## 2.7. ESTUDIO GEOTECNICO

### 2.7.1. Objetivo, Alcance y Metodología

El estudio geotécnico tiene por objeto la definición del modelo y de los parámetros de cálculo para la evaluación de la estabilidad de las áreas críticas por fenómenos de remoción en masa (FRM), y la determinación de la amenaza geotécnica.

El alcance del estudio geotécnico abarca los siguientes aspectos:

- Identificación de los sitios inestables.
- Exploración del subsuelo por medio de perforaciones y apiques.
- Ensayos in-situ y de laboratorio.
- Elaboración de perfiles de suelos.
- Caracterización geotécnica.
- Zonificación geomecánica.
- Análisis deterministíco de estabilidad.

La caracterización geotécnica del área se hizo a partir de la información obtenida durante la exploración geológica y geotécnica.

Inicialmente con base en los mapas geológicos, geomorfológicos y de identificación de los procesos se elaboró el mapa preliminar de áreas homogéneas por susceptibilidad a los FRM, utilizando la metodología desarrollada por Tchemodanova V. (1998), la cual emplea un sistema matricial para la evaluación de la susceptibilidad.

Dicho mapa preliminar permitió definir once (11) áreas críticas, donde se realizaron los trabajos detallados de exploración geotécnica.

En estas áreas se realizaron levantamientos topográficos, perforaciones y/o apiques, ensayos in-situ y obtención de muestras de suelos para ensayos de laboratorio.

Sin embargo, la exploración geotécnica no se restringió solamente a estas áreas críticas. Para la caracterización de cada una de las unidades litoestratigráficas presentes en el área de estudio también se tomaron unas muestras de suelos desde los cortes realizados para la construcción de las viviendas, donde fue posible recuperar muestras de bloque para los ensayos de laboratorio.

Con base en la exploración geotécnica, ensayos in-situ y de laboratorio se ajustó el mapa se susceptibilidad a los FRM, se elaboró el mapa de caracterización

geomecánica de áreas homogéneas y se definieron los parámetros para los cálculos de estabilidad.

### 2.7.2. Investigación del Subsuelo

#### 2.7.2.1. Exploración

Los objetivos y alcances de los trabajos a realizar fueron formulados en los Términos de Referencia del DPAE, y los sitios críticos donde se requería levantamiento topográfico y la exploración del subsuelo fueron definidos en la visita técnica conjunta con la entidad contratante y la Interventoría.

Los alcances especificados en los Términos de Referencia fueron las siguientes:

- Levantamiento topográfico de áreas críticas.
- Realización de apiques y trincheras.
- Toma de las muestras de suelo.
- Ensayos de laboratorio.
- Ensayos de campo.

Todas estas tareas fueron para la evaluación y el análisis cuantitativo de estabilidad geotécnica del área y los análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.

Los sitios críticos, donde se requería realizar el levantamiento topográfico y la exploración de suelos, fueron definidos con base en la zonificación geotécnica por áreas homogéneas y la definición de la susceptibilidad del terreno a los fenómenos de remoción en masa, y con base en el plano de los procesos identificados en el terreno.

Los sectores de susceptibilidad alta, ubicados en el levantamiento topográfico y donde se realizó la exploración geotécnica, se presentan en la figura 2.10, en la cual se identifican once áreas, conformadas principalmente por depósitos antrópicos de escombros de excavación localizados en los valles de erosión y/o cárcavas.

De acuerdo con la cantidad de las zonas identificadas, se programó la ejecución de 10 apiques y 5 perforaciones en los cuales se realizaron los ensayos de campo y se tomaron las muestras de suelos para los ensayos de laboratorio. En su mayoría, estos apiques y perforaciones atravesaron los rellenos antrópicos. La relación de apiques y perforaciones se presenta en los cuadros 2.10 y 2.11 respectivamente, y sus registros con fotos en el anexo 4.

**Figura 2.10** Ubicación de apiques (AP) y perforaciones (s)

**Cuadro 2.10.** Relación de apiques ejecutados

| No. | Localización | Profundidad (m) | Material Excavado |
|---|---|---|---|
| 1 | Manzana 53 Lote 27 | 1.65 | Relleno antrópico de escombros, recebo y basuras con fragmentos de roca de hasta 15 cm de diámetro. La matriz del relleno es arenolimosa, y se encuentra en estado seco y suelto. |
| 2 | Manzana 37 Lote 30 | 2.35 | Relleno antrópico en la parte media de la cárcava principal, conformado por fragmentos y bloques de arenisca embebidos en una matriz arenolimosa con tonos claros en superficie, y oscuro en profundidad. Está mal compactado y ligeramente húmedo. |
| 3 | Manzana 28 Lote 16 (vía) | 2.04 | Relleno compuesto por recebo, fragmentos de arenisca y basuras con matriz arenolimosa de color café claro. El relleno se encuentra muy saturado y contaminado por aguas servidas. |
| 4 | Manzana 17 Lote 41 al Norte (Cárcava principal) | 1.80 | Relleno de la cárcava, constituido por bloques de arenisca y basuras con matriz arenolimosa, y la cobertura vegetal del lecho de la cárcava. |
| 5 | Manzana 73 Lote 3 | 1.95 | Relleno antrópico compuesto por escombros, basuras, recebo, con poca matriz (a 1 metro de profundidad) y materiales arenolimosos, color oscuro que constituyen la matriz de los fragmentos de roca y basuras (plásticos y trapos). |
| 6 | Manzana 76 Lote 6 | 1.35 | Relleno compuesto por recebo, fragmentos de arenisca en matriz arenolimosa y bloques de arenisca de 20 a 70 cm de diámetro, los cuales hacen parte del depósito coluvial. |
| 7 | Manzana 77 Lote 4 | 1.90 | Relleno antrópico. Se encontró un bloque de arenisca de 1 m de espesor, en matriz arcillosa. |
| 8 | Manzana 79 Lote 4 | 1.50 | Relleno antrópico seguido por una capa arenolimosa de color gris claro, el horizonte Neme y el suelo residual. |
| 9 | Manzana 65 Lote 8 | 2.0 | Relleno antrópico de cárcava, muy heterogéneo compuesto por bloques con matriz arenolimosa, y arcillosa. Muy poco consolidado, y saturado hacia el fondo por aguas servidas. |
| 10 | Manzana 69 Lote 36 | 1.7 | Una capa delgada de relleno, la cual ha sido removida en su mayor parte, seguida de un horizonte de arenisca muy friable de color blanco. De igual manera aparece la capa de Neme característica del sector, y en el fondo del apique se encuentra el depósito de coluvión. |

