

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 objetivo	1
1.3 alcance del estudio.....	1
1.4 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	1
1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO	2
3 ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO	2
4 ESTUDIO GEOTÉCNICO.....	3
4.1 Análisis cinemático	4
4.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD	5
4.2.1 Taludes en roca.....	6
4.2.2 Taludes en suelo	7
4.3 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN PLUVIAL.....	7
5 EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FRM	7
5.1 Variables aleatorias: límites	7
5.2 Probabilidad de falla y distancia de viaje	8
6 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD POR FRM	9
7 EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FRM.....	9
8 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN.....	9
9 DISEÑO DE OBRAS DE MITIGACIÓN.....	10
10 CONCLUSIONES	10

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1 Resultados del análisis cinemático por talud	5

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Factores de seguridad para los taludes y secciones estudiados	6
Tabla 2 Valores extremos de las variables aleatorias	8

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Zonificación de amenaza. Escenario actual	
Figura 2 Zonificación de vulnerabilidad	
Figura 3 Zonificación de riesgo por remoción en masa	

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El Fondo de Prevención y Atención de Emergencias a través de la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito – DPAE suscribió el Contrato de Consultoría No. 162 de 2003 con la UNIÓN TEMPORAL RIESGOS URBANOS conformada por Germán Darío Tapia Muñoz y Edgar Eduardo Rodríguez Granados – Ingeniería y Georriesgos, la elaboración del Estudio de riesgo por remoción en masa, evaluación de alternativas de mitigación y diseños detallados de las obras recomendadas para estabilizar el escarpe del Barrio San Isidro, sectores Cerrito I, II, III y Carboneras de la Localidad de Ciudad Bolívar en la ciudad de Bogotá D.C., contrato iniciado a partir del 15 de julio con duración de tres meses.

1.2 OBJETIVO

El objetivo general del estudio es el diseño detallado de las obras para mitigar el riesgo alrededor del escarpe del barrio San Isidro sectores Cerrito I, II, III y Carboneras de la Localidad de Ciudad Bolívar previo análisis de alternativas. Lo anterior requiere la construcción de la información cartográfica de topografía, geología, geomorfología, tipología de viviendas, amenaza, vulnerabilidad y riesgo de la zona.

1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO

- Recopilación de información primaria y secundaria.
- Levantamiento topográfico detallado de la zona de estudio a escala 1:500, tanto del macizo rocoso como de los equipamientos urbanos.
- Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio.
- Inventario y cartografía de variables como: geología, geomorfología, inventario de viviendas.
- Inventario de los procesos morfodinámicos, con el fin de conocer los mecanismos de falla, los factores condicionantes y desencadenantes de ellos.
- Análisis de amenaza: Evaluación de la probabilidad de falla por distancia y mecanismo de inestabilidad: Análisis de tipología de viviendas, condiciones de exposición y resistencia.
- Análisis de vulnerabilidad
- Análisis de riesgo
- Determinación y evaluación de alternativas de reducción del riesgo en la zona.
- Diseño detallado de obras y acciones tendientes a minimizar el riesgo potencial y maximizar el entorno ambiental.
- Presupuesto detallado y especificaciones.

1.4 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El sitio se localiza en el suroccidente del cementerio El Apogeo, barrios San Isidro Sectores Cerrito I, II, III y Carboneras, en la localidad Ciudad Bolívar. Corresponde a un

escarpe de una antigua explotación minera con viviendas de uno a dos pisos de mampostería no confinada ubicadas en la parte inferior y superior del talud. El acceso al sitio se realiza por la Autopista Sur hacia la planta de Concretos de Central de Mezclas o por la Autopista Villavicencio en la entrada al barrio el Perdomo. El área de estudio se ubica aproximadamente entre las coordenadas 99550 N – 88650 E, 99400 N – 88650 E, 99550 N – 88800 E y 99400 N – 88900 E.

1.5 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el límite entre los sectores Cerrito II y III y el sector Carboneras se expone un antiguo frente de explotación artesanal de areniscas que alcanza hasta 10 metros de altura y aprox. 160 de longitud, con cortes de inclinación muy elevada y cuya dirección preferencial es norte-sur. La disposición estructural del macizo y los agentes erosivos y de intemperismo generan un ambiente propicio para la generación de caídas de bloques por diferentes mecanismos de falla: planares, cuñas, volteos. A pocos metros de distancia del escarpe, hacia arriba y hacia abajo, se exponen varias unidades habitacionales que en caso de caída de los bloques podrían verse afectadas.

