Convenio 076/2002

DIRECCION DE PREVENCION Y ATENCION DE EMERGENCIAS
ALCALDIA MAYOR SANTA FE DE BOGOTA D.C.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS POR DESLIZAMIENTO DE LOS BARRIOS EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE, CIUDAD BOLIVAR - BOGOTA



INFORME FINAL

Bogotá D. C., mayo de 2003

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA,
MINERO - AMBIENTAL Y NUCLEAR - INGEOMINAS

SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOAMBIENTALES

ADOLFO ALARCÓN GUZMÁN
Director General INGEOMINAS

FERNANDO RAMÍREZ CORTÉS
Director General DPAE

DIANA MARCELA RUBIANO VARGAS
Subdirector Amenazas Geoambientales – INGEOMINAS

GRUPO DE TRABAJO

MAURICIO ALBERTO TAPIAS CAMACHO
Jefe de Proyecto
Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa - INGEOMINAS

Grupo Geotecnia
JESÚS GARCÍA
MAURICIO TAPIAS
FABIAN ULLOA
CARLOS PALACIOS
CARLOS MENDOZA
FERNANDO DÍAZ

Geología
DIEGO IBAÑEZ
EDUARDO CASTRO

Geomorfología y Amenaza Regional
EDUARDO CASTRO

Topografía y Perforaciones
JAIR RAMÍREZ
NAZARIO CARRILLO
JORGE PEÑA
PABLO MORA
JUAN MESA
FRANCISCO TORRES

Instrumentación y Monitoreo
FABIAN ULLOA

Grupo Hidrología e Hidráulica
GERMÁN BARRETO
DEYANIRA RUÍZ

Laboratorio de Suelos
GUILLERMO ÁVILA
MANUEL CAVIEDEZ
GRUPO DE ENSAYOS

Sistemas y SIG
EDGAR CARRILLO

Evaluación de Amenaza por Movimientos en Masa

JESÚS GARCIA
Coordinador Modelación Numérica y Análisis de Estabilidad

MAURICIO TAPIAS
Coordinador de Zonificación

Digitalización y Cartografía
MERCEDES PACHECO
DEYANIRA RUÍZ

Edición Final
ANA ISABEL ALVARADO
GRUPO MOVIMIENTOS EN MASA

Digitalización
INSAT LTDA

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
CAPITULO 1	**1**
INTRODUCCIÓN	**1**
1.1 LOCALIZACION	1
1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO	1
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ALCANCE Y CONTENIDO DEL INFORME	3
CAPITULO 2	**7**
METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO	**7**
CAPITULO 3	**9**
LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO EL ESPINO	**9**
3.1 INTRODUCCIÓN	9
3.2 METODOLOGÍA	9
3.3 EQUIPOS	10
3.3.1 Estación semitotal sokkisha referencia SDM3E	10
3.3.2 Teodolito geodesico WILD T-2	10
3.3.3 Nivel de ingeniero NAK2	11
3.4 MAPAS TOPOGRÁFICOS	12
3.4.1 Topografía mayo de 2002	12
3.4.2 Topografía agosto de 2002	12
3.4.3 Topografía febrero de 2003	15
CAPITULO 4	**17**
CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLOGÍA	**17**
4.1 GEOLOGÍA REGIONAL	17
4.1.1 Formación Chipaque (Ksch)	17
4.1.2 Grupo Guadalupe (Ksg)	20
4.1.2.1 Formación Arenisca Dura (Ksgd)	20
4.1.2.2 Formación Plaeners (Ksgp)	20
4.1.2.3 Formación Labor y Tierna (Ksglt)	20
4.1.3 Formación Guaduas (Ktg)	20
4.1.4 Depósitos Cuaternarios	21
4.1.5 Suelos Residuales (Qrs)	22
4.1.6 Material de Relleno de Excavación (Qr)	22
4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL	22
4.3 GEOLOGÍA LOCAL Y UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES 23	
4.3.1 Materiales Derivados de Roca ¨In Situ¨	24
4.3.1.1 Unidades de Roca (Ktg)	24
4.3.1.2 Suelo Residual (Qsr)	30
4.3.2 Depósitos de ladera o de vertiente 31	
4.3.3 Botadero de Escombros (Qbe)	33
4.4 CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES LOCALES	34
4.5 GEOMORFOLOGÍA	35
4.5.1 Morfodinámica	36
4.5.1.1 Tipos de movimientos en masa	36

CAPITULO 5 **43**
EXPLORACIÓN Y ENSAYOS **43**
5.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO 43
5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO 43
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS 65
5.3.1 Arcillolitas 65
5.3.1.1 Propiedades Índice 65
5.3.1.2 Ensayos de Resistencia al Corte 66
5.3.1.2.1 Ensayos de Corte Directo 66
5.3.1.2.2 Ensayos Triaxiales 68
5.3.1.2.3 Ensayos Compresión simple 69
5.3.1.3 Ensayos De Compresibilidad 69
5.3.2 Areniscas 70
5.3.3 Perfil típico promedio 71

CAPITULO 6 **73**
ANÁLISIS HIDRÓLOGICO **73**
6.1 METODOLOGIA 74
6.1.1 Bases teóricas para la metodología 74
6.1.2 Limitaciones 75
6.2 HIDROLOGIA 79
6.2.1 Inventario de Estaciones 79
6.2.2 Datos seleccionados y obtenidos 81
6.2.3 Caracterización de la precipitación 82
6.2.4 Caracterización climatológica 85
6.3 ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN Y FILTRACIONES DE AGUAS SERVIDAS 87
6.3.1 Estimación de la Infiltración por Causas Naturales 87
6.3.1.1 Cálculo de la Evapotranspiración 87
6.3.1.2 Cálculo de la Escorrentía 89
6.3.1.3 Caudal estimado para aguas de escorrentía suponiendo un diseño de alcantarillado pluvial 89
6.3.1.4 Cálculo de la Infiltración de Aguas Lluvias 90
6.3.1.5 Estimación de la infiltración por ensayos de campo 90
6.3.2 Estimación de la Infiltración por Causas Antrópicas 95
6.3.2.1 Cálculo de Filtraciones de Aguas Servidas y Aguas Lluvias 96
6.3.2.2 Cálculo de Infiltraciones por Obras Rusticas Existentes 96
6.4 CÁLCULO DE LA RECARGA 97
6.5 RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN CON EL MOVIMIENTO EN MASA 98
6.5.1 Análisis de lluvias acumuladas. 99
6.5.2 Análisis de frecuencias de lluvias acumuladas 100
6.5.3 Inventario de informes asociados con movimientos del terreno y su relación con la ocurrencia de lluvias. 103
6.5.4 Lluvia acumulada antecedente 103
6.5.5 Lluvias máximas diarias y horarias en la cronología de eventos. 108

CAPITULO 7 **113**
INSTRUMENTACIÓN Y MONITOREO **113**
7.1 ANTECEDENTES 113
7.2 DISEÑO DE INSTRUMENTACIÓN 113
7.2.1 Instrumentación superficial 113

7.2.1.1 Mojones 113
7.2.1.2 Extensómetros de Polea 115
7.2.1.3 Extensómetros de Estacas 116
7.2.1.4 Extensómetros de varilla 118
7.2.2 Instrumentación profunda 118
7.2.2.1 Piezómetros de Casagrande 119
7.2.2.2 Inclinómetros de precisión 119
7.3 RESULTADOS 120
7.3.1 Mojones 120
7.3.1.1 Precisión en el monitoreo 120
7.3.1.2 Resultados última campaña 124
7.3.1.2.1 Resultados de las mediciones sobre la red principal de mojones. 124
7.3.1.2.2 Resultados de las mediciones sobre los mojones ubicados en los barrios San Rafael, El Rodeo y El Espino III Sector 128
7.3.1.3 Consideraciones generales del desplazamiento de mojones 129
7.3.1.3.1 Red principal de Mojones 129
7.3.1.3.2 Mojones ubicados sobre los barrios San Rafael, El Rodeo y El Espino III Sector 146
7.3.2 Extensómetros de polea 147
7.3.3 EXTENSOMETROS DE ESTACAS 152
7.3.4 Piezometros casagrande 156
7.3.5 Inclinómetros 158
7.3.6 Registros fotográficos multitemporales 168
7.3.7 Análisis de cambios topográficos 174

CAPITULO 8 176
AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE 176
8.1 ESTIMACION DE LA AMENAZA EN LOS ALREDEDORES DEL DESLIZAMIENTO EL ESPINO 176
8.1.1 Influencia del área de la carbonera 176
8.1.2 Influencia en los alrededores de las quebradas 179
8.1.3 Influencia en el Barrio El Mirador de La Estancia 180
8.1.4 Influencia en el Barrio San Rafael 180
8.1.5 Conclusiones 180
8.2 ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL MOVIMIENTO PRINCIPAL – DESLIZAMIENTO DEL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE 184
8.2.1 Antecedentes 184
8.2.2 Identificación del Plano de Falla 184
8.2.3 Análisis de Estabilidad 187
8.2.3.1 Etapa 1 Minería a Cielo Abierto – Bloque A 188
8.2.3.2 Etapa 2 – Falla del Bloque Principal Bloque B 192
8.2.3.3 Etapa 3 Fallamiento del Bloque C 200
8.2.3.4 Etapa 4 – Predicción del movimiento 202
8.3 ANÁLISIS DEL LEVANTAMIENTO EN SAN RAFAEL 204
8.4 ZONIFICACION DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA 205
8.4.1 Zona 1: Deslizamiento del Espino y Cerro del Diamante 206
8.4.2 Zona 2: Bloque desplazado detrás del escarpe principal 207
8.4.3 Zona 3: Deslizamiento Quebrada Santo Domingo 207
8.4.4 Zona 4: Flujo de Detritos Quebrada Santo Domingo 207
8.4.5 Zona 5: Caída de Rocas del Espino Sector III 208
8.4.6 Zona 6: Escarpe y Depósitos de Talus 208
8.4.7 Zona 7: Parte Alta Quebrada Santo Domingo 208

8.4.8 Zona 8: Ladera Arriba Deslizamiento El Espino y Cerro Del Diamante -Escenario de Amenaza por Sismo 209
8.4.8.1 Zona 8A Efecto sísmico de 0.05g de aceleración horizontal. 209
8.4.8.2 Zona 8B Efecto sísmico de 0.15g de aceleración horizontal 209
8.4.8.3 Zona 8C - Efecto sísmico de 0.24g de aceleración horizontal 209
8.4.9 Zona 9: Ladera Arriba Deslizamiento El Espino y Cerro Del Diamante – Escenario de Amenaza por Intervención Antrópica 210
8.4.10 Zona 10: Ladera Abajo Deslizamiento El Espino y Cerro Del Diamante – Escenario de Amenaza por Avance del Movimiento 210
8.4.10.1 Zona 10a: Avance del movimiento ladera abajo de la zona 1c 210
8.4.10.2 Zona 10b: avance del movimiento ladera abajo de la zona 1ª 211
8.4.11 Zona 11: Influencia en San Rafael 211

CAPITULO 9 213
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 213
9.1 CONCLUSIONES 213
9.2 RECOMENDACIONES DE MEDIDAS Y OBRAS DE MITIGACIÓN 221
9.2.1 MEDIDAS INMEDIATAS 221
9.2.2 RECOMENDACIONES A MEDIANO Y LARGO PLAZO 224

CAPITULO 10 226
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 226

ANEXOS

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1.1. Localización de la zona de estudio – Barrios El Espino y Cerros del Diamante.	2
Figura 2.1 Metodología del estudio de evaluación de la amenaza por el deslizamiento de El Espino y Cerros del Diamante.	8
Figura 3.1 Mapa del levantamiento topográfico de Mayo de 2002	13
Figura 3.2 Mapa de levantamiento topográfico de Agosto de 2002	14
Figura 3.3 Mapa del levantamiento topográfico de Febrero de 2003	15
Figura 4.1. Geología Regional (Tomado de la Zonificación Geotécnica de Bogotá, INGEOMINAS 1988).	18
Figura 4.2. Detalle de Geología regional, mostrando los conjuntos medio (Ktgm) e inferior (Ktgi) de la formación Guaduas. (Tomado de INGEOCIM, 1998).	19
Figura 4.3. Bloque diagrama esquemático del deslizamiento de detritos de El Espino en Ciudad Bolívar. El plano de falla aunque es planar tiene una componente curva hacia la corona.	37
Figura 5.1 Perfil Geotécnico de la perforación 1	45
Figura 5.2 Perfil Geotécnico de la perforación 2	47
Figura 5.3 Perfil Geotécnico de la perforación 3	49
Figura 5.4 Perfil Geotécnico de la perforación 4	51
Figura 5.5 Perfil Geotécnico de la perforación 5	53
Figura 5.6 Perfil Geotécnico de la perforación 6	55
Figura 5.7 Perfil Geotécnico de la perforación 7	57
Figura 5.8 Perfil Geotécnico de la perforación 8	59
Figura 5.9 Perfil Geotécnico de la perforación 9	61
Figura 5.10 Perfil Geotécnico de la perforación 10	62
Figura 5.11 Perfil Geotécnico de la perforación 11	64
Figura 5.12 Falla en la etapa de consolidación del ensayo triaxial por la presencia de lente de arena de color marrón.	68
Figura 6.1. Esquema de distribución relativa de la precipitación mensual, la recarga y la evapotranspiración (Dwight et al, 1984).	79
Figura 6.2. Localización de estaciones en el área de estudio e Isoyetas	80
Figura 6.3. Régimen de la precipitación media	83
Figura 6.4. Régimen de la precipitación media en la zona de estudio	84
Figura 6.5 Comparación de valores de ETP mensuales con relación al promedio indicando el error para el 5%	88
Figura 6.6 Localización de puntos para la realización de ensayos de infiltración.	91
Figura 6.7 Gráfico de infiltración según Horton	93
Figura 6.8 Gráficos de los ensayos de infiltración	95
Figura 6.9 Relación de la precipitación anual y la evapotranspiración potencial anual	98
Figura 6.10 Distribución relativa de la precipitación mensual, evapotranspiración y recarga para la zona de estudio basado en los registros de la Estación Doña Juana.	99
Figura 6.11 Curvas de precipitación acumulada máxima y promedio a nivel horario y diario para la Estación Sierra Morena	101

Figura 6.12 Frecuencia de la precipitación acumulada a nivel horario y diario para la Estación Sierra Morena 102
Figura 6.13 Análisis de precipitación acumulada para algunas fechas de posibles movimientos en masa. 107
Figura 6.14 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2000. 109
Figura 6.15 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2001. 110
Figura 6.16 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2002. 111
Figura 6.17 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2003. 112

Figura 7.1 Detalle constructivo de los mojones de concreto 115
Figura 7.2 Extensómetros de polea 116
Figura 7.3 Esquema de extensómetros de estacas 116
Figura 7.4 Detalle del inclinómetro. Tubería ranurada (Izquierda) - Torpedo Biaxial marca “Geokon” (derecha) – Torpedo biaxial marca “Geotechnical Instruments” (Abajo). 120
Figura 7.5 Esquema Nivelación Trigonométrica 123
Figura 7.6 Variación de la velocidad de desplazamiento total (3D) de los mojones ubicados sobre los ejes 1 y 2 en función del tiempo 132
Figura 7.7 Isovelocidades totales registradas durante el periodo de Abril 2002-Marzo 2003. (arriba) Isovelocidades registradas durante la segunda campaña (Abril-Mayo 2002) (abajo) 134
Figura 7.8 Isovelocidades registradas durante la tercera campaña (Mayo-Junio 2002). (arriba) Isovelocidades registradas durante la cuarta campaña (Junio-Julio 2002) (abajo) 135
Figura 7.9 Isovelocidades registradas durante la quinta campaña (Julio -Agosto 2002). (arriba) Isovelocidades registradas durante la sexta campaña(Agosto-Septiembre 2002) (abajo) 136
Figura 7.10 Isovelocidades registradas durante la séptima campaña (Septiembre-Octubre 2002). (arriba) Isovelocidades registradas durante la octava campaña (Octubre-Noviembre 2002) (abajo) 137
Figura 7.11 Isovelocidades registradas durante la novena campaña (Noviembre-Diciembre 2002). (arriba) Isovelocidades registradas durante la décima campaña (Di ciembre2002 -Febrero 2003) (abajo) 138
Figura 7.12 Isovelocidades registradas durante la onceava campaña (Febrero-Marzo 2003). 139
Figura 7.13 Isodirecciones totales registradas durante el periodo de Abril 2002-Marzo 2003. (arriba) Isodirecciones registradas durante la segunda campaña (Abril-Mayo 2002) (abajo) 140
Figura 7.14 Isodirecciones registradas durante la tercera campaña (Mayo-Junio 2002).(arriba) Isodirecciones registradas durante la cuarta campaña (Junio-Julio 2002) (abajo) 141
Figura 7.15 Isodirecciones registradas durante la quinta campaña (Julio -Agosto 2002).(arriba) Isodirecciones registradas durante la sexta campaña (Agosto-Septiembre 2002) (abajo) 142
Figura 7.16 Isodirecciones registradas durante la séptima campaña (Septiembre-Octubre 2002). (arriba) Isodirecciones registradas durante la octava campaña (Octubre-Noviembre 2002) (abajo) 143

Figura 7.17 Isodirecciones registradas durante la novena campaña (Noviembre Diciembre 2002). (arriba) Isodirecciones registradas durante la décima campaña (Diciembre 2002 -Febrero 2003) (abajo) 144
Figura 7.18 Isodirecciones registradas durante la onceava campaña (Febrero-Marzo 2003). 145
Figura 7.19 Desplazamientos en función del tiempo - Extensómetros de Polea de 1 a 4 148
Figura 7.20 Desplazamiento en función del tiempo - Extensómetros de Polea de 5 a 7 149
Figura 7.21 Comparación de desplazamientos totales de los extensómetros de polea en función del tiempo. 150
Figura 7.22 Tasas de desplazamiento en función del tiempo para extensómetros de polea 151
Figura 7.23 Desplazamiento extensómetros de estacas EE1,EE2,EE3,EE4a, EE4b y EE5 154
Figura 7.24 Desplazamientos extensómetros EE6, EE6b, EE7, EE8 y EE9 155
Figura 7.25 variación del nivel freático y la precipitación para los piezómetros pc2, pc3, inc1, inc5 e inc9 157
Figura 7.26 Deflección acumulada e incrementos en la deflección (eje A) inclinómetro 1 159
Figura 7.27 Deflección acumulada e incrementos en la deflección (eje B) inclinómetro 1 160
Figura 7.28 Deflección acumulada ejes A y B inclinómetro 2 161
Figura 7.29 Deflección acumulada ejes A y B inclinómetro 3 162
Figura 7.30 Deflección acumulada e incrementos en deflección eje a inclinómetro 4 163
Figura 7.31 Deflección acumulada ejes A y B inclinómetro 5 164
Figura 7.32 Deflección acumulada ejes A y B inclinómetro 6 165
Figura 7.33 Deflección acumulada ejes A y B inclinómetro 7 166
Figura 7.34 diferencias de nivel entre el levantamiento topográfico de marzo/03 y mayo/02 175

Figura 8.1. Fotografía aérea de las zonas de El Espino y La Carbonera, mostrando en color naranja las coronas de los deslizamientos y en azul, una zona de grietas alrededor del deslizamiento El Espino. En color rojo se aprecian las fallas geológicas y lineamientos que delimitan los fenómenos. Foto aérea 241, tomada el 24 de julio de 2002 178
Figura 8.2 Esquema de los deslizamientos de El Espino y La Carbonera con sus áreas de influencia. 181
Figura 8.3 Fotografía aérea de la zona de El Espino y San Rafael, mostrando en color naranja las coronas de antiguos deslizamientos y de canteras. En color rojo las fallas geológicas y lineamiento que atraviesan los fenómenos. En color amarillo se aprecia una zona inestable del barrio mirador de la Estancia. Foto aérea 242, tomada el 24 de julio de 2002. 182
Figura 8.4 Determinación de la normal a un plano, conocida la coordenada de 3 puntos 185
Figura 8.5 Bloque diagrama ilustrado en rojo el plano de falla 186
Figura 8.6 Modelamiento del desplazamiento de los diferentes bloque 189
Figura 8.7 Inestabilización de un talud por la actividad minera 190
Figura 8.8 Diagrama del cuerpo libre del bloque fallado 190
Figura 8.9 Planos de falla de la arcillolita en prueba triaxial (CU) 193
Figura 8.10 Distribución de resultados de la encuesta acerca de la posible causa del deslizamiento del Espino y Cerro del Diamante. 195

Figura 8.11 Variación de la cohesión y ángulo de fricción con la succión, para tres tipos de suelo (Escario, 1986) 196
Figura 8.12 Variación de al velocidad de desplazamiento total (3D) de los mojones ubicados sobre los ejes 1 y 2 en función del tiempo 201
Figura 8.13 Efecto del sismo sobre el área afectada ladera arriba del bloque C 203
Figura 8.14 Zona afectada por rompimiento de tubería ladera arriba del Blooue C 205
Figura 8.15 Análisis de Estabilidad - Perfil CC 212

Figura 9.1 Esquema de la estructura de contención (El muro debe cimentarse en material rocoso fresco y estable) 225

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Coordenadas Cartesianas Puntos de Amarre Horizontal y Vertical 9

Tabla 4.1. Columna Estratigráfica Sector El Espino, Quebrada Santo domingo, Ciudad Bolívar. Formación Guaduas (Miembro Medio). 27
Tabla 4.2. Columna Estratigráfica, Quebrada Santa Rita (Cantera Santa Rita),. Formación Guaduas (Miembro Medio). Ciudad Bolívar. 28
Tabla 4.3. Clasificación de procesos de remoción en masa, Varnes 1978. 36

Tabla 5.1 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 1 44
Tabla 5.2 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 2 46
Tabla 5.3 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 3 48
Tabla 5.4 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 4 50
Tabla 5.5 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 5 52
Tabla 5.6 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 6 54
Tabla 5.7 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 7 56
Tabla 5.8 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 8 58
Tabla 5.9 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 9 60
Tabla 5.10 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 10 60
Tabla 5.11 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 11 63
Tabla 5.12 Relación de ensayos en cada una de las perforaciones 65
Tabla 5.13 Valores promedio de las propiedades índice por perforación (Arcillolitas). 66
Tabla 5.14 Resultados de los ensayos de resistencia al corte (Arcillolitas) 67
Tabla 5.15 Parámetros de Compresibilidad de las Arcillolitas 69
Tabla 5.16 Parámetros de Compresibilidad promedio por estratos para las Arcillolitas 70
Tabla 5.17 Valores promedio de propiedades índice y de resistencia por perforación (Areniscas). 70
Tabla 5.18 Perfil Geotécnico Típico 1, Perforaciones 1, 2 y 3 72
Tabla 5.19 Perfil Geotécnico Típico 2, Perforaciones 4, 5, 6, 7, 8 y 9 72

Tabla 6.1 Registros de nivel freático en El Espino. 76
Tabla 6.2 Inventario de estaciones hidrometeorológicas 81
Tabla 6.3 Estaciones próximas al área de estudio 81
Tabla 6.4 Precipitación de las estaciones cercanas al área de estudio. 82
Tabla 6.5 Comparación entre precipitaciones medias mensuales de las estaciones. 83
Tabla 6.6 Comparación de los estadísticos de registros de precipitación mensual. 84
Tabla 6.7 Comparación de series de datos de precipitación diaria con la Estación Sierra Morena. 85
Tabla 6.8 Valores medios mensuales y totales anuales de los parámetros del clima. 86
Tabla 6. 9 Valores de evapotranspiración media mensual por el método de Thornthwaite 88
Tabla 6.10 Resultados de laboratorio efectuados a muestras de material tomadas previo el ensayo de infiltrómetro 92
Tabla 6.11 Resultados de los ensayos de capacidad de infiltración realizados en el área de estudio
94
Tabla 6.12 Precipitación acumulada antecedente para la Estación Sierra Morena 100
Tabla 6.13 Cronología de informes técnicos del FOPAE en el periodo 1999-2002 relacionados con la posible ocurrencia de lluvias. 104

Tabla 7.1. Desplazamientos y velocidades de la última campaña (02/02/03-28/03/03) 125
Tabla 7.2 Comparación de desplazamientos y velocidades de la última campaña y el acumulado para cada mojón. 126
Tabla 7.3 Desplazamientos promedio en los ejes transversales al movimiento del deslizamiento 128
Tabla 7.4 Desplazamientos presentados en la última campaña de los mojones de los barrios San Rafael, El Rodeo y El Espino Sector III 130
Tabla 7.5 Comparación de desplazamientos y velocidades de la última campaña y el acumulado para cada mojón. 131
Tabla 7.6 Desplazamientos de los Extensómetros de Polea 147
Tabla 7.7 Desplazamiento de los extensómetros de estacas 152
Tabla 7.8 Desplazamiento de los extensómetros de estacas EE6b, EE7, EE8 y EE9 para el último periodo de medición 152
Tabla 7.9 Características de los piezómetros casagrande 156
Tabla 7.10 Características de los inclinómetros 158

Tabla 8.1. Valores del parámetro Q 187

Tabla 9.1 Sectorización de la zona teniendo en cuenta criterios de estabilidad y posibles medidas y obras de mitigación 223

LISTA DE MAPAS

MAPA ES 1-A LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO REALIZADO EN MAYO DE 2002.

MAPA ES 1-B MODELO DIGITAL DEL TERRENO (MAYO DE 2002).

MAPA ES 2-A LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO REALIZADO EN AGOSTO DE 2002.

MAPA ES 2-B MODELO DIGITAL DEL TERRENO (AGOSTO DE 2002).

MAPA ES 3-A LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO REALIZADO EN FEBRERO DE 2003.

MAPA ES 3-B MODELO DIGITAL DEL TERRENO (FEBRERO DE 2003).

MAPA ES 4-1/2 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

MAPA ES 4-2/2 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES (PERFILES GEOLÓGICOS)

MAPA ES 5 MORFODINÁMICO

MAPA ES 6 LOCALIZACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN

MAPA ES 7 DESPLAZAMIENTO DE PUNTOS DE CONTROL SUPERFICIAL EN EL PERIODO DE ABRIL 2002 – MAYO 2003 (MOJONES Y EXTENSÓMETROS)

MAPA ES 8 LOCALIZACIÓN DE FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES Y PERFILES GEOTÉCNICOS

MAPA ES 9 AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

MAPA ES 10 OBRAS Y MEDIDAS DE CONTROL Y MITIGACIÓN

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 LOCALIZACION

El sector de estudio se encuentra localizado en la parte occidental del Barrio Ismael Perdomo, en la localidad de Ciudad Bolívar, al sur de Bogotá, y comprende sectores de los barrios Cerro del Diamante, El Espino Sector I y III, y El Rodeo (sur del barrio San Rafael). La zona está limitada por los barrios San Rafael (al Norte), San Antonio del Mirador (al sur), al occidente con los barrios Espino Sector I y el barrio Santo Domingo y al oriente con el barrio Espino III Sector. En los costados Norte y Sur se encuentran respectivamente las quebradas Santa Rita y Santo Domingo. La extensión total del área de estudio es de aproximadamente 41.4 Ha. (**Figura 1.1**). Se tienen varias formas de acceso al sitio, por el sur desde la parte alta de la ladera por los barrios de Altos de Cazucá y Sierra Morena, y por la parte baja de la ladera por el barrio de La Carbonera; por el norte ingresando por el barrio Ismael Perdomo y entrando a la zona de estudio por la parte alta del Barrio San Rafael.

El lugar del movimiento se enmarca entre los 2600 msnm y 2750 msnm ascendiendo hacia el occidente entre las quebradas Santa Rita y Santo Domingo, pertenecientes a la cuenca del Río Tunjuelito por su margen izquierda. Al respaldo de la ladera vertiente con máxima elevación de 2800 msnm y en dirección hacia el sur occidente, se encuentra la Laguna de Terreros (2612 msnm) que da origen al Humedal de Terreros.

1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La existencia de actividades mineras en el sector Nor-oriental del barrio El Espino (Cantera Santa Rita) en el pasado, dio inicio a un fenómeno de inestabilidad en el terreno, el cual se ha venido agravando por el intenso proceso de urbanización no planificado, con graves deficiencias en las redes domiciliarias. Como resultado de lo anterior es frecuente la ruptura de tuberías, cuyos aportes de agua a la ladera son uno de los principales factores de reactivación del movimiento, junto con las precipitaciones, las características geomecánicas del macizo rocoso, y otros factores de intervención antrópica que se analizarán en el numeral de evaluación de amenaza.

La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito Capital ha venido estudiando el fenómeno desde sus orígenes mediante los siguientes trabajos:

- Zonificación del riesgo por inestabilidad del terreno para diferentes localidades en la Ciudad de Santafé de Bogotá realizado por Ingeocim (1998)

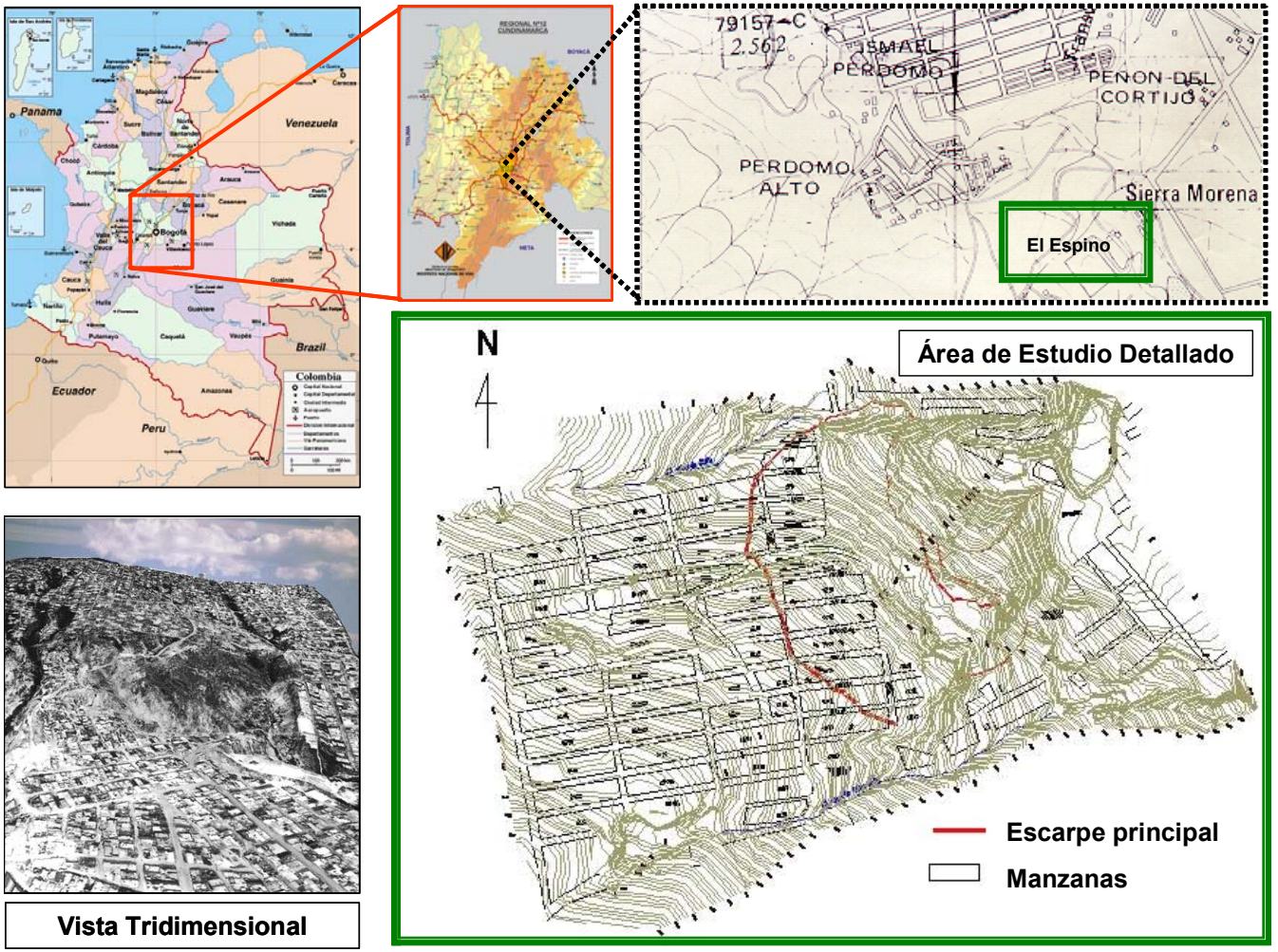


Figura 1.1. Localización de la zona de estudio – Barrios El Espino y Cerros del Diamante.

- Contratación de estudios geotécnicos, evaluación de alternativas de medidas de mitigación y diseño de obras recomendadas para estabilizar la zona de estudio con el consorcio Civiles Ltda – Hidroconsulta Ltda. (1999)
- Contratación de diseño e instalación de instrumentación geotécnica para el monitoreo y seguimiento de los fenómenos de remoción en masa con la firma Geotecnia y Cimentaciones S.A. (2000 – 2001).

Como consecuencia del fenómeno, la DPAE ha reubicado las familias cuyas casas fueron destruidas o afectadas por el movimiento.

A fin de conocer y entender la evolución probable del fenómeno y con base en ello tomar medidas preventivas en el área urbanizada aún no afectada se adelanta el presente trabajo por convenio interinstitucional entre el FOPAE e INGEOMINAS.

Específicamente el proyecto busca identificar los diferentes tipos de amenaza por deslizamiento presentes en la zona de estudio y caracterizarlos geotécnica y cinemáticamente teniendo en cuenta las propiedades de los materiales presentes, velocidades y direcciones de desplazamientos, geología local, marco geológico regional y la influencia del ciclo hidrológico para la estabilidad de las laderas.

1.3. OBJETIVOS

La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito por intermedio del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá-- FOPAE-, estableció con el INGEOMINAS el Convenio de Cooperación Especial No. 076/02, por medio del cual el INGEOMINAS se compromete a realizar el estudio de evaluación de amenaza por deslizamiento para los barrios El Espino y El Cerro del Diamante, a partir de los resultados de la instalación y monitoreo de la instrumentación geotécnica.

A través de este estudio se pretende definir el modelo de comportamiento geotécnico de la ladera y evaluar la amenaza por deslizamiento para las viviendas e infraestructura del sector.

Por lo tanto, se realiza la caracterización geotécnica del movimiento teniendo en cuenta las propiedades de los materiales presentes, velocidades y direcciones de desplazamientos, geología local, marco geológico regional y la influencia del ciclo hidrológico para la estabilidad de la ladera.

1.4. ALCANCE Y CONTENIDO DEL INFORME

A partir del mes de mayo de 2002 se comenzaron los trabajos de topografía, exploración del subsuelo e instrumentación. El INGEOMINAS ha entregado ocho informes de avance y un informe semestral, donde se describen las actividades realizadas y los resultados alojados en el monitoreo del movimiento.

Este trabajo corresponde al informe final contemplado en el convenio y contiene los resultados obtenidos del estudio de evaluación de la amenaza por deslizamiento

para los barrios El Espino y Cerros del Diamante de la localidad de Ciudad Bolívar en Bogotá. El informe contiene la metodología empleada en el estudio del deslizamiento, los resultados obtenidos en los levantamientos topográficos, la caracterización geológica y geomorfológico del área, la exploración del terreno y los ensayos de laboratorio, el análisis hidrológico, la evaluación de la instrumentación y monitoreo, y la evaluación de la amenaza del movimiento. A continuación se presenta el alcance de cada uno de estos capítulos:

- La metodología general del estudio presenta el procedimiento y las actividades que se siguieron para abordar el problema del movimiento en masa en cuestión.

- El capítulo de Levantamiento Topográfico muestra los resultados de los tres levantamientos llevados a cabo en los meses de mayo, agosto del 2002 y febrero de 2003, y sus respectivas cartografías. Estos levantamientos topográficos se trabajaron a una escala de 1:1000 presentando curvas de nivel cada metro.

- Se realizó la caracterización geológica regional y local, cartografiando las unidades superficiales en el área de estudio. Así mismo, se realizó el estudio de la geomorfología.

- En el capítulo de Exploración del Subsuelo y Ensayos se describe los perfiles estratigráficos encontrados en las 11 perforaciones realizadas, alcanzando una profundidad promedio de 30m. Se presentan los resultados de propiedades mecánicas de los materiales a partir de los ensayos de laboratorio ejecutados.

- La información hidrológica analizada permite una mejor evaluación de la situación real y la generación del mapa de amenaza teniendo en cuenta aspectos fundamentales del ciclo hidrológico. En este estudio se realiza la caracterización climatológica del área estableciendo un posible volumen de infiltración de aguas lluvias en el movimiento y un estimativo de infiltración de aguas de la red de acueducto y alcantarillado por rotura de tubería.

- En el capítulo de Evolución Temporal se describen los sistemas de instrumentación utilizados -- Mojones, Extensómetros, Piezómetros, Inclinómetros, Registros Fotográficos de estaciones -, y el análisis del correspondiente monitoreo, así como los análisis del movimiento a partir de las tres topografías realizadas.

- En la Evaluación de Amenaza se hizo un análisis de la parte regional y del movimiento principal objeto del estudio. El análisis regional se realizó con base en fotointerpretación de geoformas –a partir de fotografías aéreas a una escala aproximada de 1:6.000. En la evaluación de la amenaza para el movimiento principal se analizó primero la génesis del movimiento, se estableció el mecanismo de falla y el desarrollo del movimiento a partir de

modelos numéricos y de las propiedades del subsuelo obtenidas. Se entrega el mapa de amenaza por movimientos en masa para la zona de estudio.

1.5. CONCEPTOS BÁSICOS DE AMENAZA

A continuación se definen algunos términos relacionados con la amenaza por movimientos en masa tratados en el presente estudio, los cuales han sido tomados de MUÑOZ, F (2001) y adaptados por INGEOMINAS. Los conceptos de movimientos en masa y sus clasificaciones han sido tomados y adaptados de VARNES, 1978, e INVIAS, 1998.

Evento. Registro en el tiempo y en el espacio de un fenómeno que caracteriza una amenaza. Descripción de un fenómeno en término de sus características, su dimensión y ubicación geográfica.

Amenaza Natural. Es el fenómeno natural o grupo de condiciones o eventos que tienen el potencial de causar daño, dentro de los que se destacan movimientos en masa, volcanes y sismos. En el caso de los movimientos en masa, la representación de la amenaza parte de un conocimiento de los procesos que dan lugar al evento amenazante, e involucra las propiedades físicas del fenómeno: Tipo, actividad, velocidad, área de afectación, volumen, mecanismos de falla, trayectoria, y probabilidad de ocurrencia, entre otros.

Vulnerabilidad: Es la capacidad de anticipar, asimilar, resistir y recuperarse del daño sufrido por la acción de una amenaza.

Riesgo: Es la condición que se deriva de considerar la posibilidad de ocurrencia de una o varias amenazas en un contexto dado en donde sí existe conocimiento de la amenaza y sí involucra la toma de una decisión. Es lo que puede pasar cuando concurren la amenaza y la vulnerabilidad e implica la toma de decisión del individuo y la comunidad.

Emergencia. Corresponde a una situación que aparece cuando, en la combinación de factores conocidos, surge un fenómeno o suceso que no se esperaba, eventual, inesperado y desagradable que puede causar daños o alteraciones en las personas, los bienes, los servicios o el medio ambiente, sin exceder la capacidad de respuesta de la comunidad afectada.

Desastres: De acuerdo a la legislación colombiana en cuanto a prevención y atención de desastres el artículo 18o, del Decreto 919 del 1 de Mayo de 1989 efectúa la siguiente declaración en cuanto a la definición de desastre: Artículo 18o. Definición de desastre: “Para efectos del presente estatuto, se entiende por desastre el daño grave o la alteración grave de las condiciones normales de vida en un área geográfica determinada, causada por fenómenos naturales y por efectos catastróficos de la acción del hombre en forma accidental, que requiera por ello de la especial atención de los organismos del Estado y de otras entidades de carácter humanitario o de servicio social”.

Movimiento en Masa: Se define como todo desplazamiento hacia abajo (vertical o inclinado en dirección del pie de la ladera) de un volumen de material litológico importante, en el cual el principal agente es la gravedad. Los movimientos en masa se pueden agrupar de acuerdo a su mecanismo de falla (Varnes, 1958) en: Deslizamientos, Flujos de Tierra, Flujos de Detritos, Reptamientos, Volcamientos y Caídas entre otros.

Deslizamientos: Son movimientos caracterizados por desarrollar una o varias superficies de ruptura, una zona de desplazamiento descendente con una componente horizontal apreciable, y una zona de acumulación de material desplazado bien definidas. Ocurren sobre laderas de pendientes suaves a escarpadas sobre todo tipo de materiales litológicos, y a diferentes velocidades. El deslizamiento puede ser rotacional –con superficie de falla curva-, y traslacional –con superficie de falla planar-. El deslizamiento de cuñas constituye un caso especial de deslizamiento traslacional, en el cual la masa que se desplaza se apoya sobre la intersección de dos discontinuidades estructurales.

Flujos: Son movimientos espacialmente continuos de materiales litológicos de textura fina y gruesa que se desplaza a lo largo de una superficie de falla bien definida. Aunque comúnmente los flujos son caracterizados como movimientos rápidos y compuestos de lodos también pueden ser lentos y compuestos por rocas y suelos no saturados. En general estos movimientos se caracterizan por presentar superficies de ruptura planares a lo largo de una discontinuidad litológica, determinada por el contacto suelo – roca o roca meteorizada – roca fresca, dejando superficies pulidas y estriadas.

Reptamiento: Es un movimiento superficial lento y continuo de materiales de baja cohesión, favorecido por el agua. Este tipo de movimiento no presenta superficie de ruptura pero sobre el terreno se desarrollan varias geoformas o características que permiten su detección.

Volcamientos: Son movimientos producidos sobre una ladera o talud, debidos a colapsos de material rocoso por una heterogeneidad litológica y estructural. El movimiento se produce por acción de la gravedad y por rotación hacia delante de un material rocoso.

1.6. AGRADECIMIENTOS

El INGEOMINAS agradece a la Dirección de Atención y Prevención de Emergencias del Distrito por su apoyo y confianza en la realización de este trabajo, al igual que a todo el personal que permitió la obtención de los resultados que se exponen en el presente trabajo.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

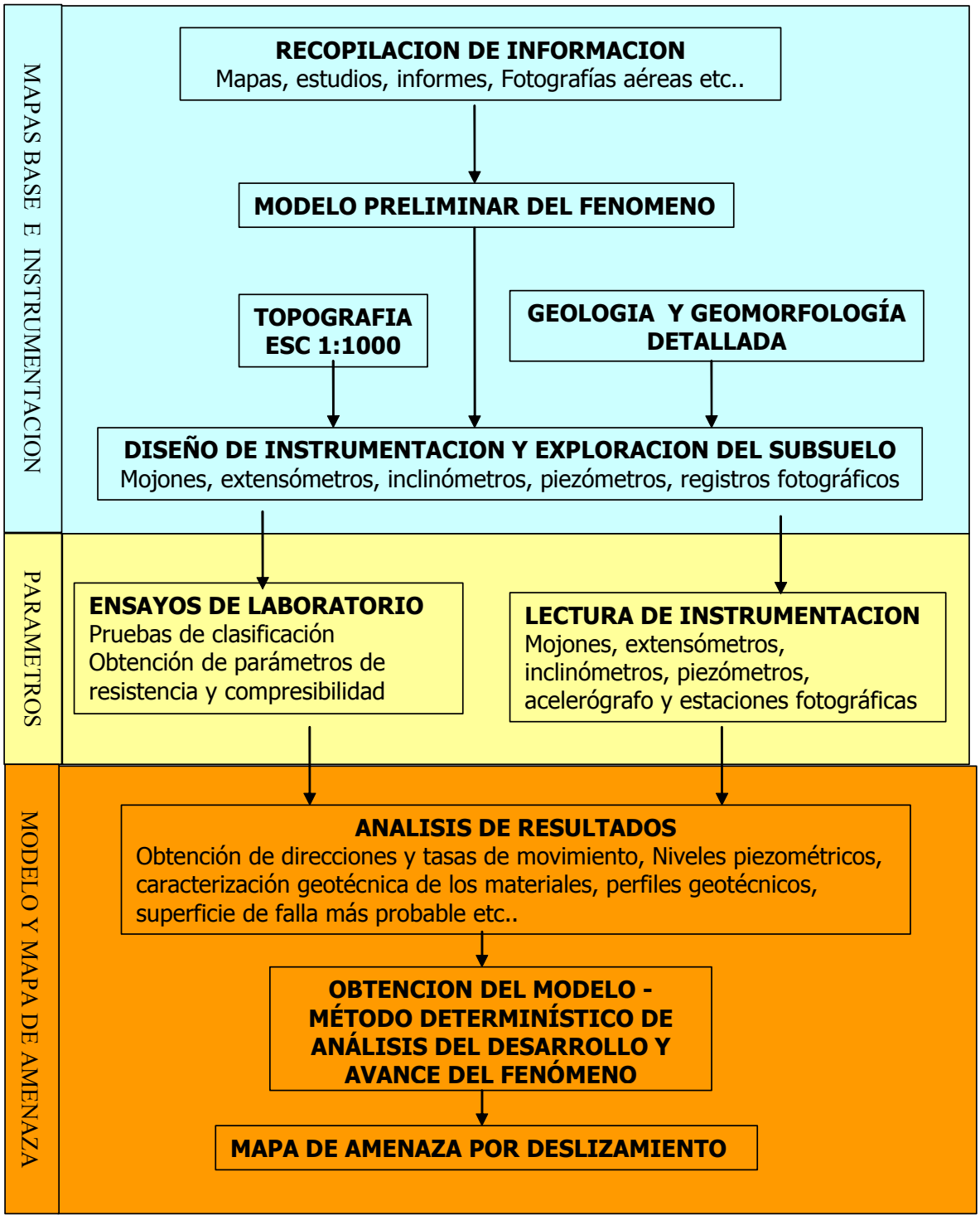
La zonificación de amenazas por movimientos en masa pretende agrupar la superficie de la corteza en zonas con características de comportamiento semejantes propensas a la ocurrencia de fenómenos desestabilizadores en las laderas que afectan directamente a la comunidad.

Con el fin de obtener el mapa de amenaza por movimientos en masa en la ladera de estudio se sigue un método determinístico empleando una escala 1:1.000, desarrollándose el proyecto en tres etapas según se muestra en la **Figura 2.1.**

1. **Obtención de mapas base e instrumentación:** Hace referencia a la conformación de la cartografía básica (Topografía, Geología y Geomorfología), al diseño e instalación de la instrumentación y la exploración del subsuelo a partir de un modelo preliminar del fenómeno.

2. **Obtención de Parámetros:** En esta etapa se pretende encontrar propiedades mecánicas de los materiales, por medio de ensayos de laboratorio así como las tasas y direcciones de movimientos en superficie y profundidad, tomando lecturas periódicas de la instrumentación instalada (mojones, extensómetros, inclinómetros, piezómetros y acelerógrafo - la DPAE tiene instalado en la localidad de Sierra Morena un acelerógrafo el cual es monitoreado por el INGEOMINAS-), así como llevando un registro fotográfico sobre algunas zonas. También se realiza un análisis hidrológico de la zona.

3. **Generación del modelo y mapa de Amenaza:** En esta etapa se pretende la obtención del modelo y generación del mapa de amenaza, a partir de la caracterización mecánica del macizo rocoso y de las lecturas de instrumentación, junto con la información de hidrología y geología detallada, se obtiene un modelo del fenómeno de inestabilidad de la ladera. Este modelo se analiza siguiendo análisis numéricos de equilibrio límite y mediante elementos finitos. Una vez definido el modelo se plantea el mapa de amenaza para la zona de estudio teniendo en cuenta la génesis del fenómeno, el avance del mismo y la amenaza sobre la población, viviendas e infraestructura.


MAPAS BASE E INSTRUMENTACION
RECOPILACION DE INFORMACION
Mapas, estudios, informes, Fotografías aéreas etc..
MODELO PRELIMINAR DEL FENOMENO
TOPOGRAFIA ESC 1:1000
GEOLOGIA Y GEOMORFOLOGÍA DETALLADA
DISEÑO DE INSTRUMENTACION Y EXPLORACION DEL SUBSUELO
Mojones, extensómetros, inclinómetros, piezómetros, registros fotográficos
PARAMETROS
ENSAYOS DE LABORATORIO
Pruebas de clasificación
Obtención de parámetros de resistencia y compresibilidad
LECTURA DE INSTRUMENTACION
Mojones, extensómetros, inclinómetros, piezómetros, acelerógrafo y estaciones fotográficas
MODELO Y MAPA DE AMENAZA
ANALISIS DE RESULTADOS
Obtención de direcciones y tasas de movimiento, Niveles piezométricos, caracterización geotécnica de los materiales, perfiles geotécnicos, superficie de falla más probable etc..
OBTENCION DEL MODELO - MÉTODO DETERMINÍSTICO DE ANÁLISIS DEL DESARROLLO Y AVANCE DEL FENÓMENO
MAPA DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO

CAPITULO 3

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO EL ESPINO

3.1 INTRODUCCIÓN

Para el seguimiento temporal del deslizamiento de El Espino fue necesario el levantamiento topográfico en tres oportunidades (Mayo, Agosto de 2002 y Enero de 2003). En la primera fecha (Mayo de 2002) se realizó un levantamiento general tanto de las construcciones existentes (viviendas y vías) como de la zona inestable haciendo énfasis en escarpes y grietas. Los dos levantamientos posteriores fueron realizados con el fin de actualizar la topografía de la zona inestable en especial toda el área localizada al Este del escarpe principal (**Mapas ES 1-A, ES 2-A, ES 3-A**). Estos levantamientos se trabajaron para escalas 1:1000 y equidistancias en curvas de nivel de un metro.

3.2 METODOLOGÍA

Para el levantamiento topográfico se empleó una poligonal cerrada apoyada en radiaciones para el levantamiento de detalles presentes en la zona tales como obras civiles, vegetación permanente, quebradas, escarpes, grietas, vías, etc. Esta poligonal está ligada a la red de puntos localizados en los alrededores de la zona de estudio y que poseen coordenadas amarradas a la malla cartográfica del IGAC.

La poligonal inicial utilizada consta de 18 vértices principales y 37 puntos auxiliares que sirvieron para definir la topografía de la zona. Para la obtención de las coordenadas geográficas de la red topográfica levantada, fue necesario ligar los puntos a los mojones M17, M17A y GPS 36 suministrados por la Dirección para la Atención y Prevención de Desastres del Distrito (DPAE). En la **Tabla 3.1** se pueden observar las coordenadas planas de estos puntos.

CODIGO	NORTE (m)	ESTE (m.)	COTA (msnm)
M17	97901,238	89465,764	2770,033
M17A	97973,935	89571,683	2737,550
GPS 036	98011,396	89553,691	2728,296

Tabla 3.1 Coordenadas Cartesianas Puntos de Amarre Horizontal y Vertical

En lo que respecta al amarre altimétrico de la poligonal utilizada fue necesario la realización de circuitos de nivelación que fueron contra nivelados para garantizar cierres acordes con las precisiones que se requerían.

3.3 EQUIPOS

Para el empleo de los equipos se tiene en cuenta la parte planimétrica y la parte altimétrica. Para la primera se utilizó una estación semitotal de marca Sokkisha referencia SDM3E y un distanciómetro de marca Wild, referencia Distomat DI2000, acoplado a un teodolito geodésico marca Wild referencia T2 con lectura directa al segundo. La desviación estándar típica para el distanciómetro es del orden de 3 mm más 1 ppm con un tiempo de medición de 1,5 segundos. Las distancias horizontales fueron tomadas con precisión del orden del milímetro al igual que se realizaron correcciones por presión y temperatura a cada una de las mismas.

Para el amarre altimétrico del levantamiento topográfico se utilizó un nivel de precisión marca Wild, referencia NAK2.

A continuación se resumen las características más importantes de los equipos utilizados

3.3.1 Estación semitotal sokkisha referencia SDM3E

Este instrumento fue utilizado para el levantamiento topográfico de la zona de estudio y para la localización de la red de mojones. En la **Foto 3.1** se puede apreciar el instrumento. Sus características técnicas son:

Medición de Distancias

Rango de Distancia	Prisma Sencillo 1000 m. Prisma Triple 1600 m
Desviación Estándar	± (5mm + 5 ppm)
Tiempo de Medida	MEAS 4 sg. TRACK 0.5 sg.
Temperatura de Trabajo	–20° C hasta +50° C
Corrección Atmosférica	–99 hasta 199 ppm

Medición Angular

Lectura directa	10”
Estimación	5”

Sensibilidad de Niveles

Nivel del Plato	30”/2 mm
Nivel Circular	10´ / 2mm

3.3.2 Teodolito geodesico WILD T-2

Este es un instrumento geodésico y fue utilizado para la medición de los ángulos horizontales para el amarre de la red de control a los puntos geodésicos suministrados por la DPAE. Sus características técnicas son:

Aumento del Anteojo	30
Diámetro del Campo visual a 100 mts (mts)	29
Distancia de Enfoque mínima (m)	2,2

Desviación Estándar Horizontal	0,8 "

Índice Círculo Vertical Automático

Margen de Centrado	±5'
Precisión de Centrado	±0,3"
Lectura Directa	1"
Estimación	0,1"
Sensibilidad del Nivel Índice	30"
Peso del Instrumento (Kg.)	6,0



Foto 3.1 Estación Total Sokkisha

3.3.3 Nivel de ingeniero NAK2

Es un instrumento sólido y fiable con una excelente óptica en el anteojo y gran precisión de medición. Se ha utilizado para la nivelación de la red de mojones y para el amarre altimétrico del proyecto a los puntos geodésicos suministrados por la DPAE. Sus características técnicas son:

Desviación Estándar (mm) para 1 km.	
De doble nivelación con placa planoparalela	0,7 hasta 0,3
Aumento (X)	32
Diámetro Libre el Objetivo (mm)	45

Campo Visual a 100 m (m) .	2,4
Distancia Mínima de Enfoque (m)	1,5
Constante de Multiplicación	100
Constante de adición	0
Precisión del Centrado del Compensador	±0,3"
Circulo Horizontal.	Si
Peso (kg.)	2,4

3.4 MAPAS TOPOGRÁFICOS

A continuación se resumen los aspectos más importantes relacionados con cada uno de los levantamientos topográficos efectuados:

3.4.1 Topografía mayo de 2002

En esta ocasión el levantamiento tuvo dos objetivos fundamentales: El primero consistió en el levantamiento general de la zona de estudio, buscando obtener curvas de nivel cada metro al igual que levantar toda la red de obras civiles y haciendo énfasis en detalles referentes a los escarpes, grietas, y demás en la zona de mayor afectación por el fenómeno. El segundo objetivo se relacionó con la materialización de la red de control interno y externo de mojones que nos servirían para el seguimiento del fenómeno. El área total levantada fue de aproximadamente 42 Ha. En la **Figura 3.1** se puede apreciar la topografía y los detalles de obras civiles y zona de deslizamiento.

