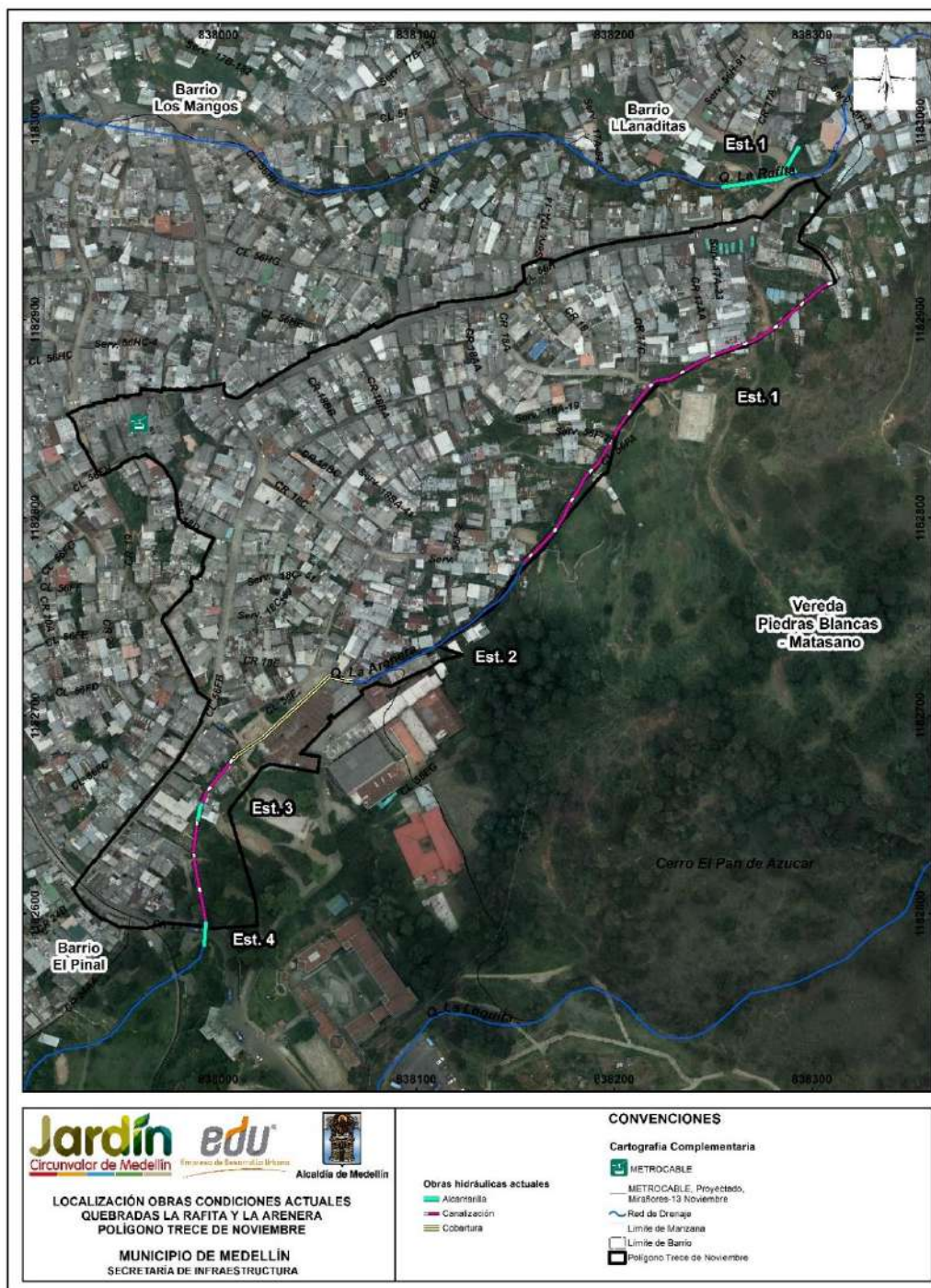
El tramo analizado de la Quebrada La Arenera comprende una longitud total de 430 m, el cual inicia en el costado oriental del Polígono Trece de Noviembre, cerca de la placa polideportiva de la zona y finaliza aguas abajo en el cruce con la Carrera 23. En el Mapa 29 se muestra en planta el tramo de quebrada analizado, indicándose en ella las zonas que corresponden a cauce natural y las que corresponden a las estructuras antrópicas.

En la parte alta de la Quebrada La Arenera, donde se pudiese precisar el inicio del drenaje, no se cuenta con un cauce definido. Sin embargo, se cuenta con un canal trapezoidal de fondo continuo en piedra pegada contiguo a la placa polideportiva (Figura 137).

A lo largo del tramo estudiado, el cauce presenta un ancho que varía entre 1.0 m y 2.0 m y una pendiente que varía entre el 9% y 65%. En el Anexo 05, en el cual se incluyen las memorias hidráulicas, se presenta un perfil del cauce. No se observó evidencia de flujo permanente en el cauce, lo que indica que corresponde a una corriente efímera que conduce escorrentía sólo cuando se presentan precipitaciones.

Al finalizar el canal inicial de fondo continuo, donde ocurre un incremento de la pendiente del cauce, inicia un canal trapezoidal escalonado en concreto, con piedra pegada en el fondo, que disipa la energía del flujo al aumentar la rugosidad y disminuir las velocidades en el flujo. La localización de este canal escalonado y del canal inicial de fondo continuo se presenta en la Figura 138, donde se han resaltado en color verde y denominado en conjunto como “Est.1”. El canal trapezoidal cuenta con una longitud de 100 m aproximadamente y su muro en la margen derecha sobresale del terreno, lo que podría dificultar el ingreso de flujo proveniente de esta margen y generar un foco de erosión que a largo plazo podría poner en riesgo la estabilidad del propio canal. En la Figura 138 y en la Figura 139 se muestran detalles de esta estructura.

Al finalizar el canal escalonado, la quebrada continúa en su cauce natural a lo largo de otros 100 m aproximadamente, con un ancho cercano a 1.0 m, en cuyas márgenes se observan expresiones mínimas de vegetación y la presencia de viviendas ubicadas a menos de 1.0 m del cauce y viviendas cuyos muros actúan como márgenes del cauce (Figura 140). En este tramo no se observaron procesos de erosión o socavación activos. En el fondo del cauce predomina la presencia de materiales gruesos, por lo que esta corriente se puede clasificar como de materiales no cohesivos. De acuerdo con la clasificación de Rosgen, el cauce natural de la Quebrada La Arenera puede catalogarse como de Tipo A3a+.



Mapa 29. Localización obras en el cauce de la Quebrada La Arenera
(TNDLocalizacionCauceQdaArenera_Medellin_C)





Figura 137. Canal de arranque de la Quebrada La Arenera y cruce peatonal



Figura 138. Empalme de canal en piedra pegada a canal escalonado en concreto y canal escalonado trapezoidal en concreto con margen derecha descubierta



Figura 139. Terminación en llave de canal trapezoidal y cruce sobre Quebrada La Arenera

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

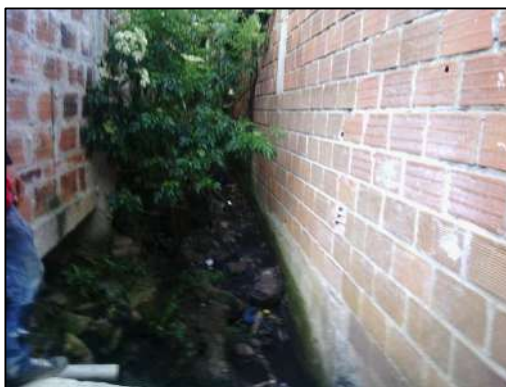
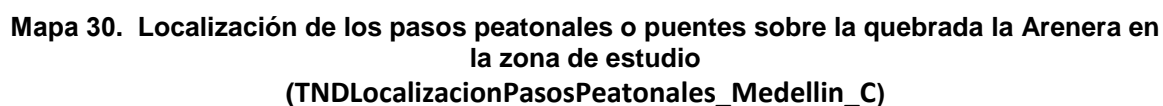


Figura 140. Invasión de viviendas al cauce de la Quebrada La Arenera

Luego del tramo en cauce natural inicia una estructura tipo box culvert, de 80 m de longitud aproximadamente, el cual cruza bajo el centro educativo y la iglesia del sector. La localización de esta estructura se presenta en el Mapa 29, donde se ha denominado como “Est.2”.

El tramo final de la Quebrada La Arenera cuenta con una longitud de 114 m aproximadamente. Este tramo se encuentra conformado por un canal rectangular en concreto (Est. 3) en el que existen obras tipo alcantarilla y tipo canal (“Est.3” y “Est. 4” en el Mapa 29 del presente informe) para facilitar el cruce de calles y para disipar la energía del flujo. En la Tabla 44 se muestra el resumen de las estructuras existentes en el recorrido de estudio de la Quebrada La Arenera.

A lo largo de la Quebrada La Arenera, existen ocho pasos peatonales o puentes cuya localización se puede observar en el Mapa 30, además se presentan las coordenadas en la Tabla 43. Los Pasos Peatonales del 1 al 7 se encuentran sobre el canal trapezoidal escalonado (Est. 1) cuyas principales características geométricas se muestran en la Tabla 44. El Paso Peatonal 8 se encuentra localizado sobre el canal rectangular (Est. 3). Los ocho puentes cuentan con sus apoyos fuera del canal y debido a la configuración del terreno, a los canales y las altas pendientes, estos apoyos no generan influencia sobre la mancha de inundación.





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

Tabla 43. Coordenadas y características de los pasos peatonales o puentes sobre la Quebrada La Arenera en la zona de estudio

PUENTE	ESTE	NORTE	LUZ (m)	MATERIAL	APOYOS
1	838220.6	1182869.3	3.5	Concreto	Simples y superficiales
2	838192.6	1182827.9	1.9	Concreto	Simples y superficiales
3	838187.52	1182823.5	2.2	Concreto	Simples y superficiales
4	838172.68	1182798.2	4.5	Concreto	Simples y superficiales
5	838163.96	1182786.1	5.5	Concreto	Simples y superficiales
6	838152.82	1182774.6	3.5	Madera	Simples y superficiales
7	838121.79	1182743	3.2	Madera	Simples y superficiales
8	837987.66	1182626.6	3.5	Concreto	Simples y superficiales

Tabla 44. Resumen de estructuras hidráulicas Quebrada La Arenera

Estructura	Ubicación	Tipo Estructura	Tipo sección	Tipo Fondo	Material Paredes	Material Fondo	Dimensiones				
							Ancho	Alto	Z	Diám.	Longitud
Est.1	Entre Calle 56fb y Carrera 18C	Canal	Trapezoidal	Escalonado	Concreto	Piedra pegada/concreto ciclópeo	0.8	1	0.6		106
Est.2	Parroquia Beato Domingo Iturrate	Cobertura (L>20)	Rectangular	Uniforme	Concreto	Concreto	1.5	1.55	0		79.91
Est.3	25 m aguas abajo de la Est.2	Alcantarilla (L<=20m)	Rectangular	Escalonado	Concreto	Concreto	1	1.3	0		11.27
Est.4	Cruce Carrera 23	Alcantarilla (L<=20m)	Rectangular	Escalonado	Concreto	Concreto	1.5	1.3	0		12.72

12.2.2 Quebrada La Rafita

En el tramo de estudio, la Quebrada La Rafita cuenta con una longitud de 310 m. Tal como se observa en el Mapa 29 la parte media y final de la quebrada se encuentran separadas ya del Polígono Trece de Noviembre, pero se ha incorporado en este estudio dado que cualquier eventual proceso de socavación podría generar alguna inestabilidad en su margen izquierda que sirve de soporte a algunas viviendas en el costado norte del polígono. Por su parte, el tramo inicial de la quebrada es la más cercana al Polígono Trece de Noviembre, donde el box culvert existente podría generar desbordamientos en caso de incapacidad hidráulica, escenario que se analiza así como la posibilidad de derrames hacia el interior del polígono.

En la parte inicial del tramo de interés el box culvert existente permite el cruce de la Carrera 17A sobre la quebrada. La localización de esta estructura se presenta en el Mapa 29 donde se denomina “Est.1”. Aguas arriba del box culvert se presenta un canal natural de ancho promedio cercano a 1.0 m, en cuyo lecho se observa presencia de vegetación de densidad media, presencia de fragmentos de roca y basuras, así como viviendas construidas muy cerca del cauce (Figura 141).

Aguas abajo del box culvert, igualmente se presenta en el lecho materiales antrópicos (basuras), y algunos fragmentos de roca (Figura 142). Tanto en la margen derecha como en la margen izquierda se observa presencia de vegetación también con algunas viviendas cercanas al cauce.

La mayor parte del tramo analizado corresponde a una quebrada más encajonada y definida, donde se hace más evidente el transporte de aguas residuales producto de las descargas de zonas urbanizadas adyacentes a esta. En el lecho de la quebrada hay mayor presencia de fragmentos y volúmenes de roca en comparación con el tramo inicial en la parte alta (Figura 143 y Figura 144).

De acuerdo con la clasificación de Rosgen, el cauce natural de la Quebrada La Rafita puede catalogarse como de Tipo A3a+. Las pendientes de esta quebrada en el tramo de estudio varían entre un 15% y un 40%, como puede verse en el perfil de cauce presentado en el en Anexo 05.

En la Tabla 45 se puede observar la estructura evaluada que puede generar influencia directa sobre el polígono.

Tabla 45. Resumen de estructuras hidráulicas Quebrada La Rafita

Estructura	Ubicación	Tipo Estructura	Tipo sección	Tipo Fondo	Material Paredes	Material Fondo	Dimensiones (m)				
							Ancho	Alto	Z	Diámetro	Longitud
Est.1	Carrera 17A contiguo a paradero de buses del barrio trece de noviembre sector el Plan	Cobertura (L>20)	Rectangular	Uniforme	Concreto	Concreto	1.64	1.56			29.36



Figura 141. Box Culvert aguas arriba



Figura 142. Box Culvert aguas abajo



Figura 143. Condiciones generales parte central

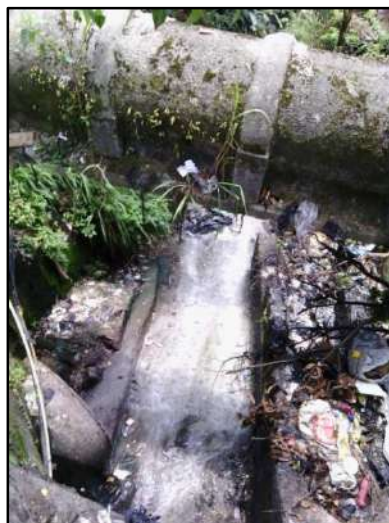


Figura 144. Tramo final zona de estudio

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 Trece de Noviembre (Tabla 39 a Tabla 42), se procedió a realizar el modelo hidráulico, cuyo objetivo 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 las cuales se delimitarán finalmente las manchas de inundación para cada uno de los periodos de retorno y los 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 de 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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.
- ✓ 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 Trece de Noviembre no son susceptibles a generar fenómenos de avenida torrencial como se describe en el Capítulo 15, no es necesario 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 (Tabla 39 a Tabla 42).

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:

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

$$Q_{pico} / A_{celda} < 3m^3/s$$

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.



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 condicione 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 Trece de Noviembre 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 Trece de Noviembre se ha considerado un 30% de obstrucción.

12.3.10 Resultados en la Quebrada La Arenera (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Arenera se presentan en el Mapa 33, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años en condiciones actuales. Se puede observar que dadas las altas pendientes del cauce, el flujo ocurre a altas velocidades y las profundidades son en general bajas. En esta quebrada juegan un papel importante las obras hidráulicas existentes en el cauce, tales como canales, coberturas y alcantarillas, dado que actúan como un control al flujo en sus encoles. Se presentan algunos desbordamientos en la parte media del tramo en estudio para los eventos con periodos de retorno altos hacia la margen izquierda. A continuación se describen los resultados de la modelación hidráulica en la Quebrada La Arenera de manera separada por tramos.

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la Quebrada La Arenera, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico con las condiciones reales en el sitio.

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 en los puentes No. 2 y No. 7 el nivel del agua se encuentra por encima de las cotas inferiores de los tableros para un periodo de retorno de 100 años en condiciones actuales (Tabla 46). Sin embargo, estos dos puentes o pasos peatonales no generan influencia directa sobre las manchas de inundación en condiciones actuales tal como puede observarse en el Mapa 33. En particular la ampliación de la mancha de inundación generada en la zona donde existe el puente o paso peatonal 7 está asociada a la existencia de viviendas en el cauce y no a la presencia del paso peatonal como tal.

Tabla 46. Verificación de las condiciones hidráulicas de los pasos peatonales o puentes en la Quebrada La Arenera para un $T_r=100$ años. Condiciones Actuales

Puente	Cota inferior del tablero (m.s.n.m)	Cota de la superficie del agua (m.s.n.m)	Gálibo disponible (m)
1	1871.44	1870.88	0.56
2	1851.91	1852.01	N/A
3	1848.86	1848.71	0.15
4	1837.22	1834.74	2.48
5	1830.3	1829.8	0.5
6	1823.14	1823.11	0.03
7	1807.43	1808.47	N/A
8	1769.86	1768.67	1.19

En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados. En la geodatabase presentada en el Anexo 12 se incluyen los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo.

12.3.10.1 Tramo Canal Trapezoidal (Est. 1)

Los resultados de la evaluación hidráulica en el tramo del canal artificial trapezoidal en condiciones actuales indican que de manera general éste cuenta con capacidad para transportar caudales en crecientes hasta de 100 años periodo de retorno. Sin embargo, al final del tramo canalizado se presentan algunos problemas de desbordamientos hacia las márgenes para todos los periodos de retorno por causa de la reducción de la pendiente que presenta el canal en esta zona, generándose una elevación de la lámina de flujo. Se pasa del 43% al 20%, como puede verse en el perfil del Anexo 05.

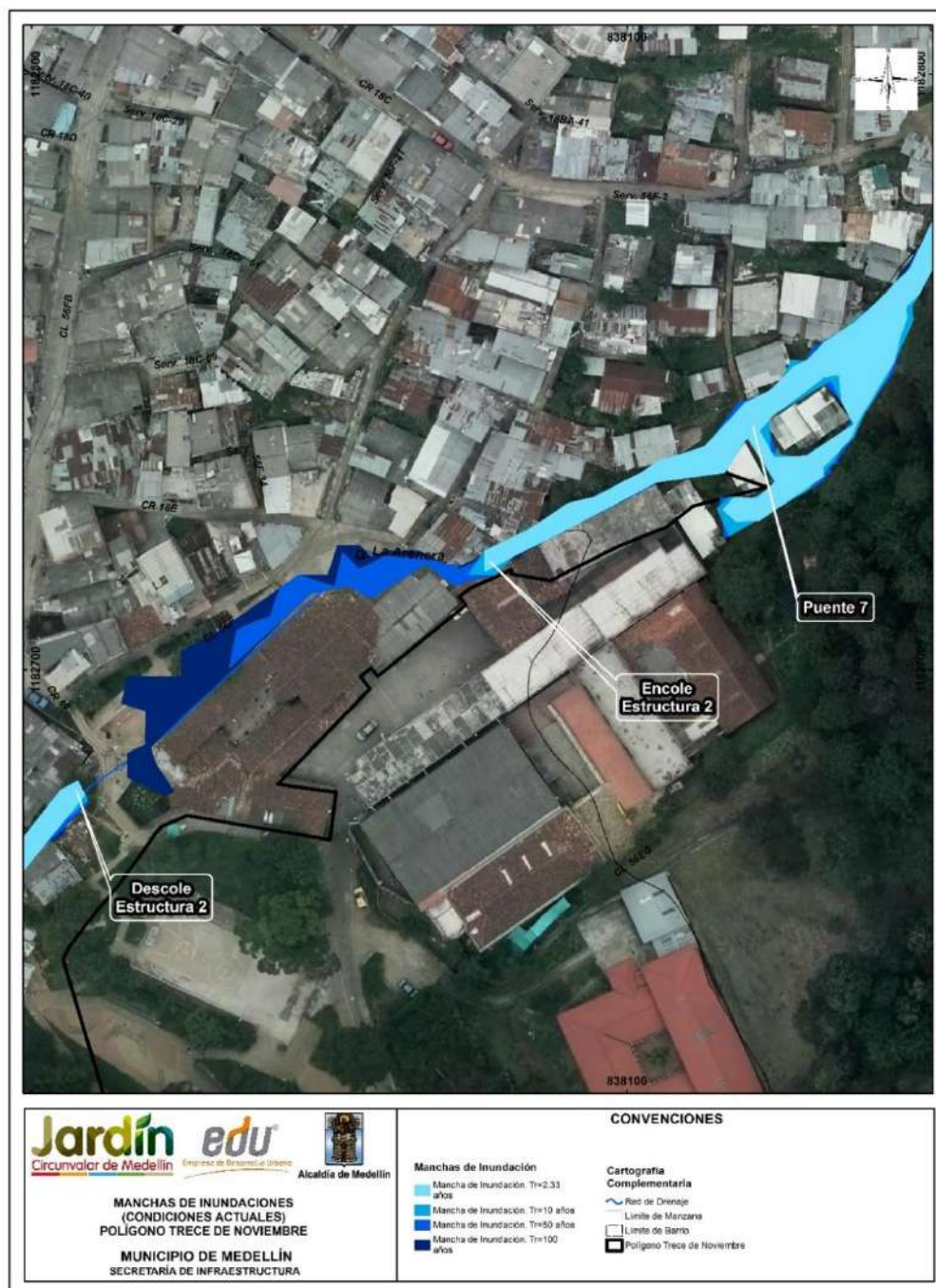
En relación con las velocidades y profundidades de flujo, en la Tabla 47 se presentan los rangos de variación de estas variables en el tramo del canal trapezoidal.

Tabla 47. Qda. La Arenera: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del canal trapezoidal. Condiciones actuales.

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.27	1.19	0.48	1.64	0.59	1.7	0.61	1.86
Profundidad Llanuras	0	0.21	0	0.31	0	0.32	0	0.43
Velocidad en el canal	2.07	6.26	2.85	7.01	3.14	8.04	0.86	8.44
velocidad Llanuras	0	1.15	0	2.63	0	3.45	0	4.82

12.3.10.2 Tramo Cauce Natural

Como se puede observar, el canal natural presenta vertimientos hacia la margen izquierda desde caudales asociados a un periodo de retorno de 2.33 años para las condiciones actuales. Las inundaciones mostradas por el modelo presentan profundidades que oscilan entre 0.33 m y 1.29 m y bordeando completamente tres viviendas aledañas (Mapa 31).



Mapa 31. Qda. La Arenera: resultados Inundación Tramo Cauce Natural en condiciones actuales
(TDNManchasInundacionCondiActualA_Medellin_C)

Para las condiciones del canal las profundidades varían entre 0.43 m y 1.43 m para un periodo de retorno de 2.33 años y entre 0.63 m y 1.74 m para 100 años periodo de retorno, la velocidad máxima para 2.33 años es de 7.14 m/s y para 100 años es de 8.44 m/s. Mientras que tanto las profundidades como las velocidades en la llanura son de un rango menor, debido a las pequeñas láminas de flujo y a los coeficientes de rugosidad (Tabla 48).

Tabla 48. Qda. La Arenera: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del Cauce Natural. Condiciones actuales.

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.43	1.43	0.55	1.67	0.59	1.71	0.63	1.74
Profundidad Llanuras	0	0.54	0	0.85	0	0.95	0	1.01
Velocidad en el canal	2.37	7.14	2.39	8.17	2.41	8.29	2.46	8.44
velocidad Llanuras	0	1.05	0	1.61	0	2.84	0	3.64

12.3.10.3 Tramo Estructura 2 (Cobertura)

En el Mapa 31 se observa que hay vertimiento de agua generando mancha de inundación por causa de la Cobertura. Esta problemática se presenta a partir de un periodo de retorno comprendido entre 10 años y 50 años para las condiciones actuales, y genera una mancha que cubre parcialmente la zona de la plazoleta del atrio de la iglesia del sector. Esta situación se debe a que la estructura de entrada no posee la capacidad hidráulica suficiente puesto que no cuenta con un cabezote definido que permita relaciones H_w/D entre 1 y 1.2, condición que determina la capacidad máxima de la estructura sin entrar a trabajar a presión.

12.3.10.4 Tramo Estructura 3 (Alcantarilla tipo Box Culvert)

Debido a las características de la estructura 3 se presentan profundidades mayores en la zona aledaña al encole. Sin embargo, no se presentan vertimientos debido a que el cauce está bien confinado hacia las márgenes y existe una vivienda justo encima del Box la cual sirve de obstáculo, evita desbordamientos y bloquea el flujo hacia otras zonas aledañas.

12.3.10.5 Tramo Estructura 4 (Alcantarilla tipo Box Culvert)

La estructura 4 posee capacidad suficiente para evacuar las aguas asociadas a un periodo de retorno de 100 años si generar vertimientos sobre la vía (Carrera 23).

12.3.11 Resultados en la Quebrada La Rafita (Condiciones Actuales)

Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Rafita se presentan en el Mapa 33, mostrándose las manchas de inundación para periodos de retorno de 2.33, 10, 50 y 100 años en condiciones actuales. Los resultados indican que el flujo ocurre a altas velocidades y las profundidades son en general bajas dadas las altas pendientes del cauce. En esta quebrada la única obra hidráulica que juega un papel

importante corresponde a la alcantarilla que permite el cruce de la vía Carrera 17A al inicio del tramo analizado, al costado nororiental del polígono. A continuación se describen los resultados de la modelación hidráulica en la Quebrada La Rafita por tramos.

Los resultados obtenidos en la modelación hidráulica se sometieron a verificación en campo a lo largo de la Quebrada La Rafita, en los cuales se comprobó la representatividad del modelo topográfico y del modelo hidráulico con las condiciones reales en el sitio.

En el Anexo 05 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica para los diferentes periodos de retorno analizados.

12.3.11.1 Tramo Cauce Natural Aguas arriba de La Carrera 17A

A partir de los resultados del modelo realizado se puede observar que el canal presenta valores máximos de profundidad que varían entre 1.80 m y 2.74 m para 2.33 años y 100 años periodo de retorno en condiciones actuales respectivamente, las velocidades máximas del flujo se encuentran del orden de 5.73 m/s para 2.33 años periodo de retorno y de 7.0 m/s para 100 años.

Tabla 49. Qda. La Rafita: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del Cauce Natural aguas arriba de la Carrera 17ª. Condiciones actuales.



VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.57	1.80	0.82	2.49	0.78	2.47	0.79	2.74
Profundidad Llanuras	0.00	1.44	0.00	1.70	0.01	1.81	0.06	1.94
Velocidad en el canal	0.43	5.73	0.97	6.56	0.97	6.97	0.97	7.00
velocidad Llanuras	0.05	1.36	0.04	1.98	0.06	2.11	0.08	4.71

12.3.11.2 Tramo Estructura 1 (Cobertura)

La cobertura existente en la Carrera 17A presenta capacidad hidráulica para periodos de retorno inferiores a 50 años en condiciones actuales. Esta estructura genera desbordamientos sobre la vía a partir de un periodo de retorno de 50 años (Mapa 32), pero estos desbordamientos no alcanzan a derivarse hacia el Polígono Trece de Noviembre dada la configuración topográfica de la zona que cuenta con una vaguada bien definida y profunda y que confina la mancha de inundación. Esta situación se debe a que la estructura de entrada no posee la capacidad hidráulica suficiente puesto que no cuenta con un cabezote definido que permita relaciones H_w/D entre 1 y 1.2, condición que determina la capacidad máxima de la estructura sin entrar a trabajar a presión.

12.3.11.3 Tramo Cauce Natural Aguas abajo de la Carrera 17A

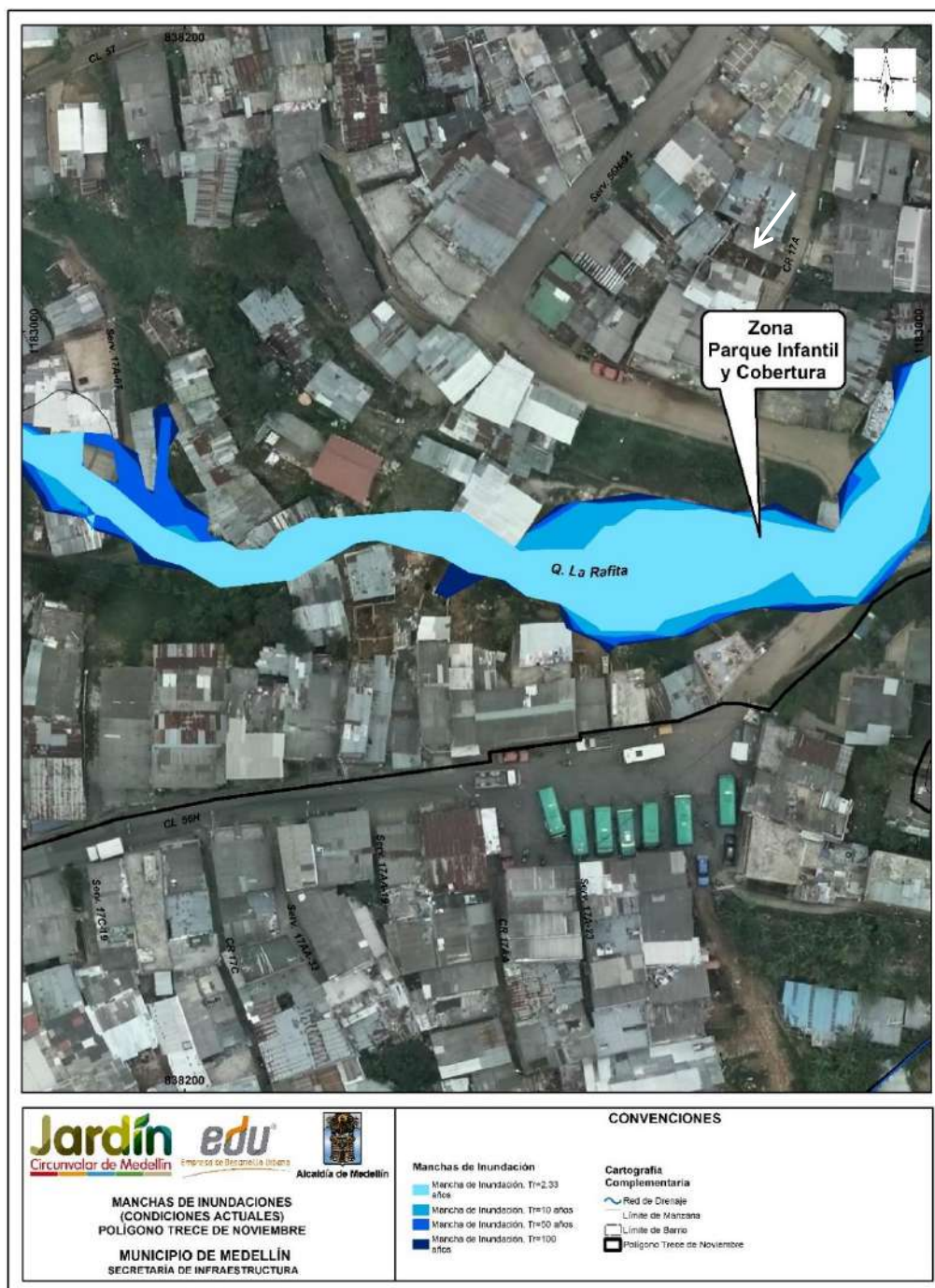
Como se puede observar en el Mapa 32, el canal natural presenta vertimientos hacia las márgenes desde caudales asociados a un periodo de retorno de 2.33 años en condiciones actuales. Cabe anotar que las viviendas afectadas por desbordamientos en este tramo no corresponden al Polígono Trece de Noviembre, pero los resultados de esta

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

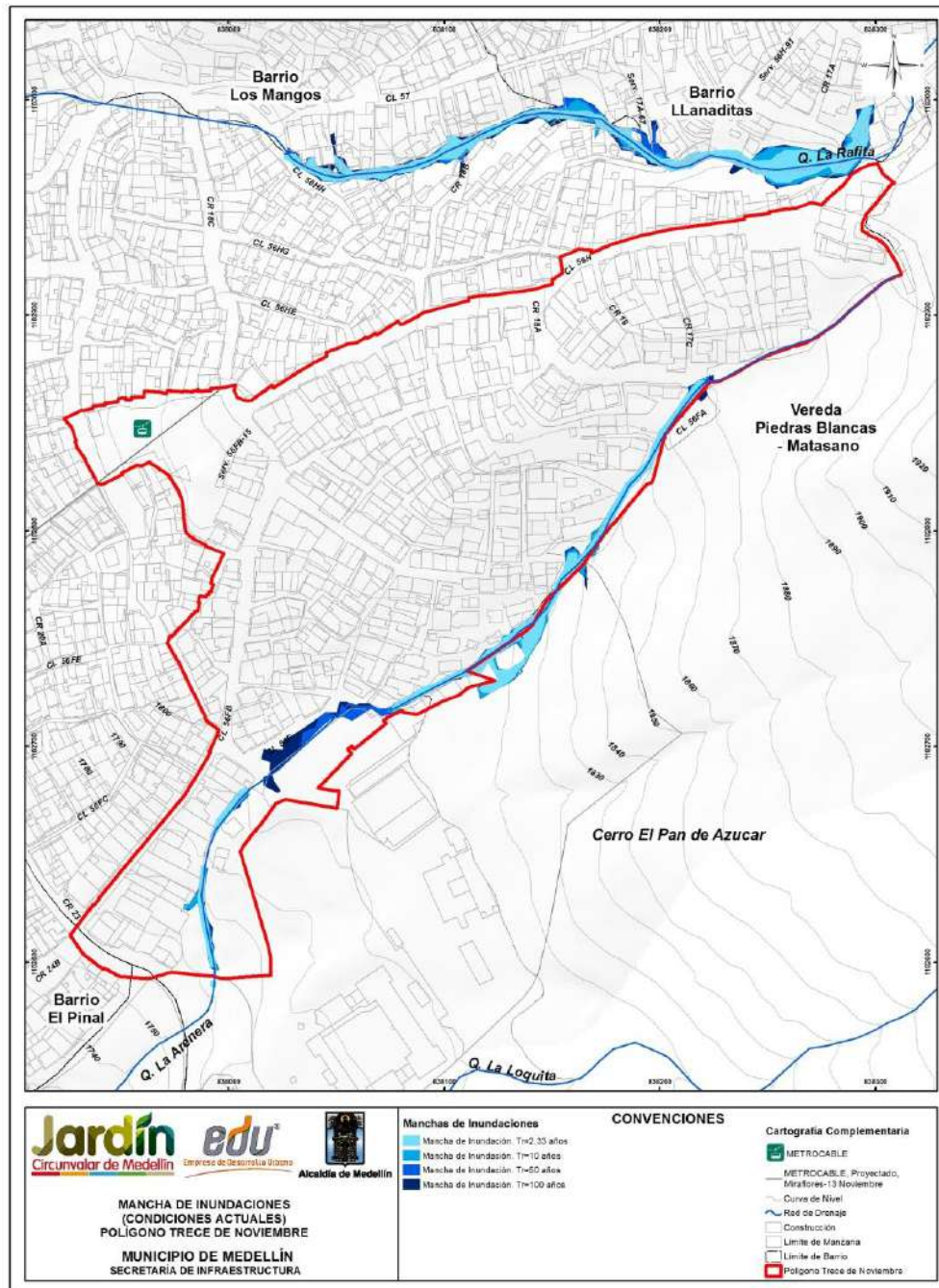
evaluación se tuvieron en cuenta para la estimación de profundidades de socavación que finalmente podrían desencadenar inestabilidades en laderas con influencia en viviendas del polígono. Las profundidades y velocidades máximas en el cauce natural se presentan en la Tabla 50.

Tabla 50. Qda. La Rafita: velocidades y profundidades de flujo en el tramo del Cauce Natural aguas abajo de la Carrera 17A. Condiciones actuales.

VARIABLE	PERIODO DE RETORNO (AÑOS)							
	2.33		10		50		100	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Profundidad Canal	0.31	3.19	0.33	2.99	0.49	3.36	0.46	3.68
Profundidad Llanuras	0.00	1.82	0.00	1.40	0.00	2.61	0.00	3.20
Velocidad en el canal	2.77	8.18	2.91	8.45	2.92	9.05	2.86	9.90
velocidad Llanuras	0.01	1.93	0.00	1.90	0.03	2.11	0.01	2.80



Mapa 32. Qda. La Rafita: resultados Inundación Tramo Estructura 1 y Cauce Natural (TR100) en condiciones actuales
(TDNManchasInundacionCondiActualC_Medellin_C)



Mapa 33. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones actuales. Polígono Trece de Noviembre.
(21_TDNManchalnundaciones_Medellin_C y 21_TDNManchalnundaciones_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 TRECE DE NOVIEMBRE</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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 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 los hallazgos encontrados a través de las perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, este análisis se realizó en condiciones secas dado que la presencia del nivel freático apenas se reportó en cuatro perforaciones de las trece consideradas.

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, 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 en el caso particular de la UMI Trece de Noviembre.

Inicialmente es importante considerar que las condiciones freáticas de la zona, según los registros de perforaciones y el seguimiento de la instrumentación, muestran una zona seca, donde la presencia de niveles freáticos se ha manifestado sólo en zonas puntuales, estableciéndose como niveles freáticos colgados.

Otro aspecto involucra las condiciones hídricas de la UMI por efecto de pendiente y el uso del suelo. En la UMI Trece de Noviembre 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. Análisis de infiltración/escorrentía mostrados en el Capítulo 11, muestran coeficientes de escorrentía por encima del 50% para el caso de las lluvias más probables y del 75% (TR 2.33 años) para el caso de las lluvias más críticas (TR 100 años) (Tabla 36). Los tiempos de concentración asociados a estas condiciones de pendiente son de hasta 14 min que son tiempos de concentración bajos, lo que demuestra que la cuenca responde rápido en términos de drenaje.

En cuanto a los usos del suelo, la UMI Trece de Noviembre se caracteriza por poseer aproximadamente un 50% en uso forestal y el otro 50% en uso urbano. No obstante, en las zonas forestales apenas el 10% posee zonas boscosas y el resto corresponde a zonas desprovistas de vegetación espesa lo que acelera más los procesos de evaporación y escorrentía y disminuye los efectos de infiltración desde la superficie.

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 Trece de Noviembre, clasifican principalmente como limos de alta plasticidad (MH) donde sus índices de plasticidad llegan a ser de 38 %, los límites líquidos están por encima del 60% y los porcentajes de saturación son en promedio del 80%. Adicionalmente, la determinación de coeficientes de permeabilidad a través de ensayos de laboratorio de

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

consolidación, realizados sobre algunas muestras de la zona arrojaron valores no menores de $1 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, lo que hace que se trate de materiales altamente impermeables.

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.

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 contemplará 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 realizarán mediante análisis bidimensionales en las zonas donde se tengan proyectadas las obras de 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 145).

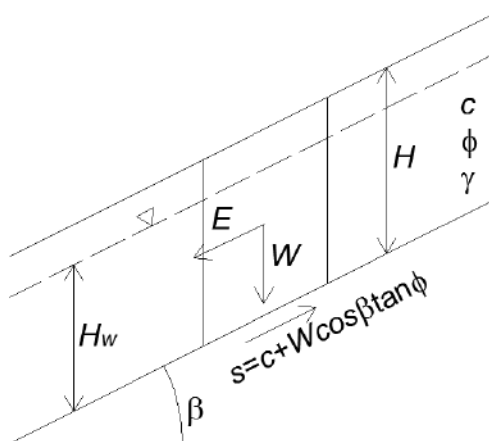


Figura 145. Modelo de cuerpo libre para mecanismo de falla planar, Taylor (1948)

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 seudoestáticas 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 seudoestático 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 (Qcv), depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos coluviales y, 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 Trece de Noviembre 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 (Capítulo 4).

