

E 98,9

CONVENIO 01 - 93

245
Folios
6 Plano 2.

OPES



OFICINA PARA LA PREVENCIÓN
DE EMERGENCIAS - OPES

DIRECCIÓN NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN
Y ATENCIÓN DE DESASTRES - DNPAD

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN
GEOCIENCIAS, MINERÍA Y QUÍMICA
INGEOMINAS

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA

SUBPROYECTO No 10
ENSAYOS DE LABORATORIO Y CAMPO
ZONIFICACION GEOTECNICA
(Informe Definitivo)



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

Santafé de Bogotá, Colombia
Noviembre de 1996

CONVENIO 01 - 93

**OFICINA PARA LA PREVENCION DE EMERGENCIAS - OPES -
DIRECCION NACIONAL PARA LA PREVENCION Y ATENCION DE
DESASTRES - DNPAD -
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA - INGEOMINAS**

**PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA**

**SUBPROYECTO No 8
ESTUDIOS GEOTECNICOS
Recopilación de Información
(Informe Definitivo)**

INGEOMINAS

**Santafé de Bogotá, Colombia
Mayo de 1996**

1 Introducción

2 Localización de Sondeos

3 Propiedades Básicas del Subsuelo de Santafé de Bogotá

3.1 Límites de Atterberg

3.1.1 Variación con la Profundidad

3.1.2 Correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido

3.2 Granulometría y Tamaño de Partículas

3.3 Actividad

3.4 Materia orgánica

3.5 Relaciones gravimétricas y volumétricas

4 Compresibilidad del Subsuelo de Santafé de Bogotá

4.1 Compresión isotrópica

4.2 Compresión unidimensional u oedométrica

4.2.3 Compresión unidimensional con carga controlada

4.2.4 Compresión unidimensional con velocidad de carga controlada

4.3 Análisis Estadístico del Coeficiente de compresibilidad

4.4 Análisis Estadístico del Coeficiente de recompresión

4.5 Esfuerzos de preconsolidación

4.6 Análisis de Valores Límites

4.7 Modelo estadístico de compresibilidad

5 Resistencia al Corte

5.1 Resistencia a la compresión en pruebas de compresión triaxial

5.1.1 Línea de Estado Crítico.

5.1.2 Ángulo de Fricción Interno.

5.1.3 Trayectorias de Esfuerzos

5.1.4 Resistencia al Corte en Esfuerzos Efectivos

5.2 Resistencia al Corte en Esfuerzos Totales

6 Comportamiento Del Subsuelo De Santafé De Bogotá Bajo Cargas Cíclicas

6.1 Metodología de laboratorio

6.2 Estudio del módulo de cortante y del amortiguamiento

- 6.2.3 Efecto de la Presión de Confinamiento
- 6.2.4 Efecto de la Relación de Vacíos
- 6.2.5 Efecto del Índice de Plasticidad
- 6.3 Estudio del módulo de cortante máximo
- 6.4 Definición de la Curva de Módulo G y amortiguamiento β contra γ_c
- 6.5 Posibilidades de Licuación
- 6.6 Estudio in Situ

7. Estratigrafía

- 7.1 Descripción de los Perfiles Típicos
- 7.2 Modelo Estratigráfico para la Zona Normalmente Consolidada

8. Zonificación Geotécnica Analítica

- 8.1 Zonificación por compresibilidad
- 8.2 Zonificación por capacidad portante

9. Zonificación Geotécnica De Síntesis

10. Recomendaciones Para Estudios Futuros

Referencias

Lista de Figuras

- Figura 2.1** Localización de los Sondeos.
Figura 2.2a Muestra de Pistón Estacionario.
Figura 2.2b Muestreador y Tubo Porta-Muestras.
Figura 2.3 Punta del Muestreador.
Figura 2.4 Extracción de la Muestra en el Laboratorio.
Figura 3.1 Gráfico de límite líquido en función de la profundidad Sondeo Ingeominas.
Figura 3.2 Gráfico de límite líquido en función de la profundidad Zona Arcillas blandas.
Figura 3.3 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 1.
Figura 3.4 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 2.
Figura 3.5 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 4.
Figura 3.6 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 5.
Figura 3.7 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 9.
Figura 3.8 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 9a.
Figura 3.9 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 13.
Figura 3.10 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 14.
Figura 3.11 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 17.
Figura 3.12 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 19.
Figura 3.13 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 20.
Figura 3.14 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 21.
Figura 3.15 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 22.
Figura 3.16 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo B22.
Figura 3.17 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 23.
Figura 3.18 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 24.
Figura 3.19 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 25.
Figura 3.20 Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 26.

- Figura 3.21** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 27.
- Figura 3.22** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 28.
- Figura 3.23** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 29.
- Figura 3.24** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 30.
- Figura 3.25** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 31.
- Figura 3.26** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 33.
- Figura 3.27** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 34.
- Figura 3.28** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 36.
- Figura 3.29** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 37.
- Figura 3.30** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 38.
- Figura 3.31** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 39.
- Figura 3.32** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 42.
- Figura 3.33** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 43.
- Figura 3.34** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 44.
- Figura 3.35** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 45.
- Figura 3.36** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 48.
- Figura 3.37** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 49.
- Figura 3.38** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 50.
- Figura 3.39** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 51.
- Figura 3.40** Gráfico de plasticidad de Casagrande en función de la profundidad, Sondeo N 52.
- Figura 3.41** Gráfico de plasticidad de Casagrande para todos los suelos estudiados.
- Figura 3.42** Isovalores de pendiente de la correlación W_i, I_p .
- Figura 3.43** Gráfico de porcentaje de partículas inferiores a $2\mu\text{m}$ en función de la profundidad.
- Figura 3.44** Gráfico de actividad.
- Figura 3.45** Gráfico de porcentaje de materia orgánica en función de la profundidad, Sondeo Ingeominas.
- Figura 3.46** Gráfico de porcentaje de materia orgánica en función de la profundidad, Zona arcillas blandas.

- Figura 3.47** Gráfico de peso específico de sólidos en función del porcentaje de materia orgánica.
- Figura 4.1** Gráfico de compresión isotrópica en plano aritmético.
- Figura 4.2** Gráfico de compresión isotrópica en plano logarítmico.
- Figura 4.3** Gráfico de correlación entre el parámetro λ de compresión isotrópica y el límite líquido.
- Figura 4.4** Gráfico de correlación entre el parámetro N de compresión isotrópica y el límite líquido.
- Figura 4.5** Gráfico de compresión odeométrica en plano aritmético.
- Figura 4.6** Gráfico de compresión odeométrica en plano logarítmico.
- Figura 4.7** Gráfico de superposición compresión isotrópica y compresión oedométrica.
- Figura 4.8** Resultados de los ensayos de consolidación oedométrica en función del límite líquido.
- Figura 4.9** Gráfico de compresión unidimensional con velocidad de carga controlada.
- Figura 4.10** Gráfico de comparación de los métodos para compresión unidimensional.
- Figura 4.11** Coeficientes de compresibilidad comparación entre los métodos convencional y de deformación controlada.
- Figura 4.12** Gráfico de coeficiente de compresión en función del límite líquido.
- Figura 4.13** Gráfico de coeficiente de recompresión en función del coeficiente de compresión.
- Figura 4.14** Gráfico del esfuerzo de preconsolidación en función de la profundidad, en la Zona blanda.
- Figura 4.15** Gráfico del esfuerzo de preconsolidación en función de la profundidad, en la Zona dura.
- Figura 4.16** Gráfico de histograma del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite líquido.
- Figura 4.17** Gráfico de histograma del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite plástico.
- Figura 4.18** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $20 < WI < 40$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.19** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $40 < WI < 60$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.20** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $60 < WI < 80$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.21** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $80 < WI < 100$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.22** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $100 < WI < 120$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.23** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $120 < WI < 140$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.24** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $140 < WI < 160$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.25** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $160 < WI < 180$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.26** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $180 < WI < 200$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 4.27** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $200 < WI < 220$ ($G_s = 2.5$).

- Figura 4.28** Gráficas de consolidación comparadas con el modelo de Compresibilidad $220 < W_I < 240$ ($G_s = 2.5$).
- Figura 5.1** Gráfico de resultado ensayo triaxial CU.
- Figura 5.2** Gráfico de la línea de estado crítico en el plano q' p' .
- Figura 5.3** Gráfico de la línea de estado crítico en el plano v p' .
- Figura 5.4** Gráfico de posición de la línea de estado crítico en el plano v p' para diferentes I_p .
- Figura 5.5** Gráfico de correlación entre el parámetro Γ de la línea de estado crítico y límite líquido.
- Figura 6.1** Gráfico Ciclos de Histéresis Ensayo Triaxial Cíclico.
- Figura 6.2** Gráfico de resultado típico de ensayo triaxial cíclico, curva de módulo cortante en función de la deformación.
- Figura 6.3** Gráfico de resultado típico de ensayo triaxial cíclico, curva de amortiguamiento en función de la deformación.
- Figura 6.4** Gráfico de G_{max} en función del esfuerzo de confinamiento σ_3 .
- Figura 6.6** Gráfico de G_{max} en función del esfuerzo de la relación de vacíos e .
- Figura 6.6** Gráfico de curvas de G/G_{max} en función de la deformación cortante para diferentes I_p .
- Figura 6.7** Gráfico de límites propuestos por DOBRY para el módulo cortante y el amortiguamiento.
- Figura 6.8** Gráfico de límites propuestos por DOBRY para el módulo cortante y el amortiguamiento.
- Figura 6.9** Gráfico de límites propuestos por DOBRY para el módulo cortante y el amortiguamiento.
- Figura 6.10** Gráfico de límites propuestos por DOBRY para el módulo cortante y el amortiguamiento.
- Figura 6.11** Gráfico de comparación resultados de módulo cortante contra límites de DOBRY según I_p .
- Figura 6.12** Gráfico de comparación resultados de amortiguamiento contra límites de DOBRY según I_p .
- Figura 6.13** Gráfico de correlación entre los parámetros α y β^* del modelo.
- Figura 6.14** Gráfico de variación del parámetro β^* del modelo en función de I_p .
- Figura 6.15** Gráfico de variación de G_{max} en función de σ_3 y la relación de vacíos e .
- Figura 6.16** Gráfico de calibración del modelo contra ensayo de laboratorio, G/G_{max} .
- Figura 6.17** Gráfico de calibración del modelo contra ensayo de laboratorio, G .
- Figura 6.18** Velocidad de onda de cortante, presión de confinamiento : $0 \text{ Kg/cm}^2 - 1.0 \text{ kg/cm}^2$.
- Figura 6.19** Velocidad de onda de cortante, presión de confinamiento : $2.0 \text{ Kg/cm}^2 - 6.0 \text{ kg/cm}^2$.
- Figura 6.20** Velocidad de onda de cortante.
- Figura 6.21** Resultados típicos de un ensayo presiométrico cíclico.
- Figura 6.22** Resultados de los ensayos DOWN HOLE.
- Figura 7.1** Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N1.
- Figura 7.2** Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N2.
- Figura 7.3** Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N4.
- Figura 7.4** Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N5.
- Figura 7.5** Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N9.
- Figura 7.6** Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N9A.

- Figura 7.7 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N13.
Figura 7.8 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N14.
Figura 7.9 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N17.
Figura 7.10 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N19.
Figura 7.11 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N20.
Figura 7.12 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N21.
Figura 7.13 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N22.
Figura 7.14 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo B22.
Figura 7.15 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N23.
Figura 7.16 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N24.
Figura 7.17 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N25.
Figura 7.18 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N26.
Figura 7.19 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N27.
Figura 7.20 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N28.
Figura 7.21 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N29.
Figura 7.22 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N30.
Figura 7.23 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N31.
Figura 7.24 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N33.
Figura 7.25 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N34.
Figura 7.26 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N36.
Figura 7.27 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N37.
Figura 7.28 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N38.
Figura 7.29 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N39.
Figura 7.30 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N42.
Figura 7.31 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N43.
Figura 7.32 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N44.
Figura 7.33 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N45.
Figura 7.34 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N48.
Figura 7.35 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N49.
Figura 7.36 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N50.
Figura 7.37 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N51.
Figura 7.38 Perfil estratográfico y ensayos de laboratorio, Sondeo N52.
Figura 8.1 Probabilidad asentamiento último >50cm.
Figura 8.2 Probabilidad de falla $Q=3 \text{ T/m}^2$.

Reconocimientos

Es importante resaltar que el inmenso trabajo de laboratorio no hubiera podido llegar a feliz término sin la estrecha colaboración de Ingeominas y de la abnegada labor del equipo de ingenieros que trabajaron en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. La realización del importante número de ensayos en un plazo de menos de un año necesitó con frecuencia prolongar las jornadas de trabajo, incluyendo con frecuencia los domingos y festivos. Por parte del laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes que realizó esta parte del estudio se expresan los agradecimientos a los ingenieros: Fernando López, Javier Camacho, María José Garcés, Alvaro Torres, José Omar Torres, Octavio Coronado, Carlos Benavides, Jaime Porto. Y a los auxiliares de ingeniería: Oscar Reyes, Tania Oñate, Johanna Salas. Por parte de Ingeominas se recibió la valiosa colaboración de la ingeniera Sandra Garzón y del geólogo Vladimir Torres.

Capítulo 1

Introducción

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 de 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 Geotecnia 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.

- 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 llevada a cabo durante el estudio de la Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá trata de llenar este vacío. Es así como el objetivo principal de este estudio es obtener parámetros que permitan simular en computador el comportamiento de los suelos de la ciudad durante un movimiento sísmico de características conocidas.

El primer paso de este estudio fue la investigación de campo durante la cual se realizaron 38 sondeos a diferentes profundidades, la mayoría de ellos se realizaron hasta una profundidad de 50 m ya que en estudios previos tales como la "Microzonificación Sísmica de Popayán" se pudo constatar que la respuesta sísmica del subsuelo depende fundamentalmente de los depósitos superiores del subsuelo. Con el fin de determinar la profundidad del basamento rocoso y tomar muestras del material presente a esa profundidad se realizaron 6 sondeos a más de 120 m de profundidad. Como complemento a los sondeos superficiales (50 m) y a los profundos se realizaron algunos sondeos a profundidad intermedia (100 m); el objetivo de estas perforaciones fue complementar la información de los sondeos superficiales y obtener bases experimentales para extrapolar las propiedades dinámicas de los sondeos que no lograron llegar hasta el basamento rocoso.

Las muestras necesarias para el estudio de las propiedades mecánicas de los suelos presentes en los cerros de la ciudad se obtuvieron mediante 14 apiques. Estas muestras se estudiaron en laboratorio y se obtuvieron los parámetros

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 cortante. El aparato triaxial cíclico se utilizó para investigar las propiedades del suelo en el intervalo de medias a altas deformaciones cortantes ($10^{-4} < \gamma_c < 10^{-2}$)*, para las deformaciones cortantes muy pequeñas se utilizó el aparato piezoeléctrico.

Puesto que el objetivo principal del subproyecto de Zonificación Geotécnica es tratar de caracterizar el comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad de Bogotá de la manera más completa, se trató de ir mas allá de la simple caracterización dinámica de los suelos presentes en los sondeos realizados. Es así como se trabajó en el planteamiento de una ley de comportamiento del suelo con la cual se pueda tener en cuenta diferentes variables tales como la plasticidad, el grado de confinamiento y la posible preconsolidación.

Algunos de los ensayos de laboratorio se complementaron con su equivalente en ensayos *in situ*: los ensayos triaxiales con ensayos presiométricos cíclicos realizados con el presiómetro Menard y los ensayos de velocidad de onda con ensayos Down Hole. Estos ensayos, concretamente el ensayo presiométrico cíclico, además de complementar el estudio plantean una esperanzadora posibilidad de estudiar el comportamiento dinámico de los suelos obteniendo numerosa información *in situ* a costos razonables.

Las propiedades dinámicas de los suelos no son mas que una extensión de su comportamiento bajo cargas monotónicas las cuales están íntimamente ligadas a sus propiedades índice. Por este motivo se realizaron numerosos ensayos de caracterización de los suelos (límites de Atterberg, granulometría, contenido de materia orgánica, humedad natural y peso específico de sólidos), 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 %.

resistencia al corte (compresión inconfiada, veleta de laboratorio y ensayos de compresión triaxial) y ensayos de compresibilidad (compresión isotrópica y unidimensional). Con base en los resultados de este estudio se logró una mejor caracterización de las zonas de suelos de comportamiento homogéneo planteadas en los estudios anteriores y establecer correlaciones entre sus propiedades.

Localización De Los Sondeos

Durante la investigación de campo se realizaron 38 sondeos y 14 apiques cuya localización se indica en la Figura 2.1. La profundidad de los sondeos realizados varía desde 20 m hasta 250 m y está consignada en la tabla 2.1. El porcentaje de recuperación de muestras inalteradas utilizado en este estudio varió de acuerdo con la profundidad de la siguiente manera: para los primeros 20 m se tomaron muestras cada dos metros, entre 20 y 50 m cada 5m y finalmente entre 50 y 250 m cada ocho metros. 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. En las fotografías de las figuras 2.2, 2.3 y 2.4 se presenta las características del muestreador utilizado y la extracción de una de ellas en el laboratorio. Las muestras así obtenidas se sometieron en el laboratorio a un proceso de extracción del tubo portamuestras (tubo de PVC de 3 pulgadas), parafinado y almacenamiento en cuarto húmedo. El diámetro de 3 pulgadas asegura que las muestras utilizadas en los ensayos de resistencia al corte: triaxiales y triaxiales cíclicos, se encuentren prácticamente inalteradas. En efecto ya que el diámetro de las muestras necesario para la realización de estos ensayos es de 2 pulgadas, durante el proceso de tallado de la muestra se retira la parte exterior que ha estado en contacto con las paredes del muestreador, de este modo se asegura que el núcleo central utilizado en el ensayo se encuentre en condiciones inalteradas.

Mediante los sondeos profundos se trató de encontrar el basamento rocoso, esto con el fin de determinar su profundidad y recuperar muestras de roca que

permitieran su caracterización desde el punto de vista del comportamiento 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 177 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. Este resultado confirma los datos del estudio de la exploración geofísica a partir de los cuales se puede inferir que la profundidad de la roca en esos puntos es de 450 m y 380 m respectivamente. Adicionalmente el sondeo localizado en el monumento a los Héroes con una profundidad de 100, también llegó al lecho rocoso.

Con los sondeos de 50 m de profundidad se trató de cubrir la ciudad que corresponde al área de estudio para su caracterización desde el punto de vista geotécnico. Como complemento a los sondeos profundos y de 50 m de profundidad se realizaron 3 sondeos a 100 m de profundidad, los resultados de estos sondeos y de los profundos sirven de base para extrapolar las características geotécnicas hasta el nivel de roca en los sondeos que no lograron llegar al basamento rocoso.