El error de cierre para la poligonal principal utilizada fue de 0,105 mts, en un perímetro de 2333,33 mts, resultando al final un grado de precisión de 1/22222

Se resalta en esta oportunidad como la zona principal de fallamiento (**Mapa ES1-A**) presentaba escarpes del orden de 3 a 5 metros y la mayoría de las construcciones del barrio el Diamante aún permanecían intactas (ver **Foto 3.2**).

3.4.2 Topografía agosto de 2002

En el mes de agosto de 2002 se realizó un segundo levantamiento topográfico de la zona noreste de la grieta principal con el fin de actualizar las formas del terreno dados los grandes cambios presentados en la topografía de la zona y la necesidad de contar con una topografía reciente para ajustar el modelo de elementos finitos de la zona del deslizamiento; se hizo necesario entonces la toma de datos planimétricos y altimétricos del escarpe y del cuerpo principal, llevando el levantamiento hasta la parte baja sobre la zona del barrio Perdomo.



Foto 3.2 Desplazamiento vertical y horizontal sobre escarpe principal

En el **Mapa ES1-B** se presenta el modelo digital del terreno para este levantamiento topográfico inicial.

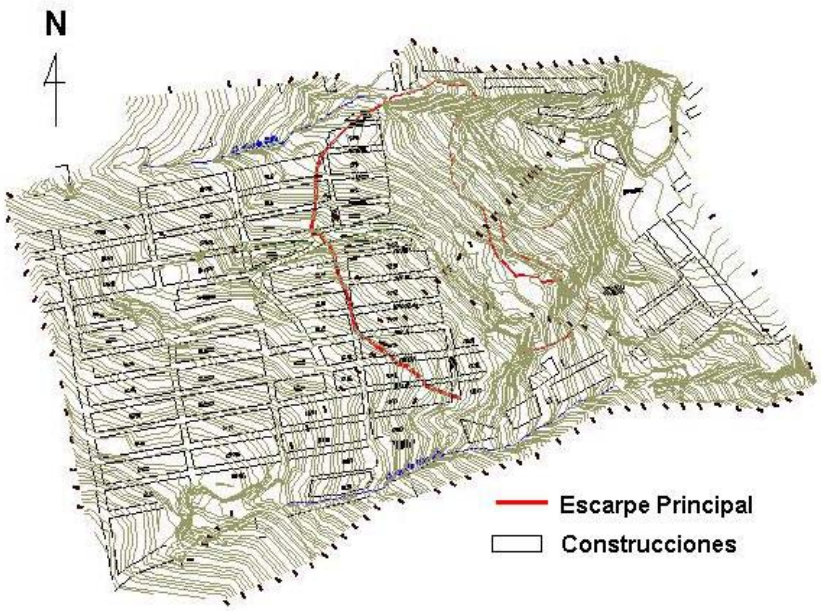


Figura 3.1 Mapa del levantamiento topográfico de Mayo de 2002

En esta ocasión se tomaron diferentes perfiles sobre la zona y se detallaron algunas otras grietas que se han evidenciado con fecha posterior al levantamiento inicial (Abril- Mayo). Igualmente se hizo el levantamiento topográfico de la zona NE (cerca al mojón M-1- Barrio San Rafael) que se venía levantando afectando un sector del Barrio San Rafael.

Para el levantamiento de esta nueva topografía se utilizaron algunos de los puntos anteriores al igual que se aprovechó la red de mojones para realizar radiaciones sobre algunos sectores en donde se requería información altimétrica y planimétrica.

En esta ocasión la precisión en la red planimétrica fue del orden de 1/2000. El cierre del polígono se realizó sobre el mojón correspondiente al GPS 45 localizado en la parte SE del estudio, cerca al barrio Perdomo. El área total levantada en esta oportunidad fue de 19,4 Ha (**Mapa ES-2A** y **Figura 3.2**). En el **Mapa ES-2B** se ilustra el modelo digital del terreno para el levantamiento topográfico efectuado en este período.

Comparando la topografía levantada en el mes de Mayo con la del mes de Agosto, se puede resaltar la demarcación de la antigua grieta principal como un escarpe, la aparición de nuevas grietas en la zona noreste a la grieta principal especialmente cerca al antiguo escarpe de la cantera Santa Rita al igual que la aparición de grietas al sureste de la grieta principal. Para esta fecha la diferencia de nivel con la topografía inicial hacia la zona del escarpe principal toma valores de hasta 8 metros.

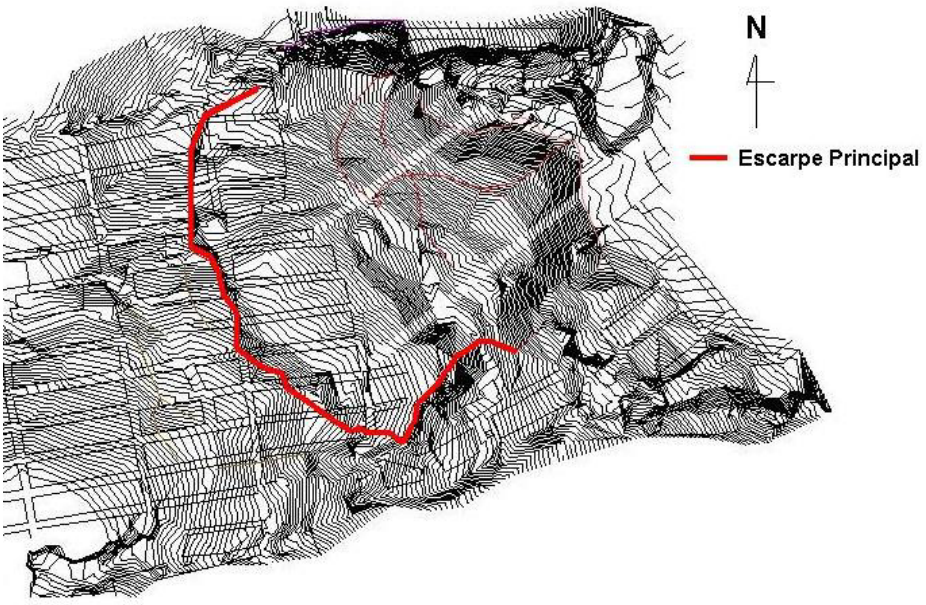


Figura 3.2 Mapa de levantamiento topográfico de Agosto de 2002

3.4.3 Topografía febrero de 2003

Con el fin de tener un nuevo mapa de curvas de nivel, en especial de la zona afectada por los desplazamientos del escarpe principal, se procedió a levantar nuevamente las grietas, quebradas, etc., utilizando para ello los puntos correspondientes a M2, M1, SRA0, ES11, Aux-F1, Aux-F2, Aux-F3 y Aux-F4. Para este levantamiento se utilizó el método de radiaciones, resultando al final un total de 500 puntos. Este nuevo levantamiento se anexó al listado inicial de puntos radiados en Mayo del 2002 y se obtuvo así un mapa actualizado de la zona de estudio.

Durante el levantamiento de los detalles se tomaron medidas a puntos materializados al inicio del estudio (Mayo 2002) obteniendo al final valores de desplazamiento que sirvieron para complementar los procesos de denudación que se vienen sucediendo. Sobre uno de los puntos medidos (delta 13) localizado al costado sur de la quebrada Santo Domingo, se obtuvo para un periodo de 10 meses un vector de desplazamiento horizontal del orden de 3,7 metros con una dirección de 47,1 grados y una componente vertical del orden de -20 centímetros.

El cierre del polígono se efectuó a partir del punto SR-A0 en dirección al mojón M-17 de la línea externa de control. El error de cierre en dirección fue de 5 segundos y en distancia del orden de 26 mm, para un error de cierre del orden de 1/ 85000. El área total levantada fue de 22,7 Ha, en donde se incluyó un sector del Barrio San Rafael sobre la que se localiza la nueva malla de mojones. En el **Mapa ES3-A** y en la **Figura 3.3** se puede observar el sector de la topografía actualizada y en el **Mapa ES3-B** se ilustra el modelo digital del terreno.

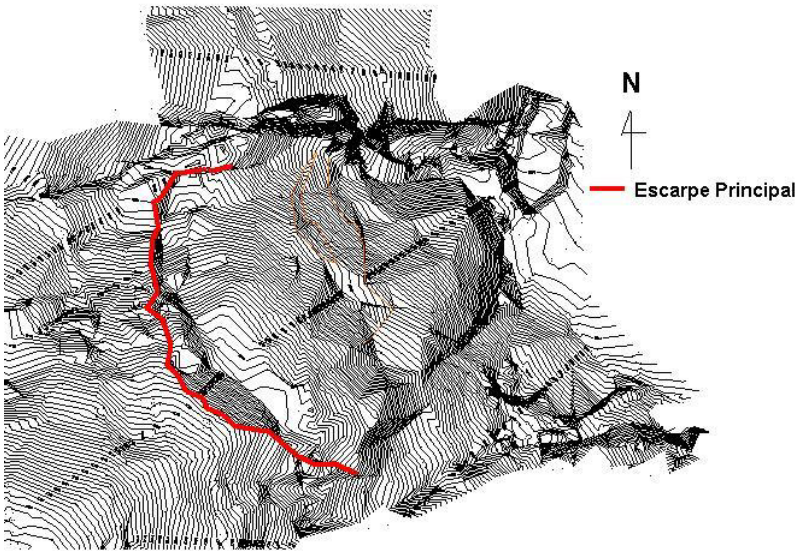


Figura 3.3 Mapa del levantamiento topográfico de Febrero de 2003

Es importante resaltar que en los tres levantamientos topográficos se utilizaron poligonales de diferentes características y con áreas levantadas diferentes, sin embargo el máximo error encontrado fue de 7 mm en la componente Norte-Sur para la poligonal del levantamiento de Mayo/02, el cual es despreciable al momento de obtener las curvas de nivel con equidistancia de 1 m.

CAPITULO 4

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOMORFOLOGÍA

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La zona trabajada hace parte del flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelito, presentando una morfología ondulada, con taludes entre 10 y 30 grados y se ubica en el sector oriental de Soacha, donde se observan rocas sedimentarias con edades que van desde el Cretáceo Superior hasta depósitos inconsolidados de edad reciente. Según el mapa Geológico de la Zonificación Geotécnica de Bogotá, (INGEOMINAS, 1988), elaborado a escala 1:25.000, las rocas más antiguas corresponden a las de la Formación Chipaque (Ksch). Suprayaciendo esta unidad aflora el Grupo Guadalupe (Ksgp), observándose las Formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Formación Plaeners (Ksgp) conjuntos Medio (Ksgpm) y Superior (Ksgps) y Formación Labor y Tierna (Ksglt); sobre el Grupo Guadalupe se encuentra la Formación Guaduas (Ktg) conjunto Inferior (Ktgi) y Medio (Ktgm) (**Figura 4.1**). Los Grupos y Formaciones nombrados anteriormente se encuentran cubiertos en algunas partes por depósitos Cuaternarios como son Complejo de Conos (Qcc), Terrazas Bajas (Qtb), Llanuras Aluviales (Qlla), Coluviones (Qdp), Material de Relleno de Excavaciones (Qr) y Suelos Residuales (Qrs).

En un estudio realizado por INGEOCIM (1998) en los alrededores del área del Espino, se hace una cartografía más detallada a escala 1:10.000, en la cual se diferencian para la formación Guaduas los conjuntos Inferior (Ktgi) y Medio (Ktgm) coincidiendo en parte con las unidades descritas por el INGEOMINAS para el sector (**Figura 4.2**). Sin embargo, en la cartografía del INGEOMINAS, debido a la escala de trabajo no se diferenció el conjunto inferior de la Formación Guaduas, pero a diferencia de INGEOCIM, se cartografiaron con bastante detalle las unidades de complejos de conos, terrazas bajas, depósitos coluviales y aluviales así como de suelos residuales. Estas unidades resultan ser más útiles para el objetivo del estudio, ya que permiten deducir con mayor facilidad las condiciones de estabilidad de los materiales geológicos.

A continuación se hace una descripción de cada una de las unidades presentes en el marco regional escogido para el presente estudio (INGEOMINAS, 1988).

4.1.1 Formación Chipaque (Ksch)

Definida por Hubach E. (1931), se presenta en el extremo suroccidental de la zona, conformando el núcleo del anticlinal de Cheba, esta formación está constituida de base a techo por un conjunto de lutitas negras arcillosas, carbonosas, piritosas, finamente laminadas, intercaladas esporádicamente con limolitas y areniscas de grano muy fino; la parte superior de esta formación se compone de una alternancia de lutitas negras, areniscas de grano muy fino y limolitas de color gris amarillento, cuarzosas, compactas, ligeramente friables.

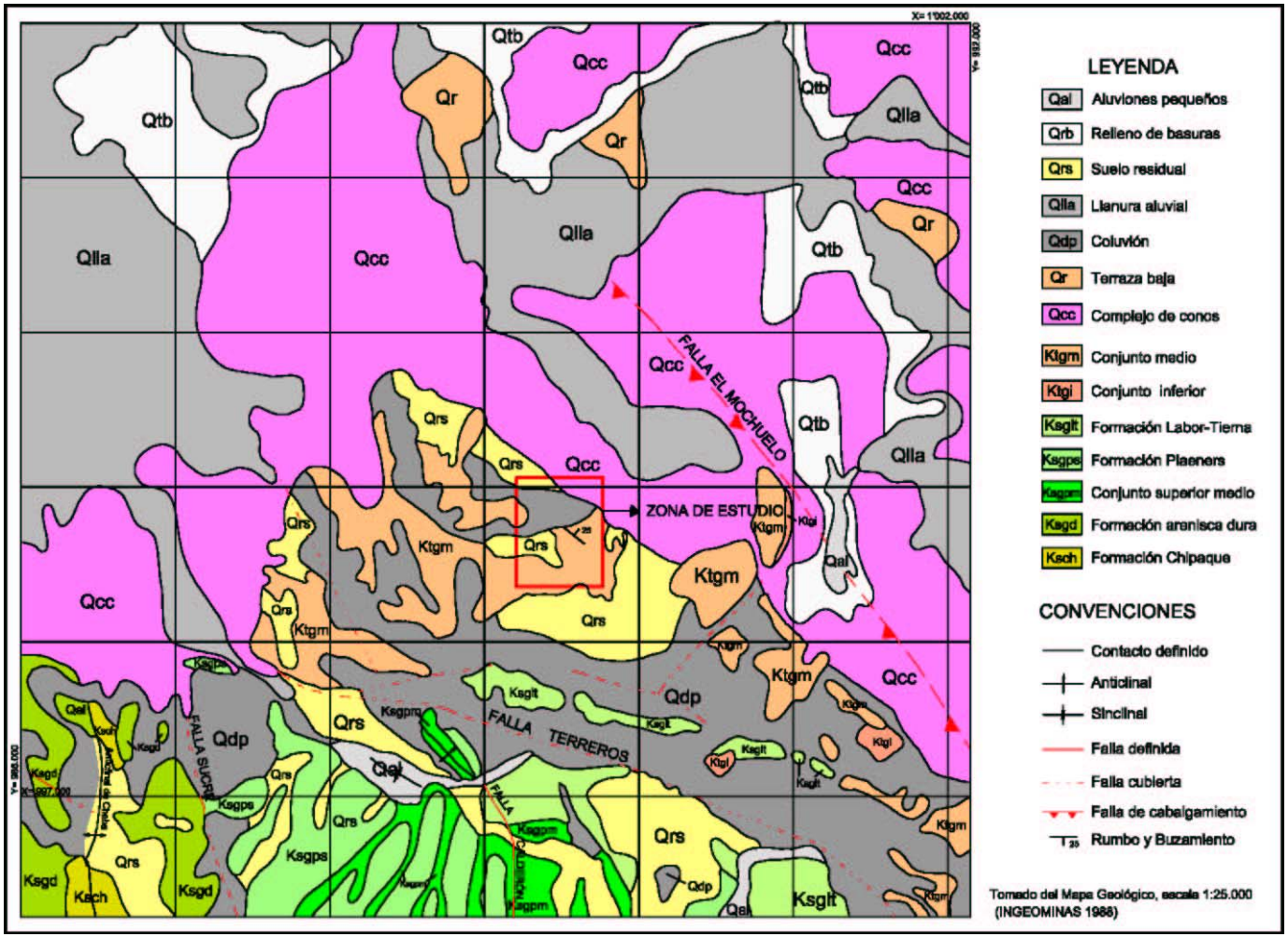


Figura 4.1. Geología Regional (Tomado de la Zonificación Geotécnica de Bogotá, INGEOMINAS 1988).

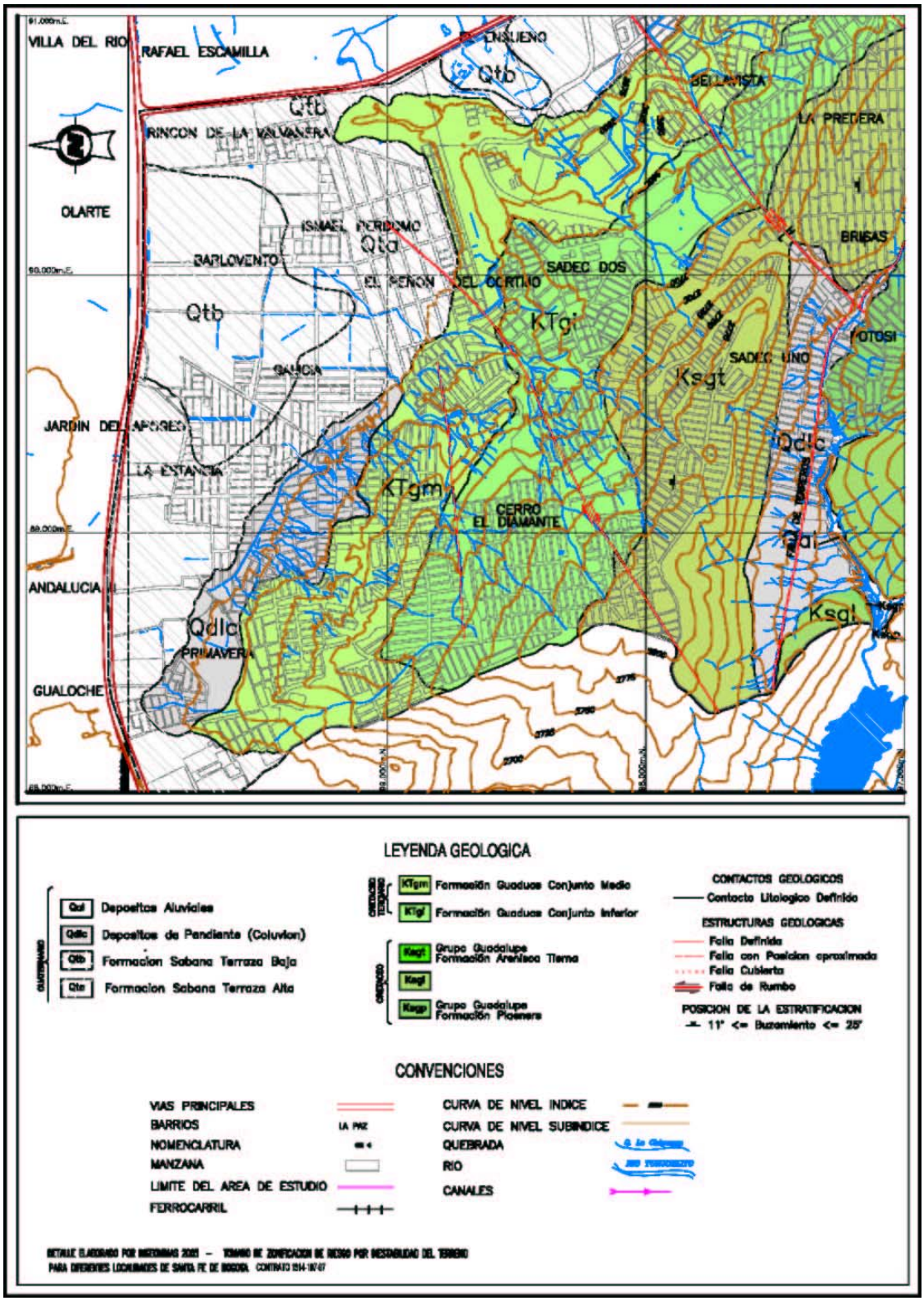


Figura 4.2. Detalle de Geología regional, mostrando los conjuntos medio (Ktgm) e inferior (Ktgi) de la formación Guaduas. (Tomado de INGEOCIM, 1998).

4.1.2 Grupo Guadalupe (Ksg)

Fué definido por Hettner A. (1892) y redefinida por Hubach E. (1957) y Renzoni G. (1968), quienes lo subdividieron en Formación Arenisca Dura (Ksgd), Formación Plaeners (Ksgp) y Formación Labor y Tierna (Ksglt).

4.1.2.1 Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Definida por Hubach E. (1931), aflora en los flancos del anticlinal de Cheba al suroccidente del área de estudio, está conformada por arenisca cuarzosa, blanca a amarillenta por alteración, grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a gruesa, intercalada esporádicamente con limolitas silíceas y arcillolitas de color gris claro.

4.1.2.2 Formación Plaeners (Ksgp)

Esta unidad fué definida por Hubach E. (1931) y redefinida por Renzoni G. (1968), hace parte de los flancos del anticlinal de Cheba al suroccidente de la zona, se presentan los Conjuntos Medio (Ksgpm) y Superior (Ksgps).

El Conjunto Medio (Ksgpm) está constituido por areniscas blancas a amarillentas cuando están alteradas, cuarzosas, de grano fino a muy fino, con estratificación muy delgada a masiva, intercaladas con limolitas y arcillolitas, grises amarillentas a grises verdosas cuando están alteradas, ricas en Siphogenerinoides.

El Conjunto Superior (Ksgps), lo conforman limolitas silíceas y arcillolitas duras a blandas, intercaladas con areniscas de grano muy fino, grises amarillentas, ricas en Siphogenerinoides y restos de peces.

4.1.2.3 Formación Labor y Tierna (Ksglt)

Definida por Renzoni G. (1968), se ubica en afloramientos puntuales situados en el centro (nororiente de la Represa Terreros) y suroriente de la zona, presenta de base a techo un conjunto inferior de areniscas blancas a grises claras y amarillas meteorizadas, cuarzosas, de grano fino a grueso, con estratificación gruesa a muy gruesa. La parte superior del conjunto lo conforman areniscas cuarzosas y feldespáticas, de grano medio a conglomerático, ligeramente duras a friables, con estratificación cruzada, intercaladas con capas delgadas de arcillolitas grises claras.

4.1.3 Formación Guaduas (Ktg)

Definida por Hettner (1892) y redefinida por Hubach (1957), localizada en la mayor parte del área y sobre esta unidad se presentan los problemas de agrietamientos y movimientos en masa que afectan la zona estudiada. La formación Guaduas consta

de tres conjuntos: El Inferior con predominio arcilloso, el Medio con predominio arenoso y el Superior arcilloso. Una descripción más detallada de esta unidad se da más adelante cuando se trata la geología local (**Mapa ES-4**).

4.1.4 Depósitos Cuaternarios

Corresponden a depósitos inconsolidados y semiconsolidados, y regionalmente se presentan los siguientes:

- **Complejo de Conos (Qcc)**

Los principales se asocian a los depósitos fluvioglaciares del río Tunjuelito, conformado por bloques, guijarros y guijos, gravas arenosas y arcillas. De acuerdo al material más grueso (gravas, guijos y bloques) existe una secuencia de sedimentos finos, con esporádicos bloques. Debido a la presencia de bloques dentro de estos sedimentos finos, más la inclinación de estos depósitos (3 a 7 grados) en el sentido de la pendiente, lo han considerado dentro de la parte superior del cono del río Tunjuelito, que tiene su ápice en el sector de Usme y su parte distal en los barrios de Bosa, Class, Keneddy, Bavaría y San Rafael. Hacia el occidente del área se observan los conos de Soacha y Terreros, que son de menor espesor; el cono de Soacha es aluvial, con un mayor transporte y mejor selección que el cono de Terreros, que refleja un transporte muy corto y cuya fuente principal fueron las lutitas silíceas del Grupo Guadalupe.

- **Terrazas bajas (Qtb)**

Corresponden a depósitos del río Tunjuelito y se ubican al norte y nororiente de la zona, presentan una superficie plana a ligeramente ondulada y poco disectada, que se eleva aproximadamente 5 metros en promedio sobre el nivel de las llanuras aluviales actuales. Se componen de limos arcillosos y los contactos con los Complejos de Conos son netos, marcados por la presencia de un ligero escarpe. El contacto con las llanuras aluviales también es neto.

- **Llanuras Aluviales (Qlla)**

Formadas por los ríos Bogotá y Tunjuelito que han cortado y erosionado los depósitos más antiguos correspondientes al Complejo de Conos y a las Terrazas aluviales, se ubican al norte y oriente del área. Son depósitos predominantemente limoarcillosos, en el área del río Bogotá se amplia más al nororiente de Soacha y en el valle del río Tunjuelito se ensancha hacia el norte hasta confundirse con la llanura aluvial del río Bogotá.

- **Aluviones pequeños (Qal)**

Se restringen a los lechos de los ríos y quebradas. La litología de estos depósitos depende de la energía y dinámica de cada corriente así como de las formaciones geológicas que disectan. Se componen de bloques de areniscas, subangulares a

subredondeados, de hasta dos metros de diámetro, variando a gravas, dentro de matrices arenosas a limoarcillosas.

- **Coluviones (Qdp)**

Son depósitos de ladera , provenientes de la fracturación y el arrastre de los materiales rocosos, cuyo movimiento se ha facilitado también por las pendientes; tienen una amplia distribución y se ubican principalmente hacia la zona central y occidental del área, en estos depósitos existe un predominio de la matriz sobre los guijos y bloques, pero en otros sectores predominan los bloques sobre la Matriz (Talus) como es el caso de los depósitos provenientes de las unidades arenosas de las Formaciones Arenisca Dura, Labor y Tierna y conjunto arenoso de la Formación Guaduas. Los depósitos provenientes de unidades arcillosas y alternancia de arcillolitas y areniscas, tales como las Formaciones Chipaque y Guaduas donde predomina la matriz sobre el material grueso, se consideran Coluviones.

4.1.5 Suelos Residuales (Qrs)

Se observan distribuidos indiscriminadamente a lo largo de la zona, considerándose como suelo residual el material producto de la meteorización e intemperismo de las rocas que no han sufrido transporte y se desarrollan en áreas con pendiente suave. Las unidades geológicas que han permitido su mayor desarrollo son las Formaciones Chipaque, Plaeners y Guaduas.

4.1.6 Material de Relleno de Excavación (Qr)

Localizados al norte y nororiente de la zona, en inmediaciones del valle del río Tunjuelito, corresponden a zonas bajas que han sido colmatadas con arenas, limos y arcillas, provenientes de excavaciones en zonas a urbanizar, algunos se han utilizado en parte para cimentación de urbanizaciones.

4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL REGIONAL

Dentro de las estructuras principales que se observan en la zona está el anticlinal de Cheba, al suroccidente del área, el cual está limitado al oriente por la falla inversa de Mochuelo. Este anticlinal presenta una orientación NNE-SSW a N-S, su núcleo está en posición normal y sus flancos están fallados, su flanco oriental está afectado por las fallas de Mochuelo al oriente y Sucre al occidente, presentando zonas falladas de dirección predominante NW-SE y NE-SW (**Figura 4.1**).

El sector se puede dividir en bloques, es así como se tiene un bloque occidental limitado por la falla de Sucre al occidente, falla de Calderón al oriente y la falla de Terreros al norte, donde se presentan pliegues sinclinales estrechos y de poca longitud con dirección principal NW-SE; otro bloque esta limitado por la falla de Calderón al occidente y la falla de Terreros al norte, presentándose una estructura anticlinal de dirección NS y un último bloque estaría limitado al sur por la falla de Terreros, al oriente por la falla de Mochuelo y al norte y occidente se hunde bajo los sedimentos cuaternarios de los conos de Terreros y Tunjuelito, este bloque presenta fallamiento en direcciones NE-SW y NW-SE, observándose replegamientos y

pliegues anticlinales y sinclinales estrechos de dirección NW-SE. Dentro de este último bloque se encuentran ubicados los sectores del Espino y Cerros del Diamante que son objeto del presente estudio.

De lo anterior se destacan algunas fallas principales como son: La de Mochuelo que es una falla inversa cuyo bloque occidental está levantado y en la zona de estudio presenta una dirección aproximada NW; la falla de Sucre que presenta una dirección NW, con una inclinación de 80º al SW y su bloque occidental se encuentra levantado, poniendo en contacto la Formación Arenisca Dura con el conjunto superior de la Formación Plaeners; la falla de Calderón de dirección general NW, con su plano de falla aproximadamente vertical, donde el bloque oriental baja con respecto al occidental y la falla de Terreros que presenta una dirección NW a casi EW, la cual se comporta como una falla de rumbo sinestral, afectando rocas de la Formación Labor y Tierna y el conjunto medio de la Formación Guaduas, además corta y desplaza la falla de Calderón.

4.3 GEOLOGÍA LOCAL Y UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

Se denomina Formación Superficial al conjunto de materiales geológicos que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros. Estas Formaciones Superficiales incluyen suelos, rocas con diferentes grados de meteorización y depósitos inconsolidados.

Las Unidades Superficiales se consideran como formaciones correlativas de los procesos morfodinámicos, debido a la acción de agentes exógenos y endógenos que modelan la superficie terrestre y son unidades cartografiables.

La caracterización de las unidades superficiales de los barrios El Espino y Cerros del Diamante, de la localidad de Ciudad Bolívar, se obtuvo a partir de la información geológica básica, la cartografía de los materiales de superficie y de las condiciones de las unidades de roca, donde se tuvo en cuenta la densidad de fracturamiento, para la cual se hizo una caracterización completa del diaclasamiento de la zona.

La zona trabajada está conformada principalmente por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Guaduas, consistente en intercalaciones de arenisca y arcillolita, cuyo buzamiento coincide aproximadamente con la inclinación de la pendiente y están afectadas por fallamiento, lo que ha ocasionado fracturamiento, cizallamiento y cambios en la dirección de las capas.

Las condiciones anteriores junto con el sometimiento a la meteorización y erosión de las rocas, la morfología abrupta a moderadamente abrupta del terreno, la acción antrópica consistente en explotación incontrolada de materiales rocosos utilizados en la construcción (Cantera Santa Rita), y la acción de las aguas de infiltración (naturales y antrópicas), han generado materiales poco consolidados a inconsolidados que favorecen la inestabilidad y ocurrencia de movimientos en masa en la zona.

Para el presente estudio las Unidades Geológicas Superficiales se clasificaron y agruparon de acuerdo con el origen y resistencia a la meteorización de los materiales, obteniéndose las siguientes divisiones:

4.3.1 Materiales Derivados de Roca ¨In Situ¨

4.3.1.1 Unidades de Roca (Ktg)

Corresponde a los afloramientos de rocas sedimentarias de la Formación Guaduas (Ktg), donde se incluyen además sectores que muestran la roca bastante alterada y fracturada. De esta unidad se extrae la mayor cantidad de material rocoso para construcción. Según se menciona en el Léxico Estratigráfico Internacional, Hettner (1892, en Julivert, 1968), definió esta formación para el sector de Bogotá, llamando Guaduas a todos los materiales que suprayacen la formación Guadalupe. Posteriormente Hubach (1931, 1945, 1957) y Hubach y Alvarado (1932), restringen este término y describen la Formación Guaduas como una sucesión de lutitas con intercalaciones de areniscas y capas de carbón. Dos de las intercalaciones de areniscas son consideradas niveles guía y se denominaron Areniscas de La Guía (parte inferior) y Arenisca Lajosa (parte Superior), que dividen a la formación Guaduas en tres conjuntos:

a) Conjunto Inferior (Ktgi): Consta de arcillolitas grises oscuras y grises claras a verdosas por meteorización, con intercalaciones de areniscas cuarzosas, grises claras a blanco-amarillentas, de grano fino y limolitas de color marrón oscuro. El espesor del conjunto alcanza los 65m.

b) Conjunto Medio (Ktgm): Determinado por dos niveles de arenisca. En la base la arenisca La Guía (30m de espesor aproximado) y en la parte superior la arenisca Lajosa. Entre estas areniscas se encuentra una masa de arcillolitas grises oscuras, compactas, que contienen mantos de carbón potencialmente explotable. Las areniscas de esta parte del Guaduas son cuarzoarenitas, de color gris claro, de grano fino a grueso similares a las de la parte superior del grupo Guadalupe.

c) Conjunto Superior (Ktgs): Consta de arcillolitas grises oscuras y abigarradas por meteorización, intercaladas localmente con mantos delgados de carbón y bancos de areniscas cuarzosas, poco compactas, de grano fino a grueso. Las arcillolitas de este conjunto tienen mayor plasticidad que las lutitas del nivel inferior.

El espesor total de la Formación Guaduas es variable, considerándose que fluctúa entre 700 m y 1000 m. Se le asigna a esta formación una edad Maastrichtiano Superior a Paleoceno Inferior.

En el área de trabajo aflora el conjunto medio de la formación Guaduas, aunque parte del conjunto inferior aflora hacia el extremo sur de la zona. Estas rocas fueron subdivididas con fines ingenieriles en tres unidades de acuerdo con el tipo de roca predominante y el grado de fracturamiento en: Arenisca (Ktg_1), Arcillolita intercalada con Arenisca (Ktg_2) y Arenisca fracturada y desplazada (Qga). Esta última se incluye dentro de los depósitos de ladera por corresponder a materiales en proceso de movimiento ladera abajo (**Mapa ES-4**).

- **Arenisca (Ktg_1).** Aflora en algunos sectores como un paquete de espesor variable entre 8 m y 15 m, de areniscas cuarzosas, grano fino, ligeramente arcillosas, finamente laminadas, ligera a moderadamente meteorizadas, de color amarillento con manchas marrones por alteración, ligeramente friables y fracturadas. Presentan delgadas intercalaciones de arcillolitas cuyos espesores son menores a 5 cm. Esta unidad de arenisca se encuentra localizada estratigráficamente entre dos paquetes de arcillolitas intercaladas con delgadas capas de arenisca.

- **Arcillolita intercalada con Arenisca (Ktg_2)**. Estas capas aparecen tanto encima como por debajo del nivel de arenisca. Consisten de arcillolitas, color gris claro a gris amarillento y verdoso, finamente laminadas, de consistencia media a firme en estado seco pero blanda y plástica en estado húmedo, con esporádicos intraclastos de areniscas de grano fino oxidados. Se presentan intercalaciones de areniscas de grano fino, de hasta 2 metros de espesor, con las mismas características texturales de las areniscas Ktg_1.

Una descripción detallada de las características litológicas y estructurales de estos dos conjuntos de rocas, se presenta a continuación en dos columnas estratigráficas (**Tablas 4.1** y **4.2**), una levantada en la quebrada Santo Domingo, limite sur del área estudiada, y la otra en el flanco izquierdo de la quebrada Santa Rita (Cantera Santa Rita), limite norte (**Mapa ES-4, Fotos 4.1 y 4.2**).

Espesor estratos (m)	Descripción
0.55	Intercalaciones delgadas de arenisca y arcillolita. Arenisca cuarzosa, gris clara, amarillenta, de grano medio a fino, en paquetes de 0.15m, 0.10m y 0.08m, suelta, bastante diaclasada con dirección preferencial 176°/78°. La arcillolita es gris, verdosa, compacta, en láminas finas, planoparalelas, presentándose en paquetes de 0.05m, 0.04m y 0.02m.
0.34	Arcillolita gris, verdosa, amarillenta, compacta, en láminas planoparalelas bastante fracturadas.
0.60	Arenisca cuarzosa, gris, amarillenta, con tintes rojizos, masiva, de grano medio, matriz arcillosa, afectada por diaclasamiento con dirección preferencial 133 °/82 ° y 286 °/80 °.
0.12	Arcillolita gris, verdosa con tintes marrones y rojizos, maleable, en laminas planoparalelas bastante fracturadas.
0.62	Arenisca cuarzosa, gris clara, rojiza, masiva, de grano medio, subangular a subredondeado; la roca se disgrega fácilmente.
0.05	Arcillolita, gris, verdosa a rojiza, dispuesta en láminas planoparalelas.
0.74	Arenisca cuarzosa, gris, amarillenta con tintes rojizos, masiva, de grano medio a fino, matriz arcillosa, suelta y bastante fracturada con planos principales 153 °/66 ° y 283 °/68 °.
0.14	Arcillolita, gris, verdosa y rojiza, dispuesta en láminas planoparalelas, fracturadas.
0.19	Intercalaciones delgadas de Arenisca y Arcillolita. Arenisca cuarzosa, gris clara a rojiza debido a oxidación, grano fino, compacta. La arcillolita es gris, verdosa, dispuesta en paquetes hasta de 0.03m que alterna con la arenisca.
0.84	Arenisca cuarzosa, gris clara a blancuzca, grano medio, subangular, con matriz arcillosa y se desmorona fácilmente al contacto con el martillo. Se encuentra bastante fracturada con plano principal 156 °/64 °.
0.22	Intercalaciones delgadas de Arenisca y Arcillolita. Arenisca cuarzosa, gris clara, grano fino, matriz arcillosa, fácilmente disgregable, dispuesta en capas de 0.06m a 0.02m, intercalada con arcillolita, gris, verdosa en capas con espesores que fluctúan entre 0.05m y 0.01m.
0.27	Arenisca cuarzosa, gris clara con tintes rojizos por oxidación, grano medio, subangular a subredondeado, matriz arcillosa, la roca se disgrega fácilmente y está bastante fracturada con plano principal 47 °/88 °.
0.43	Arcillolita, gris, verdosa, con tintes rojizos por oxidación, dispuesta en láminas plano paralelas fracturadas.
0.46	Arenisca cuarzosa, gris clara blancuzca, con tintes rojizos, masiva, grano medio, subangular a subredondeado, matriz arcillosa, la roca se disgrega fácilmente.
0.51	Intercalaciones delgadas de Arenisca y Arcillolita. La Arenisca es cuarzosa, color gris claro blancuzco, amarillento, grano fino a medio, matriz arcillosa, con estratificación cruzada, suelta, dispuesta en paquetes de 0.04m y 0.05m. La Arcillolita es gris, en láminas planoparalelas con espesores que fluctúan entre 0.05m y 0.01m.
0.18	Arenisca cuarzosa, color gris claro blancuzco con tintes rojizos, masiva,

	grano medio a grueso, compacta.
0.05	Arcillolita gris clara, con tintes rojizos por oxidación, dispuesta en láminas planoparalelas.
0.31	Intercalaciones delgadas de Arenisca y Arcillolita. La Arenisca es cuarzosa, color gris claro blancuzco, tamaño de grano medio a grueso, suelta, dispuesta en paquetes de 0.04m a 0.05m. La Arcillolita es de color gris, verdosa, con tintes rojizos, en láminas planoparalelas, fracturada.
0.86	Arenisca cuarzosa, gris clara a blanca, con manchas marrones y rojizas por oxidación, masiva, grano medio, matriz arcillosa, se disgrega fácilmente. Presenta alto nivel de fracturamiento siendo las direcciones principales 150 º/63 º y 286 º/77 º.
0.10	Arcillolita gris rojiza, compacta, fracturada, se meteoriza en laminillas.
1.27	Arenisca cuarzosa, color gris claro rojiza, presenta estratificación cruzada, disposición masiva, tamaño de grano medio pasando a ser fino hacia el tope, matriz arcillosa, de fácil disgregación. Hacia la base presenta una intercalación de 0.03m de Arcillolita gris, dispuesta en láminas planoparalelas, observándose más compacta hacia la zona de baja meteorización.
0.06	Arcillolita gris, suelta, bastante meteorizada en forma de laminillas.
1.83	Arenisca cuarzosa, gris clara a amarillenta, tamaño de grano medio, matriz arcillosa, presenta estratificación cruzada hacia el tope, fácilmente disgregable.
0.45	Arcillolita gris, en láminas planoparalelas, fracturada y suelta.
2.00	Arenisca cuarzosa, gris clara a blancuzca con manchas marrones y rojizas por oxidación, masiva, grano medio, se disgrega fácilmente, intensamente fracturada, se observan planos estriados de fallamiento con dirección 178 º/62 º.
0.21	Arcillolita gris, con niveles marrones, meteorizada en laminillas fracturadas y sueltas.
2.40	Arenisca cuarzosa, gris clara a blancuzca, grano medio pasando a ser fino hacia el tope, granos subangulares a redondeados, masiva, fácilmente disgregable, dispuesta en estratos entre 0.70m y 0.50m de espesor.
5.40	Arenisca cuarzosa, gris clara, amarillenta hacia los niveles más externos debido a la oxidación, con variaciones de tamaño de grano medio a grueso, subangulares a subredondeados, masiva, con matriz arcillosa, baja compactación y con alto nivel de fracturamiento principalmente en las direcciones 164 º/66 º y 298 º/84 º. Se observan estrías de fallamiento con dirección 170 º/70 º.

Tabla 4.1. Columna Estratigráfica Sector El Espino, Quebrada Santo domingo, Ciudad Bolivar. Formación Guaduas (Miembro Medio).

Espesor estratos (m)	Descripción
3.20	Arenisca cuarzosa, color gris clara, amarillenta, con delgados niveles marrones por oxidación, en algunos sectores se observa estratificación cruzada, tamaño de grano medio pasando a grueso hacia el tope, forma del grano subangular a subredondeado, matriz arcillosa. La roca está medianamente compacta
0.80	Arcillolita gris con tintes amarillos y blancos, maleable, dispuesta en laminas planoparalelas, contiene pequeños lentes de arenisca cuarzosa, blanca, de grano fino, fácilmente disgregable.
6.58	Arenisca cuarzosa que hacia la base presenta color gris amarillento, masiva, de grano grueso, subangular a subredondeado, matriz arcillosa, siendo la roca fácilmente disgregable. En su parte media la Arenisca toma color gris claro, de grano medio a fino y hacia el tope nuevamente el tamaño de grano se vuelve medio, disminuyendo el contenido de matriz arcillosa dando a la roca mayor compactación. La roca en general está bastante fracturada siendo las direcciones preferenciales $140^0/73^0$ y $225^0/55^0$.
1.40	Arenisca cuarzosa, gris clara, amarillenta, masiva, de grano medio a grueso hacia el tope, granos subangulares a subredondeados, matriz arcillosa. La roca está dispuesta en estratos con espesores que varían entre 0.08m y 0.19m, bastante diaclasados con direcciones principales $101^0/63^0$ y $231^0/56^0$.
3.50	Arcillolita blanca, con delgados niveles amarillentos por oxidación, masiva, con desarrollo de pequeñas laminaciones por alteración y fracturamiento.
2.0	Arcillolita rojiza, amarillenta, en láminas planoparalelas, con altos niveles de oxidación que desarrollan costras duras, fracturadas y con presencia de concreciones del orden centimetrico.
18.0	Arcillolita gris, compacta, rica en material micaceo y materia orgánica (restos de tallos), presenta también niveles delgados de arcillolita de color claro, y láminillas esporádicas de material carbonoso; hacia el techo se observan costras de oxidación dando colores amarillentos, marrones, grises verdosos y rojizos; existen además niveles de arcillolita rojiza con espesores aproximados de 0.17m, compactas, duras, masivas, que contienen nódulos de arcillolita gris hasta de 3cm. La roca está bastante replegada y fracturada siendo los planos principales de dirección $106^0/77^0$, $46^0/88^0$ y $131^0/82^0$.; estos planos están totalmente oxidados tomando colores amarillentos y marrones oscuros.

Tabla 4.2. Columna Estratigráfica, Quebrada Santa Rita (Cantera Santa Rita),. Formación Guaduas (Miembro Medio). Ciudad Bolivar.

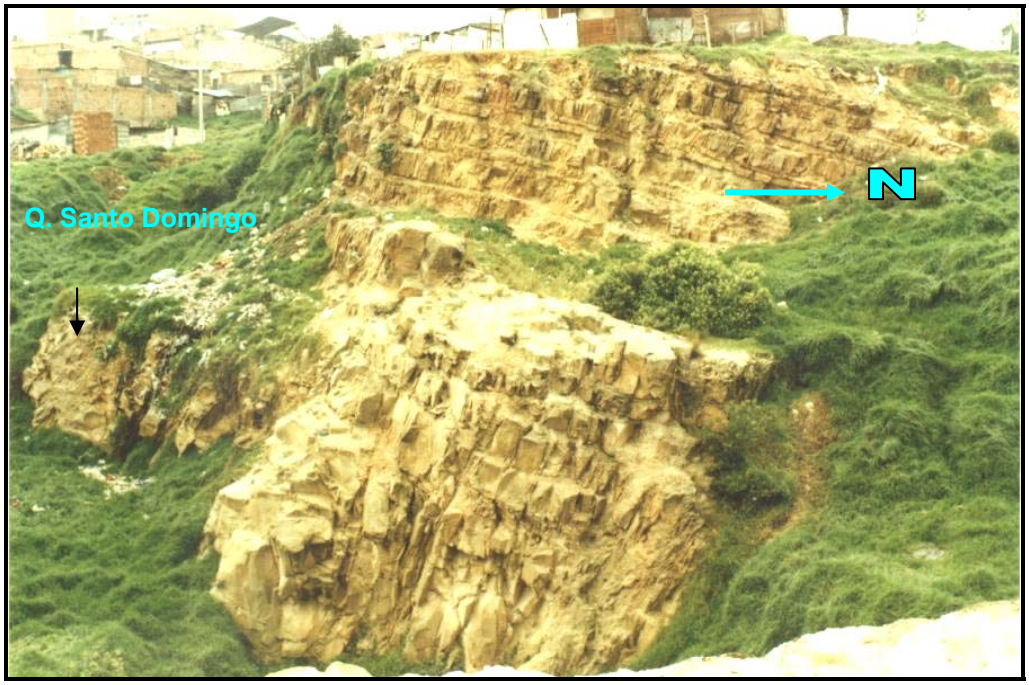


Foto 4.1. Nacimiento quebrada Santo Domingo. Sector donde se levantó la primera columna estratigráfica de la Formación Guaduas. (May/02).

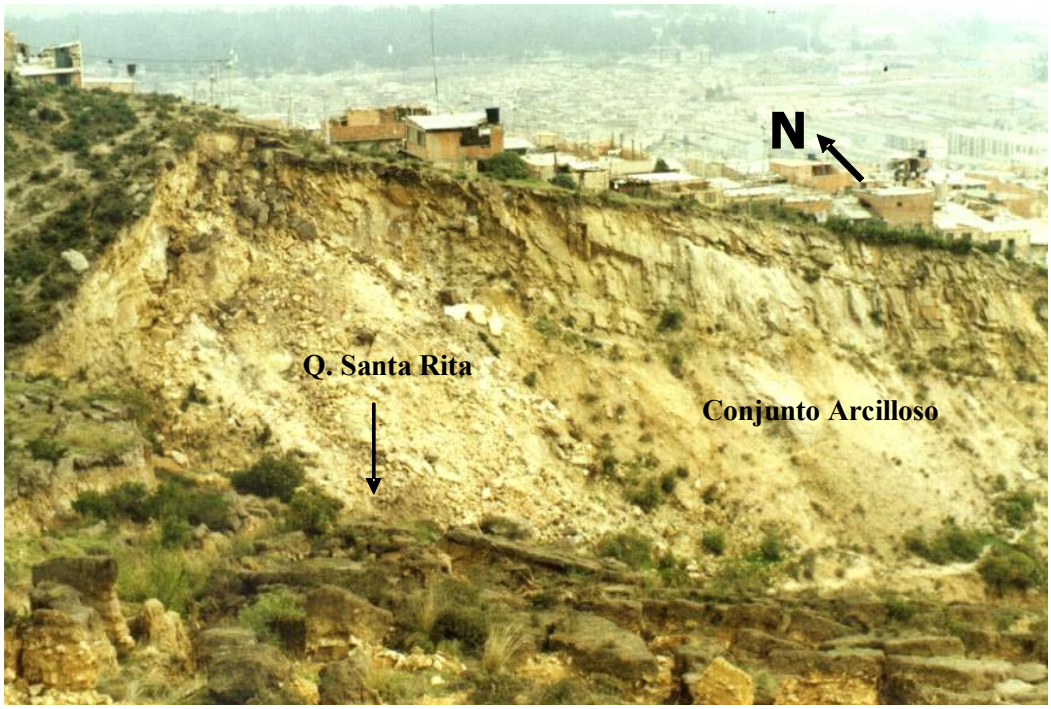


Foto 4.2. Sector de la Quebrada Santa Rita, donde se levantó la segunda columna estratigráfica. Conjunto Arcilloso intercalado con paquetes de areniscas hacia el tope (Formación Guaduas). (May/02).

Teniendo en cuenta las dos columnas estratigráficas, y según la clasificación existente de los miembros de la Formación Guaduas, se plantea que los paquetes gruesos de arenisca Ktg_1 que afloran en el sector de la quebrada Santo Domingo, podrían corresponder a las Areniscas de la Guía; mientras que el paquete de arcillolitas que afloran en el sector de la quebrada Santa Rita, corresponderían al conjunto arcilloso del miembro medio de la Formación Guaduas.

Los principales afloramientos de estas unidades de roca se encuentran hacia la parte alta de la cantera Santa Rita, que actualmente corresponde a la corona principal de un gran deslizamiento traslacional de detritos presente en el sector.

Otros afloramientos importantes de la unidad de Roca se localizan al norte de la zona estudiada, flanco izquierdo de la quebrada Santa Rita (Cantera Santa Rita), al sur del área en los barrios El Espino sectores I y III, al suroccidente en el nacimiento de la quebrada Santo Domingo y al occidente entre las calles 58 y 56 A del barrio Cerros del Diamante.

4.3.1.2 Suelo Residual (Qsr)

En ingeniería Suelo Residual se entiende como la roca meteorizada en la cual ya no aparecen sus características físicas y su comportamiento depende de las propiedades de la roca origen y de la descomposición que ésta tenga.

Los Suelos Residuales se caracterizan también por que en las etapas iniciales de la meteorización, se producen fragmentos de gran tamaño y en el proceso final se producen arcillas, y entre estos dos extremos se puede encontrar una composición de mezclas de diferentes tamaños de grano.

Esta unidad se presenta en los sectores de pendiente suave y aunque cubre la mayor parte del área de estudio, solo se cartografiaron aquellos con espesores superiores a 60 cm. Estos suelos se originaron a partir de la degradación y descomposición de las rocas de la formación Guaduas y alcanzan espesores que van desde 0.2 m hasta valores cercanos o mayores a los 2.0 m (**Mapa ES-4**).

En el área de El Espino el suelo es de color marrón oscuro a gris oscuro, caracterizado por ser finogranular, duro hacia la superficie, predominantemente areno arcilloso, pobremente clasificado, donde los horizontes superiores son ricos en materia orgánica, conteniendo humus y restos de raíces (**Foto 4.3**).

En algunos sectores el suelo fue removido debido a la explotación de materiales o por excavaciones, y en otros fue cubierto por depósitos de origen antrópico (Botaderos de Escombros). Existen zonas donde el suelo se encuentra sobre roca altamente meteorizada, con perdida de coloración, observándose fragmentos angulares de roca (arenisca cuarzosa gris clara a amarillenta) en una matriz arenoarcillosa.



Foto 4.3. Detalle de suelo residual caracterizado por ser arenoarcilloso, color gris oscuro a marrón, cuyos niveles superiores son ricos en materia orgánica. Calle 57 A, barrio Cerros del Diamante.

4.3.2 Depósitos de ladera o de vertiente

Las unidades agrupadas dentro de la categoría de depósitos de ladera corresponden a materiales que han sufrido fracturamiento y desplazamiento o se han depositado en cambios de pendiente, ya sea sobre una ladera o en una parte plana. Bates y Jackson (1980, en Suárez, 1998), llaman a estos depósitos "coluvión" y los definen como masas incoherentes de materiales sueltos y heterogéneos, de suelos y/o fragmentos de roca depositados por la gravedad, lavado de la lluvia, reptación o deslizamiento. Se caracterizan por ser materiales clastosoportados, de composición heterogénea que involucra suelos y fragmentos de roca que van desde partículas de arcilla hasta rocas de varios metros de diámetro.

Teniendo en cuenta estos conceptos y para los fines ingenieriles del estudio del deslizamiento El Espino, se diferenciaron dentro de los depósitos de coluvión aquellos materiales originados a partir de procesos de inestabilidad como desprendimientos, depósitos de talud, deslizamientos y flujos, los cuales fueron agrupados de la siguiente forma: Arenisca fracturada y desplazada de la formación Guaduas (Qga), depósitos de talud o talus (Qft), flujos de suelos (Qfs), flujos de detritos (Qfd) y suelo residual y roca desplazada (Qsd). Aquellas unidades que involucran movimientos de remoción en masa se describen con detalle en el capítulo de Geomorfología.

- **Arenisca fracturada y desplazada de la formación Guaduas (Qga).** Estos materiales se hallan involucrados dentro del deslizamiento de detritos de El Espino y se derivan del fracturamiento y desplazamiento traslacional ladera abajo de las capas de arenisca cuarzosa de la formación Guaduas. El depósito consiste en su mayoría de bloques, guijarros y gravas, de forma angular a subangular de areniscas, dentro de una matriz areno arcillosa. El movimiento de esta masa es activo y moderadamente rápido y abarca parte de la cantera de Santa Rita y se extiende al sector sur, afectando parte de otras canteras aisladas, el parque comunal y algunas viviendas del barrio El espino sector III (**Mapa ES-4 y Foto 4.4**).