La expresión que acaba de presentarse para condiciones seudoestáticas 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 límite.



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.

$$\mu_M = \mu_R - \mu_C$$

$$\sigma_M^2 = \sigma_R^2 + \sigma_C^2 - 2\rho_{RC}\sigma_R\sigma_C$$

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

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	Caso Seudoestático
Media de la resistencia	Media de la resistencia
$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$	$\mu_R = c + (\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2 \beta \tan \phi$
Media de la carga	Media de la carga
$\mu_C = \gamma H \cos \beta \sin \beta$	$\mu_C = \gamma H \cos \beta (A_h \cos \beta + \sin \beta)$

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:

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

Caso Estático	Caso Seudoestático
Varianza de la resistencia	Varianza de la resistencia
$\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$	$\sigma_R^2 = \sigma^2(c) + (\gamma H \cos \beta \sin \beta)^2 \cdot \sigma^2(\tan \phi)$
Varianza de la carga	Varianza de la carga
$\sigma_C^2 = 0$	$\sigma_C^2 = 0$

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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 multiamenazas, 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 pixel individual, a través de la implementación del SIG (Aleotti & Chowdhury, 1999; Anbalagan, 1992; Carrara, 1995; Da & Lee, 2001).

Según Van Westen & Terlien (1996), la teoría de equilibrio límite de talud infinito (Figura 145) 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 pixel, 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 pixel individual resultarán en valores del factor de seguridad, que pueden utilizarse para crear un mapa de amenaza (Figura 146). Finalmente, 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.

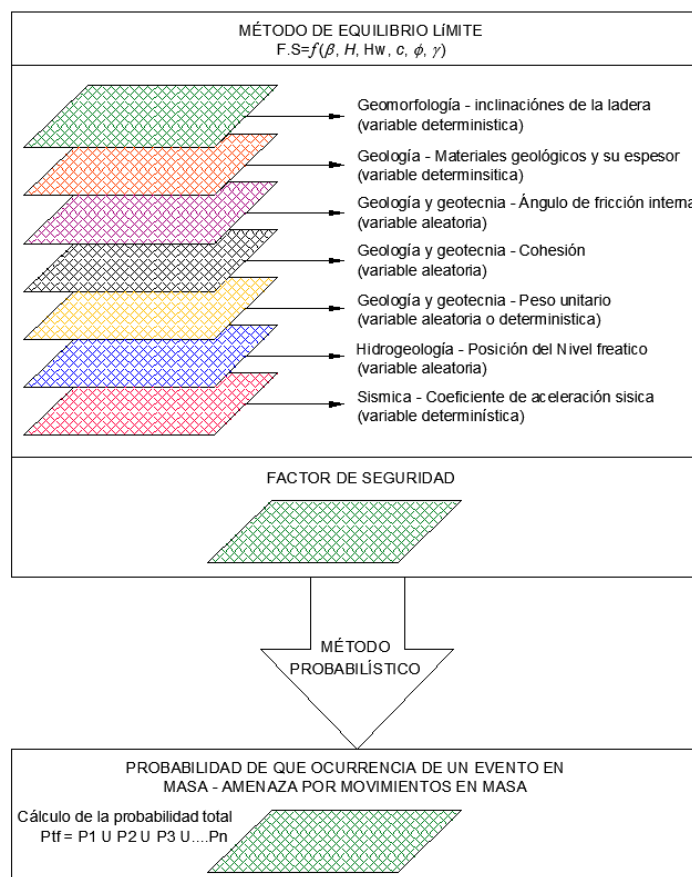


Figura 146. Modelo general de implementación en SIG para determinar la amenaza por movimiento en masa

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 manifiestan 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 51. En la Tabla 52 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 51. 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 52. 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%

13.2 RESULTADOS

El Mapa 34 y el Mapa 35 presentan los respectivos análisis del factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones estáticas se puede ver que la mayor parte del polígono presenta valores altos de FS, por encima de 1.5. En general, los factores de seguridad bajos ($FS \leq 1.2$) predominan en las zonas con pendientes muy altas, mayores que 30° , coincidiendo con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años al interior del polígono.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ En el caso del mapa de factores de seguridad (FS) en condiciones pseudoestáticas, representativo del escenario con sismo, se puede ver que por lo menos la mitad del polígono presenta valores de FS menores o iguales que 1.2. Algunas de las zonas con factores de seguridad bajos coinciden con cicatrices de procesos inactivos ocurridos hace más de diez años. Vale la pena aclarar que factores de seguridad pseudoestático mayores de 1.1 pueden considerarse aceptables, de tal manera que los FS considerados bajos en el Polígono realmente alcanzan, en algunos puntos, valores que pudieran ser adecuados.



Para validación de estos resultados, se realizó un comparativo entre el mapa de procesos morfodinámicos (Mapa 13) y los mapas de variación de los factores de seguridad en toda la UMI Trece de Noviembre, tanto para el caso estático (Mapa 34) como para el caso pseudoestático (Mapa 35). Se observa que las zonas de procesos morfodinámicos existentes coinciden con zonas que presentan los factores de seguridad más bajos, los menores que 1.2. Se puede concluir que la metodología implementada ha permitido principalmente la determinación de focos de inestabilidad en los que debe centrarse la atención para la localización de nuevos proyectos urbanísticos.

Por otro lado, el Mapa 36 muestra los resultados de los análisis de probabilidad de falla considerando las variaciones en los parámetros de resistencia al corte. 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. En el Mapa 37 se evidencia la afectación de casi la totalidad de la zona con probabilidades de falla cercanas al 100%. 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 anualizar el efecto del sismo dividiendo los resultados obtenidos en el Mapa 37 por el respectivo periodo de retorno de 475 años. Esto permitió obtener el Mapa 38 el cual 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.

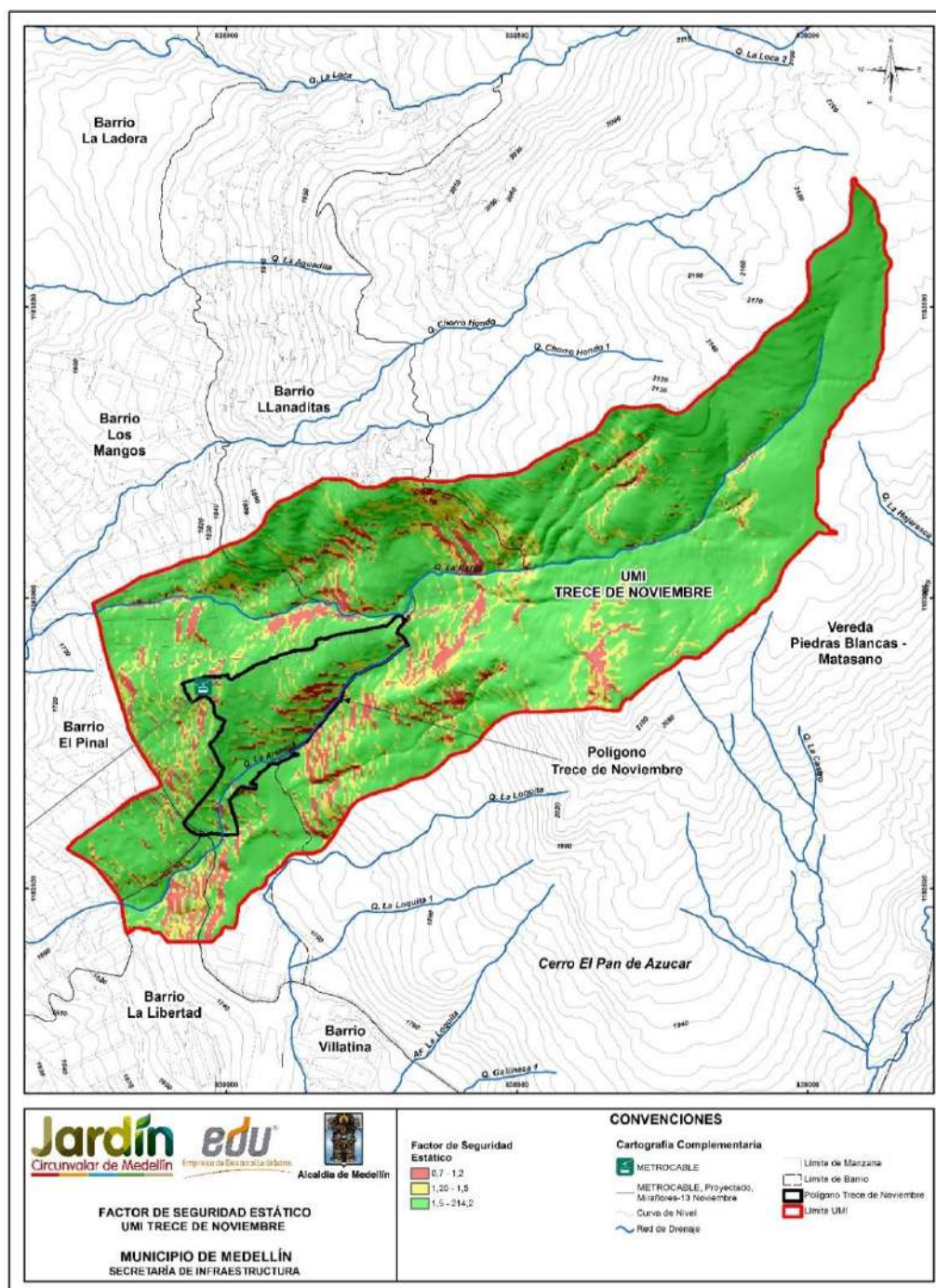
Finalmente, en el Mapa 39 se presenta la zonificación de la amenaza total considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte evaluado en el análisis del Mapa 36 y el efecto del sismo para un periodo de exposición de 50 años.

Considerándose el mapa de zonificación de la amenaza por movimientos en masa (Mapa 39), en conjunto con el mapa de pendiente (Mapa 11) y el de procesos morfodinámicos (Mapa 13) se observa que los sitios de mayor inestabilidad y que representan mayor afectación al polígono se localizan en la parte media del polígono y por fuera éste en el costado nororiental, se ubican en ladera urbanizada y no urbanizada respectivamente, con pendientes mayores de 30° y desarrolladas superficialmente en el Horizonte IC y IIA de Dunitas de Medellín y en llenos antrópicos en el caso del sector de

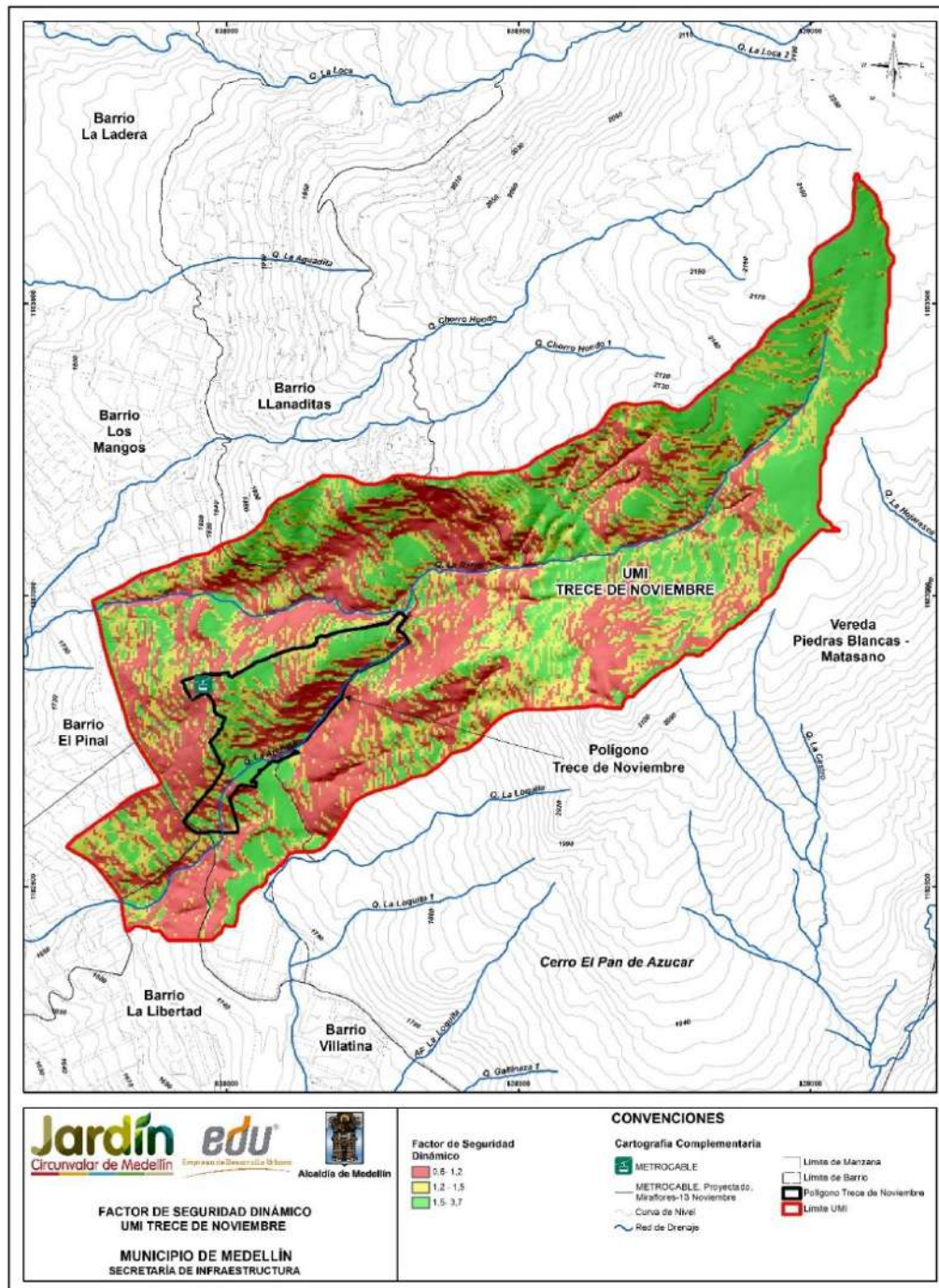
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

la parte media del polígono. En la zona se mapearon vaguadas y procesos morfodinámicos actualmente inactivos. La inestabilidad potencial se asocia entonces con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas, considerando que se encuentran ubicados donde se tiene como unidad geológica en superficie a los depósitos de vertiente.

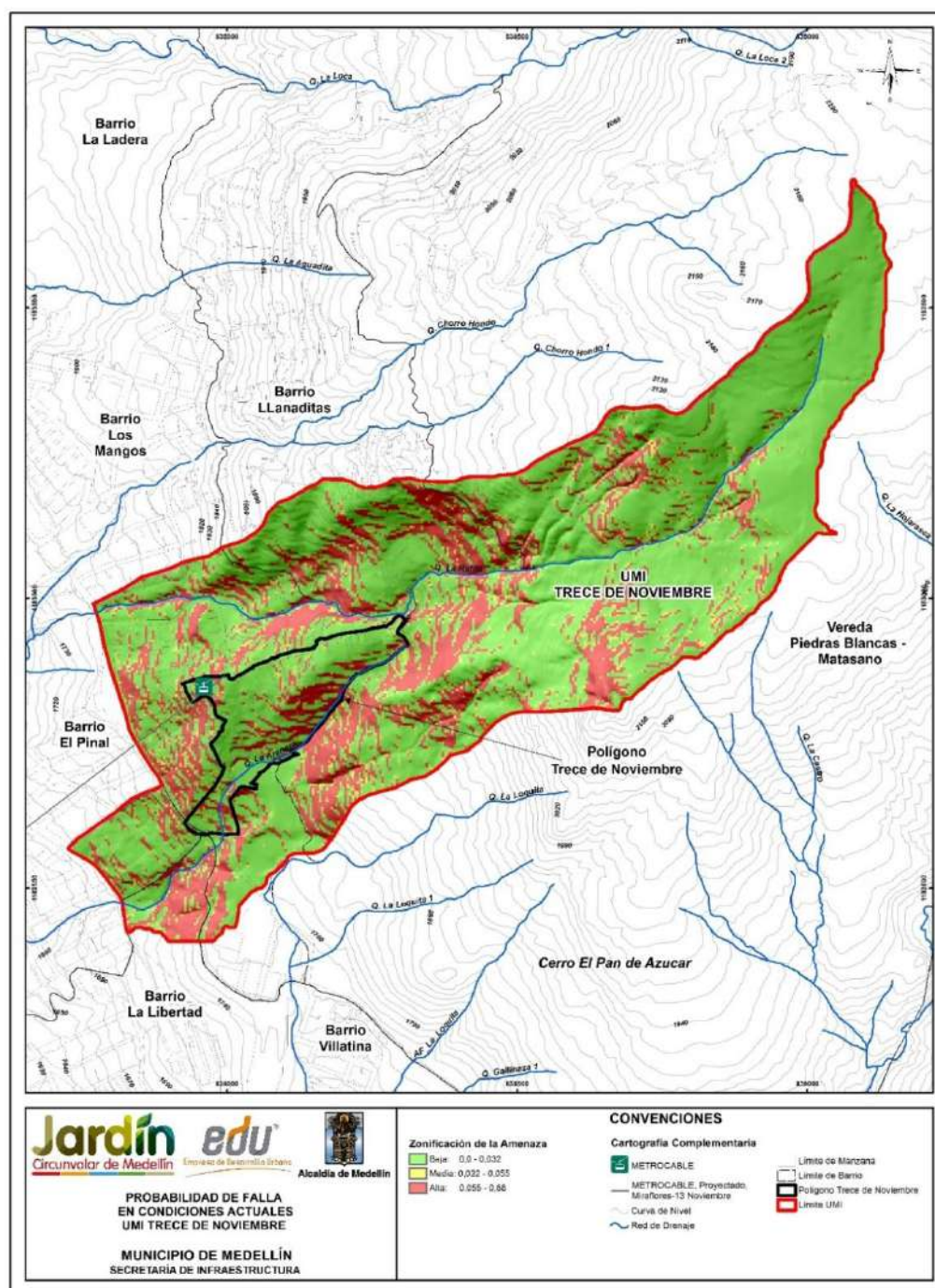
Éstos son los sitios más críticos, de tal manera que en caso de ocurrencia de un movimiento en masa, estos podrían afectar directamente las viviendas en el polígono, bien sea porque dichas viviendas se encuentran en el sitio potencialmente inestable o bien porque serían impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda.



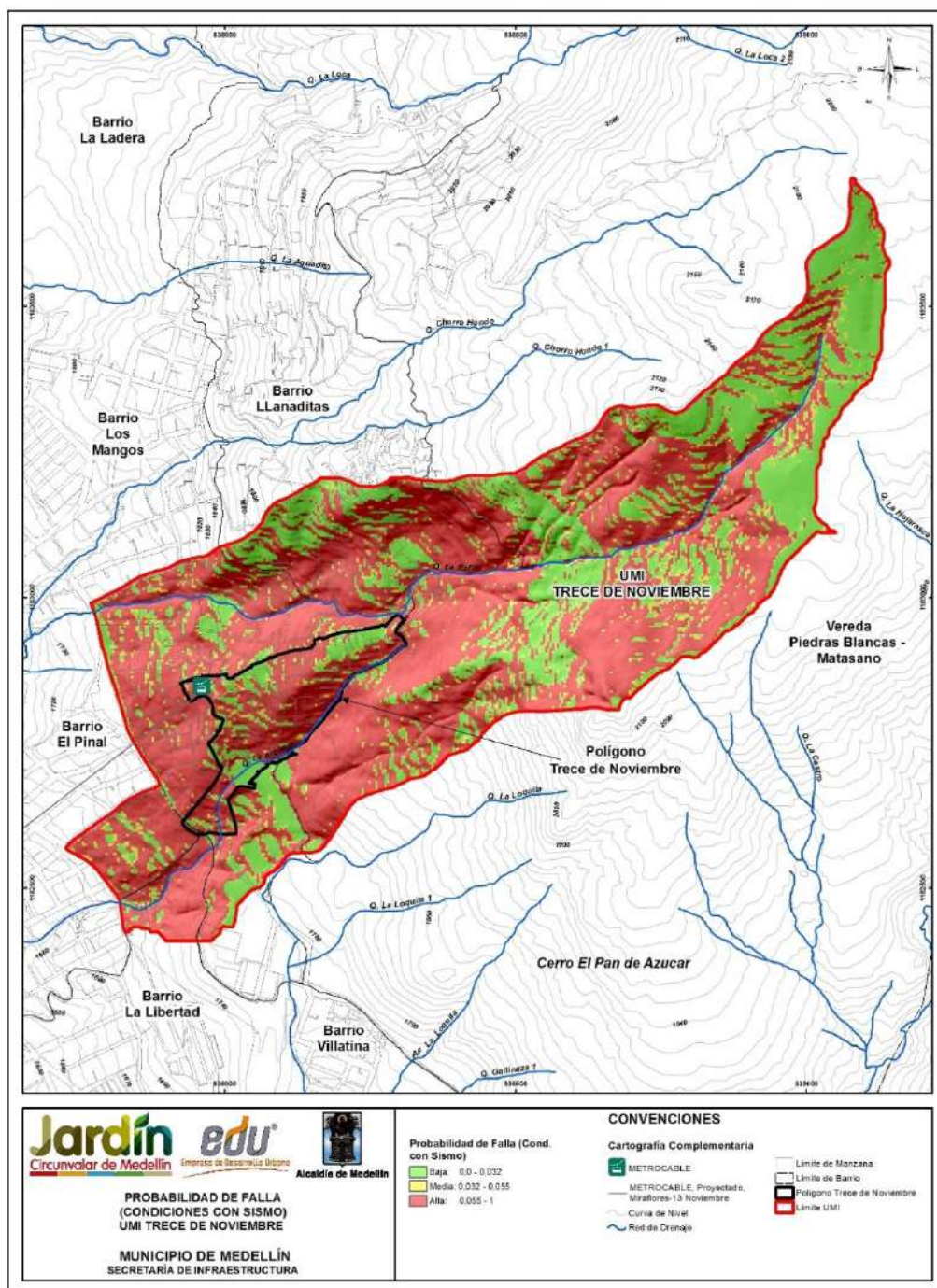
Mapa 34. Análisis del factor de seguridad de la UMI Trece de Noviembre en condiciones estáticas
(TDNFactorSeguridadEstaticoUMI_Medellin_C)



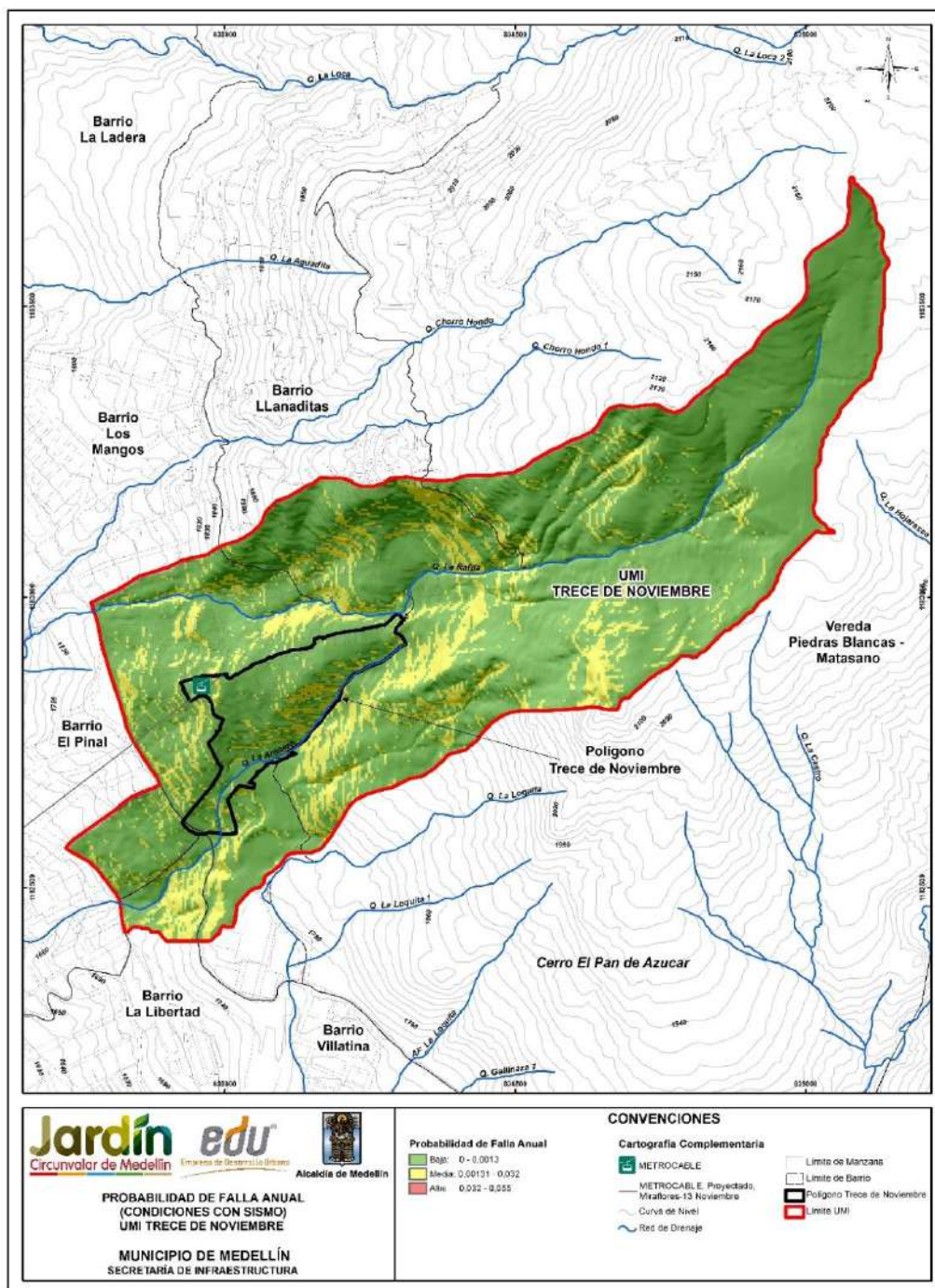
**Mapa 35. Análisis del factor de seguridad de la UMI Trece de Noviembre en condiciones seudo-estáticas con sismo de 0.25g
(TDNFactorSeguridadDinamicoUMI_Medellin_C)**



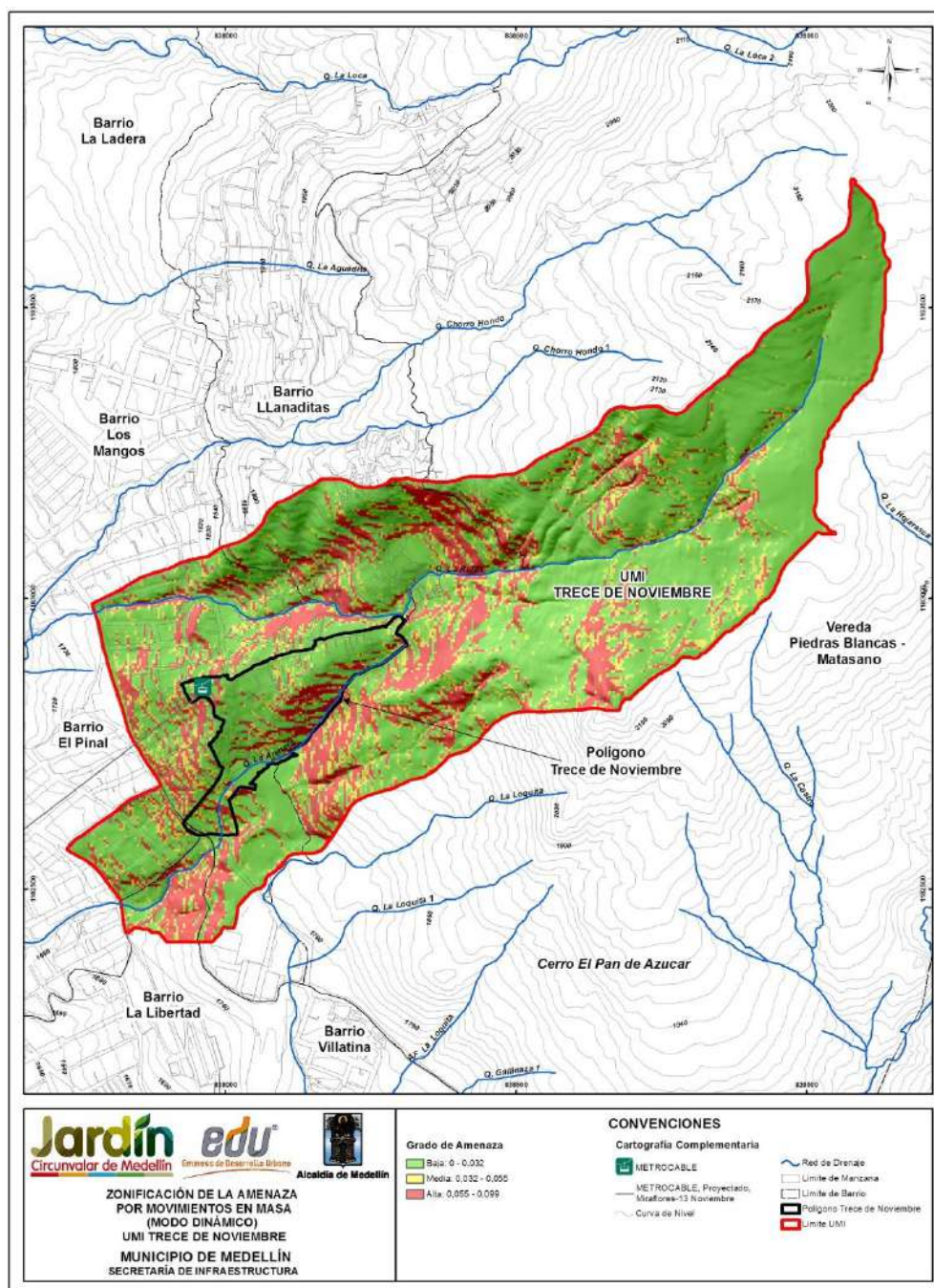
Mapa 36. Análisis de probabilidad de falla de la UMI Trece de Noviembre en condiciones actuales y naturales
(TDNProbabilidadFallaCondicionesActualesUMI_Medellin_C)



Mapa 37. Análisis de probabilidad de falla de la UMI Trece de Noviembre en condiciones pseudo-estático con un sismo 0.25g periodo de retorno de 475 años (TDNProbabilidadFallaTotalUMI_Medellin_C)



Mapa 38. Análisis de probabilidad de falla anualizado de la UMI Trece de Noviembre en condiciones seudo-estático con un sismo 0.25g (TDNProbabilidadFallaAnualUMI_Medellin_C)



Mapa 39. 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_TDNAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C y
19_TDNAmenazaMovimientosenMasa_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 147 muestra el perfil en planta en donde se analizó, de forma local, la sección que presentó los valores máximos de socavación.

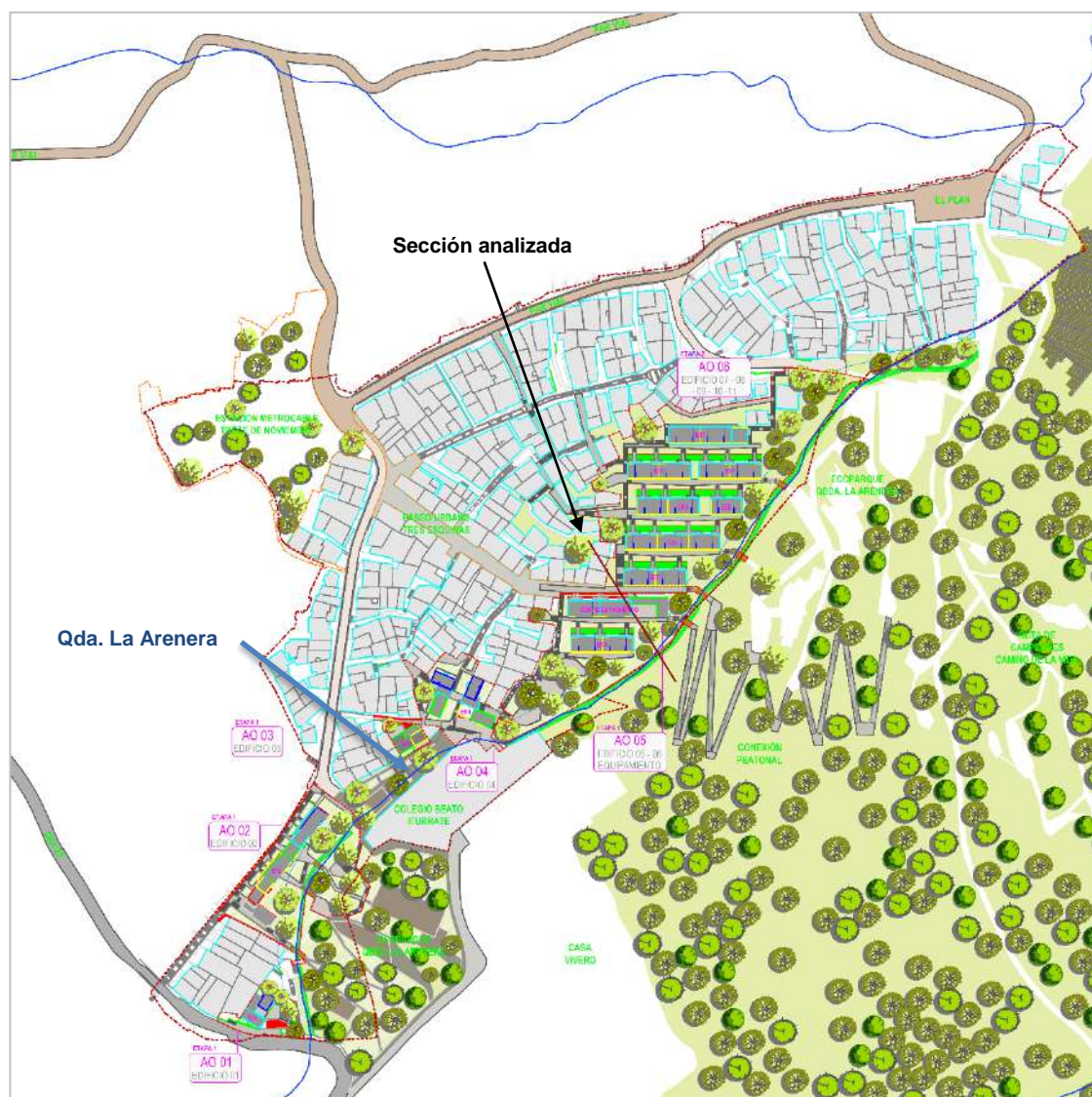


Figura 147. Esquema de localización en planta de la sección analizada

El perfil mencionado, fue analizado teniendo en cuenta el proceso de socavación y la variabilidad en los parámetros de resistencia al corte y sismo. La Figura 148 exhibe los resultados del análisis de estabilidad efectuado. 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.

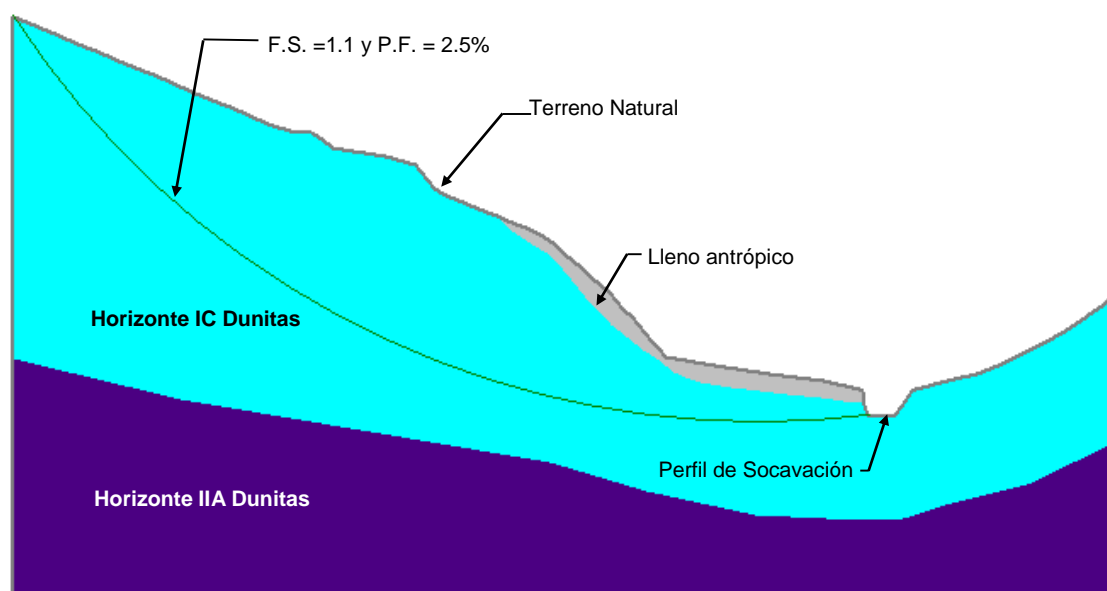


Figura 148. Análisis de estabilidad considerando socavación en la Quebrada La Chorrera

Se observa que la probabilidad de falla está en el rango de amenaza baja. Estos resultados ratifican que el proceso de socavación no implica afectación en la estabilidad de la ladera.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

14. AMENAZA POR INUNDACIÓN

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., 2005)

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 Trece de Noviembre, 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 del cauce 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 149). 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.

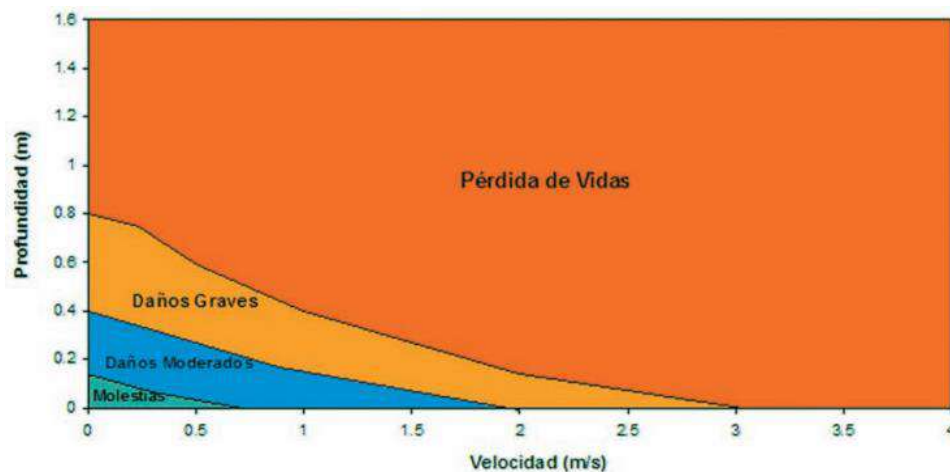


Figura 149. Tipo de daños según velocidad y profundidad de Flujo
(Universidad Nacional de Colombia e Instituto Mi Rio, 2003)

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 53 y en la Tabla 54 se resume la clasificación de la probabilidad y la intensidad respectivamente según los criterios descritos.

Tabla 53. 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 54. 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 150 se presenta de manera gráfica la asignación de la amenaza según la probabilidad y la intensidad, de acuerdo con metodologías de.