La parte superior de dicho escarpe expone por tramos delgados espesores de suelos potencialmente erodables que también son objeto de estudio.

Por otra parte, otro talud en depósitos cuaternarios, de orientación este-oeste, límite entre los sectores Cerrito I y II, aunque recubierto de pastos y con altura y pendiente menores podría, ante agentes exógenos críticos, fallar y comprometer las viviendas que se localizan en sus vecindades.

2 LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO

Se realizó un levantamiento topográfico detallado total, a escala 1:500 con curvas de nivel cada medio metro. El levantamiento topográfico se llevó a cabo, con los propósitos del análisis, la elaboración de la zonificación por amenaza, vulnerabilidad y riesgo y el diseño de las medidas correctivas. Se hizo énfasis en la zona del escarpe rocoso y en las viviendas con cierto grado de vulnerabilidad ante FRM. El levantamiento fue amarrado a placas del IGAC, que sirvieron de soporte para la definición de la poligonal de trabajo, la cual quedó materializada en campo gracias a la construcción de tres mojones en placas.

El barrido altimétrico y planimétrico se ejecutó con la ayuda de una estación total y bajo la aplicación de un procedimiento mixto, es decir tanto con la toma de secciones transversales como con la captura de una nube de puntos; aunque haciendo énfasis en la toma de secciones longitudinales y transversales, dada rugosidad y pendiente de la superficie actual. El barrido con nube de puntos (2300) se destinó a la definición de los taludes para análisis cinemático, distancia de caída de bloques y delimitación de obras de mitigación.

3 ESTUDIO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO

Con base en la información disponible y en el resultado de la interpretación de las fotografías aéreas de años anteriores, las secciones transversales, el levantamiento topográfico, y el trabajo en campo de interpretación se establecieron los niveles litológicos en términos de unidades de roca y suelo con su ubicación espacial.

El área estudiada hace parte de la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, hacia el sur de la Sabana de Bogotá, en cuyo piedemonte afloran rocas sedimentarias Cenozoicas (inicios del Terciario) en su mayoría de tipo arenisca, agrupadas dentro de la Formación Guaduas, cubiertas por depósitos de origen coluvial y antrópico. Los materiales superficiales se ilustraron en un plano regional y local, así como secciones transversales geológicas.

A nivel de estratigrafía se determinaron las siguientes formaciones:

- Formación Guaduas – Conjunto medio inferior, conjunto medio - medio y conjunto medio superior. Generalmente de areniscas con intercalaciones de arcillolitas.
- Depósitos recientes (cuaternario): coluvión antiguo, coluvión superior e inferior, coluvión con predominio de bloques, suelos orgánico minerales, suelos antrópicos de ladera y rellenos.

La tectónica se caracteriza por fallas de tendencia principal E-W (Fallas de Terreros y Perdomo) y por la Falla de Mochuelo, ubicadas al norte de la zona de estudio.

A nivel de geomorfología la zona de interés se encuentra en la parte baja de una ladera tipo estructural denudacional, en cuya configuración morfológica es claro el control estructural de las rocas de resistencia media a la erosión. Se encuentran formas como:

- Lomerío (ladera estructural – denudacional, ED)
- Ladera coluvial alta (LCA)
- Ladera coluvial baja (LCB)
- Ladera escarpada en coluvión con bloques (LECb)
- Ladera escarpada en coluviones recientes (LEC)
- Laderas escarpadas en coluvión antiguo (LECa)
- Laderas escarpadas en arenisca muy fracturas (LEAf)
- Laderas escarpadas sometidas a mecanización (LEA)
- Eskarpe (EA)

Los procesos de remoción en masa presentes en el sitio corresponden a desprendimientos y a caída de bloques. Los desprendimientos son un tipo de caída en el que se produce disgregación de masa litológica (o de la matriz del coluvión en el caso presente) ya sea de suelo o de roca fracturada o descompuesta y existe un descenso súbito con fragmentación de material a lo largo de una ladera de fuerte pendiente.

Las caídas de bloques son el principal proceso de remoción en masa y se evidencian en la existencia de depósitos de talus en el pie del eskarpe y en la observación del eskarpe en arenisca. Se llevó a cabo una medición sistemática de las discontinuidades (440 datos). Los procesos de caída se relacionan con la posibilidad de cuñas, planares y volteos.