Foto 4.4. Arenisca fracturada y desplazada en la estación de buses sector SW del área de estudio (Sep/02).

- **Depósitos de talud o talus (Qft).** Se ubican en el extremo nororiental del área donde forman depósitos de pie de ladera, cuya forma se adapta a la posición de la pendiente. Se componen de fragmentos angulares de 1 m a 80 cm de diámetro, de arenisca ligeramente friable en una matriz arenosa suelta.

- **Flujos de suelos (Qfs).** Los flujos de suelo se relacionan con procesos morfodinámicos; sin embargo, también pueden ser considerados como depósitos de tipo gravitacional. Se asocian a valles de quebradas de pendiente suave a moderadamente alta donde existe saturación de los materiales.

Esta unidad se presenta a lo largo de los valles de las quebradas Santa Rita y Santo Domingo, que limitan el área de trabajo al norte y sur, respectivamente (**Mapa ES-4**). Se componen principalmente de materiales arcillosos provenientes de la meteorización, desprendimiento y arrastre de las arcillolitas de la Formación Guaduas, desarrollando depósitos de materiales finos que involucran también suelos residuales. Estos depósitos están afectados en algunos sectores por erosión en surcos y reptación de suelos.

- **Flujos de detritos (Qfd).** Corresponde cuerpos conformados por bloques de arena y material arcilloso localizados sobre la margen izquierda de la quebrada

Santo Domingo. Estos se han deslizado como una masa de detritos de manera fluida, presentando una forma estrecha hacia su corona y alargada y en forma de abanico hacia sus bases.

- **Suelo residual y roca desplazada (Qsd).** Los suelos presentan un horizonte orgánico con espesor variable entre 60 y 120 cm, de color gris oscuro a negro, con algunos fragmentos de areniscas incluidos. Debajo de este nivel aparece otro horizonte orgánico pero con abundantes fragmentos de roca, cuyo espesor varía entre 40 cm y 1 m. En el regolito o roca altamente meteorizada se observa la estructura laminar de las areniscas; su espesor varía entre 60 cm y 1 metro. La roca sana está compuesta de arcillolitas intercaladas con areniscas.

Debido a que esta unidad reposa sobre la Arenisca fracturada y desplazada de la formación Guaduas (Qga), sobre ella se han generado grietas con escarpes circulares de hasta 4 m de altura, que involucran el suelo, el regolito y los niveles de roca más superiores (**Foto 4.5**).



Foto 4.5. Panorámica de suelos residuales y roca desplazada afectando la ladera derecha de la quebrada Santa Rita (Cantera Santa Rita). Obsérvese la corona principal y los materiales conformados por Suelo residual, guijarros, gravas y bloques de arenisca. Hacia la parte superior de la corona principal se observan grietas de distensión. (May/02).

El drenaje en esta unidad tiene poco desarrollo y en general está cubierta por vegetación de pastos, al igual que de pisos de casas que han sido demolidas.

4.3.3 Botadero de Escombros (Qbe)

Son depósitos de origen antrópico conformados por escombros de materiales, algunos de los cuales provienen de residuos de construcción, tanto de vivienda como de vías, a los que se le suman aquellos materiales provenientes de la excavación del terreno que se hicieron para actualizar y adecuar las redes de

alcantarillado de la zona. Están dispuestos caoticámente y conformados por fragmentos de roca, suelo residual y material arenoarcilloso. En general estos materiales no presentan compactación, por lo tanto son sueltos y permeables, representando una amenaza por futuros movimientos en masa.

Se ubican en diferentes sectores puntuales de las laderas del área, pero los más representativos están en la parte alta de la cantera Santa Rita, a lo largo de las vías, en las quebradas o en los alrededores de las viviendas. En la parte plana sobre una depresión natural ubicada entre las estaciones de buses, como se observa al extremo nororiental de la zona, flanco derecho de la Quebrada Santa Rita, los materiales arrojados tienen cierto tratamiento ya que son uniformizados y ligeramente compactados (**Mapa ES-4, Foto 4.6**).



Foto 4.6. Flanco derecho de la quebrada Santa Rita. Rellenos mecánicos conformados por escombros de construcción, suelo residual removido y basuras, entre otros. Este relleno está siendo utilizado como parqueadero de vehículos (May/02).

4.4 CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES LOCALES

En un estudio realizado por Julivert en 1965, se menciona que los sectores de los barrios El espino y Cerro El Diamante, hacen parte del flanco occidental del sinclinal de Usme, donde los estratos de la Formación Guaduas presentan una dirección de rumbo preferencial promedio que fluctúa alrededor de N60ºW y buzamiento de 22ºN E, aproximadamente concordante con la pendiente del terreno. Existen también puntos donde las direcciones de los estratos cambian de rumbo a N80ºE y

buzamientos de 18ºNW, lo cual se debe en parte a la acción de las fallas que afectan la zona y a flexiones de las capas de roca.

Dentro de las principales fallas que atraviesan el sector, se tienen dos de dirección preferencial aproximada N80ºE a E-W que controlan los cauces de las quebradas Santa Rita y Santo Domingo. Según el estudio realizado por el consorcio Civiles Ltda & Hidroconsulta Ltda (1999), estas corresponden a fallas inversas (**Mapa ES-4)**. Evidencias de estos fallamientos se presentan cerca a la quebrada Santa Rita, parte norte de la cantera del mismo nombre, donde se encontró en los paquetes de arenisca planos de fallamiento con rumbo N35ºE y buzamientos de 83ºSE. En cuanto a la falla que controla la quebrada Santo Domingo, en el sector donde nace ésta, se presentan afloramientos de arenisca afectada por estrías de fricción con rumbo promedio N70ºE y buzamiento de 70ºSE.

También se presenta una falla de rumbo, posiblemente dextral, con dirección NNW reportada en el estudio del consorcio Civiles Ltda & Hidroconsulta Ltda (1999), localizada sobre un cambio de pendiente cerca de algunas viviendas afectadas por caídas de rocas al occidente del barrio El Espino sector III y del Cerro El Diamante. Esta falla al parecer ha contribuido con el desplazamiento y levantamiento de los niveles de arenisca que bordean la quebrada Santa Rita, en los alrededores del barrio San Rafael, ya que limita el movimiento de las areniscas fracturadas y desplazadas sobre las areniscas duras. Evidencia de esta falla se observó en las areniscas del sector sur del barrio El Espino sector III, donde se encontraron planos de fallamiento de dirección N40ºE y buzamiento de 83º SE.

Otro cambio de pendiente brusco se observa al occidente de la falla anterior, en la parte media del cuerpo mayor del movimiento en masa, el cual puede obedecer a una falla paralela y con características similares. Esta falla al parecer, aunque no hay suficientes evidencias de campo, atraviesa la falla que controla el cauce de la quebrada Santa Rita (**Mapa ES-4**).

Se realizó un estudio detallado de diaclasamiento en el área cuyos resultados y análisis se presentan en el capítulo de Geotecnia.

4.5 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es una disciplina que analiza los paisajes y los factores que los producen y modifican, especialmente para buscar soluciones a problemas generados en zonas donde cambian las condiciones de equilibrio. Ejemplo de ello son los cortes de taludes para construcción de vías y viviendas, en zonas que como El Espino son bastante susceptibles a fenómenos de remoción en masa por la disposición de las capas de roca, inclinadas en la misma dirección de la pendiente.

El paisaje de la zona de estudio es el producto principalmente de la combinación de procesos tectónicos relacionados con el levantamiento de la cordillera Oriental y la conjugación de fallas, conformando una vertiente montañosa moderadamente empinada limitada por una zona plana correspondiente a la sabana de Bogotá.

De otra parte los factores climáticos, la acción de las aguas superficiales, la abrasión y la erosión, han debilitado las rocas y modelado un paisaje donde las laderas, cubiertas parcialmente por suelos residuales, han adoptado la forma de las capas duras que la subyacen produciendo en general una **Cuesta o Pendiente Estructural** en la cual son comunes los depósitos inconsolidados y procesos de remoción en masa, acelerados por la presencia del hombre al desarrollar canteras y viviendas en zonas no aptas para este tipo de actividades.

En consecuencia, en el análisis de los aspectos geomorfológicos, se hace énfasis específicamente en la parte Morfodinámica, enfocada a la diferenciación de los diferentes cuerpos a los cuales se encuentran asociados movimientos de remoción en masa y a la determinación de los factores que afectan la resistencia de los materiales, la intensidad de los procesos que actúan sobre ellos y los cambios que puede producir a corto plazo sobre la zona de El Espino.

4.5.1 Morfodinámica

Para lograr un acercamiento al conocimiento de los procesos de remoción en masa presentes en la zona de estudio y de sus causas, se realizó, una cartografía detallada de los sectores con problemas antiguos y activos de deslizamientos, flujos de suelo y de detritos, coronas de desprendimiento, caídas de roca, etc (**Mapa ES-5**).

Los procesos de remoción en masa fueron clasificados de acuerdo con sus mecanismos de falla, según la clasificación de Varnes (1978), (**Tabla 4.3**).

TIPO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL			
		ESTRATIFICADO		SUELOS	
CAIDAS		CAIDA DE ROCA		CAIDAS DE SUELO	
DESLIZAMIENTOS	Pocas unidades	Rotacional Hundimiento	Planar Hundimiento de bloques	Planar Deslizamiento de bloques	Rotacional Hundimiento de bloques
	Muchas unidades		Deslizamientos de roca	Deslizamiento de detritos	Deslizamiento por propagación lateral
FLUJOS	Seco		INCONSOLIDADO		
		Fragmentos de roca	Arena o limo	Mezcla	Principalmente plástico
		Flujo de fragmentos de roca	Flujo de Arena	Flujo de Loess	
	Húmedo		Flujo rápido de tierra o arena Flujo de lirio	Avalancha de detritos Flujo de detritos	Flujo lento de tierra Flujo de lodo
COMPLEJO		Combinación de materiales o tipo de movimiento			

Tabla 4.3. Clasificación de procesos de remoción en masa, Varnes 1978.

4.5.1.1 Tipos de movimientos en masa

- **Deslizamiento traslacional de detritos.** Corresponde al problema principal que afecta el sector del Espino. Este puede catalogarse como un *deslizamiento traslacional de detritos* con corona retrogresiva semicircular indicando que el plano de deslizamiento es en parte circular hacia la corona del mismo (**Figura 4.3**). Estas

coronas o zonas de desprendimiento semicircular se generan cuando bloques de roca se separan del macizo rocoso a través de diaclasas verticales o en cuña debido a perdida de confinamiento que aumenta los esfuerzos cortantes y hace que estos se deslicen sobre otra diaclasa preexistente, o plano de estratificación.

A partir de este fenómeno se han originado gran cantidad de grietas de distensión que afectan varias viviendas ubicadas en el barrio Cerros del Diamante y El Espino (**Mapa ES 5**).

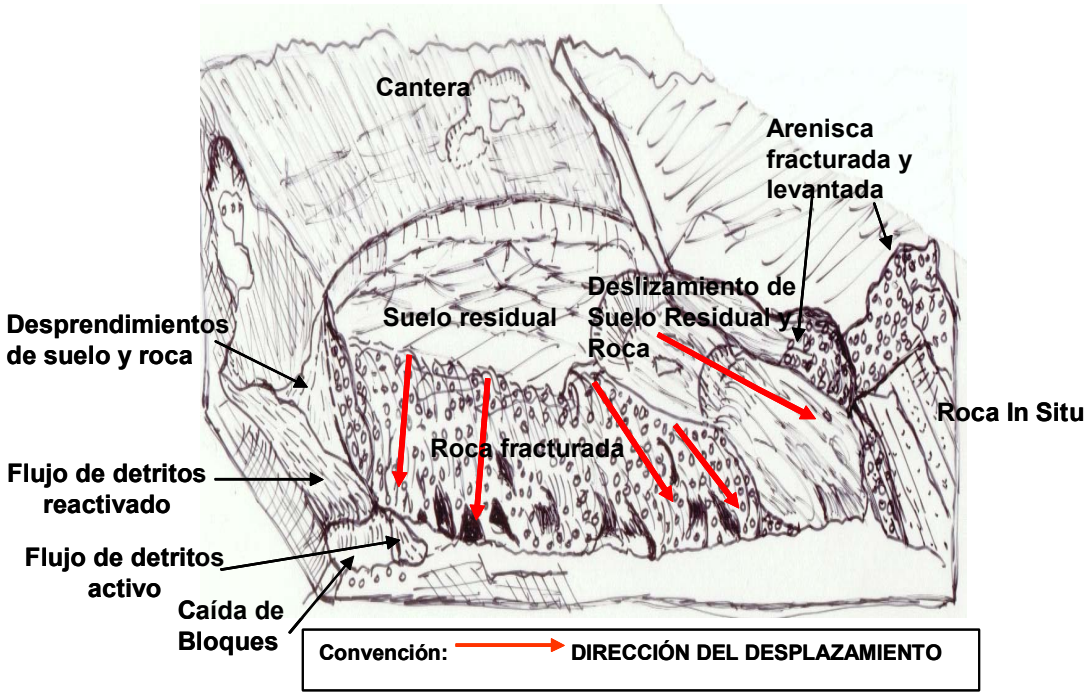


Figura 4.3. Bloque diagrama esquemático del deslizamiento de detritos de El Espino en Ciudad Bolívar. El plano de falla aunque es planar tiene una componente curva hacia la corona.

Estas grietas se extienden hacia el sur del área y ya están abarcando el sector comprendido entre la calle 55 con carrera 89 y la calle 60 con carrera 89, delimitando una nueva corona, pues a lo largo de la carrera 89 y sectores aledaños se presentan escarpes en el terreno con saltos mayores a 3 m. Estas grietas destruyeron viviendas, la calle 89 (principalmente) y otras aledañas, postes del alumbrado y tuberías del acueducto y alcantarillado (**Fotos 4.7, 4.8 y 4.9**).



Foto 4.7. Vía destruida y postes de alumbrado público inclinados debido a los agrietamientos de Carrera 89, barrio Cerros del Diamante, (May/02).



Foto 4.8.. Detalle de los agrietamientos que afectaron las tuberías de acueducto y alcantarillado. Estas grietas alcanzan aberturas cercanas al metro y profundidades mayores a los 3 metros. Carrera 89, barrio Cerros del Diamante (May/02).



Foto 4.9. Vivienda afectada por agrietamientos que se extienden a lo largo de la carrera 89, Barrio El Espino sector I. (May/02). En el capítulo de Geología estos fenómenos se describen como la Unidad de Suelo Residual y Roca desplazada (Qsd).

Las dimensiones del fenómeno hasta la fecha son de aproximadamente 350 metros tanto de largo como de ancho y se calcula que el plano del deslizamiento se encuentra ubicado entre 20 y 25 metros de profundidad. Estas dimensiones generan aproximadamente un volumen de material desplazado al menos de 1'750.000 m^3, que presenta en la actualidad un movimiento moderadamente rápido (5 cm/mes) de acuerdo con los datos obtenidos de la instrumentación instalada.

La dirección de avance del deslizamiento ocurre en dirección aproximada N30ºE en concordancia con la inclinación de las capas. Sin embargo, hacia el flanco suroriental de este proceso, se presenta un cambio en la dirección del desplazamiento hacia el este (N60ºE aproximadamente), debido a que las capas de arenisca del subsuelo se flexionan y cambian de dirección forzando el deslizamiento a moverse en ese sentido. La línea aproximada de cambio en la dirección de movimiento se muestra en el mapa Morfodinámico (**Mapa ES-5**).

La amenaza que representa este fenómeno es alta para las viviendas ubicadas inmediatamente alrededor de dos manzanas localizadas cerca de su pata y sobre sus flancos como en el barrio San Rafael parte baja.

Dentro del cuerpo del deslizamiento se cartografiaron dos tipos de materiales en movimiento los cuales se describen detalladamente en el capítulo de Geología: un deslizamiento superficial de suelo residual y roca, y otro de roca fracturada desplazada.

Deslizamiento Superficial de Suelo Residual y Roca. Estos fenómenos se presentan en el sector nororiental del área, dentro del cuerpo del deslizamiento traslacional de detritos descrito anteriormente. Se caracterizan por tener una corona circular o semicircular a lo largo de la cual se desliza el material. Estos deslizamientos pueden considerarse igualmente como hundimientos del terreno (Slump) donde las superficies de falla tienden a ser curvas generando hundimientos y contrapendientes en el material poco consolidado. Los planos falla de estos fenómenos se ubican aproximadamente a 4 metros de profundidad y se presentan sobre niveles de arcillolitas con delgadas intercalaciones de arenisca sobre los cuales reposan niveles de roca muy alterada y suelos residuales. En el **numeral 4.3.2** de este capítulo, estos fenómenos se describen como la Unidad de Suelo Residual y Roca desplazada (Qsd).

El movimiento del terreno es considerable en el barrio Cerros del Diamante entre las calles 58 y 59 con carrera 89. También existen otros menos extensos a lo largo de los agrietamientos presentes en la carrera 89.

Roca Fracturada Desplazada. Comprende el cuerpo principal de avance del deslizamiento del Espino e involucra gran cantidad de bloques, guijarros y grava compuestos de arenisca, englobados dentro de una matriz arenoarcillosa. En el **numeral 4.3.2** esta unidad se describe como Arenisca fracturada y desplazada de la formación Guaduas (Qga).

- **Arenisca Fracturada levantada**. Son areniscas muy fracturadas en proceso de levantamiento, localizadas hacia el norte del área, en limites con el barrio San Rafael. Este sector ha presentado levantamientos de más de 7 metros en cortos periodos de tiempo, menores a tres meses como se aprecia en los registros fotográficos multitemporales (**numeral 7.3.6**). Asociados a este fenómeno y dentro de la zona, también se diferenciaron *Suelos Residuales y Roca Levantada*, localizados sobre la margen derecha de la quebrada Santa Rita. Este fenómeno ha causado el agrietamiento de las casas ubicadas en los alrededores del barrio San Rafael y amenaza con extenderse hacia el norte del barrio, como se describe en el **numeral 8.1.4**.

- **Desprendimientos de suelo y roca**. Son depósitos de material originado por desprendimientos de suelo residual, arcillolita y arenisca de la corona principal del deslizamiento del Espino. Estos desprendimientos se deben a la perdida de confinamiento de los materiales durante el retroceso del deslizamiento principal del Espino obligando a los materiales a desplazarse a lo largo de las diaclasas preexistentes. Se localiza al sur del área, cerca de la quebrada Santo Domingo y presenta una dirección de desprendimiento de los materiales en sentido sureste.

- **Talus o depósitos de talud.** Se desarrollan a partir del desprendimiento por gravedad, de rocas en zonas escarpadas cuyos materiales se depositan en el cambio de pendiente. Estos materiales representan gran amenaza por su ubicación debajo de zonas escarpadas además de ser muy inestables ya que han empezado

a sufrir el efecto de la presión y empuje de los materiales del deslizamiento de El Espino por lo cual se están deformando y abombando.

- **Caída de Bloques**. Estos fenómenos están asociados a antiguas canteras de las cuales se extraían areniscas para ser utilizadas como material de construcción. Las caídas de bloques localizadas en el barrio El espino sector I, al parecer están sufriendo el efecto del empuje de los materiales de los movimientos de remoción en masa de La Carbonera y del flujo de detritos reactivado aledaño a la quebrada Santo Domingo, razón por la cual los habitantes de la zona afirman que las rocas se fracturan, revientan y posteriormente se desprenden para rodar algunos metros ladera abajo hasta la parte trasera de las casas ubicadas en el Espino sector I.

- **Flujos de suelo.** Son movimientos que presentan múltiples superficies de corte, estrechamente espaciadas. Varnes (1978) propuso el término ‘’Flujo Lento de Tierras o Suelos’’ para describir flujos lentos en materiales de comportamiento plástico, como arcillas o rocas descompuestas arcillosas, expuestas en taludes de pendiente suave.

Constituyen procesos antiguos de desplazamiento rápido ayudados por la abundante agua de los alrededores, cuyos materiales rellenaron los cauces de las quebradas Santa Rita y Santo Domingo formando depósitos superficiales. Estos flujos se originaron en laderas de pendientes suaves por lo cual en la parte superior o corona, no se observan superficies de desgarre definidas. En la parte media e inferior los espesores de material desplazado no sobrepasan los 3 m.

Entre las causas principales que generan estos movimientos se tiene el cambio en las condiciones de equilibrio de los suelos por el incremento del peso con la humedad y el consecuente aumento de la presión de poros en las épocas lluviosas. Estos flujos son drenados por los cauces de las quebradas, por lo cual se pueden generar cárcavas que pueden ser ampliadas lateralmente si las condiciones de lluvia se vuelven extremas, pudiendo reactivarlos y empezar a desplazarse nuevamente. Sin embargo por la pendiente suave y por los espesores de material presente sólo representan una amenaza moderada para las zonas aledañas.

- **Flujos de Detritos.** Ocurren típicamente al suroriente de la zona, sobre la margen izquierda de la quebrada Santo Domingo. Se diferenciaron dos tipos de flujos: uno antiguo reactivado posiblemente como consecuencia del empuje de los materiales del deslizamiento El Espino y de otros fenómenos ubicados en la margen derecha de la quebrada Santo Domingo. Su extensión, no supera los 200 metros de largo y 100 metros de ancho y en su parte media e inferior el espesor del material no sobrepasa los 8 m (**Foto 4.10**).



Foto 4.10. Flujo de detritos reactivado desarrollando una topografía suave en la margen izquierda de la quebrada Santo Domingo. Obsérvese el contraste de pendiente con las rocas muy fracturadas en procesos de desplazamiento (Sep/02).

El otro flujo identificado es activo y de pequeñas dimensiones: 50 m de largo, 8 m de ancho y no más de tres metros de espesor. Se ubica un poco nororiente del anterior, cuya forma es estrecha y alargada pero con mayores contenidos de humedad, lo cual ha permitido su desplazamiento y depositación en la parte plana, ejerciendo presión sobre algunas viviendas que ya han sido demolidas, pero que representa peligro para las demás casas de los alrededores.

Al igual que los flujos de suelo, los flujos de detritos se originaron en laderas de pendientes suaves por lo cual no se observan coronas de desgarre definidas. Estos flujos por sus características dinámicas son impredecibles y pueden moverse rápidamente si las condiciones de humedad cambian, representando una alta amenaza para las viviendas ubicadas en su pata.

CAPITULO 5

EXPLORACIÓN Y ENSAYOS

5.1 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO

Con el objetivo de caracterizar geológica y geotécnicamente el subsuelo de la zona de estudio se llevó a cabo un programa de exploración del macizo rocoso en el que se realizaron 11 perforaciones con recuperación continua de muestra. Las perforaciones se llevaron a cabo a profundidades entre 20 y 40 m y su ubicación puede observarse en el **Mapa ES6**. Los registros de perforación se pueden observar en el **Anexo 5.1**

La ubicación de las perforaciones y las profundidades se realizaron teniendo en cuenta la ubicación y el objetivo de la instrumentación a instalar en cada perforación (piezómetros e inclinómetros).

En general el macizo rocoso esta conformado por areniscas cuarzosas fracturadas intercaladas con paquetes de arcillolitas de menor espesor hasta aproximadamente los 20 m; de ahí hasta los 40 m (máxima profundidad de las perforaciones), se presenta un paquete grueso de arcillolita compacta y firme.

5.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

En general se realizaron ensayos de clasificación, resistencia y compresibilidad sobre muestras inalteradas para los materiales del macizo rocoso, además se realizaron algunas pruebas “in situ” de infiltración de las cuales se hablará en el **Capítulo 6**.

En las **Tablas 5.1 a 5.11** se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados en cada una de las perforaciones y las **Figuras 5.1 a 5.11** muestran la variación de algunas propiedades con la profundidad.

Los resultados de los ensayos de laboratorio se presentan en los anexos de este capítulo como se describirá más adelante para cada uno de ellos.

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			% PASA	GS	γt	Is (50) Kg/cm2		CORTE DIRECTO		TRIAXIAL		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	TAMIZ 200		Grs/cm3	Paral	Perp	C'r Kg/cm2	ϕ'r (°)	C' Kg/cm2	ϕ' (°)	K cm/s	Cv cm2/s
1	0.0	0.6	0.3	Suelo residual arenoso gris algo oxidado, con gravas angulosas, consistencia blanda- firme,seco.	6.4					2.59	1.87								
2	0.6	2.2	1.4	Arcillolita abigarrada, compacta, maleable, con cantos y fragmentos angulares hasta de 4 cm de arenisca cuarzosa, gris clara, grano fino a medio, friable.	18.4	71.9	20.9	51.0		2.67	2.03								
3	2.2	3.4	2.8	Arenisca gris oscura embebida en matriz arcillosa blanda color gris claro.	19.2				65.3										
4	3.4	4.5	3.9	Fragmentos de arenisca gris embebidos en matriz arcillosa amarilla algo oxidada ,seca.	18.2	68.5	22.6	45.9		2.60	2.00								
5	4.5	5.1	4.8	Arenisca grís de consistencia firme algo oxidada,seca							2.02	52.14	79.49						
6	5.1	7.3	6.2	Arenisca gris oscura de consistencia firme algo oxidada,seca, con matriz arcillosa escasa							2.29	32.46	83.7						
7	7.3	7.6	7.4	Arcillolita gris clara con fragmentos de arenisca, algo oxidada, ligeramente húmeda.	21.5	53.0	19.8	33.2											
8	7.6	9.8	8.7	Arenisca cuarzosa color gris claro, altamente fracturada, con fracturas rellenas de arcilla							2.35	35.04	40.82						
9	9.8	12.2	11.0	Arenisca cuarzosa color gris de consistencia firme algo oxidada, seca, poca fracturación							2.23	38	94.36						
10	12.2	14.4	13.3	Arcillolita gris clara amarillenta blanda con tintes rojizos, contiene inclusiones de fragmentos angulares de arenisca cuarzosa	29.3	47.7	20.2	27.5	57.9										
11	14.4	16.9	15.6	Arcillolita gris clara amarillenta, con tintes rojizos, blanda, maleable. En algunos sectores se vuelve más dura debido a costras de oxidación presentes hacia la superficie, de colores marrón a rojo oscuro.	17.9	45.2	19.8	25.4		2.71				0.2	30				
12	16.9	18.9	17.9	Arcillolita gris con tintes amarillentos, blanda, maleable, con presencia esporádica de fragmentos angulares de arcillolita silícea hasta de 1 cm, marrón oscuro, dura.	21.7	45.3	20.3	25.0			2.12								
13	18.9	20.4	19.7	Arcillolita gris clara, con tintes amarillos, blanda, con fragmentos esporádicos de arcillolita dura, marrón oscuro (oxidada). En algunos tramos la arcillolita se vuelve más dura y compacta.	20.8	50.5	19.5	31.0			2.03			0	30	2	37.8	5.15E-08	0.002381
14	20.4	21.4	20.9	Arcillolita oscura, compacta, dura, rica en materia orgánica, hacia la base presenta laminillas de carbón intercaladas. También se observan estrías de fallamiento que afectan la roca.	12.3	26.9	18.7	8.2			2.17								
15	21.4	21.7	21.6	Arcillolita gris oscura blanda, maleable con presencia de materia orgánica, no presenta fracturación marcada.							1.94								
16	21.7	22.3	22.0	Arcillolita gris con algunos fragmentos de arenisca gris oscura,consistencia firme, ligeramente húmeda.	21.3	58.2	21.5	36.7			2.14								
17	22.3	24.4	23.4	Arcillolita gris clara, consistencia media, seca	19.6	53.3	25.4	27.9		2.73	2.11								
18	24.4	26.3	25.4	Arcillolita gris oscura consistencia media, húmeda.	19.5	58.3	21.6	36.7		2.63	2.15								
19	26.3	27.0	26.7	Arcillolita color café amarillento compacta y de estratificación gruesa (1 – 2 mm)							2.24								
	27.0	27.1	27.1	Carbón															
20	27.0	30.1	28.6	Arcillolita gris oscura de consistencia firme,algo oxidada,ligeramente húmeda.	22.7	37.0	17.5	19.5		2.69	2.23					1	50		

Nota : Los ensayos de corte directo fueron realizados sobre muestras precortadas, Los valores de K y Cv son para un nivel de esfurezos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.1 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 1

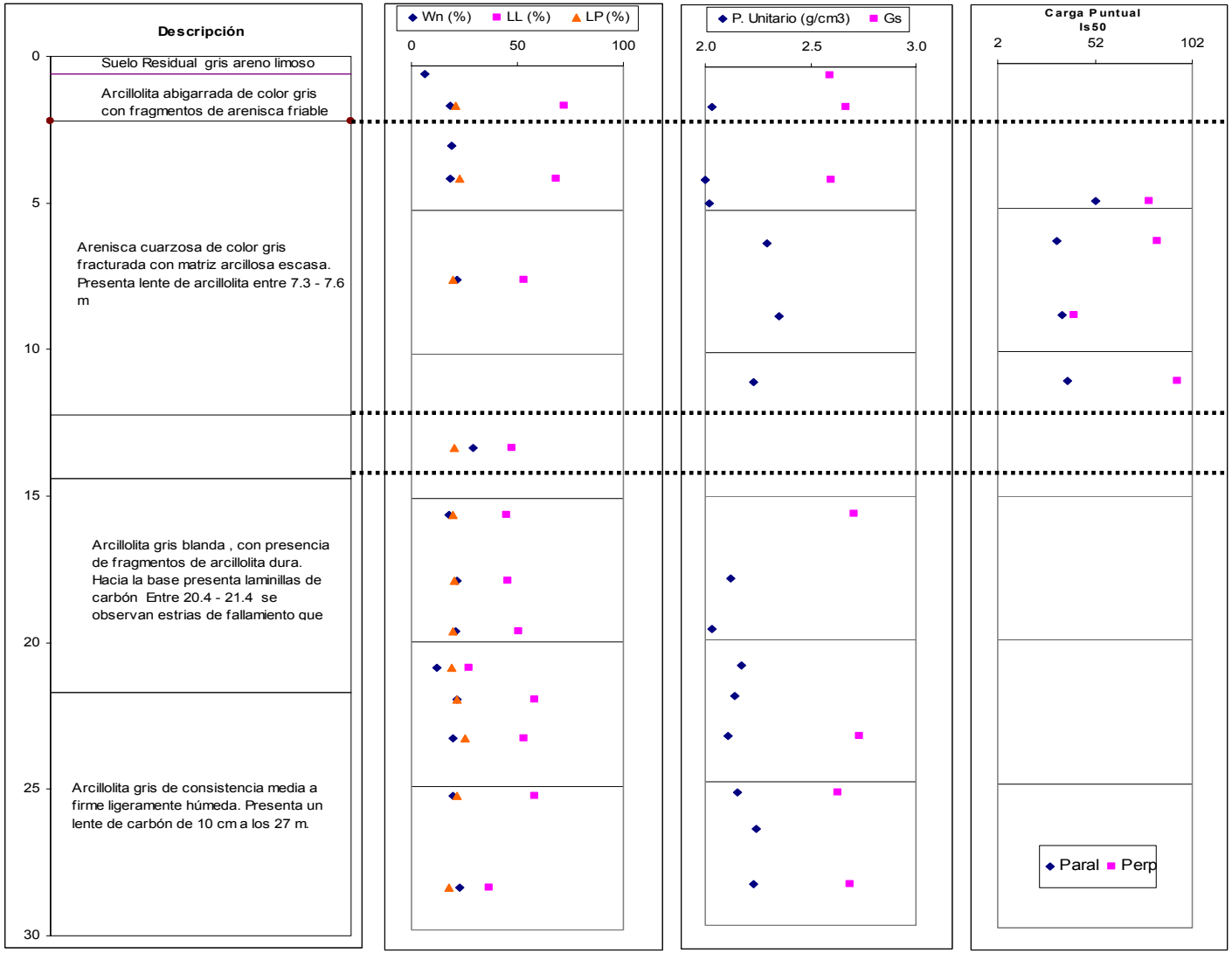


Figura 5.1 Perfil Geotécnico de la perforación 1

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			% PASA	γt	GS	Is (50) Kg/cm2		TRIAXIAL		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	TAMIZ 200	Grs/cm3		Paral	Perp	C' Kg/cm2	ϕ' (°)	K cm/s	Cv cm2/s
1	1.3	3.15	2.225	Arenisca cuarzosa color pardo con betas blancas, grano fino redondeado a subredondeado						2.31		33.5					
2	3.15	4.7	3.925	Fragmentos de arenisca embebidos en matriz arcillosa	15.70	39	16.6	22.5			2.63						
3	4.7	7.65	6.175	Arenisca cuarzosa, gris clara amarillenta, con tonalidades rojizas y marrones oscuras debido a la oxidación, matriz arcillosa escasa. La roca es dura, con fracturamiento a lo largo del cual hay relleno de material arcilloso, marrón oscuro.						2.24		67.14					
4	7.65	8.5	8.075	Arcillolita gris clara algo oxidada,presencia de gravas angulares,ligeramente húmeda.	28.40	59.6	26.7	32.9			2.62						
5	8.5	9.3	8.9	Arcillolita gris amarillenta,planos de estratificación,algo oxidada,seca.						2.22		31.86					
6	9.3	12.1	10.7	Arcillolita gris clara amarillenta, blanda presenta planos de estratificación, muy fracturada ,algo oxidada,seca.	15.6	38.1	18.6	19.4			2.64			0	23.5		
7	12.1	12.8	12.45	Arcillolita amarillo rojizo con betas color morado, fracturada consistencia media-firme,algo oxidada,seca.	15.6	40.8	18.9	22.0		2.08	2.65						
8	12.8	14.4	13.6	Arcillolita gris oscura con fragmentos granulares de arenisca cuarzosa,algo oxidada,ligeramente húmeda.	21.8	43.5	19.5	24.0		2.08	2.74						
	14.4	15.1	14.75	Arenisca cuarzosa gris clara con tintes marrones por oxidación, intercalada con niveles delgados de arcillolita marrón													
9	15.1	17	16.05	Arcillolita amarilla totalmente blanda algo oxidada con gravas angulares de arenisca y arcillolita marrón,seca.	19.6	64.8	19.8	45.0			2.68						
10	17	18.5	17.75	Arcillolita gris clara de consistencia firme algo oxidada,seca.	17.4	50.1	21.0	29.1		2.07	2.62					6.71E-08	0.00234
	18.5	19.8	19.15	Arcillolita gris clara, con tintes amarillentos y rojizos, medianamente compacta, maleable. En los primeros 0.70 m se presentan láminas intercaladas de colores amarillo y gris. También se observan estrías oxidadas de fallamiento y esporádicamente se encue													
11	19.8	20.8	20.3	Arcillolita gris oscura con planos de estratificación ,consistencia firme pero fracturada, algo oxidada,seca.	14.5	34.7	18.7	16.0		2.19	2.68						
	20.8	22.6	21.7	Arenisca cuarzosa, amarilla a parda, de grano medio a grueso, subangular a subredondeado, con matriz arcillosa escasa. La roca es dura con baja incidencia de fracturación.													
12	22.6	24	23.3	Arena suelta, cuarzosa, de color marrón, hacia la parte media superior presenta principalmente fragmentos hasta de 3cm de arcillolita negra, rica en materia orgánica, con tintes carbonosos.	25.0				14.1								
13	24	25.6	24.8	Arcillolita gris, medianamente compacta, con presencia esporádica de materia orgánica principalmente hacia el tope.	14.9	30.4	18.5	12.0		2.24	2.68						
14	25.6	28.9	27.25	Arcillolita café amarillenta oscura,consistencia firme,seca.	12.3	31.0	19.1	11.9		2.27	2.67						

Nota: El ensayo de triaxial fue realizado sobre muestra remoldeada, Los valores de K y Cv son para un nivel de esfuerzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.2 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 2

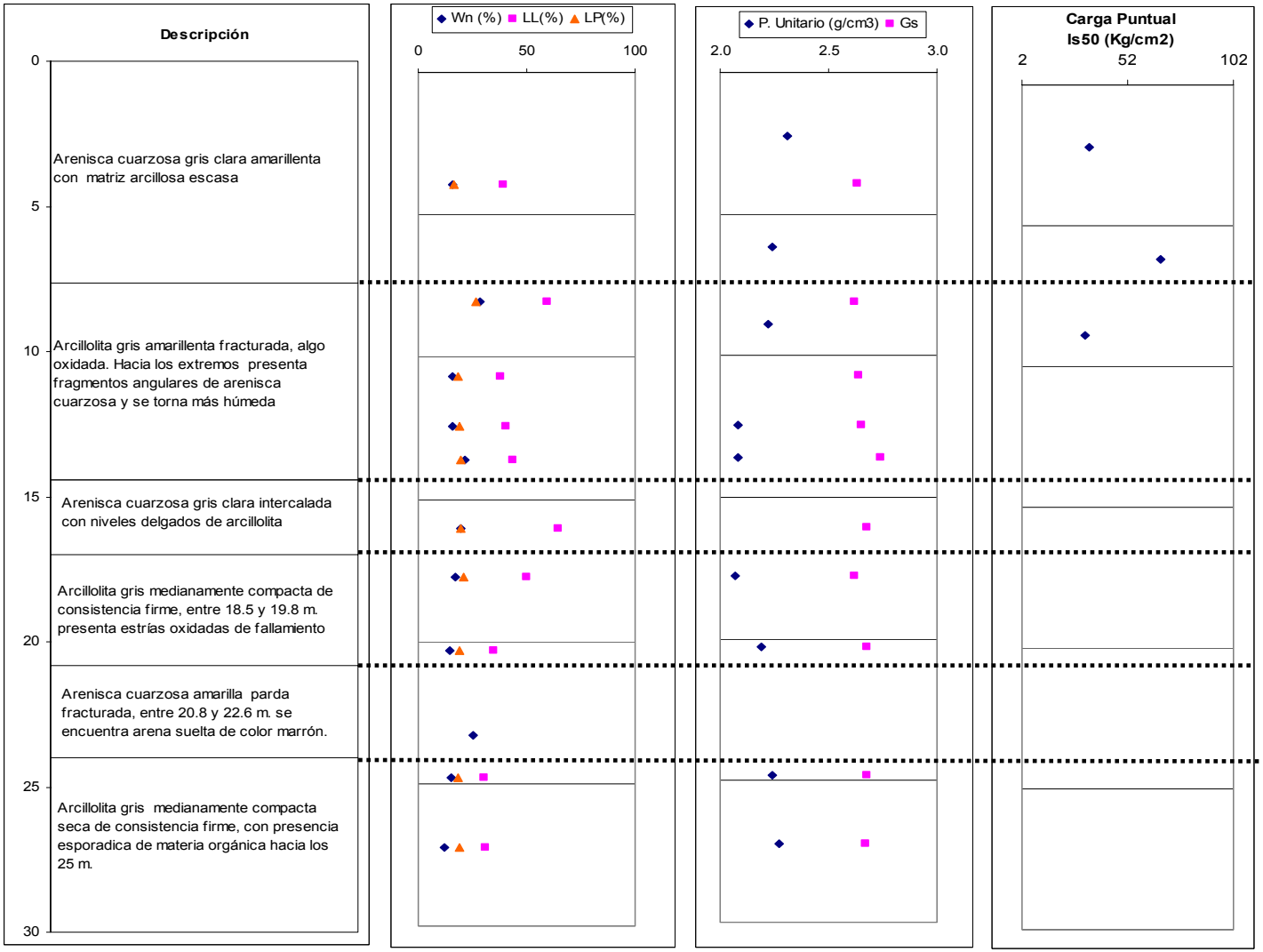


Figura 5.2 Perfil Geotécnico de la perforación 2

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	K cm/s	Cv cm2/s
1	0	7.14	3.57	Arenisca cuarzosa gris amarillenta, muy fracturada, friable en algunos tramos,algo oxidada, matriz arcillosa escasa, seca.	8.50				2.17	2.68	7.14			
2	7.14	7.26	7.2	Arcillolita gris con bandas amarillas por oxidación, blanda, masiva. Hacia la base se presentan láminas intercaladas de colores grises claras y amarillentas.	20.50	70.7	25.4	45.3		2.77				
3	7.26	8.17	7.715	Arenisca gris parda con intercalaciones de arcillolita gris, bandas cafés, ligeramente húmeda.	30.60	32.9	15.6	17.3			3.62	8.55		
3A	8.17	9.1	8.635	Arenisca gris parda con intercalaciones de arcillolita gris, bandas cafés, ligeramente húmeda.	17.00	43.1	18.2	24.9	2.37					
3B	9.1	10	9.55	Arenisca gris parda con intercalaciones de arcillolita gris, bandas cafés, ligeramente húmeda.	23.4	68.3	24.5	43.9		2.68				
4	10.6	12.6	11.6	Arenisca cuarzosa gris parda,bandas marrón algo oxidada,compacta,seca.					2.31		22.35	51.72		
5	12.6	14.1	13.35	Arenisca con intercalaciones de arcillolita gris parda bandas cafés,ligeramente húmeda.	25.7				2.39					
6	14.1	15.28	14.69	Arenisca cuarzosa gris verdosa con intercalaciones de arcillolita gris,seca.	20.8	62.0	23.4	38.6			37.72	49.93		
6A	15.28	16.45	15.865	Arenisca cuarzosa gris verdosa con intercalaciones de arcillolita gris,seca.	14.3	57.4	23.4	34.0						
6B	16.45	17.62	17.035	Arenisca cuarzosa gris verdosa con intercalaciones de arcillolita gris,seca.	25.6	62.6	26.3	36.2	2.32					
6C	17.62	18.8	18.21	Arenisca cuarzosa gris verdosa con intercalaciones de arcillolita gris,seca.	22.5	67.8	27.1	40.7		2.73				
7	18.8	21.4	20.1	Arenisca gris parda poco friable muy fracturada, con intercalaciones de arcillolita gris,seca.					2.41		26.88	44.15		
8	21.4	25.8	23.6	Arenisca parda bandas cafés,consistencia firme,fracturada al final del tramo,seca.					2.35		34.88	79.52		
9	25.8	27.4	26.6	Arcillolita gris parda,compacta,consistencia firme,seca.	17.2	44.2	20.7	23.6	2.31	2.82			4.48E-08	0.00272
10	27.4	27.6	27.5	Arcillolita gris parda en matriz orgánica carbonosa,algo oxidada,seca.					1.77					
11	27.6	28	27.8	Arcillolita gris compacta,consistencia firme,seca.	11.50	36.7	20.4	16.2	2.23	2.72				
12	28	28.9	28.45	Arcillolita gris compacta algo oxiada,seca.	13.8				2.20					
13	28.9	30.4	29.65	Arcillolita café amarillenta oscura puntos de oxidación,seca.	14.0	38.5	19.7	18.8	2.24	2.71				

Nota: los valores de K y Cv son para un nivel de esfurzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.3 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 3

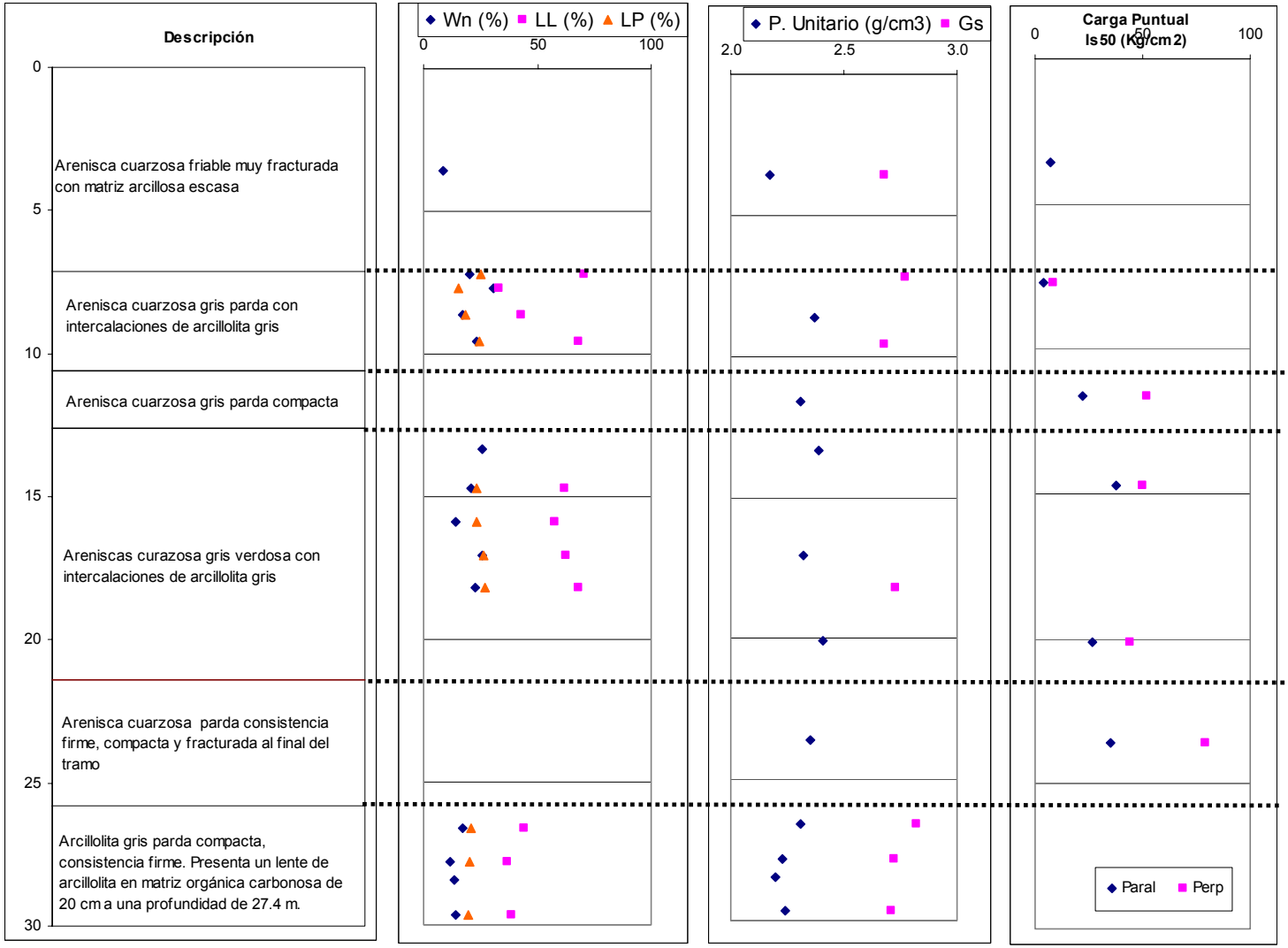


Figura 5.3 Perfil Geotécnico de la perforación 3

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CORTE DIRECTO				CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	C'p Kg/cm2	ϕ'p (°)	C'r Kg/cm2	ϕ'r (°)	K cm/s	Cv cm2/s
1	0	4.6	2.3	Areniscas embebidas en matriz arcillosa. R=34 cm	17.9	69.6	25.2	44.3		2.60								
2	4.6	5.6	5.1	Areniscas color café amarillento claro fracturado. R= 18 cm					2.28									
3	5.6	8	6.8	Arenisca con intercalaciones arcillolitas muy fracturada. R= 55 cm. color amarillenta.					2.30									
	8	8.3	8.15	Arenisca triturada en matriz arcillosa color café - amarillenta.														
4	8.3	8.36	8.33	Arcillolita blanda color gris claro con fragmentos de arenisca.	20.0													
5	8.36	8.6	8.48	Arenisca gris parda, bandas cafés,seca.					2.45		68.78							
6	8.6	8.8	8.7	Arcillolita color café amarillento oscuro con fragmentos arenisca angulares de 2-3 cm.	34.3													
7	8.8	8.9	8.85	Arenisca color gris claro con bandas de arcilla de 1-2 mm presenta puntos negros.	21.8													
8	8.9	9.2	9.05	Arcillolita color gris claro, seca compacta.	15.3	57.3	24.3	33.0	1.97	2.75								
9	9.2	9.25	9.225	Polvo de arcilla seca color habano oscuro con fragmentos arcillosos.	20.5	22.9	17.5	5.4		2.72								
10	9.25	10	9.625	Arenisca gris parda, bandas cafés,algo oxidada,seca.					2.46		57.07	71.25						
11	10	10.9	10.45	Arenisca gris amarillenta consistencia firme algo oxidada,seca.					2.23		37.98	68.99						
12	10.9	12.85	11.875	Arenisca cuarzosa color gris amarillenta fracturada dura.					2.37		48.98	49.06						
	12.85	13.28	13.065	Areniscas embebidas en matriz arcillosa.							35.31	55.24						
13	13.28	16.3	14.79	Arenisca cuarzosa color gris claro con bandas cafes, presenta en su tramo medio discontinuidades rellenas de material arcilloso.					2.33									
14	16.3	19.2	17.75	Arenisca color habano oscuro oxidada, altamente fracturada y con vestigios de arcilla. Cementada.					2.30		35.04							
15	19.2	20.5	19.85	Arcillolita color gris claro con bandas habanas. Compacta.	22.7	39.8	19.5	20.3	2.09	2.74			0.1	33			6.51E-08	0.00238
16	20.5	20.7	20.6	Areniscas color gris oscuro algo oxidado presentan planos de estratificación gruesos entre 1-2 mm.					2.27									
17	20.7	21.2	20.95	Arenisca color gris claro con bandas cafés, compacta dura.					2.36		25.4							
18	21.2	23.8	22.5	Arcillolita color gris claro, húmeda compacta.	17.4	34.8	19.9	14.9	2.09	2.69			0.6	26	0.4	26		

Nota: El ensayo de corte directo de la M 18 se realizó con una saturación previa de la muestra de 48h. los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfurzos de 4 Kg/cn

Tabla 5.4 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 4

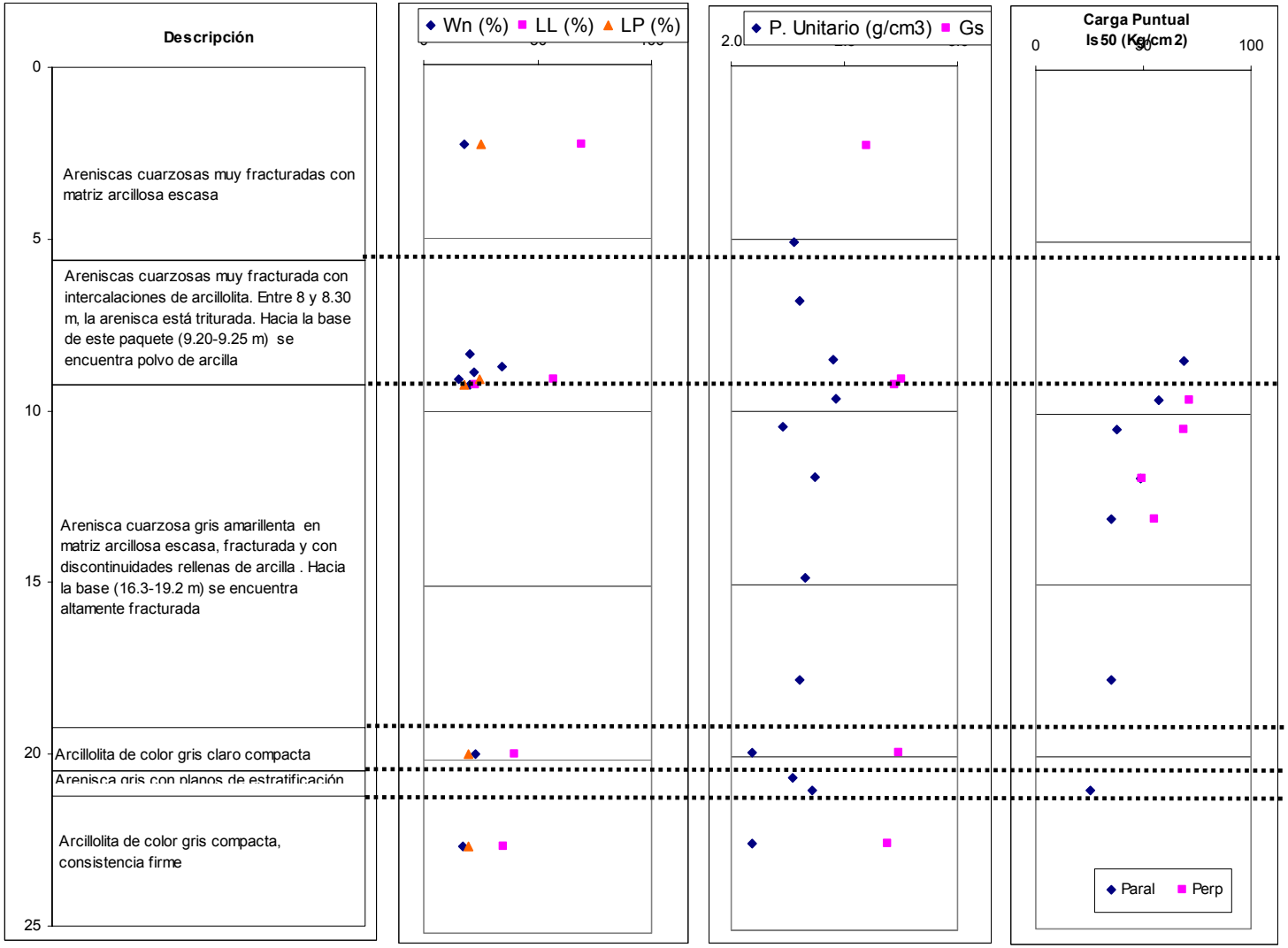


Figura 5.4 Perfil Geotécnico de la perforación 4

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CORTE DIRECTO		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	C'p Kg/cm2	ϕ'p (°)	K cm/s	Cv cm2/s
1	0.0	0.5	0.3	Suelo residual areno-limoso color café oscuro. Con presencia de trazas orgánicas.	13.1											
2	0.5	0.8	0.7	Arcillolita gris clara algo oxidada seca.	15.8	34.1	15	19.1		2.75						
3	0.8	2.2	1.5	Areniscas altamente fracturada color gris claro. No se recuperó.					2.48		7.69	13.6				
4	2.2	2.7	2.5	Arcillolita gris clara algo oxidada de baja plasticidad, seca.	22.5	29.4	14.6	14.8	2.00	2.68			0.1	31		
5	2.7	3.3	3.0	Arenisca color gris claro altamente fracturada con presencia de material arcilloso.	28.1				2.29		37.12					
6	3.3	3.5	3.4	Arcillolita color gris claro oxidada consistencia media.	29.7	89.5	30.3	59.2		2.68						
	3.5	5.3	4.4	Arenisca color gris clara altamente fracturada. R=28 cm												
7	5.3	5.8	5.5	Arenisca color gris claro con bandas cafés compacta, presenta discontinuidades rellenas con arcilla.					2.30		20.99	32.12				
8	5.8	6.2	6.0	Acillolita gris clara oxidada con fragmentos de arenisca en la parte baja.	24.1	64.9	21.3	43.6	2.03	2.63						
9	6.2	6.8	6.5	Arcillolita color gris pardo húmeda-plástica, consistencia blanda.	40.1											
10	6.8	7.2	7.0	Fragmentos de arenisca embebidos en matriz arcillosa, plastica.	23.9	71.3	23.4	47.9		2.79						
11	7.2	8.1	7.7	Arenisca color gris clara pardo con bandas cafes, compacta en los extremos y fracturada hacia el centro.					2.45		24.74	41.99				
12	8.1	8.3	8.2	Arcillolita gris clara, húmeda , consistencia media alta.	22.3	59.7	24.5	35.2		2.66						
13	8.3	11.1	9.7	Arenisca color gris amarillenta presenta fracturas rellenas de material arcilloso, poco friable.					2.38							
13 A	11.1	11.4	11.2	Fragmentos de areniscas embebidas en matriz arcillosa.					2.15							
14	11.4	15.4	13.4	Arenisca cuarzosa de color gris claro pardo compacta poco friable.					2.42			72.65				
	15.4	15.9	15.7	Arenisca cuarzoza color gris pardo altamente fracturada.												
15	15.9	18.5	17.2	Arenisca cuarzoza color gris rojizo, presenta en algunos tramos fracturas rellenas de material arcilloso, presenta bandas color café oscuro compacta y dura.												
16	18.5	21.5	20.0	Arcillolita color gris claro compacta.	21.70	39.2	18.1	21.1	2.06	2.66					7.86E-08	0.00238