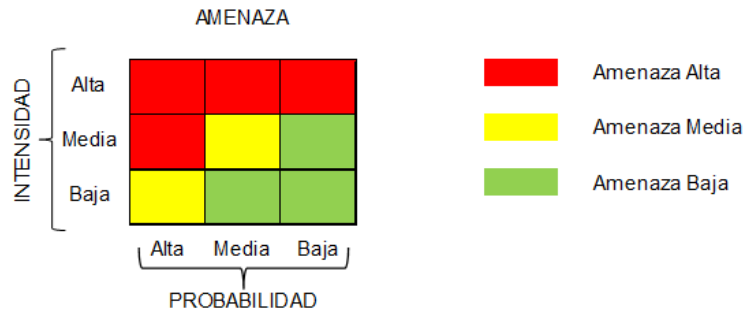


Figura 150. Asignación de la amenaza por Inundación a partir de la Intensidad y la probabilidad del fenómeno (Ofee et al (1997 y Fiebiger (1997) en López y Courtel 2006)

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

contacto con el flujo diversas asignaciones de la amenaza. En estos casos se asignó a 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 el.

14.3 RESULTADOS

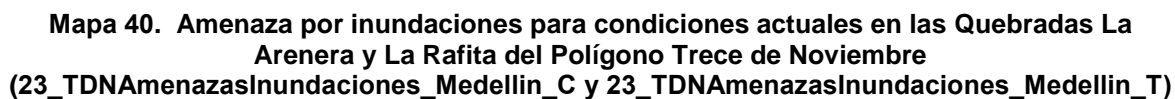
La evaluación de la amenaza por inundaciones en condiciones actuales generadas por las Quebradas La Arenera y La Rafita, principales drenajes del Polígono Trece de Noviembre, arrojó resultados que indican que la zona que corresponde al cauce principal de estas quebradas presenta una amenaza alta, dado que la intensidad (velocidad y/o profundidad) y frecuencia de los flujos de aguas que por allí transitan presentan valores altos.

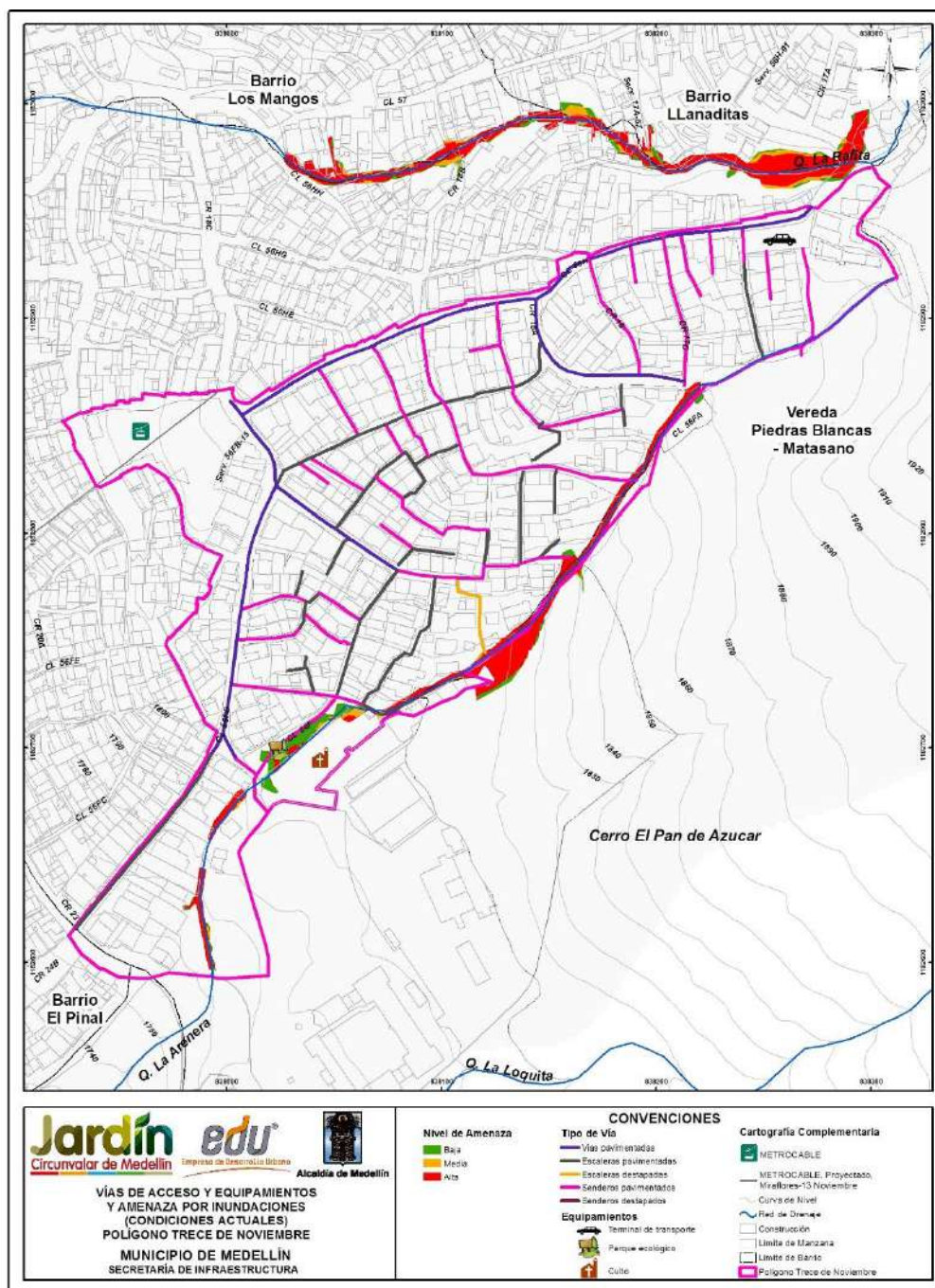
Para el límite sur del polígono, que coincide con la Quebrada La Arenera, la mayor parte de las viviendas e infraestructura que se encuentran inmediatamente al lado del cauce, están expuestas a una alta amenaza por eventos de inundaciones. Tal es el caso de la zona aledaña a la Iglesia Beato Domingo Iturrate, que se encuentra expuesta a una amenaza alta, influenciada en gran parte por la capacidad hidráulica del Box Culvert 1 que genera vertimientos sobre la plazoleta existente en esta zona.

Por el contrario, la Quebrada La Rafita representa una amenaza baja por inundaciones para el Polígono Trece de Noviembre dado que su mancha de inundación no afecta al polígono, ni siquiera en situaciones de desbordamiento en la estructura de cruce cercana al extremo nororiental del polígono.

En el Mapa 40 se presenta la amenaza por inundaciones para ambas quebradas del Polígono Trece de Noviembre.

En el Mapa 41 se presenta el grado de amenaza en el que se clasificaron los tramos de vías o andenes y la amenaza para infraestructura especial o equipamientos.





Mapa 41. Superposición de Vías de Acceso y Equipamientos sobre la amenaza por inundaciones
(TDNAmenazaInundacionAccesosEquipamiento_Medellin_C)

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 al considerar los bajos caudales que transitan a través de ellos, implicando con ello una baja capacidad erosiva.

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

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 Y TRANSPORTE DEL MATERIAL DEL LECHO

En este numeral 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

Dado que el objetivo de este análisis es verificar si se da el inicio del proceso de remoción del lecho, el cual ocurriría a nivel superficial, en la anterior expresión se toma la variable “a” con un valor nulo ($a=0$) y se calcula por tanto el esfuerzo resistivo únicamente considerando la componente cohesiva, sin que los demás parámetros afecten su magnitud, $C_*, \sigma, \rho, \varphi$.

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:

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

- ✓ 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, basado únicamente en el componente cohesivo de la resistencia por tratarse del análisis en superficie que es donde se iniciaría el fenómeno.

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 fueron presentados en el Numeral 10.3 de este informe y los cuales se resumen en la Tabla 55 para el cauce de la Quebrada la Rafita. En la Quebrada La Arenera no se realiza este análisis dado que su cauce actualmente se encuentra cubierto con estructuras tipo canales y coberturas que eliminan la posibilidad de generarse en ellos procesos de remoción del lecho.

En la Tabla 55 puede observarse que los materiales de las corrientes estudiadas tienen cohesiones que varían entre 13,1 kPa y 24,2 kPa correspondiendo el primero a llenos antrópicos y el segundo a las Dunitas de Medellín (JKuM).

El esfuerzo ejercido por el flujo sobre el lecho en cada sección a lo largo de La Quebrada La Rafita se presenta en la Figura 151. En esta figura también se ha ubicado la menor cohesión existente de los materiales presentes en el cauce, y de manera comparativa puede observarse que en la totalidad del cauce analizado, con excepción de un tramo de 1 m aproximadamente, el esfuerzo cortante que se transmite al lecho es inferior al valor de la cohesión de los materiales, es decir, inferior al esfuerzo resistivo.

El análisis realizado permite por tanto concluir que no es factible la ocurrencia de la remoción de un volumen de material suficiente para ocasionar una avenida torrencial en el polígono de estudio.

Tabla 55. Propiedades de los materiales de los cauces con influencia en el polígono Trece de Noviembre

TRECE DE NOVIEMBRE	ϕ (°)	c' (kPa)	γ (kN/m³)
Qda la Rafita			
Dunitas de Medellín (JKuM)	26.50	24.20	16.7
Lleno Antropico	26.90	13.05	16.9
Depositos de flujo de lodos y escombros	24.13	22.79	17.4
Depositos coluviales	23.13	19.43	17.4

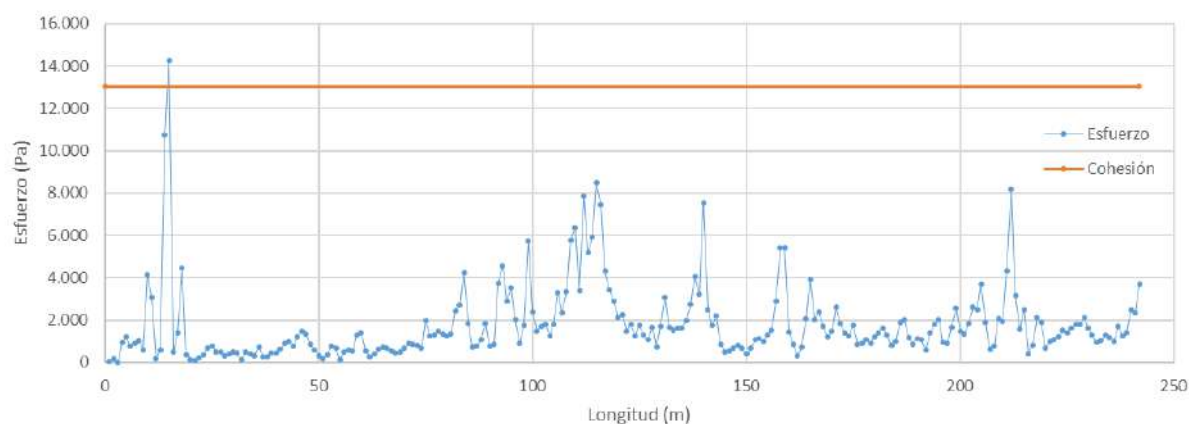




Figura 151. Variación comparativa entre el esfuerzo cortante en el lecho y la cohesión mínima de los materiales existentes lo largo de la Quebrada La Rafita.

15.4 RESULTADOS

Por lo anotado en este capítulo, se concluye que el Polígono Trece de Noviembre 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

16. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

16.1 ASPECTOS GENERALES

Según el POT (2014) del municipio de Medellín, 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 Pontificia Bolivariana (UPB, 2014) UPB bajo el contrato *“ESTUDIOS, DIAGNÓSTICO, FORMULACIÓN Y DISEÑOS DE LOS PROYECTOS BARRIOS SOSTENIBLE EN EL SECTOR LA ARENERA Y TRES SECTORES MÁS AL INTERIOR DE LOS PLANES MAESTROS PAN DE AZÚCAR, LLANADITAS Y LOS SECTORES DEL PLAN MAESTRO CENTRO-ORIENTAL PERTENECIENTES A LA COMUNA OCHO, DENTRO DEL MARCO DEL PROYECTO CINTURÓN VERDE METROPOLITANO 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), tipo de cubierta (teja de lata, teja de zinc, madera, losa de concreto o plástico), tipo de ocupación (residencial,

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

comercial o mixta) y densidad habitacional, entre otros. La dirección correspondiente a cada predio también es obtenida del estudio elaborado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB, 2014) y es presentada en el actual estudio, como parte de la geodatabase del proyecto. 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 Pontificia Bolivariana (UPB, 2014).

La información de la UPB (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) 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 efectos esperados 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.

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 con las características de los elementos expuestos. De forma adicional, en el

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa se pudo determinar la vulnerabilidad de las personas que habitan las estructuras 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 (Hung, 1997) en este caso un movimiento en masa. Según Amatruda et al. (2004), la intensidad podría estar expresa 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 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 152). Ambos factores son adimensionales y son calculados por medio de las siguientes expresiones:

$$I = \begin{cases} I_{gem} \cdot I_{dfm} \\ I_{din} \cdot I_{dpt} \end{cases}$$

Factor de intensidad geométrico, cuando las estructuras están dentro del movimiento en masa

Factor de intensidad dinámico, cuando las estructuras están fuera del movimiento en masa

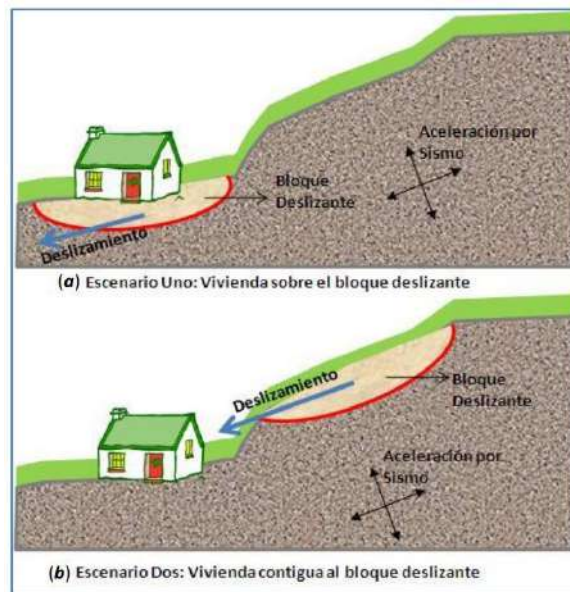


Figura 152. Esquema general que muestra los escenarios donde podría localizarse un movimiento en masa

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 56) 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:

$$I_{din-E} = \begin{cases} 0,00 & C \leq 5 \times 10^{-7} \quad (mm/s) \\ \frac{1}{36} (\log_{10} C + 6,30)^2 & C > 5 \times 10^{-1} \quad (mm/s) \end{cases}$$

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 56. 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:

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

$$R = (\xi_{sfd} \cdot \xi_{est} \cdot \xi_{alt} \cdot \xi_{man})^{1/4}$$

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 60 a la Tabla 59 se presentan los demás factores que hacen parte de la evaluación de la resistencia de las estructuras propiamente.

Tabla 57. 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 58. 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 59. 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.

$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0.5 \\ 1.0 - \frac{2(R - I)^2}{R^2} & 0.5 < \frac{I}{R} \leq 1.0 \\ 1.0 & \frac{I}{R} \leq 1.0 \end{cases}$$

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 153 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 154 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por movimientos en masa.

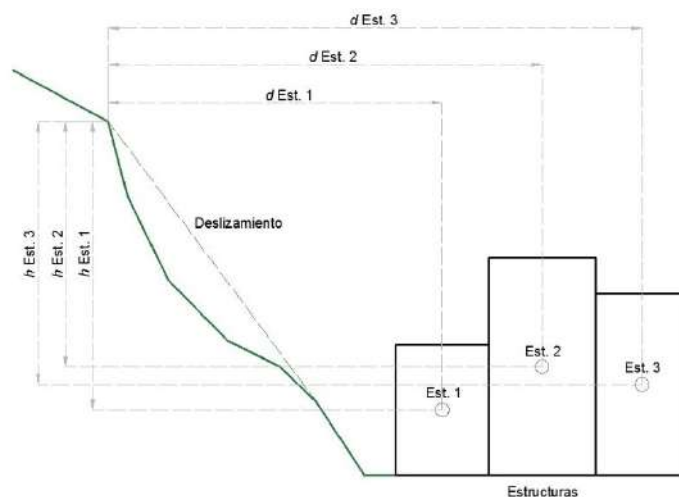


Figura 153. Parámetros de altura y distancia del deslizamiento a las estructuras físicas vulnerables

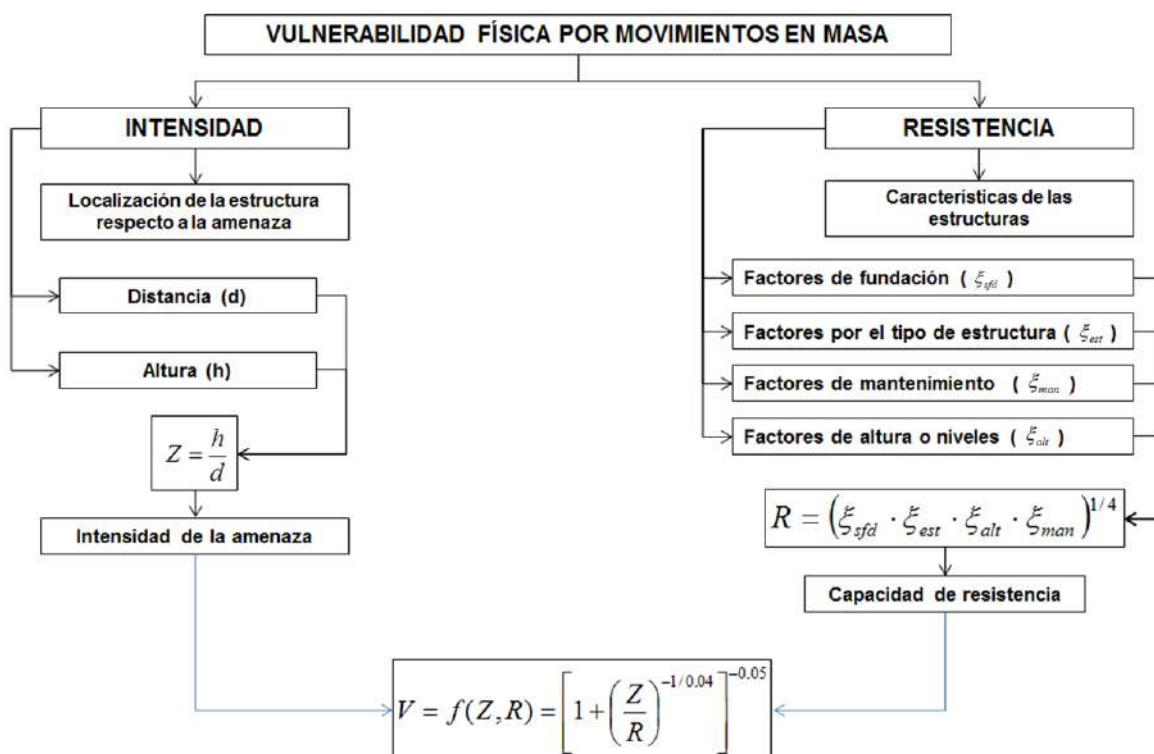


Figura 154. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para movimientos en masa

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 155).

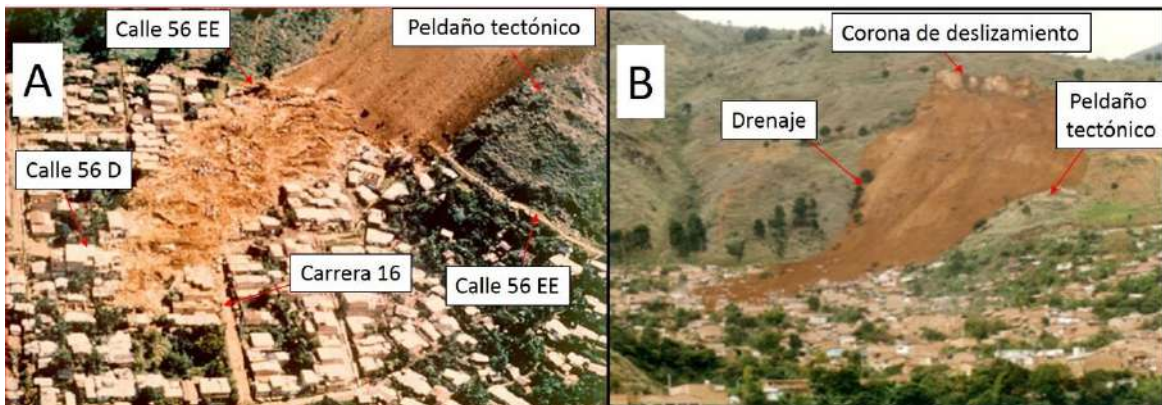


Figura 155. Localización de puntos de referencia para la definición del polígono asociado al Deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre fotografías del mismo

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 Villatina (Figura 156).

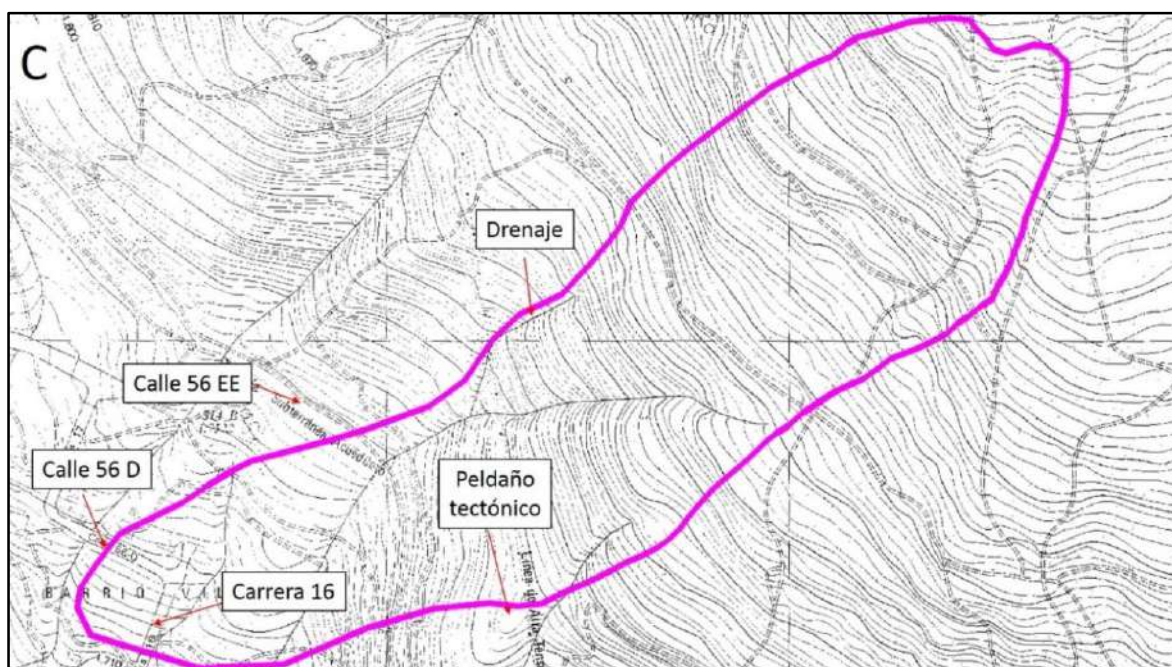


Figura 156. Polígono asociado al deslizamiento Villatina ocurrido en 1987 sobre cartografía IGAC de 1973 con puntos de referencia tomados de fotografías

La Figura 157, 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 42 y la Figura 158 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).

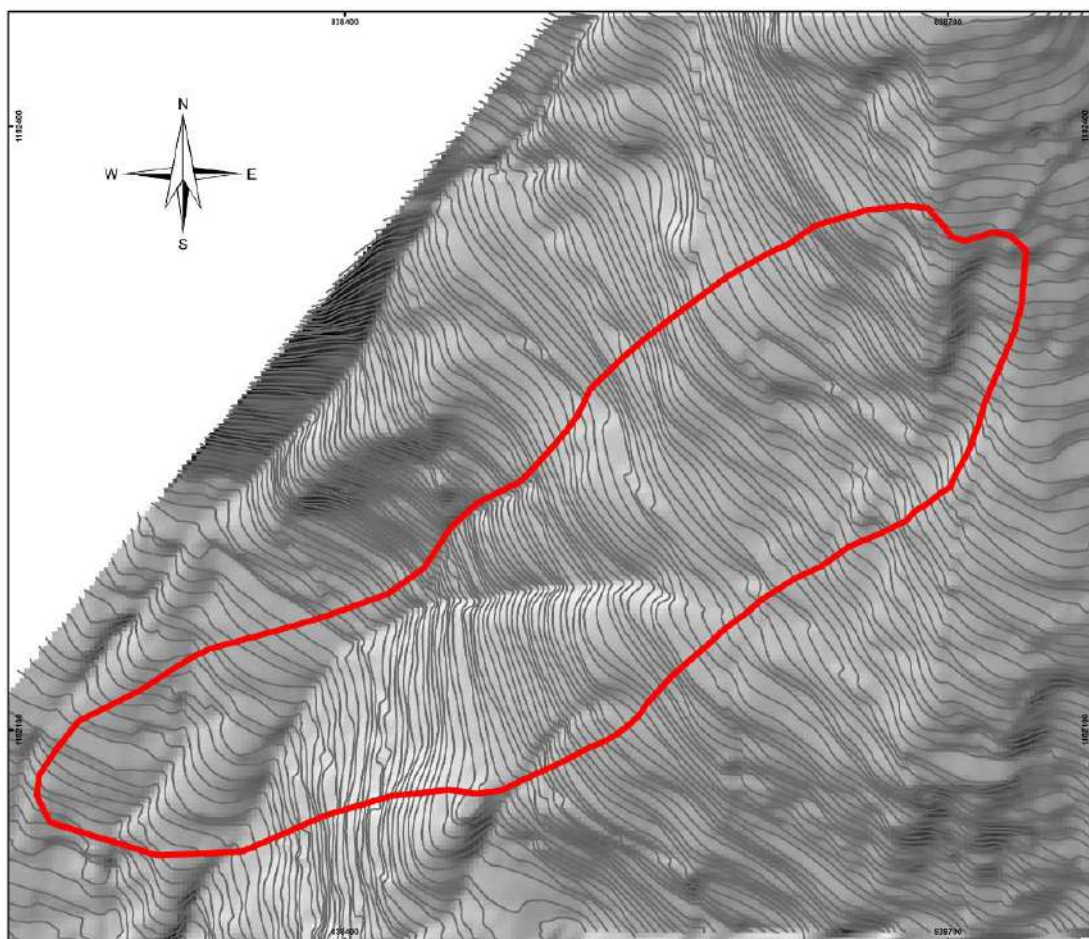
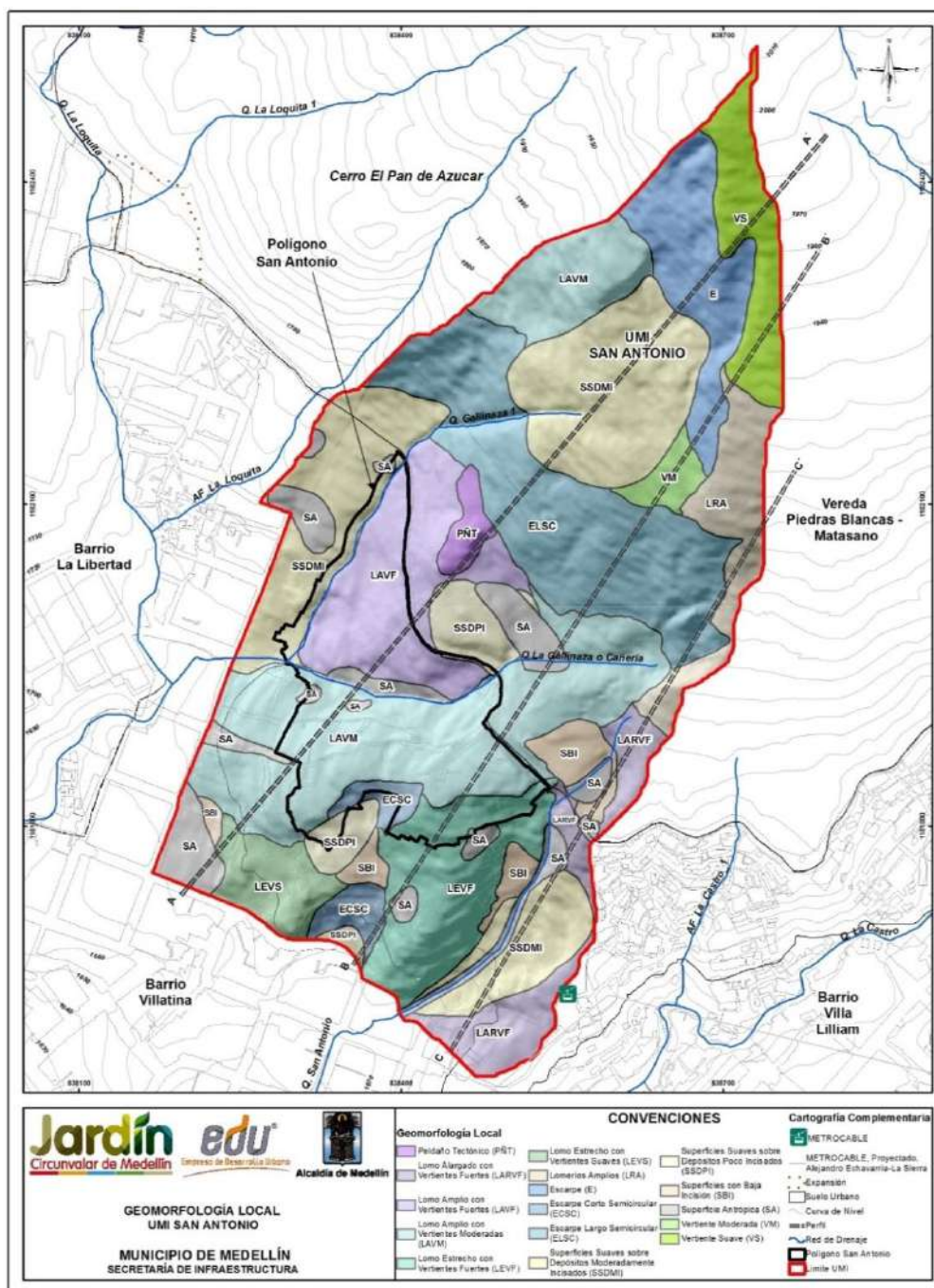


Figura 157. Polígono asociado al deslizamiento Villatina trazada por medio de registro fotográfico del mismo sobre la cartografía del año 1973



Mapa 42. Unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

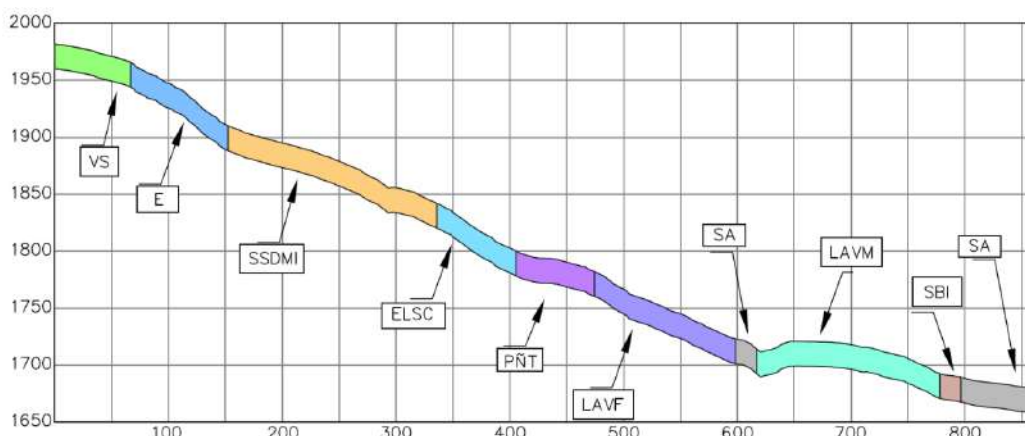




Figura 158. Perfil A-A' de unidades geomorfológicas de la UMI San Antonio (SIGA, 2018)

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

16.2.2.2 Factor de intensidad

Se habló en el Numeral 16.2.1 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 geométricamente. 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 153 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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.

16.2.2.3 Comparación de factor de intensidad con polígono de deslizamiento

La Figura 159, 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 159 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.



	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</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.

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 Trece de Noviembre, con un total de 481 estructuras (Figura 160). Las respectivas fichas de análisis para este polígono se presentan en el Anexo 06. El Mapa 43 presenta las vías de acceso y equipamientos del polígono objeto de estudio.

Este polígono se encuentra dentro del polígono de tratamiento Z3_MI_3 del POT (2014) del Municipio de Medellín. Los referentes físicos que se tienen para la delimitación del polígono a intervenir son los siguientes: en el noroccidente con la Calle 56FB desde la Carrera 23 hasta la Carrera 19, de la Carrera 56FC hasta la futura estación del Metrocable y por la Calle 56H hasta El Plan. El límite suroriental está definido por el cauce de la Quebrada La Arenera. El polígono se dividió en 30 zonas para realizar de una forma ordenada el trabajo de inspección e inventario.

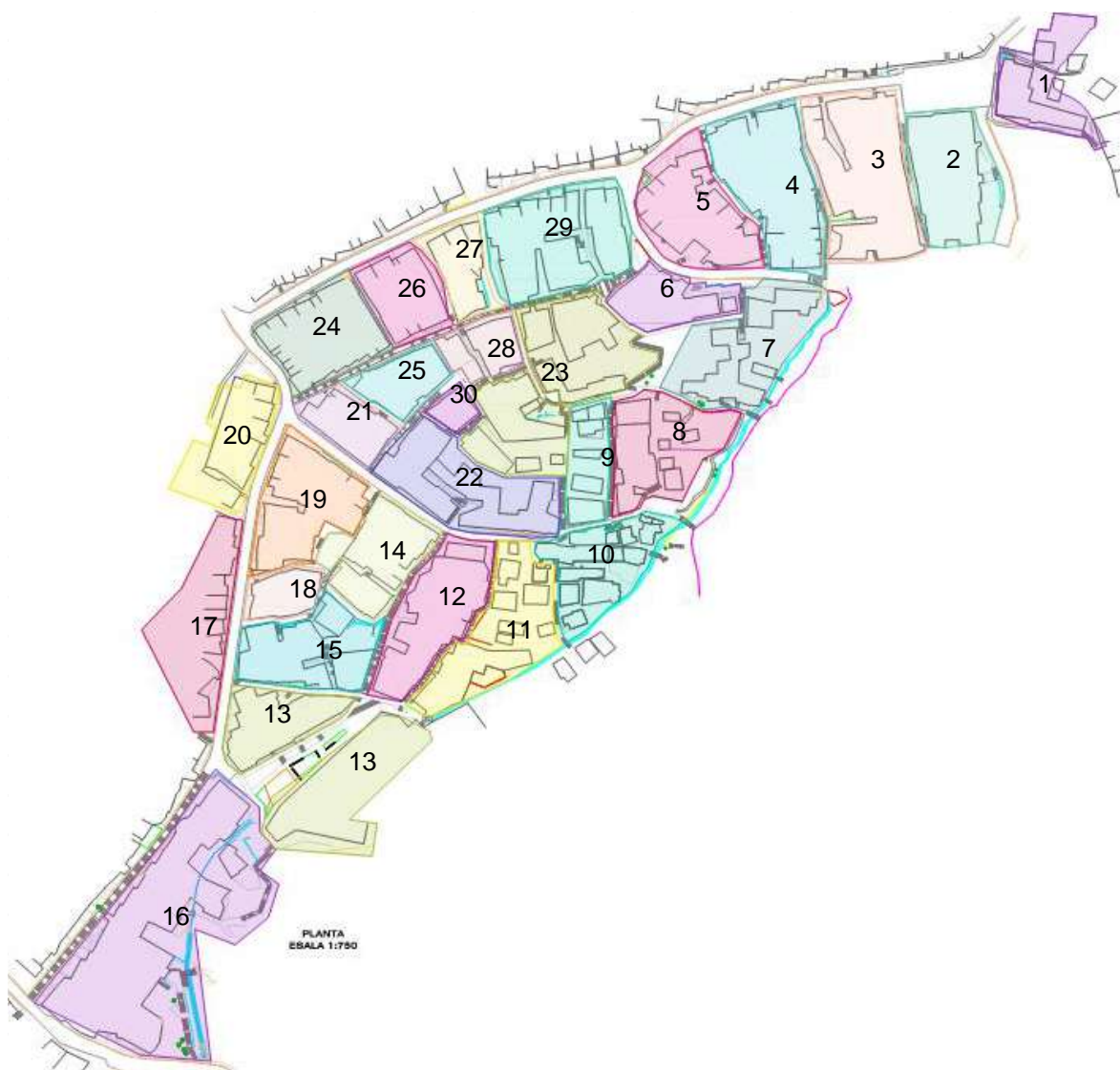
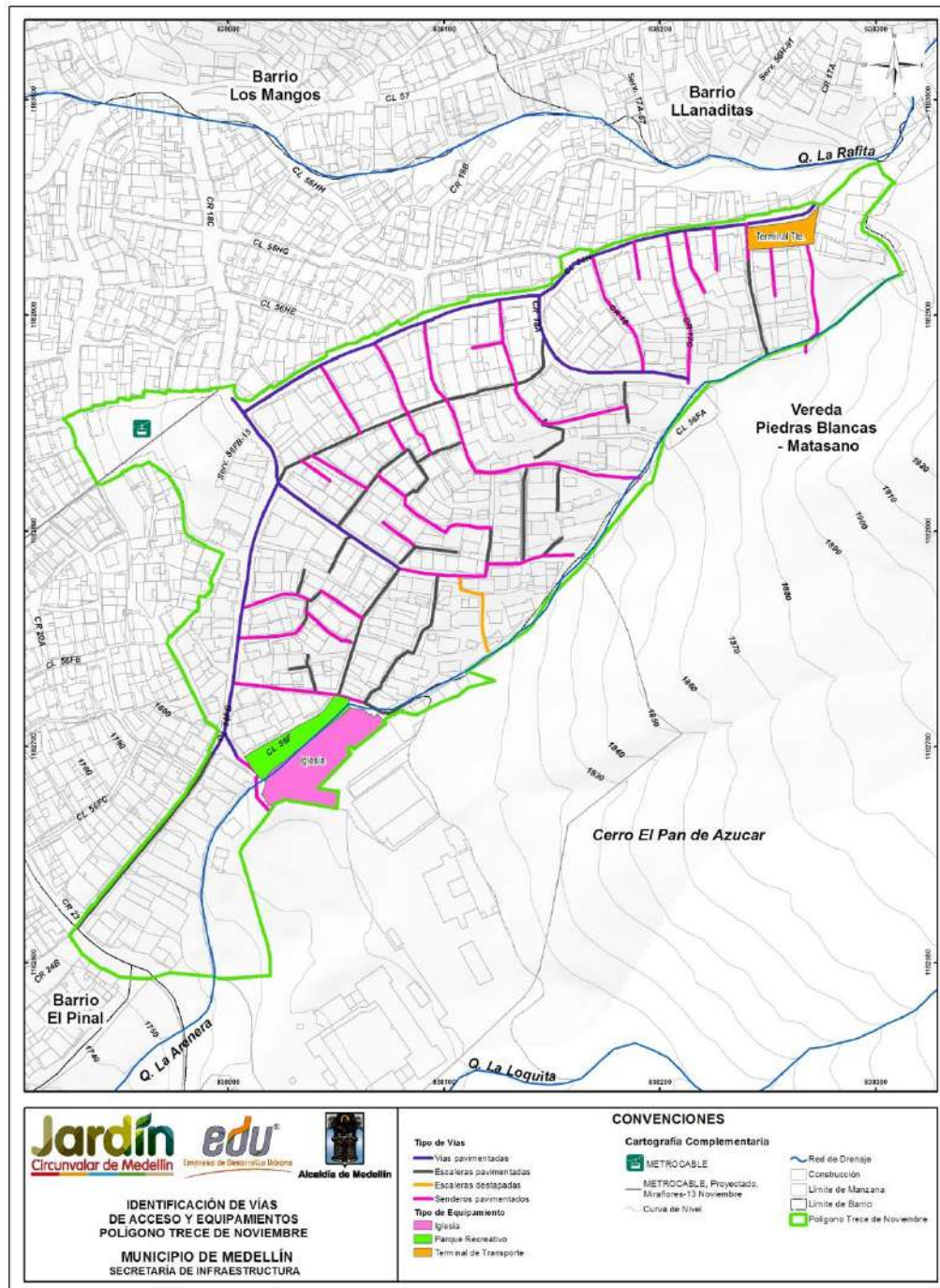


Figura 160. Zonificación de la vulnerabilidad en el Trece de Noviembre



Mapa 43. Localización vías de acceso y equipamiento en el Polígono Trece de Noviembre
(35_TDNViasdeAccesosyEquipamientos_Medellin_C y
35_TDNViasdeAccesosyEquipamientos_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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 realizaron un análisis estadístico mediante la implementación de diagramas circulares (Tabla 60 a Tabla 64) para facilitar la interpretación de los resultados.