4 ESTUDIO GEOTÉCNICO

El estudio geotécnico se enruta estableciendo un modelo geológico-geotécnico representativo de ambos problemas, para el efecto se definen varias secciones de análisis que conjugan la geometría de los taludes y sus tipos de materiales, las cuales se apoyan en la información geológica y de exploración del subsuelo en cuanto a litología y propiedades. De forma paralela, se establece el marco estructural del macizo rocoso

expuesto, mediante el levantamiento y procesamiento sistemático de discontinuidades: su orientación y buzamiento y sus propiedades mecánicas con ayuda de investigación del subsuelo y ensayos específicos.

La investigación del subsuelo persigue resolver dos cuestionamientos básicos: los contactos litológicos y las características de los materiales existentes en los puntos explorados. Una vez evaluadas las bondades, la relación beneficio-costos y las limitaciones de los diferentes métodos de exploración, se definió un programa de exploración que combina los métodos directos y los indirectos, el cual permite obtener con buena confiabilidad la realidad indagada. En el primer caso se utilizaron perforaciones con distintos sistemas de avance, apiques y columnas/trincheras y en el segundo, sondeos eléctricos verticales (SEVs).

Como métodos indirectos el método utilizado fue la geoelectrica mediante la realización de cuatro líneas perpendiculares a la cara del talud y a lo largo de él (coincidentes con las secciones topográficas identificadas como B, C, D y F) con base en nueve (9) sondeos geoelectricos verticales (SEVs) algunos de los cuales son útiles para más de una línea como se muestra en la misma figura.

Simultáneamente se realizó buen número de ensayos de laboratorio sobre muestras representativas para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos y rocas encontrados. En algunos casos, se recurrió de ser posible a práctica de ensayos in situ tipo SPT.

La síntesis del conjunto de información se consolidó en resúmenes gráficos que facilitaron la caracterización de los materiales y su comprensión mediante secciones de análisis geológico-geotécnicas.

Posteriormente, la primera etapa del análisis de estabilidad se enfocó al estudio direccional de los modos y posibilidad de deslizamiento a lo largo de los planos de debilidad estructural, en el marco de exposición del macizo rocoso a partir de la aplicación del análisis cinemático (Goodman, 1989 y Hoek and Bray, 1974).

En una segunda etapa se modeló, con la ayuda de los métodos de equilibrio límite, el modo probable de movilización acorde con el tipo de material y la disposición estratigráfica: fallas planares, en cuña y volcamientos para los medios rocosos y fallas rotacionales para los taludes en suelo.

La evaluación de erosividad se efectúa a partir de la caracterización de los materiales susceptibles a este fenómeno.

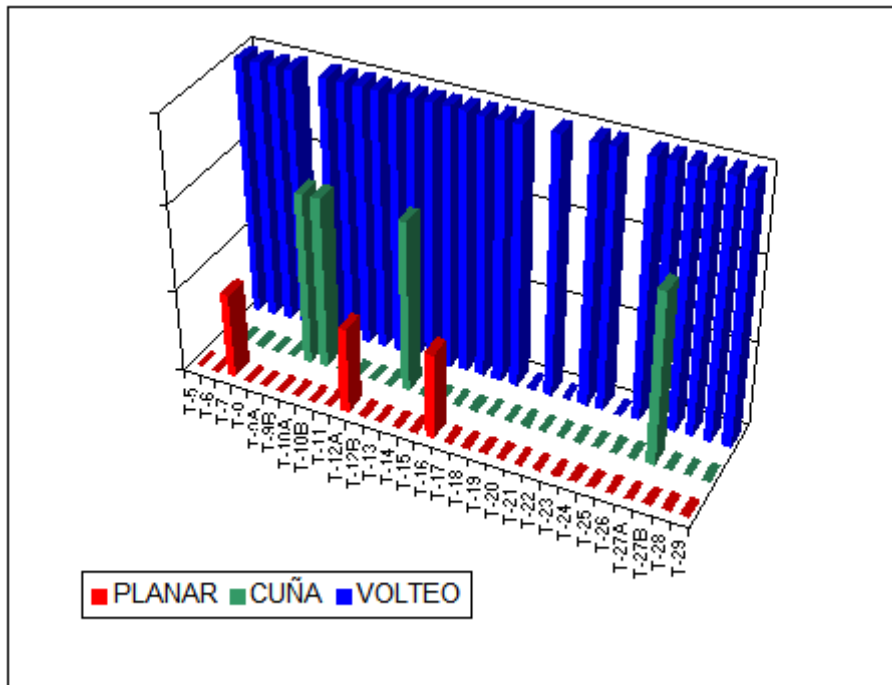
4.1 ANÁLISIS CINEMÁTICO

En este análisis se evalúan los modos probables de falla (planar, volteo y en cuña) para el conjunto de taludes en los que se expresa el macizo rocoso, contrastándolos con los posibles planos de movilización detectados en el levantamiento estructural. La evaluación persigue dilucidar acerca de los modos que sean probables y detectar los planos involucrados en dichos modos.

