CAPITULO 2

CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO DE LA CIUDAD

2.1 GEOLOGÍA LOCAL

La ciudad de Santafé de Bogotá se localiza en promedio a 2650 m de altitud sobre el eje de la Cordillera Oriental de Colombia. Geomorfológicamente se diferencian dos zonas: 1) la plana, ubicada hacia la parte central del área, en donde se concentra la mayor parte de la población y 2) de relieve montañoso con una parte habitada, otra dedicada a la minería de tajo abierto (canteras, gravilleras y chircales) y otra aún no intervenida por el hombre, localizada en los sectores oriental y suroccidental de la ciudad.

La zona plana es drenada por el río Bogotá que corre en sentido NNE-SSW con sus afluentes Tunjuelito, Fucha y Juan Amarillo. La zona montañosa es drenada por los ríos Tunjuelito, San Francisco y quebradas de menor caudal que corren en sentido S-N y E-W que al entrar a la zona plana sus cauces se utilizan como canales de conducción de las aguas servidas de la capital a los ríos Bogotá y Tunjuelito.

Geológicamente la ciudad se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá, y está rodeada por cerros constituídos por rocas de tipo arenisca, arcillolitas y conglomerados.

2.1.1 Litoestratigrafía

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, con edades entre el Cretáceo y Terciario, y depósitos sedimentarios pocos consolidados de edad Pleistoceno a reciente. (Caro et al, 1995). Se describen a continuación las unidades en orden cronológico de la más antigua a la más reciente (Figura 2.1)

2.1.1.1 Formación Chipaque (Ksch)

Constituída por lutitas limo-arcillosas de color negro, carbonosas, piritosas y laminadas, en bancos hasta de 10m de espesor, con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano muy fino, en estratos de 0.2 a 1.0m, que se acentúan hacia el tope. En los anticlinales de Bogotá, la parte que aflora tiene 130m de espesor y en el de Cheba 205m.

FIGURA 2.1

2.1.1.2 Grupo Guadalupe (Ksg)

Está compuesto por las Formaciones de Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna, cuyas características principales son las siguientes:

Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Aflora en los ejes y flancos de los anticlinales de Bogotá y Cheba y conforma los cerros más prominentes del área, tales como, Guadalupe, Monserrate, Alto el Cable, La Cruz, La Viga y Cheba. Esta constituída por areniscas cuarzosas, duras, de grano fino y color gris claro, bien cementadas, con intercalaciones esporádicas de capas de arcillolitas silíceas. Su espesor de acuerdo con columnas estratigráficas levantadas varía entre 308 y 460 m.
Es importante económicamente como acuífero y como material para la construcción.

Formación Plaeners (Ksgp)

Aflora en los flancos de los anticlinales de Bogotá y Cheba. Consta de tres conjuntos litológicos: a) uno inferior donde predominan arcillolitas silíceas con un espesor de unos 40m; b) otro intermedio donde alternan arcillolitas silíceas y areniscas de grano fino, con un espesor entre 70 y 117m y c) el superior donde predominan las arcillolitas silíceas con un espesor de aproximadamente 50m. Se utiliza como fuente de recebo, caolín y como acuífero en zonas fracturadas.

Formación Labor-Tierna (Ksglt)

Esta unidad aflora en el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá y flanco Oriental del Anticlinal de Cheba. Consta de tres conjuntos: a) uno inferior conformado por areniscas cuarzosas de color gris claro, de grano fino a medio, ligeramente friable y de espesor entre 135 a 165m; b) un conjunto intermedio donde predominan arcillolitas silíceas, con un espesor de 10 a 15m y c) el conjunto superior constituído por areniscas cuarzosas y feldespáticas, gris claras, de grano medio a grueso, con estratificación cruzada, en estratos de 0.2 a 3.0 m y de espesor variable entre 90 y 110m. Es importante como acuífero y proporciona la mayor parte de la “Arena de Peña” para la construcción.

2.1.1.3 Formación Guaduas (Ktg)

Aflora en los Cerros de Suba, en el piedemoente de los Cerros Orientales y en los sectores Sur y Suroeste de Santafé de Bogotá. Consta de tres conjuntos litológicos: a) parte inferior conformada por arcillolitas y areniscas de grano fino y con 70m de espesor; b) conjunto intermedio constituído por areniscas cuarzosas de color gris claro, de grano fino a grueso y con intercalaciones de arcillolitas y un manto de carbón de 0.4m. Tiene un espesor de 606m y c) conjunto superior constituído por arcillolitas de color gris oscuro, con intercalaciones de areniscas cuarzosas, de grano medio a grueso, y mantos de carbón; su espesor es de aproximadamente 324m. Esta unidad posee el carbón a nivel comercial en la Sabana de Bogotá. Las arcillas como producto de meteorización de la roca, se utilizan para la fabricación de ladrillo, bloque, teja y tubería. El nivel intermedio se considera importante como acuífero y como fuente de arena para la construcción.

2.1.1.4 Formación Cacho (Tpb)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental de Santafé de Bogotá, haciendo parte del flanco occidental del anticlinal de Bogotá. Litológicamente está constituída por areniscas de color amarillo rojizo, de grano grueso, con estratificación cruzada, en estratos de 0.1 a 2.0m y con un espesor de 50m. Es importante como acuífero y sus arenas se explotan como material de construcción.

2.1.1.5 Formación Bogotá (Tpb)

Aflora en los flancos del sinclinal de Usme-Tunjuelito. Consta de dos conjuntos: a) el inferior constituído por alternencia de arcillolitas y areniscas cuarzosas-feldespáticas, gris verdosas, de grano fino hacia la base y grueso hacia el tope, con un espesor de 620m; b) el conjunto superior constituído por arcillolitas gris oscuro, gris verdoso y marrón, por meteorización; su espesor sobrepasa los 100m. Las arcillas como producto de meteorización se utilizan para la fabricación de ladrillo, teja y tubería y como lechos impermeables para depósitos de basura.

2.1.1.6 Formación Arenisca la Regadera (Tpr)

Aflora hacia la parte media en las laderas del Valle del río Tunjuelito, haciendo parte del sinclinal Usme-Tunjuelito. Está constituída por capas de areniscas de cuarzo y fragmentos líticos, de color gris claro, con abundante matriz arcillosa, e intercalaciones de arcillolitas de color gris claro a oscuro, blandas y plásticas, las cuales predominan hacia el tope de la unidad. Su espesor es de 360m. Sus arenas son importantes como material de construcción; tiene poca importancia como acuífero por su alto contenido de matriz arcillosa.

2.1.1.7 Formación Usme (Tpu)

La parte inferior aflora a lo largo del eje sinclinal de Usme-Tunjuelito. La parte que aflora está constituída por limolitas y arcillolitas de colores gris oscuro y amarillo por meteorización. Se presenta en bancos de 4 a 20 m, con intercalaciones esporádicas de areniscas cuarzosas de grano muy fino a medio. La parte que aflora tiene un espesor de 150m.

2.1.1.8 Formación Tunjuelo (Qpt)

Aflora a lo largo del piedemonte oriental de Santafé de Bogotá, pero sus mejores afloramientos se presentan en el Valle del río Tunjuelito, entre Yomasa y la escuela de Artillería. Su litología está compuesta por bancos de bloques, guijarros, guijos y gránulos de areniscas, limolitas, arcillolitas y chert, dentro de una matriz areno-arcillosa poco consolidada. Ocasionalmente se presentan intercalaciones de capas de arena y limo-arcilloso de aspecto lenticular y estratificación horizontal. Su espesor se estima en unos 100m. De esta unidad se extrae la gravilla de mejor calidad que existe en la Sabana de Bogotá y se utiliza como agregado para concretos de alta resistencia.

2.1.1.9 Formación Sabana (Qs)

Constituye la mayor parte de la superficie plana del área de estudio; geomorfológicamente corresponde al nivel de terraza alta descrita en el mapa. Consta de arcillas plásticas de color gris oscuro, en estratos de 0.4 a 1.0m de espesor, con

interestratificaciones de lentes de arena y grava e intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco, las cuales son más abundantes hacia la parte media del depósito. Sus niveles arenosos y de gravas son importantes para el almacenamiento de agua. El espesor total alcanza los 320m.