- ✓ El uso predominante de las estructuras en el Polígono Trece de Noviembre es el residencial, donde un 95.43% de las estructuras inventariadas cumplen dicho fin. Las construcciones con uso mixto o comercial son pocas, con 3.33% y 1.25% respectivamente (Tabla 60).
- ✓ En el Polígono Trece de Noviembre se tiene un buen nivel en cuanto al estado y tipo de estructuras existentes. La gran mayoría de las estructuras están construidas en mampostería, con un 92.93% del total de las estructuras inspeccionadas. Le sigue las estructuras de madera con un 6.24% y una minoría en material prefabricado con un 0.83% (Tabla 61).
- ✓ El Polígono Trece de Noviembre presenta en su mayoría estructuras en estado o condiciones medias, que hace referencia a un estado entre bueno y malo (Tabla 62). No se le dio una calificación buena, dado que las construcciones en mampostería son simples, no poseen ningún tipo de confinamiento ni se puede considerar como mampostería estructural. En esta categoría media se ubica el 92.93% de las estructuras. En menor porcentaje se encuentran las construcciones en estado muy bueno, bueno, malo, muy malo y con el 0.21%, 2.49%, 2.49%, 1.87% respectivamente.
- ✓ En el Polígono Trece de Noviembre casi la mitad de las estructuras presentan dos niveles construidos, con un 48.44% del total de estructuras inspeccionadas (Tabla 63). Le siguen las construcciones de un solo piso con el 35.76% y de tres a cinco niveles con el 15.8%.
- ✓ La mayoría de las construcciones existentes en el Polígono Trece de Noviembre tiene teja de Zinc con un 85.86%, le siguen las cubiertas tipo losa con un 9.36% y una minoría en otro tipo de cubierta con un 4.78% (Tabla 64).
- ✓ En el caso particular de las estructuras al interior del Polígono Trece de Noviembre, 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 60. Tipo de ocupación – Movimiento en Masa

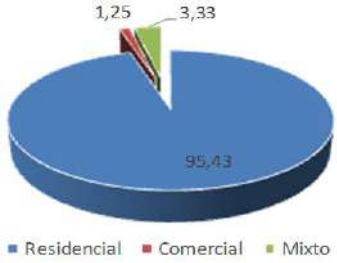
Ocupación	Total Estructuras	%	
Residencial	459	95.43	
Comercial	6	1.25	
Mixto	16	3.33	
Total	481	100	

Tabla 61. Tipo de estructura – Movimiento en Masa


Tipo Estructura	Total Estructuras	%	
Ligera (Madera)	30	6.24	
Mixta (Prefabricada)	4	0.83	
Mampostería	447	92.93	
Total	481	100	

Tabla 62. Estado de la estructura – Movimiento en Masa

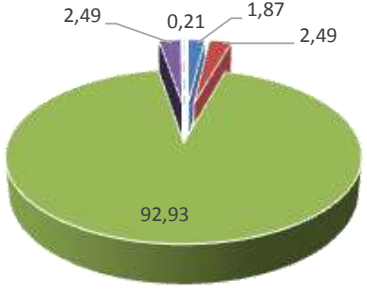
Estado Estructura	Total Estructuras	%	
Muy mala	9	1.87	
Mala	12	2.49	
Media	447	92.93	
Buena	12	2.49	
Muy buena	1	0.21	
Total	481	100	

Tabla 63. Alturas de las estructuras – Movimiento en Masa

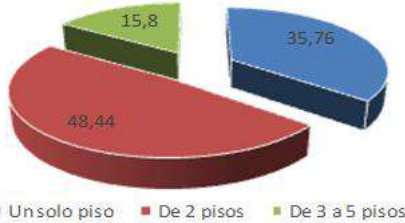
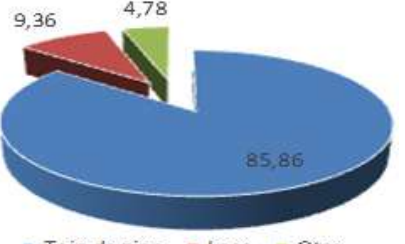
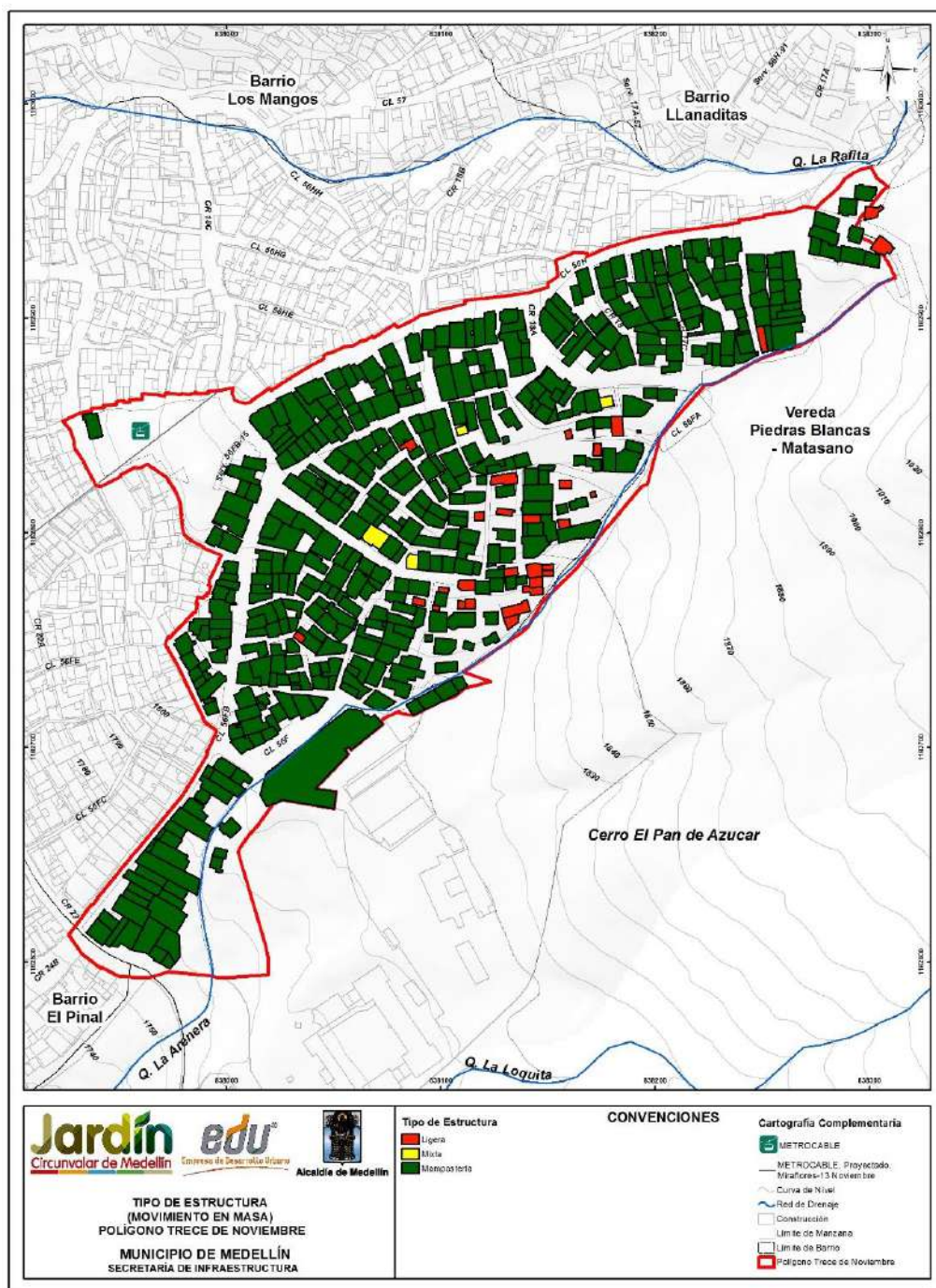
Altura Estructura	Total Estructuras	%	
Un solo piso	172	35.76	
De 2 pisos	233	48.44	
De 3 a 5 pisos	76	15.8	
Total	481	100	

Tabla 64. Tipo de cubierta – Movimiento en Masa

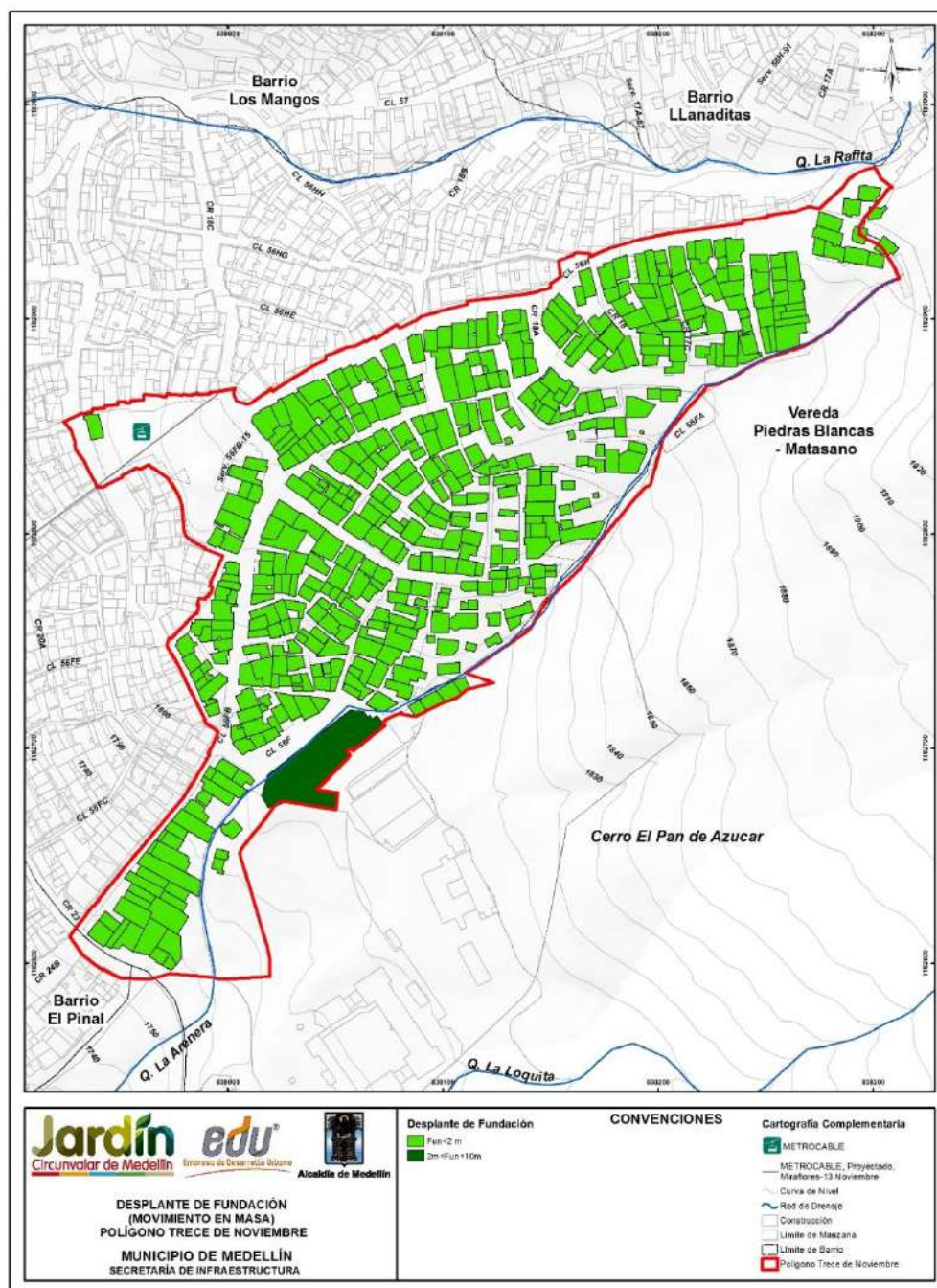
Tipo Cubierta	Total Estructuras	%	
Teja de zinc	413	85.86	
Losa	45	9.36	
Otro	23	4.78	
Total	481	100	

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 44 al Mapa 48.

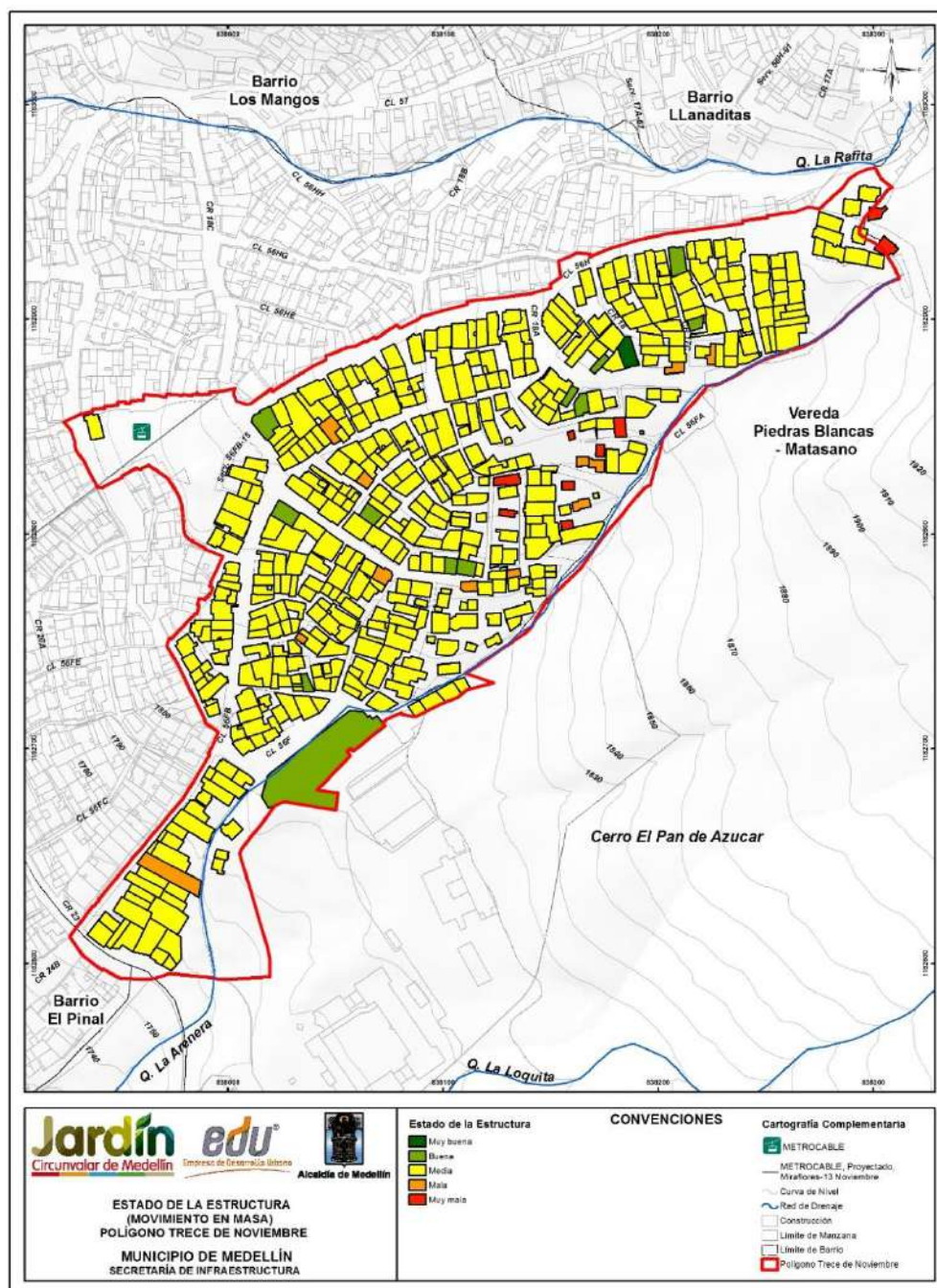
Luego del análisis de la información y con la construcción de los respectivos mapas para cada uno de los factores que conforman la metodología de análisis de vulnerabilidad física por movimientos en masa, se determinó el factor de resistencia cuantitativa de las estructuras según la metodología anteriormente expuesta, este se presenta en el Mapa 49.



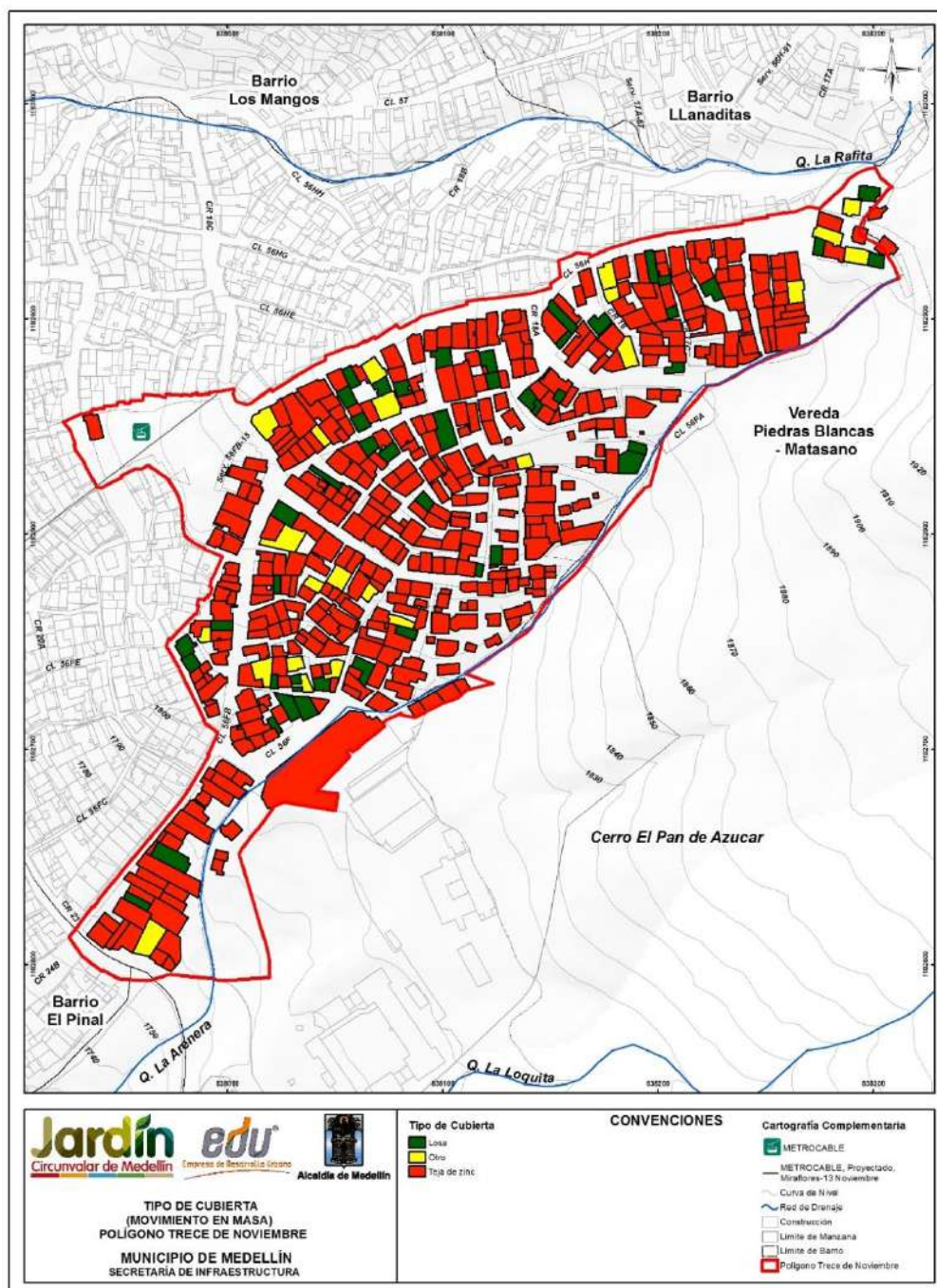
Mapa 44. Localización espacial del tipo de estructura por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(25_TDNTipodeEstructura_Medellin_C y 25_TDNTipodeEstructura_Medellin_T)



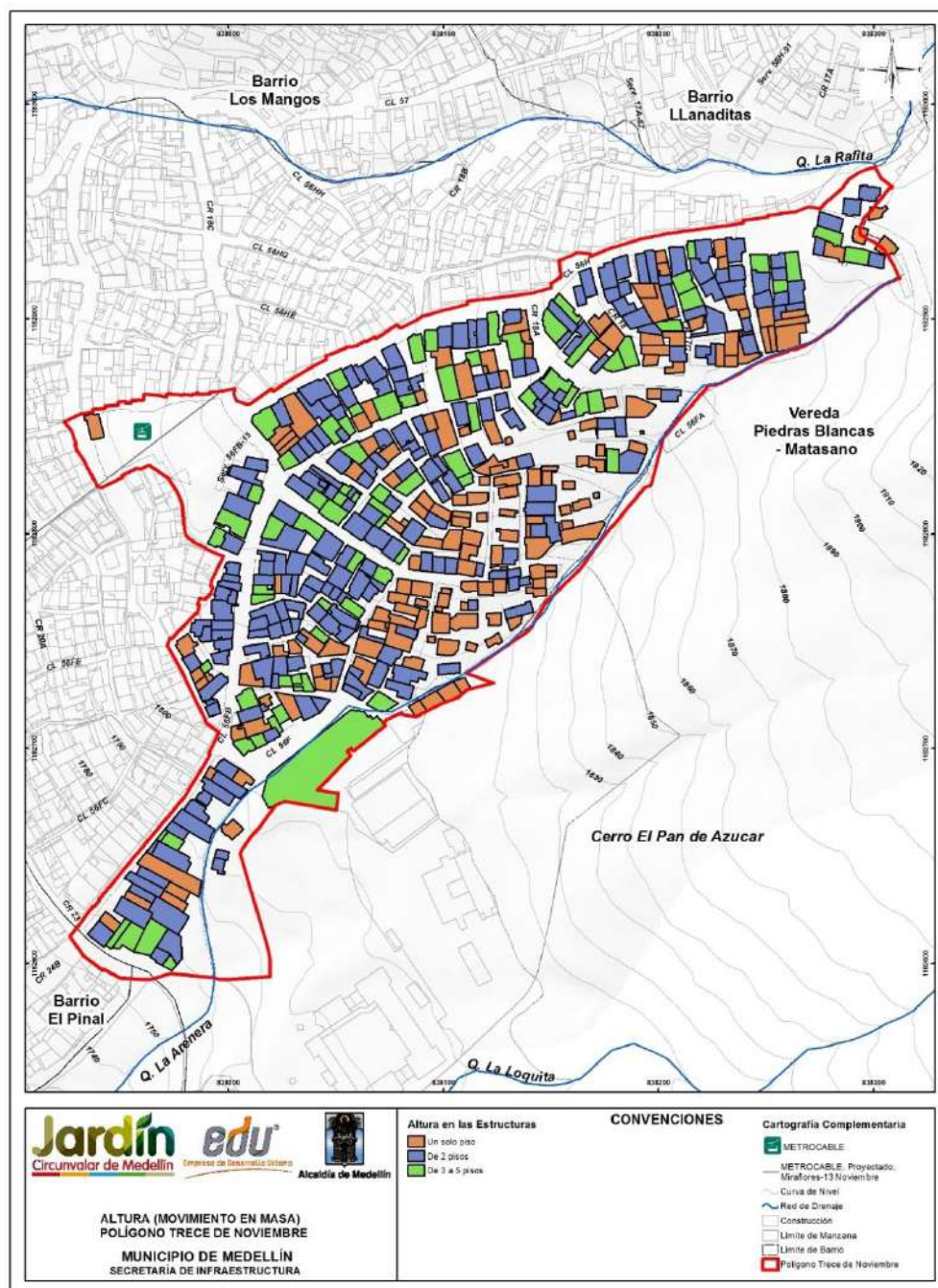
Mapa 45. Localización espacial del desplante de fundaciones por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(26_TDNDesplantedeFundaciones_Medellin_C y 26_TDNDesplantedeFundaciones_Medellin_T)



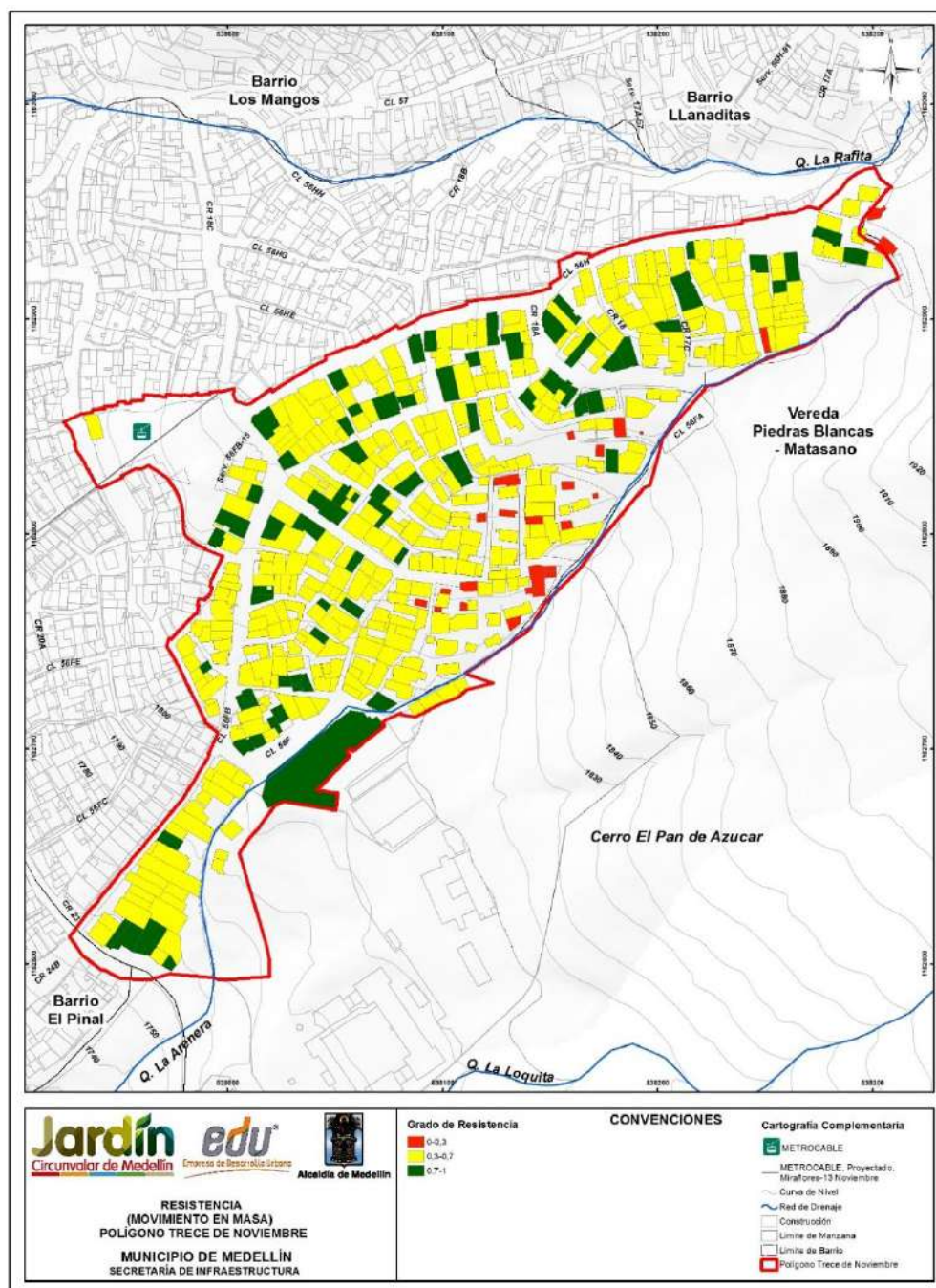
Mapa 46. Localización espacial del estado de la estructuras por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(27_TDNEstadodelaEstructura_Medellin_C y 27_TDNEstadodelaEstructura_Medellin_T)



Mapa 47. Localización espacial del tipo de cubierta por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(28_TDNTipodeCubierta_Medellin_C y 28_TDNTipodeCubierta_Medellin_T)



Mapa 48. Localización espacial de la altura de las estructuras por movimiento en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(29_TDNAlturadelaConstruccion_Medellin_C y 29_TDNAlturadelaConstruccion_Medellin_T)



Mapa 49. Parámetro resistencia de las estructuras para la metodología de vulnerabilidad física por movimientos en masa
(30_TDNMapadeResistencia_Medellin_C y 30_TDNMapadeResistencia_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 Trece de Noviembre observado en el Mapa 49, 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 Trece de Noviembre.

Para determinar el factor intensidad (z) en cada polígono, se partió del mapa de amenaza por movimientos en masa a 50 años (Mapa 39). 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 50, 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:

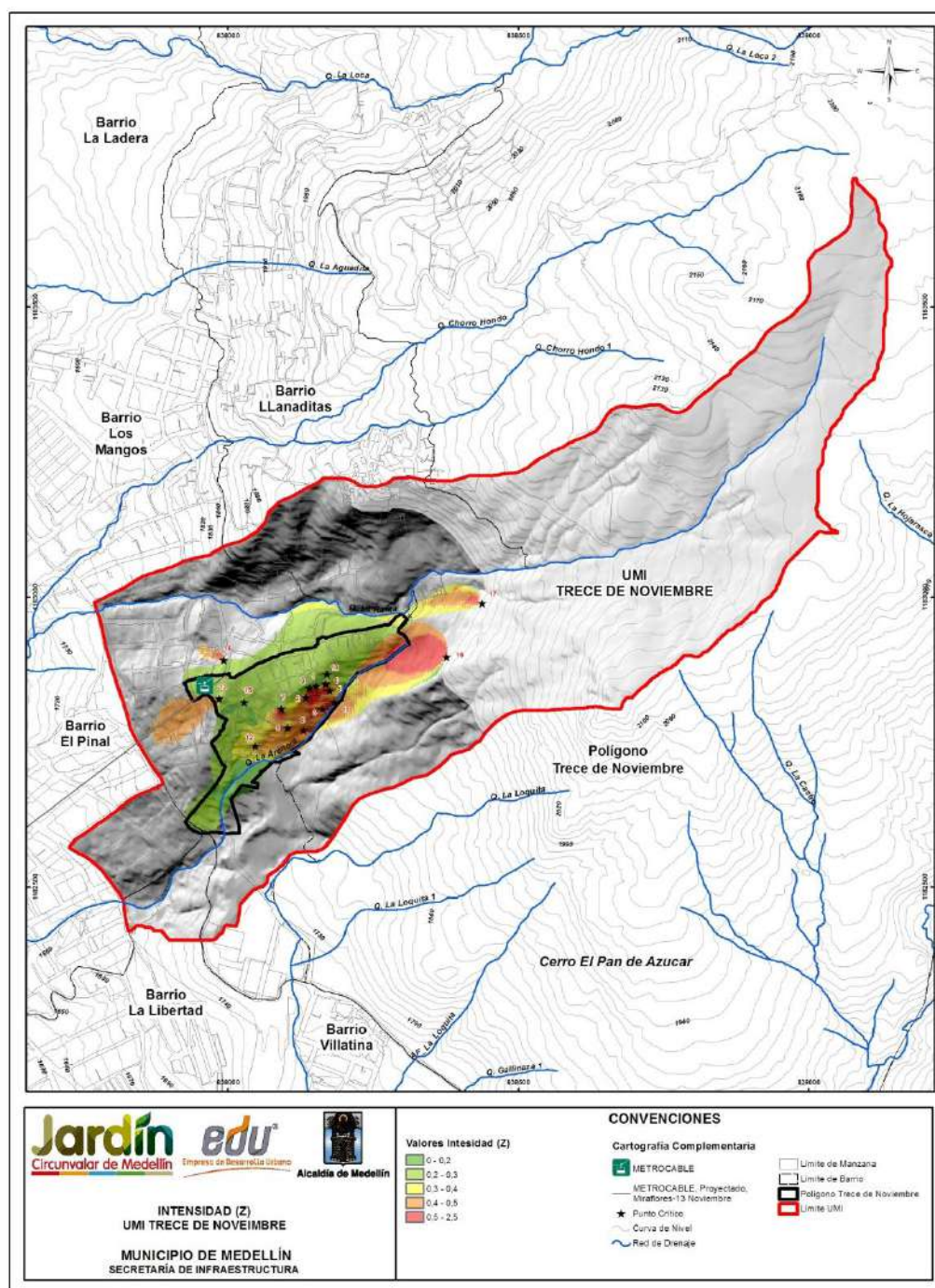
$$V_e = f(Z, R) = \left[1 + \left(\frac{Z}{R} \right)^{-1/0.04} \right]^{-0.05}$$

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. Este valor bien puede representar un factor de daño. La Tabla 65 presenta la clasificación de la vulnerabilidad física estructural establecida para este proyecto.

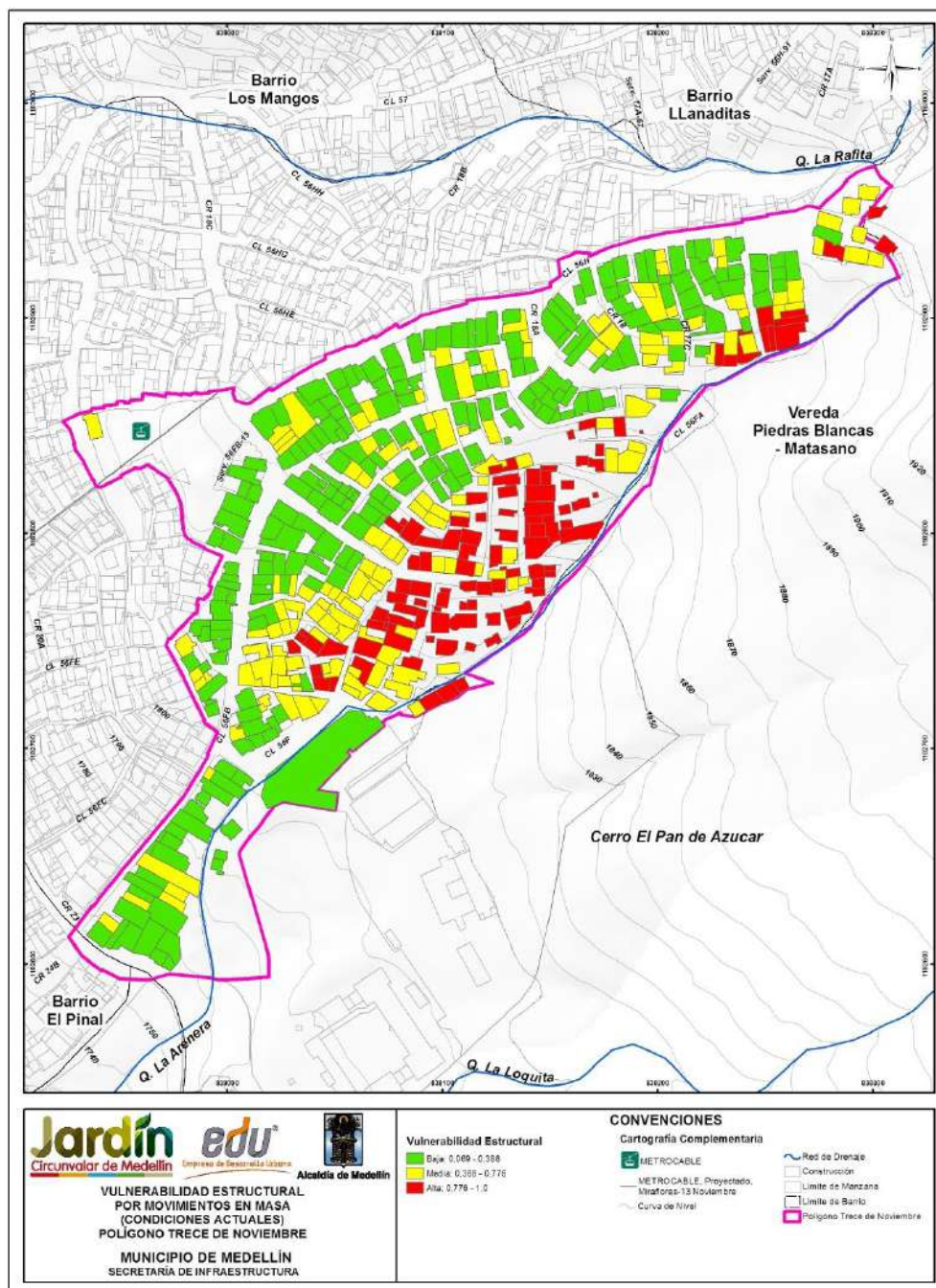
Tabla 65. Categorización de la vulnerabilidad estructural física ante fenómenos de movimientos en masa

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

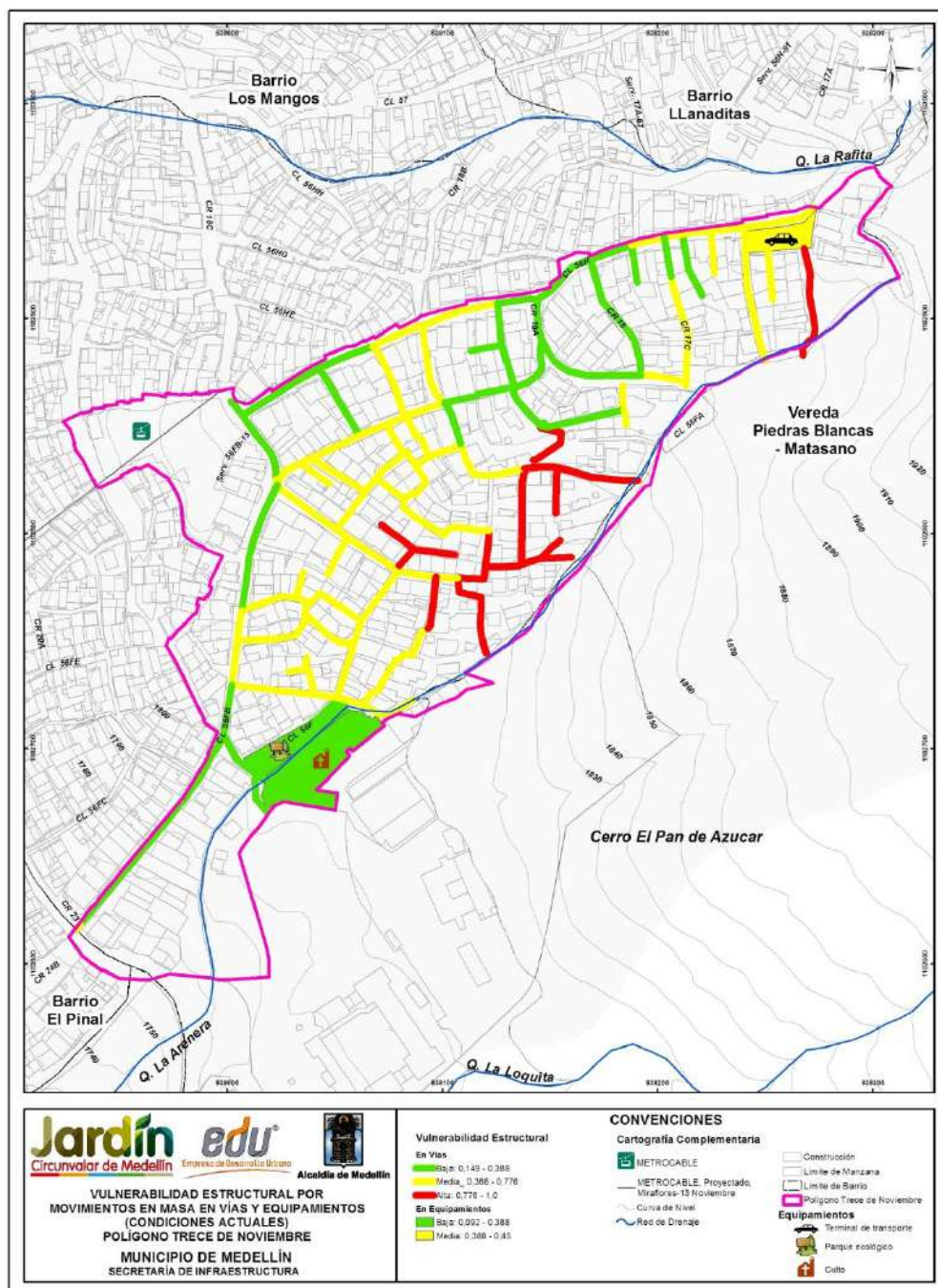
El Mapa 51 y el Mapa 52 presentan el análisis de la vulnerabilidad estructural de las viviendas y de las vías de acceso y equipamientos del Polígono Trece de Noviembre con su respectiva clasificación entre baja, media y alta según el criterio de la Tabla 65.