TABLA 2.1.
Profundidad y localización de los Sondeos

SONDEO	SITIO	NORTE	ESTE	PROFUNDIDAD [m]
N1	Cll 170 - FFNN	1'016.800	1'005.100	50
N2	Jardines de Paz	1'021.000	1'004.000	50
N4	Cll 138 Club de Suboficiales	1'014600	1'014.000	50
N5	Cll 100 - Autopista Norte	1'010.000	1'002.300	50
N9	Cll 127 - Autopista Norte	1'012.200	1'002.600	27
N9A	Cll 126 - Cra 29	1'012.200	1'003.100	190
N13	Clínica Corpas	1'018.300	998.300	50
N14	Av. Cundinamarca - Cll 139	1'016.200	997.600	246
N17	Barrio Bochica Norte	1'012.700	996.700	50
N19	Barrio El Lujan - Av. Boyaca	1'009.200	997.300	50
N20	Cra 82 - Cll 68	1'010.900	997.000	20
N21	Terminal Transportes	1'006.700	995.800	100
N22	Av. Boyacá - Cll 13	1'005.900	994.500	23
B22	Barrio Fontibón - Cll 13	1'007.400	993.200	50
N23	Av. 68 - Av. Américas	1'003.900	995.000	50
N24	C. Comer. Plaza Américas	1'002.500	993.600	20
N25	Plazoleta Banderas	1'003.900	992.100	20
N26	Barrio Patio Bonito	1'004.700	999.500	20
N27	Parque Timiza	1'001.500	991.500	130
N28	Autopista Sur - Av. 68	999.900	993.300	50
N29	Barrio El Apogeo	1'000.000	989.400	20
N30	Barrio Bosa La Estación	1'000.000	998.100	20
N31	Barrio Bosa Holanda	1'003.500	998.000	20
N33	Monumento los Heroes	1'007.700	1'001.900	100
N34	Escuela Militar Cll 80	1'008.700	1'001.000	20
N36	Cll 63 Parque los Novios	1'006.400	999.400	20
N37	Cra 50 - Cll 26	1'004.800	998.100	50
N38	Barrio Puente Aranda	1'003.900	996.500	20
N39	Centro Administra. Distrital	1'003.200	999.500	20
N42	Cra 30 - Cll 6	1'001.100	997.700	20
N43	Av. 1 de Mayo - Cra 30	1'000.000	996.000	100
N44	Cra 27 - Cll 44 Sur	999.300	995.200	20
N45	Barrio Tunal	997.200	993.600	50
N48	Univ. Agraria Cll 170	1'017.300	1'002.800	130
N49	Av. 30 - INGEOMINAS	1'005.000	997.700	180
N50	Cll 80 - Av. Boyaca	1'011.000	998.700	50
N51	Aeropuerto el Dorado	1'010.900	993.300	250
N52	Barrio Kennedy			22

Los apiques se realizaron en la zona de los cerros con el fin de recuperar muestras que permitieran estudiar las condiciones de estabilidad de las laderas en esta zona. Estos llegaron hasta un máximo de 5 m de profundidad y en ellos se extrajeron muestras inalteradas en bloque.

Cabe anotar que la metodología utilizada en este estudio consiste en caracterizar de una manera muy completa los suelos encontrados en las perforaciones desde el punto de vista de sus propiedades índice (límites de Atterberg) para posteriormente realizar ensayos más elaborados sobre suelos típicos que cubran el intervalo de variación de suelos en Bogotá y establecer leyes de comportamiento que dependan fundamentalmente de las propiedades índice. Lo anterior explica la concentración de ensayos dinámicos en los sondeos utilizados como calibración de los modelos: Ingeominas, Universidad Agraria y Aeropuerto El Dorado.

Propiedades Básicas Del Subsuelo De Santafé De Bogotá

3.1 Límites De Atterberg

Los límites de Atterberg se determinaron por los métodos usuales de laboratorio (norma ASTM D4318). En la formación 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 de mayor dificultad ingenieril en el mundo, razón que explica las frecuentes fallas en obras construidas en la ciudad y justifica el aumento de la inversión en la realización de estudios geotécnicos detallados previos a la realización de cualquier obra.

3.1.1 Variación 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 la Figura 3.1 que corresponde al 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. Una de las explicaciones a este fenómeno está relacionada con el proceso de sedimentación de las partículas de suelo presentes en el lago que originó el depósito de arcillas blandas de la ciudad. En efecto las partículas más arenosas por su mayor velocidad de sedimentación tienden a ubicarse en las capas más profundas mientras que las partículas más pequeñas y por consiguiente

más arcillosas se localizan en superficie. Esta interpretación podría tener validez al menos en la parte mas profunda en donde puede haber ocurrido un proceso de sedimentación, en la zona superficial esta explicación tiene menos validez ya que existen eventos de depositación de volcánicos recientes.

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 límites en un amplio rango que varía de 30 a más de 200 %. Lo anterior podría tener una explicación fundamentada en que durante esta última etapa de sedimentación el fondo arcilloso del lago ya ha adquirido una cierta consistencia hasta un punto tal que las partículas arcillosas no pueden migrar hasta el fondo del depósito y permanecen en capas superficiales. Los estudios de palinología que actualmente se adelantan en Ingeominas conducirán sin duda a explicaciones mas precisas sobre los eventos de depositación que han dado origen al subsuelo de la ciudad.

Es interesante notar que a una profundidad de aproximadamente 160 m se encuentra un estrato de alta plasticidad (límite líquido alrededor de 100). La explicación de la presencia de este estrato sobrepasa el alcance de este estudio, los estudios de palinología realizados en Ingeominas sin duda arrojarán luces sobre la presencia de este estrato a una profundidad tan alta.

Hacia el sur de la ciudad se puede identificar una zona de suelos duros en la que se encuentran dos tipos de suelo principalmente: 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 pero estas arcillas no presentan una alta plasticidad (límite líquido alrededor de 30 %). Esta diferencia en plasticidad con respecto a las otras zonas puede explicarse por una mayor influencia del transporte de sedimentos de los ríos.

En la Figura 3.2 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.

3.1.2 Correlación entre el índice de plasticidad y el límite líquido

Es conocido en geotécnica 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. En el plano horizontal de las Figuras 3.3 a 3.40 en el cual está representado el gráfico de plasticidad de Casagrande puede observarse que esta tendencia es clara en los suelos de Bogotá. En la tabla 3.1 está consignada la relación existente entre estos parámetros así como también su coeficiente de correlación para cada uno de los sondeos estudiados.

TABLA 3.1.

Correlaciones entre el límite líquido y el índice de plasticidad

SONDEO	ECUACION	COEF CORREL
N1	$lp = 0.7124 * (wl - 5.6)$	0.886
N2	$lp = 0.7696 * (wl - 11.4)$	0.977
N4	$lp = 0.8055 * (wl - 18.8)$	0.843
N5	$lp = 0.7786 * (wl - 19.6)$	0.946
N9	$lp = 0.7924 * (wl - 17.9)$	0.976
N9A	$lp = 0.7453 * (wl - 13.9)$	0.951
N13	$lp = 0.7369 * (wl - 13.5)$	0.847
N14	$lp = 0.8074 * (wl - 16.2)$	0.987
N17	$lp = 0.8532 * (wl - 27.5)$	0.954
N19	$lp = 0.8623 * (wl - 25.8)$	0.963
N20	$lp = 0.7159 * (wl - 2.3)$	0.956
N21	$lp = 0.7779 * (wl - 12.4)$	0.975
N22	$lp = 0.7459 * (wl - 11.7)$	0.962
B22	$lp = 0.7968 * (wl - 16.3)$	0.973
N23	$lp = 0.7650 * (wl - 16.2)$	0.967
N24	$lp = 0.8223 * (wl - 17.1)$	0.991
N25	$lp = 0.7400 * (wl - 12.6)$	0.984
N26	$lp = 0.7010 * (wl - 4.7)$	0.965
N27	$lp = 0.7366 * (wl - 11.5)$	0.972
N28	$lp = 0.6309 * (wl - 9.9)$	0.877
N29	$lp = 0.6706 * (wl - 10.9)$	0.992
N30	$lp = 0.7479 * (wl - 12.8)$	0.996
N31	$lp = 0.8012 * (wl - 17.2)$	0.973
N33	$lp = 0.7976 * (wl - 17.8)$	0.966
N34	$lp = 0.7649 * (wl - 15.2)$	0.947
N36	$lp = 0.7541 * (wl - 10.2)$	0.975
N37	$lp = 0.7335 * (wl - 12.2)$	0.980
N38	$lp = 0.7975 * (wl - 17.9)$	0.994
N39	$lp = 0.5971 * (wl - 7.57)$	0.978
N42	$lp = 0.6678 * (wl - 11.2)$	0.986
N43	$lp = 0.6898 * (wl - 12.7)$	0.952
N44	$lp = 0.7369 * (wl - 11.1)$	0.995
N45	$lp = 0.7459 * (wl - 11.1)$	0.949
N48	$lp = 0.7998 * (wl - 10.9)$	0.982
N49	$lp = 0.8082 * (wl - 16.3)$	0.972
N50	$lp = 0.8086 * (wl - 18)$	0.973
N51	$lp = 0.7868 * (wl - 15.4)$	0.923
N52	$lp = 0.7588 * (wl - 15.8)$	0.993

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:

$$I_p = 0.7792 * (w_l - 15.2) \quad r = 0.967 \quad (3.1)$$

En la Figura 3.41 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.

Teniendo en cuenta los resultados de las anteriores correlaciones se encuentra que se podrían agrupar los diferentes tipos de suelo de acuerdo con el valor de la pendiente de la recta que relaciona el límite líquido y el índice de plasticidad. En la Figura 3.42 se representan los valores de la pendiente de la correlación antes mencionada, obteniendo un mapa de isovalores. En este gráfico se encuentra que en los suelos del sur se encuentran correlaciones con menor pendiente que los del norte de origen lacustre y alta plasticidad.

3.2 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 $2 \mu\text{m}$) 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 Figura 3.43 se encuentra la variación del porcentaje de partículas inferiores a $2 \mu\text{m}$ en función de la profundidad exceptuando las capas de arena.

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.

3.3 Actividad

Los límites de Atterberg se determinan sobre una muestra de suelo cuyas partículas tienen dimensiones inferiores a 0.4 mm. Sin embargo solamente las partículas más finas de esa fracción presentan propiedades coloidales susceptibles de modificar dichos límites. Lo anterior conduce a que el valor de los límites dependa en gran medida de la proporción de partículas arcillosas (partículas con tamaño inferior a 2µm) en la muestra. Este fenómeno se observa si se gráfica la variación del índice de plasticidad en función del porcentaje de arcilla (Figura 3.44). Se observa que los suelos de un mismo origen se localizan en líneas rectas que pasan por el origen y el valor de su pendiente es una característica del mineral que lo constituye. Skempton propuso denominar a esta pendiente la actividad del suelo.

Es posible demostrar teóricamente que la actividad es igual al índice de plasticidad de la arcilla que predomina en el suelo:

Cuando el contenido de arcilla es bastante alto, los granos con tamaño superior a 2 micras están empotrados en la arcilla y prácticamente no se tocan. En este caso el suelo llega al límite líquido o plástico cuando la arcilla que lo forma llega a esos límites. Si se admite que el límite líquido o plástico es una característica del mineral y que las partículas superiores a 2 micras prácticamente no retienen agua es posible plantear:

$$I_p = \left[I_p^{arcilla} (\%arcilla) + I_p^{limos} (\%limos) \right] \quad (3.2)$$

Teniendo en cuenta que los limos y arenas no presentan propiedades coloidales y que por lo tanto su índice de plasticidad es nulo se obtiene:

$$I_p^{arcilla} = \frac{I_p}{\%arcilla} = \text{Actividad} \quad (3.3)$$

Esta teoría evidentemente aproximada aclara el concepto de actividad.

Comparando el valor de la actividad de la arcilla blanda de Bogotá con los valores de diferentes arcillas consignados en la tabla 3.2 se puede concluir que la arcilla blanda de Bogotá se ubica alrededor de 1.0

TABLA 3.2.
Valores Típicos de la Actividad para diferentes tipos de Minerales

Mineral	Actividad
Cuarzo	0
Calcita	0.18
Caolinita	de 0.33 a 0.46
Illita	0.90
Montmorillonita Ca	1.5
Montmorillonita Na	7.2

3.4 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 se encuentra 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

autores en diferentes partes del mundo, se consideró conveniente estudiar la variación de este parámetro en la zona de suelos blandos.

En la Figura 3.45 se representa la variación de la materia orgánica en función de la profundidad que se encuentra en el sondeo realizado en Ingeominas y en la Figura 3.46 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 se observan variaciones importantes, en esta capa se encuentran valores que oscilan entre 8 y 30 % con intercalaciones de turba en donde el 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.

El alto contenido de materia orgánica y la gran dispersión de este parámetro que se presenta en los primeros 30 m conducen a pensar que durante el proceso de formación de la capa mas superficial reinó un ambiente semejante a los humedales que se encuentran en algunos sitios de la ciudad combinado con un clima propicio para la formación de materia orgánica.

3.5 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 las 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

materia orgánica que presenta el suelo de la ciudad. En efecto, la Figura 3.47 indica 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 2.7 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 entrada de aire) que caracteriza a los suelos de la ciudad de Bogotá. En efecto las medidas realizadas con un desecador de vacío muestran que la presión de succión correspondiente a la entrada de aire es superior a 10 kg/cm^2 valor que es

considerablemente superior al correspondiente a la profundidad del nivel freático promedio en la zona blanda de Bogotá ($< 1 \text{ Kg/cm}^2$). Esto no excluye que en ciertos puntos de la zona blanda se encuentren arcillas desecadas en superficie por el fenómeno de la evapotranspiración.

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 siguiendo la norma ASTM D2435-90. 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 coeficiente de compresibilidad, coeficiente de recompresión, esfuerzo de preconsolidación y coeficiente de consolidación en los suelos de las zonas de la ciudad que presentan mayores problemas de compresibilidad.

4.1 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. Puesto que este tipo de modelos sirven de base a los programas de computador basados en el método de los elementos finitos utilizados en geotecnia se consideró importante realizar un cierto número de ensayos de este tipo que permitan caracterizar el comportamiento de algunos de los suelos de Bogotá desde el punto de vista elastoplástico.

Cuando los suelos arcillosos se someten a una trayectoria de esfuerzos en compresión isotrópica es posible observar que la curva de variación de la relación de vacíos en función del esfuerzo isotrópico p' esta definida por dos curvas mas o menos bien identificadas. La primera parte de esta curva presenta una mayor reversibilidad que la segunda y corresponde a un dominio de comportamiento cuasi elástico o preconsolidado. En la segunda parte de la curva ($e - p'$) el comportamiento es irreversible y se presentan deformaciones tanto elásticas (reversibles) como plásticas (Figura 4.1).

El límite de estos dos dominios de comportamiento corresponde al límite de elasticidad o esfuerzo de preconsolidación el cual es igual al mayor esfuerzo que ha sufrido el suelo en su historia.

Es usual representar estas curvas en un plano semilogarítmico utilizando logaritmo natural en las abscisas (representación de Cambridge) o logaritmo en base 10. 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, las pendientes de estas rectas en la representación de la escuela de Cambridge son respectivamente κ y λ . El límite del comportamiento cuasi elástico corresponde a P'_o . (Figura 4.2)

Es posible describir las curvas de comportamiento en compresión isotrópica mediante las ecuaciones siguientes:

Para el dominio elastoplástico o normalmente consolidado:

$$v = N - \lambda \ln(p') \quad (4.1)$$

Para el dominio cuasi elástico o preconsolidado:

$$v = v_k - \kappa \ln(p') \quad (4.2)$$

en donde:

v representa el volumen específico: $v = 1 + e$

e representa la relación de vacíos

N representa el valor del volumen específico correspondiente a un esfuerzo isotrópico unitario en el dominio normalmente consolidado

v_k representa el valor del volumen específico correspondiente a un esfuerzo isotrópico unitario en el dominio preconsolidado

En las Figuras 4.3 y 4.4 está representada la relación entre λ y N y el límite líquido. Es posible observar que existe una buena correlación entre la pendiente de la curva de compresión isotrópica en el dominio elastoplástico λ y su punto inicial N con el límite líquido del suelo. En efecto estos dos parámetros dependen de la compresibilidad del suelo la cual a su vez depende de su plasticidad entendiendo plasticidad como límites de Atterberg.

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.

4.2 Compresión Unidimensional U Oedométrica

Los ensayos de compresión unidimensional o compresión oedométrica son las pruebas que tradicionalmente se realizan para calcular los asentamientos por consolidación de una capa de suelo. En este tipo de pruebas se impide la deformación radial de la muestra y se mide únicamente la deformación vertical. Puesto que durante el ensayo no se mide el esfuerzo radial no es posible calcular directamente la trayectoria de esfuerzos. Sin embargo, suponiendo que la relación entre el esfuerzo horizontal y el vertical es igual a K_0 (presión de tierras en reposo)

$$\frac{q'}{p'} = \frac{3(1 - K_o)}{1 + 2K_o} \quad (4.3)$$

En este tipo de ensayos se observa la misma tendencia que en los ensayos de compresión isotrópica: se observan dos dominios de comportamiento uno en el rango cuasi elástico (preconsolidado) y otro en el rango elasto plástico estos dos rangos de comportamiento están separados por el límite de elasticidad o esfuerzo de preconsolidación (Figura 4.5). Al igual que en compresión isotrópica es usual dibujar las curvas de compresión en un plano semilogarítmico (logaritmo decimal en este caso) en este plano los dos dominios de comportamiento están definidos por rectas. Las pendientes de estas rectas se denominan coeficiente de compresibilidad C_c en el dominio elastoplástico o normalmente consolidado y coeficiente de recompresión C_r en el dominio cuasi elástico o preconsolidado (Figura 4.6).

Tanto en las curvas de compresión isotrópica como en las curvas de compresión unidimensional se estudia el mismo fenómeno esto explica la semejanza que tienen las curvas de comportamiento. En efecto en la Figura 4.7 se observa la superposición de una curva de compresión isotrópica y una de compresión unidimensional (tomando $K_o = 1 - \text{sen } \phi$) en esta figura se observa que las curvas de compresión en el dominio elastoplástico o normalmente consolidado son paralelas, esto indica que la pendiente de este dominio en una compresión isotrópica es igual a la correspondiente a una consolidación unidimensional. Puesto que los parámetros de compresión isotrópica λ y κ están definidos en un plano semilogarítmico utilizando logaritmo natural y los parámetros de compresión unidimensional se definen en un plano basado en logaritmo decimal se puede concluir que estos parámetros están relacionados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$C_c = 2.3\lambda \quad (4.4)$$

$$C_r = 2.3\kappa \quad (4.5)$$

4.2.1 Compresión unidimensional con carga controlada

El estudio de la compresibilidad del suelo de las diferentes zonas de la ciudad está basado principalmente en ensayos de compresión unidimensional (oedométricos) aumentando la carga en etapas tal como lo indica la norma ASTM D2435-90. Los resultados se observan en los anexos "Resultados de Ensayos de Laboratorio".

En la Figura 4.8 están representados los resultados de algunos de los ensayos realizados, donde se observa la siguiente tendencia, que está en acuerdo con lo reportado ampliamente en la literatura: a medida que el límite líquido aumenta la compresibilidad es decir que aumenta el coeficiente de compresibilidad C_c . Los resultados de los ensayos de compresión consolidométrica merece un análisis detallado razón por la cual cada uno de ellos se analiza por separado en este informe.

4.2.2 Compresión unidimensional con velocidad de carga controlada

Usualmente los ensayos de compresibilidad se realizan con etapas de carga controlada sin embargo este procedimiento para suelos tales como las arcillas blandas de Bogotá puede tardar mucho tiempo (15 días realizando una etapa de descarga). Teniendo en cuenta esta demora en la obtención de resultados algunos investigadores han tratado de desarrollar métodos acelerados para la realización de ensayos de compresión unidimensional entre ellos podemos citar el ensayo con velocidad de deformación controlada desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego y descrito por Sandbaeckken 1987. Con el fin de estudiar la posibilidad de realizar estos ensayos sobre suelos de la ciudad de Bogotá se implementó un equipo que permite realizarlos el cual está compuesto básicamente por una celda oedométrica convencional equipada con un sensor de presión de poros una celda

de carga y colocada en una prensa que permite aplicar un desplazamiento controlado.

Los ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento descrito por el NGI y sus resultados se muestran en la Figura 4.9. La comparación entre los ensayos realizados a velocidad de deformación controlada que se presenta en la Figura 4.10 muestran una buena concordancia con los ensayos realizados siguiendo el procedimiento tradicional pero es importante anotar que los ensayos acelerados se realizaron en un lapso inferior a 24 horas. En la Figura 4.11 se observa la comparación del coeficiente de compresibilidad obtenido con ambos ensayos.

Con base en los ensayos pocos comparativos realizados se puede concluir que es muy promisorio la posibilidad de implementar este tipo de ensayos en los laboratorios de suelos de la Ciudad sin embargo es importante continuar realizando estudios comparativos para poder plantear una conclusión definitiva.

4.3 Análisis Estadístico Del Coeficiente De Compresibilidad

El coeficiente de compresibilidad es un parámetro de suma importancia ya que de él depende la magnitud de la deformación del suelo bajo cargas externas. Este parámetro depende principalmente de la plasticidad del suelo, en la Figura 4.12 se observa que en efecto existe una buena correlación entre el límite líquido y el coeficiente de compresibilidad. Esta correlación ha sido investigada por diferentes autores alrededor del mundo y la más aceptada es la de Skempton quien plantea la correlación $C_c = 0.009(WL - 10)$. La correlación que se encuentra para la ciudad de Bogotá es $C_c = 0.0089*(wl - 14)$ con un coeficiente de correlación de 0.62. Esta correlación es bastante cercana a la de Skempton y además tiene una justificación que concuerda con los análisis de valores límites que se presenta en el párrafo 4.7.