Depósitos aluviales (Terrazas Bajas) (Qtb)

Los afloramientos son escasos y su delimitación ha sido hecha exclusivamente con base geomorfológica. Algunos de los afloramientos están constituídos por limos y arenas.

Coluvión (Qdp)

Son los depósitos productos de la fracturación, meteorización y erosión de rocas preexistentes, que han tenido transporte por acción del agua y de la gravedad y se han depositado en las partes media e inferior de las laderas. Sus mejores afloramientos se presentan en los piedemontes oriental, suroriental y suroccidental de área.

Suelo residual (Qrs)

Es el material producto del interperismo de las rocas y son importantes por su espesor, hasta de 10m, en la parte suroeste. Por tratarse de suelos predominantemente arcillosos, su permeabilidad es baja y su comportamiento geomecánico pobre.

Rellenos de excavaciones (Qr)

Son los depósitos que han resultado de acciones antrópicas para la adecuación de terrenos en el desarrollo urbanístico, principalmente en zonas pantanosas y deprimidas, donde el material utilizado es el sobrante sacado de las excavaciones. Estos depósitos abundan principalmente en los alrededores de Guaymaral, Aeropuerto El Dorado, Autopista Norte y Norte de Bosa.

Rellenos de Basura (Qb)

Están conformados por desechos sólidos que produce la ciudad y que se han concentrado sobre lechos relativamente impermeables, previamente excavados y acondicionados. Se destacan los rellenos sanitarios de El Cortijo, Gibraltar, Santa Cecilia y Doña Juana.

2.1.2. Geología estructural

Se describe a continuación, algunos de los rasgos estructurales más notorios y se presentan interpretaciones sencillas, con el objeto de aportar ideas acerca de la génesis de la depresión que hoy ocupa la Sabana de Bogotá.

Por la conformación tectónica y estructural, el área de trabajo se ha subdividido en tres partes: a) bloque localizado al norte de la falla de Usaquén; b) bloque al sur de la falla de San Cristóbal; c) bloque central hundido, situado entre las fallas de Usaquén y San Cristobal.

2.1.2.1 Bloque al norte de la falla de Usaquén

Es curiosa la desaparición, bajo los sedimentos de la sabana, de los cerros de Suba, Cota-Chía y Tabio-Tenjo, además de corresponder a estructuras anticlinales; los valles que separan estos cerros parecen haberse formado sobre depresiones estructurales de forma sinclinal. La linealidad y abrupta terminación de la punta sur de estos cerros, contra la prolongación de la trayectoria de la falla de Usaquén, el estilo estructural particular y la menor profundidad del relleno cuaternario, respecto al bloque central, de acuerdo con datos obtenidos por registros de geofísica, este bloque se interpreta como desgarrado del bloque central a través de la falla de Usaquén, en sentido lateral izquierdo, mediante movimiento de despegue hacia el W del bloque Central a través de las fallas de cabalgamiento como la de Bogotá.

Por otra parte, la continuidad de los Cerros Orientales hacia el Norte se ve interrumpida por la falla de Usaquén, sitio a partir del cual los cerros Guadalupe y Monserrate aumentan de altura notoriamente y el Bloque Central presenta desplazamiento lateral.

La falla de Usaquén está cartografiada en los cerros orientales de la Sabana, pero parece prolongarse más al suroriente por varias decenas de kilómetros. En estudios recientes su traza ha sido ubicada dentro de la Sabana, debido a su alineamiento en la parte sur de los cerros de Suba, Cota-Chía y Tabio-Tenjo y el control y alineamiento del cauce del río Juan Amarillo.

2.1.2.2 Bloque al sur de la falla San Cristobal

Se localiza al sur del Bloque Central teniendo como límite la prolongación de las fallas de San Cristobal-Facatativa. Como estructuras sobresalientes se menciona el sinclinal de Usme-Tunjuelito y la falla del río Tunjuelito , que parecen curvarse al noroeste, y la falla de Bogotá, aparentemente desplazada por la falla de San Cristóbal.

La falla de Tunjuelito es una falla inversa de dirección general NNE y buzamiento al oeste la cual, junto con la falla de Bogotá, practicamente delimita el sinclinal de Usme-Tunjuelito. La dirección de la inclinación del plano de falla, contrasta con el buzamiento de los planos de falla del Bloque Norte.

2.1.2.3 Bloque central

Limita con los bloques norte y sur por las fallas de Usaquén y San Cristobal-Facatativa, respectivamente. En este sector se tiene la mayor amplitud y profundidad del relleno Cuaternario de la sabana, además de otras particularidades como la inversión de las formaciones litológicas que conforman los cerros orientales.

La falla de Bogotá es una falla de cabalgamiento de dirección nor-noreste y plano buzando al este, el cual pone en contacto areniscas del Grupo Guadalupe y arcillolitas de la Formación Guaduas, sobre la parte media baja de los cerros al Oriente de Bogotá. Su traza está bien definida en los bloques Central y Sur, pero hacia el Norte, luego de Usaquén, no se tiene conocimiento de su continuidad.

La falla de San Cristobal controla el curso del río del mismo nombre, en los cerros orientales de la Sabana. Su prolongación hacia el sureste se manifiesta por una serie de rasgos topográficos y drenajes alineados. La prolongación de su traza hacia el NW

parece limitar el borde sur de la depresión de Funza, y de manera aproximada con el límite sur del relieve plano del valle de la sabana. Esta falla, junto con el sistema de fallas de Facatativa, marca la frontera sur de la cuenca de la Sabana de Bogotá las cuales probablemente ejercieron control tectónico, que sirvió de barrera estructural e impidió la depositación hacia el sur.

2.2 ESTUDIOS GEOFÍSICOS REALIZADOS

Los ensayos de prospección geofísica tuvieron por objeto caracterizar los sedimentos y rocas que conforman el depósito con propiedades físicas como velocidad de ondas de compresión (V_p), de corte (V_s), densidad (σ) y resistividad eléctrica (ρ), de los sedimentos y rocas. La integración de la interpretación de resultados de los diferentes métodos geofísicos determinó un modelo único de la cuenca sedimentaria con su correspondiente geometría y características geofísicas. (Rivera, et al, 1996)

La toma de datos de los diferentes estudios realizados se efectuó por separado y sus resultados fueron integrados en una fase de interpretación conjunta para la obtención de un modelo de la cuenca. Se realizaron ensayos de resistividad eléctrica, gravimetría y sísmica.

2.2.1 Estudios de resistividad eléctrica

2.2.1.1 Adquisición de los datos geoeléctricos

El método geoeléctrico utilizado se denomina sondeo eléctrico vertical (SEV), que consiste en registrar la variación en profundidad de la resistividad eléctrica de los sedimentos y rocas para un punto dado.

Se utilizó un arreglo tipo Schlumberger y los datos se tomaron con un equipo de resistividad eléctrica marca OYO.

2.2.1.2 Procesamiento de datos geoeléctricos

Los datos geoeléctricos fueron procesados con el paquete Resix Plus de la firma Interpex Ltda, el cual está basado en el método de aproximaciones sucesivas.

Los resultados obtenidos se generalizaron en perfiles y mapas para analizar la variación de la resistividad eléctrica de los materiales de la cuenca sedimentaria, tanto lateralmente como en profundidad.

2.2.1.3 Interpretación de resultados geoeléctricos

Los resultados obtenidos se agruparon en cinco unidades petrofísicas de variación de valores de resistividad eléctrica, a los que se les denominó “zonas de resistividad”, (Tabla 2.1).

Zona de resistividad	ρ, ohm-m	Pofundidad media,	Litología	Distribución areal

		h, metros		
1	15-60	0-25	Alternancia de arcillas, limos y algunas arenas parcialmente saturadas	Toda el área de estudio
2	10-20	25-50	Arcillas con algunas intercalaciones de limos	Toda el área de estudio
3	25-60	50-200	Intercalaciones de arenas con capas delgadas de arcillas y algunos limos	En la mayoría del área de estudio
4	10-19	200-300	Arcillas _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ Arcillolitas	Sector occidental _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _ Sector central y norte
5	≥100	<500	Areniscas con intercalaciones de limolitas saturadas	Áreas aledañas a los cerros orientales, cerros de Suba y en cercanías de Soacha

Tabla 2.1. Zonas de resistividad eléctrica

2.2.1.4 Mapas geoeléctricos

Con base en la información puntual de los SEV se realizaron dos mapas : el mapa de la profundidad del límite sedimento-roca y el mapa de contornos de la profundidad de la roca más compacta.