Mapa 50. Factor de intensidades de deslizamientos que afectan el Polígono Trece de Noviembre
(TDNSuperficie del IntesidadesZUMI_Medellin_C)



Mapa 51. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(36_TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 36_TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 52. Análisis de la vulnerabilidad estructural por movimientos en masa de las vías de acceso y equipamientos en el Polígono Trece de Noviembre
(45_TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_Cy
45_TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_T)

El Mapa 51 que se presenta en este informe permite observar una tendencia de mayor vulnerabilidad estructural en las estructuras que se ubican sobre la margen derecha de la Quebrada La Arenera en la parte media del polígono.

La Figura 161 muestra que cerca de un 31% de las estructuras presentes al interior del Polígono del Trece de Noviembre presentan una vulnerabilidad media, el 47% presentan una vulnerabilidad baja y el 22% aproximadamente presentan una vulnerabilidad alta. La comparación entre la Figura 160 y el Mapa 51 de este informe permitieron observar que las zonas donde se concentra esta vulnerabilidad estructural alta son parte de las Zonas 1, 2 y 3 y las Zonas 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 22. En estas zonas, se presentan resistencias en estado medio a bajo, con una mayor concentración de estructuras en madera.

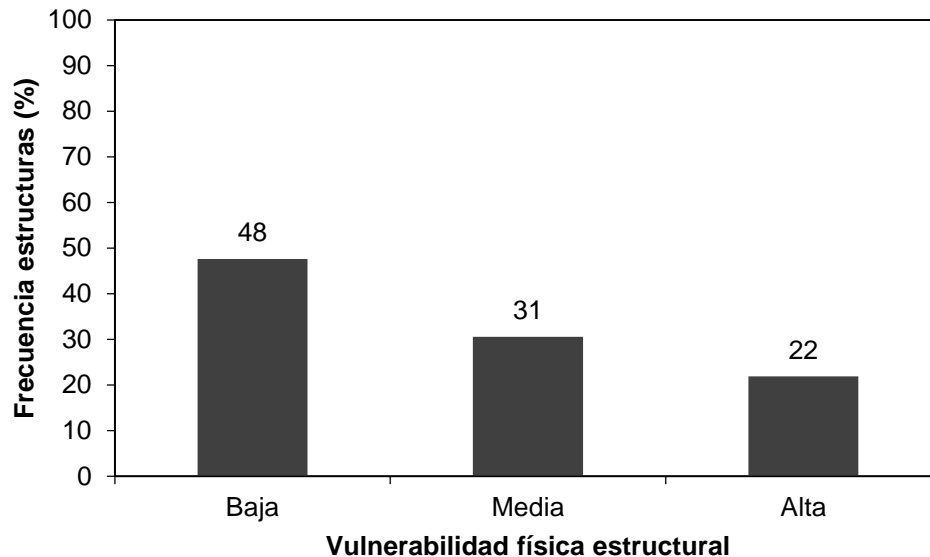


Figura 161. Distribución de frecuencia de la vulnerabilidad física de las estructuras

Además de la vulnerabilidad física estructural, la metodología propuesta por Uzielli (2006) permite estimar la vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras, en función de la vulnerabilidad estructural mediante la expresión:

$$V_p = f(V_e) = 0.0014 \cdot e^{6.07 \cdot V_e}$$

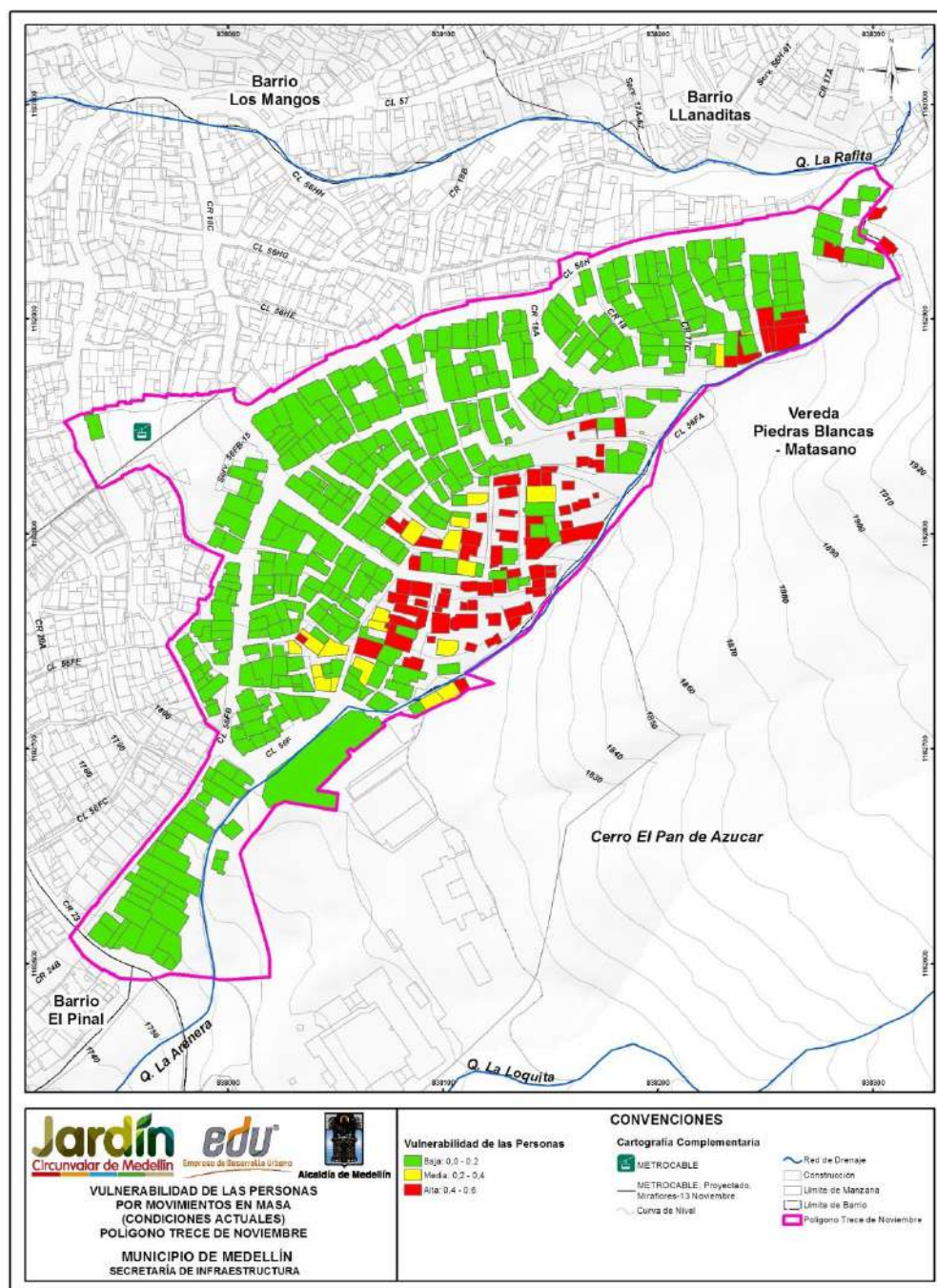
La vulnerabilidad de las personas se expresa en como un numero adimensional que varía entre 0 y 0.6, donde 0.6 es el valor de máxima vulnerabilidad de las personas. Finalmente, la vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras por efectos de movimientos en masa, se podrá categorizar como se muestra en la Tabla 66.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Tabla 66. 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 moverse 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 53 presenta el análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Trece de Noviembre por movimientos en masa con su respectiva clasificación entre baja, media y alta. En el mapa se observa que de las 481 estructuras, 381 de ellas presentan una baja vulnerabilidad de personas (79%), 21 presentan vulnerabilidad de personas media (5%) y 79 presentan alta vulnerabilidad de las personas (16%). Se observa que el valor máximo de vulnerabilidad de las personas es de 0.6 y que este valor coincide con las estructuras donde la vulnerabilidad estructural fue la máxima. De igual forma se observa que la vulnerabilidad de las personas se concentra hacia la zona de la margen derecha de la Quebrada La Arenera.



Mapa 53. Análisis de la vulnerabilidad de las personas por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(37_TDNVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_Medellin_C
37_TDNVulnerabilidadPersonasMovimientosenMasa_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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

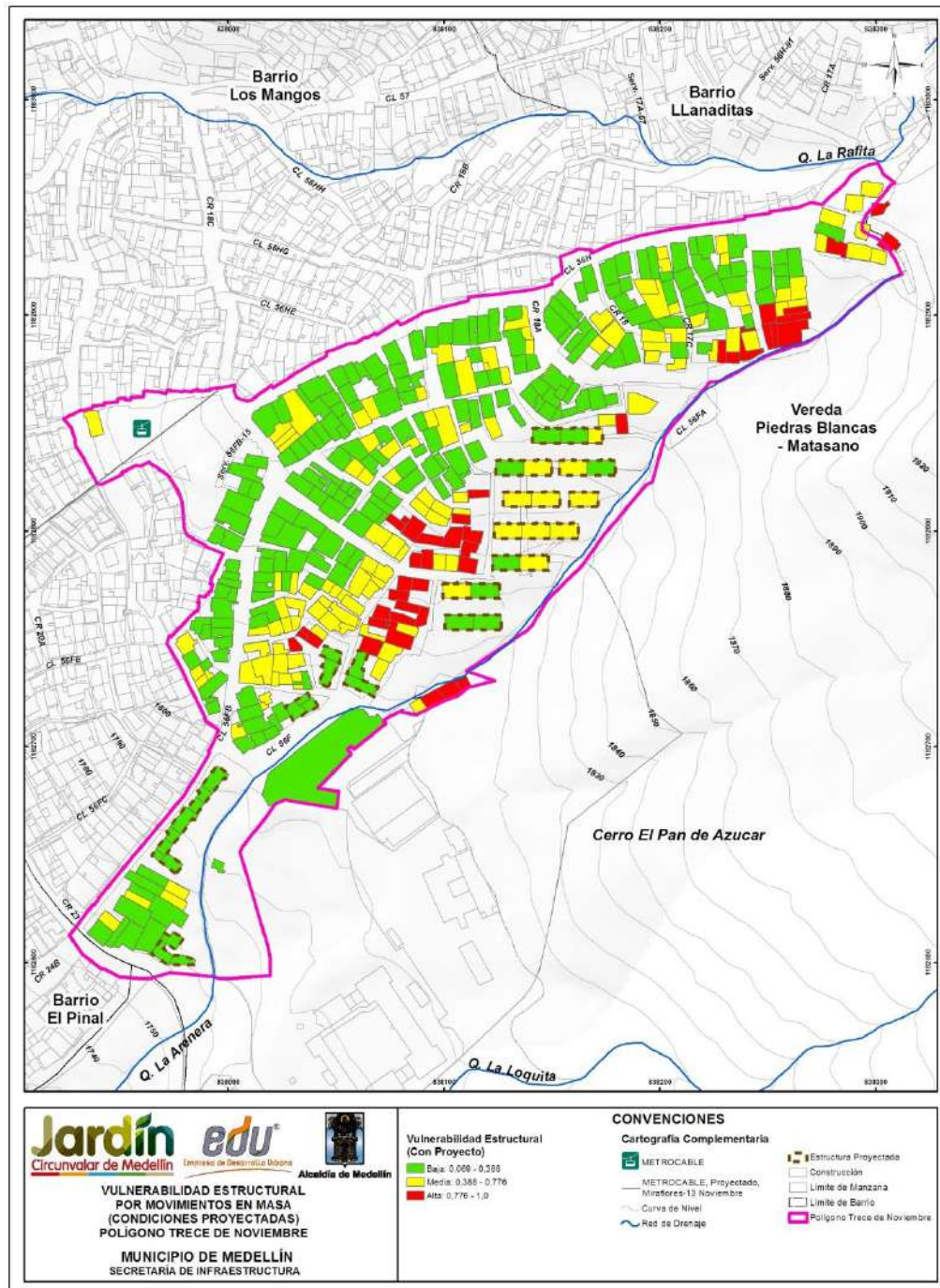
Además del análisis de la vulnerabilidad con las condiciones actuales del proyecto, se hizo una evaluación de la vulnerabilidad estructural y de las personas considerando el futuro Proyecto Barrios Sostenibles.

Para esta modelación se consideró que las nuevas estructuras de dicho proyecto tendrán unas características mejores que las estructuras existentes, al considerar que se tratan de estructuras 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. 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 67).

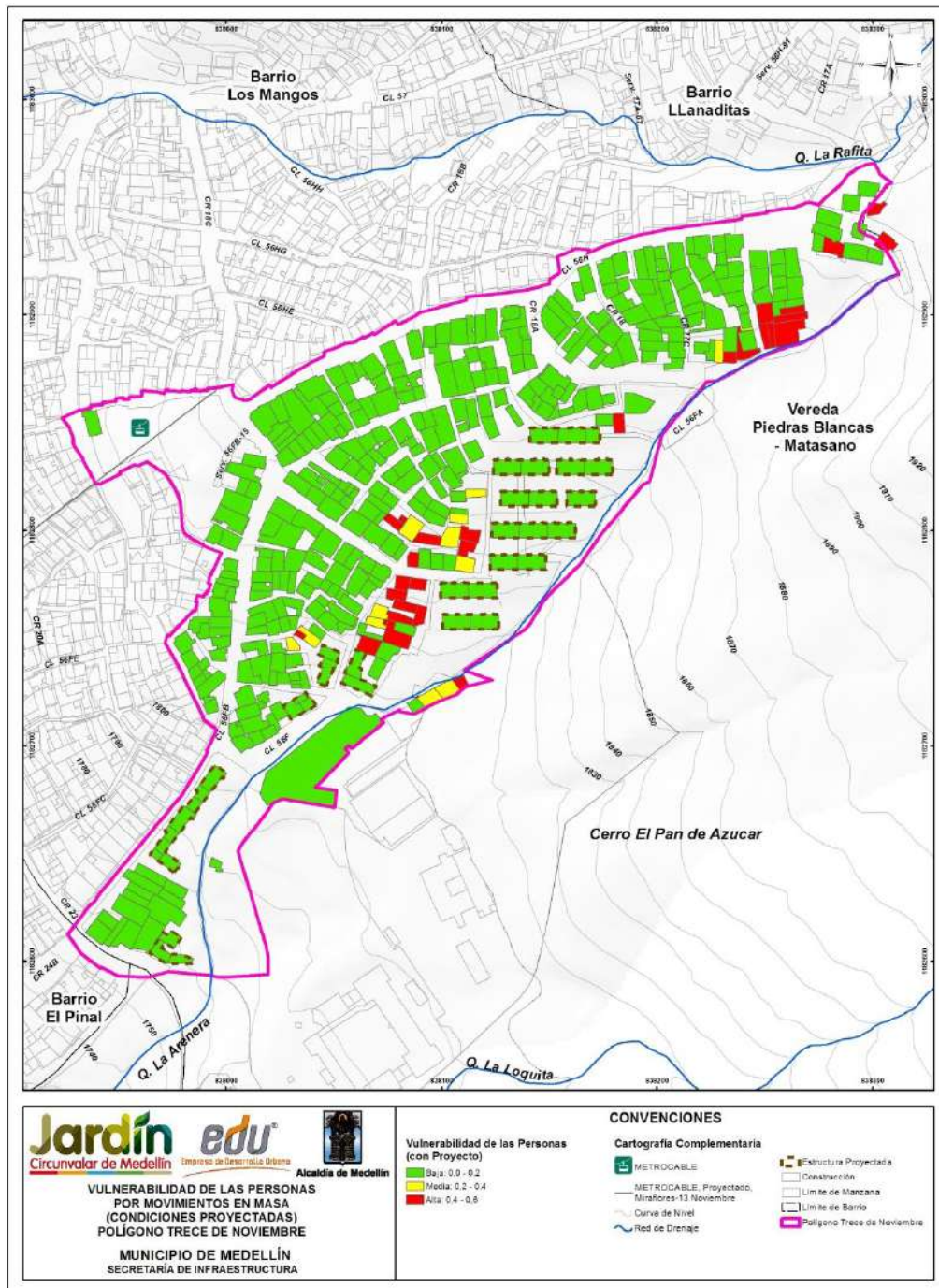
Tabla 67. Factores de vulnerabilidad considerados para el Proyecto Barrios Sostenibles del Trece de Noviembre

Factores de vulnerabilidad estructural	Calificación
Estado de la estructura (ξ_{man})	1.5
Altura de la estructura (ξ_{alt})	0.9
Nivel de fundación de la estructura (ξ_{sfd})	1.05
Tipo de estructura (ξ_{est})	1.5

Teniendo en cuenta lo anterior, el factor de resistencia (R) para estas estructuras 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. El Mapa 54, y el Mapa 55 de este informe, presentan el resultado de la vulnerabilidad estructural y de las personas respectivamente, considerando los mismos factores de intensidad del Mapa 50 que se presenta en este informe. Se observa entonces que con estas consideraciones las estructuras presentan de forma general una vulnerabilidad baja, tanto desde el punto de vista estructural como de las personas.



Mapa 54. Análisis de la vulnerabilidad estructural del Polígono Trece de Noviembre por movimientos en masa con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles
(TDNVulnerabilidadEstructuralMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)



Mapa 55. Análisis de la vulnerabilidad de las personas del Polígono Trece de Noviembre por movimientos en masa con el nuevo proyecto nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (TDNVulnerabilidadPersonasMovimientosMasaProyecto_Medellin_C)

16.3 VULNERABILIDAD PARA INUNDACIONES

Para el caso de inundaciones, la vulnerabilidad física se estimará 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). 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 4 o más niveles, su Factor de Vulnerabilidad por Tamaño de Edificación (FVT) será de 1; para uno de 3 niveles será de 2, para uno de 2 niveles será de 3 y finalmente para uno de 1 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 considerará 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 68.

Tabla 68. 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 69.

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 69. 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

La Figura 162 presenta un diagrama de flujo en el cual se observan los aspectos principales que componen la vulnerabilidad física por inundaciones.

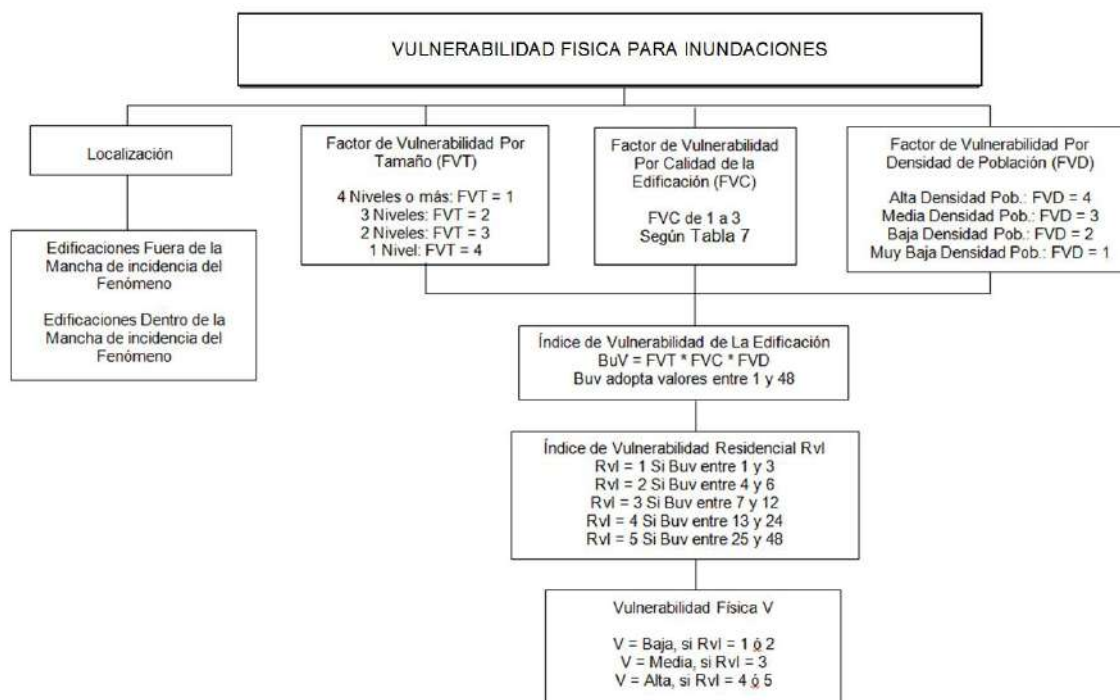


Figura 162. Diagrama de secuencia para la evaluación de la vulnerabilidad física para inundaciones

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 56 al Mapa 59 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 este polígono se tiene un buen nivel en cuanto al estado y tipo de estructuras existentes (Tabla 70). La gran mayoría de las estructuras están construidas en mampostería, con un 93.76% del total de las estructuras inspeccionadas. En un menor porcentaje se encuentran las estructuras ligeras con un 6.24%.
- ✓ El Polígono Trece de Noviembre presenta en su mayoría estructuras en estado medio, que hace referencia a un estado entre bueno y malo (Tabla 71). En esta categoría media se ubica el 92.93% de las estructuras. En menor porcentaje se encuentran las construcciones en estado malo y bueno con el 4.37% y 2.7% respectivamente.

- ✓ En este polígono casi la mitad de las estructuras presentan dos niveles contruidos, con un 48.44% del total de estructuras inspeccionadas. Le siguen las construcciones de un solo piso con el 35.76% y de tres pisos con el 14.35%. En un menor porcentaje se encuentran las estructuras de 4 pisos y más con un 1.46% (Tabla 72).
- ✓ En casi la mitad de las construcciones se tiene una densidad muy baja con un 40.54%. Le siguen las construcciones con densidad baja con un 38.25%. En menores porcentajes se encuentran las estructuras con densidades medias y altas con el 14.76% y 6.44% respectivamente (Tabla 73).

Tabla 70. Tipo de estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

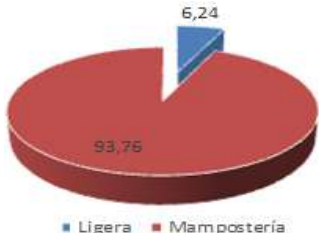
Tipo Estructura	Total Estructuras	%	
Ligera (Madera)	30	6.24	
Mampostería	451	93.76	
Total	481	100	

Tabla 71. Estado de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

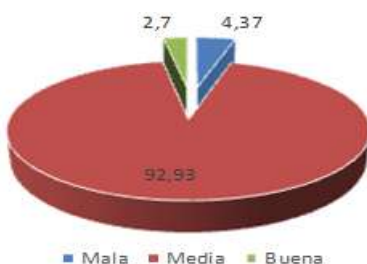
Estado Estructura	Total Estructuras	%	
Mala	21	4.37	
Media	447	92.93	
Total	481	100	

Tabla 72. Altura de la estructura – Inundaciones y Avenidas torrenciales

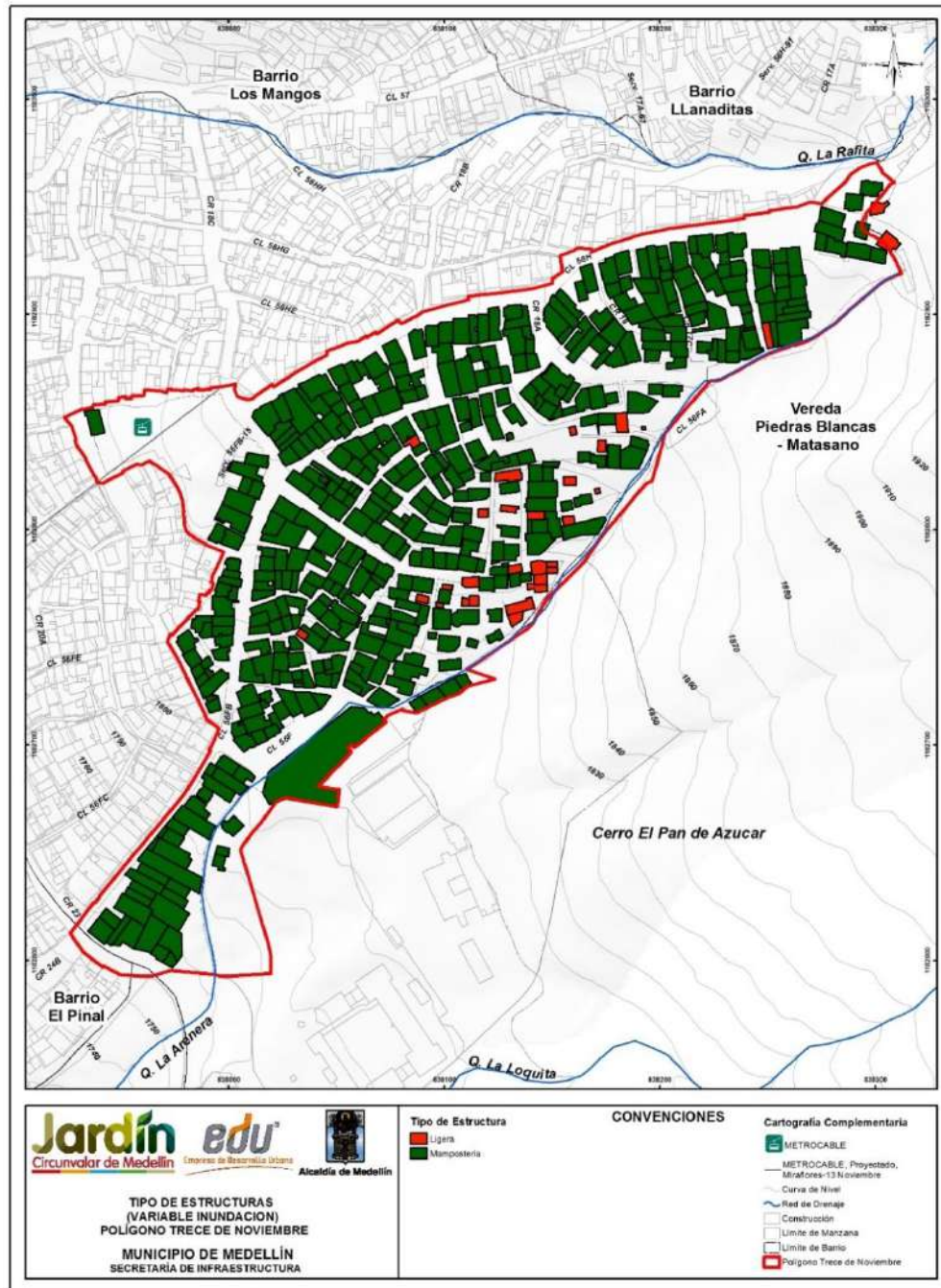
Altura de la estructura	Total Estructuras	%	
Un solo piso	172	35.76	
De 2 pisos	233	48.44	
De 3 pisos	69	14.35	
De 4 pisos y más	7	1.46	
Total	481	100	

Tabla 73. Densidad de población – Inundaciones y Avenidas torrenciales

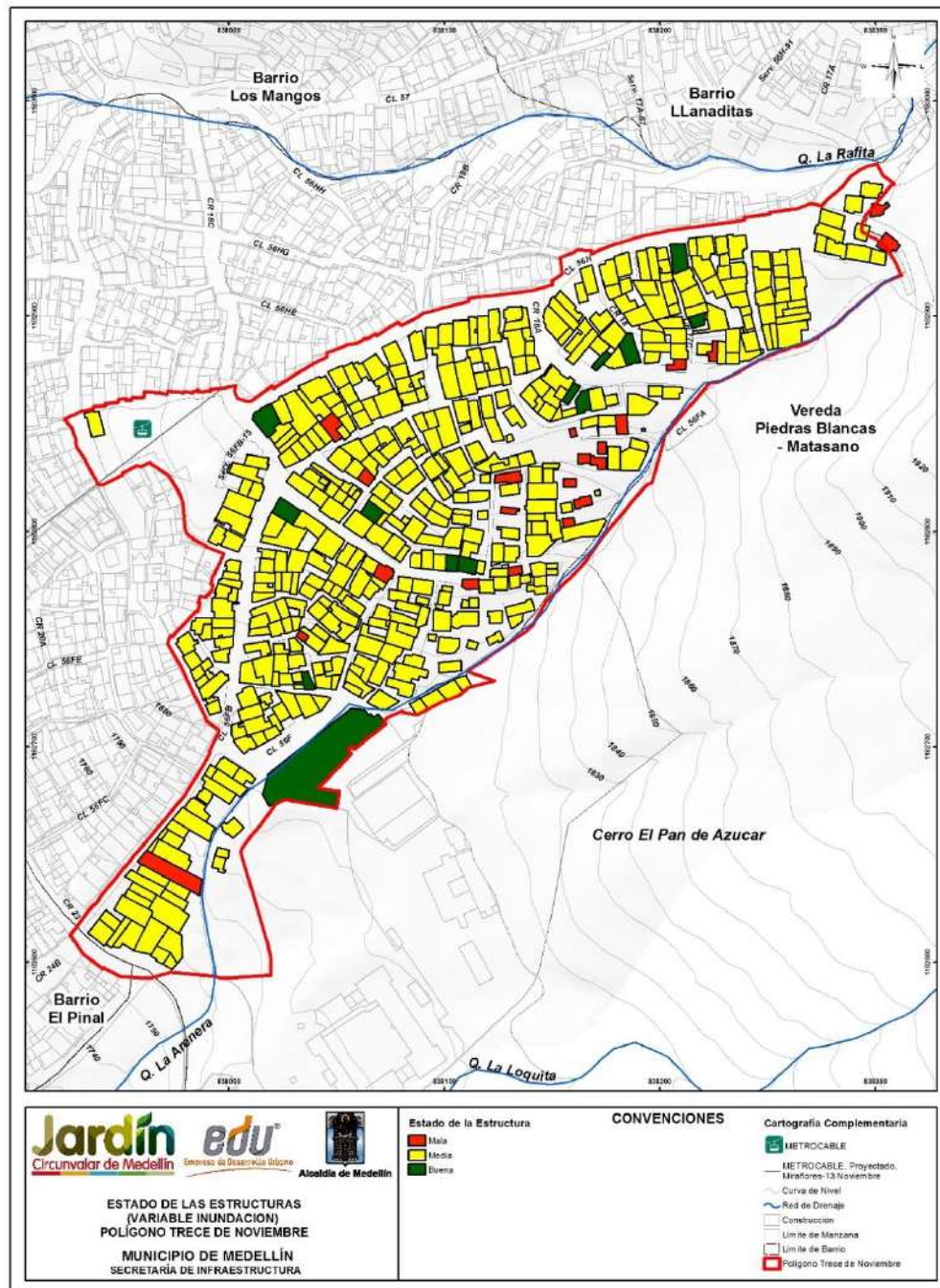
Densidad de población	Total Estructuras	%	
Muy baja	195	40.54	
Baja	184	38.25	
Media	71	14.76	
Alta	31	6.44	
Total	481	100	

Finalmente con la información de los Mapa 56 al Mapa 59 que se presentó en este informe se generó el mapa de vulnerabilidad física por inundaciones para el Polígono Trece de Noviembre el cual se presenta en este informe en el Mapa 60. En el Mapa 61 de este informe, se presenta igualmente la vulnerabilidad de las estructuras ante inundaciones, considerando las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles.

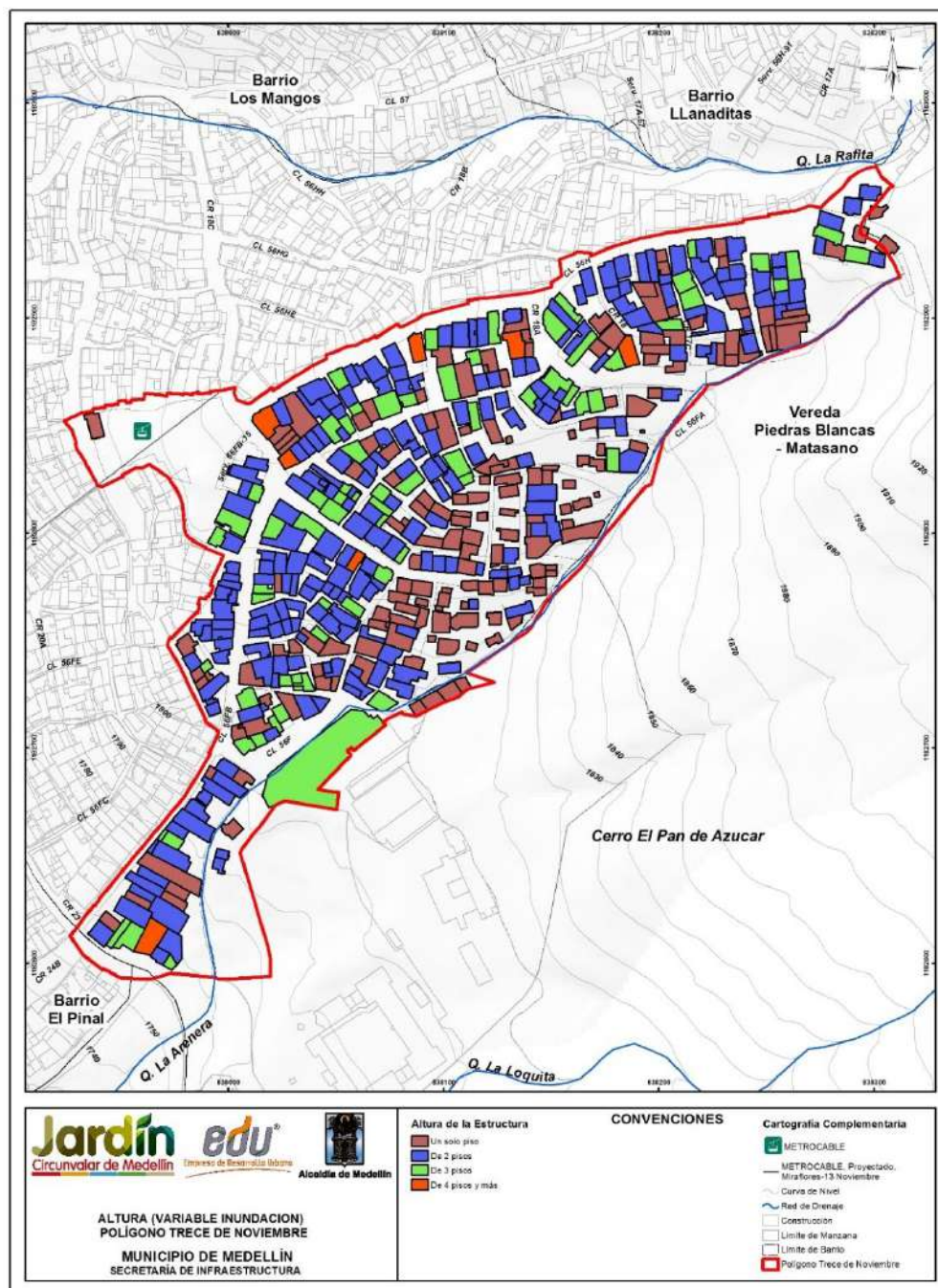
De igual forma, se evaluó la vulnerabilidad para las vías de acceso y equipamientos dentro del Polígono Trece de Noviembre. Para el caso de las vías, se tiene que el Factor de Vulnerabilidad por Densidad (FVD) y el Factor de Vulnerabilidad por Tamaño (FVT) son constantes con los valores 4 y 4 respectivamente, 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 62 se presenta el resultado del análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre para las Vías de Acceso y Equipamientos.