Como se puede observar en los registros de perforación, el espesor máximo de rellenos antrópicos en cárcavas es de 6.5 m. Por debajo del relleno frecuentemente (3 casas de las 5) se presenta el suelo orgánico negro y/o el horizonte "Neme", por debajo de los cuales se presenta un material eluvio-deluvial, compuesto por arenolimoso de color amarillo rojizo, de plasticidad media a alta.

En ninguna de las perforaciones encontró el nivel freático.

En los apiques también se observó que la depositación de rellenos antrópicos se realizó encima de la capa vegetal orgánica y/o el horizonte "Neme", después del cual sigue el material eluvio-deluvio o coluvión (ver fotos de los apiques No. 2, 5, 8, 10 del Anexo). En los apiques No. 2, 3, 6 y 9 se ha encontrado el material completamente saturado o muy húmedo a partir de 1.5 m de profundidad.

**Cuadro 2.11** Relación de perforaciones ejecutadas

| Perforación | Localización | Profundidad m | Agua | Material excavado | SPT golpes/pie |
|---|---|---|---|---|---|
| "S" - 1 | Vía frente a las manzanas 24 y 25. | 8.2 | seco | 0.0-6.5 m -Relleno | 4-7 |
| | | | | 6.5-8.0-Suelo orgánico negro | 12-14 |
| | | | | 8.0-8.2-Eluvio | >20 |
| "S" - 2 | Manzana 53 Lote 28 | 6.2 | seco | 0.0-5.0 Relleno | 5-16 |
| | | | | 5.0-6.2 Eluvio Deluvio | >45 |
| "S" - 3 | Manzana 54 Lote 25 | 3.2 | seco | 0.0-2.5 Relleno | 4 |
| | | | | 2.5-2.9 Neme | 30-40 |
| | | | | 2.9-3.2 Eluvio Deluvio | >70 |
| "S" - 4 | Vía frente a la Manzana 64 | 5.0 | seco | 0.0-3.2 Relleno | 5-10 |
| | | | | 3.2-5.0 Eluvio Deluvio | >38 |
| "S" - 5 | Manzana 64 Lote 6 | 5.0 | saturado | 0.0-4.0 Relleno | 4-6 |
| | | | | 4.0-4.5 Suelo | 5-6 |
| | | | | 4.5-5.0 Eluvio Deluvio | 26 |

Al excavar los apiques 3 y 9 las paredes se derrumbaron. El agua provenía de las fugas de las mangueras de acueducto y de la saturación por aguas vertidas (ver fotos en el anexo). En estos apiques se obtuvieron las muestras en bloques y un tubo Shelby para su ensayo en el laboratorio.

### 2.7.2.2. Ensayos in-situ

Se realizaron ensayos in-situ en cada uno de los apiques y perforaciones.

En los apiques se efectuaron los ensayos de permeabilidad, densidad in-situ, granulometría simplificada (tamiz #4), y la resistencia a la penetración con el penetrómetro de bolsillo. El resumen de los resultados obtenidos se presenta en el cuadro 2.12.

En las perforaciones se realizaron los ensayos de SPT. Los resultados obtenidos se presentan en los registros de perforación incluidos en el anexo 4 y en el cuadro 2.11.

### 2.7.2.3. Ensayos en laboratorio

Se obtuvieron trece (13) muestras para ensayos de laboratorio, once (11) de los apiques y dos (2) de cortes de los taludes. Debido al estado del material seco, se pudieron recuperar cuatro (4) muestras inalteradas, a las cuales se les practicaron los ensayos de corte directo, peso unitario y clasificación. En las muestras alteradas y de acuerdo a su composición se realizaron ensayos de:

- Clasificación
- Humedad natural
- Granulometría
- Desgaste
- Compactación (Proctor Estándar)

Los anteriores ensayos se efectuaron con el fin de obtener -en forma indirecta- los parámetros de resistencia al corte. Los resultados obtenidos se presentan en el anexo 5 y se resumen en el cuadro 2.13, donde se puede observar que la mayor parte de los ensayos se efectuó sobre muestras de rellenos antrópicos, debido a que estos materiales tienen la mayor presencia en el área y conforman las áreas potencialmente inestables.

El análisis de los resultados de ensayos de campo y de laboratorio se presenta a continuación.

### 2.7.3. Caracterización Geotécnica

#### 2.7.3.1. Definición de las propiedades fisico-mecánicas de rocas y depósitos no consolidados

Como se desprende del estudio geológico y de la exploración geotécnica, el área ocupada por el Barrio Caracolí se encuentra conformada por seis (6) unidades litoestratigráficas principales, y que difieren por su génesis desde los más antiguos hasta las más recientes:

- Rocas de las Formaciones Arenisca Tierna y sus saprolitos y Arenisca de Labor (Ksgt, ksgts y Ksgl)
- Depósitos eluvio-deluviales (Qed)
- Coluviones (Qlc)
- Proluviones y/o Flujos de Tierra (Qft)
- Horizonte Neme (Qsn)
- Rellenos antrópicos (Qae y Qac)

Cada una de las unidades anteriores se caracterizó por sus propiedades fisico-mecánicas con base en los ensayos de laboratorio y de campo, empleando además los datos existentes en estudios anteriores realizados en Santafé de Bogotá.