4.4 Análisis Estadístico Del Coeficiente De Recompresión

El coeficiente de recompresión es el equivalente al coeficiente de compresibilidad 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 $Cr = Cc/10$. En la Figura 4.13 están representados los valores de estos parámetros para los suelos investigados, con base en esta figura se encuentra una correlación $Cr = Cc/8$ con un coeficiente de correlación de 0.83.

4.5 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 del estado inicial en que se encuentra el 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 zona preconsolidada en superficie de espesor variable de alrededor de 10 m, el cual puede ser debido a esfuerzos internos de succión producto de la baja del nivel freático, llegando a unos esfuerzos de preconsolidación del orden de 1.5 kg/cm^2 ; en profundidad este esfuerzo disminuye con respecto al superficial, llegando a valores alrededor de 1.0 kg/cm^2 a los 20 m. La zona normalmente consolidada no presenta valores de esfuerzo de preconsolidación muy altos en profundidad, 3 kg/cm^2 a los 70 m, debido a la baja densidad de los suelos ($\gamma = 1.6 \text{ Ton/m}^3$) (Figura 4.14). 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 , a causa de la succión e incrementando con la profundidad a valores del orden de 4 kg/cm^2 a los 50 m.(Figura 4.15)

4.6 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 4.3 se presentó la correlación entre el coeficiente de compresibilidad y el límite líquido sin embargo para poder localizar la recta correspondiente al dominio normalmente consolidado en el plano ($e - \log \sigma'_v$) es necesario conocer el punto inicial o final de dicha recta. Existen evidencias en la literatura (Biarez 1994) que para la gran mayoría de los suelos (remoldeados) tanto el punto correspondiente al límite líquido como el correspondiente al límite plástico corresponden a dos valores bien definidos del esfuerzo efectivo vertical: según Biarez 0.07 Kg/cm^2 y 10 Kg/cm^2 respectivamente.

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 4.16 se observa el histograma de frecuencias del esfuerzo efectivo vertical que corresponde al límite líquido, se observa que el valor promedio se encuentra para un valor de 0.2 kg/cm^2 .

Al igual que con el límite líquido en la Figura 4.17 se muestra el histograma del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite plástico, 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. En efecto, tomando como base los valores del esfuerzo efectivo vertical correspondientes a los límites líquido y plástico podemos calcular el coeficiente de compresibilidad de la siguiente manera:

$$C_c = \frac{e_{w_L} - e_{w_P}}{\text{Log}(\sigma_{w_P}) - \text{Log}(\sigma_{w_L})}$$

$$C_c = \frac{G_s(w_L - w_P) / 100}{\text{Log}(\sigma_{w_P}) - \text{Log}(\sigma_{w_L})} = \frac{G_s IP / 100}{\text{Log}(\sigma_{w_P}) - \text{Log}(\sigma_{w_L})}$$

Tomando los valores del esfuerzo efectivo vertical correspondiente al límite líquido y plástico se obtiene:

$$C_c = \frac{G_s IP}{207}$$

Sin embargo tomando el valor promedio de G_s para Bogotá y utilizando la correlación encontrada entre el índice de plasticidad y el límite líquido $Ip = 0.7792(WI - 15.2)$ se obtiene:

$$C_c = 0.0094 (w_L - 15.2)$$

relación que es muy próxima a la de Skempton y a la encontrada en el párrafo 4.4.

4.7 Modelo Estadístico De Compresibilidad

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. Las Figuras 4.18 a 4.28 muestran las relaciones que se obtienen para un peso específico de sólidos $G_s=2.5$, sobre las cuales se encuentra la superposición de algunas de las curvas de consolidación, donde se observa una buena correspondencia entre los resultados experimentales y el modelo.

Resistencia Al Corte

La resistencia al corte de los suelos de Santafé de Bogotá se estudió principalmente con base en pruebas de compresión triaxial consolidadas no drenadas. 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. Adicionalmente se realizaron algunas pruebas de resistencia al corte in situ utilizando el presiómetro.

5.1 Resistencia Al Corte En Pruebas De Compresión Triaxial

Los ensayos 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. Los resultados de los ensayos se presentan en una gráfica que contiene seis planos en los que se presentan las trayectorias de carga. En el primer plano se presenta la variación del esfuerzo desviador en función de la deformación axial (q, ϵ_1), en el segundo se presenta la trayectoria de carga seguida en el plano de invariantes isotrópico y desviador (p', q'); en el tercer plano se presenta la trayectoria de carga en el plano de esfuerzo normal contra cortante, en el cuarto plano se muestra la evolución de la presión de poros en función de la deformación axial (u, ϵ_1), finalmente en el quinto y sexto plano se presenta la variación de la relación de vacíos en función del esfuerzo isotrópico p' , tanto en escala aritmética como logarítmica (Figura 5.1).

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.

5.1.1 Línea de estado crítico

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. De esta manera las ecuaciones que representan a la línea de estado crítico son:

$$\begin{array}{ll} \text{en el plano } p', q': & q' = M p' \\ \text{en el plano } v, \text{Ln}(p') & v = \Gamma - \lambda \text{Ln}(p') \end{array}$$

En estas ecuaciones Γ representa el valor del volumen específico correspondiente a un esfuerzo isotrópico unitario, λ es la pendiente de la línea de estado crítico la cual es paralela a la de compresión isotrópica y M es la pendiente de la línea de estado crítico en el plano p' , q' .

En las Figuras 5.2 y 5.3 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 . Para este suelo los valores de las constantes M , Γ y λ son 0.6746, 2.026 y 0.5577 respectivamente.

Tal como se observa en la Figura 5.4 la posición de la línea de estado crítico en el plano v p' depende fundamentalmente de la plasticidad del suelo (límites de Atterberg). Es así como existen correlaciones entre M y Γ y el límite líquido, la correlación entre λ y el límite líquido es la misma que se presentó en el análisis de los resultados de compresión isotrópica. (Figura 5.5 y 5.6)

5.1.2 Ángulo de fricción interno

El ángulo de fricción interno en esfuerzos efectivos ϕ' sirve para representar la envolvente de resistencia al corte en el plano de Mohr, esta envolvente es igual a la línea de estado crítico representada en un plano diferente. Puesto que se trata de la misma línea en ambos planos existe una relación directa entre M y el ángulo de fricción interno ϕ' :

$$M = \frac{6 \operatorname{sen} \phi}{3 - \operatorname{sen} \phi}$$

De esta ecuación se obtiene:

$$\phi = \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{3M}{6 - M} \right)$$

Teniendo en cuenta la correlación encontrada entre M y el límite líquido se encuentra la correlación del ángulo de fricción interno la cual se representa en la Figura 5.7.

5.1.3 Trayectorias de esfuerzos

El comportamiento de las obras de ingeniería involucra dos variables fundamentales: la resistencia máxima y la deformabilidad, tradicionalmente en

teorías modernas del comportamiento de los suelos es que tienen la capacidad de integrar la resistencia última en plasticidad perfecta con la deformabilidad. La deformabilidad de un suelo se representa en el plano de esfuerzo desviador en función de la deformación axial, la forma de las curvas que se contienen en este plano depende en gran medida de la trayectoria de carga en el plano de invariantes p' , q' .

Si se considera un tipo de suelo en particular es usual encontrar que la forma de las trayectorias de carga sigue una tendencia similar. Es así como es posible normalizar las trayectorias de carga con respecto al esfuerzo isotrópico P'_e correspondiente al volumen específico de la muestra.

$$P'_e = e^{\frac{N-v}{\lambda}}$$

En la Figura 5.8 se presentan las trayectorias de carga normalizadas para diferentes suelos normalmente consolidados, en ella se observa que las trayectorias de carga presentan un eje de simetría diferente al eje de compresión isotrópica p' . Este tipo de comportamiento es usual en arcillas naturales anisotrópicas (Biazrez 1994) las cuales presentan un eje de simetría en el plano de invariantes p' q' que corresponde con el eje de anisotropía dado por el coeficiente de empuje de tierras en reposo ($K_0 = 1 - \text{sen } \phi$).

$$\frac{q'}{p'} = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0}$$

5.1.4 Resistencia al corte en esfuerzos totales

La resistencia al corte no drenada representada por la cohesión no drenada C_u puede obtenerse con base en los resultados de los ensayos triaxiales realizados. En efecto para un volumen específico v , la cohesión no drenada está dada por:

$$Cu = \frac{1}{2} Me^{\frac{\Gamma-v}{\lambda}}$$

Con base en las correlaciones encontradas para el cambio de volumen en compresión uniaxial es posible calcular el volumen específico correspondiente a un esfuerzo vertical σ'_v :

$$v = 1 + \frac{G_s W_L}{100} - Cc \text{Log} \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_{wL}} \right)$$

Esta ecuación expresada en logaritmo neperiano conduce a la siguiente relación:

$$v = 1 + \frac{G_s W_L}{100} - \lambda \text{Ln} \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_{wL}} \right)$$

Finalmente se obtiene la siguiente expresión para Cu:

$$Cu = \frac{1}{2} Me^{\frac{\Gamma-1-\frac{G_s W_L}{100}}{\lambda}} \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_{wL}} \right)$$

Con base en las correlaciones encontradas entre Γ y λ con el límite líquido sería posible obtener una correlación entre la cohesión no drenada y el límite líquido.

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 con ensayos in situ como el Down Hole y el Presiometro de Menard cíclico. Debido a la gran variedad de suelos y condiciones que pueden afectar la respuesta dinámica de estos y la extensión de la ciudad (400 km aproximadamente), sería casi imposible y muy costoso pensar la posibilidad de realizar un estudio determinístico de las propiedades dinámicas de los suelos, por lo que se decidió utilizar un modelo de comportamiento para simular el comportamiento dinámico, pero por las características particulares del suelo de la ciudad, algunos modelos desarrollados con anterioridad como el de Hardin y Drnevich y el de Ramberg y Osgood, no dieron buenos resultados, entonces se estudió la posibilidad de realizar un modelo de comportamiento dinámico en el cual se involucren todas aquellas variables que afectan en mayor importancia la respuesta del suelo y que tuviese en cuenta la diversidad de suelos de la ciudad con sus características propias, alta plasticidad, altas relaciones de vacíos, etc.

6.1 Metodología de laboratorio

Para estudiar el comportamiento de los suelos se realizaron 100 ensayos triaxiales cíclicos con deformación controlada a arcillas, para obtener la curva de degradación del módulo cortante contra la deformación angular y ensayos triaxiales cíclicos con esfuerzo controlado en materiales arenosos para estudiar la

susceptibilidad a la licuación de los materiales del sur de la ciudad y 25 ensayos de medición de la velocidad de onda de corte con la ayuda de elementos piezoeléctricos generadores y receptores.

Los ensayos triaxiales cíclicos con deformación controlada se realizan aplicándole a la muestra confinada a un esfuerzo σ_3 isotrópico, 13 ciclos de deformaciones angulares desde 10^{-3} % hasta 1.5 %, lo que significa una deformación axial máxima del 1%. El equipo utilizado para este ensayo consta de 4 sensores eléctricos que toman en tiempo real los datos de deformación, esfuerzo y presión de poros en el transcurso del ensayo.

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se encuentran los resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico, los ciclos de histéresis de esfuerzo cortante τ contra deformación angular γ_c , la curva de degradación del módulo cortante G contra la deformación angular γ_c y la curva de amortiguamiento contra deformación angular γ_c .

6.2 Estudio del módulo de cortante y del amortiguamiento

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 vista como límites de Atterberg.

6.2.1 Efecto de la Presión de Confinamiento

Con base en la literatura se conoce que en los suelos existe una fuerte relación entre el valor de módulo cortante inicial G_{max} y la presión de confinamiento y que esta relación no es lineal. De relaciones teóricas se encuentra la siguiente ecuación que relaciona el valor inicial del módulo de rigidez E_0 , el cual a pequeñas deformaciones se encuentra relacionado con el de cortante por la relación de poisson.

$$E_o = \frac{3}{2} \alpha p^n \quad (6.1) \text{ (Biarez, 1994)}$$

donde α es una función de la relación de vacíos, n es igual a $1/3$ y p es la presión de confinamiento. Se realizaron varios ensayos a diferentes presiones de confinamiento obteniéndose como resultado que a mayor presión de confinamiento el valor del módulo G_{MAX} incrementa como se observa en la Figura 6.4.

6.2.2 Efecto de la relación de vacíos

El efecto que tiene la relación de vacíos sobre el valor del módulo se puede inferir por la fuerte relación que tiene este parámetro con la presión de confinamiento y se encuentra dada por la siguiente ecuación

$$E = \alpha \frac{(b - e)^2}{1 + e} p^n \quad (6.2) \text{ (Hicher, 1987)}$$

El valor del parámetro b depende de la naturaleza del suelo como ejemplo se tiene la siguiente tabla en la que se muestran valores típicos de este parámetro.

Tabla 6.1.
Adaptada de Hicher

	e	b
Arena - Arena limosa a limo arcilloso - Arcilla dura	$0.4 < e < 0.9$	1.69
Limo arcilloso - Arcilla relativamente dura - Arena limosa	$0.8 < e < 1.4$	2.97
Arcilla consistencia dura o blanda	$1.1 < e < 2.2$	4.60
Arcilla muy blanda	$e > 2$	7.32

El coeficiente α es un parámetro que depende de la naturaleza del suelo, es decir de la mineralogía de las partículas, su forma, su granulometría, etc. (Hicher, 1987). En la anterior tabla se observa que existe una relación entre e y b , pero esta relación es más entre la plasticidad del suelo o el índice de plasticidad I_p y b , estando fuertemente relacionados e y I_p . Los resultados obtenidos se aprecian en la Figura 6.5, en la que se observa que al incrementarse la relación de vacíos el valor del módulo cortante G_{max} disminuye.

6.2.3 Efecto del índice de plasticidad

El efecto de la plasticidad del material, representada por el índice de plasticidad I_p , no recae directamente sobre el valor de G_{max} , sino en la forma y la velocidad con que se degrada el módulo con la deformación, representado en la curva G/G_{max} contra γ_c . Al observar la Figura 6.6 se aprecia que existe diferencia en el comportamiento de las diferentes arcillas mostradas. Una diferencia clara se encuentra en la longitud de la parte elástica de la curva, la cual para uno de los suelos llega hasta un $\gamma_c \approx 0.1 \%$ y en otro solo hasta $\gamma_c \approx 0.02 \%$.

De recopilar resultados de diferentes ensayos con diversos tipos de arcillas, se compararon las curvas de G/G_{max} contra la relación de vacíos y el I_p , encontrándose que cuando G/G_{max} tiende a incrementar, e y I_p también lo hacen (Dobry et al 1987). Basado en esto, Dobry propone las dos siguientes curvas, Figuras 6.7 y 6.8, las cuales esquematizan el comportamiento de la degradación del módulo secante G con la deformación cortante, en función del Índice de Plasticidad I_p . Para el comportamiento del amortiguamiento se realizó un estudio similar por parte de Dobry y el resultado son las curvas mostradas en las Figuras 6.9 y 6.10. Finalmente, la importancia de conocer el grado de linealidad de una arcilla, medido por la posición de G/G_{max} contra γ_c y del amortiguamiento β , radica en poder determinar la capacidad del suelo para amplificar los movimientos sísmicos a los que son sometidos (Dobry et al, 1987). En la Figura 6.6 se resumen algunos resultados de curvas de G/G_{max} contra γ_c obtenidos en este proyecto.

En la tabla 6.2 se resumen parte de los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento de los suelos de la ciudad, donde se pueden apreciar los valores de G_{MAX} , e , σ_3 e I_p .

Tabla 6.2.
Resultados Típicos del ensayo Triaxial cíclico

MUESTRA	Gmax [kg/cm ²]	I _p [%]	e	σ ₃ [kg/cm ²]
N4946	530	17.3	0.77	4.5
N4934	370	53.3	1.08	3.5
N49254	315	47.0	1.54	2.5
N4925	260	34.6	1.33	2.5
N4916	105	120.4	1.48	2.0
N2115	170	80.2	1.88	1.5
N1411	79	94.4	2.69	1.0
N1404	34	136.8	2.80	0.5
N51154	1100	7.0	0.41	7.1
N5177	290	50.4	1.45	4.0
N5140	115	82.7	2.33	2.0
N5120	75	78.5	2.54	1.0
N2709	150	36.1	1.24	0.5
N2718	65	97.7	2.11	0.5
N2334	520	24.4	0.58	2.5
N2316	220	36.5	1.38	2.0
N2159	750	8.8	0.48	5.0
N2126	330	4.9	0.84	2.0
N2102	140	56.4	1.71	0.5
N1439	400	51.6	1.41	5.0
N1428	250	64.1	1.61	3.5
N4819	75	36.0	0.84	2.0
N4832	65	66.0	1.95	4.0
N4524	500	18.6	0.73	2.5
N4506	180	41.0	1.23	1.0
N9A95	700	43.25	0.93	5.0
N27118	550	21.4	0.89	3.5
N2780	450	11.8	0.63	2.5
N2811	250	31.6	0.77	1.5
N2830	460	23.0	0.75	2.5

6.3 Estudio del módulo de cortante máximo

Por el tipo de ensayo utilizado para obtener la curva de módulo cortante G contra deformación cortante γ_c , no se puede conocer con exactitud el valor de G_{max} debido que la deformación mínima que se alcanza a percibir es del orden de $1 \times 10^{-2} \%$, para obtener el valor de G_{max} se recurrió entonces a extrapolar las curvas utilizando el método propuesto por Nakagawa y Soga (1995), el cual consiste en definir la curva de degradación del módulo como un función hiperbolica, este método se explica con más detalle en el parágrafo 6.4. Para revisar que tan confiables eran los resultados se compararon con los límites propuestos por Dobry, tanto para el módulo como para el amortiguamiento, según el índice de plasticidad como se muestra en las Figuras 6.11 y 6.12, en las que se aprecian muy buenos resultados para los valores de G/G_{MAX} , y no tan buenos para el amortiguamiento. Los valores del módulo de cortante máximo extrapolados mediante el método de Nakagawa se comprobaron con medidas directas en laboratorio utilizando la metodología del "bender element" desarrollado en el Instituto Geotécnico Noruego, algunos de los resultados de estas medidas se muestran en las Figuras 6.18 a 6.20.

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

El modelo desarrollado por Nakagawa (ecu. 6.3) representa de mejor manera la forma de la curva de G contra γ_c y para utilizarlo solo son necesarios definir dos parámetros α y β , el símbolo β aquí es diferente al del amortiguamiento.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \alpha |\gamma|^\beta} \quad (6.3) \text{ (Nakagawa et al, 1994)}$$

El modelo además tiene la facilidad de tener relacionados entre si los dos parámetros generadores, con una relación logarítmica, ya que estos son propios

del tipo de suelo, la cual se hizo para los suelos de Bogotá y se encontró que era de la siguiente forma (Figura 6.13)

$$\alpha = 12.9837 e^{2.8104 \beta} \quad (6.4)$$

Como se dijo anteriormente existe una fuerte relación entre el índice de plasticidad I_p y la forma de la curva, por lo tanto se relacionaron los valores de I_p contra el valor de β para los ensayos realizados (Figura 6.14) por la siguiente ecuación

$$\beta = 0.3431 I_p^{0.212} \quad (6.5)$$

Debido a que los valores del amortiguamiento β obtenidos de laboratorio no eran muy confiables se recurrió entonces a utilizar la ecuación 6.6 para definirlo de manera similar al modelo de Hardin y Drnevich, de esta forma el amortiguamiento también queda ligado al valor de la plasticidad como se dijo anteriormente.

$$\beta = \beta_{max} \left[1 - \frac{G}{G_{max}} \right] \quad (6.6)$$

Para hacer un estimativo del valor de G_{max} se utilizó una relación entre este valor, la relación de vacíos e y la presión de confinamiento σ_3 . Se encontró que esta relación es de la forma

$$G_{MAX} = \alpha F(e) \sigma_3^n \quad (6.7)$$

donde $F(e)$ es una función de la forma

$$F(e) = \frac{(b - e)^2}{1 + e} \quad (6.8)$$

en la que b es una constante. Para los resultados de los ensayos de laboratorio se encontró que la relación que mejor se ajusta a los datos es la siguiente, la cual se observa en la Figura 6.15.

$$\frac{G_{MAX}}{F(e)} = 5.2459 \sigma_3^{0.5905} \quad (6.9)$$

con

$$F(e) = \frac{(10-e)^2}{1+e} \quad (6.10)$$

Para calibrar los resultados obtenidos del modelo, se comparó contra un resultado obtenido de un ensayo realizado en el laboratorio (Fig. 6.16 y 6.17), en el que se observa que la aproximación es buena tanto en la forma de la curva como en el valor de G_{max} .