En el mapa de la profundidad del límite sedimento-roca, se sitúa dicho límite entre las zonas de resistividad 3 y 4. Los datos de este mapa fueron calibrados por los sondeos mecánicos realizados en INGEOMINAS y en la Universidad Agraria. Este mapa es confiable en los sectores sur, centro y norte (entre los cerros de Suba y cerros Orientales), mientras que hacia el occidente pierde su validez.

El mapa de contornos de la profundidad del techo de la roca más compacta o techo de la zona de resistividad 5, corresponde principalmente a areníscas. En el sector entre los cerros de Suba y cerros Orientales la variación de la profundidad muestra una cuenca o estructura sinclinal con una dirección norte-sur. Una estructura similar se observa al Oeste de Soacha, en donde la estructura sinclinal posee también una orientación norte-sur.

Estos mapas permitieron obtener una primera aproximación de la geometría de la cuenca.

2.2.2 Estudios gravimétricos

2.2.2.1 Adquisición de datos gravimétricos

El levantamiento de las estaciones gravimétricas se llevó a cabo con un gravímetro digital marca Scintrex, modelo CG-3, cuya resolución es de 0.01 miliGales y un rango dinámico de medida de 7000 miliGales.

Aún cuando el gravímetro utilizado permite realizar correcciones por deriva instrumental, mareas, inclinación y temperatura, se levantó una red de bases para minimizar las variaciones residuales por los factores arriba mencionados. La red estuvo conformada por 24 polígonos triangulares y 20 bases, siendo debidamente amarrada a la Red Nacional de Gravimetría a través de la estación MGLS-1967, ubicada en el Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional, la cual a su vez fué trasladada de la estación absoluta NPA2E1, ubicada en el Instituto Geofísico de los Andes.

En total se levantaron 320 nuevas estaciones gravimétricas con espaciamiento promedio de 0.7-1.0 km. Al presente estudio se adicionó la información gravimétrica del trabajo de Tesis realizado por Pérez (Pérez, C.R., 1988), realizado en los alrededores de Funza, Mosquera y Madrid y la línea gravimétrica CM-10, levantada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a lo largo de la carretera Funza-Cota.

2.2.2.2 Procesamiento de los datos gravimétricos

Los datos gravimétricos fueron procesados con el fin de obtener la anomalía de Bouguer Total, que es la manifestación directa de la distribución areal y en profundidad de las masas en el subsuelo y se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\Delta GBT = Gobs - Gt + CAL - CB + CT, \quad (1) \qquad \text{Ec. 2.1}$$

Donde :

- Gobs - gravedad observada,
- Gt - gravedad teórica, fórmula Internacional de gravedad de 1971
- CAL - corrección de aire libre, referenciada a la altura del Observatorio Astronómico.
- CB - corrección de Bouguer, para una densidad de 2.6 gr/cc.
- CT - corrección topográfica, hasta el sector l de la tabla de Hammer.

2.2.2.3 Mapa de Anomalía Residual

Con el objetivo de resaltar los elementos estructurales locales se elaboró el mapa de anomalía residual sustrayéndole la componente regional del campo gravimétrico al mapa de anomalía de Bouguer Total.

Para resaltar los gradientes gravimétricos se le aplicó a este mapa un efecto de sombras, colocando una fuente ficticia a 270° de azimut y 30° de inclinación y otra fuente a 20° de azimut y 30° de inclinación, (Figura 2.2).

2.2.3.4 Interpretación gravimétrica cualitativa

De acuerdo con lo observado en el mapa de anomalía residual y en términos generales, la cuenca de la Sabana de Bogotá puede dividirse en dos subcuencas. La más profunda de ellas está localizada al noroeste del área de estudio, limitada al oeste por los cerros de El Rosal, al este por el Río Bogotá y a la altura de la intersección del río con la avenida de Las Américas tomando una orientación noreste-suroeste hacia los cerros de Bosa. Al norte esta cuenca estaría limitada por la conjunción de los cerros de Tenjo y los cerros de Cota y al sur por los cerros de Madrid. Esta subcuenca alcanza su mayor profundidad a 5 km al norte del municipio de Funza.

La segunda subcuenca se extiende de Sur a Norte por la cuenca del río Tunjuelito hasta la intersección de este con la Autopista del Sur, para posteriormente ramificarse en dos subcuencas más, localizadas entre los cerros de Cota y Suba y entre los cerros de Suba y los cerros Orientales. Estas últimas poseen su límite Norte por la unión en profundidad de los cerros de Cota, Suba y cerros Orientales.

2.2.3 Estudios sísmicos

2.2.3.1 Adquisición de los datos sísmicos

La toma de la información sísmica fue realizada en 15 sectores para un total de 10,12 km lineales de Refracción con un sismógrafo digital de 24 canales marca E & G Geometrics. Para el registro de las ondas longitudinales P y transversales S se emplearon geófonos verticales y horizontales, respectivamente; ambos de 14 Hz de frecuencia natural. Para producir las ondas se utilizó un martillo de 16 libras, apilando en promedio 25 golpes por registro.

FIGURA 2.2

Para la generación y registro de las ondas P, la geometría de las líneas sísmicas fue de tipo Z-Z; o sea, se generaron ondas con golpes verticales a la superficie terrestre y se registró la componente vertical de las mismas. Para la generación y registro de las ondas S, la geometría de las líneas sísmicas fue de tipo Y-Y; o sea, las ondas fueron generadas con golpes horizontales, normales a la orientación de la línea sísmica y fue registrada la componente horizontal de las ondas. Se utilizó la metodología de perfiles reversos.

En cada uno de los perfiles sísmicos, con el fin de obtener información sísmica detallada en profundidad, se utilizaron arreglos de geófonos de diferente longitud, para lo cual la distancia entre canales tuvo una variación de Δx=1m hasta Δx=15m. La longitud de los arreglos de geófonos variaron entre 25m y 400m, dependiendo del espacio disponible y/o de la potencia de la señal; es decir, si se registraban o no, a una determinada distancia los primeros arribos de la onda de refracción generada.

2.2.3.2 Procesamiento de los datos de refracción sísmica

Los datos sísmicos fueron procesados con el paquete SIPX de la empresa Rimrock Geophysics Inc., el cual está basado en el método de tiempos de retardo o de Gardner.

2.2.3.3 Interpretación de los datos sísmicos

La interpretación de la información sísmica estuvo dividida en dos partes: interpretación de las líneas de reflexión sísmica recopiladas e interpretación de las líneas de refracción sísmica ejecutadas.

Interpretación de las líneas de reflexión sísmica

Se recopilaron líneas de reflexión sísmica realizada por diferentes proyectos ejecutados en la zona de estudio. Sin embargo, de todas estas líneas, la de mejor calidad y proximidad al área de estudio, es la línea J-78-08, realizada por ECOPETROL.

La línea J-78-08 está localizada a lo largo de la Autopista Medellín, desde el barrio Quirigua en Santafé de Bogotá, hasta el municipio de El Rosal. Esta línea tiene una longitud aproximada de 24 km, de los cuales fueron interpretados, para el presente estudio, los 8 km más cercanos al área de estudio; es decir, desde los puntos de disparo (Shot points-SP) SP 2385, hasta SP 2540.

A la altura de los SP 2405 y SP 2480, aproximadamente a 1 km al NW del Río Bogotá y en la intersección entre la Autopista a Medellín y la vía Funza-Cota, respectivamente, los arcos de difracción evidencian fallamientos inversos importantes. Estos fallamientos son claros en profundidad y estarían afectando la Formación Tilatá. No se observa con claridad que estos fallamientos estén afectando los sedimentos más recientes.

En una dirección NW-SE, desde los cerros de Cota hacia el barrio Quirigua se observa un claro hundimiento de todos los reflectores, lo que indica una tectónica de bloques controlados por fallamientos importantes.