Nota: los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfurzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.5 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 5

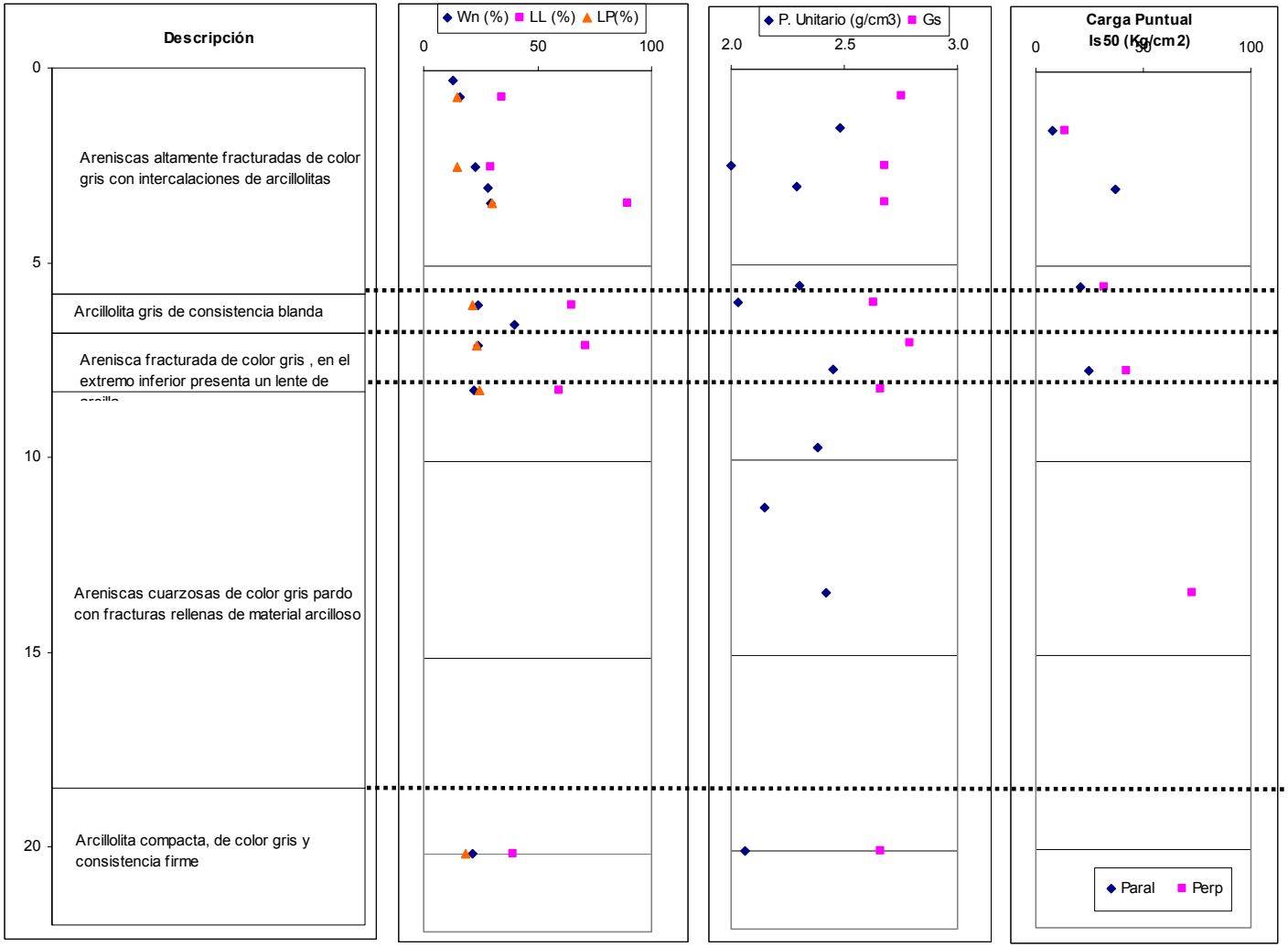


Figura 5.5 Perfil Geotécnico de la perforación 5

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			Clasifc.	γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	USCS	Grs/cm3		Paral	Perp	K cm/s	Cv cm2/s
	0.0	1.6	0.8	Suelo residual areno limoso café amarillento oscuro,seco.											
1	1.6	5.1	3.4	Arcillolita con intercalaciones areniscas altamente fracturada color gris claro con betas rojizas.	29.5	71.8	31.3	40.5	CH	1.94	2.76				
	5.1	8.4	6.8	Arenisca color gris fracturada, recuperación 65 cm											
2A	8.4	11.2	9.8	Arenisca color gris pardo altamente fracturada						2.27		23.97	19.01		
2B	11.2	13.6	12.4	Arenisca color gris pardo altamente fracturada						2.35		30.96	39.45		
2C	13.6	16.8	15.2	Arenisca color gris pardo altamente fracturada						2.32		24.33	14.75		
3	16.8	18.4	17.6	Arenisca color habano oscuro con bandas cafés, poco friable						2.26		20.31	20.04		
3A	18.4	20.0	19.2	Arenisca color habano oscuro con bandas cafés, poco friable						2.32		31.1	47.36		
3B	20.0	21.6	20.8	Arenisca color habano oscuro con bandas cafés, poco friable y altamente fracturada						2.23		18.6	21.54		
4	21.6	26.1	23.9	Arcillolita gris algo oxidada consistencia firme,fragmentos de arenisca,seca.	17.8	38.8	20.7	18.1	CL	2.09	2.66			7.73E-08	0.00237

Nota: los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfuerzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.6 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 6

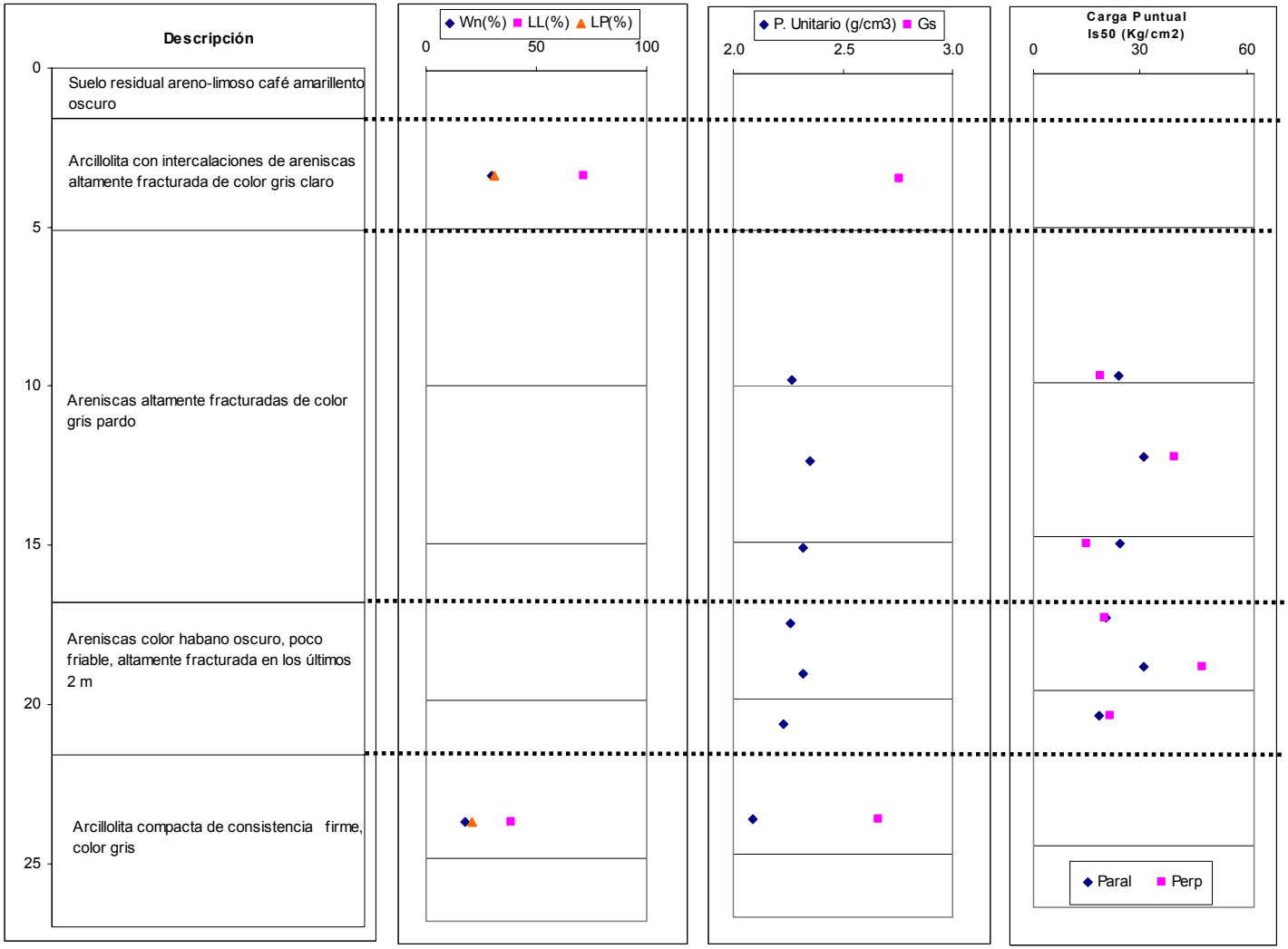


Figura 5.6 Perfil Geotécnico de la perforación 6

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			% PASA	γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	TAMIZ 200	Grs/cm3		Paral	Perp	K cm/s	Cv cm2/s
1	0.0	2.7	1.4	Suelo residual areno limoso café oscuro,presencia de raíces,seco.	22.40				34.34						
2	2.7	2.8	2.8	Arenisca grís amarillenta algo oxidada,seca.						2.31					
3	2.8	3.3	3.1	Arenisca color habano claro friable.						2.23		9.1	7.26		
4	3.3	3.7	3.5	Arenisca friable embebida en matriz areno-limosa.	4.40				19.80						
5	3.7	3.8	3.8	Arcillolita gris oscura algo oxidada húmeda.	16.0	46.3	20.5	25.8			2.75				
6	3.8	4.8	4.3	Arcillolita gris seca con bandas de oxidación,presenta planos de estratificación.	18.7	52.4	18.7	33.7			2.71				
	4.8	6.4	5.6	Arenisca habana altamente fracturada, recuperación 10 cm.											
7	6.4	8.0	7.2	Arenisca color pardo amarillenta altamente fracturada.	12.8										
8	8.0	8.2	8.1	Arcillolita gris húmeda con planos de estratificación.	26.9	60.4	26.5	33.9			2.92				
9	8.2	10.9	9.5	Arenisca color pardo amarillenta altamente fracturada, presenta diaclasas en varias direcciones.						2.25		10.22	10.8		
10	10.9	12.5	11.7	Arcillolita con intercalaciones de arenisca color gris amarillenta fracturada.	21.3	78.2	30.7	47.5		2.32	2.97				
11	12.5	14.1	13.3	Arenisca color pardo amarillenta de consistencia firme poco friable algo oxidada y fracturada.						2.29		16.32	18.74		
12	14.1	14.3	14.2	Aenisca color pardo amarillento con vetas rojizas , consistencia firme.	11.5					2.25		19.69			
13	14.3	17.5	15.9	Arenisca color pardo amarillenta muy fracturada friable con presencia de vetas oxidadas.						2.22					
13A	17.5	20.7	19.1	Arenisca color pardo amarillenta muy fracturada friable con presencia de vetas oxidadas.						2.25					
14	20.7	23.1	21.9	Arcillolita grís oscura consistencia firme algo oxidada,seca.	21.1				10.0	2.08	2.80			1.12E-07	0.00237

Nota: los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfuerzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.7 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 7

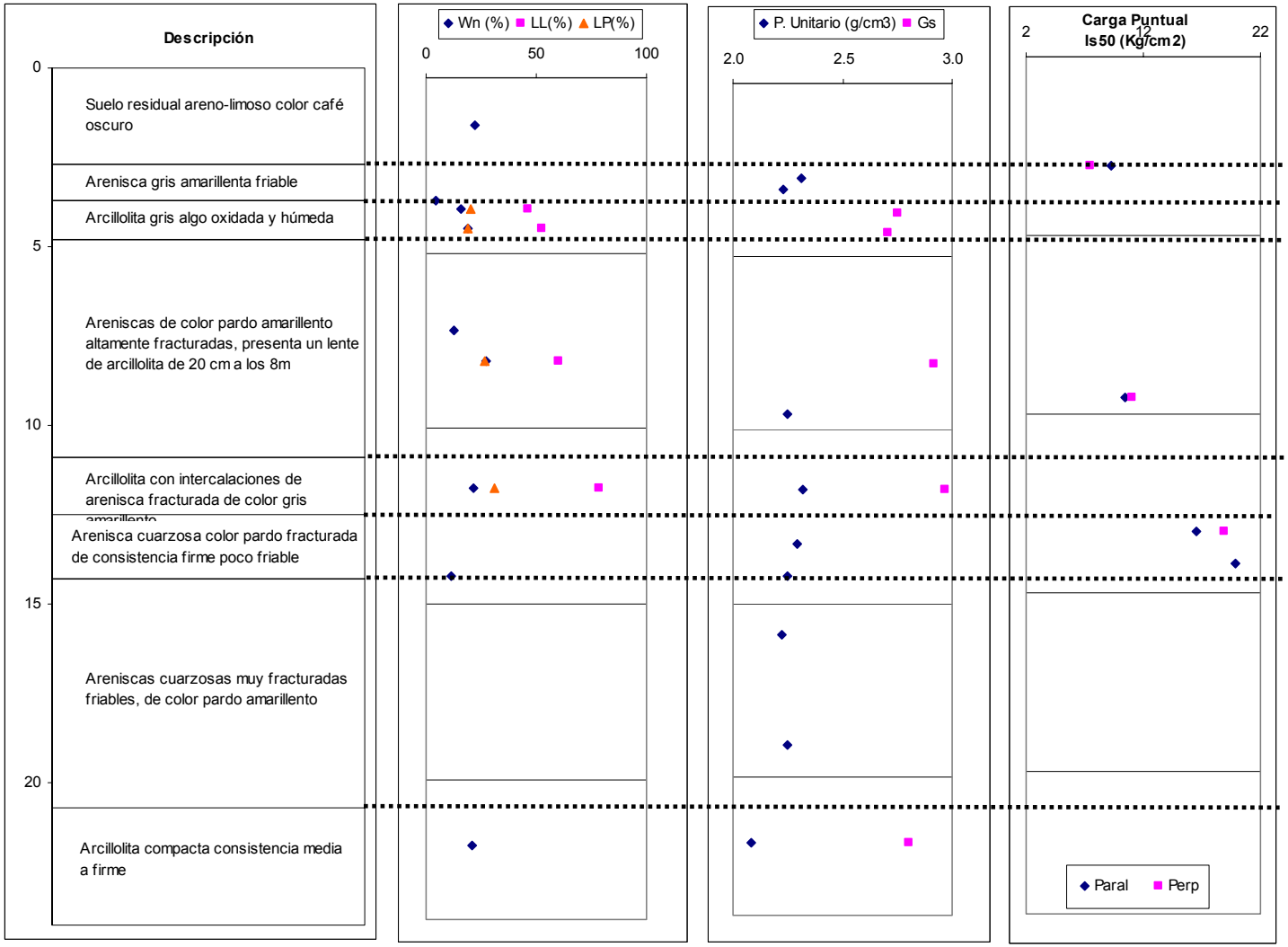


Figura 5.7 Perfil Geotécnico de la perforación 7

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	K cm/s	Cv cm2/s
	0.0	0.5	0.3	Suelo residual.										
1	0.5	2.3	1.4	Arcillolita color gris con vetas rojas y pequeñas intercalaciones de arenisca.	27.60	46.8	17.5	29.3		2.79				
2	2.3	3.7	3.0	Arenisca color pardo algo fracturada consistencia firme,algo oxidada,ligeramente húmeda.					2.19		15.27	14.42		
3	3.7	9.6	6.7	Areniscas color pardo muy fracturadas con pequeñas intercalaciones de arcillolita húmeda color gris , blanda.	32.10	63.6	22.7	40.9	2.29	2.69				
4	9.6	14.9	12.3	Areniscas color pardo amarillenta fracturada, consistencia firme.					2.20		37.93	43.77		
5	14.9	16.9	15.9	Areniscas color pardo amarillento altamente fracturadas					2.24		20.85			
6	16.9	19.9	18.4	Arenisca parda amarilla muy fracturada con intercalaciones de arcillolita gris algo oxidada,seca.					2.42		68.72	58.81		
7	19.9	22.4	21.2	Arcillolilta gris con bandas rojisas consistencia firme,algo oxidada,seca.	20.7	50.9	20.5	30.4		2.71			9.70E-08	0.00238
8	22.4	22.8	22.6	Arenisca parda fracturada consistencia firme algo oxidada,seca.					2.41					
9	22.8	24.5	23.7	Arcillolita parda rojiza,consistencia firme,algo oxidada,seca.	14.3	34.9	19.8	15.0		2.74				
10	24.5	28.3	26.4	Arcillolita gris oscura consistencia firme ligeramente húmeda.	26.2	52.9	22.9	36.3		2.79			6.31E-08	0.00238
	28.3	28.9	28.6	Carbón										
11	28.9	30.1	29.5	Arcillolita gris oscura consistencia firme algo oxidada,ligeramente húmeda.	22.6	30.3	19.0	11.3	2.21					

Nota: los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfuerzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.8 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 8

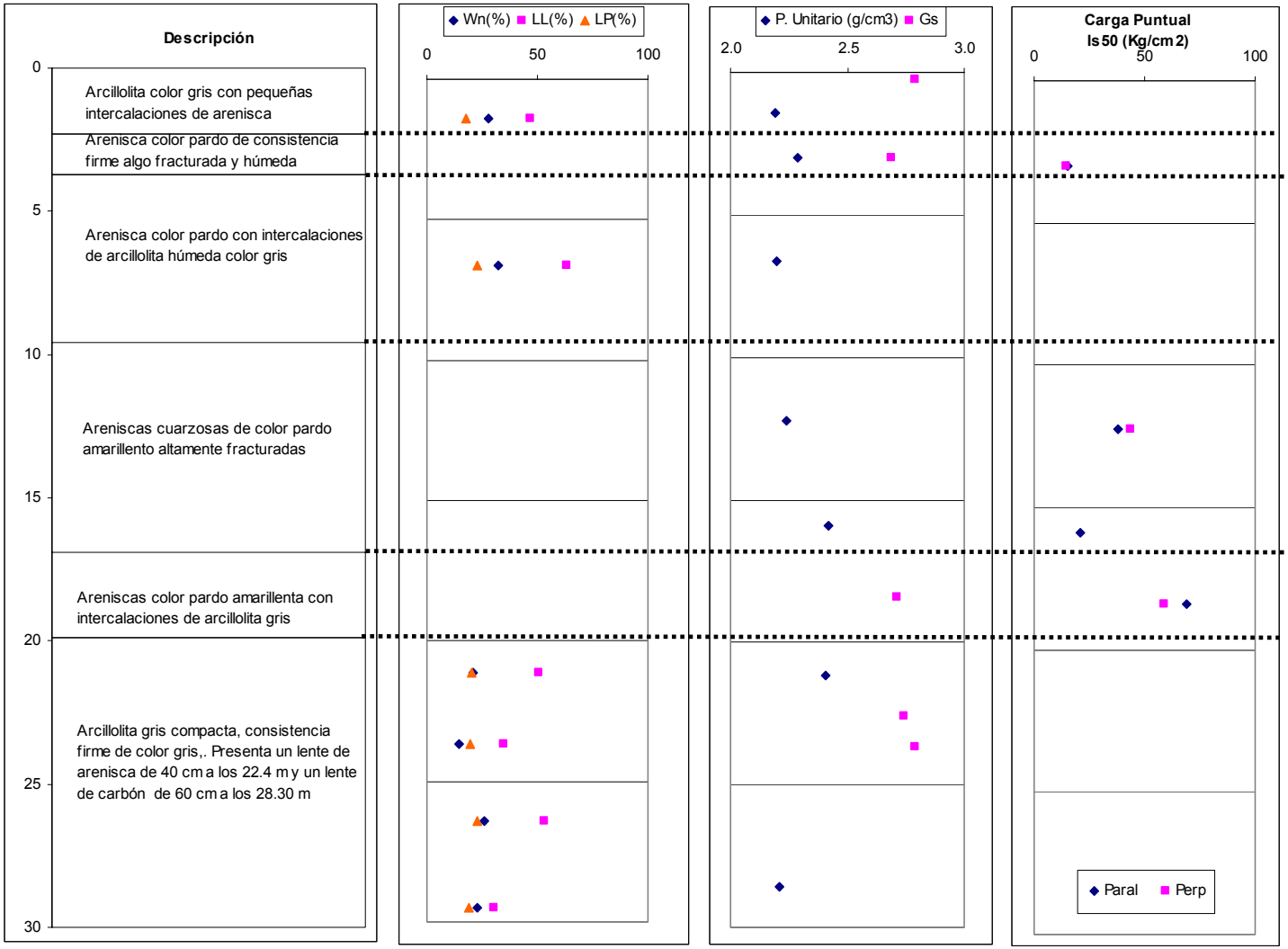


Figura 5.8 Perfil Geotécnico de la perforación 8

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CORTE DIRECTO				TRIAXIAL	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	C'p Kg/cm2	ϕ'p (°)	C'r Kg/cm2	ϕ'r (°)	C' Kg/cm2	ϕ' (°)
1	4.9	5.0	4.95	Arcillolita grís betas amarillas de oxidación consistencia dura,ligeramenta húmeda.	9.6	44	20.5	23.5	2.12									
2	7.5	7.6	7.55	Arenisca habana con oxidaciones,frascturada consistencia dura.					2.30									
3	8.2	8.3	8.25	Arcillolita grís habana consistencia media con oxidaciones ligeramente húmeda.					2.00									
4	9.0	9.4	9.20	Arena fina con algunas gravas amarilla ,ligeramente húmeda.(Muestra alterada)	6.1													
5	13.0	13.2	13.10	Arcillolita grís betas amarillas liomosas con oxidaciones consistencia dura,ligeramenta húmeda.	20.1				2.01				0.35	18.4	0.2	12.5		
6	14.6	14.8	14.70	Arenisca habana consistencia dura.					2.27			19.71						
7	15.2	15.6	15.40	Arenisca habana consistencia dura.					2.24		39.36	23.29						
8	20.6	21.2	20.90	Arcillolita grís con oxidaciones consistencia dura,ligeramenta húmeda.	16.1	34.9	19.8	15.2		2.73							0	33.7
9	24.5	25.0	24.75	Arcillolita grís betas amarillas de oxidación consistencia dura,ligeramenta húmeda.	14.8	35.2	21.1	14.1		2.70							0	43.8
10	26.0	26.5	26.25	Arcillolita rojisa algo oxidada consistencia dura,ligeramenta húmeda.	16.6				2.17	2.81								
11	27.5	27.7	27.60	Arcillolita habana con oxidaciones consistencia dura-media,ligeramenta húmeda.	18.8	34.8	21.1	13.7	2.12				0.4	33	0	25		

Tabla 5.9 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 9

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CORTE DIRECTO				CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	C'p Kg/cm2	ϕ'p (°)	C'r Kg/cm2	ϕ'r (°)	K cm/s	Cv cm2/s
1	4.0	4.4	4.20	Arcillolita grís con puntos amarillos de oxidación consistencia dura ligeramente húmeda..	13.9	37.9	19.2	18.7	2.16									
2	8.1	8.4	8.25	Arenisca grís oscura consistencia dura ,algo oxidada,ligeramente húmeda.	6.40				2.32									
3	9.5	9.8	9.65	Arenisca grís oscura muy fracturada verticalmente,algo oxidada,ligeramente húmeda.					2.39		53.866							
4	13.4	13.8	13.60	Arcillolita grís con puntos amarillos de oxidación consistencia dura ligeramente húmeda..	6.8				2.28				1.1	22.6	0.5	16.7		
5	15.4	15.7	15.55	Arcillolita grís con habanooxidacione, consistencia firme betas cafés , ligeramente húmeda..	12.5				2.24	2.67			0.7-0.2	28.5-3	0.4-0	24-26	1.44E-07	0.0027
6	18.6	19.2	18.90	Arcillolita grís con oxidacione, consistencia dura ligeramente húmeda..	12.1				2.22	2.70							4.90E-08	0.0024

Nota: los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfuerzos de 3 Kg/cm2 en la muestra 5 y 4 Kg/cm2 en la muestra 6

Tabla 5.10 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 10

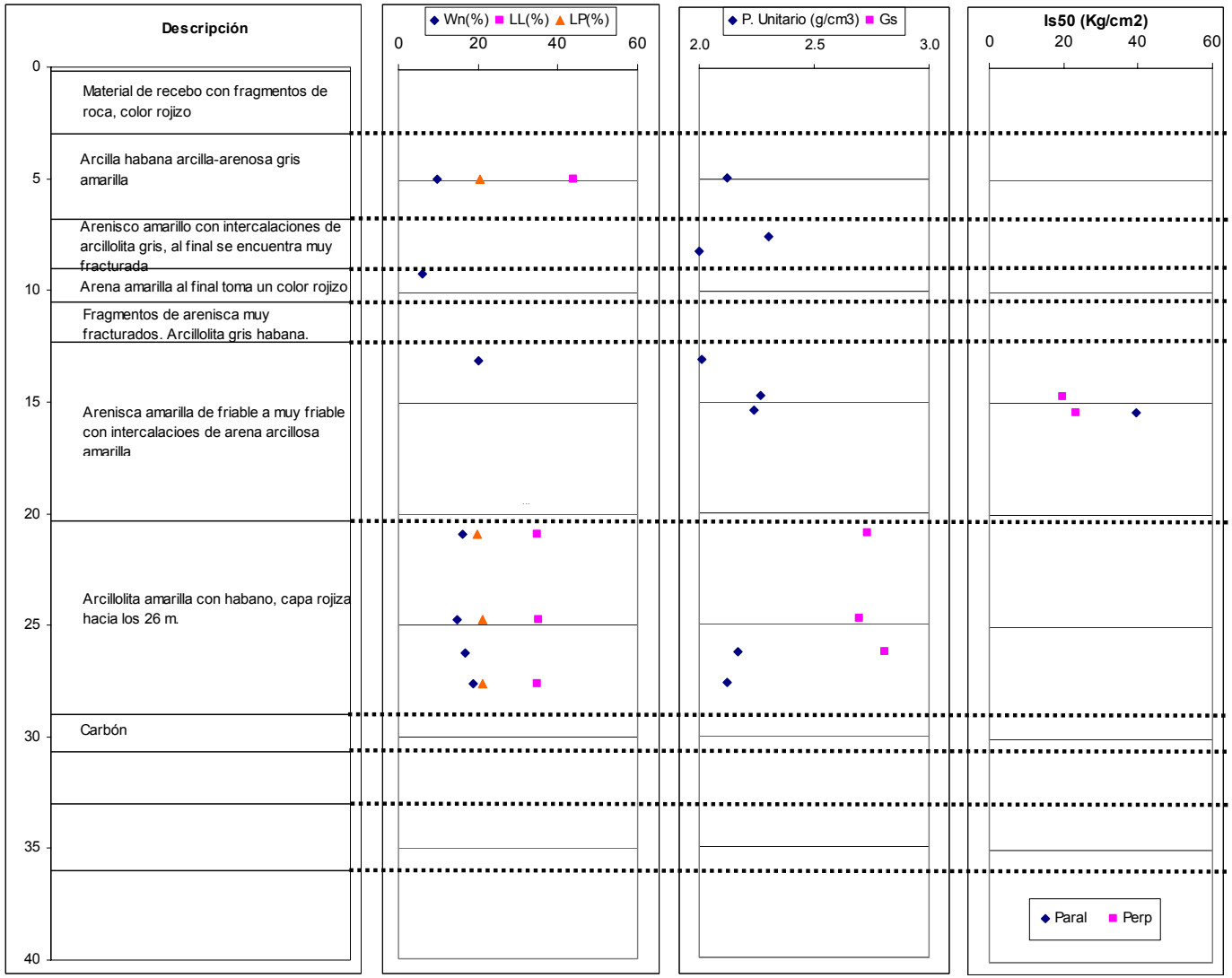


Figura 5.9 Perfil Geotécnico de la perforación 9



Figura 5.10 Perfil Geotécnico de la perforación 10

Muestra	Profundidad (m)		Media	DESCRIPCIÓN	Humedad	Limites de Att.			γt	GS	Is (50) Kg/cm2		CORTE DIRECTO				TRIAXIAL		CONSOLIDACION	
	DESDE	HASTA			105 °C %	LL %	LP %	IP %	Grs/cm3		Paral	Perp	C'p Kg/cm2	ϕ'p (°)	C'r Kg/cm2	ϕ'r (°)	C' Kg/cm2	ϕ' (°)	K cm/s	Cv cm2/s
1	3.0	3.4	3.20	Arenisca grís con habano con oxidaciones consistencia dura.					2.21		41.292	57.854								
2	5.4	5.7	5.55	Arenisca grís con habano con oxidaciones consistencia dura.					2.26			38.401								
3	9.5	9.6	9.55	Arenisca grís con habano con oxidaciones consistencia dura.					2.41			39.913					0	31.8		
4	10.2	10.4	10.30	Arenisca grís con habano con oxidaciones consistencia dura.					2.30		40.139									
5	10.5	10.7	10.60	Arenisca grís con habano muy oxidada, consistencia dura,fracturada.					2.49		13.0									
6	11.0	11.3	11.15	Arcillolita grís oscura,consistencia dura con betas orgánicas,húmeda.	15.6	48.2	15.7	32.5	2.07	2.46									5.77E-08	2.38E-03
6SI	11.0	11.3	11.15	Arcillolita grís consistencia dura con oxidaciones ligeramnte húmeda.	16.3	39.7	22.5	17.2	2.16	2.74									7.01E-08	2.38E-03
7	12.5	13.0	12.75	Arcillolita limosa grís oscura grís oscura,consistencia dura ligeamenta húmeda.	13.1				2.14				0.7	39	0.2	33.6				
7SI	12.5	13.0	12.75	Arcillolita grís consistencia dura con oxidaciones ligeramnte húmeda.	16.8				2.18	2.73									6.89E-08	2.35E-03
8	17.0	17.4	17.20	Arcillolita grís con oxidaciones consistencia dura,ligeramenta húmeda.	10.7	29.4	19.7	9.7		2.63										
9	18.0	18.5		Carbón consistencia dura.																
10	20.0	20.4	20.20	Arcillolita grís con hanano y limo algo rgániaco consistencia dura,ligeramenta húmeda.	13.6	44.4	21.9	22.4	2.15	2.82									6.31E-08	2.38E-03

Nota: los valores de K y Cv en el ensayo de consolidación son para un nivel de esfuerzos de 4 Kg/cm2

Tabla 5.11 Resultados de los ensayos de laboratorio - Perforación 11

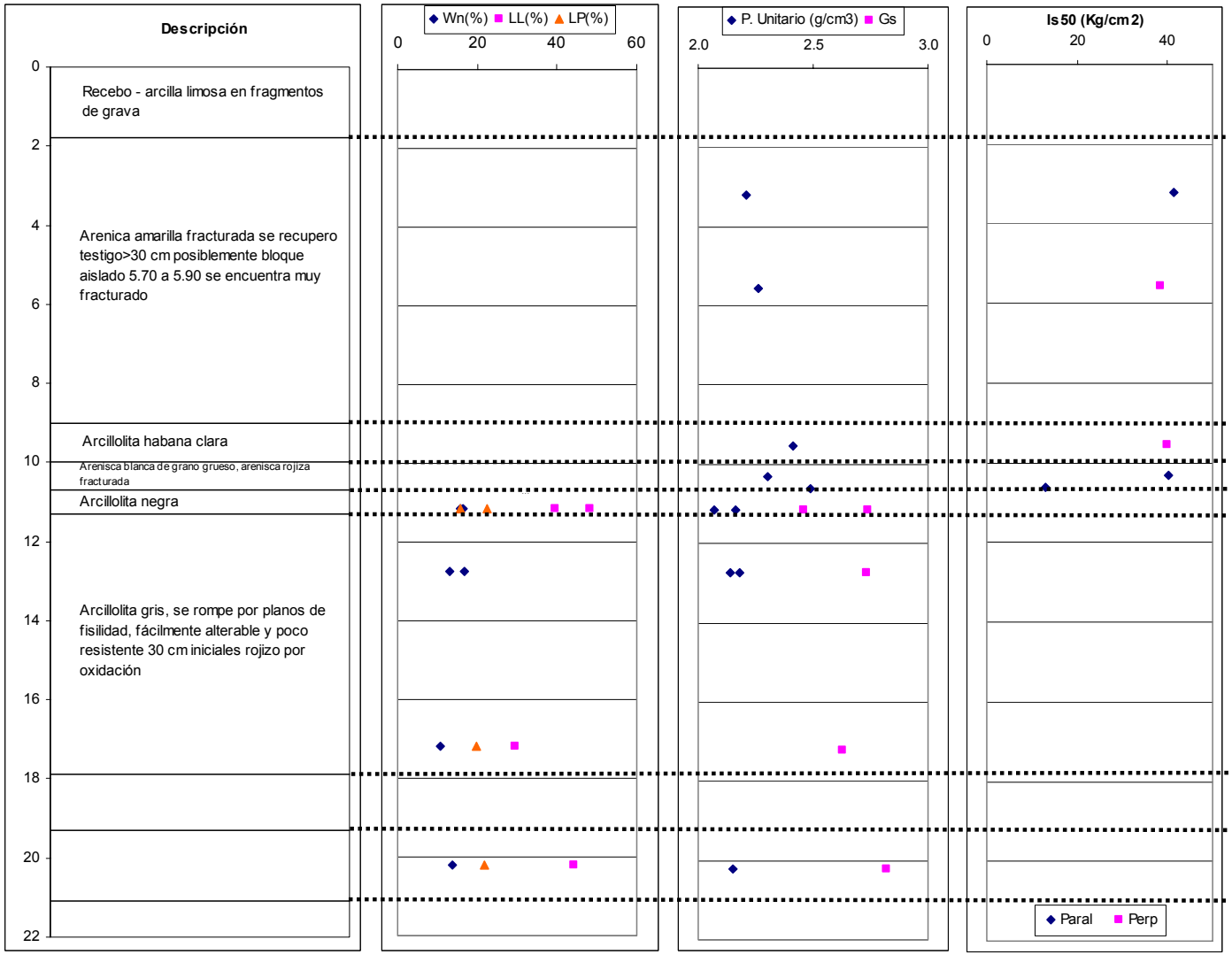


Figura 5.11 Perfil Geotécnico de la perforación 11

La distribución de ensayos realizados en cada una de las perforaciones se ilustra en la **Tabla 5.12**.

Perforación	Humedad	Límites	Granulometría	Peso Específico	Peso Unitario	Carga puntual	Corte directo	Triaxial	Consolidación	Compresión S.
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
2	X	X	X	X	X	X		X	X	
3	X	X		X	X	X			X	
4	X	X		X	X	X	X		X	
5	X	X		X	X	X	X		X	
6	X	X		X	X	X			X	
7	X	X	X	X	X	X			X	
8	X	X	X	X	X	X			X	
9	X	X		X	X	X	X	X		X
10	X	X		X	X	X	X		X	
11	X	X		X	X		X	X	X	X

Tabla 5.12 Relación de ensayos en cada una de las perforaciones

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS GEOTÉCNICOS

Existen esencialmente tres tipos de materiales identificables en el macizo rocoso: el suelo residual, las areniscas y las arcillolitas. Los ensayos geotécnicos se concentraron sobre las arcillolitas y las areniscas, al suelo residual por no encontrase en la probable zona de falla no se le practicaron ensayos.

5.3.1 Arcillolitas

Debido a que las arcillolitas se encuentran fuertemente alteradas por fallamiento local, pueden catalogarse como rocas blandas, de manera que a las muestras obtenidas se les realizaron algunos ensayos de propiedades índice, de resistencia y compresibilidad.

5.3.1.1 Propiedades Índice

De los perfiles geotécnicos se puede observar que existe uniformidad en las propiedades de humedad, límites, peso unitario y peso específico de sólidos con la profundidad. En la **Tabla 5.13** se presentan los promedios de estas propiedades en cada una de las perforaciones. (Ver **Anexos 5.2** a **5.5**).

En el **Anexo 5.6** se encuentran algunos ensayos de granulometría realizados para la caracterización del material encontrado.

Pozos	Humedad	Limites de Att.			% PASA TAMIZ 200	GS	γ_t
	105 °C %	LL %	LP %	IP %			Grs/cm^3
1	20.27	51.32	20.65	30.67	57.93	2.67	2.11
2	17.58	43.20	19.74	23.48		2.66	2.16
3	19.27	53.11	22.25	30.86		2.74	2.21
4	18.76	44.88	21.28	23.58		2.70	2.05
5	25.01	55.44	21.03	34.41		2.69	2.03
6	23.65	55.30	26.00	29.30		2.71	2.02
7	20.73	59.33	24.10	35.23	10.00	2.83	2.20
8	23.92	46.57	20.40	27.20		2.74	2.25
9	16.00	37.23	20.63	16.63		2.75	2.08
10	11.33	37.90	19.20	18.70		2.69	2.23
11	14.35	40.43	19.95	20.45		2.68	2.14
PROMEDIO	**19.17**	**47.70**	**21.38**	**26.41**	**33.97**	**2.71**	**2.13**

Tabla 5.13 Valores promedio de las propiedades índice por perforación (Arcillolitas).

La humedad natural varía aproximadamente entre 11 y 25% con un promedio de 19 %, el límite líquido varía entre 37 y 59% con un promedio de 47.7%, el límite plástico varía entre 19 y 26% con un promedio de 21.4%, el índice de plasticidad varia entre 16 y 34.4% con un promedio de 26.4%, el peso específico de sólidos varia entre 2.66 y 2.83 con un promedio de 2.71 y el peso unitario varia entre 2.02 y 2.28 gr/cm^3 con un promedio de 2.13 gr/cm^3.

En general se ha encontrado que la humedad natural se encuentra muy cercana al límite plástico, lo que permite inferir que el material rocoso puede entrar en el rango de comportamiento plástico frente a cambios en los estados de esfuerzos.

5.3.1.2 Ensayos de Resistencia al Corte

Se realizaron ensayos de carga puntual, resistencia al corte, pruebas triaxiales y compresiones inconfinadas. Los resultados de estas pruebas se encuentran en los **Anexos 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10**. En la **Tabla 5.14** se muestran los resultados de los ensayos de resistencia.

5.3.1.2.1 Ensayos de Corte Directo

Se realizaron 11 ensayos de corte directo 9 en condiciones pico y residual y 2 en condición residual (**Anexo 5.8**). Los ensayos se realizaron a baja velocidad de deformación para permitir adecuadas condiciones de drenaje. Al saturarse el material tiende a expandirse y una vez que se realiza el corte de la muestra inalterada la tendencia es contraerse con la deformación cortante (material contráctil). Este fenómeno hace que por el procedimiento mismo del ensayo de corte, algunos valores de resistencia residual resulten superiores a los de resistencia pico, como ocurrió en la muestra P4-M15 y en menor proporción en la muestra P5-M4. Este comportamiento anómalo también puede estar asociado a la presencia ocasional de fragmentos de arcillolitas más compactas dentro de la misma muestra y la presencia de delgados lentes de arena fina que se detectaron

en muestra a profundidades entre 18 y 22 m, los cuales pueden llegar a jugar un papel importante en el aumento de la resistencia si por el remoldeo llegan a la superficie de rotura durante la prueba.

Muestra	Prof. (m)	CORTE DIRECTO				TRIAXIAL CU		q_u	OBSERVACIONES
		C'p (Kg/cm^2)	ϕ'p (°)	C'r (Kg/cm^2)	ϕ'r (°)	C' (Kg/cm^2)	ϕ' (°)	(Kg/cm^2)	
P1-M11	15			0.2	33				Muestra precortada
P1-M13	20			0	30				Muestra precortada
P1-M13	20					1.1	38		
P1-M20	28					0.9	50		
P2-M6	10					0	24		Muestra remoldeada y compactada
P4-M15	20	0.1	35						Valores de resistencia residual superiores a valores pico
P4-M18	22	0.7	17.5	0.4	16.2				Saturación 48 horas
P5-M4	2.5	0.1	33.7						Valores de resistencia residual superiores a valores pico
P9-M5	13.1	0.35	18.4	0.2	12.5				
P9-M8	20.9					0	33.7		
P9-M9	24.75					0	43.8		Los tres puntos se realizaron con la misma muestra
P9-M10	26.25							2.3	Compresión inconfinada
P9-M11	27.6	0.4	33	0	25				
P10-M4	13.6	1.1	22.6	0.5	16.7				
P10-M5	15.55	0.7 - 0.2	28.5 - 33	0.4 - 0	24 - 26				
P11-M3SI	9.55					0	31.8		Los tres puntos se realizaron con la misma muestra
P11-M7	12.75	0.7	39	0.2	33.6				
P11-M7SI	12.75							1.5	Compresión confinada
P11-M10	20.2							2.3	Compresión inconfinada

Tabla 5.14 Resultados de los ensayos de resistencia al corte (Arcillolitas)

Con el propósito de evaluar la resistencia del material remoldeado, se realizó un ensayo (Muestra P1-M11), con material reconstituido y compactado a una densidad similar al material inalterado. Adicionalmente se realizó otro ensayo con muestras inalteradas pero precortadas (Muestra P1-M13), es decir se dejaron dos mitades de muestra en el equipo de corte y se procedió a realizar el ensayo, con el fin de obtener la resistencia al corte sobre una superficie fallada y evitar la influencia de las pequeñas partículas de arcillolita.

Finalmente para evaluar el efecto de la posible saturación de la muestra, se realizó otro ensayo convencional con muestra inalterada, pero dejándola en saturación y sin carga durante 48 horas (Muestra P4-M18). En este caso el comportamiento fue muy consistente con valores pico superiores a los valores residuales.

En general los resultados en condición pico muestran ángulos de fricción interna entre 18° y 39° con cohesiones cercanas a cero, en condición residual con muestras precortadas presentan ángulos de fricción interna del orden de 30° con cohesión muy cerca del cero y para las otras condiciones residuales los ángulos de fricción interna varían entre 12° y 33° con cohesiones cercanas a cero. Cabe resaltar que a

pesar de todos los métodos utilizados para encontrar valores reales de condición residual, los mínimos valores registrados se encontraron al saturar la muestra por un periodo de 48 horas presentando un ángulo de fricción interna de 12 a 16° y cohesión de 0.2 a 0.4 Kg/cm2.

5.3.1.2.2 Ensayos Triaxiales

Se realizaron 6 ensayos traxiales consolidados no drenados (CU) midiendo presión de poros (**Anexo 5.9**). En general los valores de los parámetros de resistencia fueron altos (ángulos de fricción interna de 40° a 50° y cohesiones entre 0 y 1 Kg/cm^2) la arcilla podría considerarse en una condición intermedia entresuelo duro y roca blanda. A pesar de la alta resistencia del material se presentaron problemas para saturar y consolidar las muestras, debido a que fallaban aun sin aplicárseles algún esfuerzo desviador, con el simple flujo de agua a través de la muestra. Al analizar la superficie de falla se pudo notar pequeños lentes de arena fina y la alta oxidación que presentaban las caras en contacto con la arena, es decir existía una clara superficie de debilidad en el material (**Figura 5.12**). La única forma de poder realizar algunos puntos fue seleccionando los tramos que no presentaban incrustaciones de arena y realizando las etapas de saturación y consolidación con muy bajos gradientes de presión, es decir que se tuvo que proceder muy lentamente en las pruebas.



Figura 5.12 Falla en la etapa de consolidación del ensayo triaxial por la presencia de lente de arena de color marrón.

5.3.1.2.3 Ensayos Compresión simple

Se realizaron dos ensayos de compresión inconfinada y uno en condición confinada (P11-M7). El material ensayado presentó un comportamiento elasto-plástico, alcanzando q_u de 2.3 Kg/cm^2 en condición inconfinada y para la condición confinada tiene un Cu de 0.75 Kg/cm^2. (Ver **Anexo 5.10**)

5.3.1.3 Ensayos De Compresibilidad

Se realizaron 15 ensayos de consolidación, mínimo uno en cada perforación, a profundidades aproximadamente de 12, 20 y 26 m. Por tratarse de un material consolidado, la elaboración de las curvas de consolidación (relación de vacíos contra logaritmo del esfuerzo) no alcanzaron el 40% de la relación de vacíos inicial, con la carga máxima aplicada de 16 Kg/cm^2, por ello se realizó un ensayo con un esfuerzo normal de 32 Kg/cm^2, muestra P11-M7SI, el cual fue la base para determinar los demás comportamientos. Entonces, la magnitud de los esfuerzos de preconsolidación y de los coeficientes de consolidación y recompresión se obtuvo de analizar las gráficas y de reconstruir la curva "in-situ" aproximada de cada consolidación como se propone en el **Anexo 5.11**.

Los resultados se ilustran en la **Tabla 5.15**, donde σ'_o, σ'_p, RSC, Cc, Cr, K y Cv corresponden al Esfuerzo vertical in situ, Esfuerzo de preconsolidación, Relación de Sobre-Consolidación, Coeficiente de Consolidación, Coeficiente de Recompresión, Permeabilidad y Coeficiente volumétrico respectivamente. Finalmente se clasifican las muestras en Normalmente Consolidadas NC y Sobre-Consolidadas SC.

Pozo	Muestra	Prof.	σ´o	σ´p	RSC	Cc	Cr	K	Cv	Consolidación
		m	Kg/cm^2	Kg/cm^2				cm/s	cm2/s	
1	13	19.7	4.1	6.0	1.46	0.159	0.027	5.15E-08	0.00238	SC b
2	10	17.8	4.0	4.6	1.15	0.174	0.042	6.71E-08	0.00234	NC
3	9	26.6	5.6	6.0	1.07	0.109	0.038	4.48E-08	0.00272	NC
4	15	19.4	4.4	6.0	1.36	0.156	0.033	6.51E-08	0.00238	SC b
5	16	20.0	4.5	4.5	1.00	0.184	0.037	7.86E-08	0.00238	NC
6	4	22.0	4.7	4.7	1.00	0.201	0.043	7.73E-08	0.00237	NC
7	14	22.0	4.7	4.7	1.00	0.323	0.067	1.12E-07	0.00237	NC
8	7	21.2	4.7	4.7	1.00	0.215	0.049	9.70E-08	0.00238	NC
8	10	26.4	5.6	5.6	1.00	0.198	0.048	6.31E-08	0.00238	NC
10	5	15.6	3.5	4.0	1.14	0.255	0.043	1.44E-07	0.00270	NC
10	6	18.9	4.2	6.0	1.43	0.122	0.036	4.90E-08	0.00240	SC b
11	6	11.2	2.6	3.8	1.46	0.117	0.02	5.77E-08	0.00238	SC a
11	6SI	11.2	2.6	5.0	1.92	0.209	0.042	7.01E-08	0.00238	SC a
11	7SI	12.8	2.9	4.0	1.38	0.185	0.044	6.89E-08	0.00235	SC a
11	10	20.2	4.5	6.0	1.33	0.161	0.032	6.31E-08	0.00238	SC b

Tabla 5.15 Parámetros de Compresibilidad de las Arcillolitas

La permeabilidad presentada esta calculada para un esfuerzo de 4 Kg/cm^2; el cual equivale al esfuerzo in situ para una profundidad de 20 metros aproximadamente, en promedio la permeabilidad de las arcillolitas es del $6.0_{10}{}^{-8}$ cm/s. Finalmente, se puede clasificar la arcillolita en tres estratos, uno de 11 a 13 m con RSC del orden de 1.6 (SC a), otro intermedio de 18 a 21 m con RSC de 1.4 (SC b) y un estrato profundo Normalmente Consolidado a partir de los 22 m aproximadamente (NC). En la **Tabla 5.16** se muestran los parámetros promedio de cada estrato típico.

Promedios	Prof.	σ´o	σ´p	RSC	Cc	Cr	K	Cv
	m	Kg/cm^2	Kg/cm^2				cm/s	cm2/s
SC a	11.7	2.7	4.3	1.59	0.170	0.035	6.56E-08	0.00237
SC b	19.6	4.3	6.0	1.40	0.150	0.032	5.72E-08	0.00239
NC	21.5	4.7	4.9	1.05	0.207	0.046	8.55E-08	0.00246

Tabla 5.16 Parámetros de Compresibilidad promedio por estratos para las Arcillolitas

5.3.2 Areniscas

Sobre estas rocas se realizaron ensayos de humedad, peso unitario y carga puntual. Al igual que en las arcillolitas se presenta uniformidad en los resultados de los ensayos con relación a la profundidad. Los promedios de los resultados de los ensayos geotécnicos en cada una de las perforaciones se puede observar en la **Tabla 5.17**, donde se hace una estimación de la resistencia a la compresión simple (qu) a partir de los resultados del ensayo de carga puntual. Para esto, se uso la correlación que indica que el valor de la resistencia a la compresión simple es aproximadamente de 20 a 25 veces el índice de carga puntual (Is50), en este caso se uso un valor de 22

			Is (50)						q_u (Kg/cm2)					
Pozos	Humedad	γ_t	Paralelo			Perpendicular			Paralelo			Perpendicular		
	105 °C %	g/cm^3	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom	Min	Max	Prom
1	19.2	2.22	32.5	52.1	39.4	40.8	94.4	74.6	714	1147	867	898	2076	1641
2		2.26	31.9	67.1	44.2				701	1477	972			
3	18.3	2.33	7.1	37.7	25.8	44.2	79.5	56.3	157	830	567	971	1749	1239
4	25.4	2.34	25.4	68.8	44.1	49.1	71.3	61.1	559	1513	970	1079	1568	1345
5	28.1	2.35	7.7	37.1	22.6	13.6	72.7	40.1	169	817	498	299	1598	882
6		2.29	18.6	31.0	24.9	14.8	47.4	27.0	409	681	547	325	1042	595
7	9.6	2.26	9.1	19.7	13.8	7.3	18.7	12.3	200	433	304	160	412	270
8		2.29	15.3	68.7	35.7	14.4	58.8	39.0	336	1512	785	317	1294	858
9		2.27	39.4	39.4	39.4	19.7	23.3	21.5	866	866	866	434	512	473
10	6.4	2.36	53.9	53.9	53.9				1185	1185	1185			
11		2.33	13.0	41.3	31.5	38.4	57.9	45.4	285	908	692	845	1273	999
PROMEDIO	**17.8**	**2.30**	**23.1**	**47.0**	**34.1**	**26.9**	**58.2**	**41.9**	**507.4**	**1033.6**	**750.4**	**592.0**	**1280.5**	**922.4**

Tabla 5.17 Valores promedio de propiedades índice y de resistencia por perforación (Areniscas).

De los resultados obtenidos para estos materiales podemos concluir que la humedad promedio es 18%, el peso unitario varia entre 2.22 y 2.36 con un promedio

de 2.30, el índice de carga puntual con la carga aplicada paralela a la estratificación (Is50 - Paralelo) varia entre 7 y 68 con un promedio 34.1 y el índice de carga puntual con la carga aplicada perpendicular a la estratificación (Is50 – Perpendicular) varía entre 7 y 94 con un promedio de 41.9. De acuerdo a esto y usando la correlación anteriormente planteada la resistencia a la compresión simple aplicada la carga paralela a la estratificación varía aproximadamente entre 150 y 1500 Kg/cm^2 y aplicada la carga perpendicular a la estratificación varía entre 160 y 2000 Kg/cm^2.

Con base en los datos de abatimiento del nivel de agua dentro del pozo 2 y 3, se tiene la lectura diaria de descenso de la lamina de agua en la perforación hasta estabilizarse con el nivel freático como se muestra en la **Figura 7.25**. Es posible entonces estimar la permeabilidad de la arenisca fracturada haciendo el análisis de flujo por las paredes del pozo y suponiendo que los estratos de arcillolita se comportan prácticamente impermeables ($K=6.0 \times 10^{-8}$cm/s). Es así como se obtiene que la permeabilidad de los estratos de arenisca es del orden de 2.5×10^{-3}cm/s.