- Propiedades de las rocas de las Formaciones Arenisca Tierna y Arenisca Labor

Las propiedades fisico-mecánicas de las rocas fueron tomadas de las investigaciones realizados por Tomás Shuk para el Túnel los Rosales de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, que incluyen datos de los ensayos de muestras en laboratorio, como del macizo, determinados por el Método de Taludes Naturales (MTN)[1]. Las propiedades físico-mecánicas de las rocas se presentan en el cuadro 2.14. Estos valores son los que se utilizaron para el cálculo de estabilidad de los taludes en roca.

[1] Tomás Shuk y Departamento de Ingeniería de la Universidad de los Andes (Diciembre de 1993). "Comprobación Experimental y Observacional de la Metodología de Taludes Naturales (MTN) – Túnel Los Rosales". Volúmenes I y II

En el presente estudio la Formación Arenisca Tierna fue separada del nivel de roca muy alterada, el cual se denominó como saprolito. Para este nivel se adoptó el límite inferior de los valores de "c" y "φ", correspondiente a la Formación Arenisca Tierna.

- Propiedades fisico-mecánicas de los depósitos eluvio-deluviales

De acuerdo con la descripción geológica y la clasificación de laboratorio, la formación eluvio-deluvial está compuesta por suelos duros de arenas limosas y limos arenosos con algo de gravas.

Los parámetros de "c" y "φ" fueron determinados en el laboratorio en el estado saturado, por medio de ensayos de corte no consolidados (ver cuadro 2.13), los cuales se emplearon en los cálculos.

- Propiedades fisico-mecánicas del Horizonte Neme (Qsn)

Esta unidad, aunque no fue cartografiada por su bajo espesor (30-40 cm), tiene mucha importancia por estar cubriendo casi toda el área de estudio, además de que la mayoría de construcciones están fundadas sobre ella. El horizonte Neme se presenta cubriendo saprolitos, eluvio-deluviales y coluviones, encontrándose frecuentemente sepultado por debajo de los rellenos antrópicos. Las propiedades del horizonte Neme fueron determinados en el laboratorio y en el campo.

En el campo se hizo la determinación de la resistencia a la penetración (Rp=3.16a > 4.5 kg/cm$^2$) y peso unitario ($\gamma$=1.9 T/m$^3$) en estado natural, que coincide con los ensayos de laboratorio (ver cuadros 2.12 y 2.13).

En el laboratorio se realizaron ensayos de clasificación, expansión y corte directo en estado saturado, arrojando los resultados presentados en el cuadro 2.13.

Según los resultados del ensayo de expansión controlada, el horizonte Neme, se caracteriza por aumento de volumen en un máximo de 11%, y genera una carga de 5 kg/cm$^2$; que lo caracteriza como de expansión media[2] .

El aumento máximo de volumen del nivel Neme, cuyo espesor es de 30 - 40 cm, representa un levantamiento máximo del terreno libre de construcciones en unos 3 cm, valor que se encuentra dentro de los límites del máximo permitido para las construcciones de uno o dos pisos en mampostería confinada.

[2] "Recomendaciones de diseño de fundaciones de construcciones", Moscú, 1986, pág 25

Es evidente que para las construcciones de características inferiores, cualquier deformación diferencial puede generar problemas de estabilidad, relacionados con la pérdida de resistencia por expansión, motivo por el cual es recomendable el retiro de esta capa de la base de las construcciones.

Para el cálculo de estabilidad de los taludes se tomaron los valores de peso unitario y parámetros de resistencia al corte determinados en ensayos de laboratorio.

- Propiedades fisico-mecánicas de los coluviones

Los depósitos coluviales están compuestos en un 90% por bloques con diámetros superiores a 20 cm en matriz arenosa, motivo por el cual en el laboratorio solo fue posible realizar la clasificación de la matriz (ver cuadro 2.13 y muestra 11 del anexo 5)

La definición de los parámetros c y $\varphi$ se realizó por medio de la metodología rusa[3], utilizando la granulometría y el peso unitario determinados en el campo. El cálculo de los parámetros, la ecuación empírica y el significado de los parámetros empleados se presentan en el cuadro 2.15.

- Propiedades fisico-mecánicas de rellenos antrópicos

Como se indicó en el capitulo de Geología, los rellenos antrópicos están representados por dos variedades:

– Rellenos de escombros, que conforman terraplenes de las vías principales y zonas comunales (Qae); y

– Rellenos de cárcavas (Qac).

De acuerdo con la exploración realizada, ambas se caracterizan por su composición y estado físico muy heterogéneo, por su grado de compactación muy variable, y frecuentemente están contaminados por materia orgánica y basura.

Las propiedades físico-mecánicas de los rellenos antrópicos fueron investigados por medio de los ensayos de campo y de laboratorio. Para la determinación de los parámetros de cálculo de estabilidad de taludes conformados por rellenos antrópicos, se realizó el análisis comparativo de los resultados obtenidos sobre las

[3] Normas Instituto Nacional de construcciones de la URSS, 1989

muestras de laboratorio, directamente in-situ, e indirectamente por ecuaciones empíricas, empleando los ensayos de SPT (González, 1998) y el método ruso (NINC, 1989).