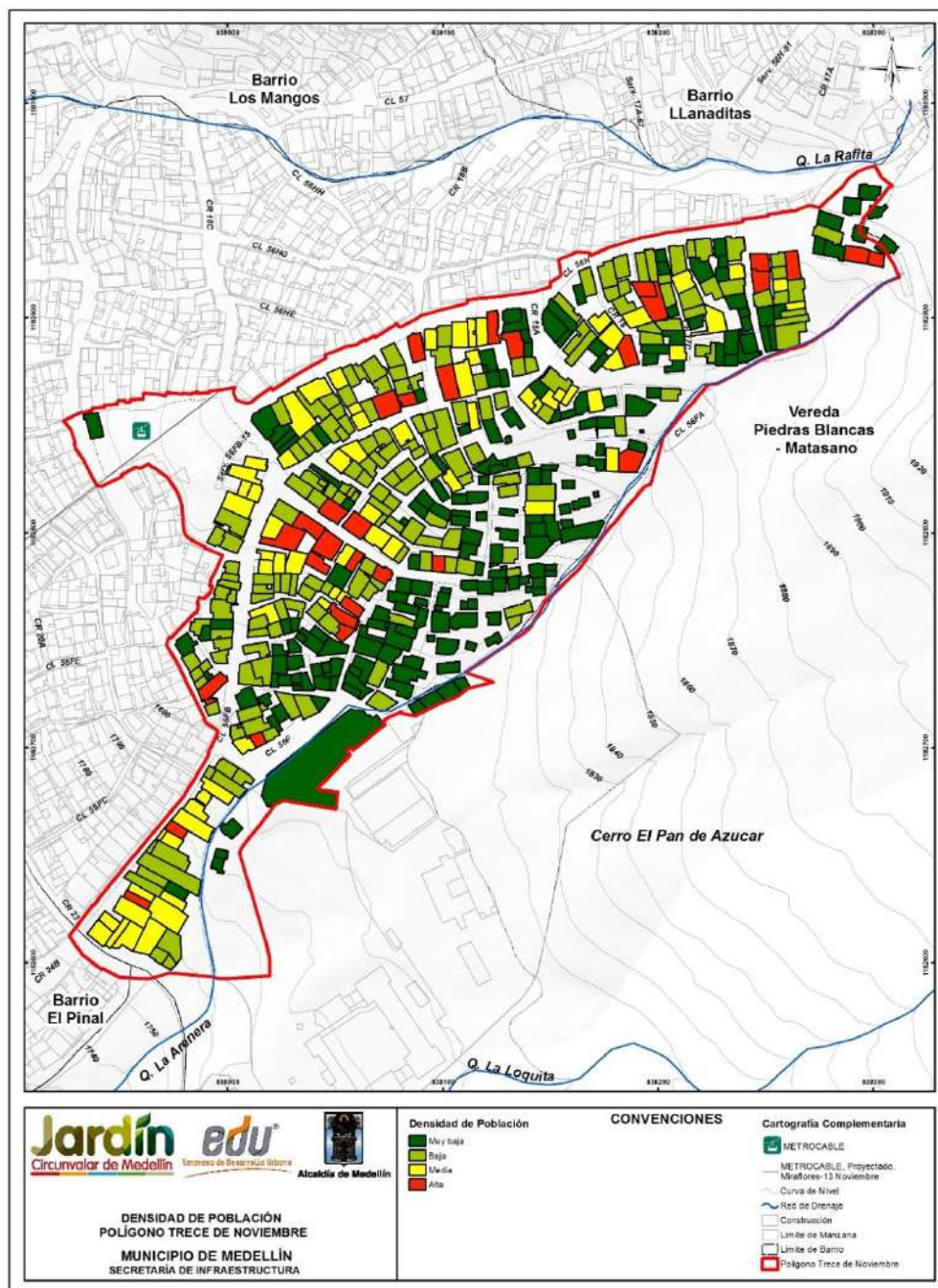
Mapa 56. Localización espacial del tipo de estructura para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre
(31_TDNTipodeEstructura_Medellin_C y 31_TDNTipodeEstructura_Medellin_T)



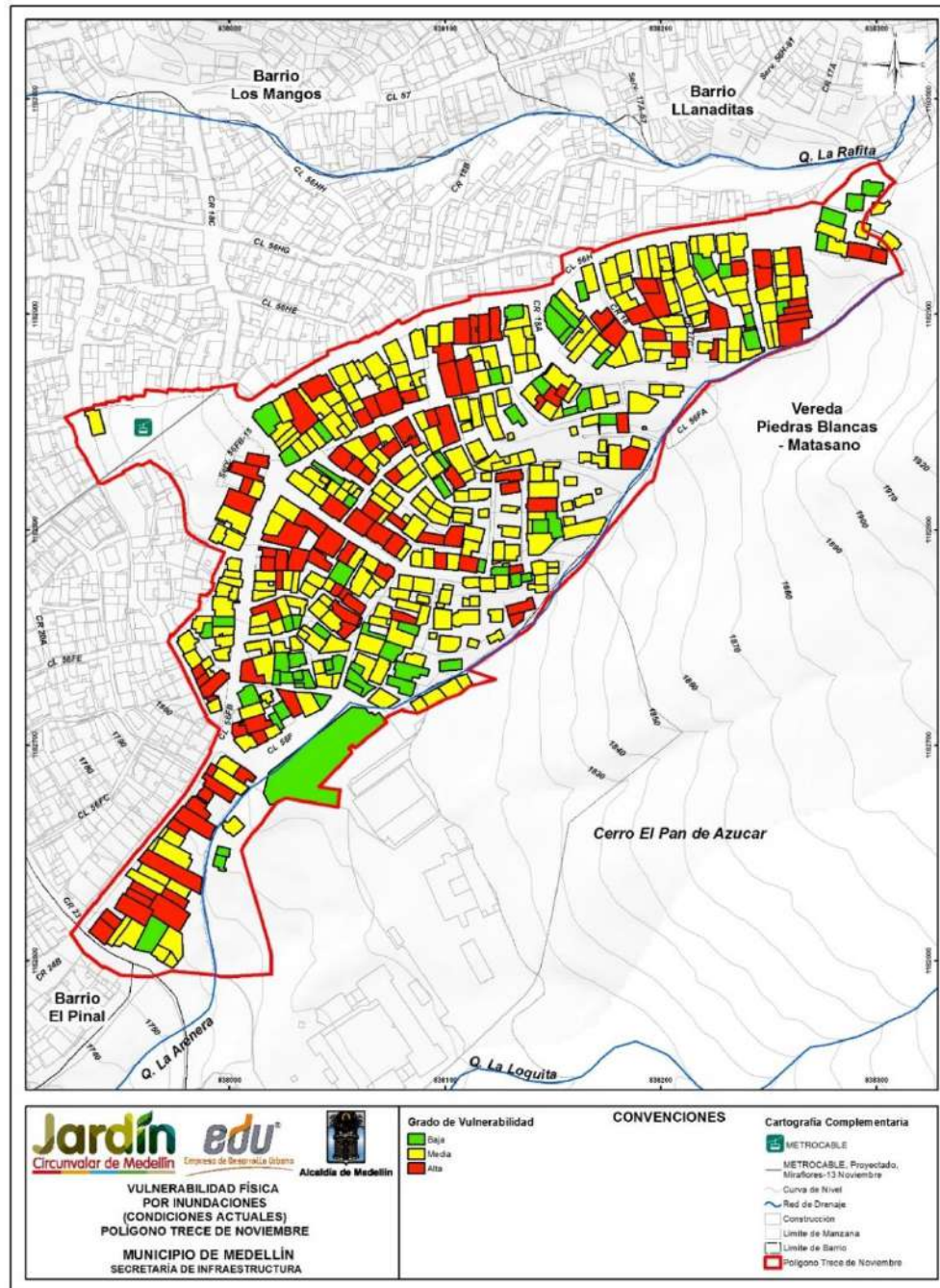
Mapa 57. Localización espacial del estado de la estructura para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre
(32_TDNEstadodelaEstructura_Medellin_C y 32_TDNEstadodelaEstructura_Medellin_T)



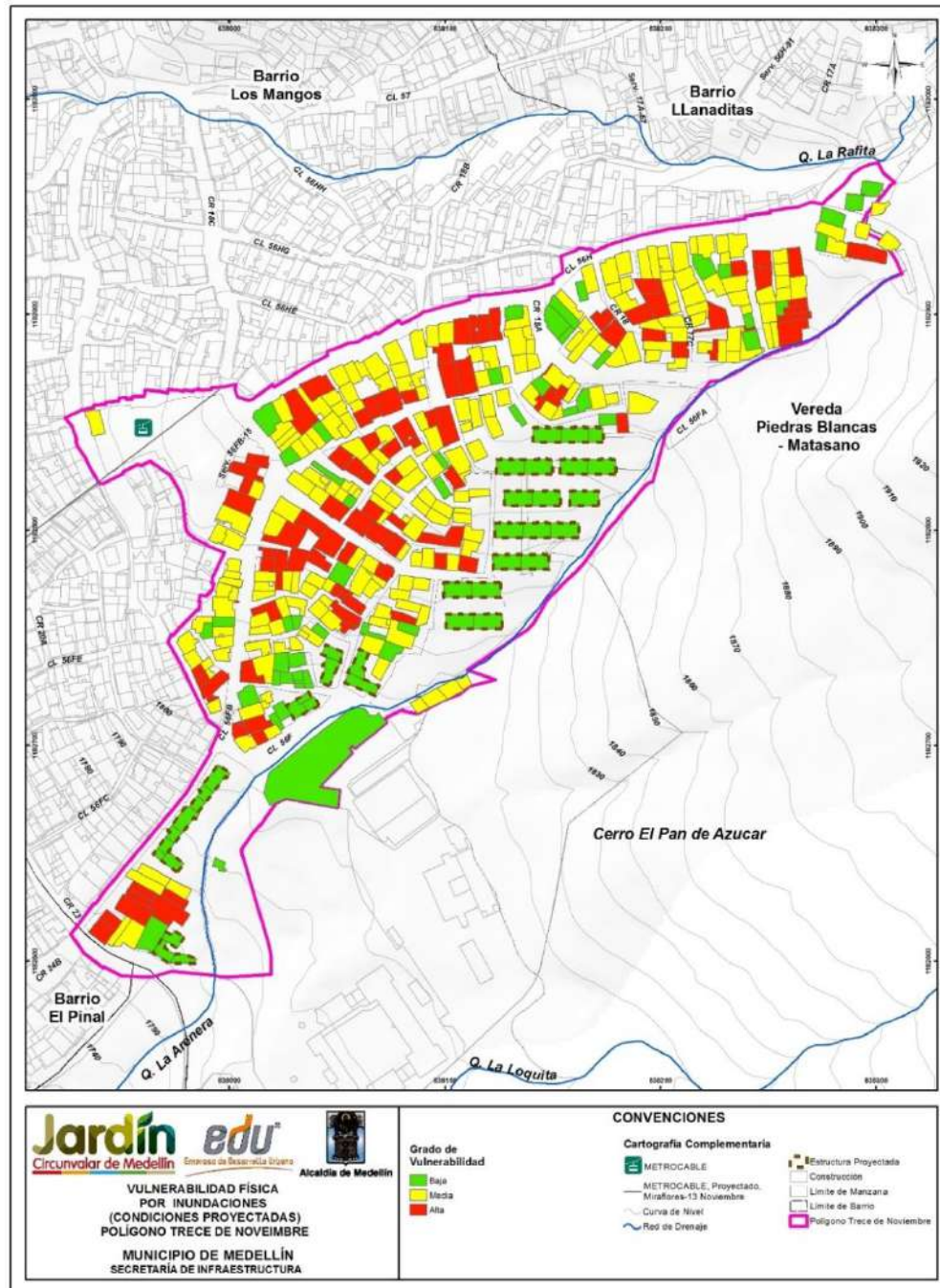
**Mapa 58. Localización espacial de la altura de las estructura para inundaciones en el
Polígono Trece de Noviembre**
(33_TDNAIlturadelaConstrucción_Medellin_C y 33_TDNAIlturadelaConstrucción_Medellin_T)



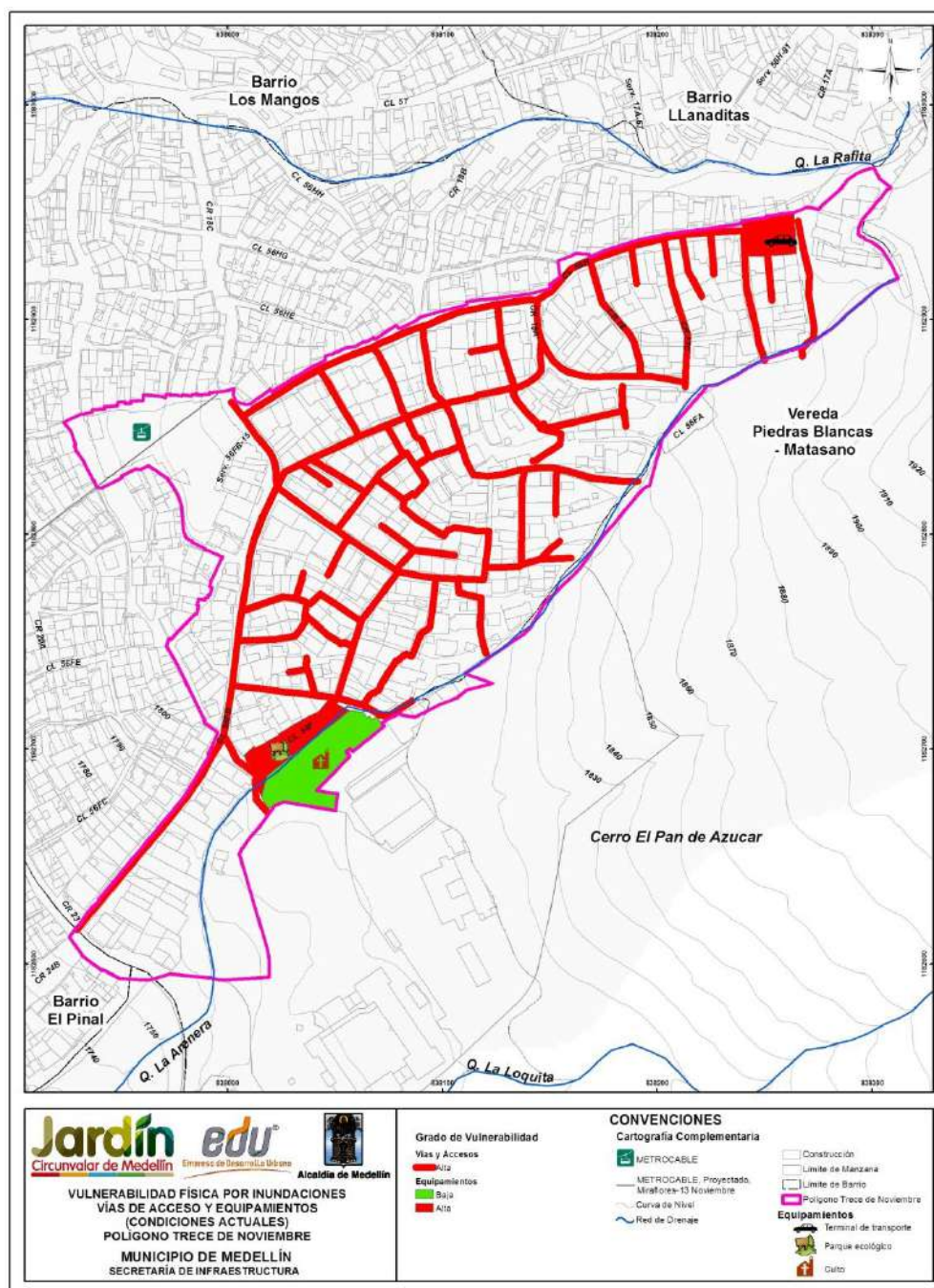
Mapa 59. Localización espacial de la densidad de población para inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre
(34_TDNDensidaddePoblacion_Medellin_C y 34_TDNDensidaddePoblacion_Medellin_T)



Mapa 60. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en condiciones en el Polígono Trece de Noviembre
(38_TDNVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_C y 38_TDNVulnerabilidadFisicaporInundaciones_Medellin_T)



Mapa 61. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre con el nuevo Proyecto Barrios Sostenibles (TDNVulnerabilidadFisicaporInundacionesProyecto_Medellin_C)



Mapa 62. Análisis de vulnerabilidad física ante inundaciones en el Polígono Trece de Noviembre para las Vías de Acceso y Equipamientos
(46_TDNVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C y
46_TDNVulnerabilidadInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_T)

16.4 SOPORTE FOTOGRÁFICO

En la Tabla 74 se presenta el registro fotográfico para las zonas en las que se dividió el Polígono Trece de Noviembre.

Tabla 74. Registro fotográfico en el Trece de Noviembre



Zona 1



Zona 2



Zona 3

Tabla 74. Registro fotográfico en el Trece de Noviembre



Zona 4



Zona 5



Zona 6



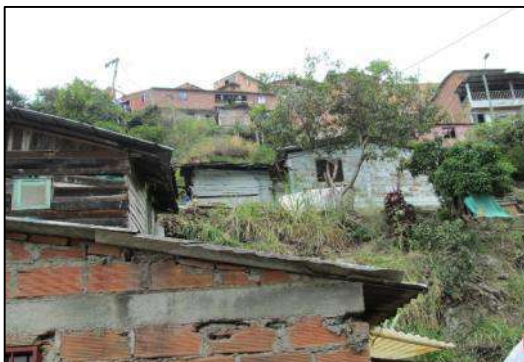
	<p align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	--	---

Tabla 74. Registro fotográfico en el Trece de Noviembre



Zona 7



Zona 8



Zona 9



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

Tabla 74. Registro fotográfico en el Trece de Noviembre



Zona 10



Zona 11



Zona 12



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

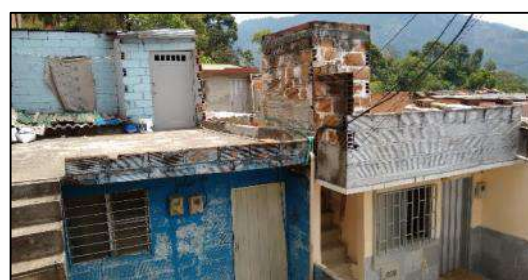
Tabla 74. Registro fotográfico en el Trece de Noviembre



Zona 13



Zona 15



Zona 16



Zona 17



 <p>edu[®] Empresa de Desarrollo Urbano</p>	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	 <p>edu[®] Empresa de Desarrollo Urbano</p>
---	---	---



Tabla 74. Registro fotográfico en el Trece de Noviembre



Zona 18



Zona 19

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

17. RIESGO POR MOVIMIENTO 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 por lo tanto se hace necesario su estimación cuantitativa que permitan 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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Donde, R es el riesgo específico o grado de pérdidas esperadas debido a una amenaza de magnitud o intensidad (H_i), 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.

$P(H_i)$ es la amenaza o probabilidad de ocurrencia de un movimiento en masa, inundación u avenida torrencial, con una magnitud o intensidad específica (H_i) 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 (H_i) expresada en una escala entre 0 y 1 como en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa.

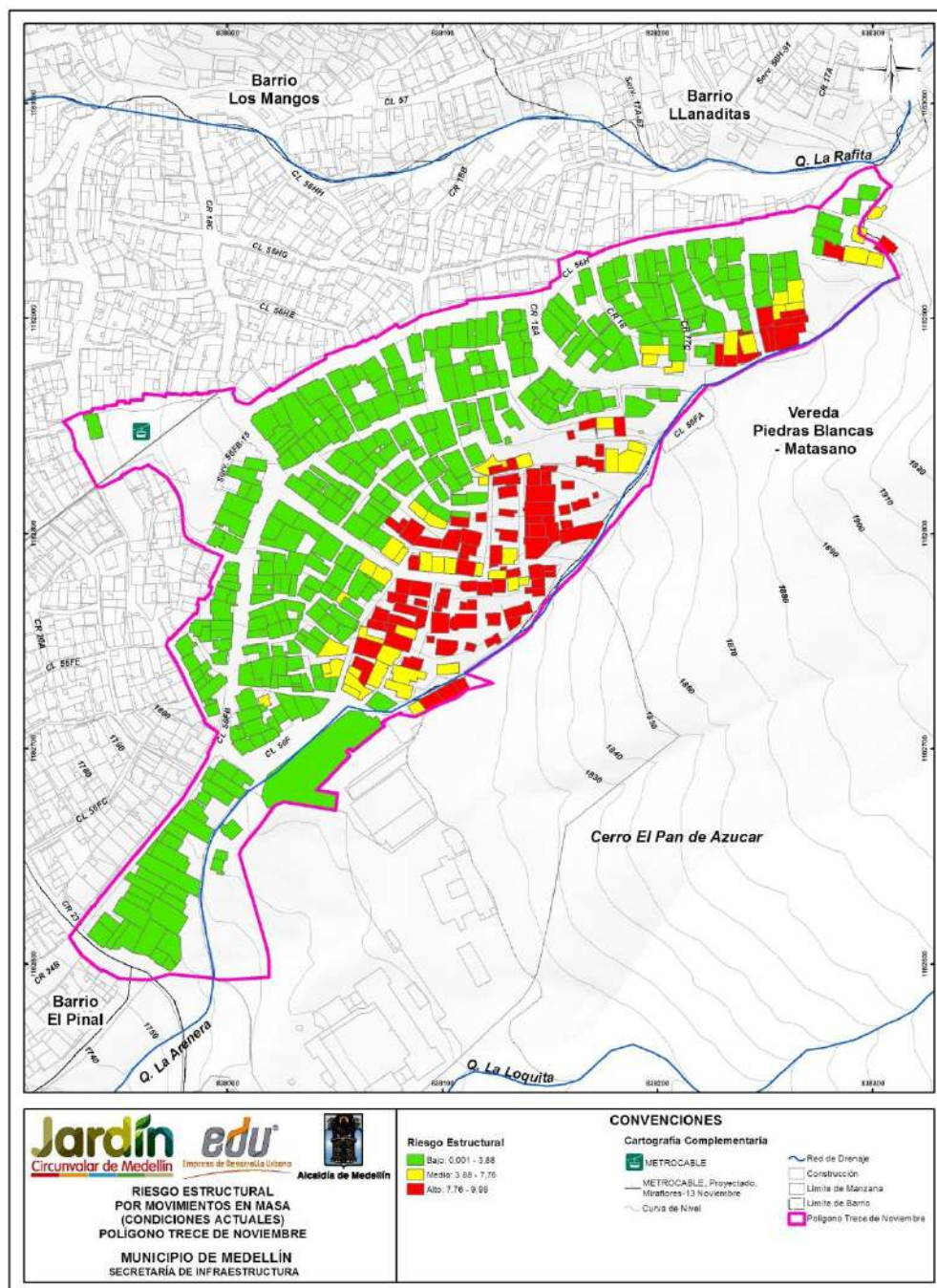
E es el valor total o costo de los elementos físicos expuestos o amenazados por la amenaza; para el caso de personas.

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 pérdidas, 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.

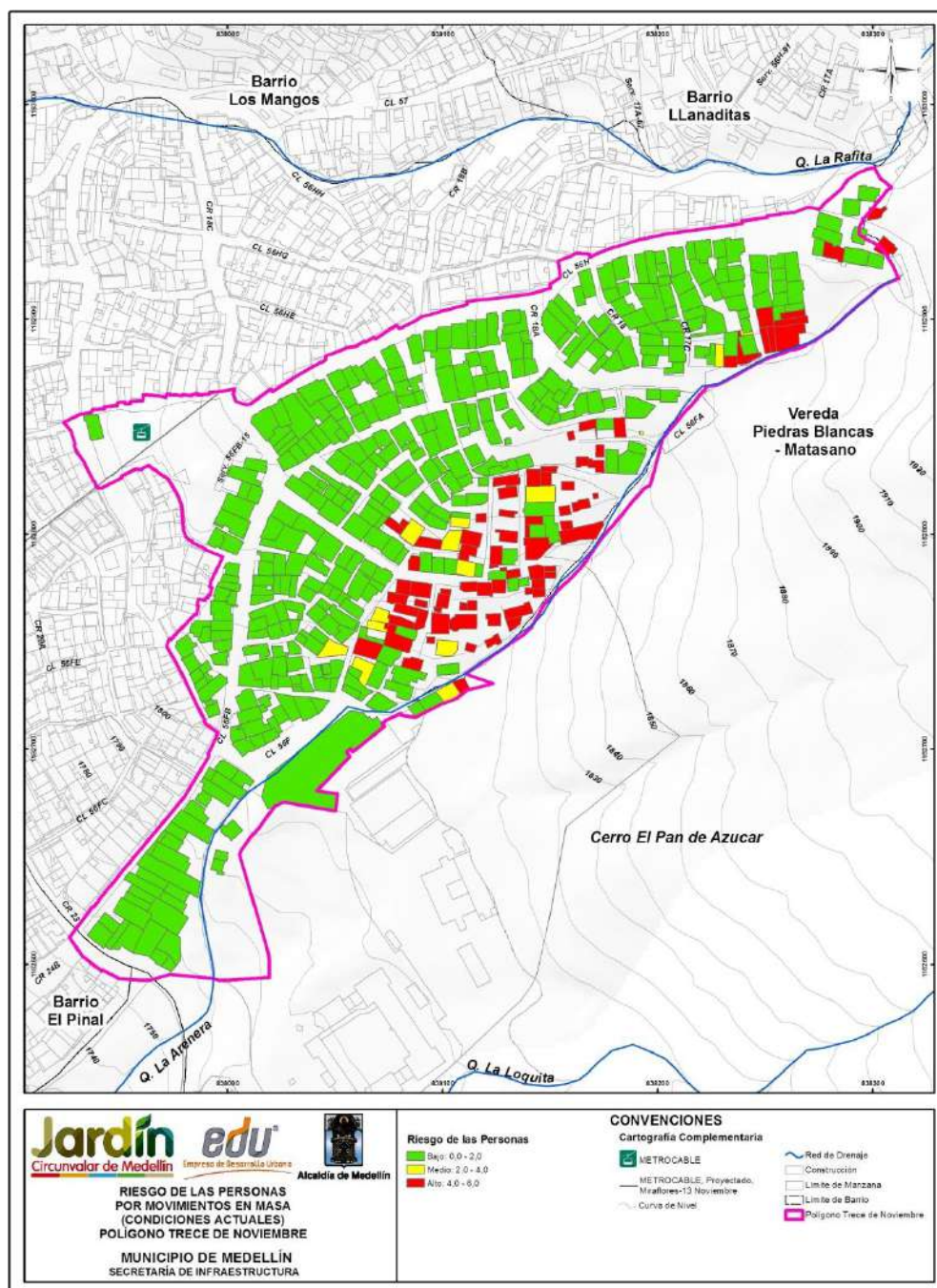
17.3 RESULTADOS

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años (Mapa 39), donde se consigna la probabilidad de falla total considerando la variabilidad de los parámetros y la actuación del sismo en 50 años. También se tuvieron en cuenta los mapas de vulnerabilidad estructural y de personas analizados en el Numeral 16.2.4.

En el Mapa 63 y el Mapa 64 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 65 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 importante de viviendas en el costado oriental del polígono con riesgo alto.

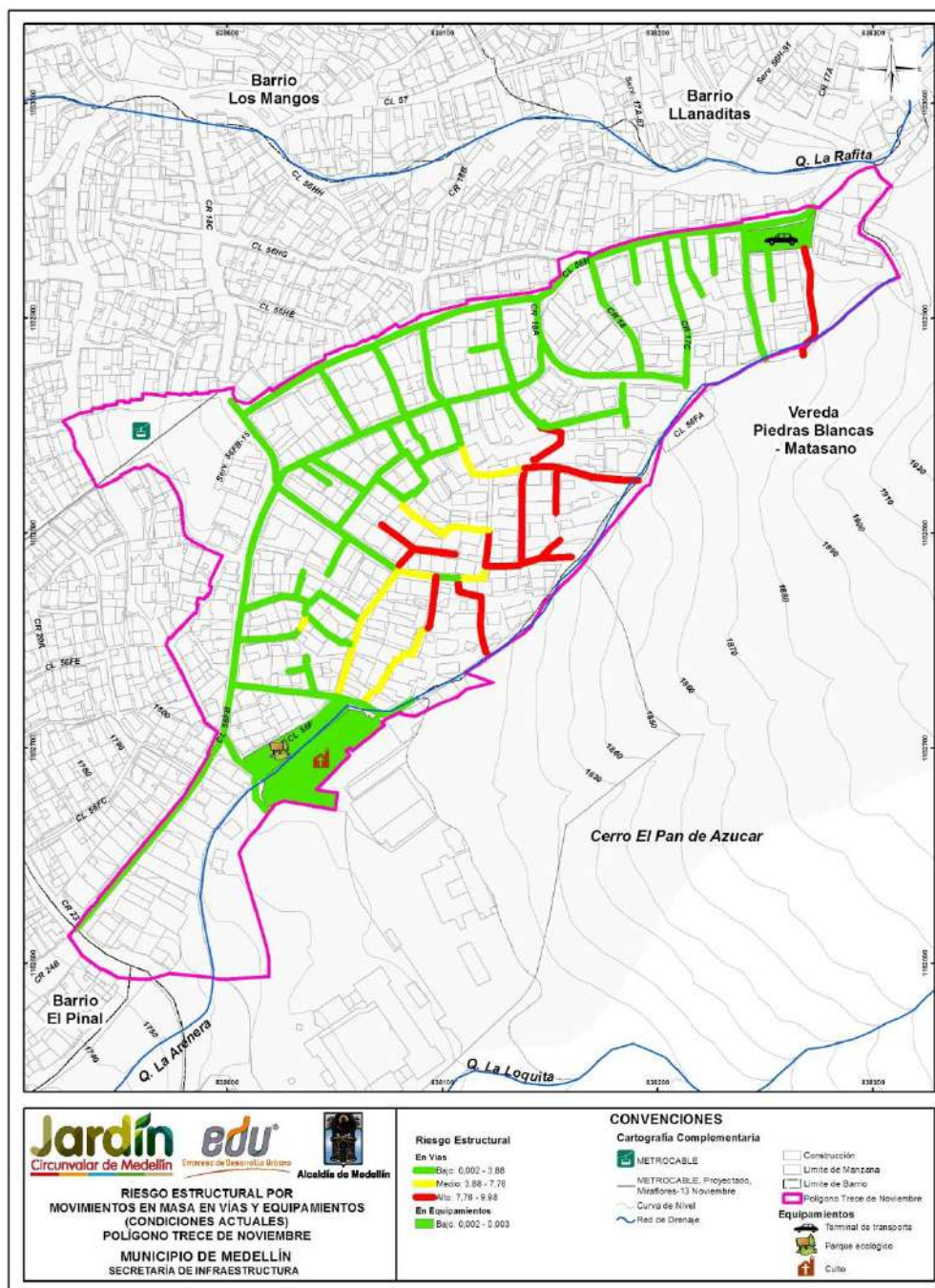


Mapa 63. Análisis de riesgo estructural de viviendas y construcciones por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(39_TDNRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_C y 39_TDNRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_Medellin_T)



Mapa 64. Análisis de riesgo de las personas por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre

(40_TDN Riesgo Personas Movimientos en Masa_Medellin_C y
40_TDN Riesgo Personas Movimientos en Masa_Medellin_T)



Mapa 65. Análisis de riesgo estructural de vías de acceso y equipamientos por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre
(47_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_ViasEquipamientos_Medellin_C y
47_SATRiesgoEstructuralMovimientosenMasa_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 con base 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 75. 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

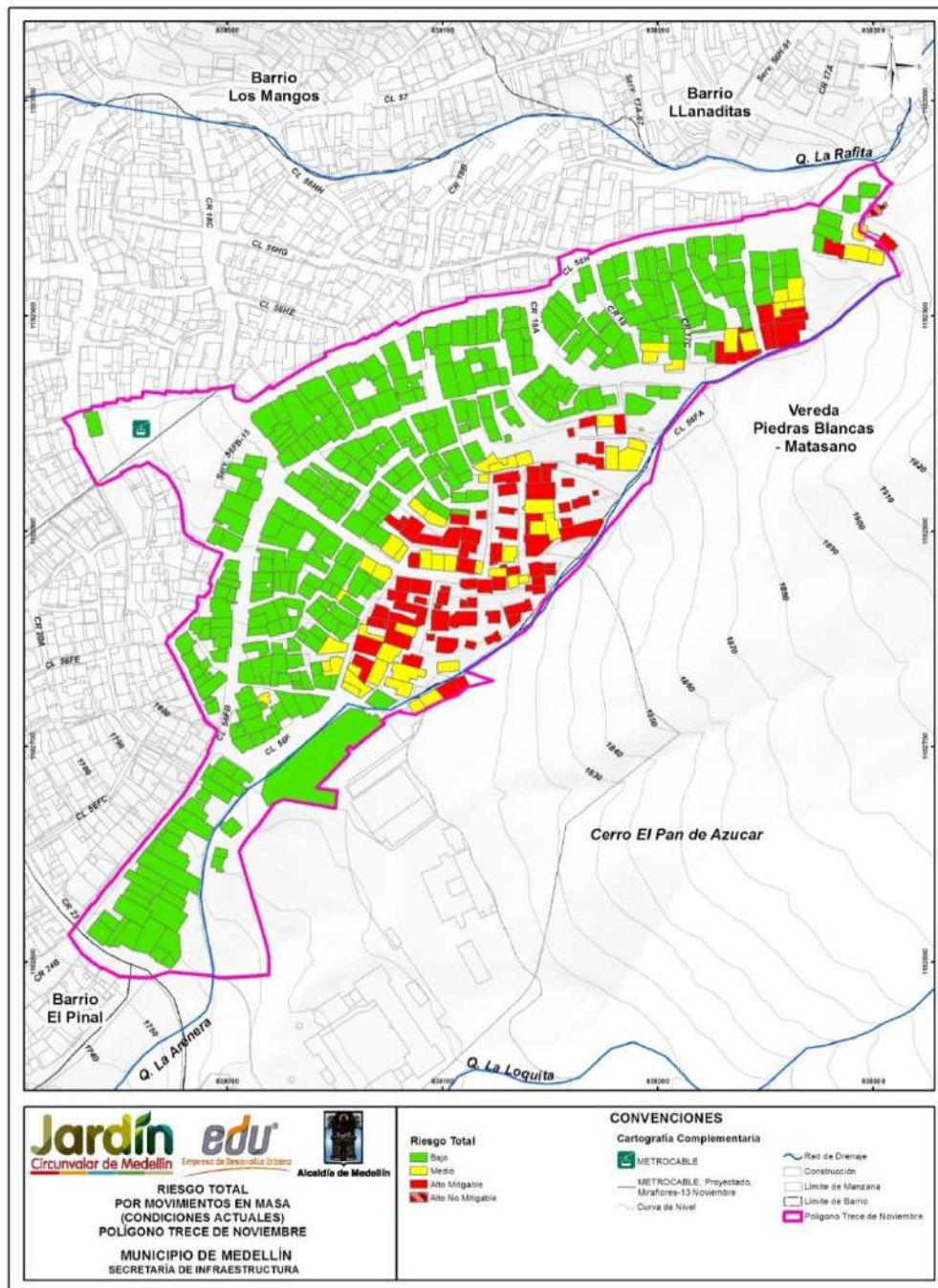
Fue posible categorizar el riesgo en un solo mapa entre bajo, medio y alto donde la descripción de cada categoría se indica en la Tabla 76.

Tabla 76. 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 lo que corresponde a riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. Cuando los costos de reubicación de asentamientos e infraestructura excedan 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 66 de este informe, se presenta finalmente la clasificación del riesgo considerando incluso la subcategorización de riesgo alto mitigable y no mitigable. Se muestra que de las 481 estructuras, 336 presentan un riesgo bajo ante movimientos en masa (70%), 55 presentan riesgo medio ante movimientos en masa (11%) y 90 presentan riesgo alto ante movimientos en masa (19%), de las cuales sólo una estructura fue clasificada en riesgo alto no mitigable.





Mapa 66. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones actuales en el Polígono Trece de Noviembre
(41_TDNRiesgoTotalMovimientosenMasa_Medellin_C y
41_TDNRiesgoTotalMovimientosenMasa_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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

En la Tabla 77 se presenta la descripción de cada una de las estructuras que presentan riesgo alto no mitigable ante movimientos en masa.

Tabla 77. Inventario de las estructuras en alto riesgo No Mitigable por movimientos en masa en el Polígono Trece de Noviembre

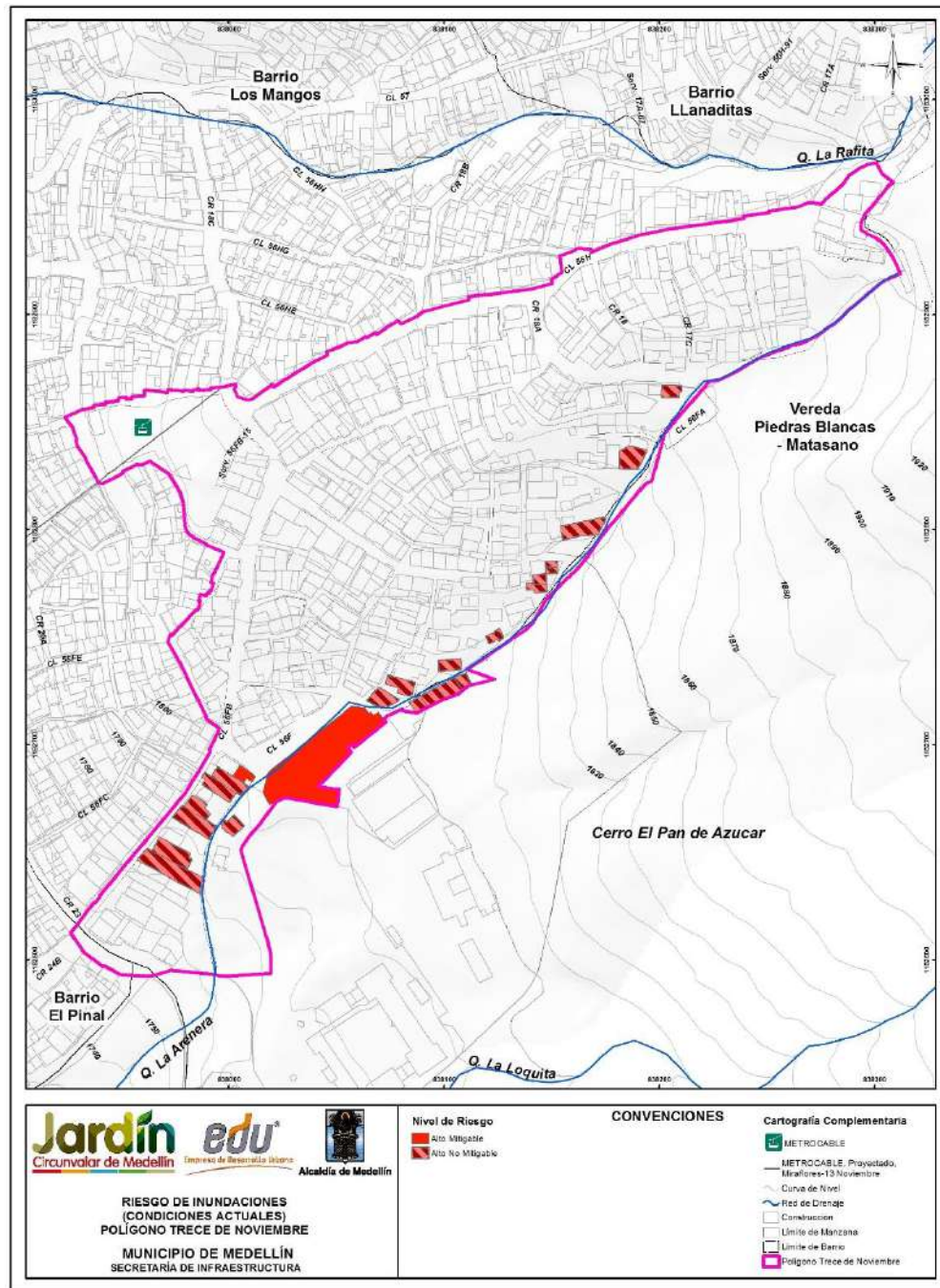
Estructura	COBAMA	Dirección	Ocupación	Tipo	Fundación	Estado	Altura
457	9008003	Sin dirección	Residencial	Ligera	<2 m	Mala	Un piso

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

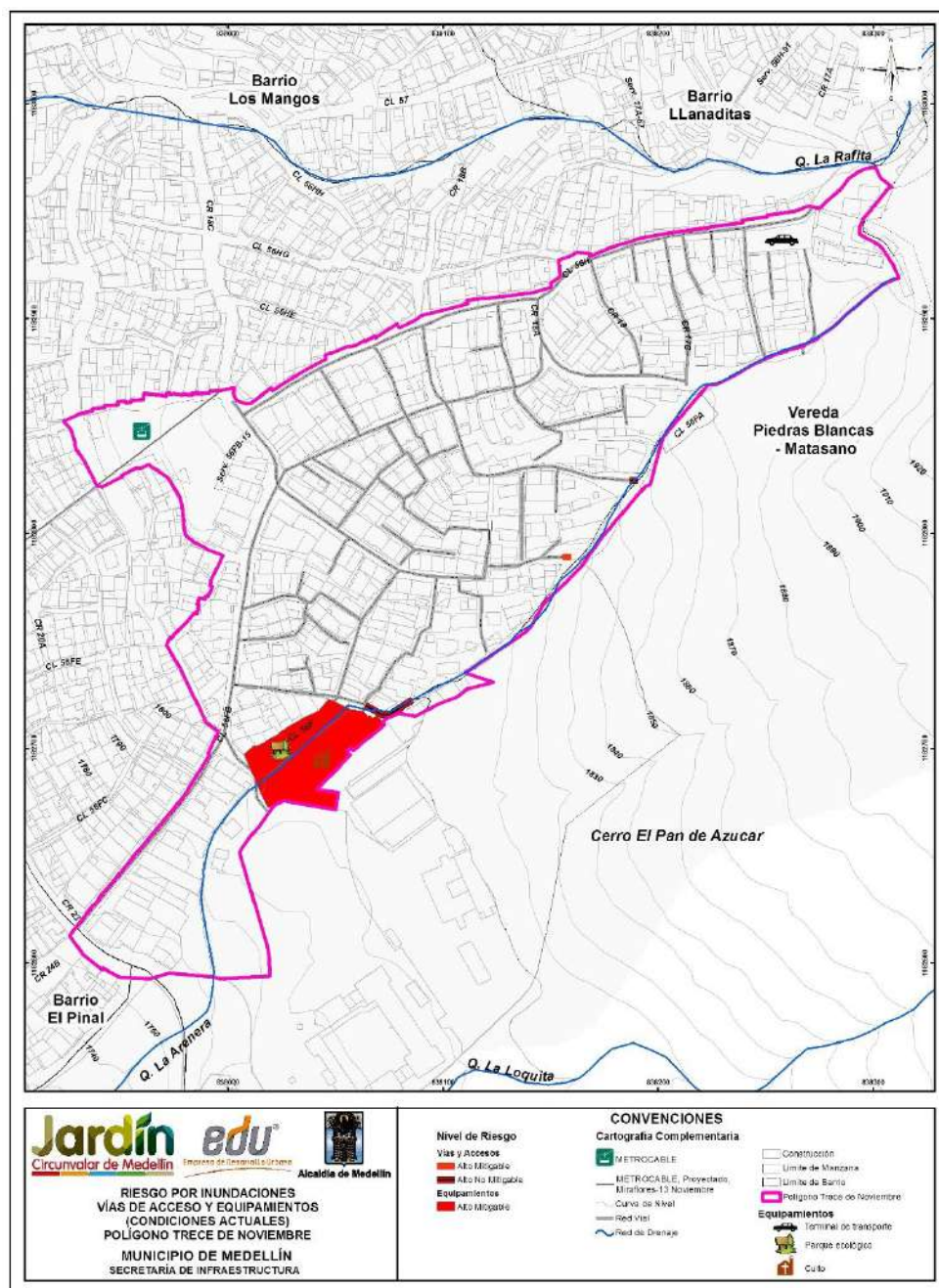
En particular para el Polígono de estudio, los resultados de la evaluación del riesgo indican que diversas viviendas aledañas al cauce de la quebrada La Arenera presentan Riesgo Alto No Mitigable por Inundaciones por estar ubicadas en zona de amenaza alta ante este tipo de fenómenos. Por su parte, la estructura correspondiente a la Iglesia del sector presenta Riesgo Alto Mitigable dado que está ubicada en zona que se ve afectada por vertimientos generados por insuficiencia de una obra hidráulica existente (la estructura “Est. 2”).