El levantamiento de discontinuidades da por resultado una estratificación (E1) y 3 familias de diaclasas (D1, D2 y D3) y el análisis cinemático evidencia el alto número de configuraciones geométricas para que se puede producir la falla por volteo: esto es, dentro del intervalo de direcciones de buzamiento del talud extraídos (0 – 180°) y buzamientos mayores a 30°; mientras que la falla planar se presenta en este caso para direcciones entre 0° y 20° y buzamientos entre 40 y 80°. La posibilidad en cuña por su parte, recae para direcciones del talud entre 55° y 130° y para buzamientos comprendidos entre 80° y 90°.

En la Gráfica 1 se muestran las posibilidades cinemáticas en los taludes representativos (T5 a T29) del sector oriental organizados de norte a sur, en ella se evidencia que bajo las condiciones geométricas mencionadas para los taludes y consecuentemente con las disposiciones cuasiverticales de las diaclasas, los mecanismos de falla en su mayoría resultan ser por volteo, a excepción de los taludes 9A, 19, 21 y 24 para los que no se esboza algún tipo de falla. En tanto que, los taludes 9B, 10A, 13 y 27A presentan además posibilidad de falla en cuña. La falla planar es factible por el plano de estratificación en los taludes 7, 12A y 16.

Gráfica 1 Resultados del análisis cinemático por talud



4.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

La evaluación de estabilidad se efectúa para el talud rocoso sobre los taludes típicos (1P a 4P y M1 a M4) y sobre las secciones B-B' y C-C', para el talud en suelo. Ver Tabla 1.

Tabla 1 Factores de seguridad para los taludes y secciones estudiados

VARIABLES DE ANALISIS				MECANISMO DE FALLA Talud o sección									
Fricción	Cohesion	Lluvia	Sismo	Planar	Cuña			Volcamiento				Rotacional	
				1P	2P	3P	4P	M1	M2	M3	M4	B-B'	C-C'
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Sin	1.68	2.42	2.21	2.42	3.64	4.07	4.31	5.83	1.87	2.81
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Sin	1.00	2.40	2.24	2.44	2.32	2.61	2.76	3.76	1.72	2.51
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Sin	1.66	1.87	0.40	0.52	2.53	2.83	3.00	4.07	0.83	1.70
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Sin	0.98	1.85	0.43	0.54	1.63	1.84	1.96	2.72	0.70	1.41
ϕ_{max}	C_{max}	Sin	Con	0.99	0.66	1.71	1.86	2.12	2.37	2.49	3.16	1.35	1.60
ϕ_{min}	C_{max}	Sin	Con	0.59	0.63	1.73	1.88	1.57	1.76	1.86	2.41	1.25	1.44
ϕ_{max}	C_{min}	Sin	Con	0.97	0.51	0.31	0.40	1.67	1.87	1.97	1.51	0.55	0.94
ϕ_{min}	C_{min}	Sin	Con	0.57	0.49	0.33	0.42	1.19	1.34	1.42	1.90	0.47	0.79
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Sin	1.11	1.22	1.11	1.21	1.40	1.49	1.53	1.72	1.25	1.89
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Sin	0.56	1.20	1.13	1.23	1.13	1.21	1.25	1.45	1.21	1.75
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Sin	1.09	0.94	0.20	0.26	1.18	1.27	1.31	1.51	0.27	0.81
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Sin	0.53	0.93	0.23	0.28	0.89	0.97	1.02	1.22	0.24	0.68
ϕ_{max}	C_{max}	Con	Con	0.66	0.34	0.85	0.93	1.10	1.18	1.22	1.38	0.89	1.06
ϕ_{min}	C_{max}	Con	Con	0.33	0.32	0.87	0.95	1.13	0.99	1.03	1.20	0.86	0.99
ϕ_{max}	C_{min}	Con	Con	0.64	0.26	0.16	0.20	0.95	1.03	1.07	1.23	0.13	0.42
ϕ_{min}	C_{min}	Con	Con	0.31	0.24	0.17	0.22	0.74	0.82	0.85	1.02	0.13	0.35

4.2.1 Taludes en roca

De acuerdo con los resultados del análisis cinemático, son factibles fallas de tipo planar, en cuña y por volcamiento a la largo del talud de orientación preferencial norte-sur. Los párrafos siguientes se destinan a una breve descripción de dichos tipos de falla en el sitio.