Una interpretación puntual de los reflectores observados para el SP 2480 de base a tope, en la parte más profunda de la cuenca fue la siguiente: Formación Chipaque a una profundidad de 2760 m y con una velocidad Vp=3450 m/s; Formación Guadalupe a

2385 m y Vp=3350 m/s; Formación Guaduas a 2000 m y Vp=3200 m/s; Formación Bogotá a 680 m y Vp=1700 m/s; Formación Regadera a 504 m y Vp=1680 m/s; Formación Tilatá 396 m y Vp=1650 m/s. Los sedimentos más recientes no se observan debido a la aplicación en el procesamiento de un "mute" o silencio de 200 ms (ms-milisegundos), el cual cortó toda la información somera.

Interpretación de las líneas de refracción sísmica

Los estudios de refracción sísmica permitieron establecer con cierto detalle las interfases más someras; así, como las variaciones de los valores de las velocidades Vp y Vs.

La profundidad de investigación varió en promedio entre 50 m y 170 m, donde se detectaron, en algunos casos, interfases de hasta 1 m de espesor.

En términos generales, para las interfases más someras, el corte sísmico de base a tope es el siguiente:

- Sector norte, interfase con velocidades de roca (arcillolita) Vp=2281-2500 m/s, en el sector Suba-Compartir, y velocidades Vp=1800 m/s y Vs=378 m/s, en el sector Bosque Calderón,

- Sector sur, interfase con velocidades de sedimentos muy compactos (arenas y gravas muy densas) Vp=2091 m/s y Vs=655 m/s, y con velocidades de roca (areniscas) Vp=3301 m/s, en el sector del Parque Distrital del Sur.

- Sectores norte y centro, interfase con velocidades de material arcilloso, arcillas húmedas, Vp=1000-1400 m/s y Vs=120-280 m/s,

- Sector norte, interfase con velocidades de sedimentos arcillosos con contenido orgánico y poco compacto, Vp=130 - 450 m/s y Vs=70 - 120 m/s,

- Sector sur, interfase con velocidades de sedimentos arenosos poco compactos, Vp=470 - 660 m/s y Vs=167 - 348 m/s.

Con el objetivo de unificar los resultados obtenidos con los diferentes arreglos de geófonos utilizados en cada uno de los sectores, se elaboraron columnas sísmicas generalizadas, en donde se muestran las variaciones de las velocidades Vp y Vs y de las profundidades a la base de las diferentes interfases, (Figura 2.3).

Vp=133 m/s Vs=72 m/s	0.1m-0.6 m
Vp=333 - 438 m/s Vs=121 m/s	4.0m-4.5m
Vp=879 m/s Vs=152 - 186 m/s	9.6-m-13.8m
Vp=1224-1370 m/s	

Vs=281m/s Vp=1755 m/s	19.9m-27.2m

Figura 2.3 Valores de Vp, Vs y profundidades en INGEOMINAS

2.2.4 Modelo geológico-geofísico del subsuelo de la ciudad

Para tener una noción más aproximada acerca de los lineamientos que controlan la cuenca, se realizó una interpretación conjunta de los mapas sombreados de anomalía residual, mapa topográfico y mapa geológico.

Debido a que los datos gravimétricos poseen una distribución areal homogénea y una mayor densidad de datos con respecto al resto de estudios, el modelamiento final, se realizó tomando como base dichos datos, los cuales fueron debidamente "amarrados" a los resultados de todos los estudios.

El modelamiento se realizó por medio de los programas GM-SYS y Geosoft, inicialmente en 2D (modelamiento determinístico) y posteriormente se calculó una regresión lineal (modelamiento estadístico) para determinar arealmente la profundidad de la roca.

2.2.4.1 Interpretación conjunta de los mapas de anomalía residual, mapa topográfico y mapa geológico.

Para poder correlacionar los lineamientos detectados en el mapa de Anomalía Residual con los observados en el mapa Topográfico, al primero se le aplicó un efecto de sombra simultáneamente con un ángulo de inclinación de 30° y azimuts de 20° y 270°, como se observa en la figura 2.2. El mapa Topográfico se iluminó con un ángulo de 30° y un azimut de 270°.

El lineamiento que mejor se observa en ambos mapas fue el denominado falla de San Cristóbal, que corresponde a una falla de desplazamiento lateral, la cual fué corroborada en superficie. Esta falla tiene una orientación NW-SE y pudo detectarse hasta unos 2.5 km al occidente del Aeropuerto El Dorado.

Otro lineamiento de igual orientación al anterior es el denominado Molinos-Sasaima; éste, a la altura del Club de los Lagartos, se intersecta con la falla cartografiada en el Mapa Geológico de Santafé de Bogotá, como falla de Usaquén-Sasaima. La falla de Molinos-Sasaima tiene un caracter más regional que la de Usaquén-Sasaima. A tres (3) km hacia el sur de dicha falla se encuentra el lineamiento denominado Los Rosales, el cual se extiende desde la intersección de la Avenida Chile con la Avenida Circunvalar hasta el barrio Quirigua. Este lineamiento correspondería a la continuación en profundidad de la falla de Bogotá o podría estar controlándola, ya que precisamente, de acuerdo con el Mapa Geológico, se pudo cartografiar dicha falla hasta la intersección de la Avenida Chile con Circunvalar.

De los lineamientos de orientación NE-SW se destacan los denomidados falla de Cota y falla de Soacha.

En el sector norte de los cerros de Suba se observan lineamientos de desplazamiento lateral. La mayoría de estos lineamientos están cartografiados en superficie. En este

caso el aporte de los métodos geofísicos consiste en extender la continuación en profundidad de dichos lineamientos.

En el sector sur, en cercanías de Bosa y Soacha, se observa una buena correlación entre los lineamientos cartografiados en superficie y los observados en el mapa de Anomalía Residual. El mapa de Anomalía Residual pudo definir la continuación en profundidad de algunos de estos lineamientos, como es el caso de la falla de Mochuelo, cuyo extremo norte se detectó a unos 3 km más al norte que el inferido en el Mapa Geológico de Santafé de Bogotá.

2.2.4.2 Modelamiento en 2 Dimensiones

Con la ayuda del programa GM-SYS se generaron modelos en 2D por medio del método de aproximaciones sucesivas. Los modelos obtenidos fueron los siguientes:

a. *Modelo Geológico-Geofísico Calle 170.* Este modelo tiene una orientación noroeste-sureste, normal a las estructuras, desde el borde de los Cerros de Cota, atravesando los Cerros de Suba y a lo largo de la Calle 170 al norte de la ciudad. Figura 2.4. Se obtuvo un error de ajuste de las curvas gravimétricas medida y generada por el modelo de RMS = 0.1 (RMS- error medio cuadrático).

Como puntos de control o de amarre de la información se utilizaron los afloramientos de las rocas en los cerros de Suba y los cerros Orientales, la perforación 227-IVB-444 a 350m del Inventario Hidrogeológico de Colombia, (INGEOMINAS, Proyecto Base de Datos Hidrogeológica, 1990), en donde no se llegó a roca, y el sondeo geotécnico realizado en la Universidad Agraria, en donde se encontró arcillolita a los 119m.

Para la elaboración del modelo se emplearon los resultados de los estudios geoeléctricos y de refracción sísmica, los cuales permitieron obtener una primera aproximación del modelo geológico-geofísico. Estos resultados fueron debidamente calibrados con los sondeos geotécnicos. Por ejemplo, el perfil geoelétrico realizado en el Sector Norte y que intersecta la Calle 170 a unos 700 m del sondeo geotécnico realizado en ese sector, estableció una capa arcillosa a 140m. Al correlacionar estos resultados con el sondeo geotécnico se estableció que dicha capa podría ser arcillolita, la cual fue encontrada por el sondeo mecánico a 120m. Los perfiles de refracción sísmica en el sector Suba-Compartir establecieron una interfase entre 106m-144m con velocidades de roca Vp=2281-2500 m/s, las cuales de acuerdo a la información geológica, podrían corresponder a arcillolitas.

FIGURA 2.4

Utilizando la metodología arriba descrita se elaboraron todos los modelos geológico-geofísicos. Estructuralmente, el modelo representa un sinclinorio conformado por sinclinales (entre los cerros de Cota y Suba y entre los cerros de Suba y cerros Orientales) y anticlinales (Cerros de Suba y Cerros Orientales), los cuales se encuentran afectados por fallamientos inversos.