La comparación de los resultados se presenta en el cuadro 2.16, que se elaboró con base en los cuadros 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 y anexos 4 y 5.

En el cuadro 2.16 se puede apreciar que:

**Cuadro 2.16** Comparación de resultados de ensayos de la Unidad Qae

| Parámetro | Laboratorio | In-situ | SPT | NINC |
|---|---|---|---|---|
| Humedad %<br>natural<br>Saturado<br>Optima | <br><br>21 ± 1<br>13.43 ± 0.94 | <br>15 ± 5<br>Saturado en apiques 2, 3, 6 y 9 | | |
| Tamiz 4% | 14 ± 7 | 41 ± 9 | | |
| Peso unitario<br>Seco<br>Saturado<br>Natural | <br>1.76 ± 0.04<br>1.90 ± 0.06 | <br><br>1.76 ± 0.28 | | |
| Clasificación | SC | Grava con bloques en matriz areno-limosa | | |
| Densidad máxima | 1.85 ± 0.09 | 1.99 ± 0.09 | Golpes/pie<br>7 ± 3 | |
| Densidad mínima | | 1.49 ± 0.17 | | |
| Cohesión, t/m$^2$<br>de - a<br>Media | Saturado<br>1.5 – 4.4<br>2.51 ± 1.21 | | <br><br>0.3 | <br>0.9 – 3.45<br>1.86 ± 0.8 |
| Angulo de fricción interna,<br>pico<br>Residual<br>Efectivo | Saturado<br>25° - 28°<br>21° - 27°<br>- | - | <br><br><br>22º – 34º<br>27º ± 3º | <br><br><br>17º - 23º |

- Por su humedad natural, los rellenos antrópicos se encuentran desde un estado seco a ligeramente húmedo (con una humedad inferior al Límite Plástico), hasta un estado saturado, y se evidencia una tendencia de aumento de humedad con la profundidad.

- El porcentaje de la fracción gruesa > 4 mm, determinado en las muestras llevadas a laboratorio, es inferior al obtenido in-situ.

- En el laboratorio se clasificó el material principalmente como SC; y en el campo como gravas y bloques en matriz areno-limosa.

- El peso unitario determinado en el campo varía dentro de un intervalo muy amplio, encontrándose el material con una compactación de 64% a 98% (promedio de 81%, a 2 m de profundidad), en relación con el obtenido en el ensayo Proctor Estándar.

- La cantidad de Golpes/pie varía de 4 a 10, presentando una tendencia al aumento con la profundidad.

- El valor de la cohesión, definido en el laboratorio sobre las muestras saturadas es casi 10 veces superior que el calculado con los datos del ensayo SPT (González, 1998), y 25% superior el obtenido por el método ruso (NINC, 1989). El último puede ser correlacionado con la diferencia en el contenido de fracción fina de las muestras e in-situ.

- El ángulo de fricción interna pico, definido en el laboratorio sobre la muestra saturada, es similar al promedio efectivo calculado con los datos del SPT.

- El ángulo residual de ficción interna tomado de las gráficas de ensayos de laboratorio, es un 11% inferior al del ensayo de SPT, y 16.6% superior al calculado por el método ruso. Esta variación puede considerarse como aceptable.

De acuerdo con el análisis comparativo de los resultados de los ensayos para efectos del cálculo de estabilidad, para los rellenos antrópicos de escombros (Qae) que conforman terrazas antrópicas, y donde existe alguna compactación de los materiales, se considera que pueden ser utilizados los valores mínimos de las propiedades fisico-mecánicas obtenidos en el laboratorio.

Para los rellenos antrópicos en cárcavas que tienen baja compactación, se considera apropiado utilizar las propiedades físicas obtenidas en ensayos de campo, y los valores de “c” y “$\varphi$” calculados por el método ruso, que resultan adecuadamente conservadores.

- Propiedades físico- mecánicas del Proluvio y/o Flujo de Tierra (Qtl)

En esta unidad no se realizaron ensayos, debido a su estado de saturación por aguas negras. Sus propiedades fisico-mecánicas se dedujeron a partir de su composición. Los materiales que componen los flujos son los mismos rellenos antrópicos sueltos, contaminados por materia orgánica y basuras, por lo que se les asignaron los valores mínimos obtenidos en el campo para los rellenos

antrópicos de los apiques presentados en el cuadro 2.12 y calculados por el método ruso (ver cuadro 2.15).

### 2.7.3.2. Zonificación Geomecánica

La zonificación geomecánica corresponde a una zonificación por áreas homogéneas que se hace con el propósito de caracterizar espacialmente el terreno, de acuerdo con las propiedades de las rocas y depósitos no consolidados que conforman el área de estudio. Una parte de esta tarea, es la compaginación de la información geológica, geomorfológica y geotécnica con las propiedades fisico-mecánicas de los materiales que conforman dicha área.

El alcance de la zonificación llega hasta la elaboración de un mapa de áreas geomécanicamente homogéneas, efectuada con base en sus propiedades fisico-mecánicas, y la creación de una base de datos que permita definir los parámetros para evaluar la estabilidad y la amenaza, y el diseño de las obras necesarias para reducir el riesgo geotécnico.

La definición y caracterización de las áreas homogéneas se realizó mediante el análisis de la información geológica regional y local, y los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio utilizando las bases teóricas y prácticas disponibles en la literatura técnica correspondiente a estos temas (Tchemodanova, 1998).

La delimitación de las áreas homogéneas se realizó confrontando el mapa geomorfológico con el mapa geológico.

En primera instancia, se determinó la pertenencia del área de estudio a dos (2) bloques tectoestructurales que se caracterizan por la homogeneidad de las condiciones tectoestructurales y paleo históricas.