Mecanismo de falla planar

La falla planar se desarrolla sobre el plano de estratificación en un talud típico 1P con azimut de buzamiento/buzamiento: 9/64. Los factores de seguridad se obtienen mediante el empleo de una hoja de cálculo que sistematiza la expresión propuesta por Duncan.

Mecanismo de falla en cuña

Las cuñas que se generan y que son susceptibles de fallar son: D21D31, D11D32 y D11D21, ellas se desarrollan en taludes típicos 2P, 3P y 4P con azimut de buzamiento/buzamiento: 115/81, 66/86 y 75/71, respectivamente. Los factores de seguridad se obtienen mediante el empleo de una hoja de cálculo que sistematiza la expresión propuesta por Low (1996).

Mecanismo de falla por volcamiento

Las familias de diaclasas propensas a fallar son: D22, D31, D12 y D32 ellas se desarrollan en taludes típicos M1 a M4, con azimut de buzamiento/buzamiento: 54/65, 13/61, 111/59 y 143/49, respectivamente. Los factores de seguridad se obtienen mediante el empleo de una hoja de cálculo que sistematiza la expresión propuesta por Hoek y Bray (1981).

4.2.2 Taludes en suelo

El talud norte se modeló con ayuda de las secciones B y C que resultan representativas del sector. La evaluación de estabilidad se planteó con métodos de equilibrio límite: falla rotacional sobre superficie crítica, empleando como herramienta de trabajo el programa PCStable 6, método de Bishop

4.3 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN PLUVIAL

Para la estimación de la pérdida de suelo por erosión pluvial se utilizó el modelo matemático propuesto por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), que correlaciona factores de erosión (lluvia – viento), propiedades del suelo y condiciones que afectan el proceso de erosión.

En los taludes rocosos de pendiente escarpada si bien se evidencian pérdidas muy severas de suelo que propician el desconfinamiento de bloques localizados en cercanías de la sección e, el área que afectan no es significativa dentro de la exposición del macizo rocoso. No obstante, el efecto que la erosión puede tener como agente contribuyente de la inestabilidad de los bloques, ha sido considerado en el análisis cinemático, mediante la suposición de que aún en estas zonas existe control estructural en la caída de bloques; y en la selección de parámetros geomecánicos que evidencian pérdida de resistencia entre bloque y bloque. Hacia la parte posterior de los taludes no se observaron procesos erosivos debido a la baja pendiente del terreno y a la densa cobertura urbana.

5 EVALUACIÓN DE AMENAZA POR FRM

La amenaza se debe entender como la probabilidad de que ocurra la falla para cualquier mecanismo. Esta amenaza se relaciona con el sitio puntual de donde se desprenden los materiales, bien sea en la caída de bloques o bien en los eventos rotacionales. No obstante, es innegable que por efectos gravitatorios las masas deslizadas pueden avanzar y eventualmente comprometer áreas adicionales. En el análisis se tuvo en cuenta por una parte, la probabilidad de falla de los materiales y por otra, la probabilidad de que ellos avancen. La conjugación de estos dos elementos permite la definición de franjas de amenaza graduales semi-paralelas a los taludes (hacia arriba y hacia abajo) que tienen que ver con las distancias de viaje y franjas imaginarias perpendiculares a los taludes que involucran los materiales y su resistencia al deslizamiento.

Así pues, la primera etapa consiste en definir por mecanismo de falla, la curva de probabilidad de colapso que es función del factor de seguridad, FS para las 16 (=2⁴) diferentes combinaciones de variables aleatorias extremas como son: parámetros geomecánicos (c y ϕ) e influencia de los sismos y las lluvias (Rosenblueth, 1975 y Harr, 1987). La segunda etapa consiste en la definición de las distancias de viaje: como funciones de probabilidad a partir de eventos aleatorios en roca y como valor único en la posible falla rotacional en suelo.