6.5 Ensayos *in situ*

En las Figuras 6.21 y 6.22 se muestran los resultados de algunos de los ensayos *in situ*: en la Figura 6.21 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 la interpretación de estos resultados. Estos resultados plantean una esperanzadora posibilidad de reducción del costo de los estudios de microzonificación sísmica. En la Figura 6.22 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 NGI.

Estratigrafía

La estratigrafía de cada uno de los sondeos realizados se presenta en las Figuras 7.1 a 7.38. En cada uno de ellos se presenta la variación contra la profundidad del límite líquido, el límite plástico y la humedad natural. Con base en estos resultados se calculó el índice de liquidez en función de la profundidad. La variación de las propiedades índice concuerdan con lo presentado en el capítulo 3.

También se presenta en cada sondeo la variación de la materia orgánica y el peso unitario contra la profundidad. Finalmente se presentan la resistencia al corte obtenida en ensayos de compresión inconfiada y veleta de laboratorio.

El bajo número de perforaciones realizado no permite realizar cortes estratigráficos a lo largo y ancho de la ciudad sin incurrir en errores de interpolación. Sin embargo, es posible identificar algunos sondeos que muestran las tendencias generales de la estratigrafía.

El sondeo de Ingeominas ubicado en la zona blanda presenta las siguientes características geotécnicas: en superficie (primeros 8 m) se encuentra un suelo con límite líquido inferior a 100 que presenta características preconsolidadas. A partir de esta profundidad el límite líquido aumenta hasta valores promedio de 150 con índices de liquidez cercanos a 0.8 y resistencia al corte no drenada C_u inferior a 0.3 Kg/cm^2 . Es frecuente encontrar en la zona blanda estratos de arena, en el caso de Ingeominas se encuentra uno de ellos entre 30 y 40 m de profundidad. En las proximidades de la superficie es frecuente encontrar estratos de turba en este sondeo se encuentran a 12 y 30 m de profundidad. El límite líquido disminuye a

medida que aumenta la profundidad y la cohesión no drenada aumenta hasta valores de 1.2 Kg/cm^2 a una profundidad de aproximadamente 150 m.

El sondeo del parque timiza muestra las características típicas de la parte occidental de la zona dura: en esta perforación se encuentran arenas de grano fino con muy baja presencia de arcillas hasta aproximadamente 50 m de profundidad. En profundidad se encuentran arcillas de baja plasticidad. El sondeo de la autopista sur con carrera 68 presenta características típicas de la parte oriental de la zona dura, en esta perforación se encuentran limos y arcillas poco plásticos con intercalaciones de arena y presencia de turba de 4 m de espesor a una profundidad de 30 m.

Zonificación Geotécnica Analítica

El objetivo de una zonificación geotécnica es agrupar zonas de comportamiento geomecánico homogéneo, puesto que un suelo puede tener un comportamiento diferente en función del tipo de sollicitación que se le aplique se concluye que los resultados de una zonificación solo serán aplicables al parámetro en consideración.

Con el fin de establecer las variaciones relativas entre zonas de comportamiento geomecánico homogéneo (suelo duro, suelo blando) es conveniente que ellas sean caracterizadas por un valor analítico. Es así como es posible realizar una zonificación analítica en la cual se presenten las variaciones relativas de un parámetro dado en el área de estudio.

El parámetro de base para una zonificación analítica debe ser cuidadosamente escogido para evitar las grandes variaciones puntuales que pueden existir en un sitio dado y debe tener en cuenta la dispersión natural que presentan los parámetros geomecánicos al interior de una zona homogénea. Por esta razón se escogió en este proyecto utilizar los conceptos de geoestadística concretamente se utilizó una descripción de tipo probabilístico.

La metodología probabilística tiene varias ventajas la principal de ellas es que permite tener en cuenta la dispersión natural que los parámetros geomecánicos presentan en una zona, además tiene la ventaja de suavizar los valores extremos restandoles importancia de este modo al interior de una zona se observa principalmente la tendencia general y no los valores pico.

En este proyecto se escogieron dos parámetros analíticos de zonificación relacionados con los comportamientos del suelo que tienen mayor interés en geotécnica: la compresibilidad y la capacidad portante.

Como parámetro analítico de compresibilidad se escogió la probabilidad de que el asentamiento último que presenta una cimentación superficial de 15 m de diámetro cimentada a 2 m de profundidad y con una carga neta de 3 ton/m^2 sufriera un asentamiento superior a 50 cm. La cuestión sobre el tiempo necesario para que se produzca este asentamiento no es relevante en este problema ya que solamente se desea obtener un parámetro que permita observar las variaciones relativas entre zonas.

Como parámetro de capacidad portante se escogió la probabilidad de falla de la misma cimentación pero aplicando una carga neta de 5 ton/m^2 .

Los valores de las probabilidades tanto de que los asentamientos sean superiores a un cierto valor como los valores de probabilidad de falla pueden obtenerse adoptando una función de distribución y encontrando los parámetros de dicha función de distribución. Numerosos autores han adoptado tanto para los asentamientos como para la falla funciones de distribución de tipo normal. Para esta función de distribución los parámetros necesarios para describirla son la esperanza matemática E y la varianza V .

La esperanza matemática y la varianza de una función $Y=f(X_i)$ se pueden calcular con base en un desarrollo en series de Taylor (Magnan 1982) alrededor del valor medio $f(m_1, m_2, \dots, m_n)$ en donde los valores m_i representan los valores medios de las diferentes variables que intervienen en la ecuación $Y=f(X_i)$. Limitando el desarrollo al primer o segundo orden se obtiene una expresión aproximada de Y la cual permite determinar de una manera mas simple los valores de los parámetros de densidad de probabilidad de Y .

De este modo se puede plantear una expresión aproximada para la esperanza matemática:

$$E[Y] = f(m_1, \dots, m_n) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i \partial x_j} \Big|_{(m_1, \dots, m_n)} \sigma x_i \sigma x_j$$

$\sigma x_i \sigma x_j$ representa la covarianza de las dos variables aleatorias X_i y X_j ; la varianza tiene como valor aproximado:

$$V[Y] \cong \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Big|_{(m_1, \dots, m_n)} \frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_j} \Big|_{(m_1, \dots, m_n)} \sigma x_i \sigma x_j$$

En el caso en que las variables X_i sean ondependientes se tiene para $\sigma x_i \sigma x_j = 0$ i diferente de j y se llega a la siguiente expresión para la varianza:

$$V[Y] \cong \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(x_1, \dots, x_n)}{\partial x_i} \Big|_{(m_1, \dots, m_n)} \right]^2 V[X_i]$$

En donde $V[X_i]$ representa la varianza de la variable X_i

8.1 Zonificación Por Compresibilidad

Para la zonificación por compresibilidad se utilizaron como variables aleatorias el coeficiente de compresibilidad C_c , el esfuerzo de preconsolidación, los valores límites de las curvas de consolidación y el peso específico de sólidos. Para estos parámetros se utilizó la correlación que presenta cada uno de ellos con el límite líquido (a excepción del peso específico de sólidos) con su respectiva varianza.

Para cada uno de los sondeos se calculó la probabilidad de que el asentamiento de una zapata estándar (15 m de diámetro colocada a 2 m de profundidad y con

una carga de 3 ton/m^2) sea superior a 50 cm. Los resultados de estos cálculos se interpolaron en la superficie del área de estudio con lo cual se obtuvo el mapa representado en la Figura 8.1. Este mapa muestra las variaciones del asentamiento en la ciudad lo cual concuerda bastante bien con las características de compresibilidad que se conocen en las diferentes zonas de la ciudad.

8.2 Zonificación Por Capacidad Portante

Para la zonificación por capacidad portante se utilizó fundamentalmente como variable aleatoria la cohesión no drenada metodología válida únicamente en los suelos cohesivos pero aplicable al caso de Bogotá ya que este tipo de suelos predominan en la ciudad. Para cada uno de los zondeos se calculó la media y la varianza de la cohesión no drenada en la zona de influencia de la zapata. Con base en estos parámetros se calculó la probabilidad de falla definida como la probabilidad de que el factor de seguridad sea inferior a 1.

En la Figura 8.2 se presenta el mapa analítico de zonificación por capacidad portante. En este mapa se observa que las variaciones relativas de la probabilidad de falla corresponden bastante bien con las tendencias observadas en la ciudad y coinciden en cierta forma con la zonificación analítica por compresibilidad.

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. Además se incluyeron en los análisis en 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 de Casagrande y mapas de zonificaciones analíticas. Finalmente se consultó a Ingenieros Geotecnistas con conocimiento del subsuelo de la ciudad, obteniendo como resultado el Mapa de zonificación geotecnica de la ciudad de Santafé de Bogotá.

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 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 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 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 una 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:

- 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.

Recomendaciones Para Estudios Futuros

Es importante destacar que a pesar que este estudio ha sido uno de los más completos a nivel internacional todavía quedan puntos sobre los cuales se debe continuar trabajando:

- Con respecto al comportamiento dinámico de las arcillas es importante continuar estudiando la influencia de la velocidad de deformación o de la frecuencia de la carga cíclica. Este es un tema sobre el cual no existen muchas referencias y se ha podido comprobar esta variable es de importancia en el suelo de Bogotá.
- Con respecto al comportamiento de las arenas de la zona sur es necesario continuar con los estudios de licuación utilizando muestreadores que permitan obtener especímenes inalterados.
- El bajo número de sondeos que se realizaron en este estudio no permite identificar los límites de las zonas con precisión ni evaluar de manera precisa las variaciones al interior de cada zona. Por este motivo es conveniente continuar densificando el estudio realizando principalmente ensayos in situ Down Hole o cono sísmico y presiómetro cíclico.

Referencias

BIAREZ J, HICHER P. "Elementary Mechanics of Soil Behaviour", AA Balkema 1994.

DESAI C., CHRISTIAN J., "Numerical Methods in Geotechnical Engineering", McGraw Hill Book Company. 1977

DOBRY R. VUCETIC M. "Dynamic Properties and Seismic Response of Soft Clay Deposits" In Proceedings of the International Symposium of Geotechnical Engineering of Soft Soils, Vol 2, pp 51-87, 1987.

FAVRE J.L. "Analyse De Données Geotechniques". Presses de L'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, 1985.

HUJEUX J., "Une loi de Comportement pou le Chargement Cyclique des sols", Genie Parasismique. Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées pp 287-302.

HICHER P.Y., "Rheologie des Sols" Presses de L'Ecole Centrale de Paris, 1990.

INGEOMINAS "Zonificación geotécnica de Bogotá", 1988

MAGNAN J. P. " Les méthodes statistiques et probabilistes en mécanique des sols". Presses de L'école Noationale des Ponts et Chaussées, 1982.

MARTINENGI T. OBONI F. " Problemes de Consolidation Primaire". 3 Seminaire sur les Methodes Probabilistes en Geotechnique, 1984.

MARTINEZ J.M., PRIETO J. C., "Características de las arcillas blandas de Santafé de Bogotá" VII Jornadas Geotécnicas y I Foro sobre la Geotecnia de la Sabana, 1992.

NAKAGAWA K., SOGA., "Nonlinear Cyclic Strees - Strain Relations of Soils", Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Enginering and Soil Dynamics. St Louis Missouri. 1995.

PECKER A. "Comportement des Sols sous Chargement Cyclique" in Genie Parasismique. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

PECKER A. "Dynamique des Sols". De. Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

SANDBAEKKEN G., BERRE T., Lacasse S. "Oedometer testing at the Norvegian Geotechnical Institute". Publication Nr 168 Norwegian Geotechnical Institute, 1987.

SARRIA A., "Ingeniería Sísmica" Ediciones Uniandes, 1995

SEED H B, IDRISSE I. M., "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses", Report No EERC 70 - 10, University of California, Berkeley.

W 1012.000m

W 1017.000m

W 1012.000m

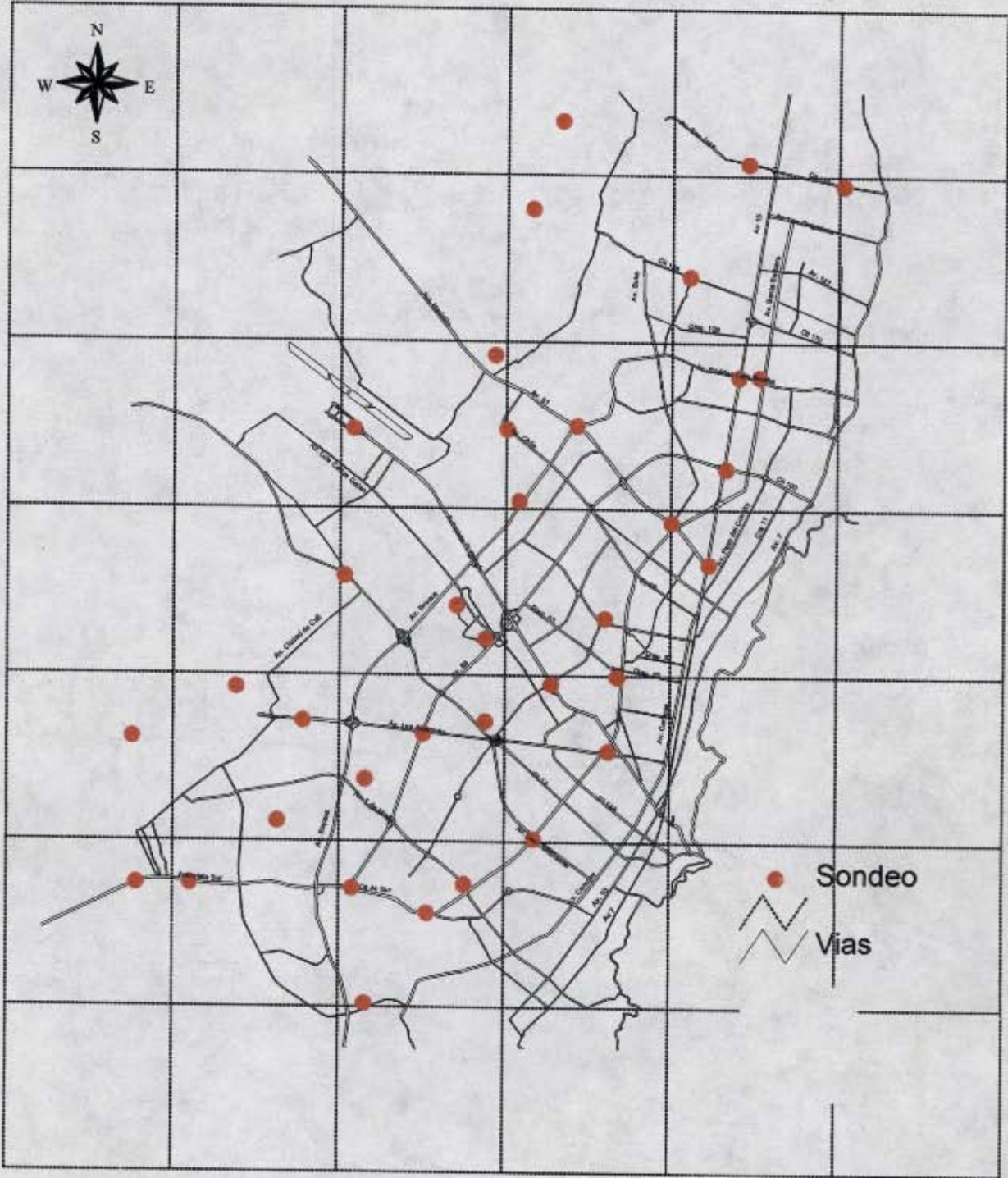
W 1013.000m

W 1008.000m

W 1011.000m

W 1010.000m

W 1013.000m



● Sondeo
Vias



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
PROYECTO MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA D.C.
SUBPROY. ZONIFICACION SIMOGEOTECNICA