5.3.3 Perfil típico promedio

Con base en las exploraciones de campo y los resultados de laboratorio se concluye que el perfil típico esta conformado por cuatro estratos: un estrato de suelo residual, seguido por estratos de Arenisca muy fracturada intercalada con capas de Arcillolita y finalmente se encuentra una Arcillolita de consistencia firme.

Se clasificaron las perforaciones en dos grupos con base en su ubicación, espesor promedio de los estratos y profundidad de la arcillolita. Entonces se propone dos perfiles típicos; el primero agrupa las perforaciones 1, 2 y 3 ubicadas al costado norte de la zona de estudio y el segundo grupo abarca las perforaciones 4, 5, 6, 7, 8 y 9 localizadas en la parte central del área estudiada. Las perforaciones 10 y 11 no se tuvieron en cuenta para este fin por muy separadas.

Los perfiles geotécnicos típicos se resumen en las **Tablas 5.18 y 5.19** donde se establecen los rangos de espesor y las principales propiedades geotécnicas promedio de cada estrato.

ESTRATO	DESCRICIÓN	ESPESOR DEL ESTRATO m	PROF. CONTACTO SUPERIOR m	γt gr/cm^3	Is (50) Paral Kg/cm^2	Is (50) Perp Kg/cm^2	C'p Kg/cm^2	ϕ'p	C'r Kg/cm^2	ϕ'r	RSC	K cm/s
Suelo Residual	Suelo residual, areno-arcilloso, color gris amarillento con tintes marrones y rojizos debido a la oxidación, con restos de raices y materia orgánica.	0.6-1.3	-	1.87								
Arenisca	Arenisca cuarzosa color gris a parda de grano medio a fino, poco friable, de fracturada a muy fracturada	9.6-11.5	0-2.2	2.27	36.5	65.5						2.5E-03
Arenisca - Arcillolita	Arenisca cuarzosa color gris a parda de grano medio a fino, con intercalaciones de arcillolita color gris de consistencia media a firme	11.1-14	7.1-12.2	2.17					0	25	1.4-1.1	6.0E-08
Arcillolita	Arcillolita color gris algo oxidada, de consistencia firme. Hacia los 27 m de profundidad presenta un paquete de carbón de 0.2 a 0.7 m de espesor.	-	21.7-25.8	2.18			1	48	0	30	1.05	4.5E-08

Tabla 5.18 Perfil Geotécnico Típico 1, Perforaciones 1, 2 y 3

ESTRATO	DESCRICIÓN	ESPESOR DEL ESTRATO m	PROF. CONTACTO SUPERIOR m	γt gr/cm^3	Is (50) Paral Kg/cm^2	Is (50) Perp Kg/cm^2	C'p Kg/cm^2	ϕ'p	C'r Kg/cm^2	ϕ'r	RSC	K cm/s
Suelo Residual	Suelo residual, areno-arcilloso, color gris amarillento, con restos de raices y materia orgánica.	0.5-1.6	-									
Arenisca	Arenisca cuarzosa color gris a parda de grano medio a fino, poco friable, de fracturada a muy fracturada	13-19	0-6.8	2.3	30.1	33.5						
Arenisca - Arcillolita	Arenisca cuarzosa color gris a parda de grano medio a fino, con intercalaciones de arcillolita color gris de consistencia media.	1.8-4.6	2.3-9.2	2.1			0.2	30	0	12.5	1.3-1.1	6.5E-08
Arcillolita	Arcillolita color gris algo oxidada, de consistencia firme. Hacia los 27 m de profundidad presenta un paquete de carbón de 0.2 a 0.7 m de espesor.	-	18.5-21.6	2.11			0.1	45	0	25	1	8.5E-08

Tabla 5.19 Perfil Geotécnico Típico 2, Perforaciones 4, 5, 6, 7, 8 y 9

CAPITULO 6

ANÁLISIS HIDRÓLOGICO

En el deslizamiento activo del Barrio El Espino en la Ciudad de Bogotá D. C., convergen diversidad de factores que de una u otra forma han contribuido con el movimiento a lo largo del tiempo.

Uno de los principales factores detonantes de los movimientos en masa es la elevación del contenido de humedad de los suelos y en ocasiones el efecto que tiene la intensidad de la lluvia sobre algunos materiales. La acción del agua se puede reflejar en el aumento de los esfuerzos de corte en la masa deslizada y en la reducción de la resistencia al corte del material pudiéndose generar superficies de falla.

El contenido de humedad en los suelos varía con la retención propia de los mismos, la existencia de aguas subterráneas y su flujo, los niveles freáticos, la incorporación de agua por procesos de infiltración o a través de grietas que aparecen en la parte externa del terreno. En áreas urbanas, las obras de infraestructura rústica como aljibes, pozos sépticos, zanjas superficiales y mangueras entre otras, además de las obras de infraestructura moderna como acueductos, alcantarillados, sumideros y en general, el manejo de las aguas lluvias y servidas, se ven afectados en gran medida por los movimientos en masa, adicionando caudales líquidos al interior de los mismos. El efecto de la intensidad de la precipitación es en ocasiones detonante de movimientos en masa dada la energía cinética de las gotas de lluvia, el volumen acumulado y su efecto sobre algunos tipos de suelos.

En el caso de El Espino, un sector densamente habitado sobre materiales en general correspondientes a una roca fracturada, se considera de gran importancia el estudio de la influencia que tiene el contenido de humedad en los materiales producto principalmente de la incorporación de aguas lluvias al cuerpo del movimiento (material removido y potencialmente susceptible a moverse), filtraciones principalmente por colapso de los sistemas de abastecimiento de agua y drenaje de aguas lluvias y servidas, la variación en los niveles freáticos y la posible existencia de flujos de aguas subterráneas sobre los estratos subyacentes y los múltiples rellenos existentes en el sector de estudio.

En este capítulo se analizará la incidencia del agua producto de la escorrentía sobre el movimiento caracterizando el área desde el punto de vista Climatológico estimando el volumen de escorrentía susceptible de infiltrarse y en la medida de la disponibilidad de información adicional, las posibles contribuciones de aguas subterráneas en los puntos de colapso de los sistemas de abastecimiento y drenaje del sector.

6.1 METODOLOGIA

Según Dwight A. Sangrey, Kingsley O. Harrop-Williams y Jeffrey A. Klaiber (Dwight et al.,1984), los niveles de elevación de la superficie de agua al interior del suelo son considerados una de las principales causas de la inestabilidad de laderas y otros problemas importantes de ingeniería geotécnica.

Estos autores, desarrollaron una metodología descrita que permite predecir la fluctuación de los niveles de la superficie de agua como una función de la precipitación. El método aproximado usa mediciones características del sitio o región en un corto periodo de calibración de los registros de pozo. La magnitud de la precipitación para la fluctuación de la superficie de agua puede ser usada en cualquier método determinístico o probabilístico. Esta metodología ha sido ensayada y aplicada en varias áreas geológica y climatológicamente diferentes, y es usada inclusive hoy en día como metodología base de estudios hidrogeológicos.

Diversos estudios de campo fueron realizados con el fin de medir la sensibilidad de la metodología para un periodo de calibración, tiempo de respuesta del acuífero y evapotranspiración entre otras características evaluadas. Dicho trabajo demostró que la fluctuación del nivel de la superficie de agua, incluyendo valores extremos, puede ser predicha con suficiente aproximación para muchos problemas de análisis y diseño, siempre y cuando se puedan tomar en un periodo relativamente largo (mayor a 6 meses), lecturas de niveles de agua y al mismo tiempo mediciones de precipitación.

6.1.1 Bases teóricas para la metodología

El objetivo de la metodología citada es predecir la altura de la superficie de agua en un acuífero a partir de la precipitación experimentada en el área y relación con los elementos meteorológicos como son la precipitación, temperatura y las características geológicas del acuífero.

Se divide convenientemente el modelo en dos partes, la primera, llamada Modelo Hidrometeorológico, ligada a la cantidad de precipitación y factores como temperatura, para la recarga efectiva de la lámina de agua; la segunda parte, llamada Modelo Hidrogeológico, ligado a la altura de la recarga de la lámina de agua en el acuífero.

Esta aproximación teórica es similar, en principio, a algunos métodos en hidrología de agua superficial, donde un modelo teórico en cada cuenca se correlaciona con los registros de precipitación y niveles de superficie de agua.

La principal y única contribución expuesta dentro de esta metodología particular es que propone un método a desarrollar particularmente para ingeniería geotécnica en deslizamientos. Los elementos particulares seleccionados para incluir en la metodología han sido elegidos después de múltiples análisis comparativos de algunas variables de hidrología superficial. El resultado es un método con adecuado balance entre complejidad y aproximación, considerando la cantidad de entradas disponibles y las necesidades de diseños prácticos y análisis.

6.1.2 Limitaciones

Para el caso específico del movimiento en el Barrio El Espino, no se contó con registros simultáneos de parámetros climatológicos y niveles de agua en pozos realizados en el sector, dado que las estaciones climatológicas cercanas son manejadas por entidades diferentes a la DPAE y a la fecha de procesamiento de la información no se disponía de los datos registrados por las mismas, ya que se encontraban en proceso de oficialización.

Así mismo, del trabajo de perforación e instalación de pozos para piezómetros en campo realizado no se obtuvieron los resultados esperados (Ver **Tabla 6.1**). En cuanto a registros de los niveles de agua (niveles freáticos) se encontró una variación excesiva como consecuencia del movimiento presentado entre los meses de abril y julio de 2002. Finalmente, desaparecieron totalmente los niveles de agua al colapsar los pozos perdiendo así continuidad y confiabilidad en los registros para su aplicación en la metodología propuesta.

Se considera que el periodo de seguimiento de los niveles fue muy corto y aún considerando un seguimiento hasta finales del año 2002 y comienzos de 2003, se hubiera requerido de la instalación de nuevos pozos sin considerar los costos adicionales en que se incurriría y la alta posibilidad de colapso por el movimiento.

Pese a lo anterior, para los análisis geotécnicos se obtuvo información acerca de niveles freáticos a partir de los inclinómetros instalados.

Ante estos inconvenientes, se realizaron los análisis del Modelo Hidrometeorológico, complementándolo con los Análisis Geotécnicos y el análisis histórico de los movimientos ocurridos en el sector relacionados con los factores hidrometeorológicos mediante la interpretación de datos de lluvias acumuladas precedentes.

Modelo Hidrometeorológico

El modelo hidrometeorológico es la interfase entre hidrología y meteorología. Este determina la recarga del agua subterránea (llamada *R*) basado en factores del clima tales como la temperatura y precipitación. La recarga *R*, puede ser obtenida de la sustracción de la escorrentía *Qr* y la evapotranspiración *E*, de la precipitación *P*.

Otro factor que puede afectar la recarga es el almacenamiento *St* y elementos sintéticos *Sy*, primordialmente encontrados en zonas templadas por ejemplo, la acumulación de nieve en invierno y subsecuentemente la fusión en verano. El agua del suelo sobre la superficie freática es también parte de *St*. Los elementos sintéticos se refieren a la irrigación no natural y bombeo. La recarga del agua suelo puede ser expresada como

$$R = P - Qr - E \pm St \pm Sy$$

PIEZOMETRO DE CASAGRANDE PC1			
FECHA	**HORA**	**PROF (m)**	**N.F (m)**
18/05/2002	10:30	6.20	Seco
21/05/2002	11:50	6.00	Seco
22/05/2002	8:40	6.00	Seco
23/05/2002	14:00	6.00	Seco
24/05/2002	12:35	6.00	Seco
25/05/2002	15:30	6.00	Seco
26/05/2002	14:20	6.00	Seco
27/05/2002	8:30	6.00	Seco
28/05/2002	9:30	6.00	Seco
29/05/2002	10:30	6.00	Seco
30/05/2002	11:30	6.00	Seco
07/06/2002	14:00	6.00	Seco
08/06/2002	15:00	6.00	Seco
09/06/2002	8:00	6.00	Seco
10/06/2002	9:00	6.00	Seco
11/06/2002	15:00	6.00	Seco
13/06/2002	15:00	6.00	Seco
20/06/2002	DESTRUCCION DEL POZO		

PIEZOMETRO DE CASAGRANDE PC2			
FECHA	**HORA**	**PROF (m)**	**N.F (m)**
18/05/2002	8:30	22.00	10.27
20/05/2002	10:50	22.00	12.85
21/05/2002	11:30	22.00	14.10
22/05/2002	8:00	22.00	14.90
23/05/2002	13:45	22.00	14.90
24/05/2002	10:35	22.00	14.97
25/05/2002	12:42	22.00	15.02
26/05/2002	15:30	22.00	15.36
27/05/2002	8:30	22.00	15.35
28/05/2002		20.20	15.94
29/05/2002		20.20	16.24
30/05/2002		20.20	16.68
31/05/2002		20.20	16.70
02/06/2002	9:30	20.20	17.90
03/06/2002	15:00	20.20	17.70
04/06/2002	9:00	20.20	17.12
05/06/2002	10:00	20.20	17.16
07/06/2002	14:00	20.20	16.70
08/06/2002	15:00	20.20	16.70
09/06/2002	8:00	20.20	16.40
10/06/2002	9:00	20.20	16.60
11/06/2002	15:00	20.20	16.50
13/06/2002	15:00	20.20	16.50
20/06/2002	13:55	20.20	16.50
24/06/2002	11:00	20.20	16.30
28/06/2002	11:00	20.00	17.50
04/07/2002	8:00	19.90	17.50
25/07/2002	8:00	19.80	17.12
02/08/2002	10:00	17.80	16.22
22/08/2002	11:10	15.40	15.40
05/09/2002	10:30	Destrucción pozo	

PIEZOMETRO DE CASAGRANDE PC3			
FECHA	**HORA**	**PROF (m)**	**N.F (m)**
18/05/2002	8:05	29.90	18.75
20/05/2002	11:10	29.90	21.75
21/05/2002	11:30	29.90	22.69
22/05/2002	7:50	29.90	22.40
23/05/2002	13:30	29.60	22.40
24/05/2002	10:30	29.60	22.56
25/05/2002	12:35	29.60	22.65
26/05/2002	15:30	29.60	22.36
27/05/2002	8:30	29.60	22.36
28/05/2002		29.40	22.92
29/05/2002		29.40	23.24
30/05/2002		29.40	23.60
31/05/2002		29.40	23.64
02/06/2002	9:30	29.40	23.30
03/06/2002	15:00	29.40	24.70
04/06/2002	9:00	29.40	25.10
05/06/2002	10:00	29.40	25.10
07/06/2002	14:00	29.40	25.70
08/06/2002	15:00	29.45	25.70
09/06/2002	8:00	29.40	25.35
10/06/2002	9:00	29.40	25.70
11/06/2002	15:00	29.40	26.50
13/06/2002	15:00	29.40	26.00
20/06/2002	13:55	28.30	28.00
24/06/2002	11:00	28.10	27.25
28/06/2002	11:00	28.60	28.60
04/07/2002	8:00	28.50	Seco
25/07/2002	8:00	28.30	Seco
02/08/2002	10:00	28.30	Seco
22/08/2002	11:10	28.00	Seco
05/09/2002	10:30	28.00	Seco
23/09/2002	11:30	28.00	Seco
03/10/2002	11:00	28.00	Seco
10/10/2002	11:30	28.00	Seco
24/10/2002	11:15	28.00	Seco
13/11/2002	11:45	28.00	Seco
29/11/2002	9:30	28.00	Seco
05/12/2002	10:00	28.00	Seco
11/12/2002	14:00	28.00	Seco
17/12/2002	9:30	28.00	Seco
09/01/2003		27.00	Seco
23/01/2003	10:00	27.00	Seco
14/02/2003	11:30	27.00	Seco
27/02/2003		27.00	Seco
11/03/2003	10:10	27.00	Seco
28/03/2003	10:50	27.00	Seco
07/04/2003	9:30	27.00	Seco
24/04/2003	9:00	27.00	Seco

FECHA	Día, mes y año de toma de lectura
PROF (m)	Profundidad del pozo
N.F (m)	Lectura de nivel freático

Tabla 6.1. Registros de nivel freático en El Espino.

Dentro del modelo se simplifican las contribuciones por *St* y *Sy*. Esta simplificación es valida para algunos casos como el de El Espino, pero puede llevar a errores significativos en otras áreas. Si *Sy*, o ambas, son conocidas y no pueden ser desestimadas, la generalidad del modelo permite su incorporación.

Como ambos *Qr* y *E* son funciones de *P*, esto implica que *R* es una función de *P* también. Goldschmidh (Goldschmidh, 1960) sugiere que ambas, *Qr* y *E* son funciones lineales de *P* como sigue:

$Qr = co + c1*P$

$E = do + d1*P$

Remplazando en la primera ecuación se obtiene que

$R=(-co-do) + (1-c1-d1) *P$

Los coeficientes *co, c1* y *do, d1* son obtenidos por regresiones lineales de valores almacenados de *P, Qr* y *E*. La validación para suponer que *Qr* y *E* son funciones lineales de *P* esta limitado por la condición estática. Otros factores tales como la condición de humedad del suelo, la precipitación antecedente y la cobertura del suelo entre otros pueden afectar la linealidad. En general, la longitud del periodo de tiempo base para *Qr, E* y *P*, será el modelo lineal más valido.

Sin embargo allí habrá un incremento correspondiente en el posible error para cada evento de precipitación individual.

Una alternativa aproximada en la determinación de la recarga fue propuesta por Thornthwaite (Thornthwaite, 1948). El evaluó la evapotranspiración potencial mensual *PEm* (en mm/mes), en términos de la temperatura media mensual, *Tm*. Esta puede ser expresada como

$PEm = (16) * b2 * (10Tm / I) ^ b1$

En la cual

$I = \Sigma(0.2*Tm)^1.514$

es llamado el índice anual de calentamiento, y es la suma tomada sobre el año.

El coeficiente *b2* es un factor de corrección por diferente longitud de mes y día (tabulada por mes y latitud), y

b1 = (6.75 x 10^-7)*I^3 – (7.71 x 10^-5)*I^2 + (1.792 x 10^-2)*I + 0.49239.

Asumiendo por último que la escorrentía está eventualmente recargando la superficie de agua, Jonson (Jonson, 1977) sugiere que la recarga mensual puede ser tomada como la diferencia entre la precipitación mensual y la evapotranspiración

mensual. Las recargas mensuales de Thornthwaite peden entonces ser obtenidas como:

Rm = Pm – PEm

En la cual *Pm* = la precipitación media mensual.

Johnson Further sugirió una combinación de los métodos de Goldschmidt y Thornthwaite porque la ecuación está en términos de la evapotranspiración potencial en lugar de la evapotranspiración. Él sugiere que la evapotranspiración mensual puede ser escrita en términos de la evapotranspiración anual, *Ey*, como:

*Em = (PEm / PEy)*Ey*
PEy = ΣPEm
*Ey = do + d1*Py*

Los coeficientes *do* y *d1* son de la ecuación de regresión de la evapotranspiración anual, *Ey*, a la precipitación anual *Py*. Combinando esos factores la formula de la recarga de Goldschmidt – Thornthwaite es

Rm = Pm – Em ó

*Rm = dom + d1m*Pm*

En la cual

dom = -do(PEm / PEy)*
d1m = 1-d1(PEm / PEy)*(Py/Pm)*
Pm = precipitación media mensual
Py = precipitación media anual.

Una ilustración de la distribución relativa de la precipitación mensual a la recarga y evapotranspiración para climas semi-arídos es presentada en la **Figura 6.1** donde se ha empleado la teoría Goldschmidt – Thornthwaite para definir la evapotranspiración. Si es usada otra teoría para la determinación de la evapotranspiración, la teoría Thornthwaite u otro modelo para la evapotranspiración, la distribución resultante será diferente a la mostrada en la **Figura 6.1**.

Como observa en la **Figura 6.1** una importante característica de la precipitación y de la recarga almacenada es el déficit cuando la evaportranspiración potencial es mayor que la precipitación. Esta condición puede ocurrir para la mayoría de meses en un área, pero con climas de temperaturas similares. Allí habrá algunos períodos con déficit potencial. Durante un período de déficit de recarga no hay contribución de una nueva precipitación para el agua del suelo. En teoría hay potencial para el déficit que es manifestado en una pérdida del agua del suelo (ej. A través de raíces profundas de la vegetación). Esta es una cuestión compleja y esta metodología ha sido usada asumiendo que allí no hay un mecanismo para la pérdida de agua para satisfacer el déficit en la evapotranspiración.

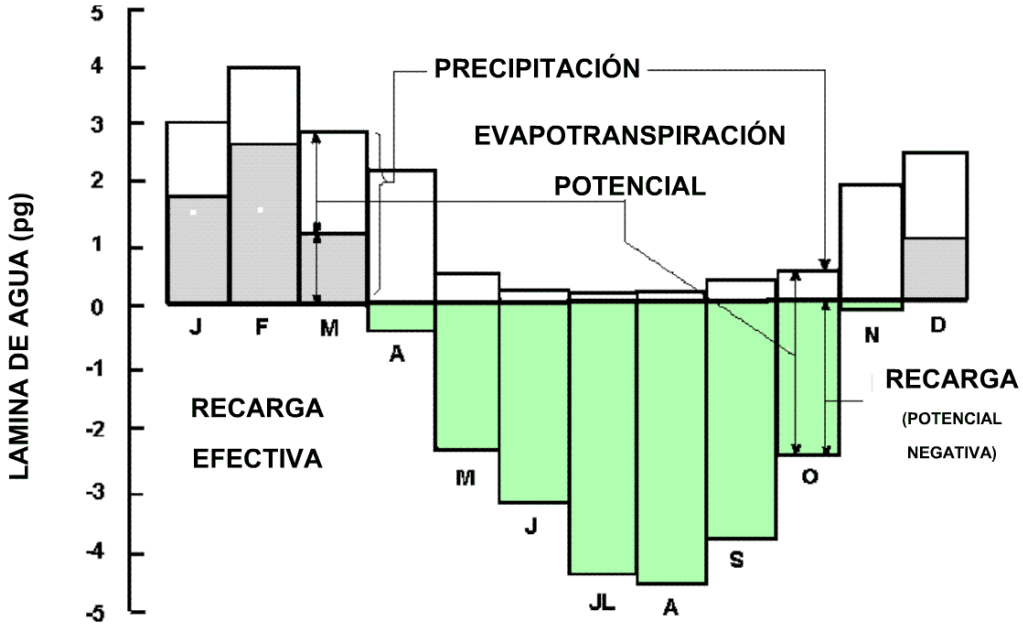


Figura 6.1. Esquema de distribución relativa de la precipitación mensual, la recarga y la evapotranspiración (Dwight et al, 1984).

6.2 HIDROLOGIA

6.2.1 Inventario de Estaciones

Para la caracterización de los parámetros hidrológicos en el área de estudio se realizó inicialmente la recopilación de la información existente de las estaciones localizadas dentro y en proximidades al área de estudio (Ver **Figura 6.2**). Esta información fue consultada en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB, 2002), El Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, y la Corporación Autónoma Regional CAR, entidades que se encargan de la recopilación de los datos, procesamiento y en general del manejo de las mismas.

En total se encontraron 19 estaciones entre las coordenadas planas (990.000 m N – 1.010.000 m N) y (980.000 m E – 1.010.000 m E) en la Ciudad de Bogotá D. C., entre las cuales solo se inventariaron las de tipo hidrometeorológico y principalmente aquellas que cuentan con registros de precipitación. (Ver **Tabla 2**)

Después de analizada el área de estudio y consultadas las entidades responsables de la información hidrometeorológicas fueron seleccionadas nueve (9) estaciones, las cuales se encuentran más cerca al área de estudio. Dichas estaciones hidrometeorológicas son de tipo: CO Climatológica Ordinaria, CP Climatológica Principal, PM Pluviométrica, PG Pluviográfica

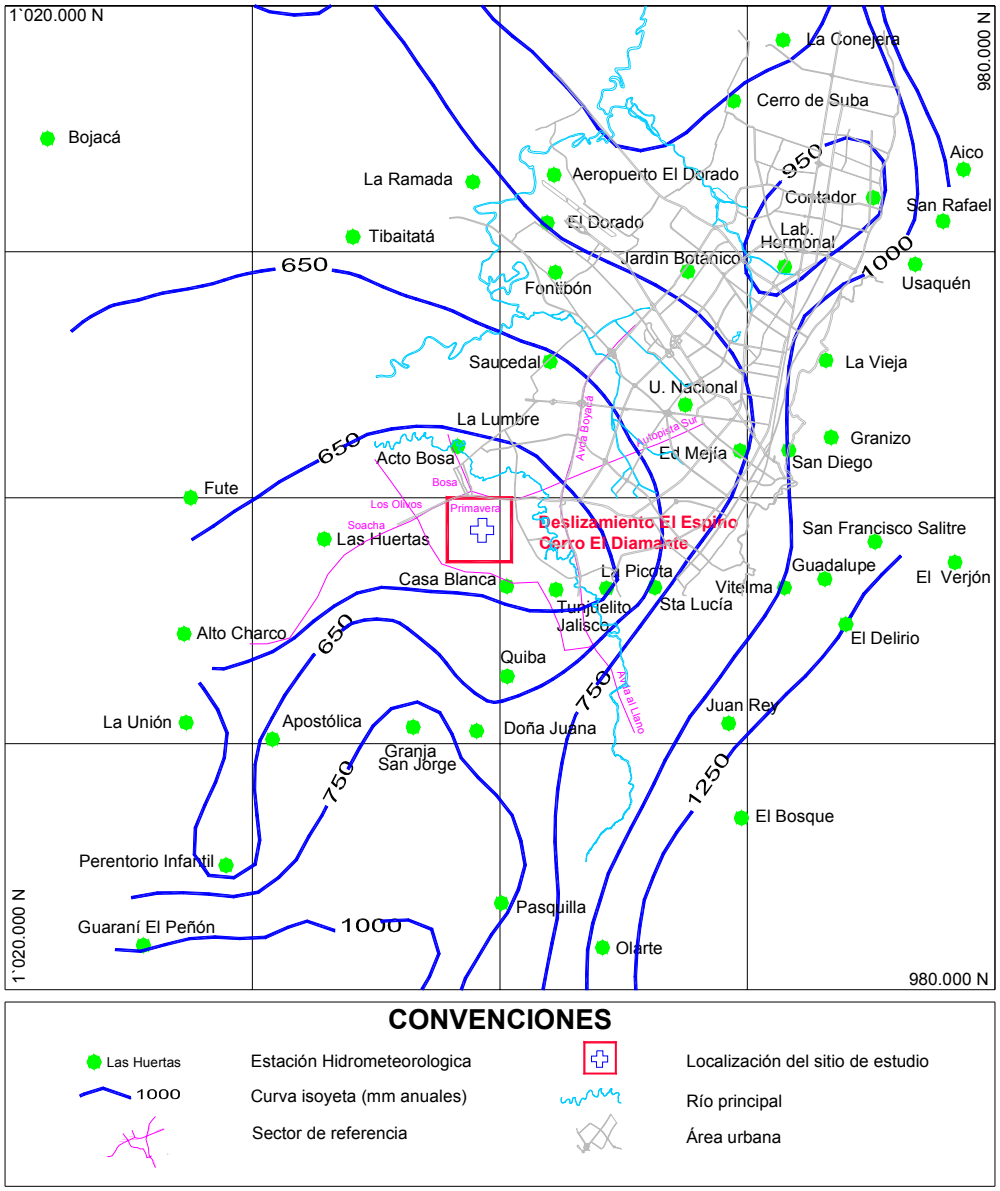


Figura 6.2. Localización de estaciones en el área de estudio e Isoyetas

INVENTARIO DE ESTACIONES

Entre coordenadas planas 990.000 N - 1`010.000 N y entre 980.000 E - 1`000.000 E

Codigo	Nombre	Tipo	Coordenadas Geográficas				Elevación (msnm)	Entidad
			Latitud E		Longitud W			
2120051	APOSTOLICA	PG	4	31	74	15	2618	CAR
2120052	SANTA LUCIA	PG	4	34	74	7	2630	EAAB
2120059	TUNJUELITO JALISCO	PM	4	34	74	9	2599	EAAB
2120115	ED MEJIA	PG	4	37	74	5	2580	CAR
2120156	LA PICOTA	PG	4	34	74	8	2580	CAR
2120197	CASABLANCA	PM	4	34	74	10	2665	EAAB
2120204	JUAN REY	PG	4	31	74	5	2985	EAAB
2120205	QUIBA	PG	4	32	74	10	3000	EAAB
2120207	SAUCEDAL II	PM	4	39	74	9	2900	EAAB
2120211	LAS HUERTAS	PG	4	35	74	14	2572	EAAB
2120524	VITELMA	CO	4	34	74	4	2800	EAAB
2120534	ACTO BOSA	CO	4	37	74	11	2585	EAAB
2120547	FONTIBON	CO	4	41	74	9	2518	EAAB
2120561	MUÑA	CP	4	33	74	15	2565	CAR
2120571	JARDIN BOTANICO	CO	4	41	74	6	2552	IDEAM
2120572	GJA SAN JORGE	CO	4	31	74	12	2900	CAR
2120622	U. NACIONAL	CP	4	38	74	6	2556	IDEAM
2120630	DOÑA JUANA	CP	4	30	74	10	2700	CAR
2121525	LA LUMBRE	CO	4	37	74	11	2540	CAR

Tabla 6.2. Inventario de estaciones hidrometeorológicas

En la **Tabla 6.3** figuran las estaciones más próximas al sector de El Espino.

Codigo	Nombre	Tipo	Coordenadas Geográficas				Elevación (msnm)
			Latitud E		Longitud W		
2120052	SANTA LUCIA	PG	4	34	74	7	2630
2120059	TUNJUELITO JALISCO	PM	4	34	74	9	2599
2120156	LA PICOTA	PG	4	34	74	8	2580
2120197	CASABLANCA	PM	4	34	74	10	2665
2120205	QUIBA	PG	4	32	74	10	3000
2120211	LAS HUERTAS	PG	4	35	74	14	2572
2120524	VITELMA	CO	4	34	74	4	2800
2120534	ACTO BOSA	CO	4	37	74	11	2585
2120630	DOÑA JUANA	CP	4	30	74	10	2700

Tabla 6.3. Estaciones próximas al área de estudio

6.2.2 Datos seleccionados y obtenidos

Una vez seleccionadas las estaciones y consultados los registros existentes de las mismas, fueron adquiridos los datos de aquellas estaciones ubicadas en los alrededores del movimiento que contaran con mejor calidad y mayor periodo de registro. Los datos adquiridos corresponden a registros de precipitación total anual (en algunas estaciones desde el año 1957) y precipitación diaria de los años 2000,

2001 y 2002. Se adquirieron los datos diarios de precipitación con el fin de compararlos con los registros tomados en la estación Sierra Morena, instalada desde octubre del año 2000 en un lugar muy próximo al movimiento (coordenadas geográficas 4.5749 N, 74.1707 E y Cota 3078 msnm). De las estaciones climatológicas se adquirieron además los siguientes parámetros a nivel mensual multianual: brillo solar, temperatura y evaporación.

La información hidrometeorológica de las estaciones de la EAAB fue adquirida a esta entidad y la información de las estaciones de la CAR fue gentilmente suministrada por dicha entidad.

6.2.3 Caracterización de la precipitación

Para caracterizar la precipitación en el área de estudio se realiza inicialmente el análisis de las estaciones pluviométricas y pluviográficas buscando que las series históricas sean lo más completas posibles. Se realizó el análisis de la precipitación media mensual para cada una de las estaciones mostradas en la **Tabla 6.2** y sus resultados se consignan en la **Tabla 6.4.** Se debe tener en cuenta que los periodos de registro varían para las estaciones pero en general superan los 10 años.

Codigo	Nombre	Tipo	Elevación (msnm)	PRECIPITACION MEDIA ANUAL P (mm)												Precitación Anual (mm)
				ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
2120051	APOSTOLICA	PG	2618	22.6	32.5	47.9	86.0	85.2	48.4	30.6	33.7	47.9	93.4	88.5	42.6	659.3
2120052	SANTA LUCIA	PG	2630	21.7	35.4	49.8	73.3	76.5	46.7	34.9	36.6	45.8	79.4	72.1	37.4	609.6
2120059	TUNJUELITO JALISCO	PM	2599	14.9	25.8	42.8	72.5	70.1	46.8	30.4	36.2	43.1	78.8	71.2	32.4	565.0
2120115	ED MEJIA	PG	2580	47.8	46.6	75.1	93.5	91.5	35.4	35.8	34.8	35.8	85.3	101.6	61.5	744.7
2120156	LA PICOTA	PG	2580	22.9	41.2	37.0	69.4	61.7	43.3	36.6	38.8	35.7	60.7	68.3	31.8	547.4
2120197	CASABLANCA	PM	2665	21.5	29.5	45.3	71.4	78.4	44.8	37.2	39.6	52.0	73.3	65.2	28.0	586.2
2120204	JUAN REY	PG	2985	62.6	57.5	83.1	83.7	130.0	124.0	198.6	127.9	62.2	73.7	106.4	58.7	1168.4
2120205	QUIBA	PG	3000	24.1	39.2	64.4	61.3	91.8	43.9	46.2	42.8	47.4	68.1	73.8	42.9	645.9
2120207	SAUCEDAL II	PM	2900	27.2	31.9	64.7	90.2	84.6	55.4	34.4	38.6	45.1	74.0	83.9	35.1	665.1
2120211	LAS HUERTAS	PG	2572	17.8	26.0	51.2	60.8	64.3	41.1	32.5	27.8	46.0	60.3	53.6	38.7	520.1
2120524	VITELMA	CO	2800	58.0	70.5	100.7	103.1	100.7	70.8	93.4	76.5	61.5	110.4	120.2	78.4	1044.2
2120534	ACTO BOSA	CO	5285	20.3	27.4	47.2	66.7	65.7	52.5	33.1	43.4	53.6	82.7	65.6	29.5	587.7
2120547	FONTIBON	CO	2518	29.4	35.6	64.1	82.8	76.2	50.8	37.1	42.5	50.3	94.8	86.6	44.0	694.2
2120561	MUÑA	CP	2565	20.5	27.6	46.0	74.8	70.6	43.3	23.9	33.2	48.7	75.5	66.4	32.1	562.6
2120571	JARDIN BOTANICO	CO	2552	37.0	59.1	70.3	106.6	92.2	46.5	31.9	38.9	55.2	123.8	112.6	65.9	840.0
2120572	GJA SAN JORGE	CO	2900	24.0	37.2	49.3	100.5	94.9	70.6	54.5	53.6	54.6	97.2	98.9	42.4	777.7
2120630	DOÑA JUANA	CP	2700	34.6	40.8	68.8	56.4	90.1	50.4	54.2	45.4	38.5	52.8	81.8	42.8	656.6
2121525	LA LUMBRE	CO	2540	19.4	28.2	42.5	80.9	68.8	52.9	31.2	30.8	45.9	84.5	78.3	26.7	590.1

Nota: La estación U. Nacional no posee registros de precipitación.

Tabla 6.4. Precipitación de las estaciones cercanas al área de estudio.

En general los registros de las estaciones tienen buenos datos de acuerdo con su longitud de registro. Para el análisis detallado de la precipitación se seleccionaron las estaciones más próximas con el fin de determinar la similitud de los valores registrados y el comportamiento en general. Como el objeto del análisis de precipitación es la correlación de lluvias entre la estación Sierra Morena (perteneciente a la DPAE e instalada en el año 2000) con las estaciones más próximas, se busca a nivel de lluvias medias mensuales la estación con la cual su comportamiento haya sido más similar y presente la menor desviación en los datos diarios.

En primer lugar, se comparan las precipitaciones medias mensuales y totales anuales de las estaciones próximas al área de estudio en todo el periodo de registro

existente. En la **Tabla 6.5** se muestran los valores de precipitación media mensual y promedios mensuales y anuales para las estaciones Sierra Morena, Acueducto Bosa, Casablanca, Las Huertas, Tunjuelito Jalisco y La Picota.

MES	PRECIPITACION PROMEDIO MENSUAL POR ESTACION (mm)						PRECIPITACION PROMEDIO (mm)
	SIERRA MORENA	ACTO BOSA	CASA BLANCA	LAS HUERTAS	TUNJUELO JALISCO	LA PICOTA	
Enero	21	20	22	18	15	23	20
Febrero	11	27	30	26	26	41	27
Marzo	45	47	45	51	43	37	45
Abril	62	67	71	61	73	69	67
Mayo	62	66	78	64	70	62	67
Junio	53	53	45	41	47	43	47
Julio	26	33	37	32	30	37	33
Agosto	17	43	40	28	36	39	34
Septiembre	69	54	52	46	43	36	50
Octubre	34	83	73	60	79	61	65
Noviembre	63	66	65	54	71	68	65
Diciembre	44	30	28	39	32	32	34
Promedio Anual	509	588	586	520	565	548	553

Tabla 6.5. Comparación entre precipitaciones medias mensuales de las estaciones.

En la **Figura 6.3** se presenta gráficamente en forma de columnas la comparación entre precipitaciones promedio mensuales y en forma de línea los valores promedio de dichos datos. Obsérvese que el régimen de precipitación es bimodal con periodos de lluvia entre marzo – junio y septiembre – noviembre. Los periodos de menor precipitación al año se presentan en los meses de diciembre – enero y julio – agosto. Los valores de precipitación media mensual varían entre 10 y 85 mm.

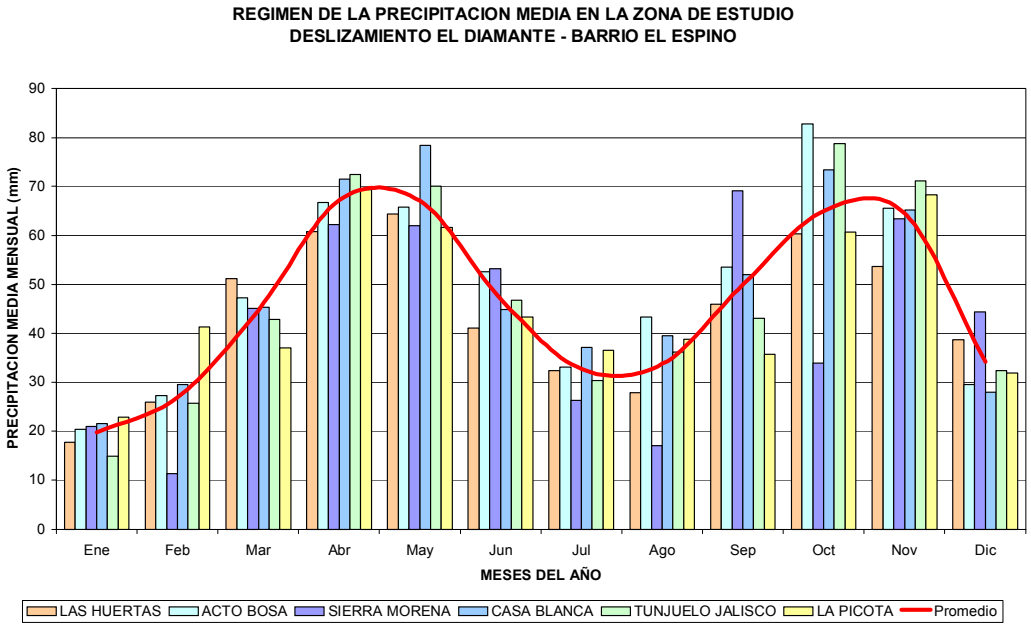


Figura 6.3. Régimen de la precipitación media

Dado que la estación Sierra Morena no cuenta con un periodo de registro largo, se realizó la comparación de valores mensuales entre cada estación y sus vecinas encontrando la mejor relación entre series mensuales para las estaciones Casablanca y Acueducto Bosa. En la **Figura 6.4** se presenta el histograma de precipitación media mensual de la estación Sierra Morena y las estaciones Acueducto Bosa y Casablaca, las cuales pueden considerarse como de comportamiento más similar. Como ejemplo, en la **Tabla 6.6** se presentan los estadísticos obtenidos incluyendo en el análisis los datos de la estación La Lumbre suspendida desde 1988.

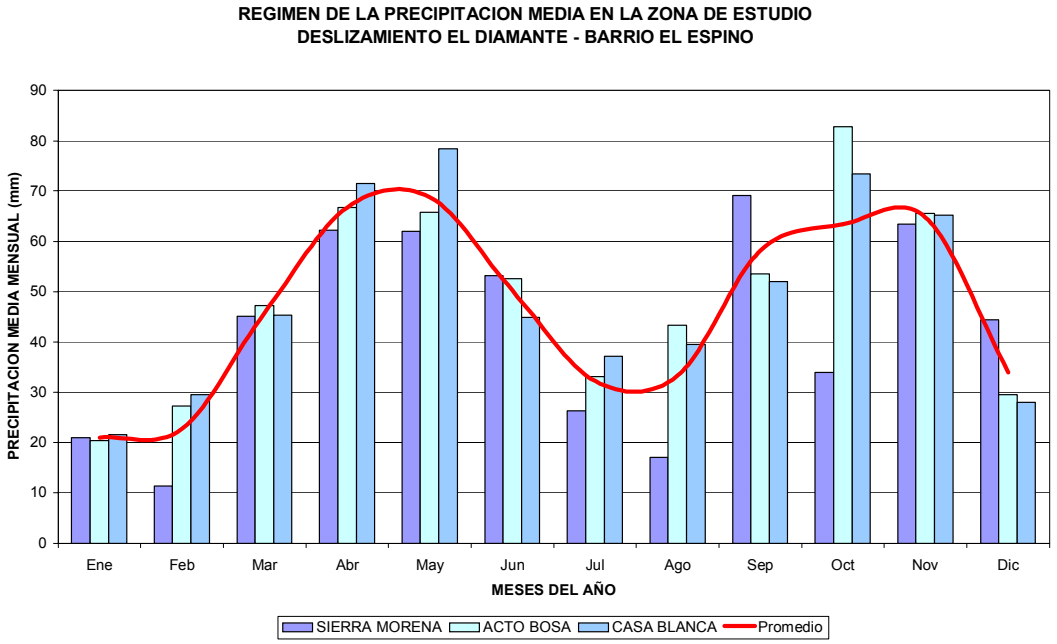


Figura 6.4. Régimen de la precipitación media en la zona de estudio

ESTADISTICOS	ESTACION CASABLANCA	VALORES ESTADISTICOS P MENSUAL POR ESTACION				
		ACUEDUCTO BOSA	LA PICOTA	TUNJUELITO JALISCO	LA LUMBRE	LAS HUERTAS
MUESTRA TOTAL	308	308	308	308	308	308
No. DATOS	301	286	237	170	150	131
CASILLAS EN BLANCO	7	22.0	71.0	138.0	158.0	177.0
PROMEDIO DATOS	48.76	47.67	47.24	49.36	47.05	43.54
DESVIACION ESTANDAR	32.25	33.25	32.64	35.39	38.02	29.02
COEF. VARIACION	1.51	1.43	1.45	1.39	1.24	1.50
COEF. ASIMETRIA	0.93	1.01	1.12	1.19	1.39	0.87
CORRELACION DE LAS SERIES						
COEF.R2	-	0.54	0.39	0.76	0.66	0.42
COEF.CORRELACION	-	0.74	0.63	0.87	0.81	0.65

Tabla 6. Comparación de los estadísticos de registros de precipitación mensual.

En segundo lugar, se considera factible que exista una relación entre la precipitación diaria de Sierra Morena y la precipitación diaria registrada en las estaciones más próximas al movimiento. Por tal motivo, se obtienen a nivel diario las desviaciones estándar de los datos buscando la menor variabilidad de los mismos en el periodo de registro común. Así mismo se considera que la variación en elevación y ubicación existente entre las estaciones es pequeña en escala regional (aproximadamente 0.5 kilómetros de radio).

Para este análisis se consideran como estaciones cercanas a la estación Sierra Morena, las estaciones Acueducto Bosa, Casablanca, Las Huertas, Tunjuelito Jalisco y La Picota. Dado que a nivel de lluvias diarias la estación Sierra Morena cuenta con registros desde octubre de 2000 a la fecha, se descarta la estación Tunjuelito Jalisco por estar suspendida desde el año 1990 además de la estación La Picota dado que desafortunadamente no se tienen procesados a la fecha los datos diarios desde octubre de 2000.

En la **Tabla 6.7** se presentan los resultados del análisis de lluvias diarias entre el 18 de octubre del año 2000 y 31 de agosto de 2002. Cabe anotar que no todas las estaciones poseen datos para este periodo, razón por la cual se incluye el número de datos con los cuales correlaciona. Como se observa en la **Tabla 6.7** las estaciones de mayor correlación con la estación Sierra Morena son en su orden Casablanca y Acueducto Bosa. Con el fin de observar el comportamiento histórico de la precipitación diaria en el movimiento, se deberán utilizar los registros de la estación Casablanca.

ESTACION BASE: SIERRA MORENA			
No. DATOS	805	No. DATOS	591
DESV. ESTANDAR	3.5	DESV. ESTANDAR	3.6
VALOR MAXIMO	25.6	VALOR MAXIMO	25.6
VALOR MINIMO	0.0	VALOR MINIMO	0.0
PROMEDIO	1.4	PROMEDIO	1.4
FECHA	31-dic-02	FECHA	31-may-01

ACUEDUCTO BOSA		DESVIACIONES (mm)	No. DATOS
DESV. ESTANDAR	3.5	15-30	0
VALOR MAXIMO	24.3	7-15	5
VALOR MINIMO	0.0	5-7	3
PROMEDIO	1.4	3-5	12
COEF CORRELACION	**0.64**	1-3	33
		>1	234

LAS HUERTAS		DESVIACIONES (mm)	No. DATOS
DESV. ESTANDAR	3.4	15-30	0
VALOR MAXIMO	25.0	7-15	8
VALOR MINIMO	0.0	5-7	5
PROMEDIO	1.3	3-5	10
COEF CORRELACION	**0.46**	1-3	32
		>1	232

CASABLANCA		DESVIACIONES (mm)	No. DATOS
DESV. ESTANDAR	3.5	15-30	0
VALOR MAXIMO	24.6	7-15	1
VALOR MINIMO	0.0	5-7	1
PROMEDIO	1.4	3-5	8
COEF CORRELACION	**0.84**	1-3	24
		>1	253

QUIBA		DESVIACIONES (mm)	No. DATOS
DESV. ESTANDAR	3.9	15-30	0
VALOR MAXIMO	30.0	7-15	10
VALOR MINIMO	0.0	5-7	7
PROMEDIO	1.8	3-5	18
COEF CORRELACION	**0.35**	1-3	44
		>1	208

Tabla 6.7. Comparación de series de datos de precipitación diaria con la Estación Sierra Morena.

6.2.4 Caracterización climatológica

La caracterización climatológica es la descripción del comportamiento de los diferentes factores del clima; depende de los datos consignados en los registros de

las estaciones, de la cobertura espacial de la red de estaciones, la calidad de la información y el periodo de registro.

Dado que el área de estudio se ubica en las laderas circundantes de la Sabana de Bogotá sobre la cordillera oriental y específicamente en el extremo sur oriental, se puede generalizar el comportamiento climático bajo ciertas consideraciones dada la extensión de la sabana, la cual por su morfología plana presenta contrastes de clima entre la zona urbana, la sabana cultivada, las laderas naturales y las laderas habitadas razón por la cual se analizaron los registros de las estaciones más cercanas al movimiento pese al escaso cubrimiento que se tiene para un estudio de escala detallada.

Como se muestra en la **Tabla 6.2**, existen varias estaciones climatológicas en los alrededores del movimiento, sin embargo, siendo el presente un estudio detallado y dada la existencia de variaciones del clima por las causas citadas anteriormente, se seleccionaron las estaciones Vitelma y Doña Juana para el análisis. A manera de ilustración, se presentan en la **Tabla 6.8** los valores medios mensuales en algunas de las estaciones de la **Tabla 6.2.**

ESTACIONES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
FONTIBON (1955 - 1999)													
Brillo Solar (Horas)	200	169	139	107	116	108	129	134	117	116	132	162	1629
Evaporación (mm)	99	155	170	170	175	93	91	104	88	95	89	97	1426
MUÑA (1966-1997)													
Brillo Solar (Horas)	217	131	176	96	126	150	151	173	103	88	151	132	1694
Evaporación (mm)	69	72	60	109	55	63	76	65	63	55	65	57	809
Temperatura (°C)	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	15	13
Humedad Relativa (%)	82	83	79	85	78	79	77	75	77	85	82	83	80
JARDIN BOTANICO (1974-1998)													
Temperatura (°C)	13	13	15	14	15	14	14	14	14	14	14	14	14
Humedad Relativa (%)	81	77	82	82	82	84	76	80	82	83	82	83	81
GRANJA SAN JORGE (1960-1997)													
Temperatura (°C)	12	12	12	12	12	12	11	11	11	12	12	12	12
Brillo Solar (Horas)	162	134	131	117	131	138	152	161	149	128	118	158	1679
Humedad Relativa (%)	80	80	82	81	81	82	81	82	81	83	84	82	82
UNIVERSIDAD NACIONAL (1987-1999)													
Brillo Solar (Horas)	174	148	142	96	101	125	134	128	118	127	125	181	1599
Evaporación (mm)	99	155	170	170	175	93	91	104	88	95	89	97	1426
ESTACION VITELMA (1976-2001)													
Temperatura (°C)	13	13	13	13	14	13	13	13	13	14	14	14	13
Brillo Solar (Horas)	96	109	102	92	77	93	89	103	101	86	85	27	1060
Humedad Relativa (%)	77	79	81	81	83	82	82	80	79	79	82	78	80
Evaporación (mm)	52	59	58	60	58	47	43	54	55	45	57	49	637
ESTACION DOÑA JUANA (1989-2001)													
Temperatura (°C)	12	12	13	13	13	12	11	12	12	13	13	12	12
Brillo Solar (Horas)	194	149	148	131	128	144	129	157	156	148	134	183	1801
Humedad Relativa (%)	69	70	73	73	77	75	78	75	71	71	73	72	73
Evaporación (mm)	59	72	65	74	68	74	62	64	74	77	68	72	830

Tabla 6.8. Valores medios mensuales y totales anuales de los parámetros del clima.

Uno de los principales factores por los cuales se seleccionaron las estaciones Vitelma y Doña Juana para la caracterización del clima fue la elevación, cotas 2800 y 2700 msnm respectivamente, dado que el movimiento que se presenta en el Barrio El Espino se enmarca entre las cotas de estas estaciones. Estas dos estaciones, Vitelma ubicada más al oriente de la zona de estudio y Doña Juana ubicada al sur, tienen los valores medios mensuales multianuales indicados en la **Tabla 6.8,** considerados aquí como representativos de parámetros del clima para el área de estudio.

Se debe anotar que la estación Doña Juana se encuentra ubicada a menor distancia de la zona de estudio y en condiciones muy similares, mientras que la estación Vitelma presenta condiciones de entorno geográfico diferentes lo cual se refleja en el aumento de los valores de precipitación y demás factores mostrados en la **Tabla 6.8** en comparación con ubicada al sur del área de estudio,

6.3 ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACIÓN Y FILTRACIONES DE AGUAS SERVIDAS

Una vez realizada la caracterización climatológica y de la precipitación, a continuación se procede a estimar un volumen de agua teniendo en cuenta las causas naturales (porcentanje de infiltración como efecto del escurrimiento) y por causas denominadas aquí como antrópicas (ocurridas por filtraciones de los sistemas de acueducto y alcantarillado existente) en la zona de estudio del movimiento en el Barrio El Espino.

6.3.1 Estimación de la Infiltración por Causas Naturales

Obedece al caudal de agua (volumen) que se incorpora al subsuelo como efecto de la infiltración de las aguas lluvias en el terreno. Para su determinación se requiere establecer los caudales de aguas lluvias que son interceptados y absorbidos por el terreno natural. Para tal efecto se siguió la metodología planteada y cálculos hidrológicos utilizados para este tipo de análisis.

6.3.1.1 Cálculo de la Evapotranspiración

Dentro de los datos fundamentales para establecer la escorrentía superficial de agua en un suelo, aplicando balance hídrico están las precipitaciones, la temperatura, la evapotranspiración y la infiltración.

Como es conocido, la evapotranspiración real del suelo es inferior en magnitud a la evapotranspiración potencial. Generalmente se estima la evapotranspiración real como una proporción de la evapotranspiración potencial. Se considera que con un factor de reducción de la evapotranspiración potencial de 0.75 (utilizado ampliamente en cálculos similares) puede darse un valor estimativo de la evapotranspiración real. Así mismo, se considera que los fenómenos de intercepción de escorrentía y percolación profunda propios de la infiltración de agua al escurrir sobre el suelo pueden representar una reducción del total de la escorrentía en hasta un 85%. Se deduce entonces que la infiltración de agua al

suelo puede ser del orden de un 15% de la diferencia entre la precipitación promedio y la evapotranspiración real promedio.

Conforme la metodología planteada, se puede encontrar el valor de la evapotranspiración potencial mensual a partir de datos de temperatura mensual utilizando la fórmula de Thorthwaite. Los resultados obtenidos para las estaciones próximas al área de estudio se observan en la **Tabla 6.9** y en la **Figura 6.5,** la comparación de dichos resultados con relación al promedio indicando mediante barras el error correspondiente al 5%.