El primer bloque corresponde a la parte alta del área, ubicada al norte de la Falla de Terreros. Es un bloque levantado al que se le asignó el número romano I. El segundo (II) bloque esta hundido y se ubica al sur de la misma falla. (ver cuadro 2.17 y mapa 6).

Luego, teniendo en cuenta el criterio morfogenético, que comprende el proceso de formación del relieve actual, cada uno de los bloques anteriores se dividió en dos (2) grandes zonas que se denominaron como:

- D, donde predomina el proceso Denudativo, y conformada por rocas de las Formaciones Arenisca Tierna (Ksgt) o de Arenisca Labor (ksgl) localmente cubiertos por una formación eluvio-deluvial.

- A, con el predominio del proceso de acumulación de los materiales provenientes de la zona anterior. Esta zona está conformada por depósitos cuaternarios no consolidados.

A las zonas ubicadas en el bloque I se les asignó el índice I-D ó I-A, y las que se ubican en el bloque II se denominaron como II-D ó II-A.

Como se deduce del mapa Geomorfológico (mapa 4, anexo 3), cada una de las zonas anteriores se componen de diferentes unidades geomorfológicas (D-1, D-2, A-1, A-2, A-3, A-4). Con base en lo anterior se definieron las áreas homogéneas a nivel de unidades geomorfológicas, las cuales se denominaron: I-D-1, I-D-2, I-A-1, I-A-2, etc. (ver cuadro 2.17 y mapa 6).

La siguiente división se hizo teniendo en cuenta que las unidades geomorfológicas anteriormente nombradas generalmente están conformadas por rocas o depósitos no consolidados de diferente génesis (antrópicos, deluviales, coluviales, etc), motivo por el cual sus características geotécnicos no pueden ser iguales. Pues como se sabe, las propiedades fisico-mecánicas dependen del génesis de las rocas. Es así, como la unidad I-A-1 se dividió en los sectores conformados por depósitos antrópicos en cárcavas (I-A-1-ac) y depósitos de flujo de tierras (I-A-1-ft) tal como se puede ver en el cuadro 2.17 y mapa 6.

En el cuadro 2.17 y el Mapa Geomecánico (anexo 3) se presenta la ubicación y caracterización geomecánica de cada uno de los sectores obtenidos. En esta caracterización se definen las propiedades de las diversas unidades geológicas por su génesis, edad, litología y grado de alteración y/o consolidación. Las propiedades físicas, hídricas y mecánicas se apoyaron en los resultados de los ensayos de laboratorio y de campo.

Los valores de las propiedades fisico-mecánicas que aparecen en el cuadro 2.17, se tomaron como parámetros de cálculo de estabilidad de los taludes.

### 2.7.3.3. Perfiles del subsuelo

Los perfiles de subsuelo se elaboraron para las zonas geomecánicas que fueron levantadas topográficamente, es decir para las áreas potencialmente inestables.

En el mapa geomecánico (Anexo 3) se ubicaron los apiques y sondeos de exploración, lo mismo que los diez (10) perfiles geotécnicos, que se presentan en un plano por separado (plano 6, anexo 3).

En cada uno de los perfiles se dibujaron las superficies del terreno, correspondientes a la topografía del año 1979 (plano IGAC) y la topografía actual,

que permite observar los espesores de rellenos antrópicos y la modificación del relieve.

En general los cambios topográficos son bastante notables y se concentran en la parte media y baja del área, exceptuando el relleno de la parte superior de la cárcava principal. Los depósitos que alcanzan los mayores espesores corresponden a los de escombros, seguidos por las cárcavas y flujos de tierra. El depósito eluvio-deluvial presenta una disminución en su espesor de la parte media a la inferior del área.

Los cortes tienen una dirección preferencial que coincide con el alineamiento de las cárcavas y corta perpendicularmente las vías principales, involucrando unidades tales como flujos de tierra, depósitos antrópicos de cárcavas y escombros los cuales yacen sobre los depósitos de neme, eluvio deluvial y las areniscas de las rocas de las Formaciones Arenisca Tierna y Arenisca Labor.

Los perfiles se elaboraron con base en el levantamiento geológico directo sobre el terreno y la exploración del subsuelo por medio de apiques y perforaciones, cuyos registros se presentan en el anexo 4.

### 2.7.4. Análisis de estabilidad

En cada una de las zonas potencialmente inestables se realizaron análisis de estabilidad de los taludes, seleccionando las secciones típicas de cada zona así:

| | |
|---|---|
| a) Zona paradero | Sección F- F’ |
| b) Zona del Colegio | Sección L - L’ |
| c) Manzana 69 | Sección J – J’ |
| d) Cárcava principal | Sección B - B’ en la parte inferior |
| | Sección C - C’ en la parte superior oeste |
| | Sección D - D’ en la parte superior este |
| | Sección E - E’ en la parte central |
| e) Manzanas 30 y 77 | Secciones H - H’ y I – I’ |
| f) Manzana 80 | Sección G - G’ |

Las secciones se encuentran indicadas en el mapa No. 6.

Los parámetros de cálculo utilizados para cada sección se tomaron de los valores adoptados para cada uno de los materiales que las componen (véase mapa No. 6) y por donde pueden ocurrir potencialmente las fallas.

**Cuadro 2.18.** Parámetros de Cálculo

| Denominación | Material | $\gamma$ kN/m$^3$ | $\gamma$ sat kN/m$^3$ | C kPa | $\varphi$° |
|---|---|---|---|---|---|
| Qac | Relleno mixto con basura | 15.6 | 17.1 | 25 | 13 |
| Qae | Relleno areno-arcilloso | 18.0 | 19.5 | 28 | 21 |
| Neme | Limo arenoso negro | 16.7 | 18.3 | 44 | 21 |
| Qed | Suelo residual | 17.4 | 19.2 | 50 | 17 |
| Qft | Flujos de tierra | 15.6 | 17.1 | 17 | 13 |

Los cálculos se realizaron utilizando el programa PCSTABL 5, el cual permite obtener resultados para diferentes condiciones del terreno analizado.

