

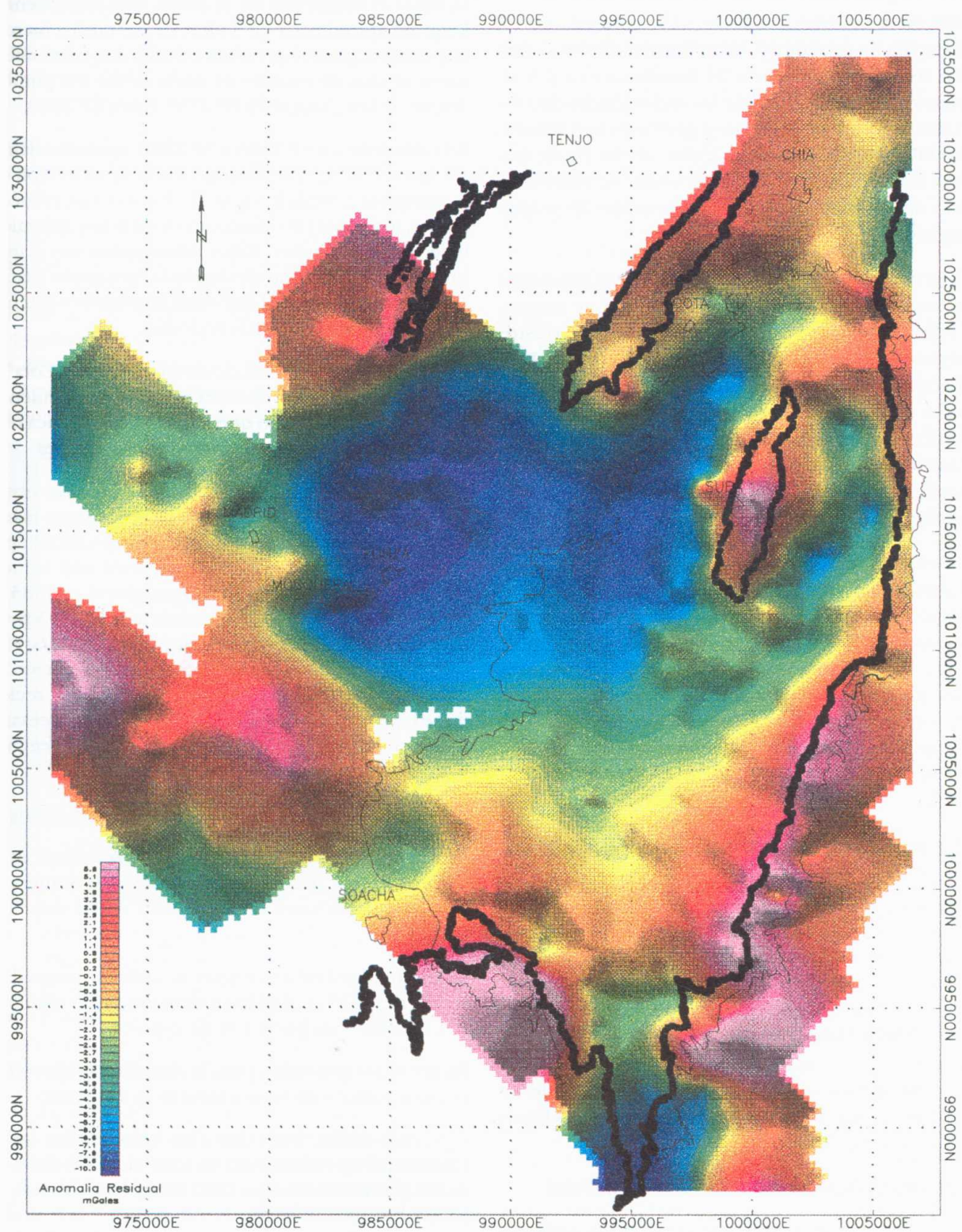


FIGURA 2.2 MAPA DE ANOMALÍA RESIDUAL CON EFECTOS DE SOMBRA

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 12km 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.

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 $\Delta x=1m$ hasta $\Delta x=15m$. 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 realizadas en 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 ECOPEPETROL.

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 $V_p=3450$ m/s, Formación Guadalupe a 2385 m y $V_p=3350$ m/s, Formación Guaduas a 2000 m y $V_p=3200$ m/s, Formación Bogotá a 680 m y $V_p=1700$ m/s, Formación Regadera a 504 m y $V_p=1680$ m/s, Formación Tilatá 396 m y $V_p=1650$ 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 V_p y V_s .

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) $V_p=2281$ -2500 m/s, en el sector Suba-Compartir, y velocidades $V_p=1800$ m/s y $V_s=378$ m/s, en el sector Bosque Calderón,
- Sector sur, interfase con velocidades de sedimentos muy compactos (arenas y gravas muy densas) $V_p=2091$ m/s y $V_s=655$ m/s, y con velocidades de roca (areniscas) $V_p=3301$ m/s, en el sector del Parque Distrital del Sur.

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

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

- Sector sur, interfase con velocidades de sedimentos arenosos poco compactos, $V_p=470 - 660$ m/s y $V_s=167 - 348$ 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 V_p y V_s y de las profundidades a la base de las diferentes interfases. Como ejemplo, se presenta en la Figura 2.3 los resultados del perfil típico para el sitio ubicado en las instalaciones del INGEOMINAS.