ESTACION	VALORES DE ETP (mm)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
El Muña	47.5	49.5	55.2	54.1	56.3	54.7	56.3	56.1	53.9	55.0	52.8	65.5	**657.0**
Vitelma	52.1	50.4	55.1	55.1	58.5	53.6	55.2	55.3	54.8	57.7	56.3	58.0	**662.2**
Doña Juana	51.3	49.2	55.4	55.9	56.5	53.3	49.3	51.3	53.5	56.8	54.1	52.4	**639.1**
Jardín Botánico	49.5	46.5	63.3	56.3	64.5	57.0	58.6	58.4	56.1	57.3	55.0	56.6	**679.3**
Granja San Jorge	52.2	49.0	54.7	53.5	55.7	54.1	50.3	50.1	48.1	54.4	52.3	53.8	**628.1**
ETP Promedio	**50.5**	**48.9**	**56.7**	**55.0**	**58.3**	**54.5**	**54.0**	**54.2**	**53.3**	**56.3**	**54.1**	**57.3**	**653.1**

ESTACION	VALORES DE ETR (mm)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
El Muña	35.6	37.1	41.4	40.6	42.2	41.0	42.2	42.1	40.4	41.3	39.6	49.1	**492.7**
Vitelma	39.1	37.8	41.3	41.4	43.8	40.2	41.4	41.4	41.1	43.2	42.3	43.5	**496.6**
Doña Juana	38.5	36.9	41.6	41.9	42.4	39.9	37.0	38.5	40.1	42.6	40.5	39.3	**479.3**
Jardín Botánico	37.2	34.9	47.5	42.2	48.4	42.7	44.0	43.8	42.1	43.0	41.3	42.5	**509.4**
Granja San Jorge	39.1	36.7	41.0	40.1	41.8	40.6	37.7	37.6	36.1	40.8	39.2	40.4	**471.1**
ETR Promedio	**37.9**	**36.7**	**42.6**	**41.2**	**43.7**	**40.9**	**40.5**	**40.7**	**40.0**	**42.2**	**40.6**	**43.0**	**489.8**

Tabla 6. 9 Valores de evapotranspiración media mensual por el método de Thornthwaite

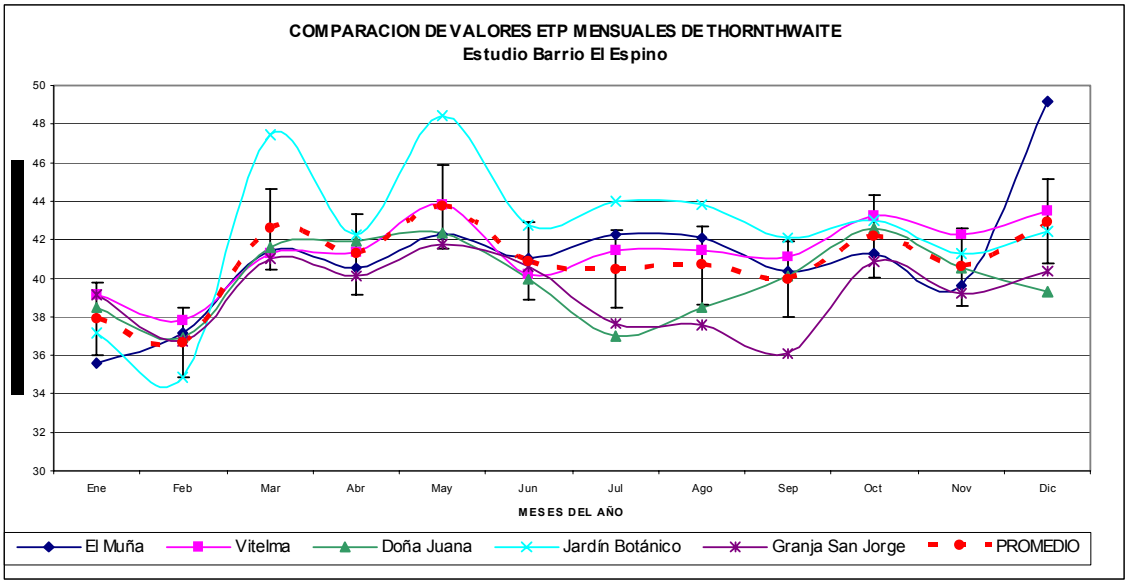


Figura 6.5 Comparación de valores de ETP mensuales con relación al promedio indicando el error para el 5%

6.3.1.2 Cálculo de la Escorrentía

Mediante la aplicación de una sencilla ecuación de balance hídrico se puede obtener un caudal medio de escorrentía generada. Esta ecuación simplificada obedece al hecho de considerar el año completo como periodo de evaluación (cambio en almacenamiento del suelo igual a cero) y a la no consideración de los caudales de aguas subterráneas que posiblemente existan en el área dentro del cálculo (estimación recurso superficial). La ecuación de balance utilizada teniendo en cuenta las condiciones del sector es:

Q = 0.85(P promedio – ETR promedio)*

Donde
Q = Caudal de escorrentía media anual (mm)
P promedio= Precipitación promedio anual en el área (mm)
ETR promedio = Promedio anual en el área de la Evapotranspiración real (mm)

Teniendo en cuenta que el promedio de los valores obtenidos de las estaciones del sector refleja sin mayor variación las condiciones del sector, se obtiene un valor global de escorrentía media anual para el Barrio El Espino.

P promedio= 587 mm (Estación Casablanca)
ETR promedio = 489.8 mm (Promedio estaciones del sector)
Q = 0.85*(587-489.9) = 82.535 mm

Se puede decir entonces, que la escorrentía promedio anual en el sector del barrio El Espino está alrededor de 83 mm.

6.3.1.3 Caudal estimado para aguas de escorrentía suponiendo un diseño de alcantarillado pluvial

Para este caso, el Caudal de Alcantarillado Pluvial se asume que corresponde al valor de escorrentía de la zona por el área aferente (en este caso el área afectada).

Escorrentía promedio anual = 83 mm, promedio mensual = 7 mm, promedio diario = 0.23 mm = 0.23 lt/m^2

- Area estimada aferente al alcantarillado = 200.000 m^2
- Caudal de alcantarillado pluvial = 200.000 m^2 * 0.23 lt/m^2 *1día/24 hr = 869565 lt / 24 hr = 26231 lt/hr

Teniendo en cuenta la suposición anterior, se debería tener en cuenta un caudal de diseño para alcantarillado pluvial por escorrentía de mínimo 7.28 LPS.

6.3.1.4 Cálculo de la Infiltración de Aguas Lluvias

Existen diferentes definiciones de infiltración entre las cuales se pueden citar:

1. Movimiento del agua a través de los intersticios o poros de un suelo u otro medio poroso.
2. Agua subterránea que se infiltra en una tubería a través de uniones, paredes porosas o roturas.
3. Entrada de agua del suelo a una galería.
4. Ingreso de líquido a través del suelo, ya sea cuando aquél cae como precipitación o cuando proviene de una corriente que fluye sobre la superficie.
5. Penetración del agua en el suelo a través de las grietas y poros, sometida a las fuerzas de gravedad y capilaridad, y da origen a las aguas subterráneas.

Como se aprecia, el concepto es el mismo y se puede resumir como el flujo de agua que penetra en un medio poroso a través de la superficie del suelo. Sin embargo cabe anotar que se citan diferentes tipos de infiltraciones algunas de las cuales están ligadas con el presente estudio como lo son las referentes a tuberías, corrientes de agua, precipitación y aguas subterráneas.

Como se mencionó anteriormente, se considera que los fenómenos de intercepción de escorrentía y percolación profunda propios de la infiltración de agua al escurrir sobre el suelo pueden representar una reducción del total del caudal de escorrentía hasta en un 85%. Se dedujo entonces que el volumen de infiltración y percolación profunda de agua en el suelo puede ser del orden de un 15% de la diferencia entre la precipitación promedio y la evapotranspiración real promedio. El valor así estimado de infiltración en este sector puede estar alrededor de 14.56 mm al año.

Dada la presencia de grietas y en general el estado de remoción del material podría considerarse para el caso particular en el cuerpo del movimiento, que la infiltración correspondiera al 95% de dicha diferencia, o sea, 92.25 mm al año. Es importante resaltar en este punto, que la incorporación de agua al suelo aquí expuesta corresponde a la originada por eventos de “precipitación”, descartando por el momento las cantidades atribuibles a intervención humana por obras de infraestructura como acueductos y alcantarillados las cuales se citan más adelante.

6.3.1.5 Estimación de la infiltración por ensayos de campo

Con el fin de obtener un valor del potencial de infiltración de aguas lluvias directamente de campo se seleccionaron 11 sitios en el área de estudio para realizar ensayos de infiltración con infiltrómetro. De la teoría se tiene que es posible calcular un valor del potencial de infiltración de agua en el suelo en pequeñas áreas a partir de ensayos de infiltrómetro.

El infiltrómetro utilizado corresponde al de “Tipo Inundación” (Flooding Type) el cual consiste en un tubo abierto en sus extremos de 30 cm de diámetro y 60 cm de

longitud el cual se entierra aproximadamente 40 cm. El ensayo consiste en suministrar la cantidad de agua necesaria tratando de mantener el nivel constante midiendo el volumen durante varios intervalos de tiempo hasta obtener una capacidad de infiltración aproximadamente constante. Sus principales limitaciones radican en que los resultados dependen bastante del tamaño del tubo y que no refleja el efecto del golpe de gotas de lluvia sobre el suelo. Sin embargo, es una medida real tomada en campo y no se basa en la estimación de un volumen desligada de las condiciones reales del tipo de suelo, el cual para este caso corresponde en general a un mismo material con diferentes grados de alteración en condiciones de pendiente, litología y propiedades geomecánicas muy similares.

En el **Anexo 6.1** se ilustra la secuencia del ensayo y se muestran fotografías de los puntos donde fueron realizados los ensayos de infiltración (Ver **Figura 6.6**).

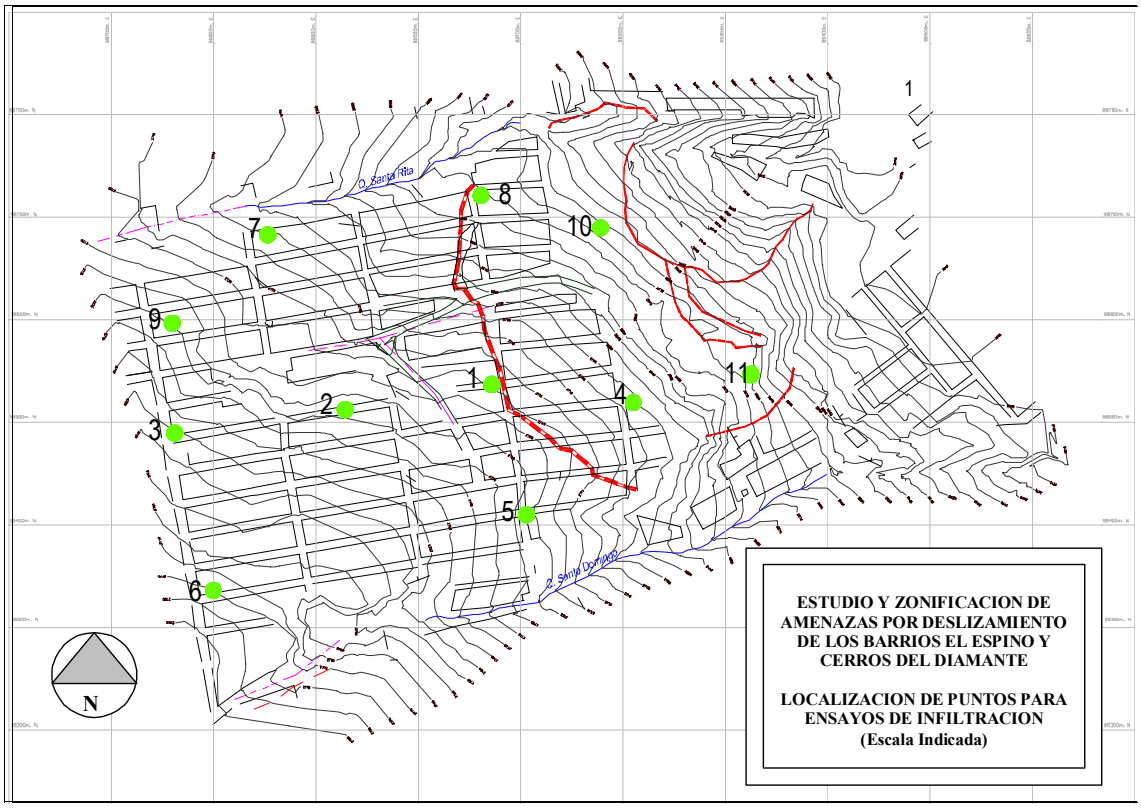


Figura 6.6 Localización de puntos para la realización de ensayos de infiltración.

Entre los principales factores del suelo que afectan la capacidad de infiltración se encuentran la humedad natural del material, su peso unitario y su capacidad de campo[1]. Algunos de estos ensayos fueron efectuados en los puntos de muestreo y los resultados de laboratorio se presentan en el **Tabla 6.10.**

[1] La capacidad de campo se refiere al contenido de agua del suelo totalmente saturado después de haberse drenado por gravedad y cuando su potencial hídrico se aproxima a cero.

DESCRIPCION VISUAL DE MUESTRAS

MUESTRA	PROF (m)	DESCRIPCION
S2	0.4	Capa superficial de relleno orgánico constituido por arena fina limosa gris ligeramente oxidada con gravas angulosas de arenisca amarillenta clara hasta de 1/4, seca
S4	0.4	Material de relleno compuesto por arenisca angulosas hasta de 3/4" con presencia de materia orgánica negra, arena fina gris en matriz limosa, seca
S5	0.4	Limo amarillento oscuro con arena fina amarilla presencia de gravas angulosas de arenisca gris oscura hasta de 1/2", seca
S6	0.4	Limo orgánico con algo de arena fina gris oscura algo oxidada con presencia de gravas angulosas hasta de 1/4" de arenisca, presencia de raicillas, seca
S7	0.4	Material en grumos negro y duro compuesto por limo con algo de arena fina gris presencia de raíces, materia orgánica negra, seco
S8	0.4	Material de relleno compuesto por arenisca angulosas amarillas hasta de 1/2" duras, con algo de limo con oxidaciones, seca
S9	0.4	Material en grumos negro algo duro con limo orgánico negro, presencia de raíces , seco

ENSAYO DE PESO ESPECIFICO DE SOLIDOS

MUESTRA	PROF (m)	W1 gr.	TEMPERATURA °C	W2 gr	W3 gr	W4 gr	yW gr/cm3	Gs
S2	0.4	708.6	70	100	42.5	672.67	0.98594	2.63
S5	0.4	708.6	73	99.7	42.5	671.82	0.985202	2.71
S6	0.4	708.6	75	114.2	55.5	671.24	0.98471	2.64
S7	0.4	709	72	111.1	53.4	672.11	0.985448	2.74
S8	0.4	710.5	71.2	114.2	54.7	672.33	0.985645	2.75
S9	0.4	708.4	73	107.2	50.2	671.82	0.985202	2.75

W1 = Wsuelo+Wpic+Wagua W2=Wsuelo+Wrecip W3=Wrecip W4=Wpic+Wagua

ENSAYO DE HUMEDAD NATURAL

MUESTRA	PROF (m)	P1 gr	P2 gr	P3 gr	Wn %
S2	0.4	253.1	238.5	23.9	6.8
S4	0.4	226.6	200.8	24.3	14.6
S5	0.4	295.1	273.1	24	8.8
S6	0.4	229.4	215.5	24	7.3
S7	0.4	227	206.7	25.1	11.2
S8	0.4	231.8	215.7	23	8.4
S9	0.4	210.7	196.4	23.9	8.3

Tabla 6.10 Resultados de laboratorio efectuados a muestras de material tomadas previo el ensayo de infiltrómetro

La capacidad de infiltración es la cantidad de agua (en lámina) que el suelo es capaz de absorber en la unidad de tiempo. Se expresa en *mm/h* ó *cm/min*.

Este proceso fué estudiado por primera vez por Horton en 1940. El propuso la siguiente relación para determinar la capacidad de infiltración:

$f = fc+(fo-fc)e-kt$

Donde:

f: capacidad de infiltración en un tiempo t en mm/h.
fc: capacidad de equilibrio, que se da cuando el suelo está completamente saturado en mm/h.
fo: capacidad inicial en mm/h
t: tiempo en horas
K: constante que representa la tasa de decrecimiento de esa capacidad.

Si se supone que al inicio de una tormenta el suelo está seco de tal manera, que la capacidad de infiltración es mayor que la intensidad de la lluvia, implica que toda la lluvia se infiltra. Con el tiempo, si la lluvia es lo suficientemente intensa, el contenido de humedad del suelo aumenta hasta que se llega a la saturación. En este momento se empiezan a llenar las depresiones del terreno y se originan "charcos", dando comienzo a la escorrentía superficial directa. A este tiempo se le denomina "tiempo de encharcamiento". Si la lluvia continúa, *f = fc* y esta capacidad de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica del suelo.

Bajo las condiciones anteriores la capa saturada, que en el momento que se da el encharcamiento era muy delgada, se ensancha, a medida que su límite inferior, llamado "frente húmedo", baja. El área bajo la curva (**Figura 6.7**) representa la profundidad del agua infiltrada durante un intervalo de tiempo.

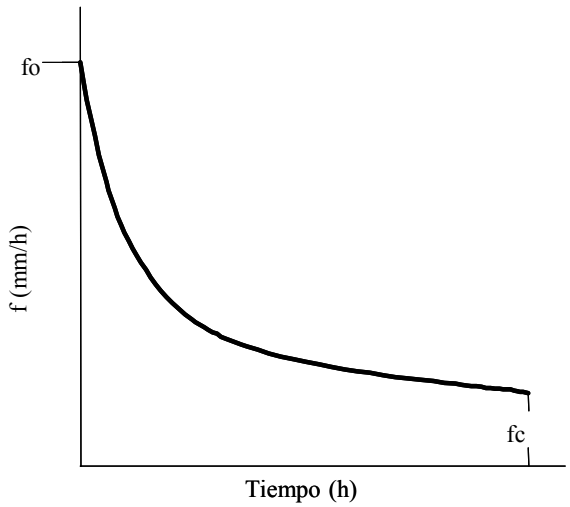


Figura 6.7 Gráfico de infiltración según Horton

Los datos obtenidos en el campo son procesados para obtener de la gráfica los valores de capacidad de infiltración inicial (*fo*) y capacidad de infiltración final (*fc*) por el método de Horton. El proceso de datos se resume a continuación:

1. A partir de los datos de campo (valores de tiempo y volumen de agua adicionada), se hallan los valores de la capacidad de infiltración para los diferentes intervalos de tiempo, teniendo en cuenta el área del infiltrómetro.
2. Se determina la capacidad de infiltración como $f = \Delta V / (A * \Delta t)$
3. Los valores de la capacidad de infiltración para los diferentes intervalos se grafican.
4. De los resultados pueden obtenerse los valores de los parámetros de la ecuación de Horton *fo* y *fc*.

Los resultados obtenidos de los ensayos de capacidad de infiltración se muestran en la **Tabla 6.11**.

Sitio 1	Tiempo(min)	1	3	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3					
	f(cm/min)	28.9	5.3	1.7	0.8	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1				
Sitio 2	Tiempo(min)	1	3	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3			
	f(cm/min)	24.7	2.2	1.4	0.4	0.4	0.7	0.7	0.8	0.6	0.6	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4			
Sitio 4	Tiempo(min)	1	4	4	3	3	3	4	4	2	3	3	3	3	3	3	3	3			
	f(cm/min)	3.1	0.0	0.1	0.6	1.0	0.9	0.5	0.3	0.6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1			
Sitio 5	Tiempo(min)	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3				
	f(cm/min)	4.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1				
Sitio 6	Tiempo(min)	1	1	1	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
	f(cm/min)	14.6	2.0	2.6	1.4	1.0	0.8	0.5	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5		
Sitio 7	Tiempo(min)	1	2	3	3	3	3	3	3	3											
	f(cm/min)	21.6	1.4	1.2	1.8	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2											
Sitio 8	Tiempo(min)	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3	
	f(cm/min)	17.6	4.0	1.5	1.8	1.3	1.5	0.9	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	
Sitio 9	Tiempo(min)	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		
	f(cm/min)	16.6	2.8	2.4	2.0	1.4	1.5	1.1	1.1	1.1	1.1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8		
Sitio 11	Tiempo(min)	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3							
	f(cm/min)	13.6	1.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1							

Tabla 6.11 Resultados de los ensayos de capacidad de infiltración realizados en el área de estudio

Como se observa para cada sitio en la **Tabla 6.11** se calcularon en la primera columna los valores corresponde a *fo (cm/min)* y conforme la duración en tiempo del ensayo, en la última columna figuran los valores de *fc (cm/min).*

Así mismo se observa que en los sitios 3 y 10 no figuran resultados ya que se presentaron inconvenientes en campo que dificultaron la realización de los mismos. En la **Figura 6.8** se muestran las gráficas de los ensayos de infiltración realizados.

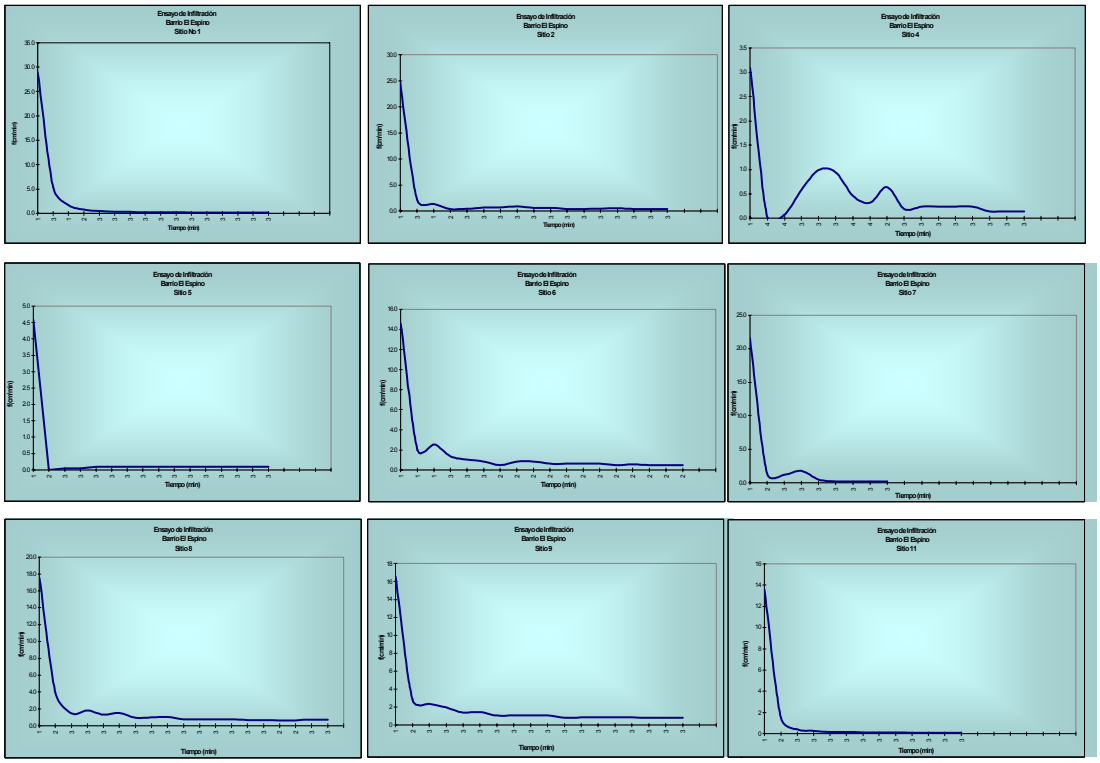


Figura 6.8 Gráficos de los ensayos de infiltración

6.3.2 Estimación de la Infiltración por Causas Antrópicas

Obedece al caudal de agua (volumen) que se incorpora al subsuelo como efecto de las filtraciones de agua en el terreno provenientes de los sistemas de abastecimiento de agua para consumo y el drenaje de las aguas residuales (en este caso domésticas) y las aguas lluvias captadas por los sistemas de drenaje superficial. Como se mencionó anteriormente, este tipo de obras que en un principio fueron rústicamente implementadas en el sector, fueron recientemente sustituidas por sistemas modernos construidos parcialmente hasta la fecha.

Para su determinación se requiere establecer los caudales de aguas servidas y lluvias que se filtran en el suelo además de los caudales de agua para consumo que se filtran igualmente al terreno por uniones y conexiones erradas.

Durante el desarrollo del presente estudio se realizó la consulta de las entidades competentes y a su vez se solicitó a la DPAE suministrara toda la información concerniente a diseños y construcción de los sistemas de acueducto y alcantarillado del sector.

Al respecto se cita el oficio RO-7475 de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la Alcaldía Mayor de Bogotá dirigido a la Doctora Astrid Alvarez (Gerente General de la EAAB – ESP), el cual fue despachado el día 12 de Abril de 2002 con referencia 2/1757, donde textualmente se cita ***"Teniendo en cuenta que el deterioro progresivo de las construcciones cercanas a los agrietamientos se asocia con la infiltración de agua provocada por los daños en las tuberías de alcantarillado recientemente construido, se han enviado las siguientes comunicaciones a diferentes áreas de la EAAB, con el fin de informar sobre las condiciones generales del sector y solicitar su intervención.***

Nombre	Dependencia	Radicado FOPAE	Radicado EAAB
William Pineda	Director Obras Civiles	04112 Agosto 16/01	190896 Agosto 16/01
Jorge Pablo Velasco	Gerente Operativo	4278 Agosto 29/01	196935 Agosto 30/01
Giovanni estepa Benavidez	División Mantenimiento Acueducto Sur	000700 Febrero 18/02	012578 Febrero 18/03
José Eduardo González	Coordinación Técnica de Interventoría	000782 Febrero 20/02	013776 Febrero 21/03
William Cantor	Mantenimiento Acueducto Sur	2-1226 Marzo 11/02	018551 Marzo 11/03
Uriel Gómez Sanabria	Director de Interventoría	2-1225 Marzo 11/03	018550 Marzo 11/04
Jairo Rodríguez	Gerente Técnico	2-1314 Marzo 14/02	019753 Marzo 14/03

……. Por lo anterior se reitera la solicitud a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá de realizar una investigación sobre las versiones de la comunidad relacionadas con la utilización de explosivos durante la construcción del alcantarillado reciente así como una inmediata inspección y evaluación de las condiciones de estabilidad de las redes de alcantarillado".

Desafortunadamente, INGEOMINAS no recibió información relacionada con este tema de manera que pudiera realizar algún estimativo del volumen de agua infiltrado. Se advierte que en el informe semestral así como en las reuniones de interventoría del convenio DPAE – INGEOMINAS fue tratado este punto y a su vez la interventoría gestionó oportunamente al respecto ante la EAAB sin respuesta a la fecha.

6.3.2.1 Cálculo de Filtraciones de Aguas Servidas y Aguas Lluvias

Dado que no se contó con los planos correspondientes a las redes de abastecimiento ni drenaje del área objeto de estudio, diseñadas ni existentes, no fue posible estimar un volumen de agua por filtraciones para ser incluido en el modelo de amenazas. Se recomienda estimar un volumen máximo en función de la distribución de las redes de alcantarillado y abastecimiento existentes relacionándolo con puntos específicos de concentración de caudales con base en los reportes de daños (bitácora de daños reportados, tipo de daño – diámetro tubería y tiempo transcurrido hasta su reparación) así como la relación con la densidad de agrietamientos y movimientos históricamente producidos en el área.

6.3.2.2 Cálculo de Infiltraciones por Obras Rusticas Existentes

Dado que el proceso de urbanización del sector de estudio es más antiguo que el movimiento estudiado, es posible que existieran obras de drenaje rústico

construidas por los moradores iniciales del sector. Este tipo de obras, previas a la construcción del alcantarillado de aguas residuales domésticas y pluvial no es conocido. Tan solo cita la EAAB que existía un drenaje superficial de dichas aguas sumado al de las mangueras con las cuales se abastecía la población de agua el cual requería ser encauzado por razones obvias de salud y ambientales.

Como no existe información al respecto que permita establecer el volumen de aporte, este no es calculado pero se tiene en cuenta dentro de las consideraciones generales del análisis.

6.4 CÁLCULO DE LA RECARGA

La recarga mensual representa el volumen de agua que pasa a conformar el suelo en un estrato o medio poroso en forma de caudal. Para este caso específico del movimiento en masa de El Espino, indica la susceptibilidad del material a almacenar agua al interior del subsuelo y está ligado a su vez con la capacidad de infiltración de los volúmenes de agua que se precipitan de forma natural al terreno.

Retomando las ecuaciones descritas en la metodología a seguir dentro de este estudio, se tiene que la recarga mensual de Goldschmidt – Thornthwaite puede ser expresada de la siguiente forma:

$$Rm = Pm - Em$$

ó

$$Rm = dom + d1m*Pm$$

Donde:

$$do\ m = -do*(PEm / PEy)$$
$$d1m = 1-d1*(PEm / PEy)*(Py/Pm)$$

Los coeficientes *do* y *d1* son de la ecuación de regresión de la evapotranspiración anual, *Ey*, a la precipitación anual *Py;*

Pm = precipitación media mensual
Py = precipitación media anual y teniendo en cuenta que,

$$Em = (PEm / PEy)*Ey$$
$$PEy = \Sigma PEm$$
$$Ey = do + d1*Py$$

Teniendo en cuenta la metodología descrita para el cálculo de la recarga mensual, se procede a encontrar los coeficientes *do* y *d1*. Para ello se elabora la **Figura 6.9.**

De la **Figura 6.9** se observa que la correlación es bastante mala. Sin embargo efectuando el cálculo estimativo se obtiene que los coeficientes correspondientes a la ecuación

$$Ey = d1*Py + do$$

Serán:

do = 685.08
d1=-0.0267.

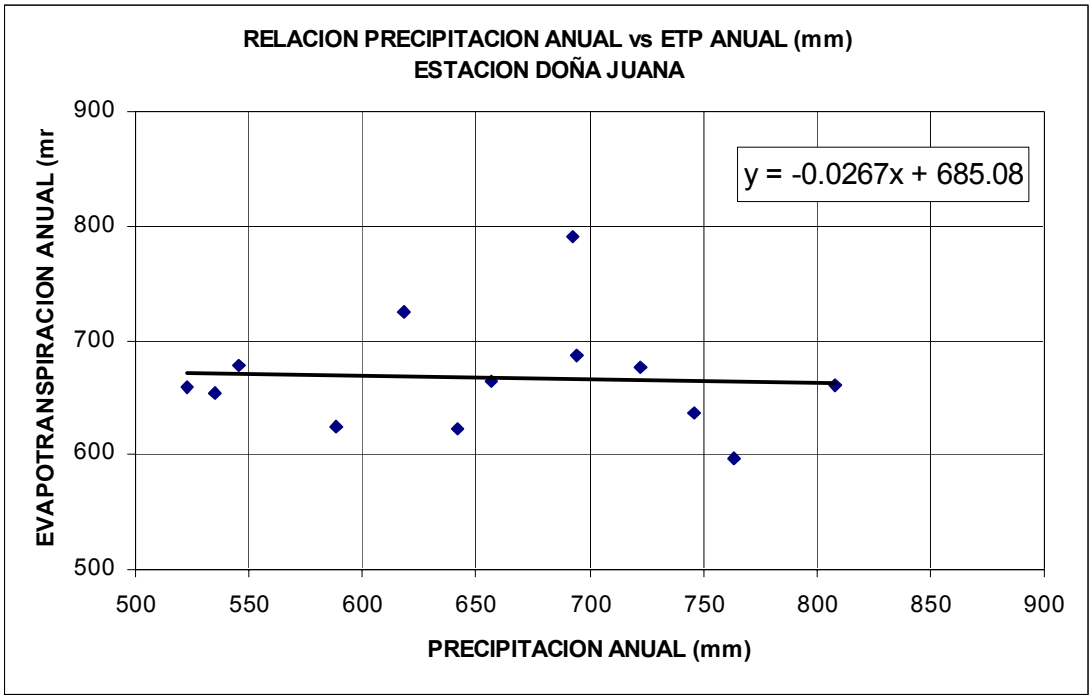


Figura 6.9 Relación de la precipitación anual y la evapotranspiración potencial anual

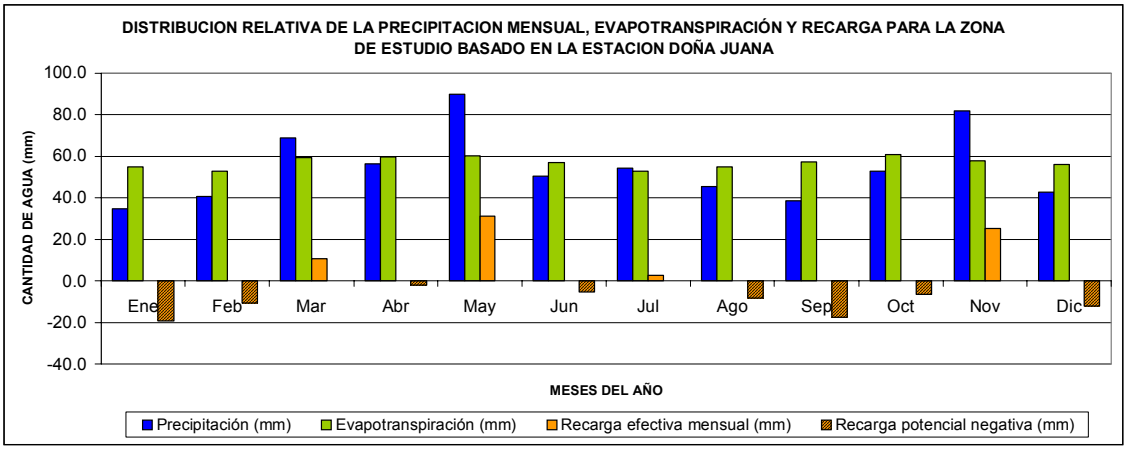
Dado que la estación Doña Juana es la estación con datos climatológicos más próxima al sitio de estudio, se estimó la recarga mensual como se muestra en la **Figura 6.10.**

Nótese que el valor de evapotranspiración potencial es muy similar a lo largo del año mientras que la precipitación varía conforme la distribución anual indicada quedando en algunos meses levemente (hasta 33.6 mm) por encima y en otros por debajo (hasta 16 mm) de la evapotranspiración. Por esta razón, la recarga potencial no excede los 19.04 mm y la efectiva los 31.09 mm mensuales.

6.5 RELACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN CON EL MOVIMIENTO EN MASA

Como se mencionó en las limitantes del modelo utilizado, se realizaron los estudios para la obtención del modelo hidrometeorológico" para el cual se busca la relación con el "Comportamiento Geotécnico" de los materiales a través del análisis histórico de los movimientos ocurridos en el y el análisis de lluvias acumuladas precedentes a los eventos.

Para tal fin se determina la magnitud de la precipitación "extrema" ocurrida con una duración dada, la cual es capaz de detonar un movimiento en masa y puede ser asociada estadísticamente a un periodo de recurrencia de este tipo de evento en función de los registros de una estación dada. Este concepto, desarrollado por Castellanos (Castellanos, 1996) es conocido como "Lluvia Crítica", y ha sido aplicado en diversos estudios realizados por INGEOMINAS.



ESTACION	Valores Mensuales												Totales anuales	
Doña Juana	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
PEm = Evapotranspiración potencial mensual (mm)	51.3	49.2	55.4	55.9	56.5	53.3	49.3	51.3	53.5	56.8	54.1	52.4	**639.1**	= PEy
Pm = Precipitación media del mes (mm)	34.6	40.8	68.8	56.4	90.1	50.4	54.2	45.4	38.5	52.8	81.8	42.8	**656.6**	= Py
Ey = Evapotranspiracion obtenida de correlación entre valores anuales de precipitación y evapotranspiración (mm)	684.2	684.0	683.2	683.6	682.7	683.7	683.6	683.9	684.1	683.7	682.9	683.9		
Em = Evapotranpiración mensual (mm)	55.0	52.6	59.2	59.8	60.4	57.0	52.8	54.9	57.3	60.8	57.8	56.1		
do m	-55.0	-52.7	-59.4	-59.9	-60.6	-57.1	-52.9	-55.0	-57.4	-60.9	-57.9	-56.2		
d1 m	1.04	1.03	1.02	1.03	1.02	1.03	1.02	1.03	1.04	1.03	1.02	1.03		
Rm = Recarga mensual (mm)	**-19.04**	**-10.57**	**10.91**	**-1.95**	**31.09**	**-5.24**	**2.65**	**-8.22**	**-17.40**	**-6.57**	**25.34**	**-11.95**		

Figura 6.10 Distribución relativa de la precipitación mensual, evapotranspiración y recarga para la zona de estudio basado en los registros de la Estación Doña Juana.

6.5.1 Análisis de lluvias acumuladas.

Dado que la estación Sierra Morena posee registros de precipitación a nivel horario, se procesaron los datos que a partir del año 2000 posee la estación hasta la fecha.

Teniendo en cuenta los análisis hidrológicos previos y las observaciones y conocimientos locales se estableció que la precipitación continua en el área de estudio es poco frecuente y generalmente está en un rango que oscila entre 1 hora y varios días. Examinando los registros horarios y diarios de la estación Sierra Morena se observa que se presentan lluvias espaciadas, en ocasiones prácticamente semanas y casi meses correspondiendo con los periodos marcados por el régimen bimodal. Es así como se establece que lluvias continuas diarias a lo

largo de 30 y 60 días son poco frecuentes y por ello se obtuvieron las curvas de lluvias máximas acumuladas y promedios multianuales para lluvias con duraciones entre 1 y 24 horas (para el caso del análisis horario), y adicionalmente para lluvias con duraciones de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30 y 60 días (para el caso del análisis diario). En la **Tabla 6.12** se presentan los valores obtenidos de precipitación acumulada antecedente para la estación Sierra Morena.

VALORES DE PRECIPITACION HORARIA ACUMULADA ENTRE 1 Y 24 HORAS

	AÑO 2000 (Oct - Dic)		AÑO 2001 (Ene - Dic)		AÑO 2002 (Ene - Dic)		AÑO 2003 (Ene - Mar)		PERIODO 2001-2003 (Oct/00 - Mar/03)	
TIEMPO (Horas)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)
1	14.00	0.07	17.80	0.07	15.90	0.07	12.50	0.04	18.10	0.06
2	20.70	0.11	20.70	0.15	18.00	0.14	12.50	0.01	21.10	0.11
3	20.70	0.17	22.00	0.22	19.50	0.21	12.50	0.02	22.00	0.17
4	20.80	0.22	22.10	0.29	21.00	0.27	12.50	0.03	22.10	0.23
5	21.00	0.28	22.20	0.37	22.20	0.34	12.50	0.03	22.20	0.29
6	21.10	0.33	22.20	0.44	22.50	0.41	12.50	0.04	22.50	0.34
7	21.10	0.39	22.30	0.52	22.70	0.48	12.50	0.04	22.70	0.40
8	21.10	0.44	22.30	0.59	22.70	0.55	12.50	0.05	22.70	0.46
9	21.10	0.50	22.30	0.66	24.50	0.62	12.50	0.06	24.50	0.52
10	21.10	0.55	22.30	0.74	25.20	0.69	12.50	0.06	25.20	0.57
11	21.10	0.61	22.40	0.81	27.10	0.75	13.90	0.07	27.10	0.63
12	21.10	0.66	22.40	0.89	27.70	0.82	13.90	0.08	27.70	0.69
13	21.10	0.72	22.40	0.96	29.60	0.89	13.90	0.08	29.60	0.75
14	21.10	0.77	22.40	1.04	31.30	0.96	13.90	0.09	31.30	0.80
15	21.10	0.83	22.40	1.11	32.10	1.03	13.90	0.10	32.10	0.86
16	21.10	0.89	22.40	1.18	33.90	1.10	13.90	0.10	33.90	0.92
17	21.10	0.94	22.40	1.26	34.60	1.17	13.90	0.11	34.60	0.98
18	21.10	1.00	22.40	1.33	34.70	1.23	13.90	0.11	34.70	1.03
19	21.10	1.05	22.40	1.41	34.70	1.30	13.90	0.12	34.70	1.09
20	21.10	1.11	22.40	1.48	34.70	1.37	13.90	0.13	34.70	1.15
21	21.10	1.17	22.40	1.56	34.70	1.44	13.90	0.13	34.70	1.20
22	21.10	1.22	22.40	1.63	34.70	1.51	13.90	0.14	34.70	1.26
23	21.10	1.28	22.50	1.71	34.70	1.58	13.90	0.15	34.70	1.32
24	21.10	1.33	22.70	1.78	34.70	1.65	13.90	0.15	34.70	1.38

VALORES DE PRECIPITACION DIARIA ACUMULADA ENTRE 1 Y 60 DIAS

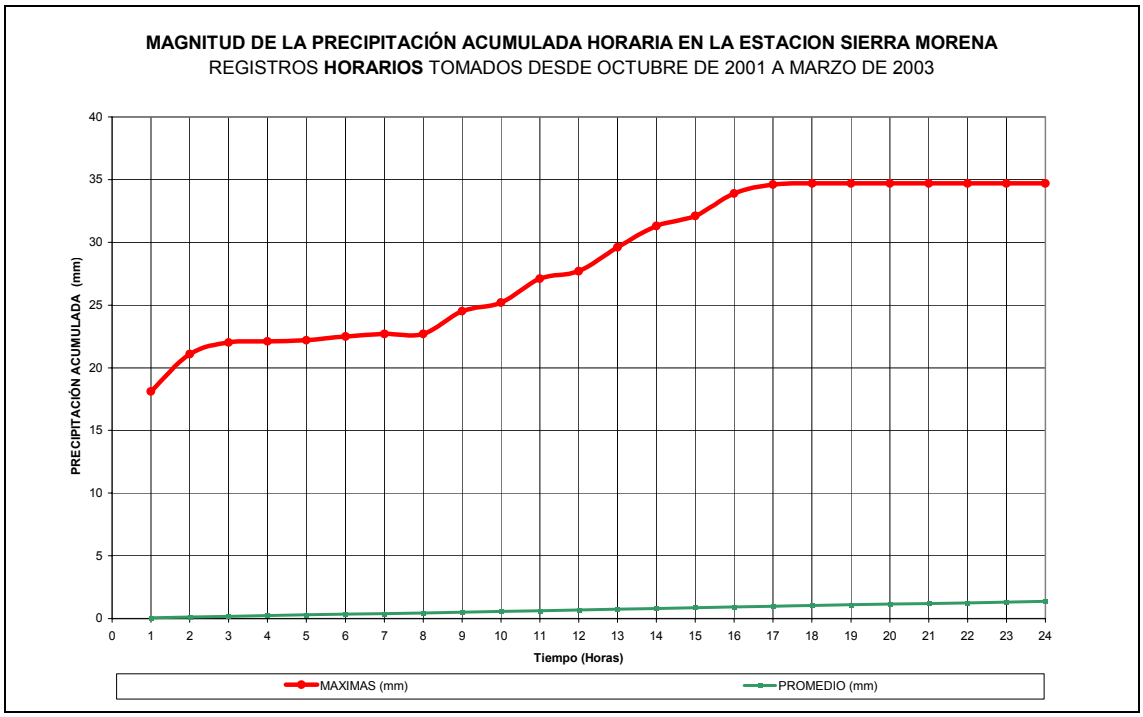
	AÑO 2000 (Oct - Dic)		AÑO 2001 (Ene - Dic)		AÑO 2002 (Ene - Dic)		AÑO 2003 (Ene - Mar)		PERIODO 2001-2003 (Oct/00 - Mar/03)	
TIEMPO (Días)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)	MAXIMAS (mm)	PROMEDIO (mm)
1	21.10	1.33	22.70	1.78	34.70	1.65	13.90	0.15	34.70	1.38
2	31.30	2.69	25.70	3.61	42.90	3.30	23.80	0.31	42.90	2.76
3	33.90	3.92	30.80	5.47	49.10	4.97	25.20	0.45	49.10	4.13
4	34.20	5.14	42.50	7.37	57.10	6.64	25.20	0.56	57.10	5.51
5	36.30	6.40	50.30	9.31	57.70	8.32	25.80	0.68	57.70	6.89
6	36.30	7.69	50.30	11.27	58.50	10.02	26.40	0.80	58.50	8.28
7	38.10	9.01	50.30	13.27	59.00	11.72	26.80	0.93	59.00	9.66
8	47.20	10.35	71.40	15.32	61.90	13.43	27.00	1.05	71.40	11.05
9	55.00	11.73	71.40	17.41	62.90	15.15	27.00	1.17	71.40	12.45
10	55.30	13.14	72.40	19.56	70.30	16.88	27.10	1.29	72.40	13.84
15	69.40	20.58	73.40	30.87	110.10	25.49	27.70	1.91	110.10	20.84
20	77.10	28.46	87.40	41.48	121.10	33.61	40.20	2.48	121.10	27.92
25	78.00	36.94	101.30	52.09	127.90	42.00	40.20	2.64	127.90	35.06
30	87.20	45.70	101.40	64.22	136.80	50.52	40.20	2.90	136.80	42.20
60	103.90	91.49	144.00	129.09	215.00	105.14	55.40	4.15	215.00	83.95

Tabla 6.12 Precipitación acumulada antecedente para la Estación Sierra Morena

En la **Figura 6.11** se muestran gráficamente los resultados obtenidos.

6.5.2 Análisis de frecuencias de lluvias acumuladas

Una vez obtenidos los valores máximos acumulados, mediante el ajuste a distribuciones de frecuencia apropiadas, se obtienen las curvas de periodo de recurrencia en función de la precipitación máxima acumulada (por ser una serie muy corta – año 2001 a 2003) y su duración, tal como se muestra en la **Figura 6.12.**



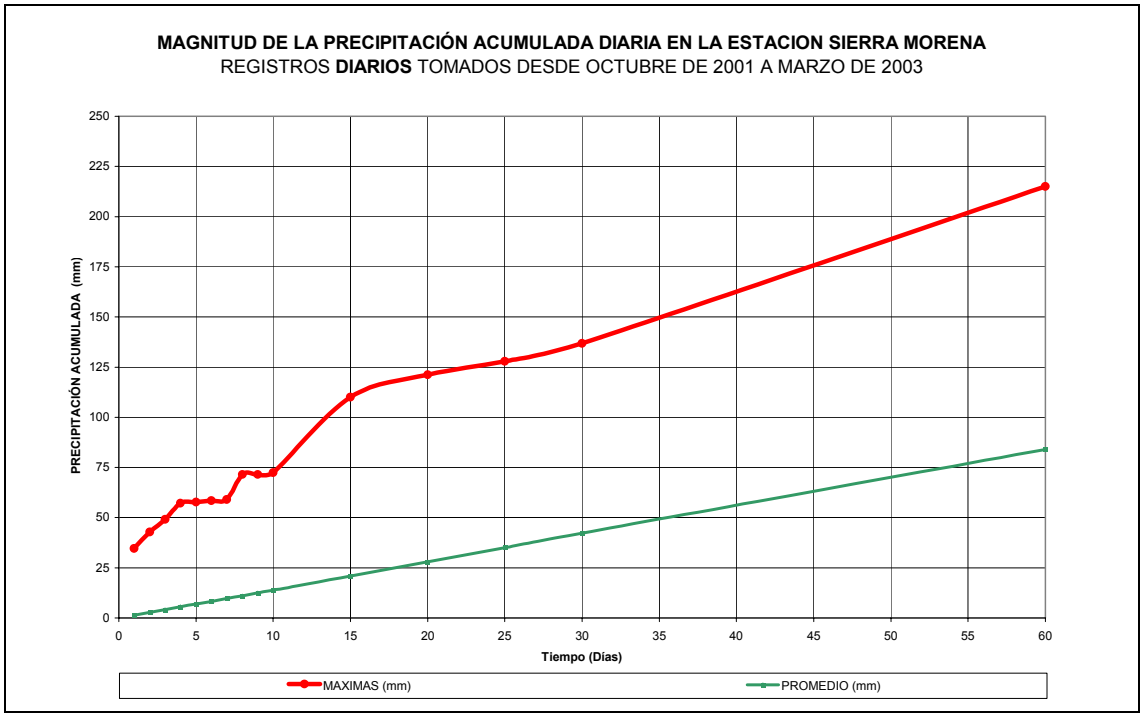
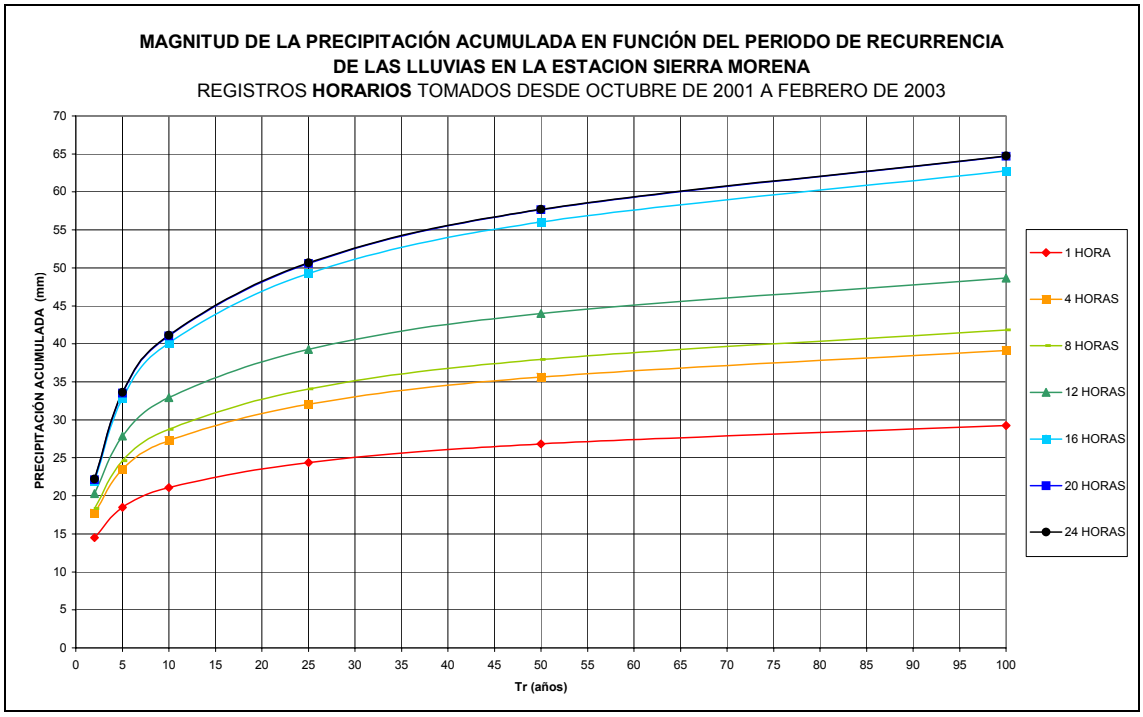


Figura 6.11 Curvas de precipitación acumulada máxima y promedio a nivel horario y diario para la Estación Sierra Morena



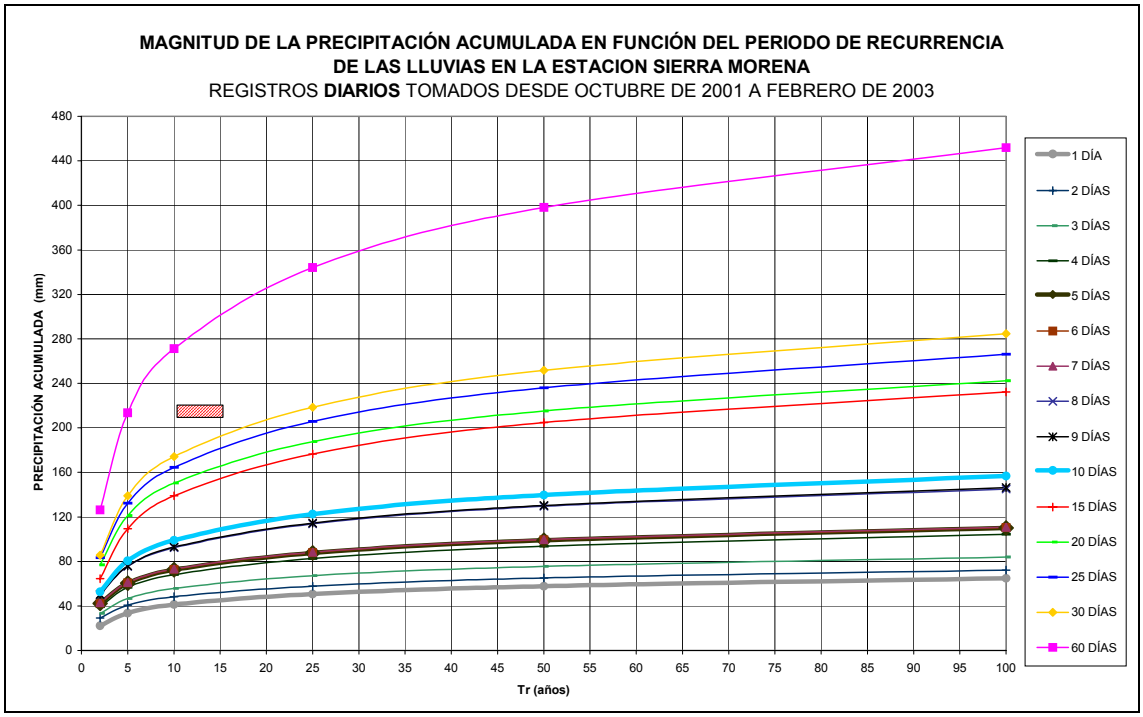


Figura 6.12 Frecuencia de la precipitación acumulada a nivel horario y diario para la Estación Sierra Morena

Parte del análisis de relación lluvia-deslizamiento se encuentra en el estudio "Zonificación de Riesgo por Inestabilidad del Terreno para Diferentes Localidades en la Ciudad de Santa Fe de Bogotá D. C." realizado para FOPAE por la firma INGEOCIM Ltda. Bajo el contrato No. 1314-107-97 suscrito entre dichas entidades.

En dicho estudio, como se cita en diferentes conceptos técnicos emitidos por la DPAE dentro del análisis hidrológico, textualmente se repite "La distribución anual de las lluvias en la zona es bimodal, con dos periodos lluviosos intercalados con dos periodos secos, con una precipitación media multianual de 600 mm y la precipitación crítica varía entre 210 mm a 220 mm, con un periodo de retorno de 10 a 15 años".

Si se observa en la parte inferior de la **Figura 6.12,** se marca el rango entre los 10 y 15 años de periodo de retorno (Tr), con lo cual la precipitación crítica en el rango de 210 mm a 220 mm se aproximaría a una duración entre 30 y 60 días acumulados con lo cual se validarían las consideraciones hasta ahora efectuadas.

6.5.3 Inventario de informes asociados con movimientos del terreno y su relación con la ocurrencia de lluvias.

Con el fin de establecer la posible relación entre los eventos reportados y los movimientos del terreno en la zona de estudio en los barrios el Cerro del Diamante y El Espino, fueron solicitados los reportes o informes relacionados a la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., los cuales fueron gentilmente suministrados por esta entidad mediante oficio 2/5150 despachado el 6 de septiembre de 2002.