El espesor de los sedimentos en el sector entre los cerros de Cota y cerros de Suba alcanza un máximo de 500 m, mientras que entre los cerros de Suba y cerros Orientales no supera los 240 m.

En el modelo están descritas las propiedades físicas de las diferentes interfases encontradas: Velocidades de propagación de las ondas, densidades y resistividad eléctrica.

b. *Modelo Geológico-Geofísico INGEOMINAS-Funza*. Este modelo tiene una orientación noroeste-sureste, desde aproximadamente 4 km al NW del municipio de Funza, pasando por la Calle 39 o Vía a Catam e intersectando el Sondeo Geotécnico en el INGEOMINAS, hasta alcanzar los Cerros Orientales a la altura de la Vía Circunvalar. El error de ajuste de las curvas gravimétricas medida y generada por el modelo fue de RMS = 0.08. Figura 2.5.

Los puntos de control o de amarre de la información fueron los afloramientos de las rocas en los Cerros Orientales, el sondeo geotécnico realizado en el INGEOMINAS, en donde se encontró arcillolita a los 180 m, los Pozos Funza I y II, llegando este último la parte superior de la Formación Tilatá a 468 m, (Arévalo et al, 1989).

En este modelo se muestra una serie de plegamientos alargados asociados a fallas inversas, los cuales a unos 4 km al Occidente del Aeropuerto El Dorado se convierten en una estructura anticlinal como una continuación en profundidad de los Cerros de Cota.

El espesor de los sedimentos alcanza su mayor valor, 780m, a unos 4.5 km al NE de Funza.

2.2.4.3 Mapa del espesor de los sedimentos.

Para obtener un modelo tridimensional del límite sedimento-roca se realizó una regresión lineal multivariable que permitió determinar la profundidad de la roca en cualquier punto del área de estudio, conociendo la variación de gravedad en él. Se escogió como variable los valores de gravedad por ser éstos los de mejor distribución y densidad en el área de estudio. La correlación múltiple se realizó entre el mapa de anomalía residual, el mapa de microtremores, el cual poseía un gran parecido con el mapa gravimétrico, y las profundidades de la roca, obtenidas en los modelos de 2D, los cuales estaban previamente calibrados con los sondeos geotécnicos y los pozos presentes en el área de estudio.

FIGURA 2.5

Se obtuvo la siguiente regresión lineal :

$$H = - 51.17 - 36.96\ \Delta g + 276.13\ T \qquad \text{Ec. 2.2}$$

donde :H = profundidad a la roca
Δg = anomalía residual
T= microtremores

Para los siguientes radios de correlación :

$$R_{T,H} = 0.72$$
$$R_{\Delta g,H} = -0.93$$
$$R_{T,\Delta g} = -0.60$$

Con base en la función de regresión lineal obtenida se pudo convertir el valor de gravedad de cada celda de la grilla de anomalía residual en valores de profundidad a la roca o el espesor de los sedimentos, (Figura 2.6). Al comparar los valores de profundidad obtenidos en el mapa con los puntos de control se observa que la diferencia no supera los 5 metros.

Es de anotar que el mapa obtenido no hace distinción entre los diferentes tipos de rocas presentes en el área de estudio y debe interpretarse como el límite entre sedimentos (arcillas y/o arenas) y roca (arcillolita y/o areniscas).

2.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Los estudios de zonificación geotécnica del subsuelo de la ciudad de Santafé de Bogotá realizados con anterioridad a este trabajo han puesto en evidencia la presencia de diferentes zonas con características geomecánicas homogéneas. De acuerdo con la "Zonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá" (INGEOMINAS, 1988) y estudios realizados por Martínez y Prieto (VII Jornadas Geotécnicas y 1 Foro sobre Geotécnia de la Sabana de Bogotá, 1992) es posible identificar 5 zonas cuya descripción a grandes rasgos es la siguiente:

- Zona montañosa caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillolitas cuya resistencia y deformabilidad dependen de su humedad.

- Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo el efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico.

- Zona de suelos duros en donde predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial.

- Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad.

FIGURA 2.6

- Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales, antiguos lagos y zonas de inundación.

Si bien el subsuelo de la ciudad de Bogotá ha sido estudiado desde hace algún tiempo desde el punto de vista de su resistencia y compresibilidad, cabe destacar que el conocimiento de su comportamiento bajo cargas cíclicas similares a las producidas durante los sismos es prácticamente nulo. La investigación geotécnica realizada en el proyecto, trata de llenar este vacío.

El comportamiento dinámico de los suelos se investigó en laboratorio utilizando principalmente el aparato triaxial cíclico y un conjunto de elementos piezoeléctricos formado por un generador y un receptor de ondas de corte. El aparato triaxial cíclico se utilizó para investigar las propiedades del suelo en el intervalo de medias a grandes deformaciones cortantes ($10^{-4} < \gamma_c < 10^{-2}$)* , para las deformaciones cortantes muy pequeñas se utilizó el aparato piezoeléctrico.

2.3.1 Localización de los sondeos

Durante la investigación de campo se realizaron 38 sondeos y 14 apiques cuya localización se indica en la Figura 2.7. La profundidad de los sondeos realizados varía desde 20 m hasta 250 m. Para asegurar la buena calidad de las muestras se utilizó un muestreador de pistón estacionario el cual, comparado con las otras técnicas de muestreo, ofrece las mejores características en cuanto a la inalterabilidad de las muestras.

Mediante los sondeos profundos se trató de encontrar el basamento rocoso y recuperar muestras inalteradas que permitieran su caracterización desde el punto de vista del comportamiento estático y dinámico. Aunque el objetivo principal de los sondeos profundos fue llegar al basamento rocoso, en razón de su costo la profundidad máxima se limitó a 250 m. Teniendo en cuenta esta restricción, 3 de los 5 sondeos profundos realizados lograron llegar hasta la roca. Estos sondeos están localizados en: INGEOMINAS (Cll 53 con Cra 30) en donde la roca se encuentra a 179 m de profundidad, Universidad Agraria (Cll 170 con Autopista Norte) cuyo basamento se encuentra a 130 m de profundidad y en la calle 127 con autopista norte en donde la roca se encuentra a 190 m de profundidad. En los sondeos localizados en el Aeropuerto El Dorado y en Tibabuyes (Cll 139 - Av. Cundinamarca) perforados hasta 250 m y 246 m no fue posible llegar al basamento rocoso. En forma general se perforaron 2483 metros, donde se realizaron los siguientes ensayos: 2000 humedades, 2000 clasificaciones, 1000 densidades aparentes, 100 gravedades específicas, 100 granulometrias, 1000 compresiones simples, 170 triaxiales estáticos, 100 triaxiales dinámicos, 100 consolidaciones y 40 bender element, entre otros. Dentro de los ensayos de campo se hicieron ensayos de presiómetro y de down-hole.

* Como convención en este informe las deformaciones axiales y de cortante se presentan en términos de deformación unitaria. Siempre que las deformaciones se expresen en porcentaje se indicará explícitamente con el símbolo %.

FIGURA 2.7

2.3.2 Propiedades básicas del subsuelo de Santafé de Bogotá

Para el análisis de las propiedades básicas del subsuelo de la ciudad se tuvieron en cuenta la totalidad de los sondeos realizados. Como ejemplo típico en la Figura 2.8 (A,B,C,D) se presenta el perfil de propiedades básicas encontradas en el sondeo realizado en INGEOMINAS.

A continuación se hace una breve descripción de cada una de las propiedades básicas del subsuelo.

2.3.2.1 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg se determinaron por los métodos usuales de laboratorio. En la zona de arcillas blandas de la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra en la parte norte de la ciudad, es posible obtener límites líquidos superiores a 200% e índices de plasticidad superiores a 100% principalmente en las capas más superficiales. Esta característica ubica al subsuelo de la ciudad de Bogotá entre los suelos con mayor dificultad ingenieril en el mundo.