5.1 VARIABLES ALEATORIAS: LÍMITES

En la Tabla 2 Valores extremos de las variables aleatorias se resumen por mecanismo de falla evaluado, los valores extremos de los parámetros utilizados: c_{min} , c_{max} , ϕ_{min} , ϕ_{max} , a_{min} ,

a_{max} , $agua_{min}$ y $agua_{max}$. En los mecanismos del talud rocoso: falla planar, en cuña y por volcamiento, se asumen como representativos de la acción del agua, parámetros geomecánicos denominados de reblandecimiento inferiores a la condición seca; estos valores provienen de los ensayos de bloque deslizante cuyo intervalo de variación si bien es amplio, puede figurar en los valores inferiores el trabajo que ha labrado el agua en el deterioro de la calidad de las paredes de la discontinuidad. Para el talud en suelo, los parámetros se derivan de las pruebas de SPT mientras que los eventos extremos de agua ($ru=0.5$) corresponden a la eventual rotura de una tubería a presión cuya probabilidad de ocurrencia es de difícil determinación pues los registros de la EAAB-ESP en cuanto a roturas de tuberías en ese sector de la ciudad, no superan los tres años y no reportan siquiera los daños en el alcantarillado que fueron percibidos por la DPAE en los primeros meses de 2003. No obstante, es importante efectuar el análisis ante un evento desfavorable que permita estimar la situación ante el espectro completo de posibilidades.

Tabla 2 Valores extremos de las variables aleatorias

ANEXO	MECANISMO DE FALLA Sección o talud Material	PARÁMETROS DE ANÁLISIS				Agua	a_{max}
		ϕ_{min} (°)	ϕ_{max} (°)	c'_{min} (T/m ²)	c'_{max} (T/m ²)		
G.1	FALLA PLANAR - TALUD 1P. TKgmm - Arenisca	14.0* - 24.5	27.0* - 37.7	0.00	0.06	*Para simular el efecto del agua se utilizan parámetros de reblandecimiento	0.24g
G.2	FALLA EN CUÑA TALUD 2P. TKgmm - Arenisca	14.0* - 24.5	27.0* - 37.7	0.00	0.02		0.24g
G.3	FALLA EN CUÑA TALUD 3P. TKgmm - Arenisca	14.0* - 24.5	27.0* - 37.7	0.01	0.06		0.24g
G.4	FALLA EN CUÑA TALUD 4P. TKgmm - Arenisca	14.0* - 24.5	27.0* - 37.7	0.05	0.13		0.24g
G.5	FALLA POR VOLCAMIENTO - TALUDES M1 a M4 TKgmm - Arenisca	14.0* - 24.5	27.0* - 37.7	0.00	0.00		0.24g
G.6 y G.7	FALLA ROTACIONAL - SECCIONES B-B' Y C-C' Qra + Qcs + Qo+cv	23.9	26.2	0.09	1.10	0.0 - 0.5	0.24g

5.2 PROBABILIDAD DE FALLA, DISTANCIA DE VIAJE Y ANÁLISIS DE AMENAZA

La probabilidad de falla de los distintos mecanismos, se obtiene mediante el cálculo del factor de seguridad para las 16 diferentes combinaciones de variables extremas y su ajuste a funciones de probabilidad Normal y/o Weibull.

La amenaza se define como nula fuera del área de influencia de los fenómenos de inestabilidad: Hacia delante, más allá de la distancia de viaje de las masas inestables y hacia atrás, en el caso del talud en roca, guardando una distancia prudencial de 5 m desde la corona donde se considera que no habrá posibilidad de generación de bloques inestables a juzgar por las evidencias de campo, y en el caso del talud en suelo, hacia atrás, una vez se termina la unidad geomorfológica de ladera escarpada.

Para los demás puntos del área de estudio, se puede definir cuál es el talud que genera amenaza: el noroccidental (en suelo) o el oriental (en roca). Cuando el punto se localiza en la aferencia del primero, se establece como de amenaza alta si hace parte del cuerpo del deslizamiento potencial evidenciado en los análisis de estabilidad, y como de amenaza media al interior de la unidad geomorfológica. De otra parte, cuando el punto se encuentra dentro del área de influencia del talud en roca, se evalúa su distancia al escarpe, D, con la que se lee de la curva respectiva de P(D) vs D, la probabilidad de que la masa llegue al punto, la cual se asimila a la probabilidad de falla, Pf y

consecuentemente al FS y a la amenaza en la curva Pf vs FS, respectiva. Se elige la curva de distancia por aferencia de la sección estudiada y la curva de probabilidad de falla más conservadora, según el (los) mecanismo(s) de falla del talud al que se enfrenta.

En total se ubican 21 viviendas en alta amenaza como se aprecia en la Figura 1.

6 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD POR FRM

El inventario de viviendas se adelantó paralelo al levantamiento topográfico urbanístico, se efectuó el inventario para cada residencia, mediante fichas de campo, en las que se consigna información concerniente a: su localización, propietario, número de habitantes, estructura, servicios públicos de que dispone, condiciones del suelo de fundación y estabilidad del mismo. Los resultados de este inventario se presentan en un plano, en el cual se clasificarán las viviendas de acuerdo con su topología. Esta información es la base para la evaluación de vulnerabilidad por FRM. En total se inventariaron 173 predios, de los cuales 143 corresponden a casas o casas lotes y 30 a lotes vacíos.