Del análisis efectuado se concluye que tan solo en tres (3) reportes se cita o menciona como antecedente la ocurrencia de lluvias precedentes. En la **Tabla 6.13** se presenta la síntesis de los reportes consultados entre los cuales se destacan los informes DI-1383 de marzo 19 al 23 de 2002, DI-1377 de marzo 1 al 8 de 2002 y DI-1242 de septiembre 15 de 2001 por mencionar la lluvia como antecedente del movimiento (Ver la precipitación de estas fechas en **Anexo 6.2**).

Sin embargo no fue posible establecer la fecha exacta de los eventos, dado que solo se presenta la fecha de la visita existiendo la incertidumbre si esta difiere de la fecha del evento como se puede observar en los registros de precipitación de la estación Sierra Morena para las fechas de reporte.

6.5.4 Lluvia acumulada antecedente

Dentro del análisis de lluvia crítica es posible establecer la magnitud de lluvia precedente al evento deseado, cuando la curva de lluvia acumulada a dicho evento sobrepasa los valores promedio y máximos acumulados de los registros de la estación.

Este tipo de análisis requiere de la existencia de registros por lo menos de un año precedente a la fecha del evento, que la estación haya registrado datos por lo más de 10 años y que se cuente con una fecha lo más exacta posible del evento. Generalmente, y El espino no es la excepción, los datos hidrológicos no tienen la

CRONOLOGIA DE INFORMES TECNICOS FOPAE PERIODO 1999 - 2002

RESUMEN DE INFORMES FOPAE ELABORADO PARA EL ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL MOVIMIENTO SECTOR AFECTADO LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR

INFORME	BARRIOS	DIRECCION	FECHA VISITA (mm/dd/aaaa)	AREA (Ha)	DESCRIPCION / DAÑOS	OBSERVACIONES	ANTECEDENTE
DI-1431	CERRO EL DIAMANTE, EL ESPINO I SECTOR, ESPINO III SECTOR	KR 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR Y DG 63C SUR ENTRE KR 73A Y 74B	04/30/2002	15	Desplome y destrucción de pisos de viviendas, agrietamiento e incremento de escarpes	Evacuación de diversas familias y recomendación de reubicación	
DI-1399	CERRO EL DIAMANTE, EL ESPINO I Y III SECTOR, SAN RAFAEL, RINCON DEL PORVENIR	KR 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR	04/15/2002	15	Desplome de viviendas, destrucción de pisos, agrietamientos. Movimiento del terreno con un agrietamiento que amplia la franja de afectación.	Evacuación de diversas familias y cambio a Prioridad 1 de algunas de ellas	
DI-1398	EL ESPINO III SECTOR - EL RODEO	CL 63D SUR ENTRE KR 74 A 75C	04/15/2002	12	Movimiento del terreno con un agrietamiento que amplia la franja de afectación.	El concepto técnico 2715 del 26 de agosto de 1997 recomendó la reubicación de 29 familias que se encontraban viviendo en la parte baja del escarpe (20m de alto y 350m de longitud) o antiguo patio de la explotación de la cantera Santa Rita por caida de bloques	
DI-1396	CERRO EL DIAMANTE, EL ESPINO I Y III SECTOR, SAN RAFAEL, RINCON DEL PORVENIR	KR 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR	04/8/2002 AL 04/12/2002	15	Desplome de viviendas, destrucción de pisos, agrietamientos. Movimiento del terreno con un agrietamiento que amplia la franja de afectación.	Evacuación de diversas familias y cambio a Prioridad 1 de algunas de ellas	
DI-1386	CERRO EL DIAMANTE, EL ESPINO I Y III SECTOR, SAN RAFAEL, RINCON DEL PORVENIR	KR 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR	03/25/2002 AL 04/1/2002	15	La tendencia del agrietamiento se mantiene dando lugar a la formación de un escarpe de deslizamiento a lo largo de la kr 89. Los cambios en el patrón de agrietamiento se relacionan con hundimientos locales del costado E de la grieta en el terreno	Evacuación inmediata de varias familias e inclusión en el proyecto de reubicación.	
DI-1383	EL CERRO DEL DIAMANTE	KR 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR	03/19/2002 AL 03/23/2002	9	Aparición de nuevas grietas paralelas a las existentes y ampliación de las aberturas alcanzando 0.5 cm. Se destaca el hundimiento relativo del terreno en la zona de mayor agrietamiento, conformándose escalones que alcanzan 0.8 m.	Informe de seguimiento de la problemática geotécnica que consiste en la aparición desde agosto de 2001 de agrietamientos con tendencia lineal, con aberturas del orden de 20 cm y profundidades superiores a 6 m. Las grietas conforman un arco paralelo al escarpe correspondiente a la cantera Santa Rita ubicada a 200 m al oriente de este arco. Se recomendó control y reparaciones inmediatas de la red de alcantarillado con el fin de evitar aporte de aguas servidas a las grietas aislando las tuberías más afectadas y manejando las aguas lluvias y negras con tuberías flexibles.	En el periodo de seguimientos se presentaron lluvias y continúan las fugas de aguas servidas del sistema de alcantarillado. Los flancos se conforman hacia los extremos norte y sur , sobre las quebradas Santa Rita y Rosales, por lo que el flujo de agua infiltrada aflora en estos puntos ubicados en una cota topográfica menor.
DI-1382	EL ESPINO III SECTOR	DG 63C SUR CON KR 73L	03/18/2002	4	El talud de la parte norte del barrio El Espino III Sector presentó desprendimiento de bloques por intenso fracturamiento y meteorización, disposición estructural desfavorable y numerosas grietas de un deslizamiento traslacional en forma paralela a la corona del escarpe de la antigua explotación. En la parte alta del extremo su occidental del barrio se observa un antiguo deslizamiento que compromete material por la DG 66 Sur entre KRS 74 y 74C y ha producido pequeños flujos de lodo y desprendimientos. Hacia lfa parte baja se encuentra el macizo rocoso. Así mismo se describen dos mecanismos de falla de la parte central (Cantera Sur) como son flujo de detritos y caída de bloques.	El concepto técnico 2715 del 26 de agosto de 1997 recomendó la reubicación de 29 familias que se encontraban viviendo en la parte baja del escarpe (20m de alto y 350m de longitud) o antiguo patio de la explotación de la cantera Santa Rita por caida de bloques	
DI-1380	EL CERRO DEL DIAMANTE	KR 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR	03/8/2002 AL 03/15/2002	9	La tendencia del agrietamiento es más definida por la intyerconexión y aparición de trazos de falla paralelos a los ya existentes, hundimiento del terreno entre 0.1 y 0.8 m en la KR 89 por CLL 56 sur, con alturas entre 0.2 y 0.6 m.	Evacuación de diversas familias y recomendación de reubicación	
DI-1377	EL CERRO DEL DIAMANTE	KR 89 CON CALLE 57 SUR	03/1/2002 AL 03/8/2002	9	La tendencia general del agrietamiento adquiere mayor continuidad a modo de arco distante 200 m y en forma paralela al borde del escarpe del deslizaqmiento de la Cantera Santa Rita.	El día 1 de marzo de 2002 se realizó un reconocimiento del barrio El cerro del Diamante en busca de fuentes de agua que afloraban en el terreno. En las esquinas de la CL 61 sur con KR 88 (manzana 1) y en la CL 59 sur con KR 89 se encontró acumulación de aguas. Se identificó filtración en el talud posterior a la vivienda ubicada en la Mz 7 Lt 17. Así mismo en la CL 57 sur con KR 89 se encontró un tubo descubierto sin reparación de diámetro 0.2 m. Otro aporte por rebose de aguas negras se ubica en la CL 56 sur frente a la placa No. 89A-25. Se reporta igualmente que existen fugas en las mangueras del acueducto comunitario en la CL 56A sur No. 88-25 ya que los movimientos las someten a esfuerzos de compresión y tracción.	Se constató incremento en la velocidad de propagación del agrietamiento del terreno asociado al agua como agente detonante, bien sea por las fuertes lluvias ocurridas y por la infiltración de aguas servidas debido al desempate de las tuberías de alcantarillado. la velocidad de avance del proceso de inestabilidad es mayor con relación a los periodos anteriores de seguimiento.
DI-1352	EL CERRO DEL DIAMANTE	KR 87 A 89 ENTRE CALLES 55 A 60 SUR	02/19/2002	9	Factores como la explotación de materiales de cantera, litología, geología estructural, hidrogeología, procesos de relleno no tecnificado, eliminación de cobertura vegetal, urbanización , entre otros configuraron el escenario de amenaza por FRM en los barrios El Espino I Sector, Cerro El Diamante, San Rafael.	Agrietamientos en manzanas 1 y 2 (NE), 4.7.10 y 14 (Centro E) y 22,27 y 31 (SE) con separaciones del orden de 2 m , longitudes de 5 m, profundidades entre 3 y 4 m , y separaciones de 10 cm. La dirección anuncia contratará el estudio Geotécnico, monitoreo y seguimiento del movimiento del terreno. Se desincentiva la construcción en el sector de nuevas viviendas y se incluyen nuevas familias en el proyecto de reubicación de familias en alto riesgo no mitigable.	PL 1 Plano de localización del agrietamiento del terreno y PL 2 Identificación de prediuos construidos.
DI-1243	CERRO EL DIAMANTE	CL 58 A SUR No. 89-43	09/15/2001	0,05	Casa afectada con agrietamiento importante.	Se informa a los moradores de la vivienda acerca de la necesidad de evacuarla y efectuar las reparaciones en las redes domiciliarias de acueducto y alcantarillado	
DI-1242	CERRO EL DIAMANTE	CL 59 A SUR No. 89-41	09/15/2001	0,05	Pequeño flujo de lodo que ingresó a la vivienda el jueves 13 de septiembre de 2001.	Se observan procesos de erosión antrópica y se sugiere desviar aguas libres.	Inadecuada descarga de los sistemas de alcantarillado de aguas negras y no existencia de aguas lluvias. Se atribuye el movimiento a las fuertes lluvias que lo antecedieron.

Tabla 6.13 Cronología de informes técnicos del FOPAE en el periodo 1999-2002 relacionados con la posible ocurrencia de lluvias.

CRONOLOGIA DE INFORMES TECNICOS FOPAE PERIODO 1999 - 2002

RESUMEN DE INFORMES FOPAE ELABORADO PARA EL ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE LA PRECIPITACIÓN EN EL MOVIMIENTO SECTOR AFECTADO LOCALIDAD CIUDAD BOLIVAR

INFORME	BARRIOS	DIRECCION	FECHA VISITA (mm/dd/aaaa)	AREA (Ha)	DESCRIPCION / DAÑOS	OBSERVACIONES	ANTECEDENTE
DI-1221	CERRO EL DIAMANTE	KR 89 CL 59 SUR	08/16/2001		Entre los días 14 y 16 de agosto de 2001 se presentaron agrietamientos de muros y pisos de viviendas entre 5 mm y 7 cm, identificándose el día 16 de agosto un agrietamiento del terreno con tendencia lineal en el barrio El Espino I, de abertura aproximada 10 cm y profundidad aproximada 5 m.	Se realizaron campañas quincenales en 20 viviendas. Se instalaron 8 mojones y 40 niveletas para seguir el movimiento. Cabe anotar que en este informe se cita la apertura de las diaclasas lo cual indica movimiento del terreno entre el 14 y 16 de agosto.	Como antecedentes se cita en el informe que para este sector se registraron desplazamientos acumulados entre agosto de 2000 y febrero de 2001 del orden de 5 a 21 mm en dirección NE. En esta zona se instaló un inclinómetro que reportó un desplazamiento acumulado de 56 mm y movimientos de hasta 12 m de profundidad. Se recomienda obtener información de la EAAB acerca de los procedimientos empleados en la construcción del alcantarillado del barrio El Cerro del Diamante, verificando las versiones dadas por la comunidad.
CT-3735	CERRO EL DIAMANTE, EL ESPINO I SECTOR, ESPINO III SECTOR	KR 89 ENTRE CL 55 A 60 SUR, DG 63C SUR A 66 A SUR ENTRE KR 73A Y 74B	04/30/2002	15	Avance de la zona de mayor agrietamiento hacia el W por el efecto retrogresivo y remontante del movimiento. El desplazamiento de material inestable ocasiona inestabilidad hacia los antiguos frentes de explotación generando caida de bloques y desprendimiento de rocas.	Ampliación de la zona de inestabilidad a manzanas 16, 19, 22 y 26 en el cerro El Diamante, y 24, 25 y 27 en el barrio El espino III sector.	37 viviendas se encuentran en alto riesgo no mitigable.
CT-3725	CERRO EL DIAMANTE, EL ESPINO I SECTOR, ESPINO III SECTOR, EL RODEO, SAN RAFAEL, RINCON DEL PORVENIR.	KR 73 A 90 ENTRE CL 55 A 60 SUR EN LA PARTE ALTA ENTRE DG 63 C A 67 A EN LA PARTE BAJA	04/15/2002	20	Laderas sometidas a explotación minera no controlada, dejando dos frentes de explotación conocidos como la Cantera Santa Rita y la Cantera Sur. En la parte alta se conformaron los asentamientos humanos de El Espino I sector y el Cerro El Diamante. En la parte baja (antiguo patio de operaciones) se desarrollaron los barrios El Espino III sector y El Rodeo. Un proceso paulatino de agrietamiento fue descrito en un sector ladera arriba del escarpe del deslizamiento en la Cantera Santa Rita descrito como segmentos lineales sobre la KR 89 entre CL 56 sur y 59A sur, paralelos al colector de aguas lluvias y negras construido por la EAAB.	Los mapas de amenaza por FRM se incorporaron al Decreto 619 de 2000 POT. La DPAE emitió los conceptos de riesgo para los barrios en proceso de legalización que fueron incorporados a las resoluciones del DAPD (3503, 3268, 3456, 3273, 3280). A partir del 1 de marzo de 2002 se incrementó el proceso de inestabilidad. El servicio de agua potable se suministra a través de un sistema provisional con mangueras; para la disposición de aguas de desecho la EAAB construyó en el primer semestre del año 2001 los colectores de aguas negras y aguas lluvias y la comunidad realizó las conexiones provisionales a dicho sistema. La cobertura de energía electrica es prácticamente total y la red vial se encuentra sin pavimentar. A partir del 4 de abril de 2002 se realiza un control permanente sobre las construcciones. Se establece que se encuentran en alto riesgo no mitigable 404 familias de las cuales 324 fueron relacionadas en los diagnósticos entre ago/01 y abr/02, y 62 predios que estaban pendientes en el proyecto de reubicación incluidos desde 1998. Adicionalmente existen 569 familias en el area de influencia del deslizamiento.	En enero de 1997 se reportó una situación de emergencia en El Rodeorerubicando 29 familias por el movimiento de 0.5 ha de terreno. De acuerdo con afirmaciones de la comunidad los daños se originaron a causa de las explosiones realizadas para las excavaciones durante la construcción de los colectores de alcantarillado por parte de la EAAB, pero no puede confirmarse esta afirmación dado que no existe seguimiento alguno. La rotura de tuberías de alcantarillado y pozos de inspección, el desempate de mangueras para suministro de agua potable y algunos días de intensas lluvias ocasionaron un incremento en el volumen de agua infiltrada en el terreno, lo cual se tradujo en daños a las construccionjes cercanas.
CT-3456	EL CERRO DEL DIAMANTE		11/30/1999		Cartografía del DAPD escala 1:500. Informe descriptivo de la zona basado en el estudio elaborado bajo contrato de consultoría No. 1314-107-97 por la firma INGEOCIM así como el estudio elaborado por Civiles LTDA denominado "Estudio Geotécnico, Evaluación de Alternativas de Medidas de Mitigación y Diseños Detallados de las Obras Recomendadas para Estabilizar la zona comprendida entre Q. Santo Domingo y Q. Santa Rita Barrio El espino - Localidad de Ciudad Bolivar y en observaciones de los profesionales del área de riesgos de la DPAE.	La intervención antrópica es alta, el sector presenta infraestructura urbana sin un planeamiento adecuado, con servicios básicos provisionales manejados por la comunidad de manera antitécnica, generandose fugas de agua y mal manejo de aguas de escorrentía y aguas servidas.	La distribución anual de las lluvias en la zona es bimodal con dos periodos lluviosos intercalados con dos periodos secos, con una precipitación media multianual de 600 mm y la precipitación crítica varía entre 210 mm a 220 mm con un periodo de retorno de 10 a 15 años.
CT-3503	ESPINO III SECTOR	Espino III Sector limita al oriente con los barrios Ismael Perdomo y Los Rosales, al sur con los barrios La Carbonera, la Carbonera II sector y Santo Domingo, y al occidente con el barrio Espinos I y el sector del Rodeo	07/20/2000		Cartografía del DAPD escala 1:1000. Informe descriptivo de la zona basado en el estudio elaborado por Civiles LTDA denominado "Estudio Geotécnico, Evaluación de Alternativas de Medidas de Mitigación y Diseños Detallados de las Obras Recomendadas para Estabilizar la zona comprendida entre Q. Santo Domingo y Q. Santa Rita Barrio El espino - Localidad de Ciudad Bolivar y en observaciones de los profesionales del área de riesgos de la DPAE.	Dentro de las recomendaciones del informe técnico se plasman reportar al DAMA la presencia de explotaciones artesanales, impedir que se continúe con el relleno en la parte colindante con la ZV 1 hasta garantizar técnicamente su estabilidad, adfelantar la construcción de obras hidráulicas recomendadas por el estudio de Civiles Ltda (alcantarillas, cunetas y estructuras de entrega),	El sistema hidrográfico natural está drenado localmente por las quebradas Santo Domingo (rosales) y La Crbonera; en la parte alta existen varios pequeños afluentes o drenajes naturales del sector algunos de los cuales no tienen continuidad, pues dada su naturaleza geológica se favorece la infiltración y posterior aforamiento a cotas inferiores. De otra parte en la zona es evidente la permanente recarga de agua en la zona, tanto superficial como subsuperficial, desde la parte alta , como resultado del vertimiento incontrolado de aguas negras y de perdidas en las mangueras del acueducto local.
CT-3268	ESPINO I SECTOR	Espino I Sector limita al norte con los barrios Mirador de la Estancia y Cerros del Diamante, al oriente con el barrio Espino II sector, al sur con el barrio Santo Domingo y al occidente con los barrios de Soacha Luis Carlos Galán y Minuto de Dios.	07/12/00	0,6	Cartografía del DAPD escala 1:1000. Informe descriptivo de la zona basado en el estudio elaborado bajo contrato de consultoría No. 1314-107-97 por la firma INGEOCIM denominado "Zonificación de Riesgos por Inestabilidad del Terreno para diferentes sectores del D. C" y en observaciones de los profesionales del área de riesgos de la DPAE.	Se recomienda destinar el sector como zona de protección o control ambiental y no permitir contrucciones en el mismo. Proceder de manera urgente con la contratación de los diseños de obras de estabilización a fin de acometer la pronta ejecución de las mismas.	El sistema hidrográfico natural está drenado localmente por las quebradas Santo Domingo (rosales) y regionalmente por la cuenca del Río Tunjuelo. En general no existen redes de recolección de aguas y la red de suministro de agua potable es deficiente. La inexistencia de alcantarillado pluvial permite que las diversas aguas se unan y corran libremente ocasionando problemas sanitarios, ambientales y creando problemas de inestabilidad
CT-3280	SAN RAFAEL DEL ALTO DE LA ESTANCIA	San Rafael limita al norte con el Barrio Mirador de la Estancia, al occidente con el barrio Rincón del Diamante y al sur con la Quebrada Santa Rita.	10/01/99		Cartografía del DAPD escala 1:500. Informe descriptivo de la zona basado en el estudio elaborado por la firma INGEOCIM denominado "Zonificación de Riesgos por Inestabilidad del Terreno para diferentes sectores del D. C", los estudios "Zonificación Geotécnica del Barrio San Rafael, Localidad de Ciudad Bolivar" realizado por la firma Nativa Ltda. y en observaciones de los profesionales del área de riesgos de la DPAE.	Se recomienda destinar el sector como zona de protección o control ambiental y no permitir contrucciones en el mismo. Adelantar obras de conducción y protección de la ribera de la Quebrada Santa Rita. Ejecutar obras de infraestructura como implementación de redes de acueducto y alcantarillado.	El sistema hidrográfico natural está enmarcado de la cuenca del Río Tunjuelo y localmente la quebrada Santa Rita. La distribución anual de las lluvias es bimodal con una precipitación media multianual de 600 mm y la precipitación crítica varía entre 210 y 220 mm con un periodo de retorno de 10 a 15 años.

Tabla 6.13 (Continuación) Cronología de informes técnicos del FOPAE en el periodo 1999-2002 relacionados con la posible ocurrencia de lluvias.

suficiente longitud de registro así que la incertidumbre de un evento extremo es mucho mayor.

Sin embargo y en procura de utilizar la información horaria de la estación Sierra Morena, se trataron de establecer fechas claves en la ocurrencia de movimientos en masa del sector para correlacionarlos así con las lluvias.

Para tal efecto se calcularon las lluvias máximas mensuales a nivel horario y diario en la estación Sierra Morena por cada año de registro (considerando en año hidrológico como el comprendido entre los meses de enero y diciembre. Como resultado de los análisis se establecieron como fechas de posible ocurrencia de movimientos las siguientes:

- Agosto 16 de 2001: por haberse observado apertura de diaclasas en el macizo entre el 14 y 16 de agosto, reportándose en el diagnóstico DI-1221de la DPAE.
- Septiembre 13 de 2001 por presentar el máximo valor de precipitación horaria y diaria de todos los registros.
- Abril 9 de 2002: por ser el mes más lluvioso de todos los registros hasta ahora obtenidos y el día 9 por ser el de mayor número de horas consecutivas de lluvia en ese mes.

En la **Figura 6.13** se superponen los valores de 0 a 2 meses de lluvia antecedente acumulada a las fechas citadas sobre las curvas de valores máximos y promedios históricos de la estación. A su vez se detallan las primeras 24 horas de dicha superposición.

Nótese que ninguna de las curvas supera los máximos de la estación, lo cual indica que estas fechas no corresponden a un evento extremo de lluvia acumulada. Con relación a la fecha de agosto 16 de 2001, se descarta cualquier relación de la lluvia con la apertura de diaclasas; para la curva de septiembre 13 de 2001 se observa que el valor máximo horario corresponde a un aguacero de elevada intensidad pero que en términos de lluvia acumulada no alcanza los máximos de la estación; y finalmente con relación al 9 de abril de 2002 se observa que este evento marca máximos para la estación entre las 18 y 24 horas precedentes a su inicio pero no marca un valor por encima del máximo de la estación.

Se concluye del anterior análisis que la estación Sierra Morena no cuenta con un periodo adecuado para el análisis y que este requeriría conocer sin incertidumbre alguna las fechas de ocurrencia de movimientos en masa. Así mismo, dada la carencia de registros históricos de precipitación podría realizarse una aproximación con los datos de la estación Casablanca, la cual presentó la mejor correlación entre registros de lluvia con Sierra Morena, siempre y cuando se tuviera un dato exacto de la fecha en que ocurrió el movimiento inicial (1999?, 2000?, 2001?) y a su vez se hayan registrado las precipitaciones de por lo menos un mes antecedente al evento incluido el día de ocurrencia.

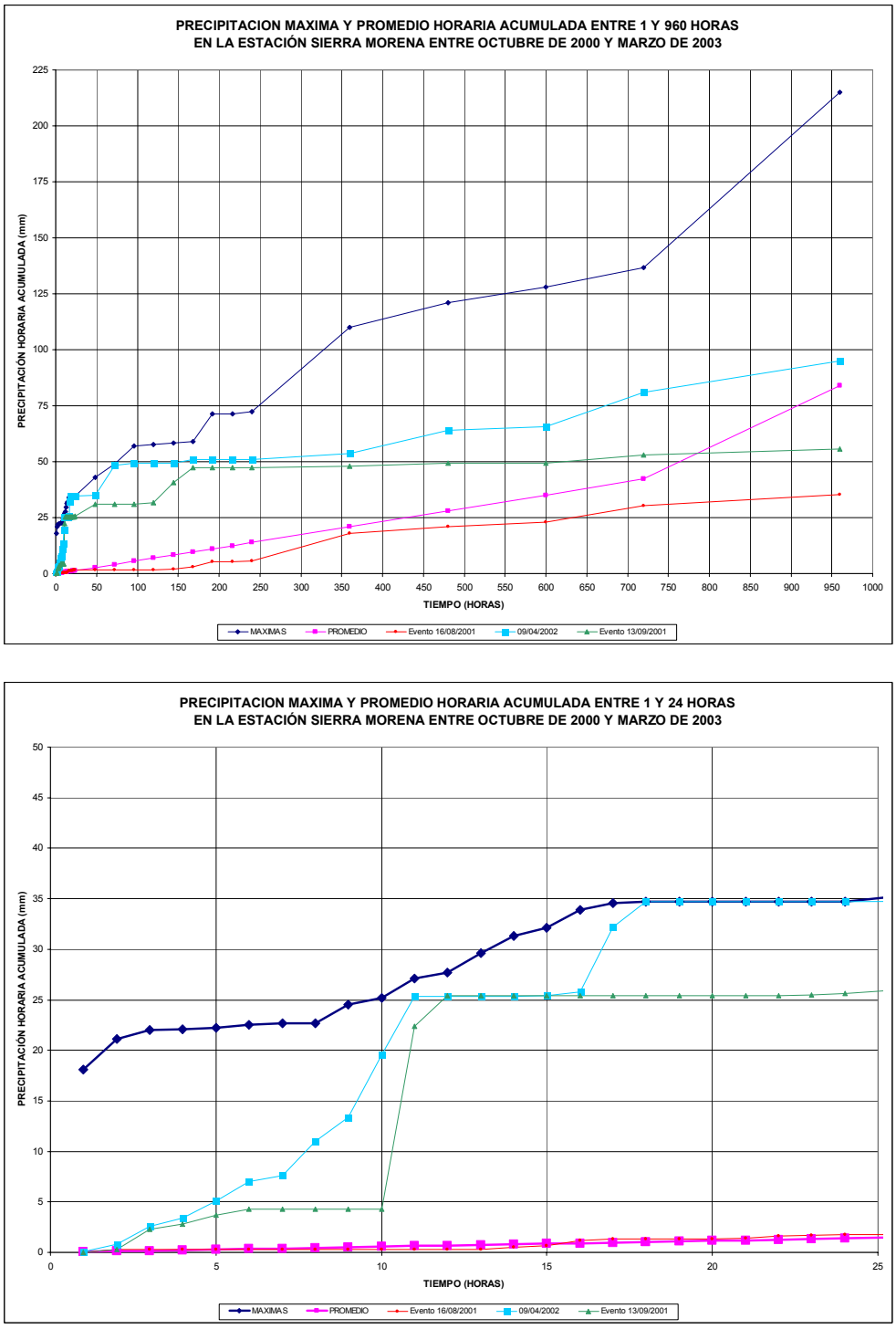


Figura 6.13 Análisis de precipitación acumulada para algunas fechas de posibles movimientos en masa.

Es importante hacia el futuro, continuar con el registro continuo de la precipitación en el área y si es posible, instalar un pluviógrafo para poder determinar realmente cual es la intensidad de los aguaceros en el sector. Este proceso requiere de por lo menos 10 años de registros de precipitación, y para el análisis de los aguaceros, se puede trabajar con registros pluviográficos de por lo menos 5 años para algunos análisis especiales.

6.5.5 Lluvias máximas diarias y horarias en la cronología de eventos.

Otra forma de descartar el efecto directo de la precipitación en la ocurrencia de los eventos es emplear la información cronológica contenida en **Tabla 6.13** además de algunas fechas producto del análisis de documentos suministrados por la DPAE.

Para tal efecto se generaron los gráficos anuales de lluvia diaria y en eje secundario las máximas en 1 hora y 3 horas por cada uno de los días del año. Esta figura permite relacionar la lluvia diaria con la máxima horaria y a su vez el efecto de la lluvia acumulada de 3 horas la cual resulta ser la más frecuente en los registros.

Las **Figuras 6.14 a 6.17** muestran lo descrito. Para un observador cualquiera es fácil determinar los datos requeridos en una fecha de interés entre octubre 18 de 2000 y marzo de 2003. A manera de ejemplo se muestran algunas fechas de interés extraídas de documentos suministrados por la DPAE además de las indicadas en la **Tabla 6.13**. En orden cronológico a manera de ejemplo se citan las siguientes:

- Noviembre 30 de 1999 (Informe CT-3456. No existen registros de precipitación en Sierra Morena)
- Marzo 22 de 2001 (Primer reporte de agrietamientos del año Radicado Personería de Santa Fe de Bogotá 23 de Marzo de 2001 y FOPAE 1-01759 de Marzo 14 de 2002)
- Agosto 16 de 2001 (Informe DI-1221. Primer informe del movimiento reciente)
- Septiembre 15 de 2001 (Informe DI-1242)
- Marzo 8 al 15 de 2002 (Informe DI-1380)
- Marzo 18 al 23 de 2002 (Informes DI- 1382 y DI-1383)
- Marzo 25 a Abril 1 de 2002 (Informe DI-1386)
- Abril 8 al 12de 2002 (Informe DI-1395)
- Abril 15 de 2002 (Informe DI-1598 y DI-1599)
- Abril 30 de 2002 (Informe DI-1431 y CT- 3735)
- Agosto 26 de 2002 (Oficio Emergencia Despachado DPAE 28 de agosto de 2002 No. 2/4889 donde se cita que el 21/ago/02 se produjo el vertimiento de un volumen considerable de agua por rotura de tubería.)
- Septiembre 18 de 2002 (Oficio EAAB – Taponamiento red de acueducto en el barrio Cerro El Diamante. Radicado FOPAE 1-08535 de fecha 25 de septiembre de 2002).

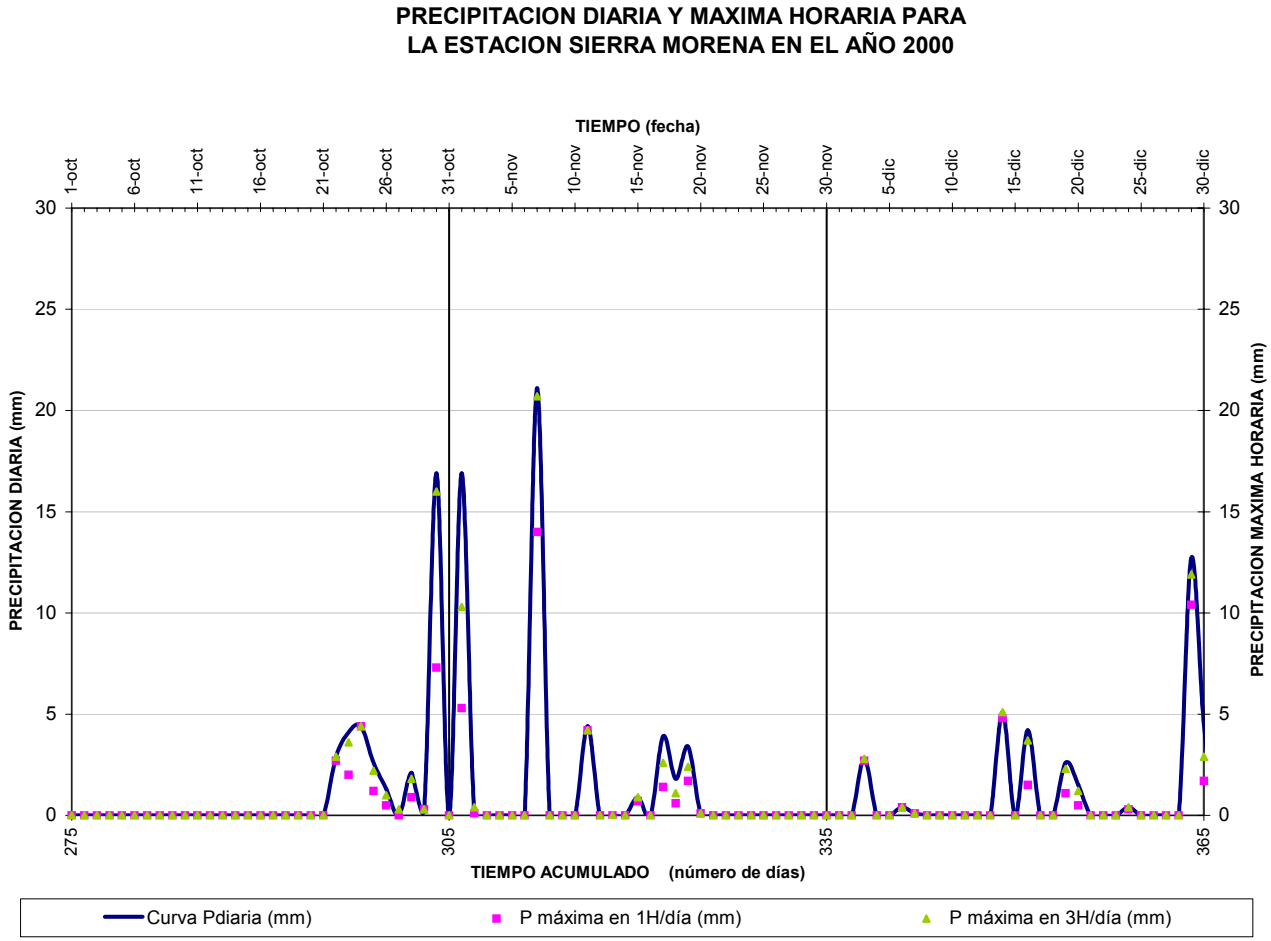


Figura 6.14 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2000.

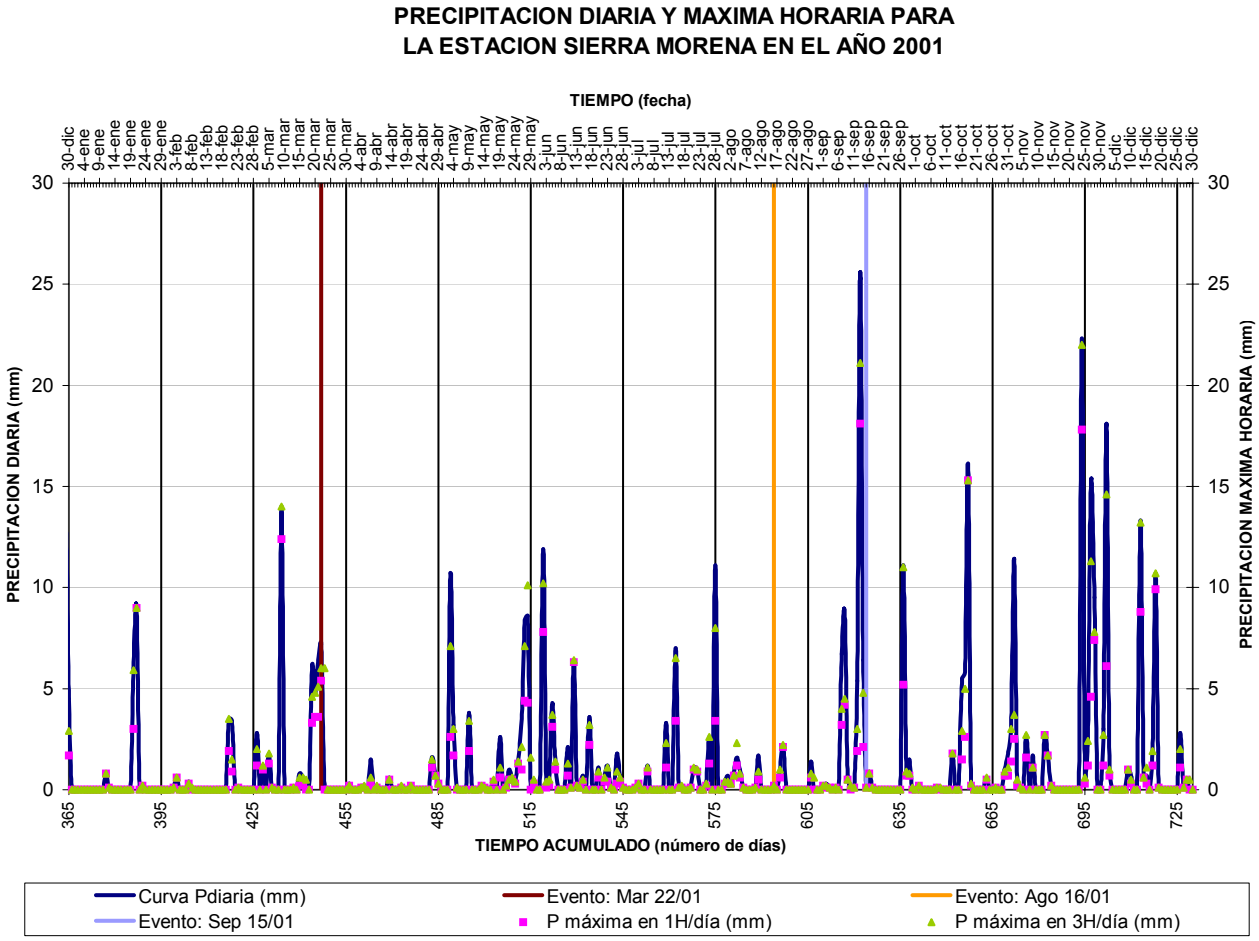


Figura 6.15 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2001.

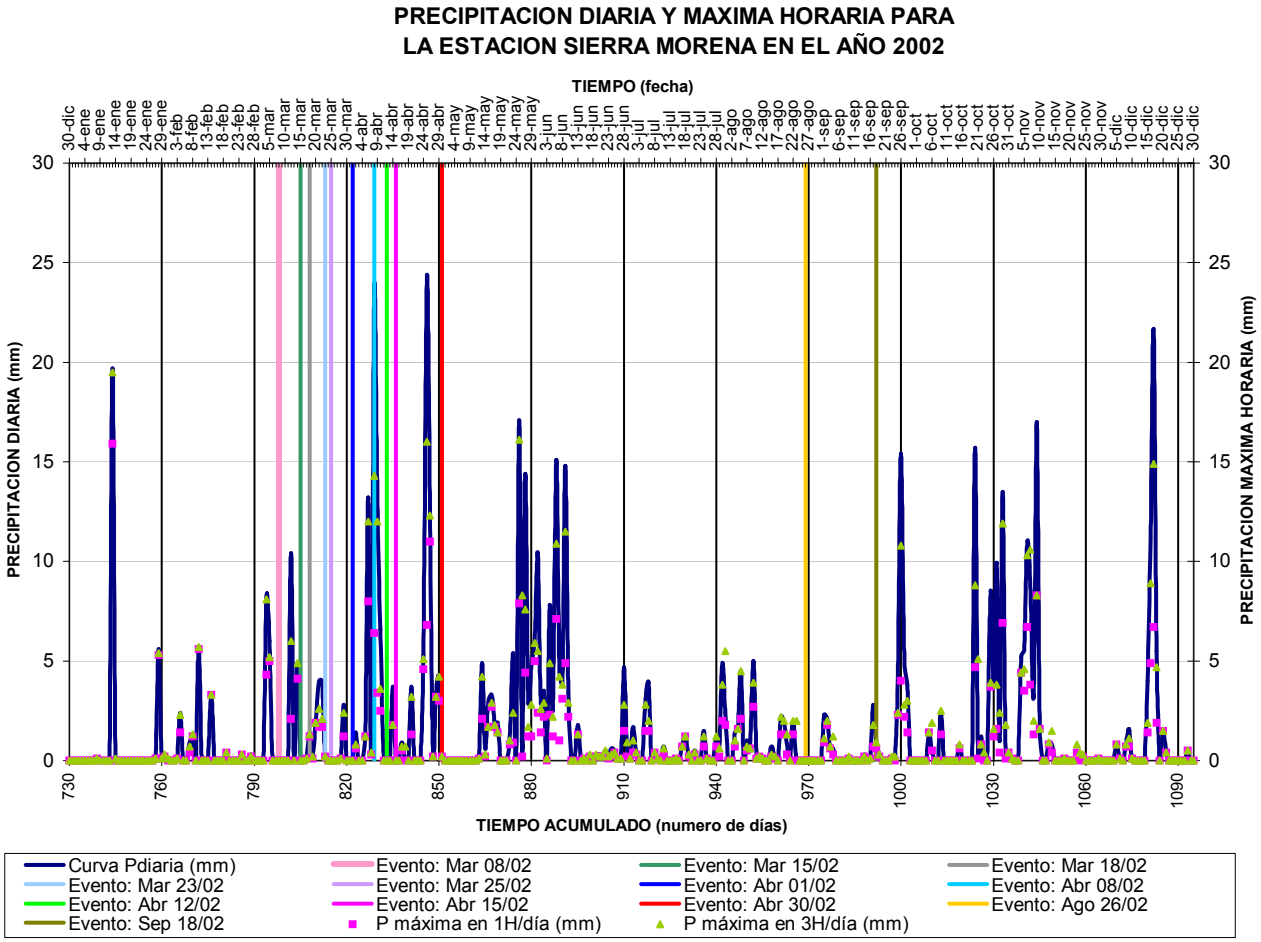


Figura 6.16 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2002.

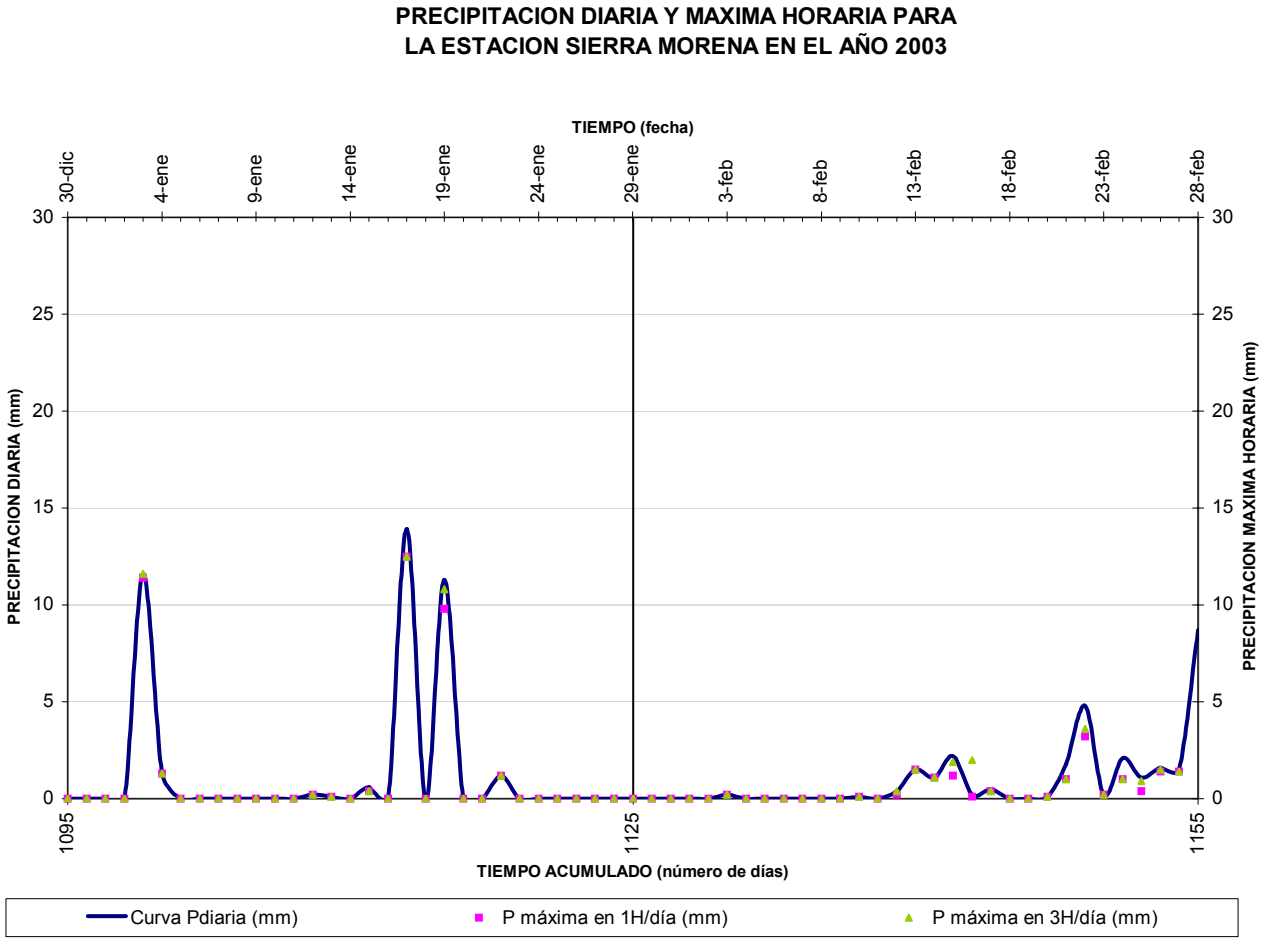


Figura 6.17 Precipitación diaria y máxima horaria para la estación Sierra Morena en el año 2003.

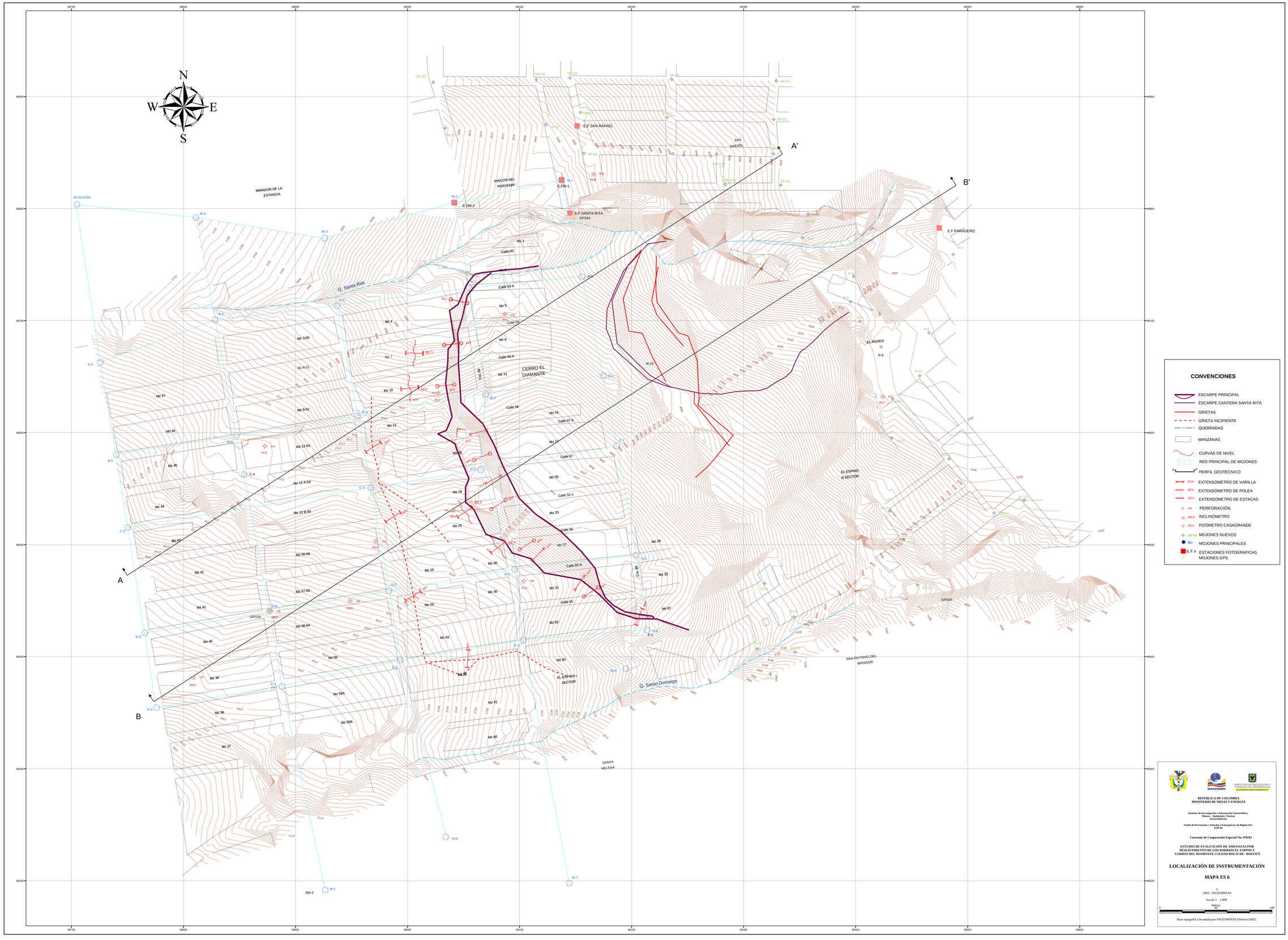


Figura 5.1 Localización de instrumentación

Límite aproximado de la zona de influencia.
Se recomienda continuar con el monitoreo de la instrumentación instalada con el fin de establecer futuras zonas de influencia.

Límite aproximado de la zona de amenaza en condiciones secas.
Se requiere información cartográfica adicional y modelar los posibles flujos para definir áreas adicionales involucradas.

Límite aproximado por caída de bloques.

ZONA 1A
ZONA 1B
ZONA 1C
ZONA 2
ZONA 3
ZONA 4
ZONA 5
ZONA 6
ZONA 7
ZONA 8A
ZONA 8B
ZONA 8C
ZONA 9
ZONA 10A
ZONA 10B
ZONA 11

(Cantera Santa Rita)
(Paradero de Buses)
(Deslizamiento de la Carbonera)

CERRO EL DIAMANTE
MIRADOR DE LA ESTANCIA
RINCON DEL PORVENIR
SAN RAFAEL
EL RODEO
EL ESPINO III SECTOR
EL ESPINO I SECTOR
SAN ANTONIO DEL MIRADOR
SANTA HELENA

Q. Santa Rita
Q. Santo Domingo
Cra 8A
Cra 8B

Calle 60, Mz 1, Mz 2, Calle 59 A, Mz 5, Calle 59, Mz 6, Calle 58 A, Mz 7, Mz 8, Mz 11, Calle 58, Mz 10, Mz 13, Mz 16, Calle 57 A, Mz 17, Calle 57, Mz 20, Calle 56 A, Mz 23, Calle 56, Mz 27, Calle 55 A, Mz 26, Mz 28, Mz 32, Mz 25, Mz 22, Mz 19, Mz 30, Mz 31, Calle 55, Mz 29, Mz 52, Mz 63, Mz 62, Mz 83, Mz 61, Mz 60, Mz 59, Mz 59A, Mz 59B, Mz 58, Mz 37, Mz 39, Mz 40, Mz 41, Mz 42, Mz 43, Mz 44, Mz 45, Mz 46, Mz 47, Mz 3-50, Mz 6-51, Mz 9-52, Mz 12-53, Mz 12 A-54, Mz 12 B-55, Mz 56-66, Mz 57-65, Mz 58-64

LEYENDA
ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

ZONA			CARACTERÍSTICAS DE LA AMENAZA SEGÚN LA GÉNESIS DEL MOVIMIENTO EN MASA
1A	DESLIZAMIENTO DEL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE	Suelo y Roca desplazados.	Corresponde al movimiento principal de la zona de estudio, es de carácter traslacional retrogresivo e involucra aproximadamente 1.750.000 m3 de arenizcas muy fracturadas con intercalaciones de arcillolitas, y algunos suelos residuales que a la vez incorporan. Presenta una longitud de aproximada de 300 m de longitud, ancho promedio de la masa movida de aproximadamente 20 a 30 m en el sector sur del barrio San Rafael (Mz 1A). Se han presentado levantamientos del orden de 7 a 8 m en el sector sur del barrio San Rafael y en los alrededores de la quebrada Santa Rita (Zona 1B). En el sector del Rodeo, al costado occidental del paradero de buses se presentan levantamientos del terreno de aproximadamente 2m.
1B		Levantamiento de suelo y roca.	El movimiento ha registrado velocidades entre 2 y 14 cm/día para el periodo mayo 2002 – marzo 2003, reportando las mayores velocidades arriba del escarpe de la Cantera Santa Rita, y los menores en la parte sur del escarpe principal. La dirección del movimiento varía entre 30 y 40° NE.
1C		Roca fracturada desplazada.	Este deslizamiento afectó 12 manzanas de los barrios Cerro El Diamante y El Espino Sector I, así como el sector sur del barrio San Rafael y El Rodeo. Por las características del movimiento, este representa una amenaza muy alta para cualquier construcción ubicada dentro del fenómeno.
2	BLOQUE DESPLAZADO DETRÁS DEL ESCARPE PRINCIPAL		Movimiento de carácter traslacional que involucra arenizcas fracturadas con intercalaciones de arcillolitas, producto de la reptación del deslizamiento principal y de la intervención antrópica. La grieta del bloque fallado se encuentra aproximadamente 100m ladera arriba del escarpe principal y ha registrado desplazamientos desde 4 hasta 32 cm en el periodo de julio de 2002 a marzo de 2003, con tasas de movimiento entre 0.02 a 0.14 cm/día. La dirección del movimiento está entre 30 y 40° NE. Este movimiento afectó las viviendas, así como la infraestructura vial y redes de acueducto y aguas servidas. Por las características del movimiento, este representa una amenaza muy alta para cualquier construcción ubicada dentro del fenómeno.
3	DESLIZAMIENTO QUEBRADA SANTO DOMINGO		Este movimiento se encuentra en el costado sur del deslizamiento del Espino. El desplazamiento va en dirección occidente-oriente sobre la vertiente de la quebrada Santo Domingo. Este deslizamiento ejerce presión sobre el flujo de detritos antiguo y ahora activado. Presentó una tasa de movimiento de 11 mm/día para el periodo Abril 2002 – Marzo 2003. Representa una amenaza muy alta para cualquier construcción ubicada dentro de la zona.
4	FLUJO DE DETRITOS QUEBRADA SANTO DOMINGO		Ocurren típicamente al sur/central del área de estudio, sobre la margen izquierda de la quebrada Santo Domingo. Se diferencian dos tipos de flujos: Flujo antiguo reactivado posiblemente como consecuencia del empuje de los materiales del deslizamiento de la zona 3 y de otros fenómenos ubicados en la margen derecha de la quebrada Santa Domingo – Deslizamiento de La Carbonera. Su extensión, no supera los 200 metros de largo y 100 metros de ancho y en su parte media e inferior el espesor del material no sobrepasa los 8 m. Presentó una tasa de movimiento de 0.4 mm/día para el período Diciembre 2002 – Marzo 2003. Flujo activo de pequeñas dimensiones: 100 m de longitud, y aproximadamente 3 m de espesor. Se ubica al nororiente del anterior. Su forma es estrecha y alargada. Presentó una tasa de desplazamiento de 0.1 mm/día para el período Diciembre 2002 – Marzo 2003. Su desplazamiento está ejerciendo presión sobre algunas viviendas que ya han sido demolidas, y representa una amenaza muy alta para las demás casas de los alrededores. Estos flujos representan una amenaza muy alta para cualquier construcción en la zona.
5	CAÍDA DE ROCAS DEL ESPINO SECTOR III		Corre que presenta cadas de bloques de roca provenientes del material fracturado que esta cornisa) y empuje del deslizamiento de La Carbonera y del flujo de detritos antiga de esta zona. Representa una amenaza muy alta para cualquier construcción ubicada dentro de esta zona.
6	ESCARPE Y DEPÓSITOS DE TALUS		En esta zona se desarrollan taludes o depósitos de talud a partir del desprendimiento por gravedad de rocas, cuyos materiales se depositan en el cambio de pendiente. Estos materiales representan gran amenaza por su ubicación debajo de zonas escarpadas además de ser muy inestables ya que han empezado a sufrir el efecto de la presión y empuje de los materiales del deslizamiento de El Espino por lo cual se están deformando.
7	PARTE ALTA QUEBRADA SANTO DOMINGO		Comprende la zona desde los escarpes de roca arriba en la quebrada Santo Domingo hasta la zona del flujo antiguo depositado en la margen izquierda de la quebrada. En la actualidad no se tienen mayores problemas por movimientos en masa sin embargo la estabilidad de las laderas vecinas -Espino y Carbonera- pueden llegar a afectar su estabilidad.
8A	LADERA ARRIBA DESLIZAMIENTO EL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE -ESCENARIO DE AMENAZA POR SISMO	Efecto sísmico de 0.15g de aceleración horizontal	Esta zona puede inestabilizarse presentando un movimiento de carácter traslacional. De no tomarse medidas que establezcan el movimiento principal cualquier construcción ubicada dentro de la zona puede verse gravemente afectada.
8B		Efecto sísmico de 0.15g de aceleración horizontal	Esta zona junto con la zona 8A puede inestabilizarse presentando un movimiento de carácter traslacional. De no tomarse medidas que establezcan el movimiento principal cualquier construcción ubicada dentro de la zona puede verse gravemente afectada.
8C		Efecto sísmico de 0.24g de aceleración horizontal	Esta zona junto con las zonas 8A y 8B puede inestabilizarse presentando un movimiento de carácter traslacional. De no tomarse medidas que establezcan el movimiento principal cualquier construcción ubicada dentro de la zona puede verse gravemente afectada.
	LADERA ARRIBA DESLIZAMIENTO EL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE ESCENARIO DE AMENAZA POR INTERVENCIÓN ANTRÓPICA		Esta zona puede inestabilizarse presentando un movimiento de carácter traslacional considerando una intervención antrópica que provoque la infiltración de aguas y alteración de las propiedades de los materiales del subsuelo. De no tomarse medidas que establezcan el movimiento principal cualquier construcción ubicada dentro de la zona puede verse gravemente afectada.
10A	LADERA ABAJO DESLIZAMIENTO EL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE ESCENARIO DE AMENAZA POR AVANCE DEL MOVIMIENTO		Zona de avance del movimiento de la zona 1C. Este movimiento podría afectar en gran parte a la zona destinada al parqueadero de los buses del sector. De no tomarse medidas que establezcan el movimiento principal cualquier construcción ubicada dentro de la zona puede verse gravemente afectada.
10B			Zona de avance del movimiento de la zona 1A. Este movimiento podría afectar el cauce de la quebrada Santa Rita pudiendo represarla. De no tomarse medidas que establezcan el movimiento principal cualquier construcción ubicada dentro de la zona puede verse gravemente afectada.
11	INFLUENCIA EN SAN RAFAEL		Este sector se puede ver afectado por caídas de rocas, y agrietamiento del terreno debido al empuje del deslizamiento del Espino y Cerro del Diamante, por lo que la zona se encuentra en amenaza alta. Esta zona puede ampliarse si el monitoreo de la instrumentación instalada registra movimientos de consideración

CONVENCIONES

- ESCARPE PRINCIPAL
- ESCARPE CANTERA SANTA RITA
- GRIETAS
- GRIETA INCIPIENTE
- QUEBRADAS
- MANZANAS
- CURVAS DE NIVEL

Notas:

La Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa se realizó teniendo en cuenta los movimientos que afectan la ladera, su génesis, estado y actividad, tipo de material involucrado, así como su afectación a la comunidad siguiéndose un método determinístico.