Teniendo en cuenta lo anterior, en cada talud se consideraron las siguientes condiciones:

- Talud no saturado, condición estática.
- Talud no saturado (seco), condición dinámica (con sismo)
- Talud saturado, condición estática
- Talud saturado, condición dinámica

Según las normas vigentes (NSR-98), en el caso dinámico se empleó una componente horizontal de aceleración de 0.3 g y una vertical de 0.15 g.

Se consideran como aceptables factores de seguridad superiores a 1.5 para la condición estática y superiores a 1.1 para la condición dinámica.

Se realizaron los análisis en cada una de las áreas potencialmente inestables, cuyas hojas de cálculo pueden ser observadas en el anexo 5. A continuación se describen los análisis efectuados en cada una de las áreas potencialmente inestables.

**a) Zona paradero. Sección F-F'**

Con el programa se corrieron diferentes superficies de falla potenciales, resultando como más críticas las siguientes:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Contacto entre el relleno y el terreno natural del antiguo caño. |
| 2 | Círculo por la parte media del relleno. |
| 3 | Círculo reducido en la parte más pendiente del relleno. |

Los siguientes son los resultados de los cálculos:

**Cuadro 2.19** Factores de Seguridad en la sección F-F'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | > 3.0 | 1.9 | 1.1 | 0.7 |
| 2 | > 1.7 | 1.7 | 1.1 | 0.7 |
| 3 | >2.4 | 2.4 | 1.7 | 0.9 |

Los factores de seguridad obtenidos reflejan las características reales del terreno, pues en general allí no se notan agrietamientos o inestabilidades, a excepción del sitio que comprende la superficie del talud aledaño a la carrera 47B, donde ocurren desprendimientos de material.

Los factores de seguridad para la condición dinámica en talud saturado son bajos, pero es necesario tener en cuenta que no es previsible que tal concurrencia de fenómenos pueda ocurrir en la práctica, puesto que normalmente los taludes no están saturados. Inclusive, las perforaciones y apiques ejecutados no mostraron presencia de agua hasta profundidades de 8 m, a pesar de que en la zona no hay un manejo adecuado de las aguas.

De acuerdo con lo anterior, si se presenta el sismo de diseño, este casi seguramente ocurriría en taludes de condiciones no saturadas, y su factor de seguridad sería de 1.1, lo cual se considera aceptable.

El área del paradero no requiere obras de estabilización diferentes al manejo adecuado de las aguas de escorrentía y de desecho de las casas, para evitar que en un futuro el terreno se pueda saturar. Este manejo de aguas podrá darse con la construcción de las redes de acueducto y alcantarillado.

Sin embargo, en el terreno del talud aledaño a la carrera 47B, se nota una inestabilidad local, porque ese material, que ha sido colocado allí sin compactación, se encuentra en su punto de equilibrio límite, desestabilizándose fácilmente cuando en la pata del talud se efectúan excavaciones para construir las viviendas o suceden fenómenos de erosión.

De acuerdo con los resultados del ensayo de densidad en el terreno, comparados con el ensayo Proctor Estándar hecho en ese material, el grado de compactación es solo del 70%, cifra que indica la baja calidad del relleno.

Teniendo en cuenta que con el tiempo ese material es susceptible a un proceso lento de asentamiento, es lógicamente deducible que los problemas de agrietamientos de las viviendas obedecen a este fenómeno.

**b) Area del Colegio - Sección L - L'**

Al correr diferentes superficies de falla en el programa, se encontraron como más críticas las siguientes:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Contacto entre el relleno y el suelo natural del fondo del caño, el cual es de suelo residual. |
| 2 | Círculo en la parte media, que alcanza el contacto del relleno con el suelo residual. |
| 3 | Círculo en la parte baja del relleno, el cual llega hasta el contacto del suelo residual. |

Los resultados de los cálculos se presentan en el cuadro 2.20

De acuerdo con los resultados de los cálculos, se observa que el talud es estable para todas las condiciones de carga consideradas. Sin embargo, y localmente en algunos sitios puntuales donde la pendiente ha sido modificada para construir las viviendas, se pueden presentar inestabilidades.

**Cuadro 2.20** Factores de Seguridad en la sección L-L'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | >3.1 | 3.1 | >1.7 | 1.7 |
| 2 | >3.1 | 3.1 | >1.8 | 1.8 |
| 3 | >5.7 | 5.7 | >1.1 | 1.1 |

De otro lado, teniendo en cuenta que las aguas negras, de acueducto y de escorrentía no tienen un manejo adecuado, se observa en el terreno que estas realizan continuamente su labor de erosión, creando condiciones para que puedan ocurrir inestabilidades locales con el tiempo. Además, en épocas de lluvia las aguas inundan algunas casas, y producen ablandamientos del terreno con sus consecuentes asentamientos diferenciales.

Aunque no hay condiciones de inestabilidad general, es necesario controlar las inestabilidades locales y manejar las aguas para evitar fenómenos posteriores de remoción en masa.