Para evaluar la vulnerabilidad física de las viviendas, únicos elementos de infraestructura considerados en el análisis (donde la unidad mínima es el predio), se requiere en primera instancia establecer su grado de exposición ante los dos tipos de eventos posibles: caída de bloques (talud rocoso) o deslizamiento rotacional (talud en suelo). Para el efecto se definen varias posibles zonas de localización del predio, en función de las cuales posteriormente se establece la vulnerabilidad. Si el lote se encuentra vacío, por no haber elemento físico expuesto, la vulnerabilidad es nula.

En la zona baja del talud rocoso, hacia donde viajarían los bloques, la vulnerabilidad física de las unidades habitacionales, se basa en la contrastación de su resistencia, expresada en términos de *velocidad de impacto resistible* - V_r y la velocidad que pueda tener el bloque en su paso por el predio, es decir la *velocidad de impacto* - V_x . La primera variable, V_r , se asigna de acuerdo con la calidad de la vivienda (competencia estructural) la cual se desprende a su vez de distintos indicadores como tipo de cubierta, daños en los elementos estructurales, etc. La segunda, V_x de los resultados arrojados por el programa CRSP (Colorado Rock Fall Simulation Program).

Las demás zonas son calificadas cualitativamente según su exposición y su resistencia o competencia estructural.

En total se encuentran 34 viviendas con vulnerabilidad alta según la Figura 2.

7 EVALUACIÓN DEL RIESGO POR FRM

Como resultado de la superposición de la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad se estimaron los niveles de riesgo existentes a escala 1:500, por medio de un método cualitativo para su evaluación. En total se encuentran 30 viviendas en alto riesgo. (Ver Figura 3).

8 ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN

Se plantearon en total seis alternativas de mitigación hacia el talud oriental (escarpe rocoso) consistentes entre barreras como jarillon y muro en gavión hasta malla anclada

con mortero y cuatro hacia el talud noroccidental (suelo) consistente principalmente en manejo de drenaje.

Del análisis de costo beneficio, riesgo aceptable y los árboles de decisión la mejor alternativa para el talud oriental es la construcción de la malla anclada con mortero y para el talud noroccidental la ejecución de cunetas. Para las alternativas igualmente se definió el plano de amenaza con obras con el fin de dilucidar el mejoramiento o disminución de los niveles calculados.

En este talud es necesario realizar mantenimiento periódico del sistema de drenaje con el fin de disminuir la amenaza y no realizar obras importantes.

9 DISEÑO DE OBRAS DE MITIGACIÓN

De acuerdo a la elección de la alternativa de diseño dada por análisis de árboles de decisión que corresponden a malla anclada con mortero, se realizó la visita a campo con el fin de detallar las obras dividiendo el talud oriental (hacia el escarpe rocoso) en seis zonas y hacia el talud noroccidental (en suelo). Para ello se cuentan con dos Planos de planta y uno de detalles, así como el presupuesto y especificaciones de diseño. El valor total de la obra es de alrededor de noventa millones de pesos. De la misma forma se recomienda obras de emergencia consistentes en perfilado de bloques inestables cuya obra oscila por los cuatro millones de pesos, siendo necesario realizarlo en el menor tiempo posible.

10 CONCLUSIONES

El estudio se enmarca al sur de la ciudad, localidad de Ciudad Bolívar, barrio San Isidro sectores Cerrito I, II, III y Carboneras, lugar que en su parte oriental corresponde a una antigua explotación de canteras que expuso las areniscas fracturadas de la formación Guaduas medio (TKgmm) en un escarpe de hasta 300m de longitud, 6m de altura y pendientes cuasiverticales. Al noroccidente un talud de menores dimensiones, longitud 150m y altura 3m, exhibe buena cobertura de pastos sobre suelos coluviales con una pendiente de 35°. En la parte superior e inferior de los taludes mencionados se emplazan viviendas de distintas tipologías estructurales desde recuperación hasta sistemas aporticados.

Los fenómenos potenciales de inestabilidad identificados se sectorizan según el talud: al noroccidente, deslizamientos rotacionales de los cuales en la actualidad no hay evidencias y al oriente, caídas de rocas, alojadas en la base del talud.