$V_p=133$ m/s $V_s=72$ m/s	0.1m-0.6 m
$V_p=333 - 438$ m/s $V_s=121$ m/s	4.0m-4.5m
$V_p=879$ m/s $V_s=152 - 186$ m/s	9.6m-13.8m
$V_p=1221-1370$ m/s $V_s=281$ m/s	19.9m-27.2m

FIGURA 2.3 VALORES DE V_p , V_s 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 regre-

sión 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 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 denominados 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 Bidimensional

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, 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 geoeléctrico 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 definió 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 $V_p=2281-2500$ m/s, las cuales de acuerdo con la información geológica, podrían corresponder a arcillolitas

Utilizando la metodología antes descrita se elaboraron todos los modelos geológico-geofísicos. Estructuralmente, el modelo representa un sinclinalio 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 a 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 microtrepidaciones (INGEOMINAS, 1996-a), 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

Se obtuvo la siguiente regresión lineal :

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

donde : H = profundidad a la roca

Δg = anomalía residual

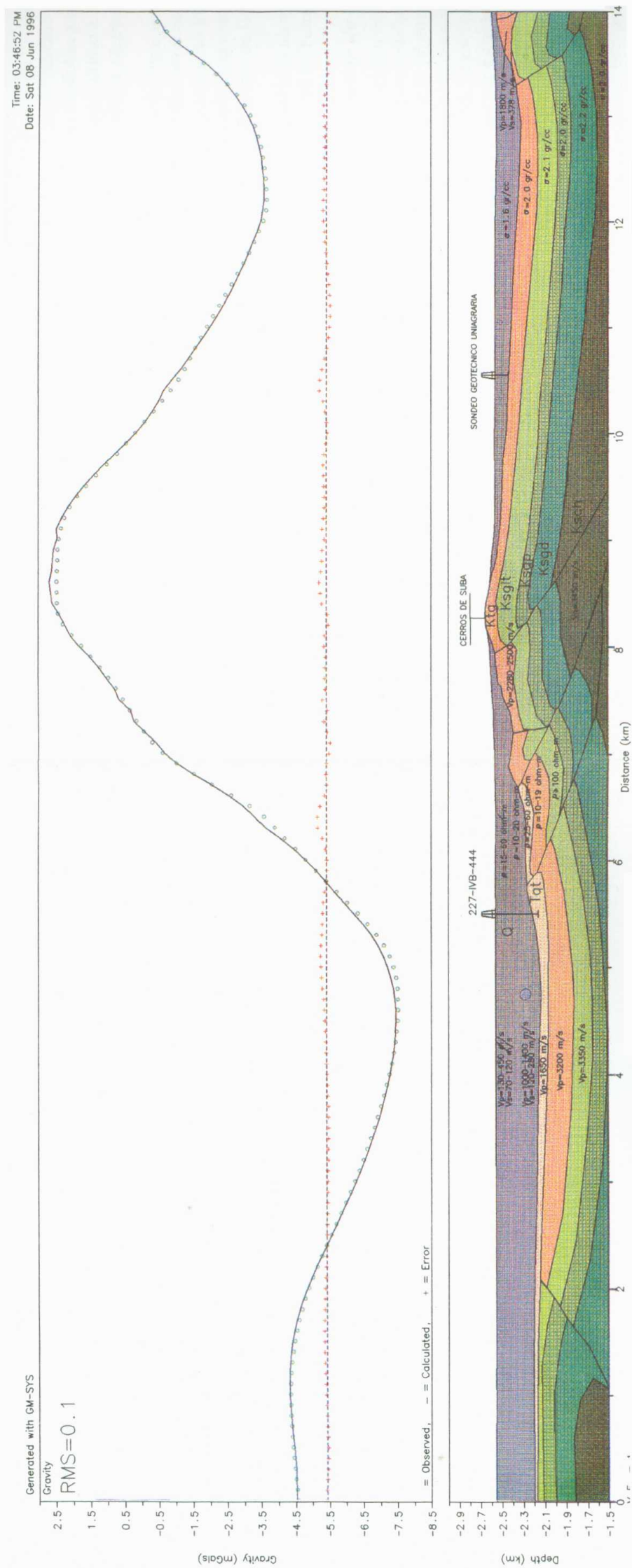
T = microtremores

Para los siguientes radios de correlación .

$$R_{TH} = 0.72$$

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

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



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 INGEOMINAS (1988) y Martínez et al (1990,1992), 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.

- 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 ($\gamma_c < 10^{-6}$) se utilizó el aparato piezoeléctrico.

2.3.1 Localización de los sondeos

A partir de los resultados de la recopilación de información geotécnica (INGEOMINAS, 1995-b) y de las zonificaciones geotécnicas existentes, se determinaron los sitios para ejecutar las perforaciones necesarias con el fin de lograr la caracterización geotécnica de cada zona.

En total se realizaron 38 sondeos y 14 apiques cuya localización se indica en la Figura 2.7. La profundidad de los sondeos realizados varió 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, ofreció 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 (CII 53 con Cra 30) en donde la roca se encuentra a 179 m de profundidad, Universidad Agraria (CII 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 (CII 139 - Av Cundinamarca) perforados hasta 250 m y 246 m, respectivamente, no fue posible llegar al basamento rocoso. En forma general se perforaron 2483 metros, donde se realizaron aproximadamente 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

* 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 %.