**c) Manzana 69 - Sección J -J'**

Las superficies potenciales de falla más críticas que se pueden presentar son las siguientes:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Contacto entre relleno y suelo natural, en toda la longitud del perfil |
| 2 | Contacto entre relleno y suelo natural, en la parte superior del perfil |
| 3 | Contacto entre relleno y suelo natural, en la parte inferior del perfil. |

Los resultados de los cálculos se pueden apreciar en el cuadro 2.21

**Cuadro 2.21** Factores de Seguridad en la sección J-J'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | >1.9 | >1.9 | >1.5 | 1.0 |
| 2 | >3.7 | 3.7 | >2.1 | 2.1 |
| 3 | >4.5 | 4.5 | >2.7 | 2.7 |

El cálculo de estabilidad demuestra que la sección es estable en todos los sitios analizados, con grados de estabilidad que se consideran buenos; y los resultados indican que las posibilidades de fenómenos de remoción en masa son remotos.

Sin embargo en sitios locales, donde los taludes son más recientes, se presentan fenómenos de desprendimientos de bloques desde el talud. Esto ocurre por la acción erosiva de las aguas de escorrentía y puede llegar a inestabilizarse con el tiempo.

**d) Cárcava principal**

Dada la longitud y características de este rasgo, la cárcava se dividió en tres partes para su análisis.

– **Parte inferior - Sección B - B'**

En esta sección las superficies de falla más críticas son:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Parte más baja del talud, en el contacto entre los depósitos de flujos de tierra y el suelo residual. |

| Superficie | Características |
|---|---|
| 2 | Parte intermedia, aguas abajo del terraplén de la carrera 47A, en el contacto entre el suelo residual y el flujo de tierras. |
| 3 | Terraplén de la carrera 47A. |
| 4 | Aguas arriba del terraplén de la carrera 47A, en el contacto entre el flujo de tierras y el suelo residual. |

Los resultados de los cálculos se presentan en el cuadro 2.22

**Cuadro 2.22.** Factores de Seguridad en la sección B - B'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | >2.9 | >2.9 | >1.8 | 1.8 |
| 2 | >4.6 | >4.6 | >1.2 | 1.2 |
| 3 | 2.7 | 1.3 | 1.3 | 1.0 |
| 4 | >2.9 | >2.9 | >1.8 | 1.8 |

Los factores de seguridad obtenidos son altos aún para la condición dinámica de talud saturado, a excepción de la superficie 3, correspondiente al terraplén de la vía, donde los valores se reducen a 1.3 en la condición estática y 1.0 en la condición dinámica.

En esta sección que en general se tomó a lo largo del caño, se considera que la condición saturada del terreno es la más común, notándose que los factores de seguridad son adecuados.

La superficie 3 del terraplén es la parte más débil de esta sección y así lo comprueban los hechos, puesto que este material ya fue arrastrado por una creciente de la quebrada al obstruirse el tubo bajo el terraplén, donde luego de esto, el nivel del agua subió, saturó el talud, y se desbordó. El talud saturado, sometido a la carga hidráulica del agua acumulada tras el terraplén, ocasionó su falla.

En condiciones normales, este terraplén debe permanecer en condiciones no saturadas y de bajo contenido de humedad. Para asegurarse de esto, es necesario darle al tubo una sección adecuada, inclusive para que pasen libremente los desechos sólidos, con el fin de evitar que este se obstruya y el agua destruya el terraplén.

Con dicho aseguramiento el FS es apropiado.

- **Parte Central - Sección E - E'**

Las superficies potenciales de falla más críticas que se presentan en esta sección son las siguientes:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Terraplén de la carrera 47B. |
| 2 | Parte más baja de esta sección, incluyendo el terraplén de la carrera 47B, en el contacto entre el suelo residual y el relleno. |
| 3 | Parte más alta de la sección en el contacto entre el relleno y el macizo rocoso. |

En el cuadro 2.23 se pueden apreciar los valores del FS obtenidos por medio de los cálculos.

**Cuadro 2.23.** Factores de Seguridad en la sección E - E'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | 1.9 | 1.3 | 1.2 | 0.8 |
| 2 | >4.5 | >4.5 | >2.8 | 2.8 |
| 3 | >2.2 | 2.2 | >1.1 | 1.1 |

Esta parte se caracteriza por corresponder a una zona del caño donde se colocó una tubería, se rellenó, y luego se construyeron casas y vías sobre el relleno.

En general, esta sección considerada es estable aún en condiciones saturadas y así se evidencia en el terreno, pues no se aprecian agrietamientos y no se conocen reportes de problemas de estabilidad.

La parte más débil, y potencialmente inestable bajo condiciones saturadas y de sismo, corresponde al terraplén de la vía, el cual, en condiciones normales, debería estar en estado no saturado. Pero esa condición no se puede cumplir completamente en la práctica, debido a que allí confluyen las aguas de las vías y el terraplén no dispone de drenajes que las evacue. Tal situación se refleja en un FS inferior al requerido como aceptable.

En el terraplén es necesario implementar las medidas de mitigación para mejorar su estabilidad.

Además, es necesario verificar el diámetro de la tubería que colocaron bajo las casas, porque es necesario evitar que esta se tapone y desemboque en un

desbordamiento de las aguas, lo cual podría generar socavaciones en las vías, y la destrucción de los rellenos.

- **Parte superior - Sección D-D'**

Las superficies más críticas determinadas por los cálculos corresponden a las siguientes:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Contacto entre el flujo de tierras y el macizo rocoso. |
| 2 | Círculo en el flujo de tierras, en la zona de mayor pendiente del talud. |

En el cuadro 2.24 se pueden apreciar los valores de FS establecidos mediante los cálculos.

**Cuadro 2.24** Factores de Seguridad en la sección D - D'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | 1.8 | 1.2 | >1.2 | 1.2 |
| 2 | 1.1 | 0.7 | 0.7 | 0.4 |

Los resultados muestran que la sección tiene condiciones precarias e insuficientes de estabilidad, y así se evidencia en el terreno, pues son frecuentes los desprendimientos y la degradación de los taludes que conforman el caño. Sin embargo, tal como lo indica el cálculo para la superficie 1, la posibilidad de un deslizamiento por el contacto roca-suelo es algo remota.