De igual manera, en el Mapa 68 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 la quebrada La Arenera, intersecta 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 alto riesgo por inundaciones al interior del Polígono Trece de Noviembre corresponden todas a corredores peatonales y no a vías vehiculares. También, se puede observar que algunas estructuras asociadas a Equipamiento se encuentran en riesgo alto, debido a la incapacidad de la cobertura existente, la cual se genera un control aguas arriba de esta obra, generando un vertimiento hacia el parque y la iglesia.



De acuerdo con lo expuesto en el Numeral 15.4, en el polígono de estudio no se presenta riesgo por avenidas torrenciales.



Mapa 67. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Trece de Noviembre para las viviendas y construcciones
 (43_TDN Riesgo Inundaciones_Medellin_C y 43_TDN Riesgo Inundaciones_Medellin_T)



Mapa 68. Riesgo por inundaciones en condiciones actuales en el Polígono Trece de Noviembre para las vías de acceso y equipamientos
(48_SATRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_Medellin_C y
48_SATRiesgoInundacionAccesosEquipamientos_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 TRECE DE NOVIEMBRE</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 Trece de Noviembre. Para llevar a cabo este análisis, se superpusieron dichas redes, según información entregada por la EDU a el proyecto, 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.

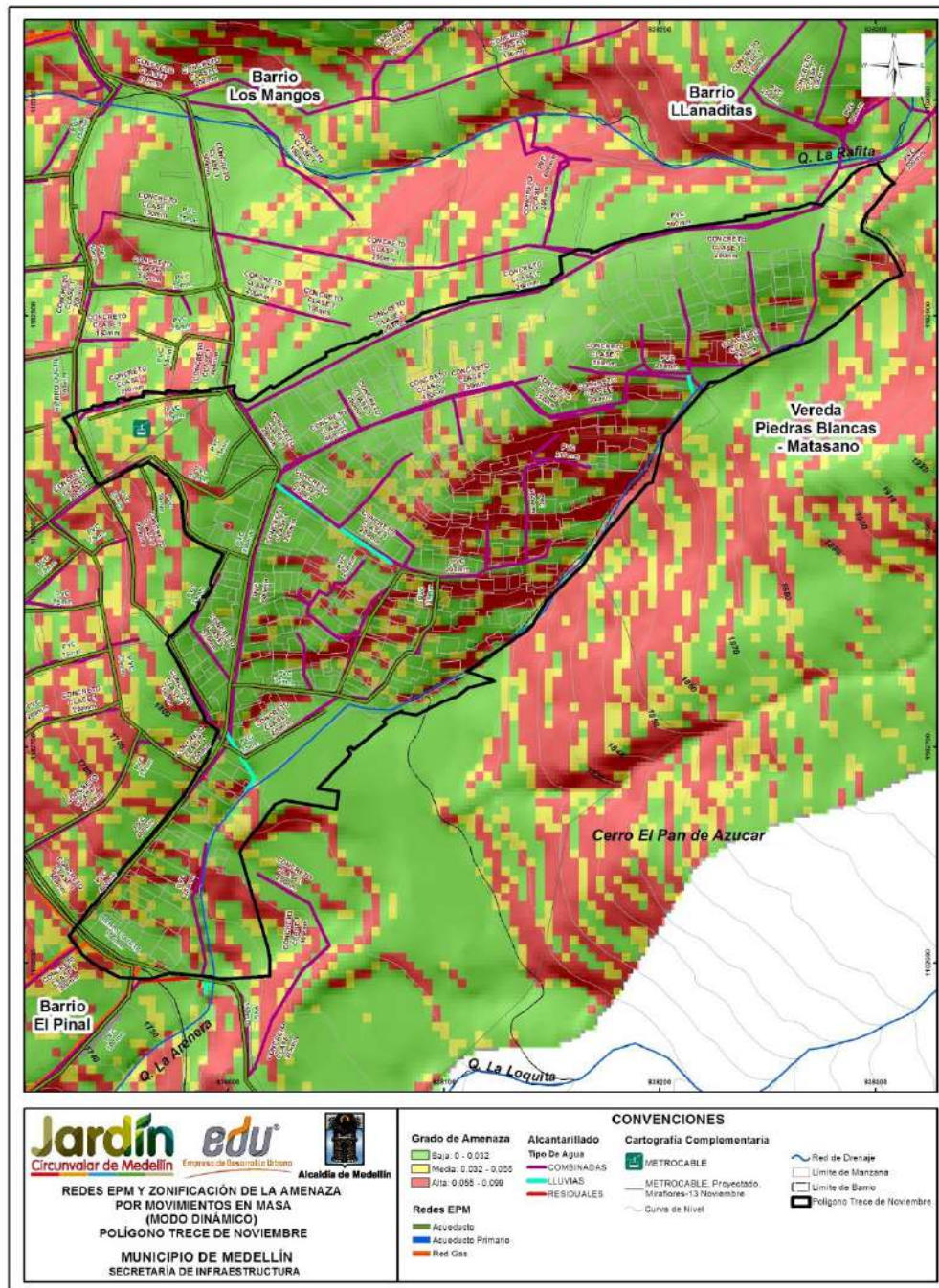
19.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES EXISTENTES

En el Polígono Trece de Noviembre se presenta cobertura de redes de acueducto y de alcantarillado de Empresas Públicas de Medellín (EPM), tal como puede observarse en la Mapa 69 o en el Mapa 70. En relación con la red de alcantarillado, ésta se extiende desde la parte sur hasta la parte norte del polígono, y desde el oriente hasta el occidente. Casi la totalidad de las líneas de alcantarillado corresponden al tipo combinado, en concreto, con diámetros entre 150 mm y 600 mm, siendo más común los diámetros menores que 250 mm. En relación con la red de acueducto, ésta presenta cobertura únicamente hacia el costado sur occidental, en la parte baja del polígono. Casi la totalidad de las líneas de acueducto son de material policloruro de vinilo (PVC), con diámetros que oscilan entre 50 mm y 200 mm, prevaleciendo las de diámetro de 75 mm. En relación con las redes de gas, este polígono no cuenta con cobertura de este tipo de redes por parte de EPM.



Con la finalidad de detectar si existen otras redes de servicios públicos diferentes a las de EPM, se superpuso el levantamiento topográfico realizado por La EDU con la información de las redes de EPM. Este ejercicio permitió concluir que todas las redes que presenta la información de topografía de La EDU corresponden a las de EPM. Sin embargo, no se descarta la existencia de líneas de tuberías o mangueras instaladas por la comunidad para el suministro de agua hacia la parte alta del polígono, las cuales quedan por fuera del alcance general del presente estudio.

19.2 SUPERPOSICIÓN EN MAPAS DE AMENAZA

En el Mapa 39 se presenta la zonificación de la amenaza total 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 69 se presenta este mismo pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes.

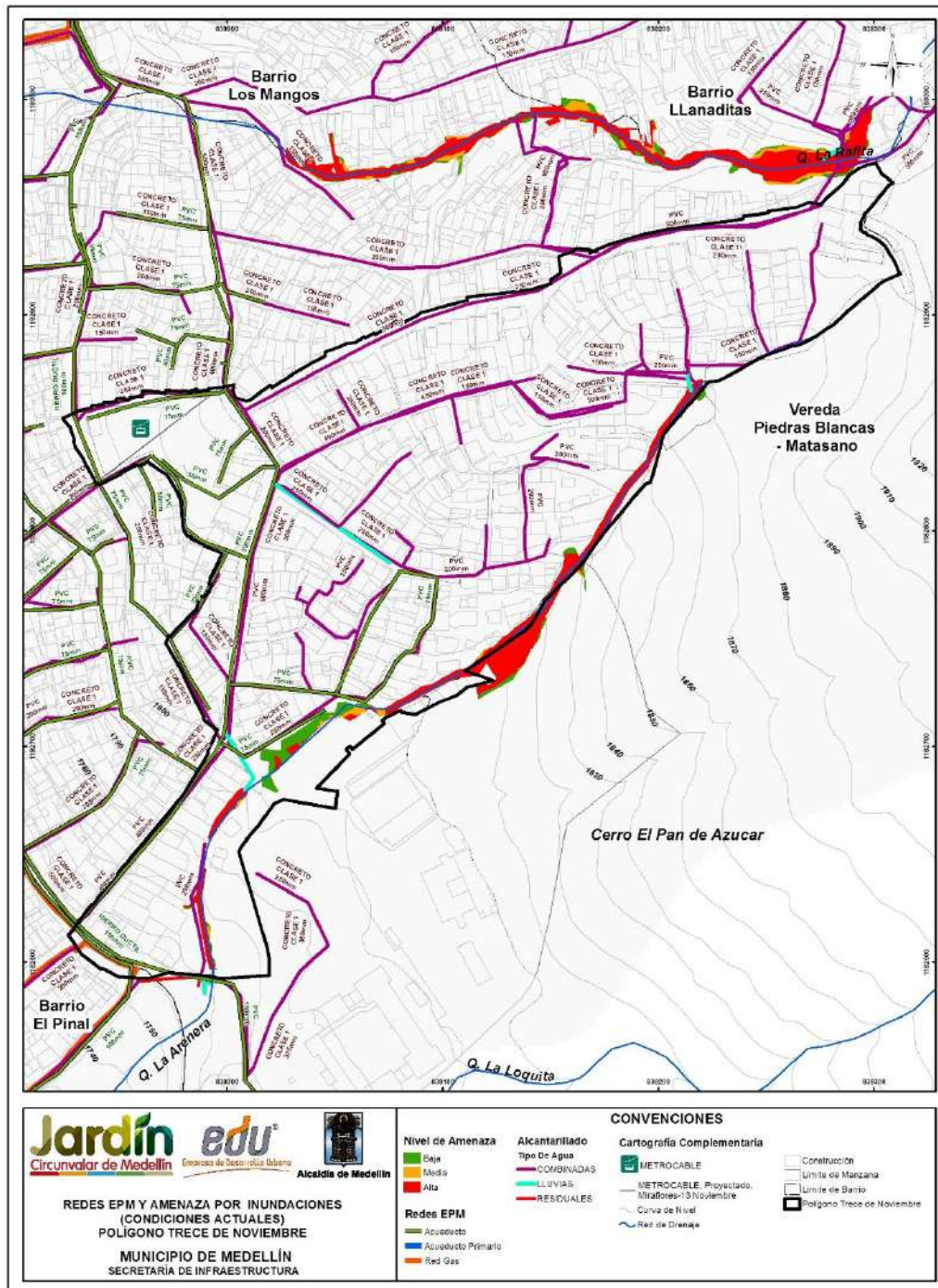


Mapa 69. Redes de servicios públicos sobre mapa de zonificación de la amenaza total por movimientos en masa proyectado para 50 años considerando la variabilidad de los parámetros y la acción del sismo de 0.25g (TDNRedesEPMYAmenazaMovimientosenMasa_Medellin_C)



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

La superposición efectuada sobre el mapa de amenaza por movimiento en masa, mostrada en la Mapa 69, permite ver diferenciadas las redes de acueducto, alcantarillado y gas sobre el mapa de amenaza total por movimiento en masa proyectado 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 solamente los tramos de redes ubicados al costado centro occidental del polígono entre las cotas 1820 msnm y 1860 msnm. Se trata de redes de aguas combinadas construidas con tuberías en policloruro de vinilo (PVC) con diámetro de 200 mm.

En el Mapa 40 y en el Mapa 73 se presentan los análisis de amenaza por inundaciones en condiciones actuales y proyectadas, respectivamente, para las Quebradas La Rafita y La Arenera del Polígono Trece de Noviembre. En la Mapa 70 se presenta este mismo pero sobre él se han superpuesto las redes de servicios públicos diferenciándose con las debidas convenciones los diferentes tipos de redes.



**Mapa 70. Superposición de redes de servicio público sobre la amenaza por inundaciones.
(TDNRedesEPM_Medellin_C)**

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

En el Capítulo 15 se demostró que el Polígono Trece de Noviembre 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 la Mapa 70, permite determinar que más del 90% de las redes de servicios públicos existentes al interior del Polígono Trece de Noviembre se encuentran por fuera de las zonas de amenaza por inundaciones. Sin embargo, también muestra algunas zonas puntuales donde se intersecta la mancha de inundación con algún o algunos tramos de las redes. En relación con la red de alcantarillado, se presenta intersección de la mancha de amenaza con las descargas de los aliviaderos de la red hacia la Quebrada La Arenera, lo cual es una situación típica y normal en las descargas de estos elementos por su inevitable cercanía puntual a las fuentes hídricas. Adicionalmente, en la parte baja del polígono, cerca de la cota 1770 msnm, se presenta un tramo de alcantarillado que corre paralelo a la Quebrada La Arenera, por su margen derecha, a lo largo de unos 20 m aproximadamente, que es intersectada también por una zona de amenaza alta por inundaciones. En relación con la red de acueducto, la totalidad de las líneas se encuentran fuera de las zonas de amenaza por inundaciones.

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 se han encontrado tuberías en concreto no reforzado, concreto reforzado y en policloruro de vinilo (PVC), y para el acueducto en policloruro de vinilo (PVC) y en HD. Algunas características de estas tuberías son mostradas a continuación:

19.3.1 Tubería en concreto no reforzado (Clase 1 y Clase 2)

Son tubos de concreto sin refuerzo, de sección circular y son utilizados en la conducción de aguas lluvias, de aguas negras y de residuos líquidos industriales, para drenajes de vías y en general, como conductos no sometidos a presión hidrostática interna. Dependiendo de la resistencia del concreto, la tubería se clasifica en Tipo 1 y en Tipo 2. Estas tuberías son fabricadas bajo las especificaciones descritas en la Norma Técnica Colombiana NTC 1022 (2014).

19.3.2 Tubería en concreto reforzado (Clase I y Clase III)

Es una tubería prefabricada con una mezcla de concreto cuya resistencia a la compresión es de 350 kg/cm², reforzada con acero grafilado enrollado helicoidalmente, en forma continua y cuya rigidez se logra con un número suficiente de varillas longitudinales, soldadas eléctricamente al refuerzo principal. La tubería de concreto reforzado se fabrica y clasifica de acuerdo con su resistencia en Clase I, Clase II, Clase III, Clase IV y Clase V. Estas tuberías son fabricadas bajo las especificaciones descritas en la Norma Técnica Colombiana NTC 401 (2009).

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Las uniones de las tuberías de concreto no reforzado y las de concreto reforzado son uniones de espigo-campana con empaque de caucho.

Las tuberías de concreto son tuberías clasificadas como tuberías rígidas, cuya sección transversal no se puede distorsionar, sin causar colapso.

19.3.3 Tubería en hierro dúctil (HD)

Es una tubería antigua que se instaló hasta finales de la década de 1970 fabricada con acero sin recubrimiento. El ángulo máximo de deflexión de las campanas es de 5°.

19.3.4 Tubería en Policloruro de Vinilo (PVC)

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.

19.3.5 Vulnerabilidad de los diferentes tipos de redes



Según la descripción anterior, las conexiones de las tuberías de concreto sin refuerzo y con refuerzo, las HD y las 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 ubicadas justo en las zonas de amenaza alta por deslizamiento es también alto. En esta misma zona, se tiene un número importante de viviendas en riesgo alto, las cuales serán retiradas como parte del Proyecto Barrios Sostenibles, el cual implica además que se requerirá redefinición de las redes de esta zona como parte integral de dicho proyecto.

Hacia el costado noroccidental del polígono, la amenaza por movimientos en masa es baja a media. No obstante, se tiene un número importante de viviendas en riesgo alto, sin que ello implique riesgo para las redes del mismo sector, consistentes en redes de aguas combinadas construidas con tuberías de concreto con diámetro de 150 mm. Este resultado se debe a que el riesgo alto de las viviendas tiene que ver con el hecho de que ellas se ven afectadas por impactos producto de deslizamientos en zonas ubicadas por fuera del polígono.

En relación con el riesgo de las redes de servicios públicos por inundaciones, en los apartados anteriores se concluyó que más del 90% de las redes de servicios se encuentran fuera de la zona de amenaza, por lo que es posible afirmar también que en la misma proporción estas redes se encuentran fuera de riesgo por inundaciones.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

Específicamente, la red de acueducto al interior del polígono se encuentra en su totalidad fuera de riesgo por inundaciones. Algunos tramos puntuales de la red de alcantarillado combinado presentan riesgo alto ante este fenómeno dado que se encuentran ubicadas en cercanías al cauce de la Quebrada La Arenera, como por ejemplo el tramo de 20 m de longitud (aproximadamente) en PVC de 250 mm, ubicado cerca de la cota 1770 msnm sobre la margen derecha de la quebrada, en la parte baja y suroccidental del polígono. Este riesgo alto por inundaciones en el caso de este polígono significa que los tramos afectados podrían trabajar en condiciones sumergidas durante el tiempo de ocurrencia de la creciente, pero dada la existencia de la canalización en el cauce de la quebrada, este riesgo alto no significa falla estructural de las tuberías.

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

20. PLANTEAMIENTO DE OBRAS DE MITIGACIÓN

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 en el Anexo 07 de 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.

20.1 OBRAS PARA RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA

Para la evaluación del riesgo por movimientos en masa se dividió el Polígono Trece de Noviembre en dos zonas, alta (Zona 1) y media (Zona 2).

La Zona 1 del Polígono Trece de Noviembre se localiza en la parte alta de dicho polígono, cerca al sitio conocido como El Plan. En esta zona se localizan actualmente 18 estructuras, las cuales presentan un alto riesgo frente a un evento de movimiento en masa. Al interior de esta zona no se tiene ninguna estructura perteneciente al denominado Proyecto Barrios Sostenibles. El riesgo se debe principalmente al hecho de que las estructuras se encuentran amenazadas por el impacto de movimientos en masa localizados en la parte media y alta de la ladera, margen izquierda de la Quebrada La Arenera. Estos movimientos en masa pueden corresponder a desprendimientos de tierra o fragmentos de roca (flujos de detritos) que ruedan como consecuencia de la erosión. Se han planteado tres alternativas de solución, correspondientes a:

- ✓ Protección con “soil nailing” de la zona potencialmente inestable.
- ✓ Construcción de una pantalla para retención de los materiales susceptibles de ser movilizados.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ Reconformación del terreno por medio de un terraceo.

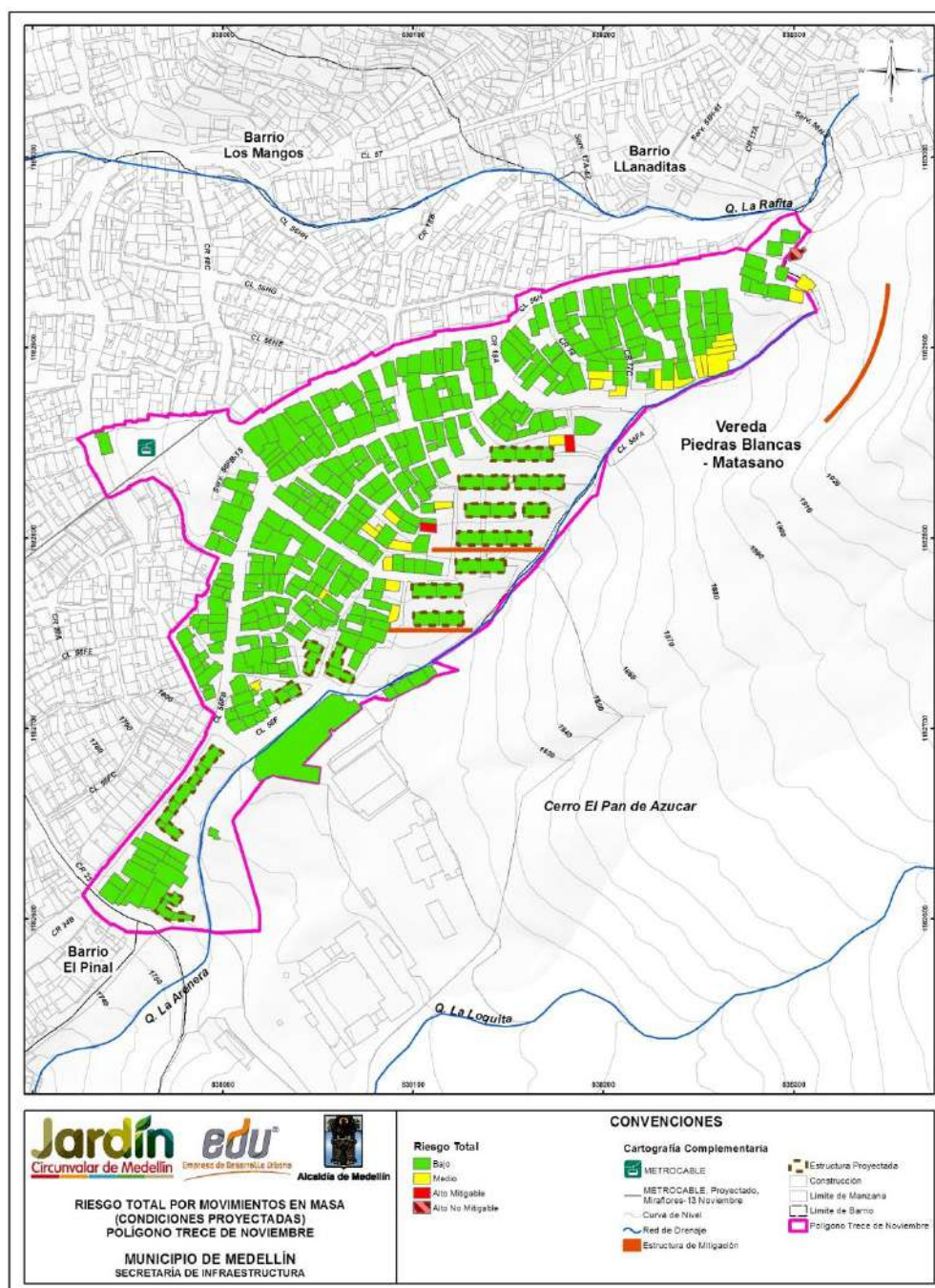
Las evaluaciones detalladas efectuadas, permiten concluir que la mejor alternativa de solución es la pantalla de protección. Lo anterior debido a que es una alternativa de fácil implementación y de poco impacto social y ambiental, además porque funciona como medida de mitigación y alerta tanto para pequeños como grandes desprendimientos de materiales desde el foco de inestabilidad. Ofrece facilidad constructiva, menor costo a largo plazo y menor afectación en la zona. Para esta alternativa se recomienda que se realice mantenimiento con la periodicidad necesaria, de tal manera que no se presente acumulación del material desprendido en la ladera.

La Zona 2 se localiza en la parte media del polígono, cerca del Colegio Sol de Oriente. En esta zona se localizan actualmente 85 estructuras, las cuales presentan alto riesgo frente a un evento de movimiento en masa. Al interior se localizarán las Estructuras E05 y E06 de la Fase 1 y las Estructuras E07 a E11 de la Fase 2 del Proyecto Barrios Sostenible, en general el riesgo para las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles es bajo. El riesgo se debe principalmente al hecho de que las estructuras se encuentran amenazadas por estar al interior de una masa inestable localizada sobre la margen derecha e izquierda de la Quebrada La Arenera. Se plantearon dos alternativas, correspondientes a:

- ✓ Dos muros pantallas conformados con pilas y muro tabique uniéndolas
- ✓ Dos muros en voladizo apoyado sobre pilas profundas.

Igual que en el caso de la Zona 1, se hicieron análisis detallados que permiten concluir que la mejor alternativa es la de muros pantallas conformados con pilas y muro tabique uniéndolas, ya que ofrecen condiciones de estabilidad y facilidades constructivas en comparación con la alternativa de muro en voladizo no ofrece.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó un análisis general del riesgo con las condiciones proyectadas considerando las estructuras de Barrios Sostenibles y las respectivas obras de mitigación. Los resultados de este análisis se presentan en el Mapa 71. Las viviendas que se presentan en categoría de riesgo mitigable, son aquellas que se muestran atendidas por las obras de mitigación. Por otro lado, la vivienda que se presentan en alto riesgo no mitigable, ubicada en la parte norte del polígono, es una vivienda en mal estado que se localiza en una zona de amenaza alta y que no es afectada por la obra de mitigación recomendada en esta zona, por lo cual debería ser reubicada.



Mapa 71. Análisis de riesgo total de viviendas y construcciones por movimientos en masa para las condiciones proyectadas en el Polígono Trece de Noviembre
(42_TDNRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_C y
42_TDNRiesgoTotalMovimientosenMasaCondProyecto_Medellin_T)

Con el fin de monitorear y evaluar la efectividad de sistema de estabilización propuesto en la Zona 2, luego de efectuado el análisis de riesgo por movimientos en masa, se propone un sistema de instrumentación compuesto por dos inclinómetros, uno por cada pantalla construida. Se recomienda que el inclinómetro sea instalado en una de las pilas que componen cada pantalla, esto con la finalidad de monitorear los desplazamientos en la zona a largo plazo y poder establecer mecanismos de alarma. Además se recomienda una frecuencia de monitoreo mínimo de una lectura mensual durante el primer año después de construidas las pantallas, y dependiendo de los resultados de dicho monitoreo, si no se detectan desplazamientos considerables en la zona, se recomienda un monitoreo preventivo de tres (3) lecturas al año.

A seguir se presentan algunos aspectos generales sobre los inclinómetros:

Las deformaciones laterales del terreno, en lo que tiene que ver con magnitud, dirección y profundidad de los movimientos, se monitorean con ayuda de los inclinómetros. Estos equipos, se deberán instalar en las zonas donde se proyectan la construcción de las pilas de los muros pantallas recomendados. De esta forma se podrá evaluar el comportamiento de las pantallas después de efectuado las labores correspondientes.

Estos elementos consisten de una tubería ranurada diametralmente, la cual se instala dentro de una perforación efectuada en un terreno en el que se sospecha que están ocurriendo o pueden ocurrir movimientos (Figura 164). Adicionalmente, se debe contar con un torpedo, el cual se usa primero para medir la posición inicial de la tubería cuando acaba de ser instalada y luego para medir las posiciones sucesivas de la tubería cuando esta se va moviendo.



Figura 164. Tubería de inclinómetros ranurada diametralmente
(Tomada de Roctest y Telemac)

La función de la tubería es entonces proveer el acceso para el torpedo de lecturas. Las ranuras longitudinales marcadas en el interior de la tubería, controlan la orientación del torpedo y proveen una superficie desde la cual se pueden hacer lecturas repetibles.

Al instalar el inclinómetro se debe buscar que una de las ranuras quede en el mismo sentido en que se espera ocurra el movimiento, el cual se denomina convencionalmente Sentido A. Las ranuras ubicadas a 90° del Sentido A constituyen el denominado Sentido B y normalmente permiten controlar una orientación en la que no se esperan mayores movimientos.

Como se muestra en la Figura 165, se habla tanto del Sentido A+ como del Sentido A- y tanto del Sentido B+ como del Sentido B-. El Sentido A+ queda orientado hacia la dirección donde se espera que se den los mayores movimientos (pendiente abajo) y el Sentido A- en dirección contraria (pendiente arriba). Según esto, los Sentidos A-, B+ y B- se encuentran orientados hacia donde no se espera que se den mayores movimientos.

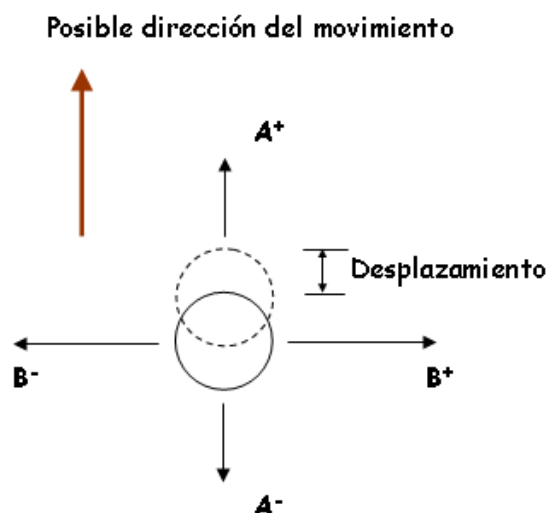


Figura 165. Disposición de los Sentidos A y B en los inclinómetros

Para mejor comprensión del lector, se presenta la Figura 166 con la localización de los inclinómetros. Además, con el estudio se presenta el Anexo 08 con las memorias de diseño de las obras de mitigación planteadas y el Anexo 09 con los Planos P-2445-TN-OM-01 al P-2445-TN-OM-03, en los que se presentan la localización y los detalles de las obras planteadas para la mitigación del riesgo por movimientos en masa en este polígono de estudio.

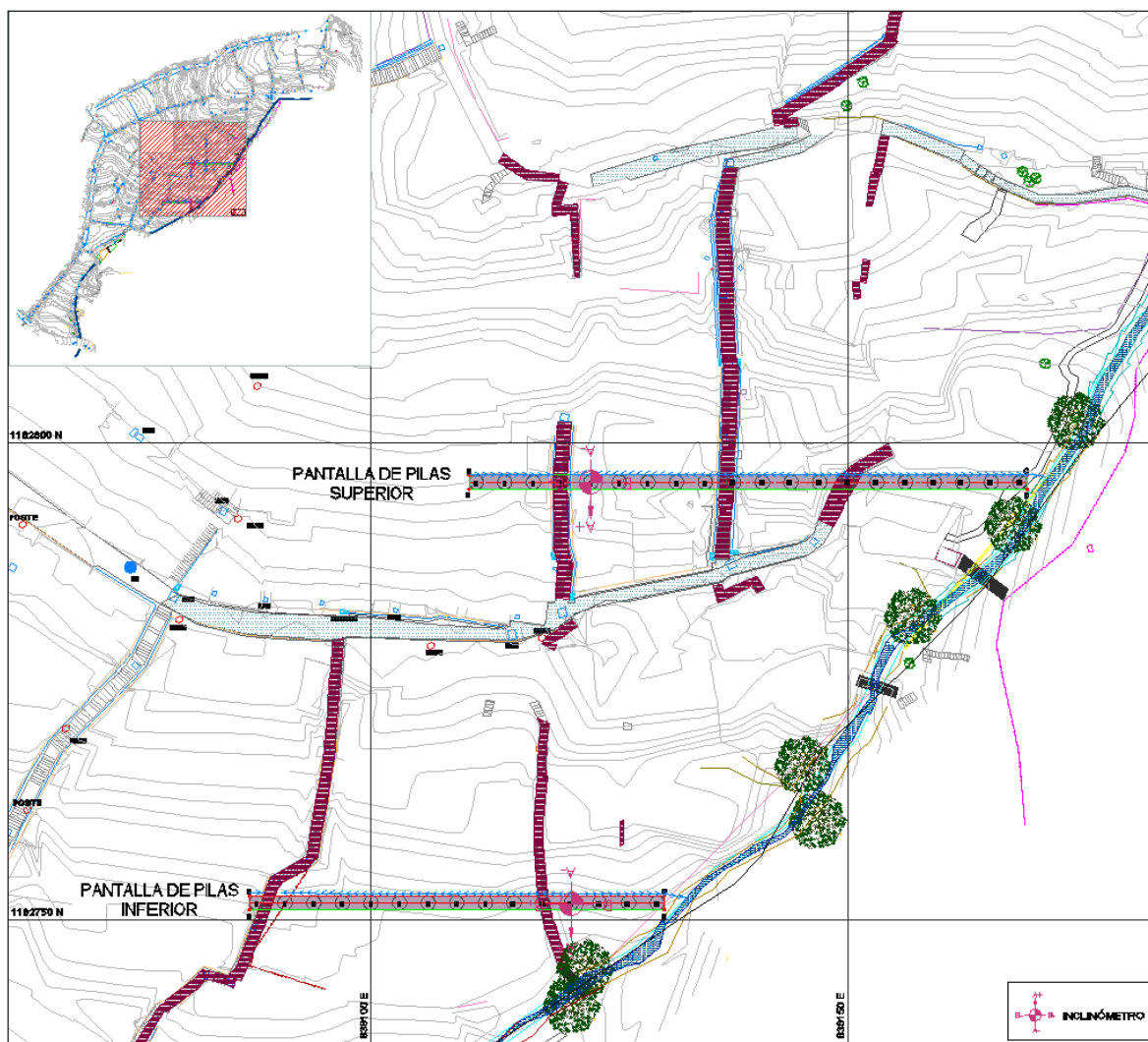




Figura 166. Localización de inclinómetros propuestos para monitoreo de obras de mitigación del Polígono Trece de Noviembre

20.2 OBRAS PARA RIESGO POR INUNDACIONES

20.2.1 Análisis de resultados en condiciones actuales y definición de obras

La denominada Estructura 2 sobre la Quebrada La Arenera, que corresponde a la cobertura que pasa cerca de la Iglesia y la escuela del sector, presenta problemas de capacidad hidráulica. Esta problemática se presenta a partir de un periodo de retorno comprendido entre 10 años y 50 años y genera una mancha que cubre parcialmente la zona de la plazoleta del atrio de la Iglesia Beato Domingo Iturrate. La causa de esta

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

problemática radica en la ausencia de una estructura de entrada adecuada que evite los desbordamientos y que garantice el flujo libre hacia el interior de la cobertura.

Para este sitio se plantean varias alternativas de solución, tratándose en todos los casos de soluciones enfocadas al mejoramiento de las condiciones hidráulicas en la entrada de la obra.

- ✓ Para este sitio crítico se recomienda como una primera alternativa de solución, la instalación de una estructura tipo cabezote con aletas al cual empalmará la futura extensión del canal existente aguas arriba.
- ✓ La segunda alternativa considerada es la instalación de un canal de transición entre la futura extensión del canal existente y el inicio de la cobertura.

Ambas alternativas permitirán controlar los vertimientos fuera del canal y garantizar un adecuado funcionamiento de la cobertura, eliminando la amenaza por inundaciones existente. Para la implementación de ambas alternativas se requiere el retiro de las viviendas aledañas a cada margen, las cuales actualmente se encuentran en riesgo alto no mitigable por inundaciones.

Finalmente se adoptó como obra de mitigación, la Alternativa 1 dado su menor costo y facilidad de construcción.

En relación con los puentes o pasos peatonales que presentan problemas en su gálibo, el Puente 7, en madera, se recomienda que sea retirado ya que una vez retiradas las viviendas a las que actualmente presta su servicio éste quedará sin funcionalidad. En relación con el Puente o Paso Peatonal 2, éste puede conservarse dado que su estructura en concreto es resistente y su condición hidráulica no significa ampliaciones importantes en la mancha y amenaza por inundación.

En relación con la Quebrada la Rafita, los resultados de amenaza indican que a pesar de presentar una problemática por insuficiencia hidráulica en la sección de la estructura de cruce sobre la vía del costado oriental del polígono, ésta no representa una amenaza para el Polígono Trece de Noviembre. Por tanto, no se incluye el diseño de esta estructura, pero se hace la recomendación a las autoridades competentes de ampliar su capacidad hidráulica con el fin de mejorar las condiciones en el barrio vecino.

En el Anexo 08 (Memorias de Diseño de Obras de Mitigación) se describen tanto las metodologías e hipótesis de las herramientas computacionales empleadas, así como los diferentes conceptos técnicos asociados al dimensionamiento de las obras proyectadas. En los Planos P-2445-TN-OM-04 y P-2445-TN-OM-05 se presentan la localización y los detalles de las obras planteadas para la mitigación del riesgo por inundaciones en este polígono de estudio.

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 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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

20.2.2 Análisis de resultados en condiciones proyectadas

Los análisis en condiciones existentes se encuentran descritos en la evaluación hidráulica presentada en el Numeral 12.3, 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 72, el Mapa 73 y el Mapa 74. En el Mapa 75 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 la obra propuesta cumple 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.

Las profundidades al ingreso de la obra oscilan entre 0.53 m y 0.89 m para 2.33 años y 100 años respectivamente. A lo largo el canal aguas arriba del ingreso a la obra se presentan profundidades que van desde 1.40 m y 1.69 para 2.33 años y 100 años. Adicionalmente las velocidades de flujo a lo largo del tramo varían entre 2.3 m/s y 5.0 m/s para 2.33 años periodo de retorno mientras que para 100 años varían entre 2.61 m/s y 8.5 m/s.