Variación del límite líquido con la profundidad

En la zona de arcillas blandas, el perfil de variación de los límites de Atterberg con la profundidad muestra un comportamiento típico de las formaciones lacustres. En el sondeo realizado en INGEOMINAS se observa que el límite líquido pasa de un máximo de 200% en superficie hasta un mínimo de 30% en profundidad. Adicionalmente es importante notar que la dispersión del límite líquido disminuye con la profundidad. Particularmente se encuentra que de 0 a 60 m de profundidad es posible encontrar valores que varían de 30 a más de 200 %. Existen diversas explicaciones a estos fenómenos fundamentadas en el proceso de sedimentación y en los aportes de eventos volcánicos, sin embargo, es conveniente esperar los resultados de los estudios de palinología que adelanta INGEOMINAS para plantear hipótesis bien fundamentadas sobre el proceso de depositación.

Hacia el sur de la ciudad se puede identificar una zona de suelos duros en la que se encuentran principalmente dos tipos de suelo: el primero, formado por arcillas limosas secas y preconsolidadas ubicado en la parte oriental y el segundo, al occidente formado principalmente por suelos más arenosos de origen aluvial en su mayoría, que son producto del transporte de sedimentos del río Tunjuelito, entre otros. La zona arcillosa se caracteriza por su plasticidad baja a media, encontrándose el límite líquido en un rango entre 20 y 70% en los primeros 30 m, en profundidad la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30%. Adicionalmente se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental, como ya se mencionó, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas. Hacia los límites con las zonas arcillosas (la zona blanda y la zona de arcillas duras) el contenido de arcillas aumenta aunque no presentan una alta plasticidad (límite líquido alrededor de 30%). Esta diferencia en plasticidad con respecto

FIGURA 2.8A

FIGURA 2.8.B

FIGURA 2.8.C

FIGURA 2.8.D

a las otras zonas puede explicarse por una mayor influencia del transporte de sedimentos de los ríos.

En la Figura 2.9 están agrupados la totalidad de los resultados de límite líquido en función de la profundidad en la zona de arcillas blandas. En este gráfico se observan las características ya anotadas: gran dispersión en los primeros 50 m, disminución del límite líquido con la profundidad y presencia de un estrato de alta plasticidad a 160 m.

Correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido

Es conocido en geotécnia que los suelos de un mismo origen tienden a ubicarse en el gráfico de plasticidad de Casagrande en una franja bien definida, esto implica la existencia de una relación entre el índice de plasticidad y el límite líquido.

Con base en el resultado de todos los puntos estudiados es posible proponer la siguiente correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido para los suelos de Bogotá:

$$Ip = 0.7792 * (wl - 15.2), \qquad r = 0.967 \qquad \text{Ec. 2.3}$$

En la Figura 2.10 se presentan los resultados de los ensayos de límites líquido y plástico de la totalidad del estudio en el gráfico de plasticidad de Casagrande. Igualmente se presenta en esta figura la relación propuesta y la franja correspondiente a los suelos de Bogotá.

2.3.2.2 Granulometría y tamaño de las partículas

Al igual que los límites de Atterberg, la distribución granulométrica de la zona de arcillas blandas presenta un aspecto típico de una formación lacustre. Las capas con mayor contenido de material arcilloso (partículas inferiores a 2 μm) se encuentran en la superficie. Este valor puede llegar hasta un máximo de 70 % y disminuye progresivamente con la profundidad hasta un valor promedio de 10 %.

En la zona de suelos duros y en la zona de piedemonte se encuentran intercalaciones de arena y arcillas duras que dificultan poner en evidencia cualquier variación del tamaño de las partículas con la profundidad. Esto se explica por el hecho de que su formación no es lacustre.

2.3.2.3 Contenido de materia orgánica

El valor de la materia orgánica se determinó por los métodos usuales de laboratorio. En los materiales que predominan en la zona de suelos blandos existe un alto contenido de materia orgánica cuya presencia se explica por el origen lacustre de esta zona y por las condiciones paleoclimáticas. Puesto que esta característica modifica de una manera importante las propiedades mecánicas de los suelos y diferencia al suelo de la ciudad de Bogotá de los suelos estudiados por diferentes autores en diferentes partes del mundo, se consideró conveniente estudiar la variación de este parámetro en la zona de suelos blandos.

FIGURA 2.9

FIGURA 2.10

En la Figura 2.11 se representa la variación de este parámetro en toda la zona blanda. Se observa que el contenido de materia orgánica disminuye a medida que aumenta la profundidad. En los primeros 30 m aparecen variaciones importantes, donde los valores oscilan entre 8 y 30 % con intercalaciones de turba cuyo contenido de materia orgánica, expresado en porcentaje con respecto a las partículas minerales, es superior al 100%.

A partir de los 30 m el contenido de materia orgánica comienza a descender paulatinamente hasta valores de alrededor del 5% a 100 m de profundidad.

2.3.2.4 Relaciones gravimétricas y volumétricas

Una de las características básicas de los suelos que tiene una gran influencia en su comportamiento mecánico es su peso unitario. El valor de esta propiedad física depende de la densidad de las partículas minerales que forman el suelo (peso específico de sólidos) y de la proporción en que se reparten los tres componentes que forman el suelo: mineral, agua y aire.

El peso específico de sólidos de los minerales arcillosos oscila alrededor de 2.7, sin embargo en los suelos de Bogotá esta característica física es considerablemente inferior a este valor. Esta aparente discrepancia se explica por el alto contenido de materia orgánica que presenta el suelo de la ciudad. En efecto, las regresiones indican que existe una buena correlación entre el peso específico de sólidos y el contenido de materia orgánica; se observa además que para un contenido de materia orgánica cercano a cero el valor de la gravedad específica es aproximadamente 2.65 el cual corresponde al promedio de la gran mayoría de minerales arcillosos.

La humedad natural de los suelos presentes en la zona blanda tiene un comportamiento típico de suelos normalmente consolidados: inmediatamente por debajo del nivel freático la humedad natural se acerca al límite líquido de tal manera que se obtienen índices de liquidez del orden del 90%, a medida que aumenta la profundidad la humedad natural disminuye paulatinamente hasta que para profundidades correspondientes a un esfuerzo efectivo vertical de 10 Kg/cm^2 su valor se acerca al límite plástico, tal como lo indican diferentes autores (Biarez, 1994). La humedad natural del suelo que se encuentra por encima del nivel freático disminuye considerablemente debido a los altos valores de succión derivados del fenómeno de desecación al que ha estado sometido esta capa de suelo.

El peso unitario tiene un comportamiento similar al de la humedad natural; en la superficie debido al fenómeno de desecación presenta un valor superior a 1.8 ton/m^3 y disminuye hasta 1.4 en las vecindades del nivel freático. A partir de esta profundidad el peso unitario aumenta paulatinamente debido al mayor esfuerzo efectivo vertical y a la menor compresibilidad del suelo hasta llegar a valores cercanos a 2 ton/m^3 para profundidades entre 100 y 200 m dependiendo del tipo de suelo.

El grado de saturación del suelo, inclusive en la capa localizada inmediatamente por encima del nivel freático, es cercano al 100%. Lo anterior se explica por el alto valor de la presión de succión necesario para provocar la desaturación del suelo (punto de

FIGURA 2.11

entrada de aire) que caracteriza a los suelos de la ciudad de Bogotá. Esto no excluye que en ciertos puntos de la zona blanda se encuentren arcillas desecadas en superficie por el fenómeno de evapotranspiración.

2.3.3 Compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá

La compresibilidad del subsuelo de Santafé de Bogotá se estudió fundamentalmente mediante ensayos de consolidación con esfuerzos controlados. Sin embargo, se complementó el estudio con pruebas de consolidación isotrópica realizadas en cámara triaxial y pruebas de consolidación con velocidad de deformación controlada siguiendo la metodología recomendada por el Instituto Geotécnico Noruego NGI.

Con base en los resultados de los ensayos de consolidación se obtuvieron los valores de índice de compresibilidad, índice de recompresión, esfuerzo de preconsolidación y coeficiente de consolidación en los suelos de las zonas de la ciudad que presentan mayores problemas de compresibilidad.