LOCALIZACION DE LOS SONDEOS

FIGURA 2.1

ESCALA 1:150000
FECHA: OCT. 1996



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA D.C.
SUBPROYECTO: ZONIFICACION
SISMOGEOTECNICA

MUESTRA DE PISTON ESTACIONARIO

Fig. 2.2a

FECHA: Octubre de 1996



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA D.C.
SUBPROYECTO: ZONIFICACION
SISMOGEOTECNICA

MUESTREADOR Y TUBO PORTA-MUESTRAS

Fig. 2.2b

FECHA: Octubre de 1996

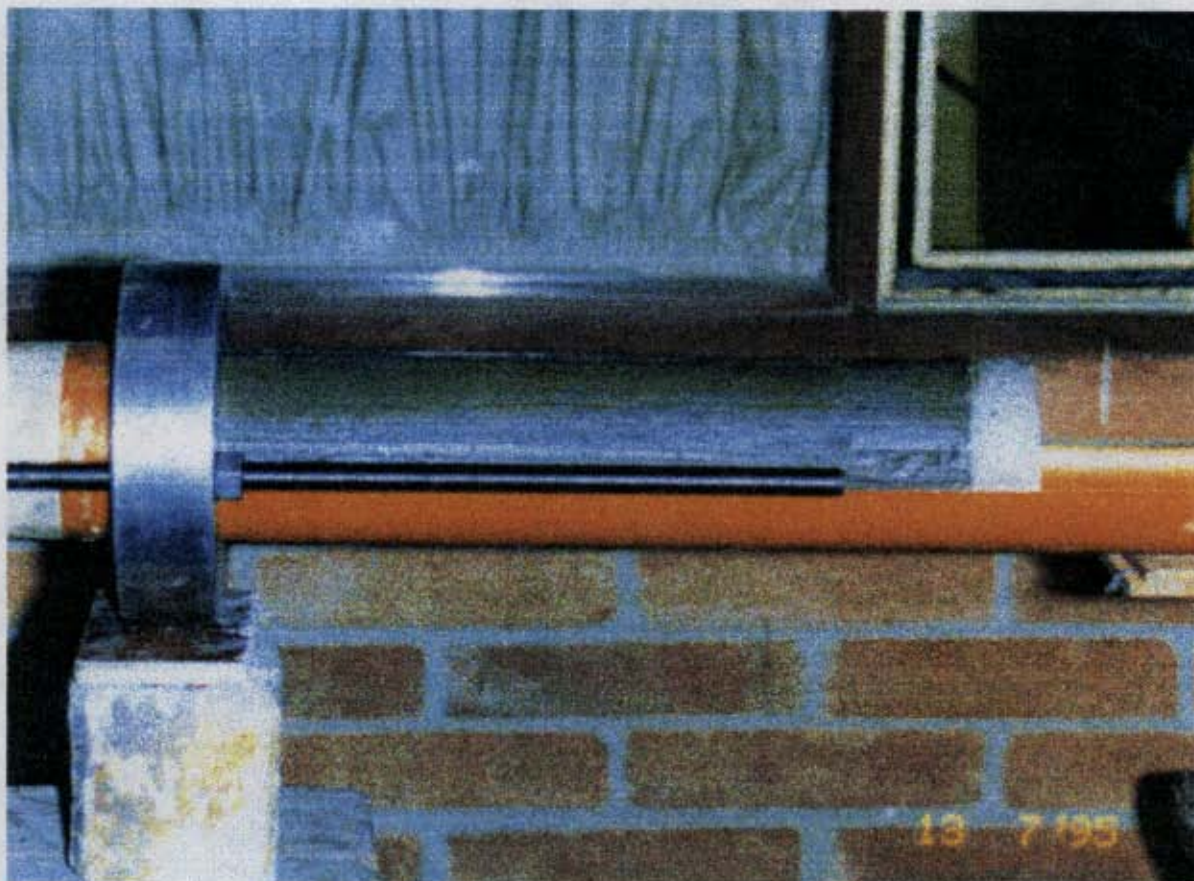


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA D.C.
SUBPROYECTO: ZONIFICACION
SISMOGEOTECNICA

PUNTA DEL MUESTREADOR

Fig. 2.3

FECHA: Octubre de 1996



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA D.C.
SUBPROYECTO: ZONIFICACION
SISMOGEOTECNICA

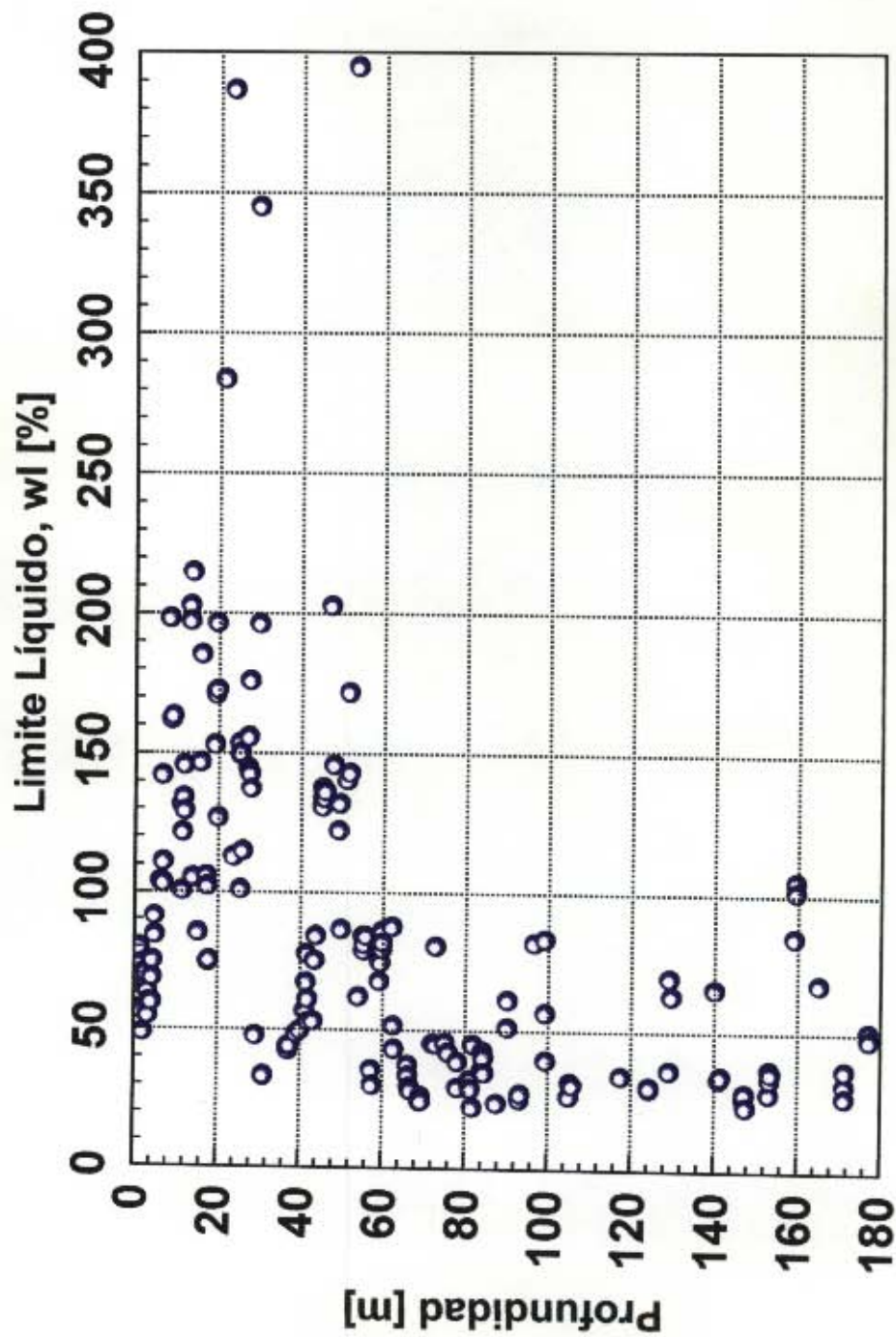


EXTRACCION DE LA MUESTRA EN EL
LABORATORIO

Fig. 2.4

FECHA: Octubre de 1996

GRÁFICO DE LIMITE LIQUIDO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO INGEOMINAS