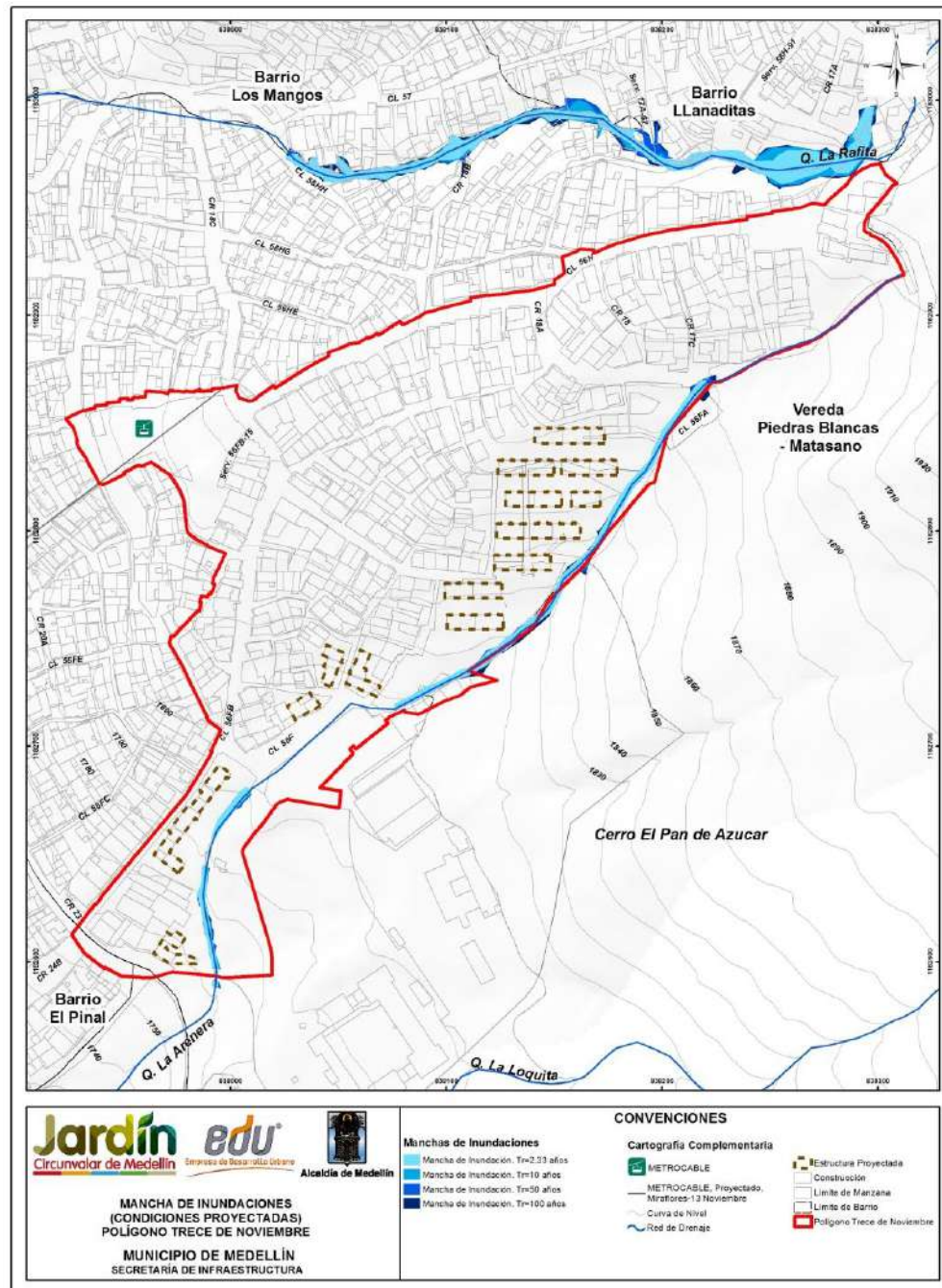
La quebrada debido a su canalización presenta un régimen de flujo saltante y/o rasante, de acuerdo a las pendientes del terreno, al controlar por intermedio de la obra propuesta, las manchas de inundación se redujeron hasta garantizar que no se volviera a presentar vertimientos a las zonas afectadas.

El Mapa 74 se presenta el análisis del riesgo por inundación en condiciones proyectadas con la obra propuesta. La amenaza alta que se presenta se encuentra asociada al cauce debido a que ya no hay vertimientos sobre ladera, la única vivienda en riesgo alto no mitigable es debido a la localización de la obra propuesta y a que se encuentra invadiendo al cauce de la quebrada La Arenera.

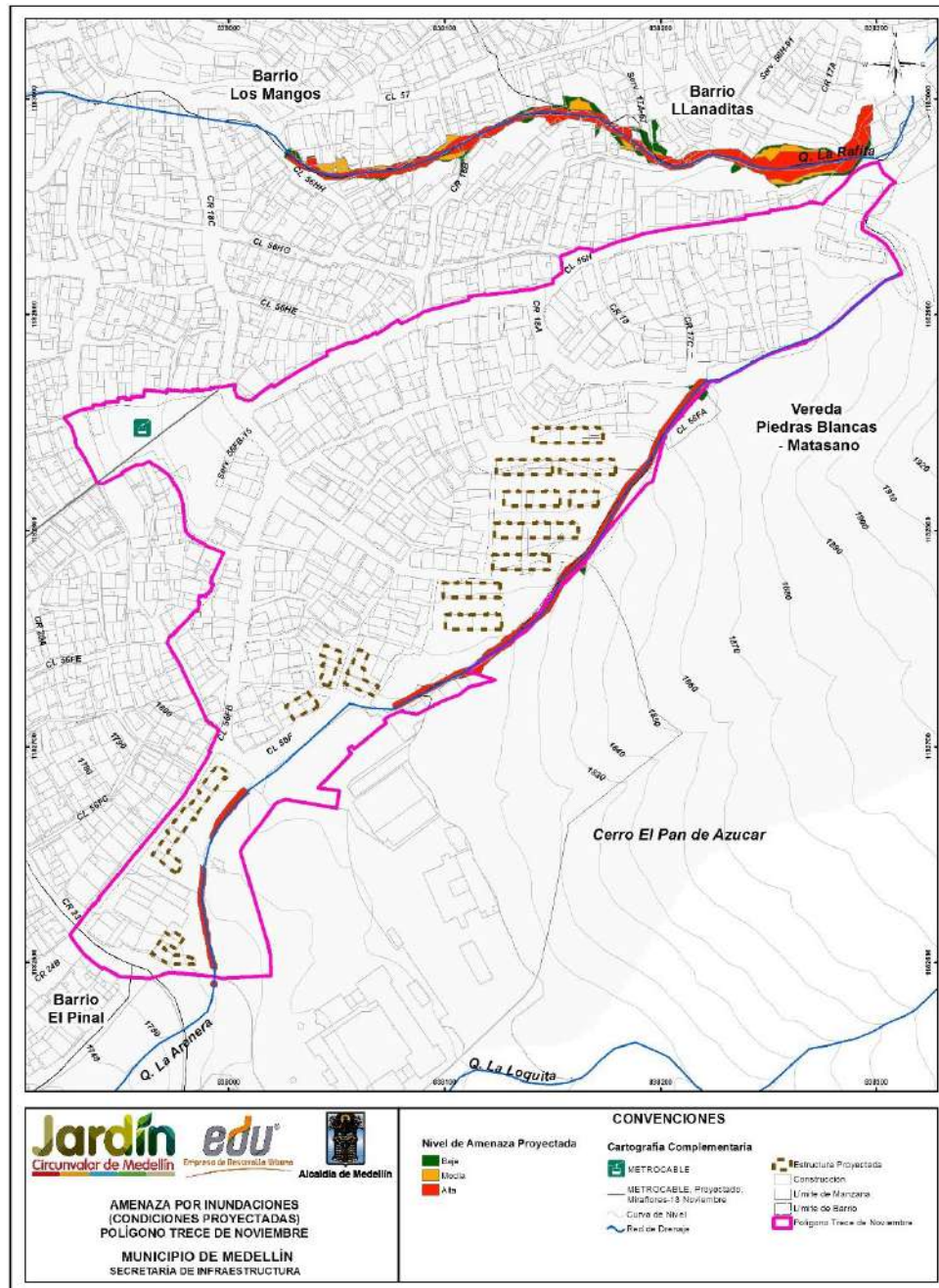
En el Mapa 75 se puede apreciar que una parte de la infraestructura de viviendas proyectadas se encuentra dentro de la zona de retiro a corrientes hídricas establecida por el POT (2014), cuya franja de retiro total se construye a partir de la envolvente de las franjas de retiros parciales establecidas 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

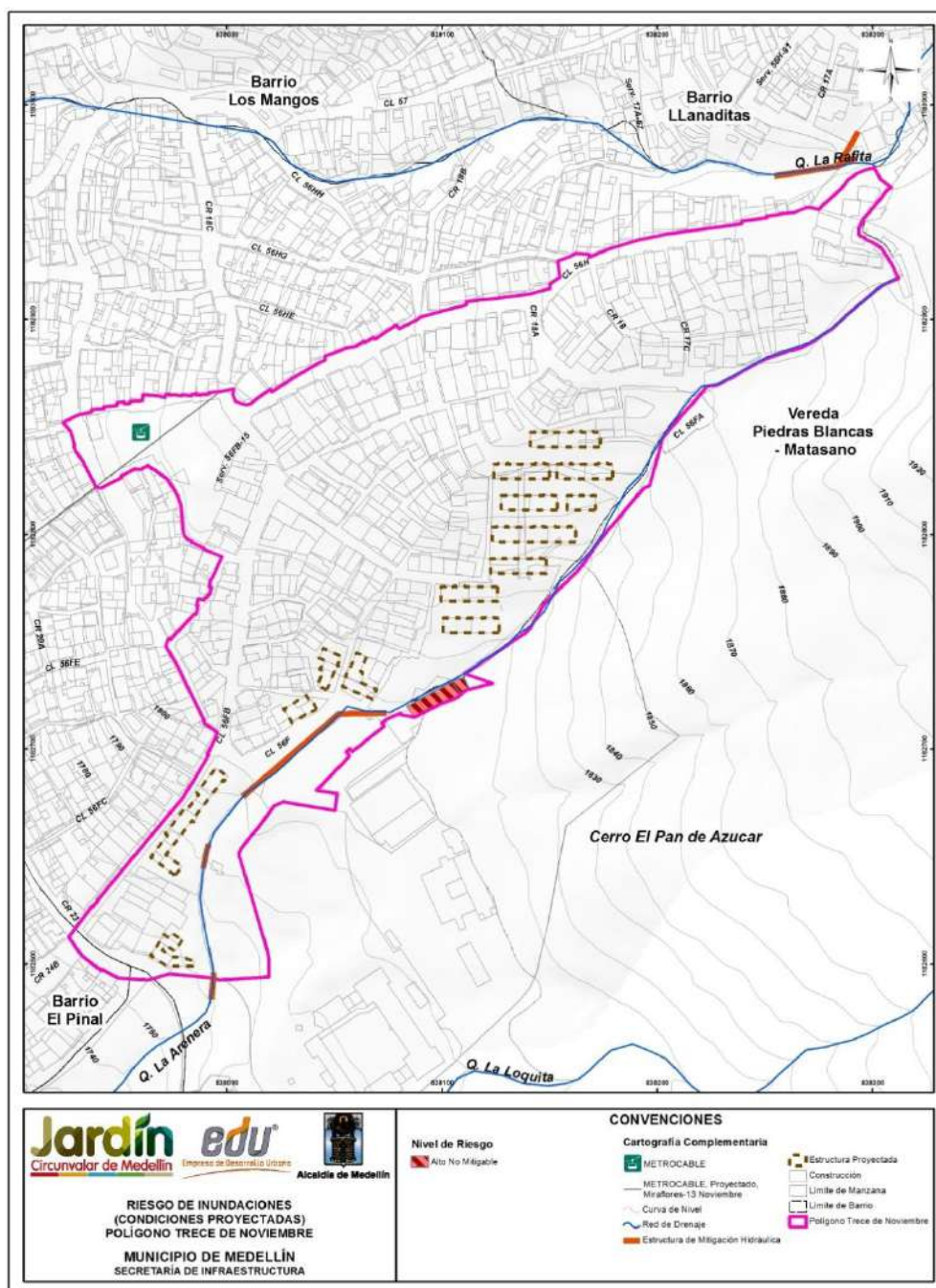
Los mapas tipo raster de velocidad y profundidad de flujo para condiciones proyectadas se incluyen en el Anexo 12 donde se presenta la geodatabase del proyecto.



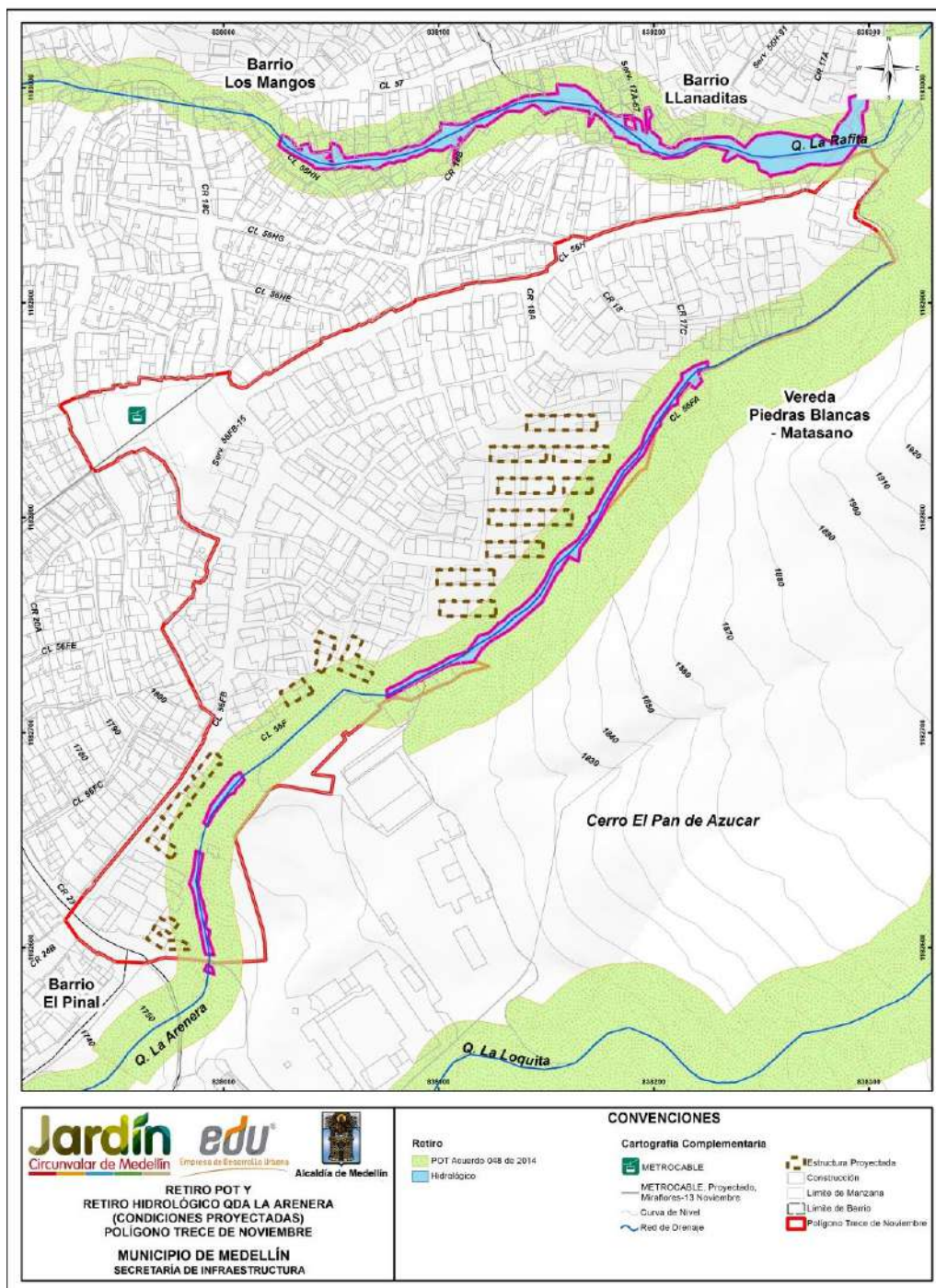
Mapa 72. Manchas de Inundación para los diferentes periodos de retorno en condiciones proyectadas del Polígono Trece de Noviembre
(22_TDNManchalInundacionesCondProyecto_Medellin_C y 22_TDNManchalInundacionesCondProyecto_Medellin_T)





Mapa 73. Análisis de amenaza por inundaciones para condiciones proyectadas en las Quebradas La Arenera y La Rafita del Polígono Trece de Noviembre
(24_TDNamenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_C y 24_TDNamenazasInundacionesCondProyecto_Medellin_T)



Mapa 74. Análisis de riesgo por inundaciones en condiciones proyectadas para las viviendas y construcciones en el Polígono Trece de Noviembre
 (44_TDNRiesgolnundacionesCondProyecto_Medellin_C y
 44_TDNRiesgolnundacionesCondProyecto_Medellin_C)



**Mapa 75. Retiro POT y retiro hidrológico para la quebrada La Arenera
(TDNRetiroPOTYRetiroHidrologicoLaArenera_Medellin_C)**

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

21. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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 al interior de diferentes barrios en la Comuna 8 (Villa Hermosa) y en la Comuna 3 (Manrique). Los polígonos localizados al interior de la Comuna 8 son los ubicados dentro de 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 ubicado dentro del Barrio La Cruz.

Específicamente el polígono objeto de este informe es el correspondiente al Barrio Trece de Noviembre, el cual está delimitado en el noroccidente por la Calle 56FB desde la Carrera 23 hasta la Carrera 19, de la Carrera 56FC hasta la futura estación del Metrocable y por la Calle 56H hasta El Plan. El límite suroriental está definido por el cauce de la Quebrada La Arenera. El polígono de intervención incluye los sectores conocidos en la zona como La Arenera-Tres Esquinas y El Plan.

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 Trece de Noviembre, pudiéndose entonces resaltar lo siguiente:

En cuanto a la **Unidad Morfodinámica Independiente (UMI)** dentro de la cual se enmarca el estudio:

La UMI del polígono ubicado al interior del Barrio Trece de Noviembre tiene un área aproximada de 65 hectáreas y se localiza hacia el norte de la Comuna 8, entre las UMI definidas para los Barrios El Faro y Golondrinas al Norte y Pinares de Oriente al Sur, abarcando las divisorias de las Quebradas La Rafita al norte y La Arenera al sur. En resumen, la UMI Trece de Noviembre está siendo limitada en la parte inferior por el límite físico correspondiente a la Carrera 23, vía principal de acceso a la zona de estudio y cuyas condiciones se consideran estables. La delimitación de la UMI hasta este límite es con el fin de evaluar las condiciones de desconfinamiento por inestabilidad por debajo del perímetro del polígono. Los límites laterales de la UMI Trece de Noviembre, principalmente en la zona baja, coinciden con las divisorias de aguas de las quebradas La Rafita al norte y La Arenera al sur, áreas que deben ser consideradas teniendo presente que hacen parte del aporte hidrológico a los drenajes. Hacia la parte media, los límites involucran más la morfodinámica de la zona considerando los procesos que se direccionan hacia el polígono y finalmente la UMI cierra en la zona alta con el nacimiento de la Quebrada La Rafita la cual debe ser considerada por efectos hidrológicos e hidráulicos para este drenaje.

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

En lo relacionado con los **Aspectos Geológicos y Geomorfológicos** tanto de la UMI como del polígono:

La unidad geológica predominante corresponde a los horizontes de meteorización de las Dunitas de Medellín (JKuM), las cuales son suprayacidas por cenizas volcánicas removilizadas (Qcv), depósitos de flujo de lodos y/o escombros (Qfl/e), depósitos de deslizamiento (Qd) y depósitos coluviales, además se presentan llenos antrópicos (Qll) asociados a las construcciones generadas por la expansión urbana.

Con respecto a los llenos antrópicos, estos abarcan en superficie longitudes entre 30.0 m y 150.0 m y en profundidad alcanzan espesores típicamente variables entre 1.5 m y 5.0 m. Solamente hacia el suroccidente de la zona de estudio, en la parte inferior de la UMI, en cercanías a la Quebrada La Arenera y a la Iglesia Beato Domingo Iturrate, por medio de la Perforación P-TN-PR-05, se detectó un lleno antrópico que alcanza un espesor de 24.0 m y está cerca de la zona donde la Quebrada La Arenera está canalizada. Al considerar los resultados de esta Perforación P-TN-PR-05, en un principio se magnificaron las dimensiones en profundidad del lleno antrópico de esta zona. Sin embargo, debido a que este espesor es atípico, esto en comparación con el rango antes mencionado que va de 1.5 m a 5.0 m, se consideró que se requería de una investigación adicional para definir el espesor real. Ante la imposibilidad de realizar esta exploración adicional, la cual pretendía corroborar el espesor de dicho lleno, se decidió hacer un análisis detallado que permitiera llevar a cabo una validación de este espesor y una aproximación a lo que sería su extensión. Se revisaron con especial cuidado los sondeos ubicados en los alrededores de la Perforación P-TN-PR-05. En síntesis, con respecto al lleno antrópico detectado por medio de la Perforación P-TN-PR-05, se concluyó entonces que su espesor promedio es del orden de 5 m. El espesor de 24 m detectado por medio del sondeo mencionado, se considera local, asociado a lo indicado por los habitantes de la zona que reportan muy cerca del punto de la perforación un pozo. Aunque las posiciones tomadas con respecto a la disposición de este lleno no afectan los análisis y resultados del estudio, se considera necesario por parte de La Interventoría que previo a desarrollar la construcción de las estructuras que harán parte del Proyecto Barrios Sostenibles, se realice la perforación antes mencionada para que de esta manera se aclare sin lugar a dudas el espesor del lleno y de ser necesario se realicen los respectivos correctivos en el diseño en su momento.

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 mensuales 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. 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 los retiros y las zonas inundables de las quebradas.

Específicamente en la UMI Trece de Noviembre, los procesos morfodinámicos identificados son predominantemente inactivos y consisten en deslizamientos, caída de rocas, surcos, cárcavas, bloques en superficie por erosión, dolinas y reptación. El Barrio Trece de Noviembre no tiene registro alguno de avenidas torrenciales. En cuanto a procesos morfodinámicos asociados a la dinámica fluvial de los drenajes de la UMI Trece de Noviembre, se identificó la presencia de un proceso morfodinámico activo asociado a la socavación en la margen izquierda de la Quebrada La Rafita, el cual afecta aproximadamente 4 m de longitud del cauce de la quebrada y se encuentra removiendo materiales antrópicos. Adicionalmente, a partir de la fotointerpretación se encontraron cicatrices de movimientos en masa en las márgenes de esta quebrada, los cuales pueden estar asociados a socavación lateral del cauce.

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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.

En lo que tiene que ver con los **Aspectos Hidrológicos e Hidráulicos** tanto de la UMI como del polígono:



Los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Arenera muestran que dadas las altas pendientes del cauce, el flujo ocurre a altas velocidades y las profundidades son en general bajas. En esta quebrada juegan un papel importante las obras hidráulicas existentes en el cauce, tales como canales y alcantarillas, dado que actúan como un control al flujo en sus encoles. Se presentan algunos desbordamientos en la parte media del tramo en estudio para los eventos con periodos de retorno altos.

De manera similar a la Quebrada La Arenera, los resultados de la modelación hidráulica realizada en la Quebrada La Rafita indican que el flujo ocurre a altas velocidades y las profundidades son en general bajas dadas las altas pendientes del cauce. En esta quebrada la única obra hidráulica que juega un papel importante corresponde a la alcantarilla que permite el cruce de la vía al inicio del tramo analizado, al costado nororiental del polígono, dado que actúa como un control al flujo y dado que cuenta con baja capacidad hidráulica, significando desbordamientos por encima de la vía para varios de los periodos de retorno analizados. De esta obra hacia aguas abajo, las crecientes de todos los periodos de retorno analizados corren al interior del cauce natural que se encuentra bien definido y profundo, lo que garantiza que no se presenten desbordamientos hacia el interior del polígono.

En lo relacionado con los **Evaluación de la Vulnerabilidad Estructural** específicamente para el polígono:

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 le dio 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 prefabricadas y 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.

Para este proyecto en especial, la vulnerabilidad se enfatizó en el análisis de la vulnerabilidad física al interior del polígono, el cual se zonificó en un mapa denominado de vulnerabilidad física, categorizando la vulnerabilidad de cada estructura en alta, media y baja, de acuerdo con las características de los elementos expuestos. De forma adicional,

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

en el caso de la vulnerabilidad por movimientos en masa se pudo determinar la vulnerabilidad de las personas que habitan las estructuras y la misma también fue categorizada según el número de personas afectadas dentro de una estructura. Se tiene que cerca del 31% de las estructuras presentes al interior del polígono del Trece de Noviembre presentan una vulnerabilidad media, el 47% presentan una vulnerabilidad baja y el 22% aproximadamente presentan una vulnerabilidad alta. Se puede observar una tendencia de mayor vulnerabilidad estructural en las estructuras que se ubican sobre la margen derecha de la Quebrada La Arenera en la parte media del polígono.



En cuanto a los resultados del análisis de vulnerabilidad de las personas que se encuentran al interior de las estructuras, se obtuvo que el valor máximo de vulnerabilidad de las personas es de 0.6 y que este valor coincide con las estructuras donde la vulnerabilidad estructural fue la máxima. De igual forma se observa que la vulnerabilidad de las personas se concentra hacia la zona de la margen derecha de la Quebrada La Arenera.

En lo relacionado con la **Evaluación de la Amenaza y del Riesgo por Movimientos en Masa** específicamente para el polígono:

La evaluación de la amenaza por movimientos en masa indica que los sitios de mayor inestabilidad y que representan mayor afectación al polígono se localizan en la parte media del polígono y por fuera éste en el costado nororiental, se ubican en ladera urbanizada y no urbanizada respectivamente, con pendientes mayores de 30° y desarrolladas superficialmente en el Horizonte IC y IIA de Dunitas de Medellín y en llenos antrópicos en el caso del sector de la parte media del polígono. En la zona se mapearon vaguadas y procesos morfodinámicos actualmente inactivos. La inestabilidad potencial se asocia entonces con las pendientes de la ladera en conjunto con los parámetros de resistencia al corte y su variabilidad asociada, factores que en caso del sismo de diseño generan probabilidades de falla relativamente altas, considerando que se encuentran ubicados donde se tiene como unidad geológica en superficie a los depósitos de vertiente. Éstos son los sitios más críticos, de tal manera que en caso de ocurrencia de un movimiento en masa, estos podrían afectar directamente las viviendas en el polígono, bien sea porque dichas viviendas se encuentran en el sitio potencialmente inestable o bien porque serían impactadas por el material que descendería ladera abajo desde un sitio inestable localizado más alto que la vivienda.

El análisis de riesgo por movimientos en masa se hizo considerando el mapa de amenaza por movimientos en masa proyectados para 50 años, donde se consigna la probabilidad de falla total considerando la variabilidad de los parámetros de resistencia al corte de los materiales y la actuación del sismo en 50 años. El análisis se hizo considerando dos cálculos diferentes como se explica a continuación:

- ✓ El primero haciendo el producto de la probabilidad de falla del movimiento en masa y la vulnerabilidad de las estructuras y de las personas. En este caso se obtuvo un valor porcentual de afectaciones de las estructuras y de pérdidas de vidas.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

- ✓ El segundo cálculo se hizo considerando el costo aproximado de la estructura por metro cuadrado por el número de pisos que fue igual a \$1.000.000 y el número de personas que habitan cada vivienda utilizando la densidad media habitacional (DMH) del sector que es equivalente a 4.6 personas por vivienda.

Los análisis muestran que las consecuencias máximas que podría presentar una vivienda son el 10% del costo de la vivienda, esto se verá incrementado en el número de pisos que está presente. Los máximos costos que se reportan en el análisis son del orden entre \$21.000.000 a \$111.000.000, correspondientes a las consecuencias económicas que afectarían la Iglesia Beato Domingo Iturrate. No obstante esto se ve afectado por la formulación de área que afecta el costo de la estructura. En términos de las demás viviendas, los costos máximos no superan los \$20.000.000 en 50 años.

En el caso de pérdidas por vidas, los casos más graves se identifican en tres viviendas cuya vulnerabilidad es alta y donde por efectos de los movimientos en masa, se podría presentar la pérdida de hasta una vida humana por efectos de los movimientos en masa generados en 50 años.

Para el análisis detallado de los resultados de la evaluación del riesgo por movimientos en masa, se dividió el Polígono Trece de Noviembre en dos zonas, alta (Zona 1) y media (Zona 2), debiéndose resaltar lo siguiente.

- ✓ La Zona 1 del Polígono Trece de Noviembre se localiza en la parte alta de dicho polígono, cerca al sitio conocido como El Plan. El riesgo se debe principalmente al hecho de que las estructuras se encuentran amenazadas por el impacto de movimientos en masa localizados en la parte media y alta de la ladera, margen izquierda de la Quebrada La Arenera. Las evaluaciones detalladas efectuadas, permiten concluir que la mejor alternativa de solución es la de una pantalla de protección para retención de los materiales susceptibles de ser movilizados.

Para esta alternativa se recomienda que se realice mantenimiento con la periodicidad necesaria, de tal manera que no se presente acumulación del material desprendido en la ladera.

- ✓ La Zona 2 se localiza en la parte media del polígono, cerca del Colegio Sol de Oriente. En esta zona se localizan actualmente 85 estructuras, las cuales presentan alto riesgo frente a un evento de movimiento en masa. Al interior se localizarán las Estructuras E05 y E06 de la Fase 1 y las Estructuras E07 a E11 de la Fase 2 del Proyecto Barrios Sostenible. El riesgo para las estructuras del Proyecto Barrios Sostenibles varía entre medio y bajo. Igual que en el caso de la Zona 1, se hicieron análisis detallados que permiten concluir que la mejor alternativa es la de muros pantallas conformados con pilas y muro tabique uniéndolas, ya que ofrecen condiciones de estabilidad y facilidades constructivas en comparación con la alternativa de muro en voladizo no ofrece.

Con el fin de monitorear y evaluar la efectividad de sistema de estabilización propuesto en la Zona 2, se propone un sistema de instrumentación compuesto por

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

dos inclinómetros, uno por cada pantalla construida. Se recomienda que el inclinómetro sea instalado en una de las pilas que componen cada pantalla, esto con la finalidad de monitorear los desplazamientos en la zona a largo plazo y poder establecer mecanismos de alarma. Además se recomienda una frecuencia de monitoreo mínimo de una lectura mensual durante el primer año después de construidas las pantallas, y dependiendo de los resultados de dicho monitoreo, si no se detectan desplazamientos considerables en la zona, se recomienda un monitoreo preventivo de tres (3) lecturas al año.

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 La Arenera y La Rafita, principales drenajes del Polígono Trece de Noviembre, 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 el límite sur del polígono, que coincide con la Quebrada La Arenera, 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. Por el contrario, la Quebrada La Rafita representa una amenaza baja por inundaciones para el Polígono Trece de Noviembre dado que su mancha de inundación no afecta al polígono, ni siquiera en situaciones de desbordamiento en la estructura de cruce cercana al extremo nororiental del polígono.

Los análisis de riesgo por inundación, indican que la denominada Estructura 2 sobre la Quebrada La Arenera, que corresponde a la cobertura que pasa cerca de la Iglesia y la escuela del sector, presenta problemas de capacidad hidráulica. Esta problemática se presenta a partir de un periodo de retorno comprendido entre 10 años y 50 años y genera una mancha que cubre parcialmente la zona de la plazoleta del atrio de la Iglesia Beato Domingo Iturrate. La causa de esta problemática radica en la ausencia de una estructura de entrada adecuada que evite los desbordamientos y que garantice el flujo libre hacia el interior de la cobertura. Para este sitio se plantearon varias alternativas de solución, optándose por la instalación de una estructura tipo cabezote con aletas al cual empalmará la futura extensión del canal existente aguas arriba. Se requiere el retiro de las viviendas aledañas a cada margen, las cuales actualmente se encuentran en riesgo alto no mitigable por inundaciones.

En relación con los puentes o pasos peatonales que presentan problemas en su gálibo, específicamente el Puente 7, en madera, se recomienda que sea retirado ya que una vez retiradas las viviendas a las que actualmente presta su servicio éste quedará sin funcionalidad. En relación con el Puente o Paso Peatonal 2, éste puede conservarse dado que su estructura en concreto es resistente y su condición hidráulica no significa amplificaciones importantes en la mancha y amenaza por inundación.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

En relación con la Quebrada la Rafita, los resultados de indican que a pesar de presentar una problemática por insuficiencia hidráulica en la sección de la estructura de cruce sobre la vía del costado oriental del polígono, ésta no representa una amenaza para el Polígono Trece de Noviembre. Por tanto, no se incluye el diseño de esta estructura, pero se hace la recomendación a las autoridades competentes de ampliar su capacidad hidráulica con el fin de mejorar las condiciones en el barrio vecino.



Los resultados del análisis del fenómeno de movimiento en masa indican que los deslizamientos posibles en las cuencas de la Quebrada La Arenera y la Quebrada La Rafita tienen asociada una baja probabilidad de ocurrencia y que en caso de ocurrir éstos deslizamientos tendrían una dirección tal que no aportarían materiales al cauce, significando con ello que la probabilidad de ocurrencia y la intensidad de las avenidas torrenciales son bajas y por tanto la amenaza por avenidas torrenciales en el Polígono Trece de Noviembre es también baja.

Se demostró además que una parte de la infraestructura de viviendas proyectadas se encuentra dentro de la zona de retiro establecida por el POT (2014). Se tienen entonces edificaciones que en teoría entrarían en conflicto con la mancha de inundación establecida por el POT (2014) para un periodo de retorno de 100 años, pero se considera que los resultados que se deben tener en cuenta para la toma de decisiones son los obtenidos en este estudio, toda vez que corresponden a estudios de mayor detalle.

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 Trece de Noviembre. 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 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, que en este caso son del tipo estructural. En los Planos P-2445-TN-OM-01 a P-2445-TN-OM-05 del Anexo 09 se presentan los diseños de estas estructuras que dan solución a la problemática de riesgo del polígono. En el Anexo 11 se presentan las cantidades de obra, presupuesto y especificaciones.

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

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

de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, además de las bases de datos, los archivos de mapa, los archivos raster y complementarios. La información del Anexo 12 se localiza en una carpeta (directorio) llamada Proy_Riesgos_EDU. Al interior de ésta, se encuentran catorce 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 167).

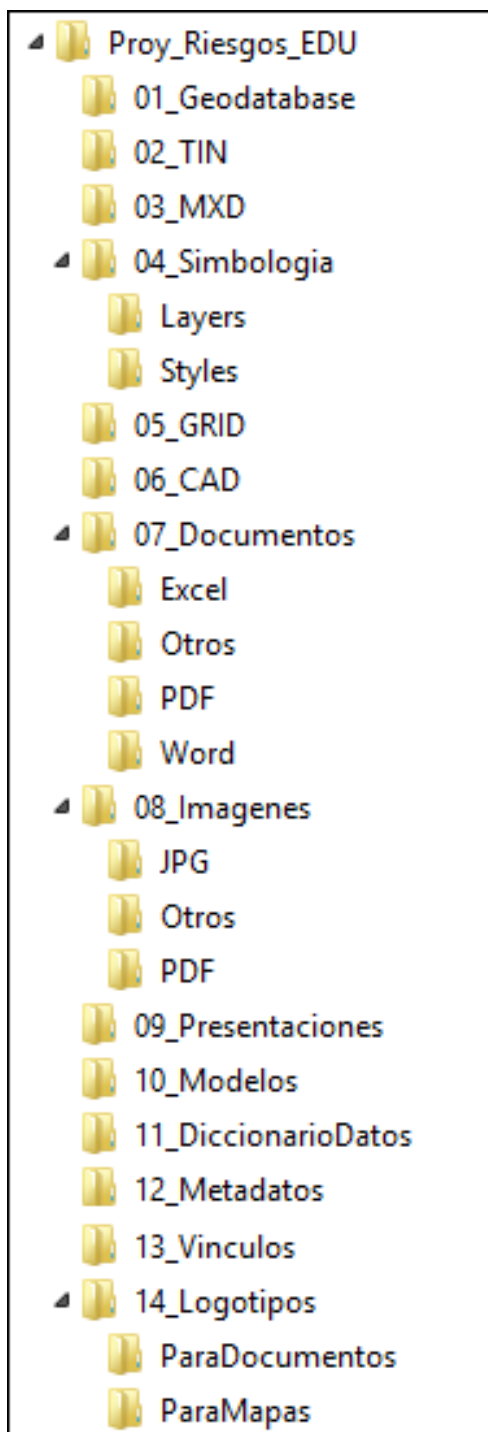


Figura 167. Estructura general de la información entregada

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

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.

Ariztizábal, 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). “Enginnering Cassification of Rock Masses for the Desing 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, GUZZETRI F (eds.). Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards[C]. Dordrecht: Kluwer Acad. Pub1., 135 - 176.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</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.

Consorcio 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.

Consulcivil, (2013). Estudios de zonificación y caracterización geológico – geotécnica del proyecto piloto cinturón verde metropolitano – Tramo 1- Sector C – Cerro Pan de Azucar en la ciudad de Medellín. GD-055 V.1.

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. Pág. 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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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.; Rodriguez, 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). BoletínGeológico 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 Sacaojal. 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.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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. 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.

INCIGAM (2015). “Estudio Geotécnico preliminar para la construcción de la primera etapa del proyecto 13 de Noviembre en el Proyecto Barrios Sostenibles, en desarrollo del objeto de la Contratación Directa No. 67 de 2013, celebrado entre la Universidad y la Empresa de Desarrollo Urbano –EDU”.

INGEOCILCÓN LTDA (2009). “Estudio de Suelos para el Parque de la Memoria de Villa Tina en Desarrollo de los convenios suscritos entre la Secretaría del Medio Ambiente de Medellín y la Empresa de Desarrollo Urbano-EDU”.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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.

LANTADA, M. N, (2007) Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis doctoral Universitat Politècnica 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.

NTC 401 (2009). Norma Técnica Colombiana – Tubos de Concreto Reforzado para Alcantarillado. Séptima actualización. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) 2014-12-19.

NTC 1022 (2014). Norma Técnica Colombiana – Tubos de Concreto Sin Refuerzo para Alcantarillado. Sexta actualización. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) 2009-03-27.

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

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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.

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.

TECNISUELOS LTDA (2013). Estudio para la construcción del parque ecoturístico y recreativo Trece de Noviembre, ubicado en el cerro Pan de Azúcar. Informe 87/2013

TECNISUELOS-ICC LTDA (2010). “Estudio de suelos para línea de metro cable Miraflores”. Informe 61/2010. Medellín.



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, 4375-4387.

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.

UPB (2014). “Estudios, diagnóstico, formulación y diseños de los proyectos barrios sostenibles en el sector la arenera y tres sectores más al interior de los planes maestro pan de azúcar, llanaditas, y los sectores del plan maestro centro oriental pertenecientes a la comuna ocho, dentro del marco del proyecto cinturón verde metropolitano en la ciudad de M”. Polígono de Intervención Trece de Noviembre. Barrios Sostenibles. Documento Técnico de Soporte Fase de Diagnóstico. Convenio 67 de 2014. Universidad Pontificia Bolivariana, Abril 2014.

	<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 TRECE DE NOVIEMBRE</p>	
---	---	---

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 SuqCace 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

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 align="center">SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A. SUCURSAL COLOMBIA</p> <p align="center">“ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO DE DETALLE PARA LOS POLÍGONOS DE BARRIOS SOSTENIBLES EN EL MUNICIPIO DE MEDELLÍN”</p> <p align="center">INFORME POLIGONO TRECE DE NOVIEMBRE</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 anterior implica entonces que el estudio efectuado tiene como limitante la aplicabilidad para el número de viviendas al momento de las evaluaciones efectuadas. Si el número de estructuras en la zona de estudio se aumenta, se requerirían evaluaciones puntuales de las mismas.

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.