2.3.3.1 Compresión isotrópica

El comportamiento de los suelos sometidos a trayectorias de carga en compresión isotrópica tiene gran importancia ya que su conocimiento permite representar las curvas esfuerzo - deformación de los suelos mediante modelos elastoplásticos. Cuando se representan las curvas de compresión isotrópica en un plano logarítmico es posible distinguir dos rectas: una en el dominio cuasi elástico y la otra en el dominio elastoplástico.

El valor del punto inicial de la recta de comportamiento cuasi-elástico y el valor del límite elástico son parámetros que no dependen del suelo sino de su estado inicial y por consiguiente no es posible correlacionarlos con propiedades índice tales como los límites de Atterberg.

2.3.3.2 Compresión unidimensional u oedométrica

En las gráficas realizadas con resultados de algunos de los ensayos realizados, se observa la siguiente tendencia, que está en acuerdo con lo reportado ampliamente en la literatura; a medida que el límite líquido aumenta, se incrementa la compresibilidad, es decir, que aumenta el índice de compresión Cc.

2.3.3.3 Análisis estadístico del índice de compresión

El índice de compresión es un parámetro de suma importancia ya que está relacionado con la magnitud de la deformación del suelo bajo cargas externas y depende principalmente de la plasticidad del suelo. En la Figura 2.12 se observa que en efecto existe una buena correlación entre el límite líquido y el índice de compresión. Esta correlación ha sido investigada por diferentes autores alrededor del mundo y la mas aceptada es la de Skempton quien plantea la correlación Cc=0.009(Wl-10). La correlación que se encuentra para la ciudad de Bogotá es Cc = 0.0089*(wl - 14) con un coeficiente de correlación de 0.62, algo bajo. Esta correlación es bastante cercana a la

FIGURA 2.12

de Skempton y además tiene una justificación que concuerda con los análisis de valores límites que se presenta en el parágrafo 2.3.3.6.

2.3.3.4 Análisis estadístico del índice de recompresión

El índice de recompresión es el equivalente al índice de compresión pero en el dominio preconsolidado del suelo o pseudo-elástico. Puesto que estos dos parámetros dependen de las mismas variables (plasticidad del suelo principalmente) es usual encontrar una correlación entre ellos. Las correlaciones propuestas por diferentes autores varían entre Cr = Cc/4 y Cr = Cc/10. Con base en los valores obtenidos para los suelos investigados se encuentra la correlación Cr = Cc/8 con un coeficiente de correlación de 0.83.

2.3.3.5 Esfuerzos de preconsolidación

Tal como ya se anotó el esfuerzo de preconsolidación obtenido a partir de los ensayos de compresión unidimensional es un parámetro que depende de la historia de esfuerzos a la que se ha sometido al suelo y no de sus propiedades índice. Por tal motivo este parámetro varía con la profundidad y con la localización de la muestra de suelo estudiada.

En la zona de arcillas blandas se observa que existe una capa preconsolidada en superficie cuyo espesor varía alrededor de 10 m. La presencia de esta capa puede ser debida a esfuerzos internos de succión producto de la baja del nivel freático y/o evapotranspiración, llegando a unos esfuerzos de preconsolidación del orden de 1.5 kg/cm^2 . En la zona de arcillas duras por el contrario se encuentra que en superficie el esfuerzo de preconsolidación es muy alto, del orden de 2 kg/cm^2 y aumenta con la profundidad hasta valores del orden de 4 kg/cm^2 a los 50 m.

2.3.3.6 Análisis de valores límites

Los resultados obtenidos permiten observar que la localización y la pendiente de la curva de consolidación unidimensional está fuertemente relacionada con la plasticidad del suelo entendiendo plasticidad como límites de Atterberg. En el parágrafo 2.3.3.3 se presentó la correlación entre el índice de compresión y el límite líquido. Sin embargo, para poder localizar la recta correspondiente al dominio normalmente consolidado en el plano (e - log σ'_v) es necesario conocer el punto inicial o final de dicha recta.

Con el fin de plantear un modelo estadístico de compresibilidad para los suelos de la ciudad de Bogotá se trató de establecer los valores del esfuerzo efectivo vertical correspondientes a los límites líquido y plástico.

En la Figura 2.13 se muestra el histograma de frecuencias del esfuerzo efectivo vertical que corresponde al límite líquido σ_{wl}. Se observa que el valor promedio se encuentra para un valor de 0.2 kg/cm^2 .

FIGURA 2.13

Al igual que con el límite líquido en la Figura 2.14 se muestra el histograma del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite plástico σ_{wp}. Se observa que en este caso el valor medio corresponde a 24 kg/cm^2.

Los valores límites obtenidos concuerdan bastante bien con la correlación entre el coeficiente de compresibilidad y el límite líquido.

Tomando el valor promedio de Gs para Bogotá y utilizando la correlación encontrada entre el índice de plasticidad y el límite líquido Ip =0.7792*(Wl - 15.2) se obtiene:

$$Cc = 0.0094\left(wl - 15.2\right) \qquad \text{Ec. 2.4}$$

relación que es muy próxima a la de Skempton y a la encontrada en el parágrafo 2.3.3.3.

Con base en la correlación obtenida entre el coeficiente de compresibilidad y los puntos extremos de las rectas en el dominio normalmente consolidado es posible plantear una recta de consolidación normal de un suelo conociendo únicamente su límite líquido. En general se observa una buena correspondencia entre los resultados experimentales y el modelo propuesto.

2.3.4 Resistencia al corte

La resistencia al corte de los suelos de Santafé de Bogotá se estudió principalmente con base en pruebas de compresión triaxial consolidada no drenada. Para complementar estas medidas principalmente en lo que se refiere a la resistencia al corte en esfuerzos totales se realizaron numerosas pruebas de compresión simple y de veleta de laboratorio.

Los ensayos de resistencia al corte en pruebas de compresión triaxial, se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM D 4767-88 para pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas con medida de presión de poros.

La gran cantidad de pruebas realizadas constituyen una base de datos de considerable importancia para el desarrollo futuro de la ciudad. Es por ello que para su interpretación se utilizaron las teorías modernas de resistencia al corte con las cuales es posible modelar en computador el comportamiento de los suelos arcillosos.

La línea de estado crítico representa la envolvente de falla en plasticidad perfecta de todas las pruebas realizadas con suelos normalmente consolidados. Esta envolvente se manifiesta en dos de los planos utilizados para interpretar los resultados: en el plano de invariantes isotrópico y desviador (p', q') la línea de estado crítico se manifiesta como una recta que pasa por el origen (siempre y cuando no exista cementación) cuya pendiente es M. En el plano de volumen específico en función del esfuerzo isotrópico (v,p') la línea de estado crítico aparece como una curva que al ser representada en escala logarítmica se convierte en una recta paralela a la línea de compresión isotrópica.

FIGURA 2.14

A manera de ejemplo en la Figura 2.15 se representan los resultados obtenidos para un suelo localizado en Suba a una profundidad de 41.5 m, consolidado a 1.0, 2.5 y 5.0 kg/cm^2.

2.3.5 Comportamiento del subsuelo de Santafé de Bogotá bajo cargas cíclicas

El estudio del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad de Santafé de Bogotá se realizó por medio de ensayos triaxiales cíclicos, ensayos con elementos piezoeléctricos para encontrar la velocidad de onda cortante en el laboratorio y ensayos in situ como el Down Hole y el Presiómetro de Menard cíclico. Debido a la gran variedad de suelos y condiciones que pueden afectar la respuesta dinámica de estos y el área de la ciudad (650 km^2 aproximadamente), sería económicamente imposible pensar en la posibilidad de realizar un estudio determinístico de las propiedades dinámicas de los suelos en toda la extensión de la ciudad, por lo que se decidió utilizar un modelo de comportamiento para simular el comportamiento dinámico.

En las Figuras 2.16 a 2.18 se encuentran los resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico, los ciclos de histéresis de esfuerzo cortante τ contra deformación por corte γ_C, la curva de degradación del módulo cortante G contra la deformación por corte γ_C y la curva de amortiguamiento contra deformación por corte γ_C.