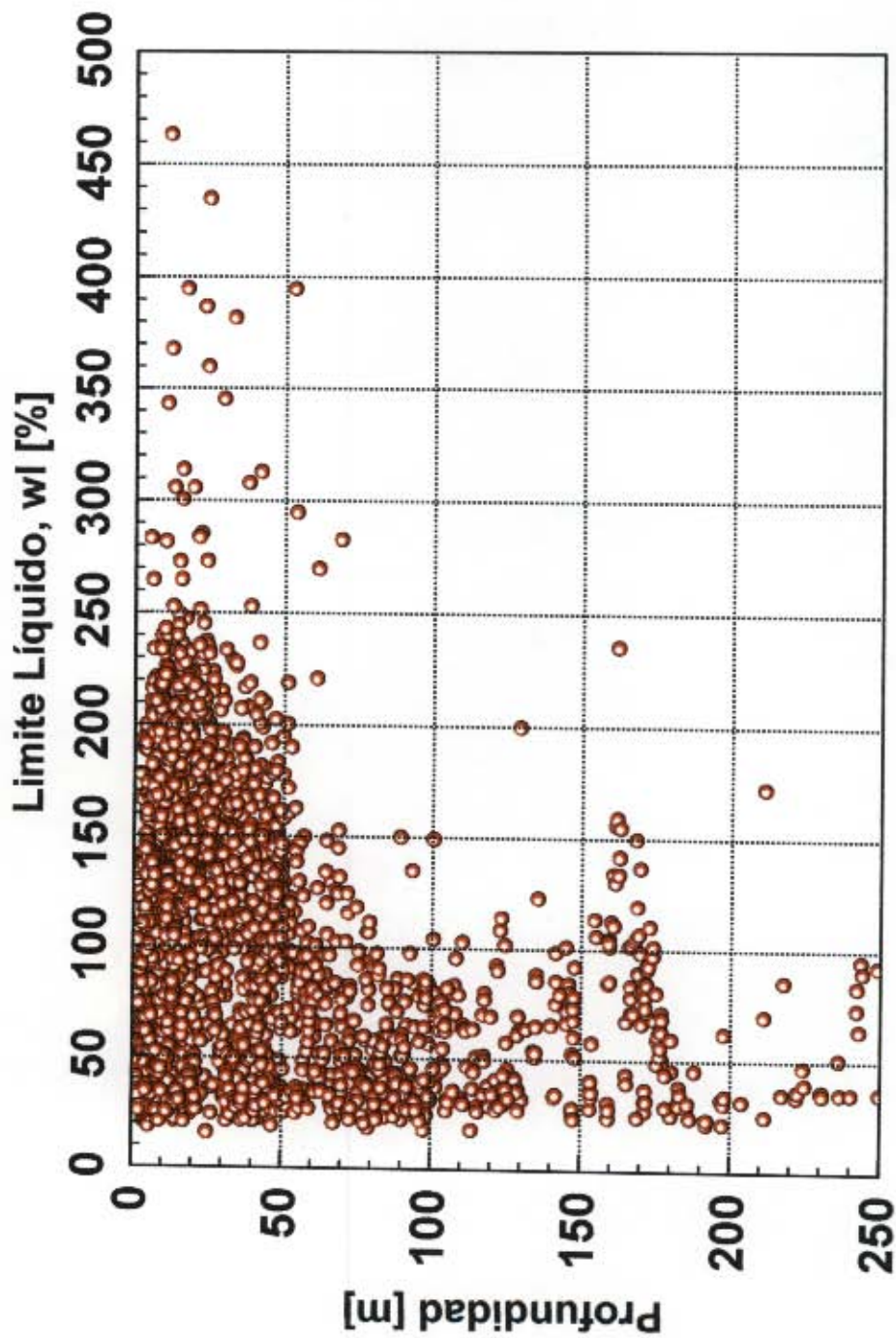


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.1

GRÁFICO DE LIMITE LIQUIDO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
ZONA ARCILLAS BLANDAS

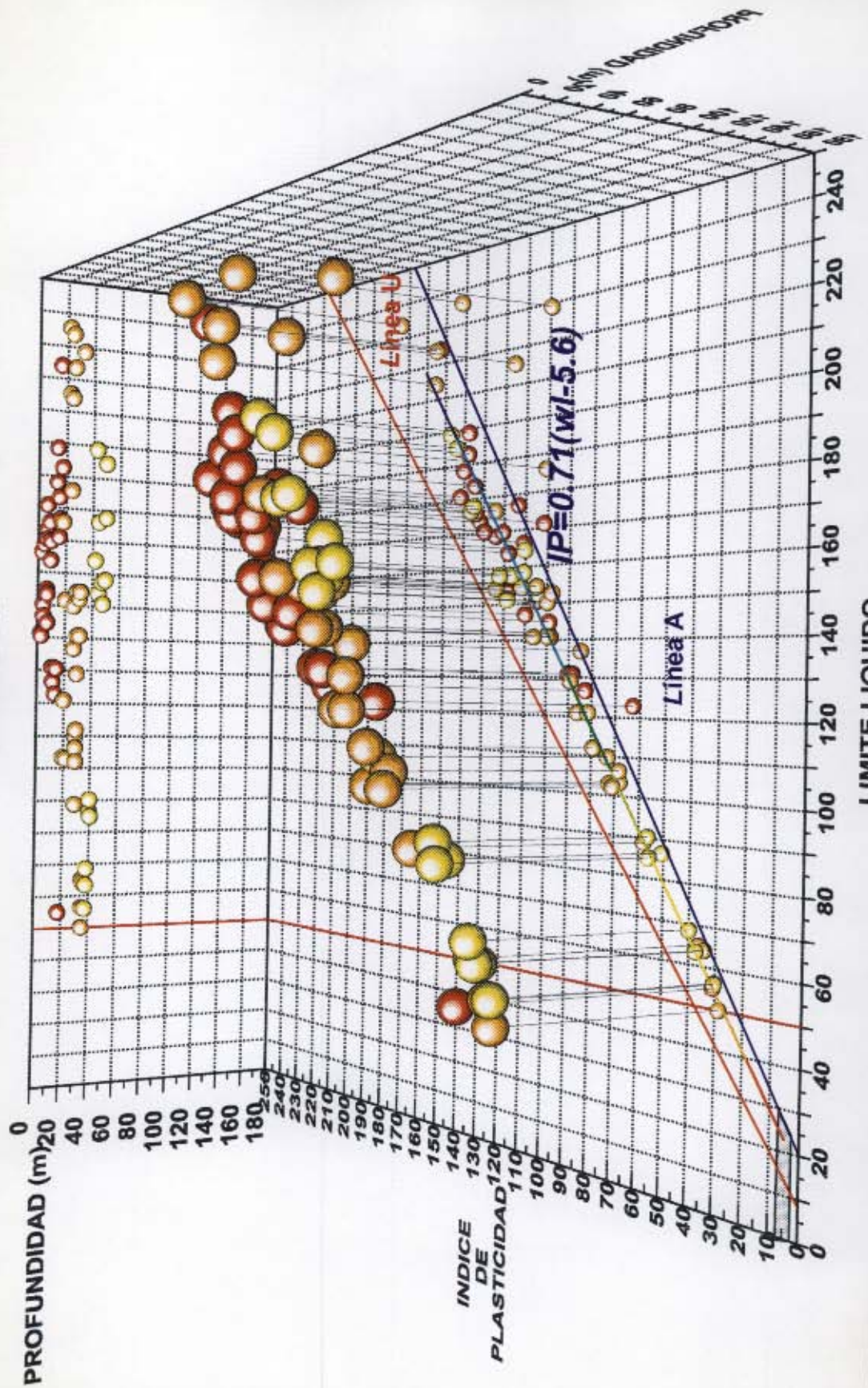


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.2

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N1

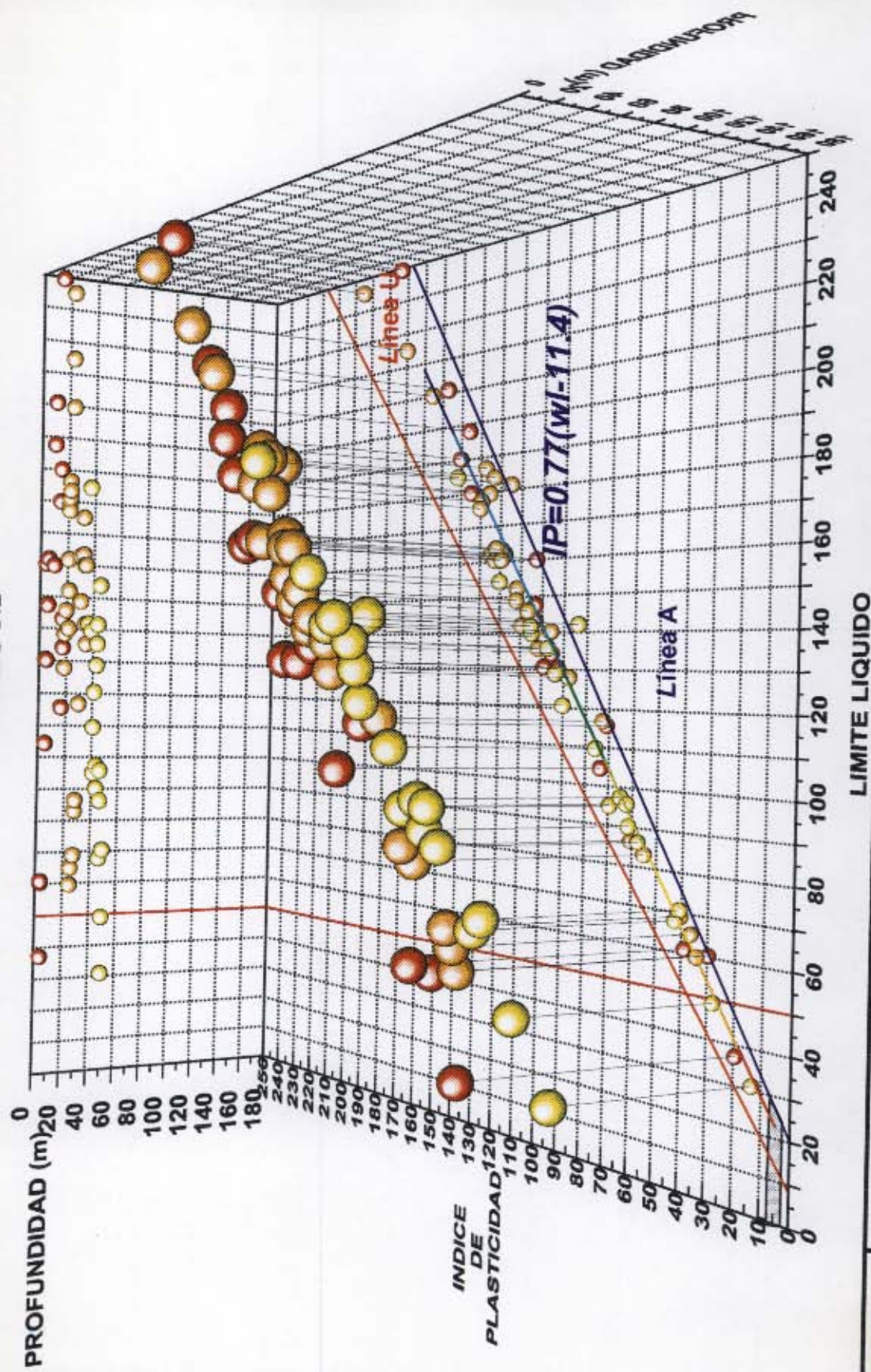


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.3

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N2

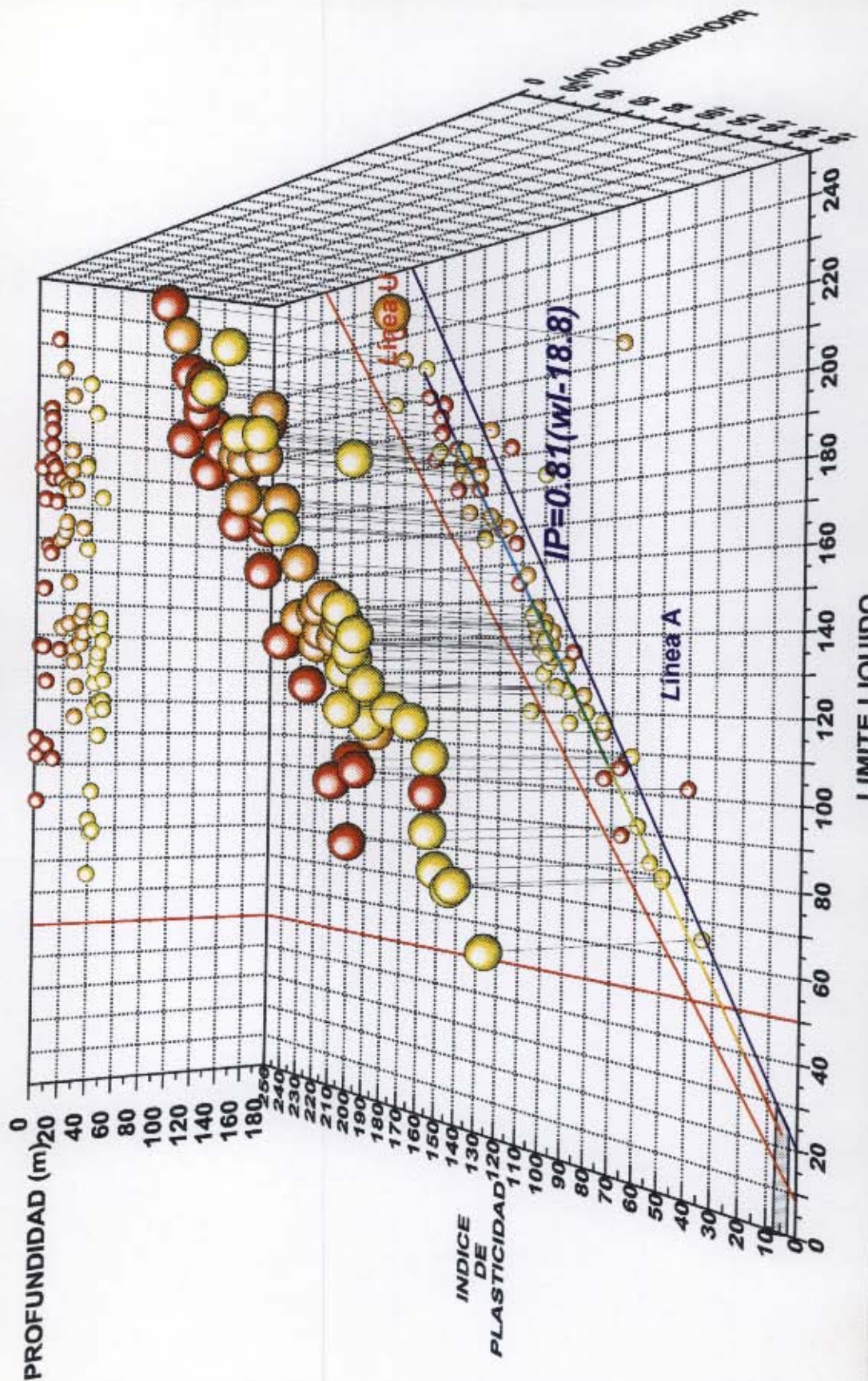


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.4

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N4

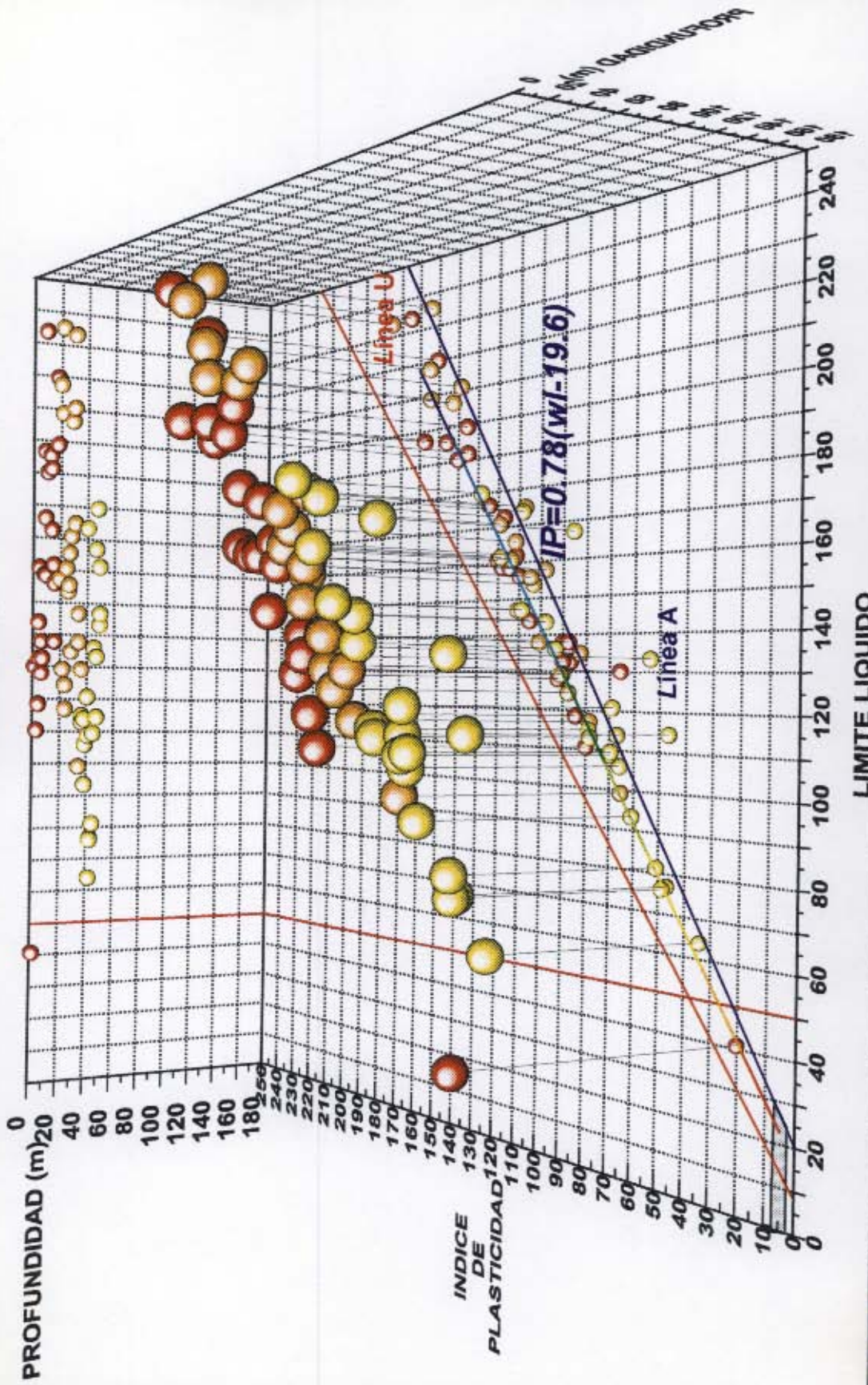


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.5

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N5

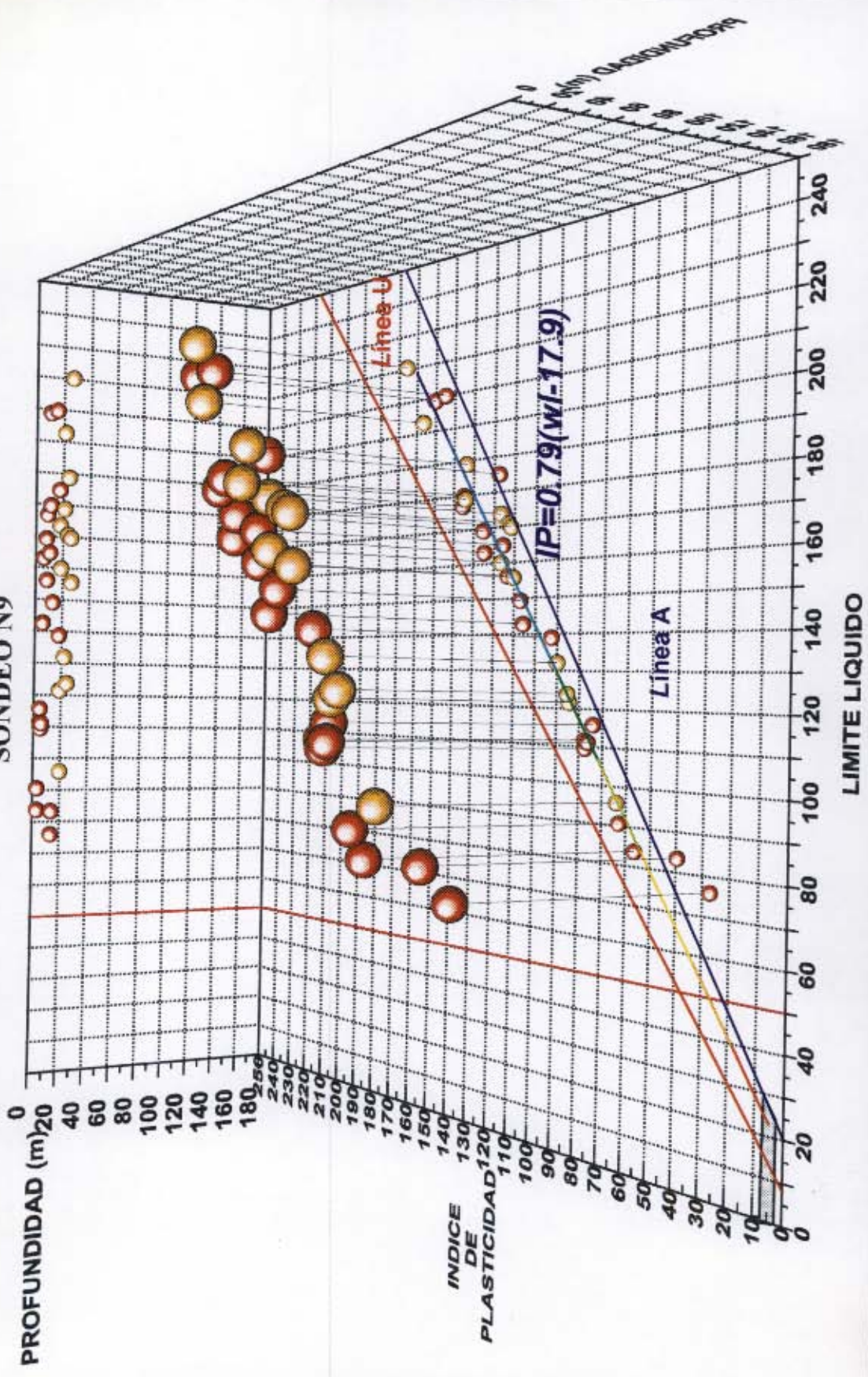


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.6

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N°9

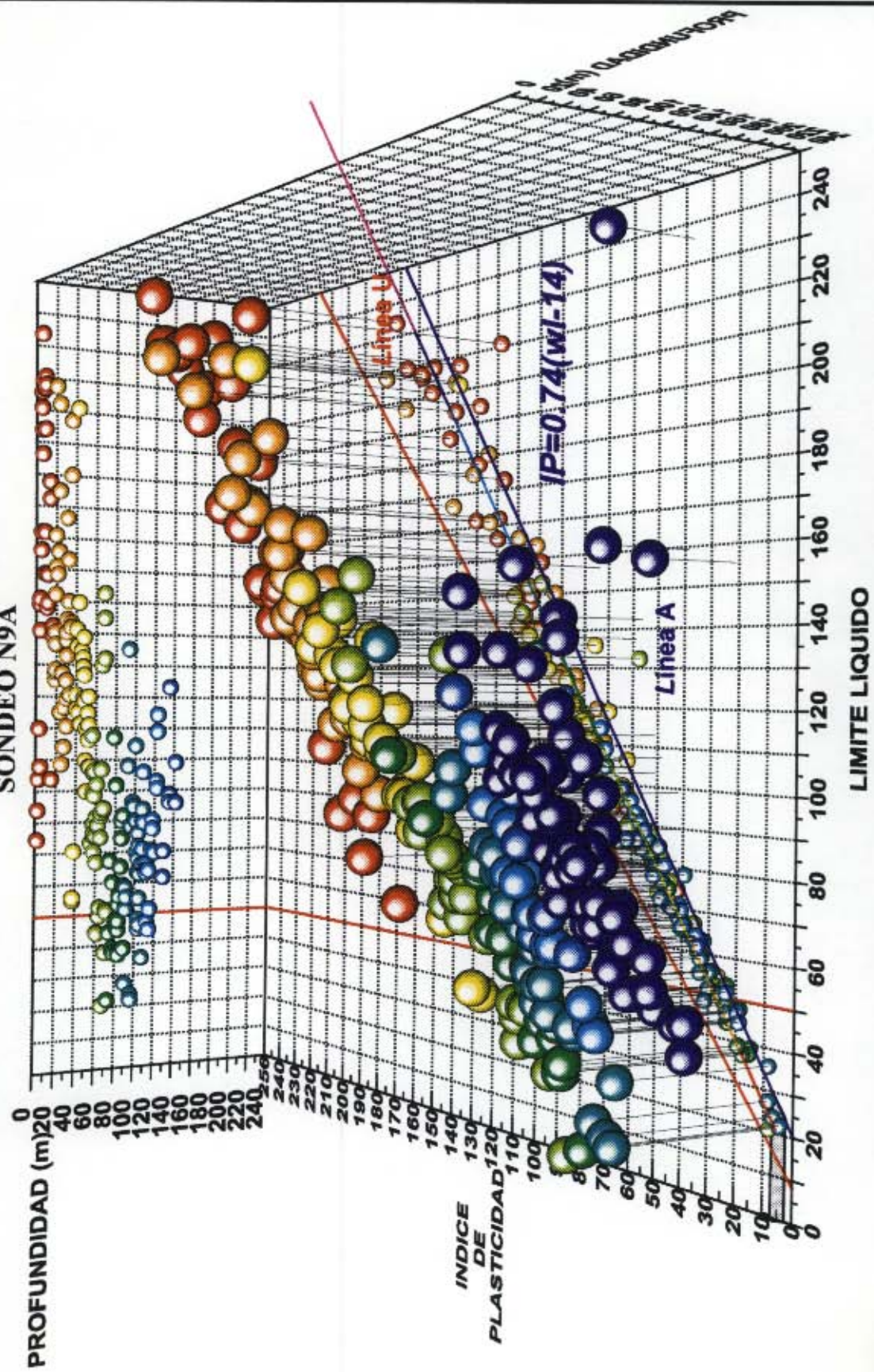


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.7

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N9A

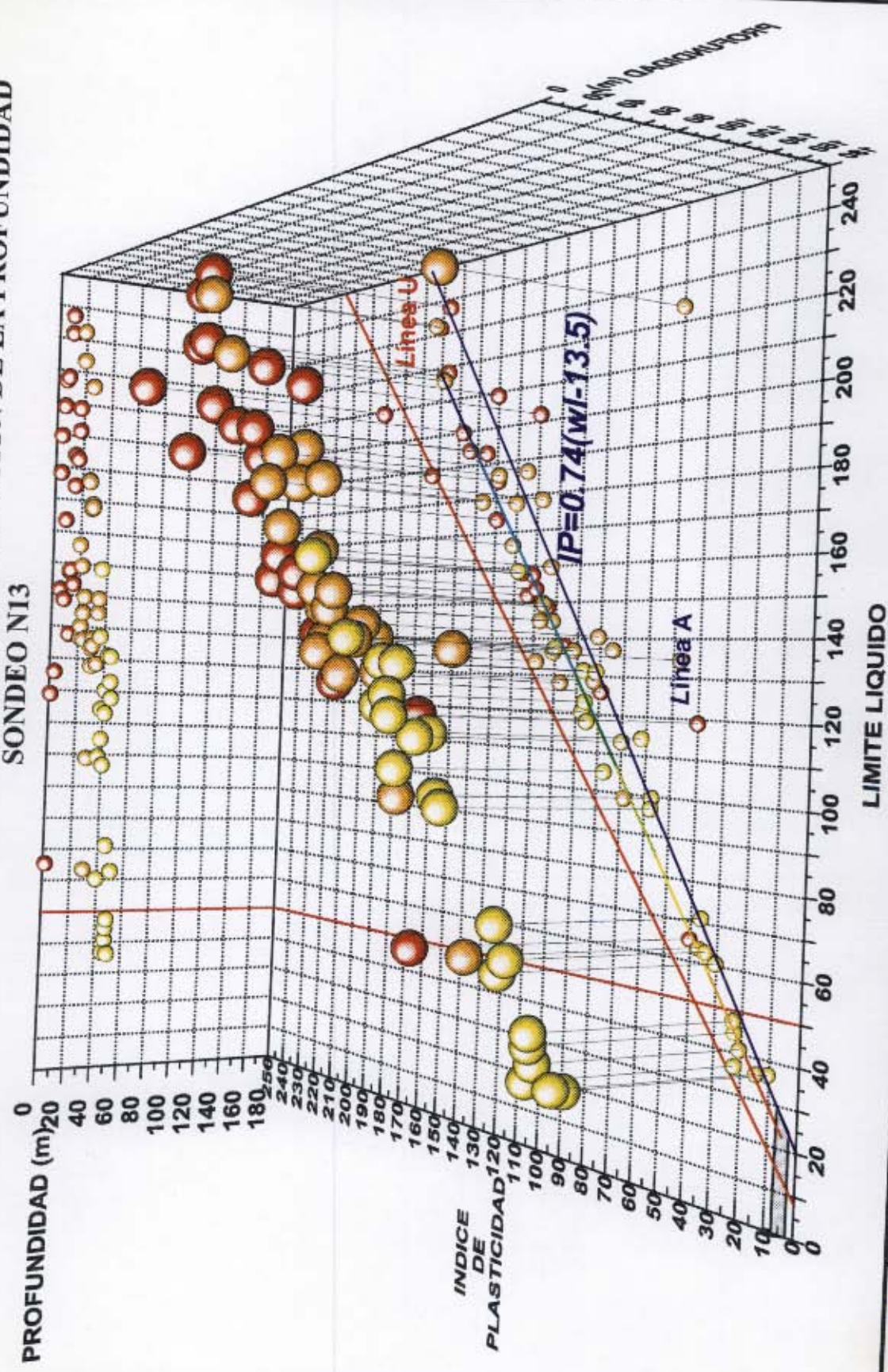


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.8

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRENDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N13