Aunque esta sección está -en general- en condiciones insaturadas y de baja humedad, se requiere la implementación de medidas de mitigación para asegurar su estabilidad a falla circular.

- **Parte superior - Sección C- C'**

Esta sección, ubicada al occidente de la sección D - D' tiene las siguientes superficies de falla potenciales más críticas:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Contacto entre el relleno y el macizo rocoso. |
| 2 | Circulo en el relleno, sobre la parte más pendiente del talud. |
| 3 | Contacto entre el relleno y el macizo rocoso en la zona más pendiente del talud. |

Los resultados de los cálculos pueden apreciarse en el cuadro 2.25.

**Cuadro 2.25.** Factores de Seguridad en la sección C - C'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | 1.6 | 1.1 | 1.0 | 0.9 |
| 2 | 1.5 | 1.0 | 0.9 | 0.6 |
| 3 | 1.6 | 1.1 | 1.0 | 0.6 |

Este talud es similar al D -D', pero con la diferencia de que se encuentra alejado del caño, y está constituido por un relleno de material suelto sobre la superficie del perfil rocoso.

Normalmente el material no se encuentra saturado, razón por la cual su estabilidad tiene unos factores de seguridad aceptables para la condición estática insaturada y de baja humedad. Sin embargo, el aporte de agua proporcionado por las viviendas de su parte superior puede aumentar los niveles de agua subterránea, disminuyendo así la estabilidad de la ladera.

Además -y con sismo- los FS son bajos, encontrándose la ladera en riesgo de desestabilizase si ocurre un evento de la magnitud considerada en los cálculos.

De acuerdo con lo anterior, el talud requiere la implementación de medidas para mejorar su estabilidad, y para evitar la infiltración de agua que coadyuve a su saturación.

e) **Manzanas 30 y 77**

- **Sección H - H'**

En esta sección se evidencian las siguientes superficies potenciales más críticas de falla:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Parte inferior de la sección, en el contacto entre el flujo de tierras y el suelo residual. |
| 2 | Terraplén de la carrera 47A. |
| 3 | Parte superior, incluyendo el terraplén de la carrera 47B, en el contacto entre el relleno y el suelo residual. |

En el cuadro 2.26 se pueden apreciar los resultados de los cálculos del FS.

**Cuadro 2.26** Factores de Seguridad en la sección H - H'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | No saturado | Saturado | No saturado | Saturado |
| 1 | >1.9 | 1.9 | >1.1 | 1.1 |
| 2 | >3.6 | >3.6 | >1.7 | 1.7 |
| 3 | >2.5 | 2.5 | >1.2 | 1.2 |

Tal como indican los cálculos, en esta sección no son factibles los fenómenos de remoción en masa; y así se comprueba en el terreno, pues no hay evidencias de agrietamientos.

Sin embargo, y localmente en sitios donde se efectúan excavaciones para viviendas, se presentan caidos de material, y además, las aguas del caño producen socavaciones que pueden generar desprendimientos o deslizamientos en los puntos más críticos.

Es importante manejar las aguas negras, de acueducto y de escorrentía, para evitar problemas de inestabilidad en el futuro.

- **Sección I – I´**

En esta sección las superficies de falla más críticas son:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Círculo en el flujo de tierras, profundizado hasta el contacto con el coluvión. |
| 2 | Contacto entre el coluvión y el macizo rocoso. |

En estas potenciales superficies de falla los factores de seguridad calculados arrojaron los resultados indicados en el cuadro 2.27.

**Cuadro 2.27** Factores de seguridad en la sección I – I´

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | Seco | Saturado | Seco | Saturado |
| 1 | 2.3 | 1.7 | 1.3 | 1.0 |
| 2 | 4.0 | 2.9 | 1.9 | 1.9 |

Tal como lo muestran los cálculos, la posibilidad de deslizamientos del coluvión son remotas, aún en las condiciones de esfuerzos más desfavorables.

Las fallas en los flujos de tierra sí son factibles en el caso de que se presente el sismo de diseño y además el terreno esté saturado. En condiciones estáticas el terreno es estable en todas sus partes.

Localmente, existen pequeños desprendimientos ocasionados por las excavaciones realizadas para la construcción de viviendas, y por la acción de socavación del caño.

f) **Manzana 80 - Sección G - G'**

Las superficies potenciales de falla más críticas son:

| Superficie | Características |
|---|---|
| 1 | Contacto entre coluvión y roca, localizado en la parte baja del perfil. |
| 2 | Falla circular en el material coluvial de la parte baja. |
| 3 | Contacto entre el relleno de material mixto y el suelo residual. |
| 4 | Falla circular en el relleno de material mixto. |

Los resultados de los cálculos se pueden apreciar en el cuadro 2.28

**Cuadro 2.28.** Factores de Seguridad en la sección G - G'

| Superficie | Factor de Seguridad | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Condición estática | | Condición dinámica | |
| | Seco | Saturado | Seco | Saturado |
| 1 | 1.3 | 0.8 | 0.6 | 0.3 |
| 2 | 1.2 | 0.7 | 0.6 | 0.3 |
| 3 | >2.6 | 2.6 | >1.1 | 1.1 |

Teniendo en cuenta estos resultados, se obtiene que el coluvión de la parte baja es inestable, con tendencia a fallar incluso si no está saturado.

En la parte media y alta los materiales de relleno son estables con FS adecuado. Sin embargo hay inestabilidades locales que obedecen a acciones socavadoras de los caños y excavaciones para plataformas de viviendas.