El estudio secuencialmente consistió en el levantamiento topográfico detallado del sector incluyendo los rasgos morfológicos más relevantes y los elementos urbanos como viviendas, servicios públicos, obras, etc; la definición del modelo estratigráfico plasmado en planta y en secciones; levantamiento estructural del macizo rocoso; modelo geomorfológico; caracterización geomecánica (exploración del subsuelo, directa e indirecta, – ensayos de campo y laboratorio – caracterización); análisis de estabilidad, evaluación de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

La evaluación condujo a la asignación de diferentes niveles de amenaza: alta, media y baja. Las viviendas ubicadas en zona de amenaza alta son: Manzana 7, Viviendas 2, 6 y

7; Manzana 8, Viviendas 7 a 9; Manzana 15, Viviendas 7, 8 y 12; Manzana 16, Viviendas 2, 3 y 4; Manzana 55, Viviendas 3 y 25; Manzana 56, Viviendas 24; Manzana 57, Viviendas 1 y 2; Manzana 59, Viviendas 5 y 8 y, Manzana 60, Viviendas 2 y 3

Estas viviendas fueron ubicadas en zonas de amenaza alta pues se encuentran dentro del área de influencia directa de los procesos morfodinámicos.

La conjunción de las condiciones estructurales (resistencia o competencia estructural) y el posicionamiento (exposición) de las viviendas coadyuvaron a su clasificación dentro de la categoría de alta vulnerabilidad ante los eventos amenazantes particulares de las siguientes: Manzana 7, Viviendas 2 a 7; Manzana 8, Viviendas 7 a 10, 12; Manzana 15, Viviendas 6 a 8, 12 y 13; Manzana 16, Viviendas 2 a 5, 7; Manzana 54, Vivienda P1; Manzana 55, Viviendas 1 a 3 y 25; Manzana 56, Viviendas 2,3 y 24; Manzana 57, Viviendas 1, 2, 4 y 26 y, Manzana 59, Vivienda 5

Una vez analizadas las condiciones de amenaza y de vulnerabilidad, a cada unidad habitacional se le asignó su nivel de riesgo como alto, medio o bajo. Las viviendas aferentes al talud oriental en riesgo alto son: Manzana 7, Viviendas 2, 3, 6 y 7; Manzana 8, Viviendas 7 a 10; Manzana 15, Viviendas 6 a 8, 12 y 13; Manzana 16, Viviendas 2 a 4 y, Manzana 59, Viviendas 5 y 8. Las viviendas aferentes al talud noroccidental y que se ubican en zona de alto riesgo son: Manzana 54, Vivienda 54A; Manzana 55, Viviendas 1 a 3 y 25; Manzana 56, Viviendas 2, 3 y 24 y, Manzana 57, Viviendas 1, 2, 4 y 26

El análisis de la relación beneficio-costado de varias alternativas de mitigación del riesgo, en cada uno de los taludes mencionados, condujo a sugerir al DPAE la elección de una malla de triple torsión sujeta con anclajes de 2,0 m de longitud a la roca en el talud oriental y sistemas de manejo de agua superficial en el talud noroccidental. Ante la eventualidad e incertidumbre de daños y/o roturas de tubos en este sector, hecho que podría detonar un deslizamiento rotacional de suelo, se sugiere establecer mecanismos interinstitucionales que involucren a la EAAB-ESP en la atención inmediata de ellos o en su prevención.

Estas actividades de mantenimiento del sistema de drenaje o inclusive la construcción del sistema de drenaje de aguas lluvias en este sector hará posible que el riesgo disminuya en este talud noroccidental y la zona pueda ser estable en el tiempo sin necesidad de reubicar o realizar obras de mitigación costosas.

Por otra parte, se recomienda la reubicación de la vivienda de la manzana 54 – lote 54A (talud noroccidental), pues su emplazamiento no corresponde con el ordenamiento urbano al ubicarse en el trazada de la vía de la calle 60 sur.

De la misma forma es necesario que la DPAE realice el perfilado del talud en los sitios indicados en forma urgente o en un tiempo corto con el fin de evitar pérdidas humanas o infraestructura. En la semana del 6 al 10 de octubre se presentó la caída de un bloque del orden de 1.5x1x1m en la zona 2, sitio recomendado para el perfilado sin causar daños y llegando solo hasta la mitad de la distancia de viaje crítica (amenaza alta), lo cual justifica intervenir en forma inmediata.

Figura 1 Zonificación de amenaza. Escenario actual

Figura 2 Zonificación de vulnerabilidad

Figura 3 Zonificación de riesgo por remoción en masa