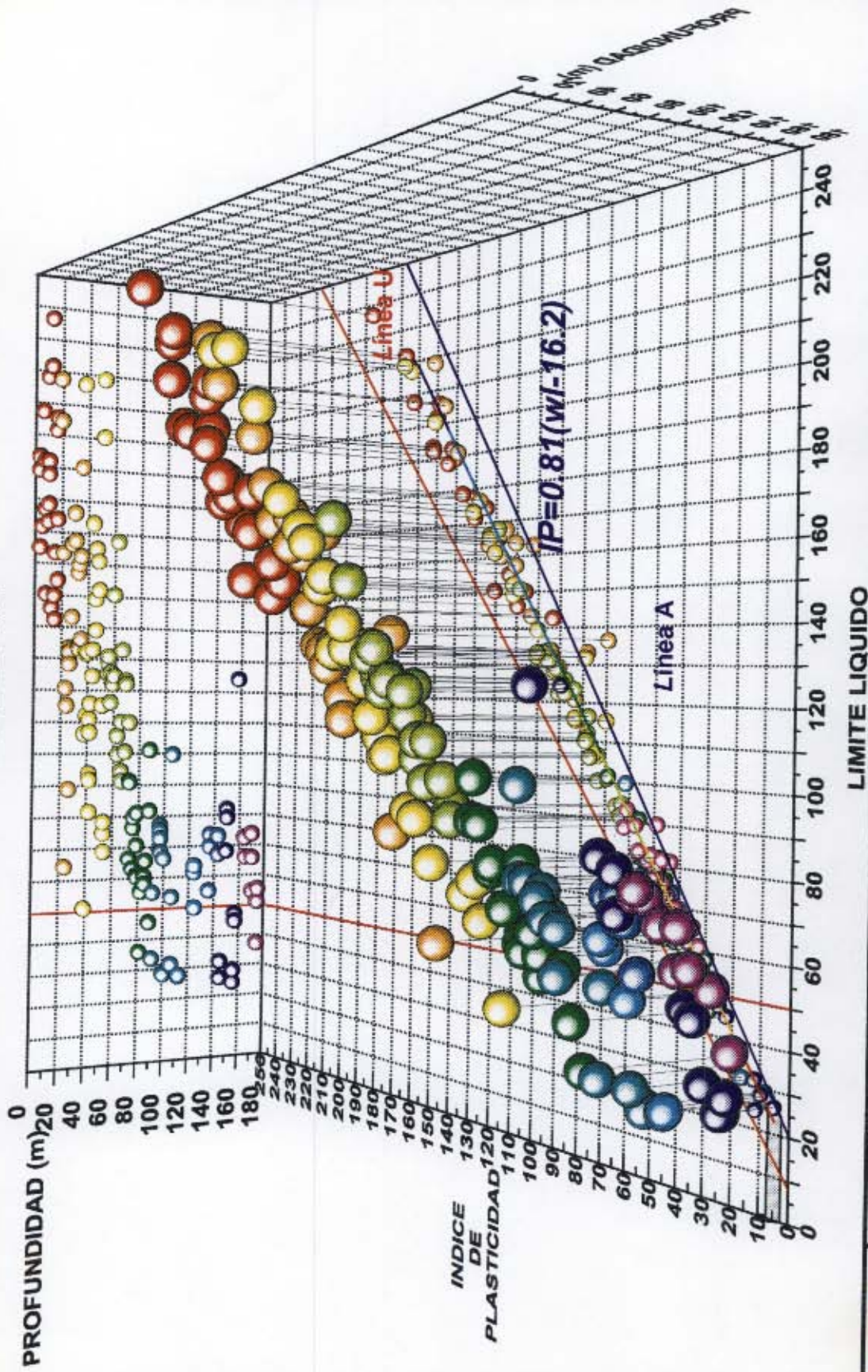


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.9

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N14

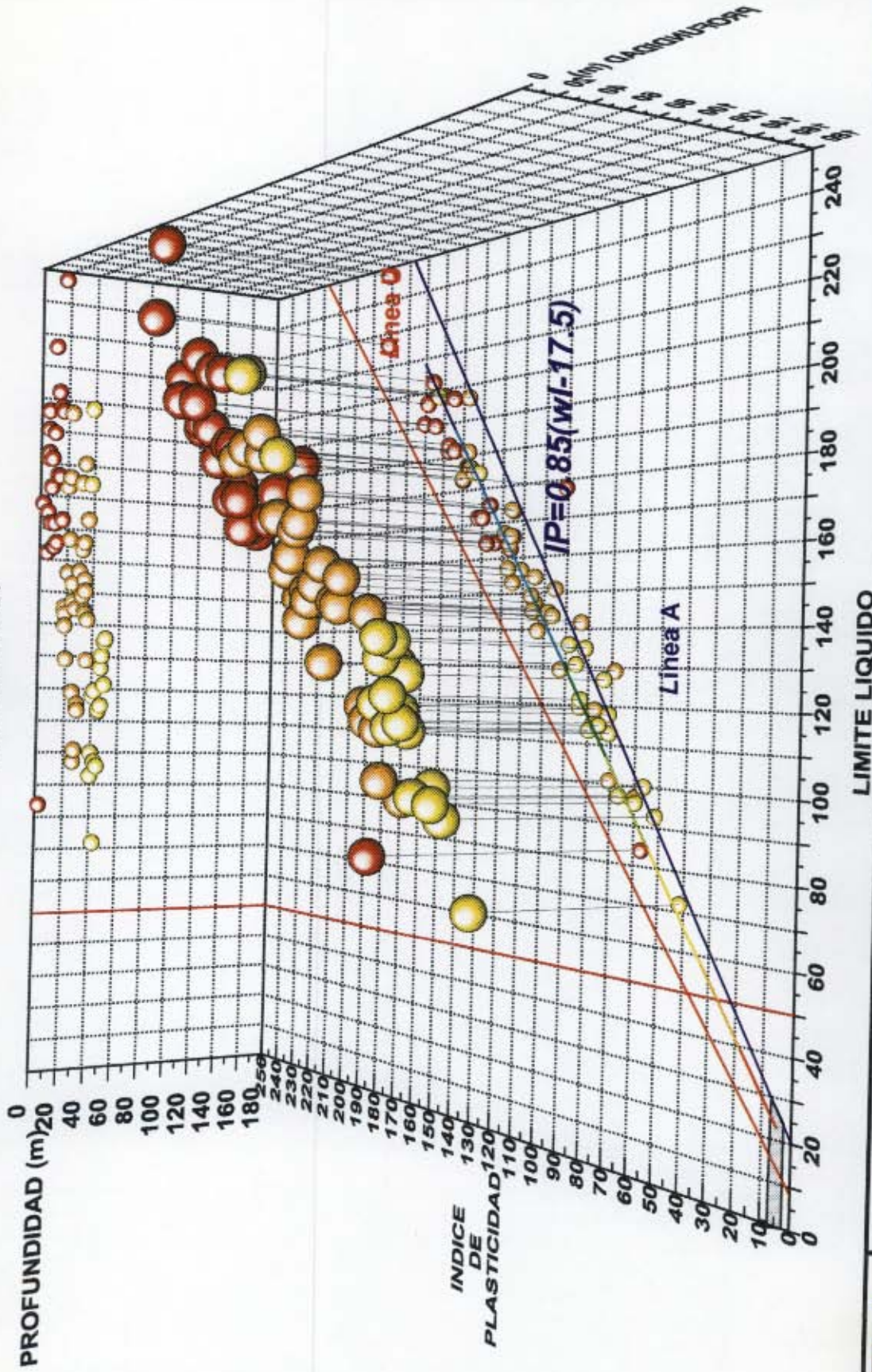


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.10

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO NI7

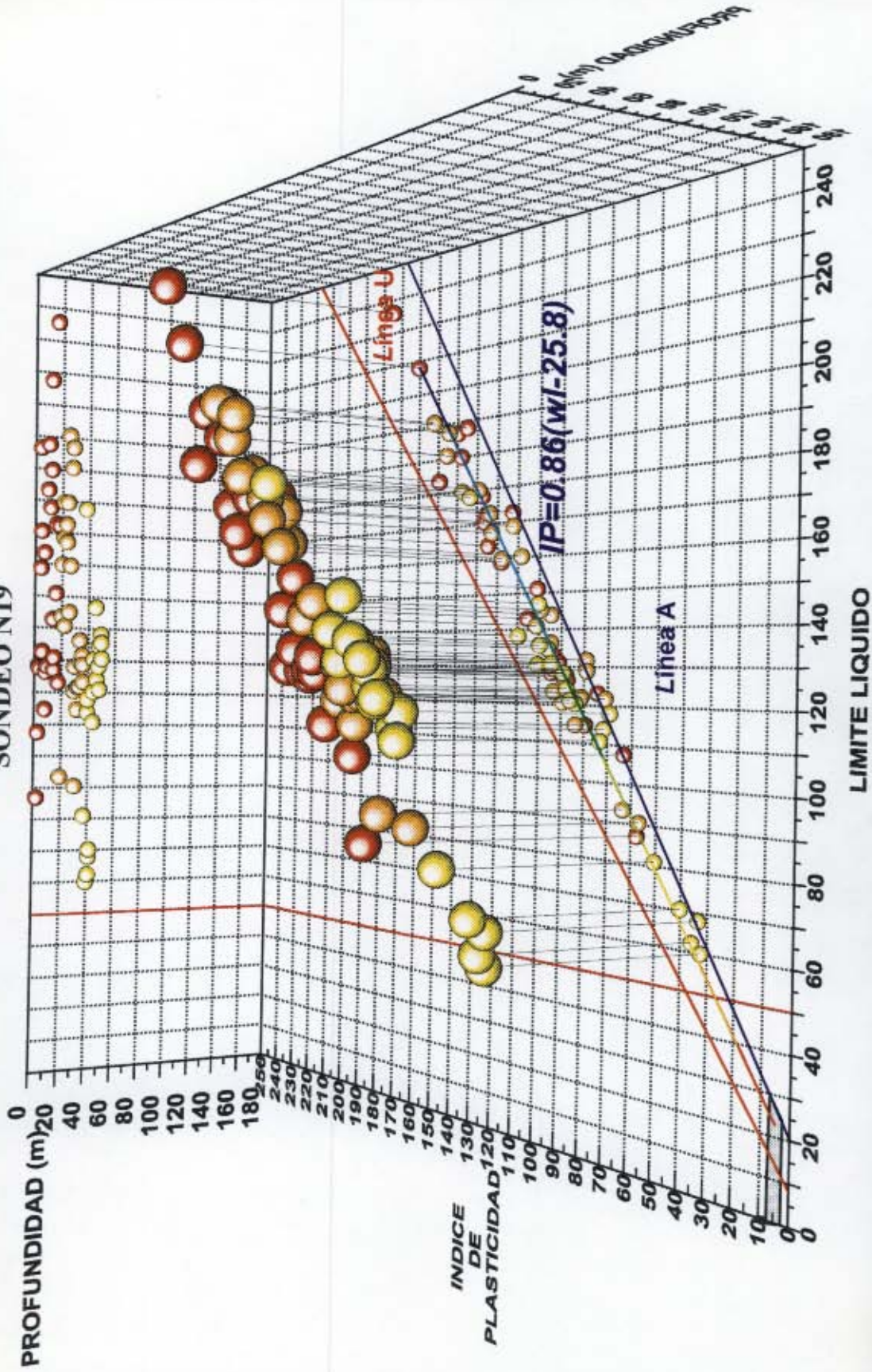


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.11

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N19

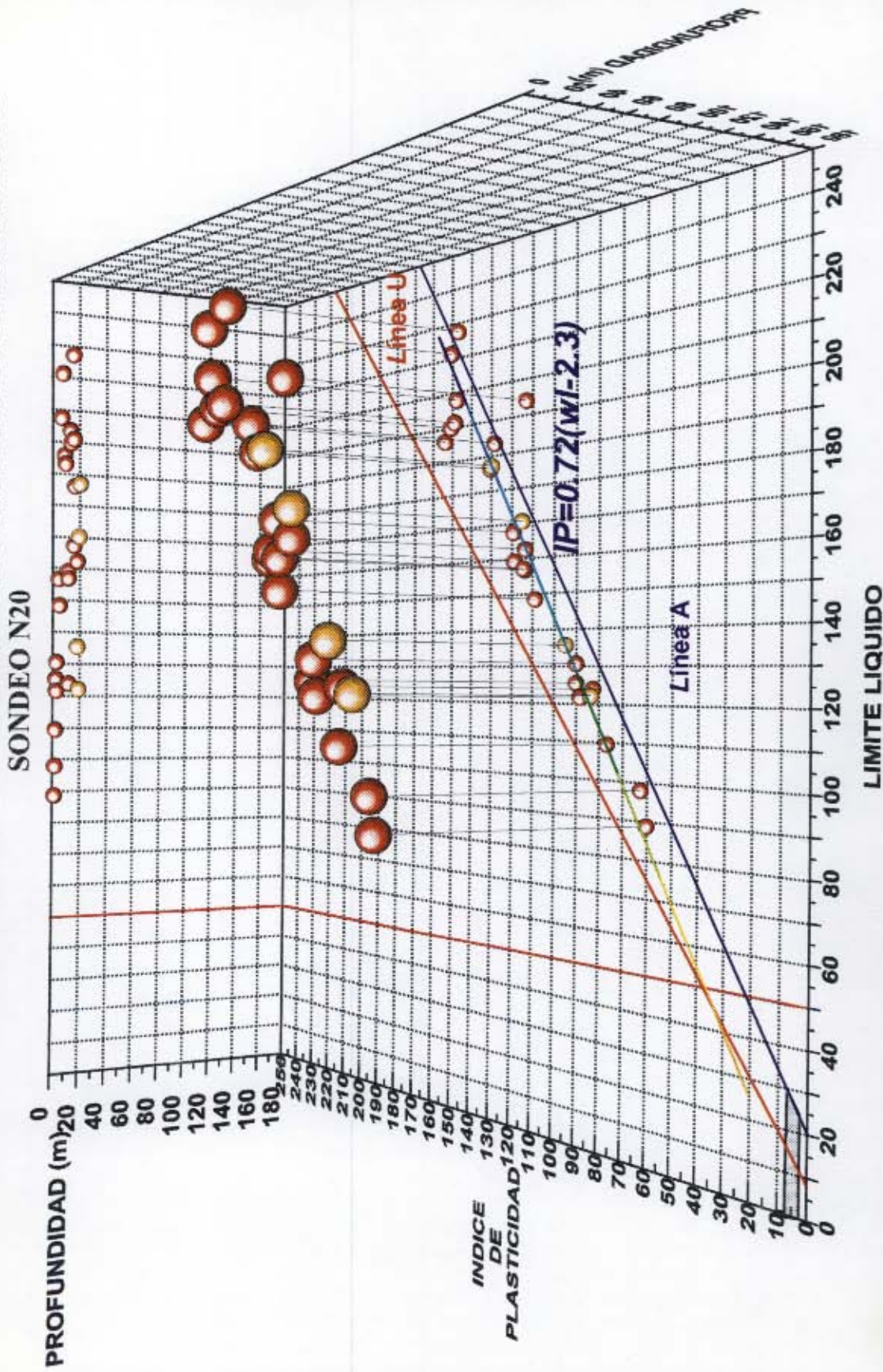


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.12

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N20

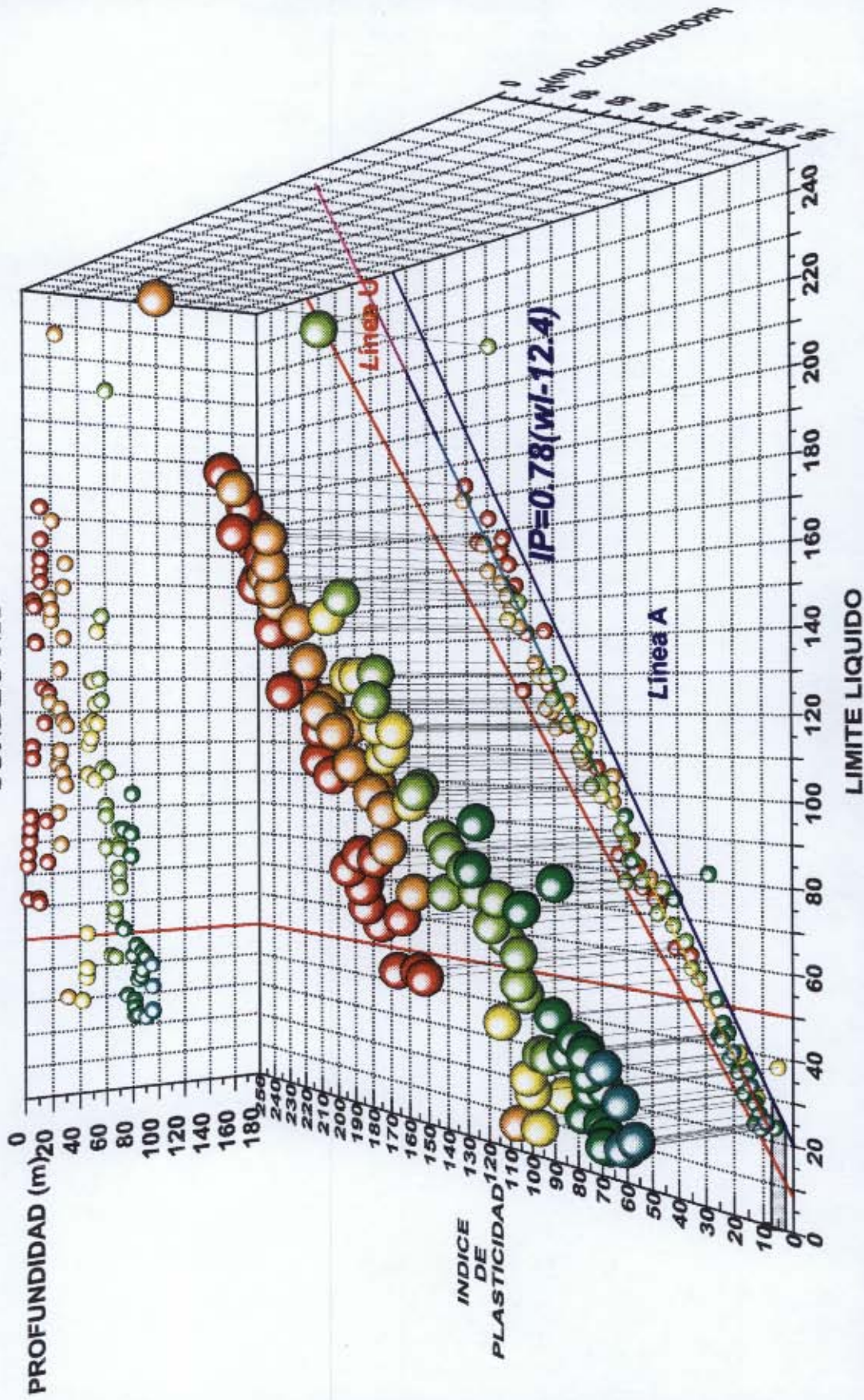


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.13

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N21

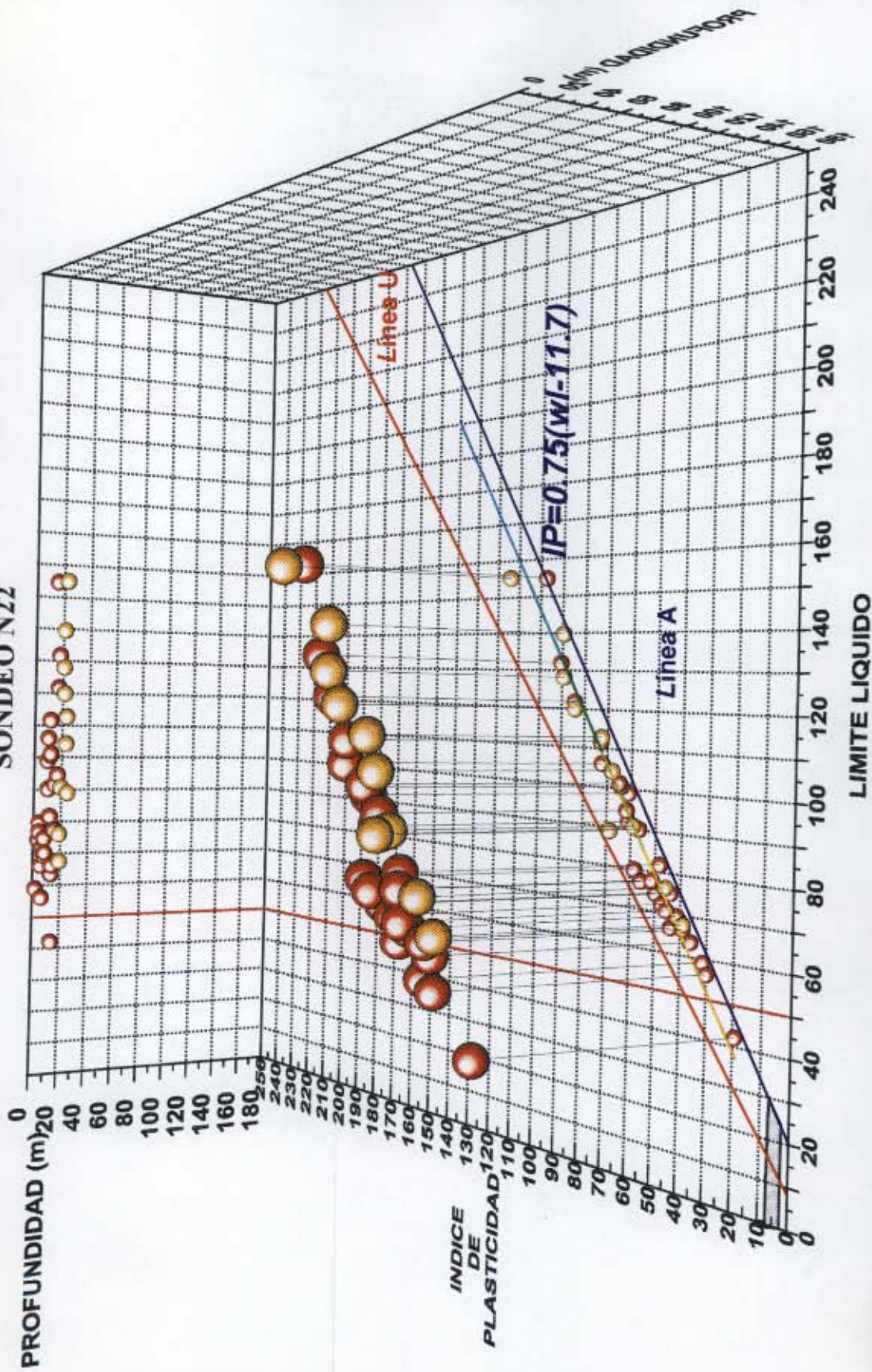


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.14

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N22