2.3.5.1 Estudio del módulo de cortante máximo

En un equipo triaxial cíclico es difícil obtener el módulo en pequeñas deformaciones ya que éstas son difíciles de medir con la instrumentación convencional. Por este motivo para obtener el módulo máximo se recurrió a otro tipo de ensayo denominado "bender element" desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego. Este ensayo está basado en la medida en laboratorio de la velocidad de una onda de cortante generada por un elemento piezoeléctrico. A manera de ejemplo en las Figuras 2.19 y 2.20 se muestran algunos resultados de estas medidas.

Se estudiaron por separado cada una de las variables que se consideraron importantes en el comportamiento dinámico del suelo, las cuales fueron el esfuerzo de confinamiento σ_3, la relación de vacíos *e* y la plasticidad (entendida como límites de Atterberg).

El módulo de cortante tangente en pequeñas deformaciones G_{max} depende fuertemente del esfuerzo de confinamiento. En las Figuras 2.21 y 2.22 se observa la tendencia que se encuentra con base en los ensayos realizados.

La influencia del índice de plasticidad está incluida en las dos variables ya estudiadas: esfuerzo de confinamiento y relación de vacíos de tal manera que para un esfuerzo de confinamiento y una relación de vacíos dados el índice de plasticidad no afecta el valor de G_{max}. Sin embargo, el índice de plasticidad sí afecta de manera importante la forma en que se degrada el módulo con la deformación.

FIGURA 2.15

FIGURA 2.16

FIGURA 2.17

FIGURA 2.18

FIGURA 2.19

FIGURA 2.20

FIGURA 2.21

FIGURA 2.22

2.3.5.2 Definición de la curva de módulo G y amortiguamiento β contra γ_c

La forma de la curva de degradación del módulo en función de la deformación por corte, representado en la curva G/G_{max} contra γ_c. depende fuertemente de la plasticidad del suelo. Ver figura 2.23.

Para integrar los valores de módulos de cortante máximos obtenidos con la metodología del "bender element" y el resto de la curva obtenidas utilizando el aparato triaxial cíclico se utilizó una función de interpolación propuesta por la cual solo necesita dos parámetros α y β^*.

Para calibrar los resultados obtenidos del modelo, se comparó contra un resultado obtenido de un ensayo realizado en el laboratorio (Figura 2.24), en el que se observa que la aproximación es buena tanto en la forma de la curva como en el valor de G_{max}.

Para el amortiguamiento se adoptó el una metodología similar a la propuesta por Hardin y Drnevich. De esta forma el amortiguamiento también queda ligado al valor de la plasticidad.

2.3.5.3 Ensayos *in situ*

En las Figuras 2.25 y 2.26 se muestran los resultados de algunos de los ensayos in situ: en la Figura 2.25 se muestra la curva obtenida a partir de un ensayo presiométrico cíclico en la cual se observa claramente la degradación del módulo a medida que aumenta la amplitud de los ciclos. Para interpretar estos resultados es necesario realizar un análisis inverso utilizando un método numérico. Esto debido a que la deformación alrededor de la sonda presiométrica no es homogénea. Estos resultados plantean una esperanzadora posibilidad de reducción del costo de los estudios de mirozonificación sísmica. En la Figura 2.26 se muestran las medidas obtenidas en los ensayos Down Hole. Cabe anotar que los resultados de estos ensayos fueron comparables a las medidas directas en laboratorio realizadas con la metodología del "bender element".

2.3.6 Zonificación geotécnica de síntesis

En la zonificación Geotécnica de síntesis se tuvieron en cuenta los estudios geológicos realizados por INGEOMINAS, la zonificación geotécnica de INGEOMINAS del año 1988 y los estudios de Martínez y Prieto de 1992. Además, se incluyeron en los análisis los resultados de la investigación geotécnica de este estudio concretamente en lo referente a propiedades índice predominantes en cada zona y su variación con la profundidad, mapa de valores de la correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido y los mapas de zonificación analítica presentados en el informe del subproyecto número 10 del presente estudio. Finalmente se consultó a Ingenieros Geotecnistas con conocimiento del subsuelo de la ciudad, obteniendo como resultado el Mapa de Zonificación Geotécnica de la ciudad de Santafé de Bogotá (Figura 2.27 - Plano No. 1).

Los límites de las zonas establecidas concuerdan en general con los de estudios realizados con anterioridad. El límite más significativo es el que separa la zona de

FIGURA 2.23

FIGURA 2.24

FIGURA 2.25

FIGURA 2.26

FIGURA 2.27

arcillas duras con la de arcillas blandas, el cual se ubica aproximadamente al sur de la Avenida de los Comuneros. Las zonas en las que se dividió la ciudad son las siguientes:

- Zona montañosa caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillolitas cuya resistencia y deformabilidad dependen de su humedad.

- Zona de piedemonte o de conos de deyección conformada por materiales que bajo el efecto de la gravedad han sufrido movimientos y se han depositado en forma de cono o abanico.

- Zona de suelos duros en donde predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosos de origen aluvial. La zona arcillosa se caracteriza por su baja plasticidad, encontrándose el limite líquido en un rango entre 20% y 70 % en los primeros 30 m. En profundidad la arcilla tiende a volverse más arenosa y presenta un límite líquido de alrededor del 30 %. Adicionalmente, se encuentra una capa de turba aproximadamente a 30 m de profundidad con un espesor de 4 m en promedio. La parte occidental de esta zona, se caracteriza principalmente por la presencia de arenas de grano fino a muy fino, con poca presencia de arcillas.

- Zona de suelos blandos caracterizada por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad. Se encuentra que en los primeros 60 m de profundidad es posible encontrar límites líquidos en un amplio rango que varía de 30 % a más de 200 %, disminuyendo en profundidad a un valor del orden de 30%. Hacia la parte sur oriental de la zona se encuentran suelos preconsolidados en un espesor del orden de 10 m; espesor que disminuye hacia la parte nor-occidental. En esta zona es común encontrar un pequeña capa de arena a una profundidad aproximada de 50 m e intercalaciones de capas de turbas que en su mayoría no superan los 5 m de espesor.

- Zona de Rondas de ríos y humedales a la cual pertenecen los cuerpos de agua de la ciudad: humedales, antiguos lagos y zonas de inundación.

Con respecto al Mapa de Zonificación Geotécnica es importante hacer las siguientes anotaciones:

- Los límites de las zonas son aproximados y solamente constituyen una guía. Es probable encontrar discrepancias importantes en los límites de las zonas.

- En ningún caso la información tanto del Mapa como de este estudio deberá utilizarse para diseños.

- Las descripciones y las características de cada zona solo son válidas para propósitos de esta zonificación.

2.4 Referencias

Arévalo G.S.R y Pinzón V.I.D, 1989. *"Análisis Sedimentológico de núcleos extraídos del pozo estratigráfico Funza II, Municipio de Funza"*. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional. Santafé de Bogotá.

Biarez J, Hicher P, 1994. *"Elementary Mechanics of Soil Behaviour"*, AA Balkema.

Caro P., Padilla J., Vergara H, 1996. *"Mapa Geológico de Santafé de Bogotá"*. VI Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología - INGEOMINAS. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Departamento de Planeación Distrital, 1988*. "Zonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá".* Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1995. *"Estudios Geológicos"* . Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyectos No. 2. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996. *"Microtrepidaciones"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyectos No. 6. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS, 1996. *"Estudios Geofísicos"*. Proyecto Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 7. Santafé de Bogotá.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996. *"Ensayos de laboratorio y Zonificación Geotécnica"* . Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyectos Nos. 10 y 11. Santafé de Bogotá.

Martínez J.M. y Prieto J.C., 1992. *"Características de las arcillas blandas de Santafé de Bogotá".* VII Jornadas Geotécnicas y I Foro sobre la Geotecnia de la Sabana. Sociedad Colombiana de Ingenieros-Sociedad Colombiana de Geotecnia. Santafé de Bogotá.

Pérez R, 1988. *"Modelo Gravimétrico de la Cuenca de la Sabana de Bogotá, en los alrededores de Funza, Mosquera y Madrid"*. Tesis de Grado. Universidad Nacional. Santafé de Bogotá.

Rivera A., Pérez R., Vásquez L., 1996. *"Modelación por prospección geofísica hecha para Santafé de Bogotá".* VI Congreso Colombiano de Geología. Sociedad Colombiana de Geología - INGEOMINAS. Santafé de Bogotá.