La finalidad del Mapa de Amenaza es proveer una herramienta para el ordenamiento territorial del sector, dirigido a establecer medidas preventivas y de control, así como restricciones de uso.

La Amenaza por Movimiento en Masa posee una característica de temporalidad y requiere un seguimiento para su actualización y utilización en futuras decisiones.

REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear
INGEOMINAS

Fondo de Prevención y Atención a Emergencias de Bogotá D.C.
FOPAE

Convenio de Cooperación Especial No. 076/02

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS POR DESLIZAMIENTO DE LOS BARRIOS EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE, CIUDAD BOLÍVAR - BOGOTÁ

MAPA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

MAPA ES 9

©
2003 - INGEOMINAS

Escala 1: 1.000

0 50 100 Metros

Base topográfica levantada por Ingeominas (Febrero/2003)

LEYENDA

	SECTOR	CONDICIÓN DE ESTABILIDAD	MEDIDAS DE MITIGACIÓN	
			INMEDIATAS	MEDIANO Y LARGO PLAZO
I	ZONA MUY INESTABLE MOVIMIENTO ACTIVO	Zonas muy inestables en las que el terreno presenta movimientos considerables continuos o discontinuos en el tiempo. Se estima que en el futuro continúen estos movimientos tal y como se han venido presentando y aun se agraven en caso de eventos detonantes extraordinarios como lluvias o sismos fuertes.	Realizar un levantamiento detallado de instalaciones hidráulicas y sanitarias para identificar escapes, rectificarlos o sellarlos. Impermeabilizar las superficies a la intemperie para evitar infiltraciones y complementar con red de zanjas o cunetas impermeables y flexibles. Reconformar los cauces de las quebradas. Es recomendable suspender toda actividad humana para proteger la vida y bienes de dichas personas. Inspeccionar los antiguos túneles de minería y determinar su posible uso, como galerías de drenaje. Mantener el monitoreo de la instrumentación instalada. No se recomienda ninguna intervención que involucre movimientos de tierras hasta no garantizar la estabilidad de los sectores II y III, a menos de que se trate de una reconformación superficial para el manejo de aguas.	Reconformación del terreno mediante terraceo. Debe complementarse con obras de drenaje superficial profundo y revegetalización. Eventualmente ésta alternativa requerirá de un muro de contención o la construcción de un contrapeso a lo largo de la pata del deslizamiento, empleando para ello el mismo material del derrumbe. Esta solución debe ser diseñada con detalle teniendo en cuenta que uno de los flancos de la presa puede presentar desplazamiento (Barrio San Rafael, Inclinómetro 6). De acuerdo con los resultados de la inspección de los antiguos túneles de minería, estos pueden ser empleados como galería de drenaje para ayudar a estabilizar la ladera
II	ZONA INESTABLE	Zona inestable en la que se han medido movimientos incipientes del terreno. Son áreas de influencia directa de los movimientos del sector 1, las cuales se caracterizan por: - Los movimientos son evidentes aunque de menor magnitud que los del sector I. - El terreno presenta agrietamientos y deformaciones. - Terrenos cuya estabilidad está en función directa de la estabilidad del sector I En vista que el sector I puede aumentar rápidamente, la estabilidad en este sector puede disminuir drásticamente	Sellar todas las grietas con materiales arcillosos. Realizar un levantamiento detallado de instalaciones hidráulicas y sanitarias par identificar escapes, rectificarlos o sellarlos. Impermeabilizar las superficies a la intemperie para evitar infiltraciones. Complementar con red de zanjas o cunetas impermeables y flexibles. Reconformar los cauces de las quebradas. Es recomendable suspender toda actividad humana para proteger la vida y bienes de dichas personas. Inspeccionar los antiguos túneles de minería y determinar su posible uso como galerías de drenaje. Mantener el monitoreo de la instrumentación instalada.	Reconformación del terreno mediante terraceo. Debe complementarse con obras de drenaje superficial profundo y revegetalización. Eventualmente ésta alternativa requerirá de un muro de contención o la construcción de un contrapeso a lo largo de la pata del deslizamiento, empleando para ello el mismo material del derrumbe. Esta solución debe ser diseñada con detalle teniendo en cuenta que uno de los flancos de la presa puede presentar desplazamiento (Barrio San Rafael, Inclinómetro 6). De acuerdo con los resultados de la inspección de los antiguos túneles de minería, estos pueden ser empleados como galería de drenaje para ayudar a estabilizar la ladera.
III	ZONA DE ESTABILIDAD MARGINAL	Zonas cuya estabilidad está condicionada a la dinámica de los sectores I y II, y a la ocurrencia de eventos extremos o la implementación de las medidas de mitigación propuestas. Sobre estas zonas no hay evidencia de inestabilidad, pero dado el avance retrogresivo del movimiento, podrían fallar siguiendo un patrón semejante al de los sectores I y II, especialmente en casos de eventos extremos como lluvias o sismos fuertes.	Sellar todas las grietas con materiales arcillosos. Reconformar los cauces de las quebradas. Es recomendable suspender toda actividad humana para proteger la vida y bienes de dichas personas. Inspeccionar los antiguos túneles de minería y determinar su posible uso como galerías de drenaje. Mantener el monitoreo de la instrumentación instalada.	Estabilización mediante la utilización de pilotes empotrados en la roca. El número, distribución, longitud y demás detalles del sistema de refuerzo deberá diseñarse para la condición más crítica de agua y sismo. De acuerdo con los resultados de la inspección de los antiguos túneles de minería, estos pueden ser empleados como galería de drenaje para ayudar a estabilizar la ladera.
IV	ZONA ESTABLE CON POTENCIAL DE DAÑO INDIRECTO	Zonas que corresponden a terrenos estables pero que pueden ser muy afectadas por el material proveniente de sectores inestables. En el corto plazo serán los sectores mas afectados, aun con movimientos moderados.	Es recomendable suspender toda actividad humana para proteger la vida y bienes de dichas personas.	

CONVENCIONES

- ESCARPE PRINCIPAL
- ESCARPE CANTERA SANTA RITA
- GRIETAS
- GRIETA INCIPIENTE
- QUEBRADAS
- MANZANAS
- CURVAS DE NIVEL
- EJE DE PILOTES EMPOTRADOS PROPUESTOS (ZONA III)
- TRAMO PARA LA RECONFORMACIÓN DE CAUCE
- LINEAMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN PROPUESTA

Nota:

La localización de las obras es aproximada y está sujeta a modificaciones producto de los estudios geotécnicos y diseños detallados que se requieren para su viabilidad.

La efectividad de las obras y medidas propuestas para el control y mitigación del movimiento dependen en gran medida a la mitigación y estabilización de los movimientos de las laderas aledañas.

REPÚBLICA DE COLOMBIA
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Instituto de Investigación y Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear
INGEOMINAS

Fondo de Prevención y Atención a Emergencias de Bogotá D.C.
FOPAE

Convenio de Cooperación Especial No. 076/02

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS POR DESLIZAMIENTO DE LOS BARRIOS EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE, CIUDAD BOLIVAR - BOGOTÁ

MAPA DE OBRAS Y MEDIDAS DE CONTROL Y MITIGACIÓN

MAPA ES 10

©
2003 - INGEOMINAS

Escala 1: 1.000

Metros 0 50 100

Base topográfica levantada por Ingeominas (Febrero/2003)

Convenio 076/2002

DIRECCION DE PREVENCION Y ATENCION DE EMERGENCIAS
ALCALDIA MAYOR SANTA FE DE BOGOTA D.C.

ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS POR DESLIZAMIENTO DE LOS BARRIOS EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE, CIUDAD BOLIVAR - BOGOTA



INFORME EJECUTIVO

Bogotá D. C., Agosto de 2003

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INFORMACIÓN GEOCIENTÍFICA,
MINERO - AMBIENTAL Y NUCLEAR - INGEOMINAS

SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOAMBIENTALES

ADOLFO ALARCÓN GUZMÁN
Director General INGEOMINAS

FERNANDO RAMÍREZ CORTÉS
Director General DPAE

DIANA MARCELA RUBIANO VARGAS
Subdirector Amenazas Geoambientales – INGEOMINAS

GRUPO DE TRABAJO

MAURICIO ALBERTO TAPIAS CAMACHO
Jefe de Proyecto
Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa - INGEOMINAS

Grupo Geotecnia
JESÚS GARCÍA
MAURICIO TAPIAS
FABIAN ULLOA
CARLOS PALACIOS
CARLOS MENDOZA
FERNANDO DÍAZ

Geología
DIEGO IBAÑEZ
EDUARDO CASTRO

Geomorfología y Amenaza Regional
EDUARDO CASTRO

Topografía y Perforaciones
JAIR RAMÍREZ
NAZARIO CARRILLO
JORGE PEÑA
PABLO MORA
JUAN MESA
FRANCISCO TORRES

Instrumentación y Monitoreo
FABIAN ULLOA

Grupo Hidrología e Hidráulica
GERMÁN BARRETO
DEYANIRA RUÍZ

Laboratorio de Suelos
GUILLERMO ÁVILA
MANUEL CAVIEDEZ
GRUPO DE ENSAYOS

Sistemas y SIG
EDGAR CARRILLO

Evaluación de Amenaza por Movimientos en Masa

JESÚS GARCIA
Coordinador Modelación Numérica y Análisis de Estabilidad

MAURICIO TAPIAS
Coordinador de Zonificación

Digitalización y Cartografía
MERCEDES PACHECO
DEYANIRA RUÍZ

Edición Final
ANA ISABEL ALVARADO
GRUPO MOVIMIENTOS EN MASA

Digitalización
INSAT LTDA

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 LOCALIZACIÓN 1

1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO 1

1.3 OBJETIVOS 1

2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA 3

2.1 GEOLOGÍA 3

2.2 GEOMORFOLOGÍA 3

3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO 4

4 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO Y ENSAYOS DE LABORATORIO 5

5 INSTRUMENTACION Y MONITOREO 6

6 AMENAZA POR MOVIMEINTOS EN MASA EN EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE 9

6.1 ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL MOVIMIENTO PRINCIPAL – DESLIZAMIENTO DEL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE 9

6.1.1 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE 10

6.1.2 METODO DE ELEMENTOS FINITOS 12

6.2 ZONIFICACION DE LA AMENAZA por movimientos en masa 12

7 RECOMENDACIONES Y OBRAS DE MITIGACION 13

9.2.2 RECOMENDACIONES A MEDIANO Y LARGO PLAZO 14

EVALUACIÓN DE AMENAZA POR DESLIZAMIENTO DE LOS BARRIOS EL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE
INFORME EJECUTIVO

1 INTRODUCCIÓN

El presente informe ejecutivo contiene los aspectos más relevantes del informe final del convenio 076/02 FOPAE – INGEOMINAS "Estudio de evaluación de amenaza por deslizamiento de los barrios El Espino y El Cerro el Diamante, localidad de Ciudad Bolívar – Bogotá

1.1 LOCALIZACIÓN

El sector de estudio se encuentra ubicado en la parte occidental del Barrio Ismael Perdomo, en la localidad de Ciudad Bolívar, al sur de Bogotá, y comprende sectores de los barrios Cerro del Diamante, El Espino Sector I y III, y El Rodeo (sur del barrio San Rafael). La zona está limitada por los barrios San Rafael (al Norte), San Antonio del Mirador (al sur), al occidente con los barrios Espino Sector I y el barrio Santo Domingo y al oriente con el barrio Espino III Sector. En los costados Norte y Sur se encuentran respectivamente las quebradas Santa Rita y Santo Domingo. La extensión total del área de estudio es de aproximadamente 41.4 Ha. (**Figura 1.1**).

1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La existencia de actividades mineras en el sector Nor-oriental del barrio El Espino (Cantera Santa Rita) en el pasado dio inicio a un fenómeno de inestabilidad en el terreno, el cual se ha venido agravando por el intenso proceso de urbanización no planificado, con graves deficiencias en las redes domiciliarias. Como resultado de esto es frecuente la ruptura de tuberías, cuyos aportes de agua a la ladera son uno de los principales factores de reactivación del movimiento, junto con las características geomecánicas del macizo rocoso, y otros factores de intervención antrópica que se analizarán en el numeral de evaluación de amenaza.

Como consecuencia del fenómeno, la DPAE ha reubicado del orden de 800 familias cuyas casas fueron destruidas o afectadas por el movimiento.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo del trabajo realizado por el INGEOMINAS fue realizar el estudio de evaluación de amenaza por deslizamiento para los barrios El Espino y El Cerro del Diamante, a partir de los resultados de la instalación y monitoreo de la instrumentación geotécnica.

A través de este estudio se definió el modelo de comportamiento geotécnico de la ladera y evaluó la amenaza por deslizamiento para las viviendas e infraestructura del sector.

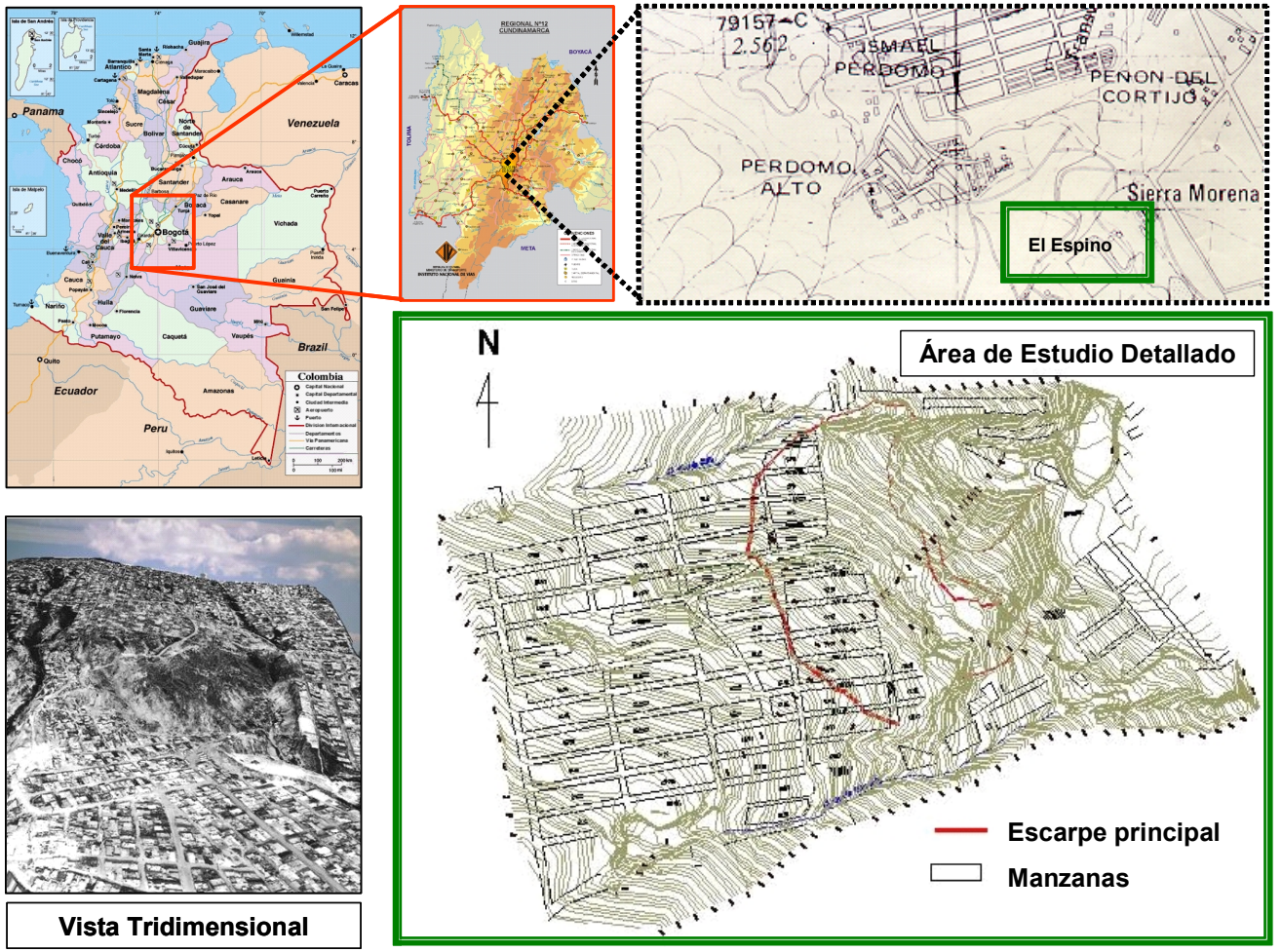


Figura 1.1. Localización de la zona de estudio – Barrios El Espino y Cerros del Diamante.

2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

2.1 UNIDADES GEOLÓGICAS SUPERFICIALES

La ladera donde se encuentran los barrios de El Espino y Cerro del Diamante está conformada principalmente por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Guaduas (Ktg), consistente en intercalaciones de arenisca y arcillolita, cuyo buzamiento coincide con la inclinación de la pendiente y están afectadas por fallamiento, lo que ha ocasionado fracturamiento, cizallamiento y cambios en la dirección de las capas.

Las fallas principales que atraviesan el sector, son inversas, de dirección N80ºE a E-W, controlan los cauces de las quebradas Santa Rita y Santo Domingo y delimitan el deslizamiento El Espino y Cerro del Diamante. También se presentan fallas de rumbo que generan cambios de pendiente bruscos en la parte media de la masa principal.

Las rocas que afloran en el área fueron subdivididas en tres unidades de acuerdo con el tipo de roca predominante y el grado de fracturamiento: Arenisca (Ktg1), Arcillolita intercalada con Arenisca (Ktg2) y Arenisca fracturada y desplazada (Qtga), incluyéndose esta última unidad dentro de los depósitos de ladera por corresponder a materiales en procesos de movimiento ladera abajo. Se presentan también suelos residuales en los sectores de pendiente suave alcanzando espesores que van desde 0.2 m hasta los 2.0 m, caracterizándose por su color marrón oscuro a gris oscuro, con textura areno arcillosa.

Se encontraron también depósitos de ladera clasificados así: Arenisca fracturada y desplazada de la formación Guaduas (Qga) – ubicados en el movimiento principal de inestabilidad en el Espino y Cerro del Diamante--, depósitos de talud o talus (Qft) – en el extremo nororiental del área sobre margen izquierda de la quebrada Santa Rita-, flujos de suelos (Qfs) – a lo largo de los valles de las quebradas Santo Domingo y Santa Rita-, flujos de detritos (Qfd) – margen izquierda de la quebrada Santo Domingo-, y suelo residual y roca desplazada (Qsd) - en el movimiento principal de inestabilidad en el Espino y Cerro del Diamante--.

Así mismo existen algunos depósitos de Botadero de Escombros (Qbe) ubicados en alguno sectores puntuales de las laderas del área, siendo los más representativos los que se encuentran en la parte alta de la cantera de Santa Rita, a lo largo de las vías, en las quebradas o en alrededores de las viviendas. También se encuentran en la parte plana sobre un depresión ubicada entre las estaciones de buses.

2.2 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología de la zona es producto de la combinación de procesos tectónicos relacionados con el levantamiento de la cordillera Oriental y la conjugación de fallas, conformando una vertiente montañosa moderadamente empinada limitada por una zona plana correspondiente a la sabana de Bogotá.

En el análisis de los aspectos geomorfológicos, se hace énfasis específicamente en la parte Morfodinámica, enfocada a la diferenciación de los diferentes cuerpos a los cuales se encuentran asociados movimientos de remoción en masa y a la determinación de los

factores que afectan la resistencia de los materiales, la intensidad de los procesos que actúan sobre ellos y los cambios que puede producir a corto plazo sobre la zona en estudio.

El movimiento principal del Espino y Cerro del Diamante se ha considerado como un deslizamiento traslacional de detritos con corona retrogresiva. A partir de este fenómeno se han originado gran cantidad de grietas de distensión que afectaron las viviendas de los barrios Cerros del Diamante y El Espino.

Las dimensiones del fenómeno hasta la fecha son de aproximadamente 350 metros tanto de largo como de ancho y el plano de falla se encuentra ubicado aproximadamente a los 20 metros de profundidad. Estas dimensiones generan aproximadamente un volumen de material desplazado al menos de 1.750.000 m3.

Asociados al deslizamiento principal se presentan deslizamientos superficiales de suelo y roca, flujos de suelo y de Detritos, talus o depósitos de talud y caídas de roca. Todos estos movimientos en masa están activos, y se desplazan actualmente a diferentes velocidades representando alta amenaza para toda la zona estudiada.

Otro fenómeno que ha venido afectando la zona corresponde al deslizamiento de La Carbonera, el cual continúa desplazándose y puede afectar áreas como El Espino III Sector, El Espino I Sector, e incidir en el mismo movimiento de El Espino y Cerro del Diamante.

3 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

El régimen de precipitación es bimodal con periodos de lluvia entre marzo — junio y septiembre — noviembre. La precipitación media mensual varían entre 10 y 85 mm y el total anual registrado por la Estación Sierra Morena, sobrepasa los 500 mm en promedio.

Los valores promedio anuales de evapotranspiración son: ETP = 653.1 mm y ETR = 489.8 mm. Los promedios mensuales varían entre 48.9 - 58.3 mm y 36.7 mm - 43.7 mm respectivamente.

La escorrentía promedio anual es de 82.53 mm teniendo en cuenta los valores promedios anuales de precipitación (587 mm - Estación Casablanca) y ETR (489.8 mm - Promedio estaciones del sector.

La capacidad de infiltración de equilibrio, fc, están entre 0.1 y 0.8 cm/min y la capacidad de infiltración inicial, fo entre 3.1 y 28.9 cm/min.

Se considera que los fenómenos de intercepción de escorrentía y percolación profunda propios de la infiltración de agua por **causas naturales** al escurrir sobre el suelo, pueden representar una reducción del total del caudal de escorrentía hasta en un 85%. Se dedujo entonces que el volumen de infiltración y percolación profunda de agua en el suelo puede ser del orden de un 15% de la diferencia entre la precipitación promedio y la evapotranspiración real promedio. El valor así estimado de infiltración en este sector puede estar alrededor de 14.56 mm al año. Por otra parte, para la parte inferior del movimiento, dada la presencia de grietas y en general el estado de remoción del material, podría considerarse que en el cuerpo del movimiento la infiltración correspondiera al 95% de dicha diferencia, o sea, 92.25 mm.

Según DPAE - INGEOCIM Ltda., la “Lluvia Crítica” posible se presentaría para periodos de recurrencia (Tr) entre 10 y 15 años y magnitud de precipitación acumulada (crítica) en el rango de 210 mm a 220 mm.

Es importante destacar que la lluvia diaria corresponde a la lluvia máxima acumulada de 3 horas y que en ocasiones la lluvia máxima horaria es equivalente a la diaria. La mayoría de los datos diarios no son superados por los máximos de 1 y 3 horas, por lo cual se establece la posible relación de una lluvia crítica para recurrencias entre 1 y 100 años con duraciones entre 1 y 24 horas donde la magnitud no superaría los 70 mm, teniendo en cuenta la incertidumbre de los datos obtenidos. Una lluvia crítica para recurrencias entre 1 y 5 años podría tener una duración no mayor de 12 horas y 30 mm de lluvia acumulada.

Eventos de recurrencias entre 10 y 15 años con magnitudes superiores a 120 mm corresponderían a lluvias acumuladas continuas de más de 10 días, lo cual con base en las consultas realizadas en el sector correspondería a algo excepcional.

Finalmente, es importante destacar que no se encontró ninguna relación directa entre desplazamientos del terreno y el régimen de lluvias.

4 EXPLORACIÓN DEL SUBSUELO Y ENSAYOS DE LABORATORIO

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento geomecánico del subsuelo, se llevó a cabo un programa de exploración del macizo rocoso consistente en 11 perforaciones con recuperación continua de muestras. Las perforaciones fluctuaron entre 20 y 40 m de profundidad y su ubicación puede observarse en la **Figura 5.1 –** Mapa ES6 del informe final.

En general el macizo rocoso esta conformado por areniscas cuarzosas fracturadas intercaladas con paquetes de arcillolitas de menor espesor hasta aproximadamente los 20 m de profundidad; de ahí hasta los 40 m (máxima profundidad de las perforaciones), se presenta un paquete grueso de arcillolita compacta y firme. Se realizaron ensayos de clasificación, (Humedad, límites, Peso unitario, peso específico de sólidos, carga puntual), de resistencia (Corte directo, triaxial CU, compresión inconfinada) y compresibilidad (Cosolidación) sobre muestras inalteradas para los materiales del macizo rocoso. Los resultados mostraron una tendencia uniforme en profundidad para muchos de los ensayos. Un perfil típico donde se establecen los rangos de espesor y las principales propiedades geotécnicas promedio de cada estrato se resume en la **Tabla 4.1**

ESTRATO	DESCRIPCIÓN	ESPESOR DEL ESTRATO m	PROF. CONTACTO SUPERIOR m	γt gr/cm^3	Is (50) Paral Kg/cm^2	Is (50) Perp Kg/cm^2	C'p Kg/cm^2	ϕ'p	C'r Kg/cm^2	ϕ'r	RSC	K cm/s
Suelo Residual	Suelo residual, areno-arcilloso, color gris amarillento, con restos de raices y materia orgánica.	0.5-1.6	-									
Arenisca	Arenisca cuarzosa color gris a parda de grano medio a fino, poco friable, de fracturada a muy fracturada	13-19	0-6.8	2.3	30.1	33.5						2.5E-03
Arenisca – Arcillolita	Arenisca cuarzosa color gris a parda de grano medio a fino, con intercalaciones de arcillolita color gris de consistencia media.	1.8-4.6	2.3-9.2	2.1			0.2	30	0	12.5	1.3-1.1	6.5E-08
Arcillolita	Arcillolita color gris algo oxidada, de consistencia firme. Hacia los 27 m de profundidad presenta un paquete de carbón de 0.2 a 0.7 m de espesor.	-	18.5-21.6	2.11			0.1	45	0	25	1	8.5E-08

Tabla 4.1 Perfil típico de los materiales de El Espino y El Cerro el Diamante.

5 INSTRUMENTACION Y MONITOREO

Con el objetivo de tener órdenes de magnitud de los desplazamientos del terreno en superficie y profundidad, elevación del nivel freático y abertura de grietas se instaló la siguiente instrumentación **(Tabla 5.1):**

Tipo de Instrumento o elemento de control	Cantidad	Profundidad	Objetivo
Mojones	72	Superficial	Medir magnitud y dirección de los desplazamientos del terreno
Extensómetros de Polea	7	Superficial	Medir abertura de las grietas (Horizontal y vertical)
Extensómetros de estacas	9	Superficial	Medir abertura de las grietas (Horizontal)
Piezómetros	4	Profundo	Detectar la variación de la profundidad del agua
Inclinómetros	7	Profundo	Detectar la profundidad del plano de falla
Estaciones fotográficas	5	Superficial	Observar la variación de la superficie del terreno
Levantamientos topográficos	3	Superficial	Calcular y observar las deformaciones del terreno visualizándolo en el continuo mediante la ayuda de un SIG.

Tabla 5.1 Descripción de la instrumentación instalada.

Dado que se realizaron mediciones periódicas de cada uno de estos instrumentos fue posible calcular también las velocidades de los desplazamiento tanto en superficie como

en profundidad. La distribución de estos instrumentos en la zona de estudio se puede observar en la **Figura 5.1**

Teniendo en cuenta los resultados de las mediciones se concluye lo siguiente:

La velocidad de avance del deslizamiento principal del Espino y El Cerro el Diamante, calculada mediante desplazamientos de mojones y extensómetros, desde mediados de abril a finales de julio de 2002 fue del orden de 0.04 – 0.14 m/d; desde inicio de agosto a mediados de septiembre de 2002 se presenta la aceleración máxima del movimiento con velocidades de 0.10 – 0.18 m/d; de allí comienza la máxima desaceleración hasta finales de noviembre de 2002 con velocidades inferiores a 0.02 m/d; finalmente continua disminuyendo su velocidad hasta terminar a finales de marzo de 2003 con velocidades inferiores a 0.01 m/d. La dirección de los desplazamientos varía entre 30 y 40° NE.

Es importante resaltar que el inicio de la desaceleración del movimiento (mediados de septiembre de 2002) es coincidente con el sellamiento de las tuberías de acueducto en la zona y con la construcción de obras de canalización de aguas superficiales.

Aproximadamente 100 m arriba del escarpe principal del deslizamiento se produjo una retrogesión del movimiento generando una grieta incipiente monitoreada mediante extensómetros (**Figura 5.1**), presentando dos tasas de movimiento: La primera desde su creación a finales de Julio hasta mediados de Noviembre de 2002 con valores entre 0.02 y 0.13 cm/d con desplazamientos totales de 3 a 29 cm y la segunda desde mediados de Noviembre hasta mediados de Marzo de 2003 con valores entre 0.01 a 0.03 cm/d y desplazamientos totales de 1 a 3 cm.

Al suroeste del deslizamiento principal y al norte de la quebrada Santo Domingo se encuentra un flujo de tierras reactivado cuyo desplazamiento promedio en la horizontal es de 0.131 m con un azimut de 75° y un hundimiento de –0.028 m desde Diciembre de 2002 hasta Marzo de 2003. Un poco más al sur se encuentra el deslizamiento del Barrio La Carbonera, el cual presentó un desplazamiento de 0.70 m con azimut de 58° y hundimiento de -0.035 m, para el mismo periodo de medición.

Los movimientos en profundidad en la zona ladera arriba de la grieta incipiente evidenciados en los desplazamientos de tres inclinómetros, nos muestran una tendencia a la ruptura (superficie de falla) en el inicio del estrato de arcillolita compacta, cercano a los 20 m de profundidad, desplazándose el bloque superior sobre el inferior. En general los desplazamientos son inferiores a +5 mm (cercanos al límite de precisión del sistema de 0.1 mm/m), y sus velocidades son prácticamente imperceptibles (Razón por la cual los mojones en superficie no presentaron movimiento), sin embargo dada la profundidad de la superficie de ruptura coincidente con el estrato de arcillolita compacta y la dirección de movimiento de los bloques, estos desplazamientos deben ser considerados.

Al igual que los anteriores un inclinómetro instalado en el Barrio San Rafael mostró tendencia al movimiento cerca de los nueve metros de profundidad coincidente con el mismo cambio en la estratigrafía.

En general la instrumentación instalada cumplió con los objetivos propuestos en cuanto a la obtención de los desplazamientos, direcciones y velocidades de los movimientos del terreno tanto en superficie como en profundidad.

6 AMENAZA POR MOVIMEINTOS EN MASA EN EL ESPINO Y CERROS DEL DIAMANTE

6.1 ANALISIS DE ESTABILIDAD DEL MOVIMIENTO PRINCIPAL – DESLIZAMIENTO DEL ESPINO Y CERRO DEL DIAMANTE

Basados en los registros de los inclinómetros fue posible identificar la superficie de falla, la cual se ilustra en la **Figura 6.1.** El conocimiento de este plano fue de gran importancia ya que permitiría definir el modelo geológico y geotécnico, identificar los posibles agentes que generaron la inestabilidad y además predecir el comportamiento del deslizamiento hacia el futuro.

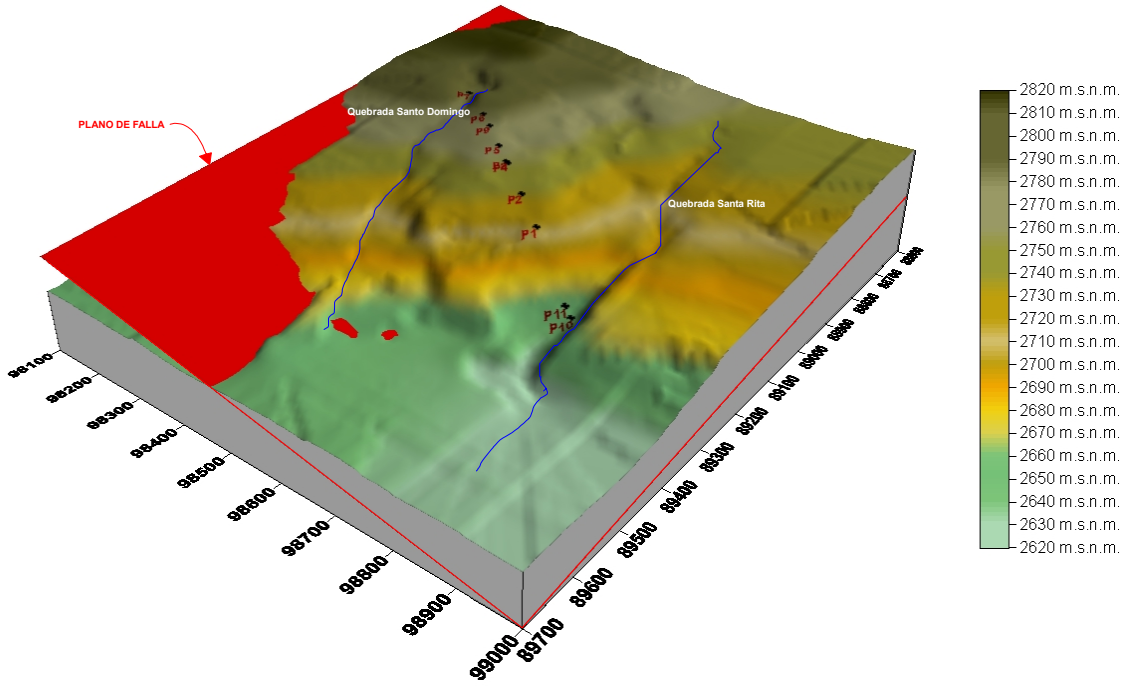


Figura 6.1 Identificación del plano de falla

Para el modelamiento numérico del deslizamiento principal del Espino y el Cerro el Diamante se utilizó el método de equilibrio límite y el método de los elementos finitos.

6.1.1 MÉTODO DE EQUILIBRIO LÍMITE

Con este método se pretende evaluar las causas del movimiento y predecir el comportamiento a futuro evaluando la estabilidad tanto del material removido como del ubicado en la zona arriba de la grieta incipiente (**Figura 6.2** – Perfil de estudio), teniendo en cuenta solicitaciones como sismos e intervención antrópica; para tal fin se realizaron análisis secuenciales sobre el perfil ilustrado. Las etapas son las siguientes:

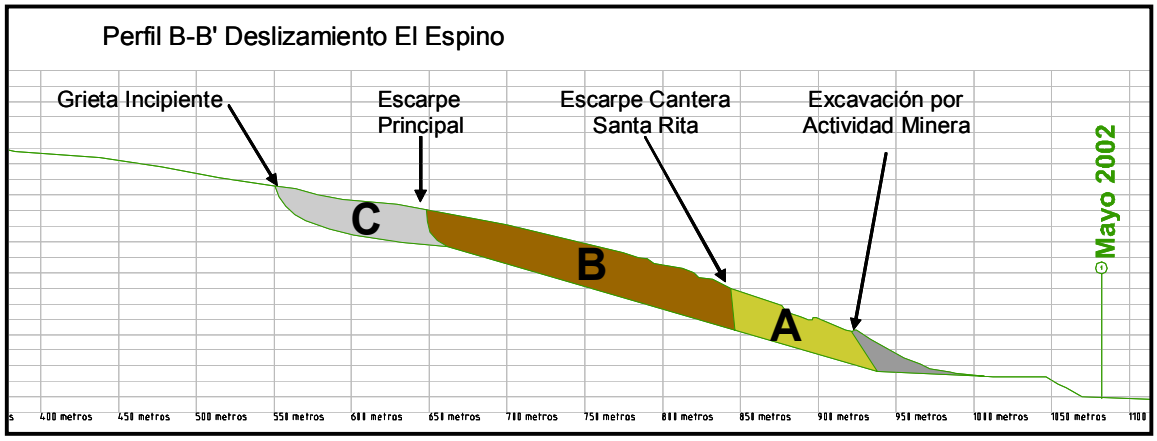


Figura 6.2. Perfil de estudio B-B'

- **Etapa 1 – Bloque A– Minería a cielo Abierto**

Los primeros signos de inestabilidad del talud se presentaron cuando se realizó la excavación para minería; los análisis de estabilidad determinaron que los siguientes agentes contribuyeron a la inestabilidad:

- **Intrínsecos:** Bajos parámetros de resistencia
- **Extrínsecos:** Excavación en la base del talud

En menor proporción influyó el agua; aunque esta generó una pérdida importante de resistencia al saturar el material de la superficie de falla.

- **Etapa 2 – Bloque B – Deslizamiento principal del Espíno y El Cerro el Diamante**

Para efectos de análisis se asumió que el rompimiento de las tuberías (intervención antrópica) generó un pequeño ascenso en el nivel freático obteniendose:

Fs =0.801 utilizando parámetros de resistencia residuales
Fs = 1.177 utilizando parámetros de resistencia pico

Si el ascenso del nivel freático es superior al metro (no se descarta este hecho), el factor de seguridad disminuye aún más.

Los agentes que afectaron la estabilidad del bloque B fueron los siguientes:

- **Intrínsecos:** parámetros de resistencia muy bajos, los cuales están furtemente afectados por la succión del material.
- **Extrínsecos:**

  - Pérdida de soporte lateral en al base, por el desplazamiento del bloque A.

  - Inyección permanente de agua proveniente del rompimiento de tubos del acueducto y alcantarillado

  La condición más realista es como a partir del mes de septiembre del 2002 la velocidad de desplazamiento se desacelera; esta fecha coincide con el taponamiento de los tubos realizado por el Acueducto, así como con las obras de canalización de aguas superficiales adelantadas por la DPAE junto con la EAAB.

  Esta hipótesis no es del todo descabellada si se tienen en cuenta que la reparación de los tubos del acueducto podía durar varios días, por lo que el volumen de agua inyectada al deslizamiento toma importancia. Esto claro está, en los sitios donde era evidente la fuga, porque existían otros que se manifestaban como lloraderos en la cara del talud, pero no se sabía a ciencia cierta el sitio de la fuga.

  - Fracturamiento del macizo rocoso por las cargas de explosivos utilizados para la construcción de las zanjas. Las zanjas fueron construidas aproximadamente paralelas a las curvas de nivel; convirtiéndose en una especie de zanjas de coronación que facilitaban la infiltración tanto del agua de escorrentía como la proveniente del rompimiento de los tubos; de hecho a lo largo de esta excavación se desarrolló la grieta principal.

- **Etapa 3 – Bloque C – Deslizamiento Grieta Incipiente**

Para efectos de análisis se asumió que pequeños movimientos del bloque B movilizaron la resistencia residual de la arcillolita, de manera que al analizar el bloque C se obtienen los siguientes factores de seguridad:

Talud Seco FS = 1.011
Talud con agua FS = 0.984

El efecto del agua en el anterior análisis se simuló asumiendo que el rompimiento de la tubería produjo un ascenso del nivel freático de un metro.

Asi, los agentes que contribuyen a la inestabilidad del bloque C fueron los siguientes:

- **Intrínsecos**:
  - Bajos parámetros de resistencia de la arcillolita sobre el plano de falla.
- **Extrínseco:**
  - Pérdida de soporte lateral por movimiento del bloque B.
  - Aporte de agua proveniente del rompimiento de tuberías instaladas en el sector; al igual que en el caso anterior, una vez taponada la tubería se produce una desaceleración del movimiento.

6.1.2 METODO DE ELEMENTOS FINITOS

Con el fin de predecir los desplazamientos que sufrirá el deslizamiento en el sector de San Rafael, se realizó un análisis mediante elementos finitos, para lo cual se utilizó una malla de 19.000 elementos. Para efectos del análisis se asumió que el nivel del agua se encontraba un metro por encima de la superficie de falla. Los resultados de la malla deformada se ilustran en la **Figura 6.3**

Mediante la modelación se halló que los resultados generados son similares al comportamiento real del deslizamiento en cuanto a desplazamientos se refiere, entendiendose esto como una calibración del modelo analizado, donde los desplazamientos se presentan a partir del escarpe principal y en mayor cantidad hacia el sector de San Rafael, coincidiendo bastante bien con lo observado en campo y teniendo como valor promedio de desplazamiento de 15 m.

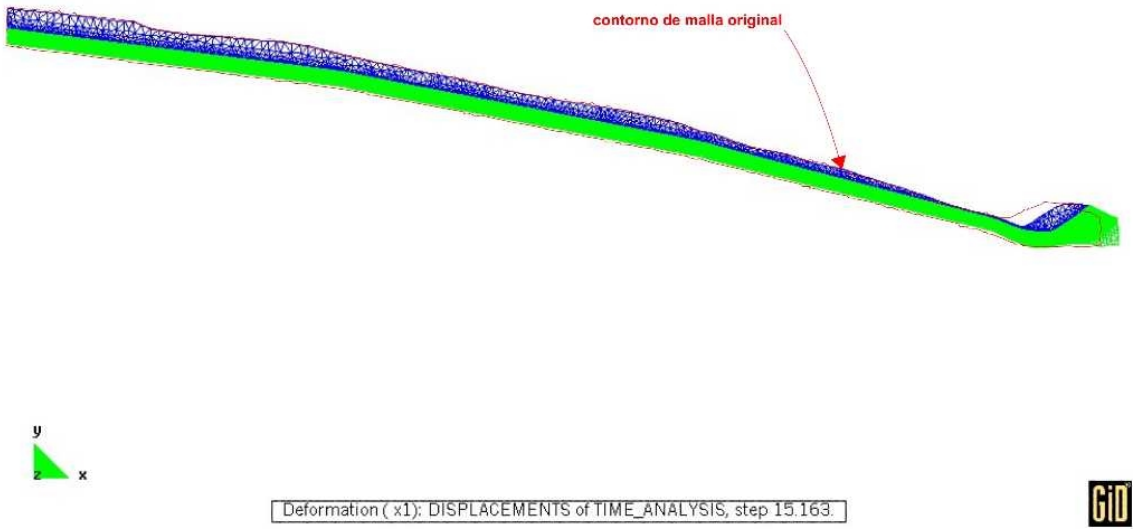


Figura 6.3 Resultados de la malla de elementos finitos deformada

6.2 ZONIFICACION DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

El desarrollo del movimiento en masa que afecta El Espino y Cerro del Diamante se ha visto fuertemente influenciado por las propiedades de los materiales - ubicados en cercanías a la zona de falla - los cuales se caracterizan por los bajos parámetros de resistencia al corte en condición residual, así como el claro control estructural del movimiento. Sin embargo se ha visto durante el estudio que la intervención antrópica ha sido decisiva en la detonación del fenómeno en lo concerniente a la instalación de sistemas de redes de acueducto que posteriormente han sufrido roturas provocando fugas considerables. Uno de los ejes de las redes coincide con el eje del escarpe principal, que

según habitantes del sector fue construido utilizando dinamita. La influencia de la lluvia como detonante del movimiento principal no es considerable, sin embargo no se descarta que esta haya llegado a acelerar movimientos.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se realizó una zonificación de la amenaza por movimientos en masa (ver **Figura 6.4)**, en escala 1:1.000, donde se destacaron 11 zonas considerando los movimientos que afectan la ladera, su génesis, estado y actividad, tipo de material involucrado, así como su afectación a la comunidad. Se realizó también la evaluación de las zonas ladera arriba del movimiento principal que pueden llegar a inestabilizarse por efectos sísmicos y por la continuación de la acción antrópica (continuo rompimiento de tuberías que como se explicó anteriormente afectan las propiedades de los materiales). Los análisis muestran que futuros rompimientos de tubos podrán generar el fallamiento de un bloque de 100 metros de longitud ladera arriba de la grieta que delimita el bloque C **(Figura 6.2)**, mientras que el efecto de un sismo, dependiendo de la aceleración máxima, la longitud afectada fluctuará entre 30 y 200 metros.

7 RECOMENDACIONES Y OBRAS DE MITIGACION

Con base en los resultados del estudio, se sugieren algunas medidas generales para la mitigación del riesgo en la zona del estudio y sectores aledaños. Ellas se han dividido en inmediatas y a corto o mediano plazo, siendo las primeras aquellas que deben implementarse en el menor tiempo posible y las segundas las que tomarían un mayor tiempo debido a que requieren un diseño detallado. Las primeras tienen el objeto de controlar parcialmente las aguas de infiltración que actúan como detonante del movimiento y evitar que este se acelere, pero que no garantizan la estabilización del terreno. Las segundas corresponden a la solución definitiva, tomando en cuenta la ocurrencia de eventos extraordinarios como lluvias y sismos fuertes. Es importante aclarar que las obras que se proponen deben ser estudiadas y diseñadas con el detalle requerido. En la **Figura 6.5** presenta una sectorización de la zona de estudio de acuerdo a su condición de estabilidad y las medidas y obras de mitigación a implementar.

MEDIDAS INMEDIATAS

- Realizar un levantamiento detallado de todas las redes de instalaciones hidráulicas y sanitarias con el objeto de identificar escapes y rectificarlos, o eliminar totalmente los conductos defectuosos. Durante visitas realizadas en el mes de Mayo de 2003, se observaron algunos tubos de alcantarillado con fugas de caudales importantes.

- Impermeabilizar las superficies a la intemperie ladera arriba de la grieta incipiente, principalmente las vías, con el objeto de evitar cualquier infiltración. Esto se debe complementar con una red de zanjas o cunetas también impermeables y en materiales muy flexibles. Se debe asegurar que estos conductos entreguen el agua recolectada en alguna de las quebradas naturales que bordean el deslizamiento, mediante una estructura de entrega adecuada que evite la socavación del terreno.

- Sellar con materiales arcillosos todas las grietas ladera arriba del escarpe principal, sectores II y III (**Figura 6.5**).

- Reconformar los cauces de la quebradas Santa Rita y Santo Domingo con el objeto de controlar posibles flujos de lodos y detritos; sería recomendable la construcción de pequeñas presas transversales de retención, aguas abajo de las quebradas, especialmente de la Quebrada Santa Rita Esto requerirá una evaluación geotécnica e hidráulica de las condiciones de los cauces para determinar el número, distribución, localización y dimensiones de estas presas.

- Inspeccionar los antiguos túneles de minería y determinar su alineamiento y dimensiones con el objeto de evaluar su eventual uso como galerías de drenaje.

- Mantener el monitoreo y ampliar la instrumentación en algunos sectores vecinos como el barrio Rincón del Porvenir.

- Por el momento no es recomendable ninguna intervención que involucre movimiento de tierras en los sectores I y II (**Figura 6.5**), a menos que se trate de una reconformación superficial para manejo de aguas.

- Es recomendable suspender toda actividad humana en los Sectores I, II, III y IV, bien sea para evitar que estas actividades exacerben el movimiento o para proteger la vida de quienes las realizan. Los asentamientos futuros en dichos sectores dependen de la realización de obras que garanticen su estabilidad.

9.2.2 RECOMENDACIONES A MEDIANO Y LARGO PLAZO

Para estas medidas se ha tenido en cuenta que el terreno por arriba de la llamada “Grieta Incipiente”, corresponde a un bloque rocoso cuyo mecanismo de falla probable sería un deslizamiento traslacional a lo largo del contacto arenisca/arcillolita compacta, tal como ha ocurrido en la zona actualmente inestable. Por su parte, el terreno en esta zona inestable limitada por la grieta incipiente hasta el escarpe principal, se compone de una serie de bloques rocosos formados a partir de la ruptura del macizo rocoso original. Finalmente del escarpe principal hacia abajo, se trataría de un material de suelo y roca desplazado conformado por areniscas muy fracturadas con intercalaciones de arcillolitas y algunos suelos residuales que las sobreyacen. Las medidas sugeridas son las siguientes:

- Estabilización del sector III (**Figura 6.5**), ladera arriba de la grieta incipiente, mediante la utilización de pilotes empotrados en la roca. El número, distribución, longitud y demás detalles del sistema de refuerzo deberá diseñarse para la condición más critica de agua y sismo.

- Reconformación del terreno mediante terraceo en los Sectores I y II (**Figura 6.5**). Este debe complementarse con obras de drenaje superficial, drenaje profundo y revegetalización. Eventualmente, esta alternativa requerirá de un muro de contención, o la construcción de un contrapeso a lo largo de la pata del deslizamiento, empleando para ello el mismo material del derrumbre. Al igual que la recomendación anterior esta solución debe ser diseñada con detalle, teniendo en cuenta que uno de los flancos de la presa puede presentar desplazamiento (Barrio San Rafael – Inclinómetro 6)

- De acuerdo con los resultados de la inspección de los antiguos túneles de minería, estos pueden ser empleados como galerías de drenaje para ayudar a estabilizar la ladera.

Desafortunadamente, desde un principio no se tuvo en cuenta la interrelación que podía tener el movimiento con las zonas adyacentes, y realmente, el área de estudio se quedó pequeña frente a la magnitud del problema. Aunque el estudio siempre se orientó a determinar la amenaza dado el carácter retrogresivo del mismo, surgieron problemas adicionales como el efecto sobre el Barrio San Rafael, interrelación con el deslizamiento de la Carbonera y aún más importante, cuál es el comportamiento de los depósitos ubicados en la parte inferior ante un sismo (amenaza sobre el barrio El Rodeo). Se hace especial énfasis, en los depósitos inferiores, ya que al saturarse el comportamiento es el de un flujo y la distancia recorrida por el mismo es motivo de investigación con el fin de evaluar el área de amenaza de manera más confiable.

Aunque se tienen definidos los correctivos de manera general, para el presente estudio, no se ha tenido en cuenta el efecto de la Carbonera sobre El Espino, el cual puede ser muy importante, requiriéndose validar algunas de las hipótesis mencionadas con anterioridad.

Por último, se recomienda seguir con el plan de instrumentación adelantado por INGEOMINAS, con el fin de medir posibles tendencias del movimiento debido a que esta instrumentación es costosa y por ningún motivo se debe abandonar, y más ahora cuando se acerca un nuevo período invernal.