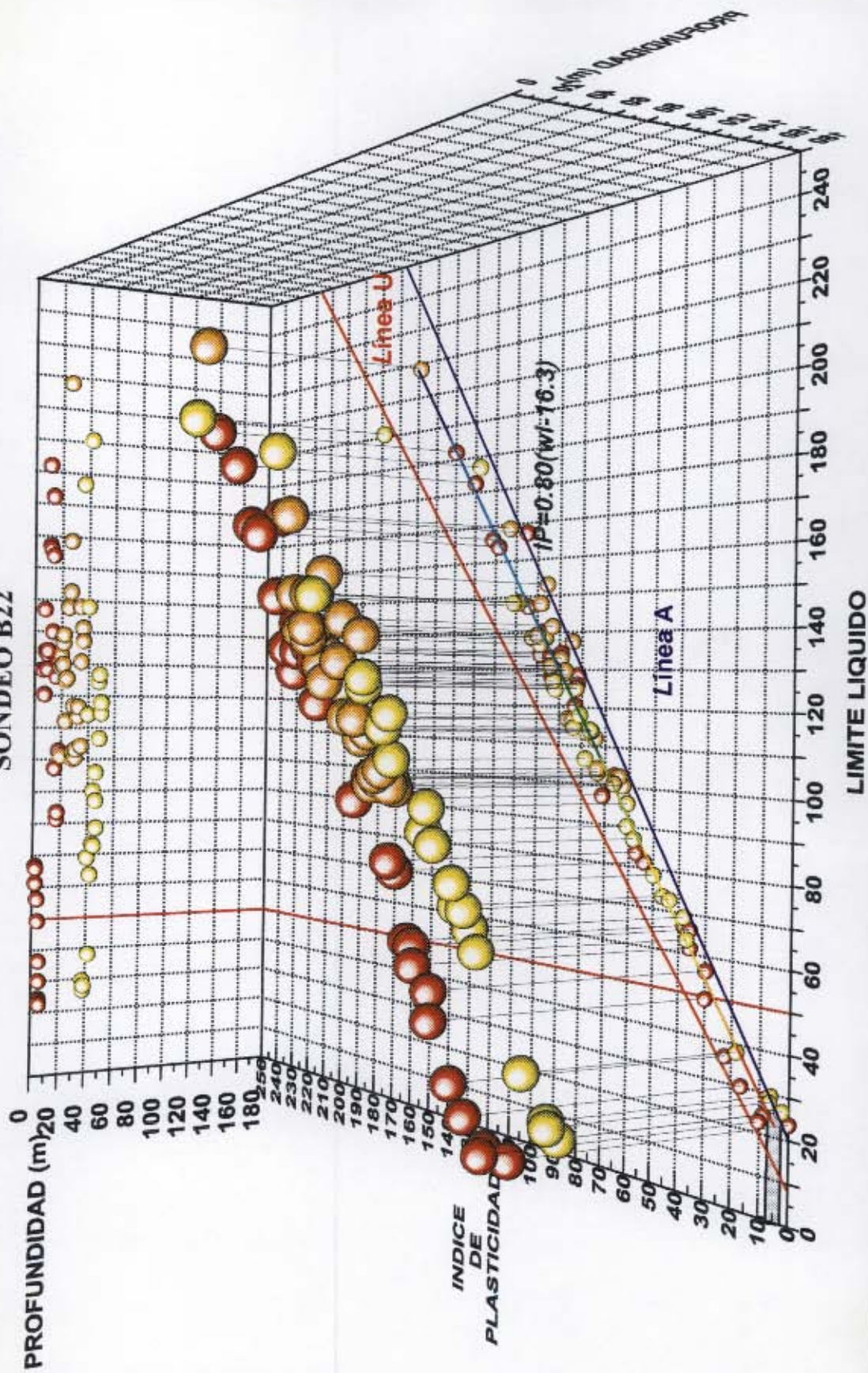


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.15

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO B22

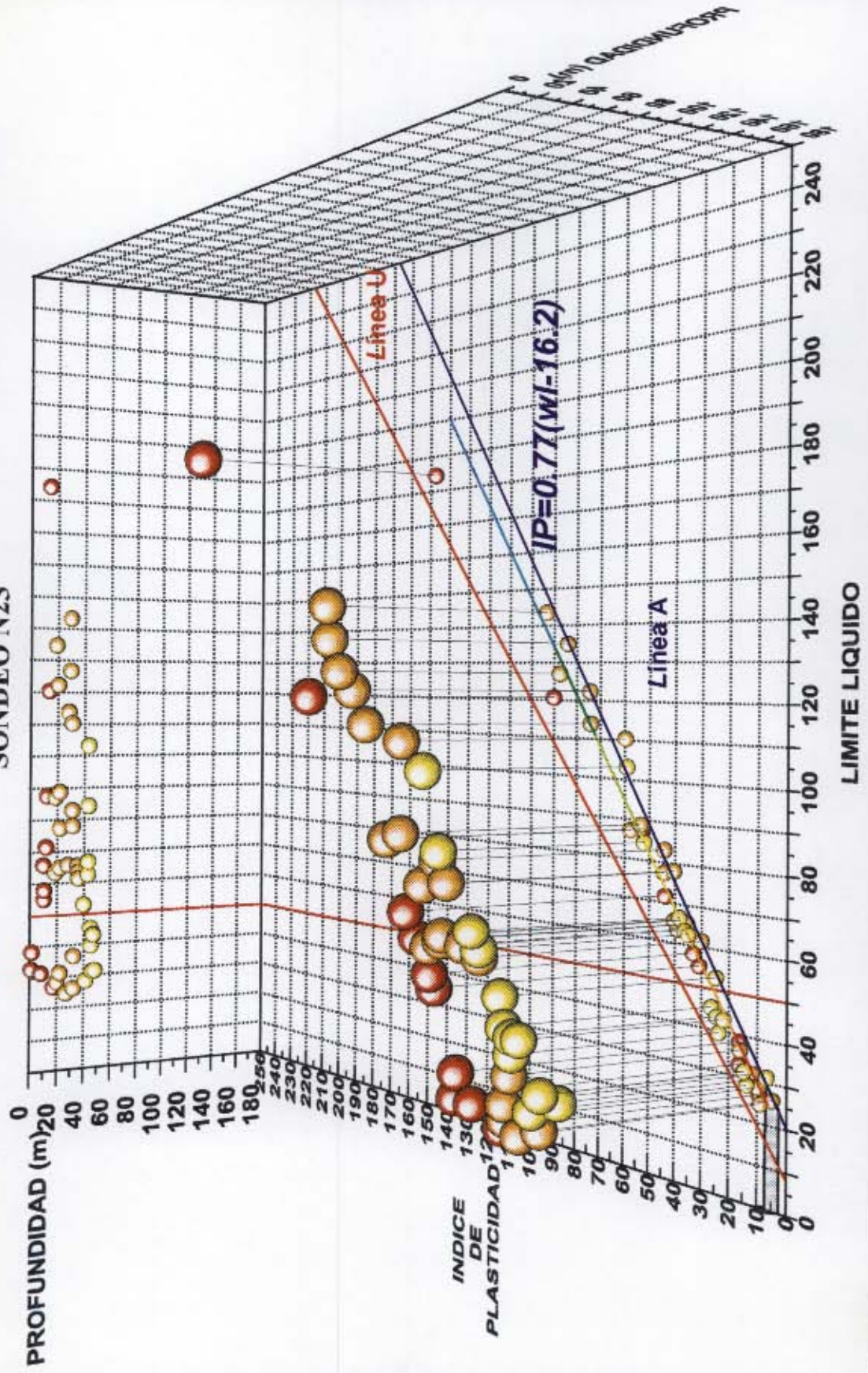


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.16

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N23

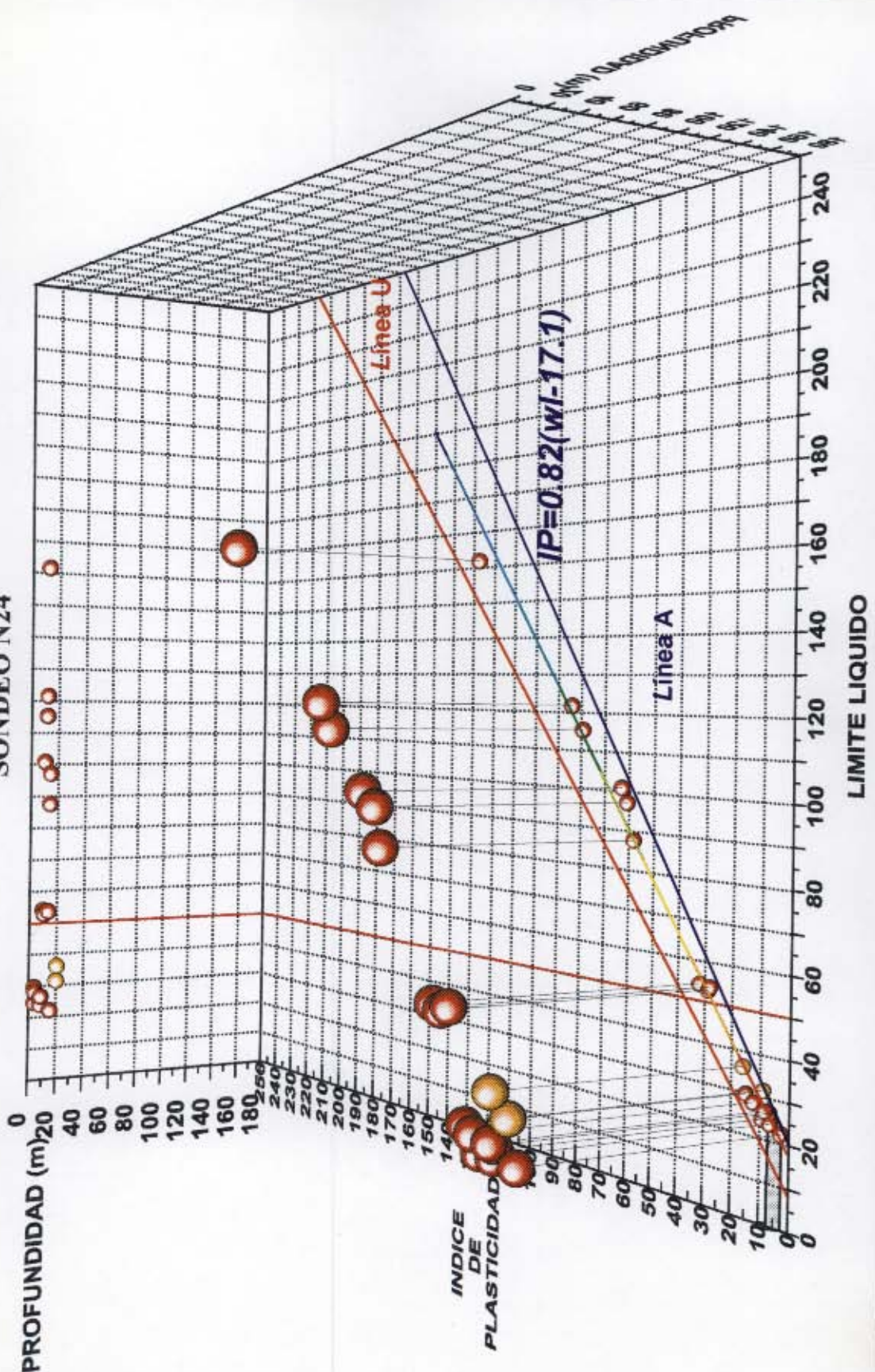


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.17

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N24

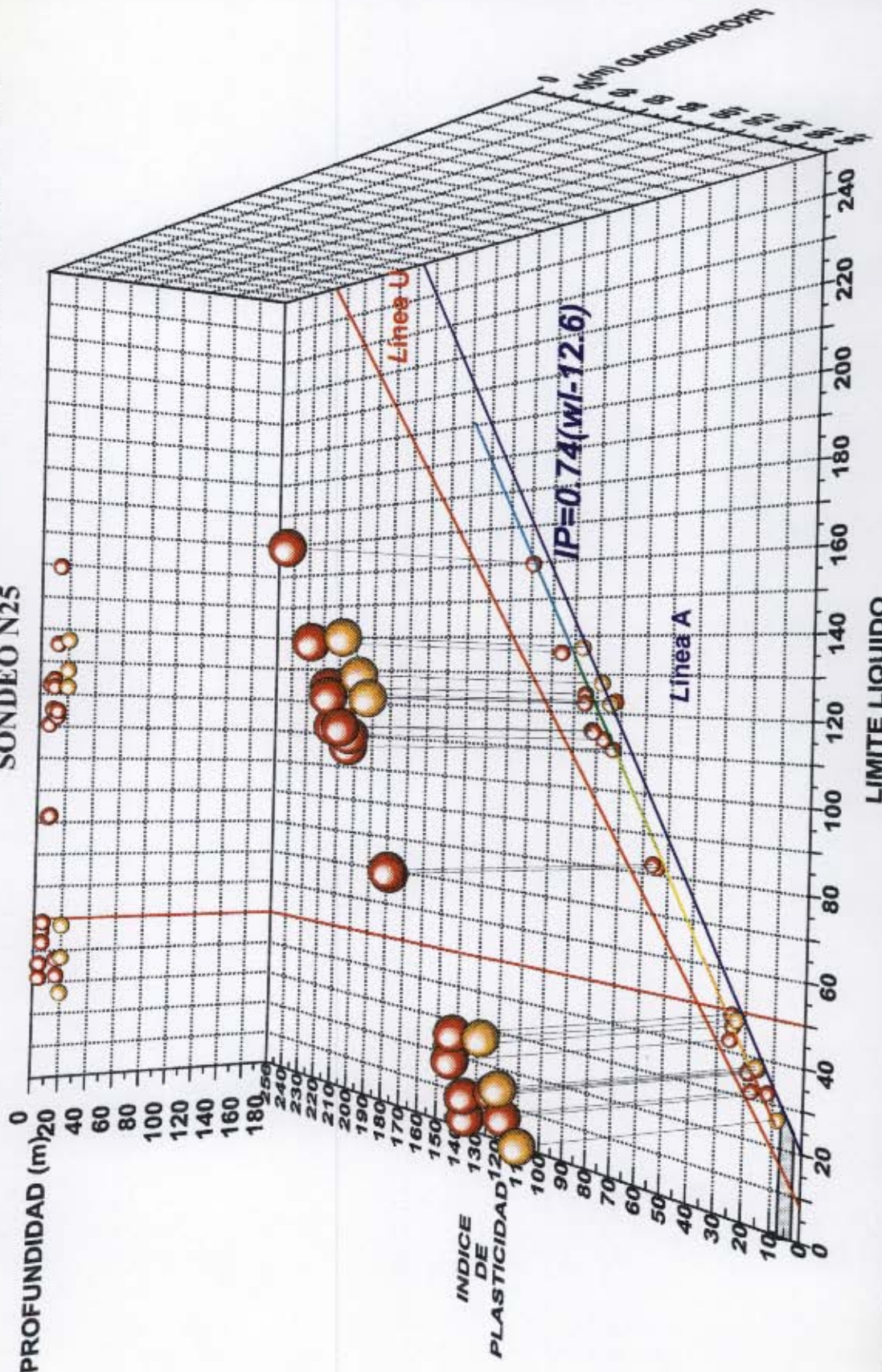


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.18

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N25

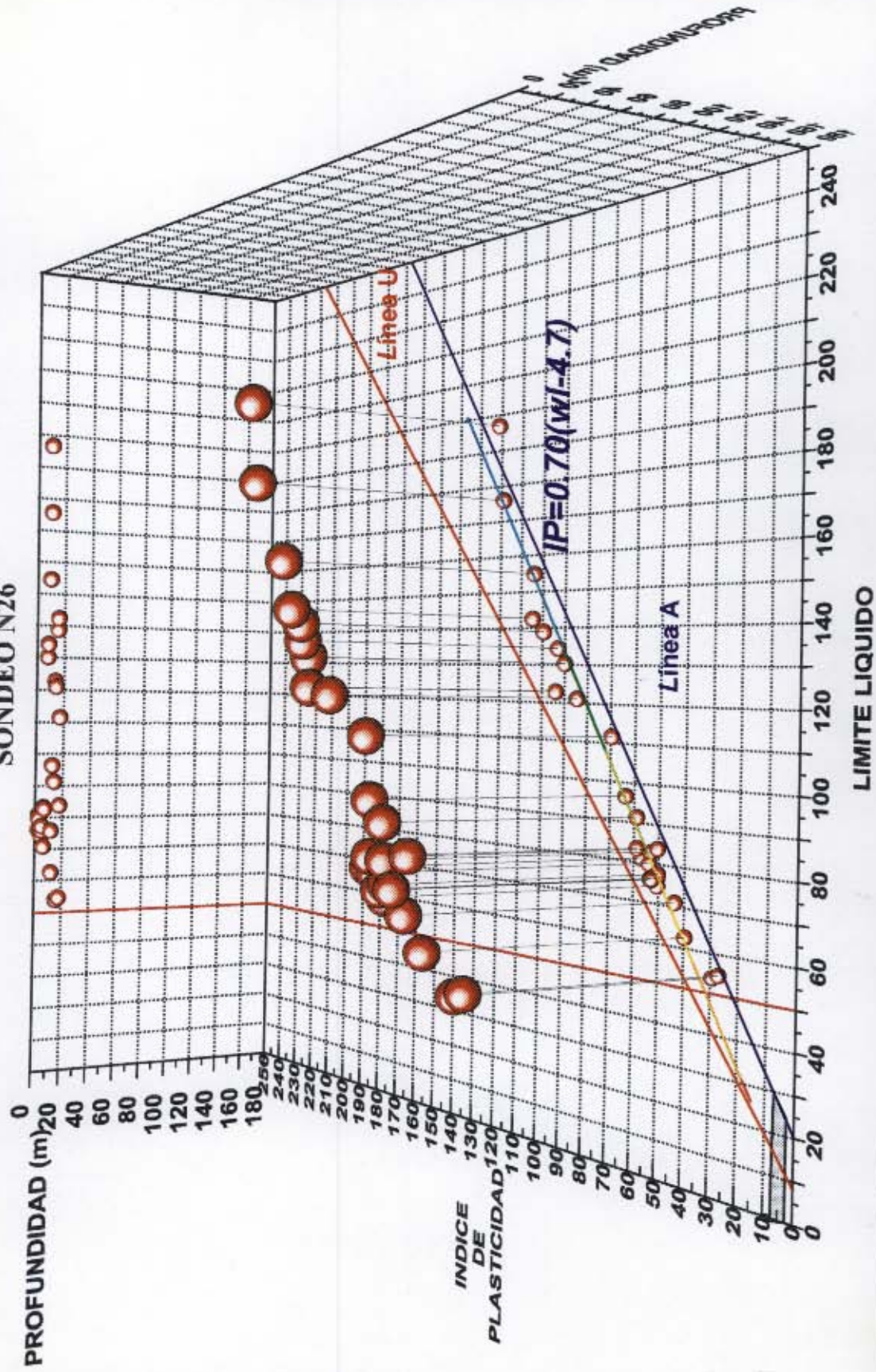


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.19

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N26

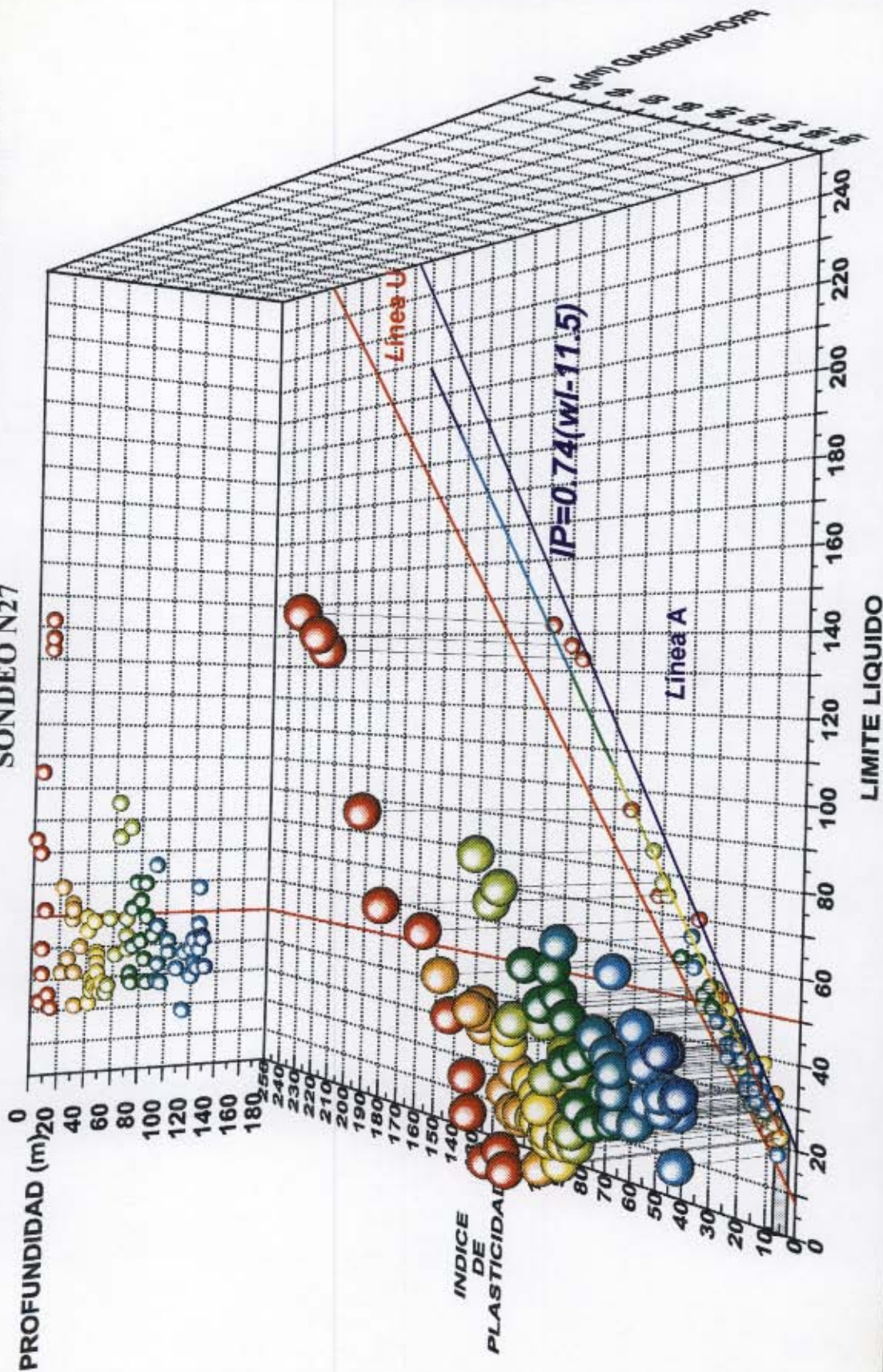


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.20

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N27

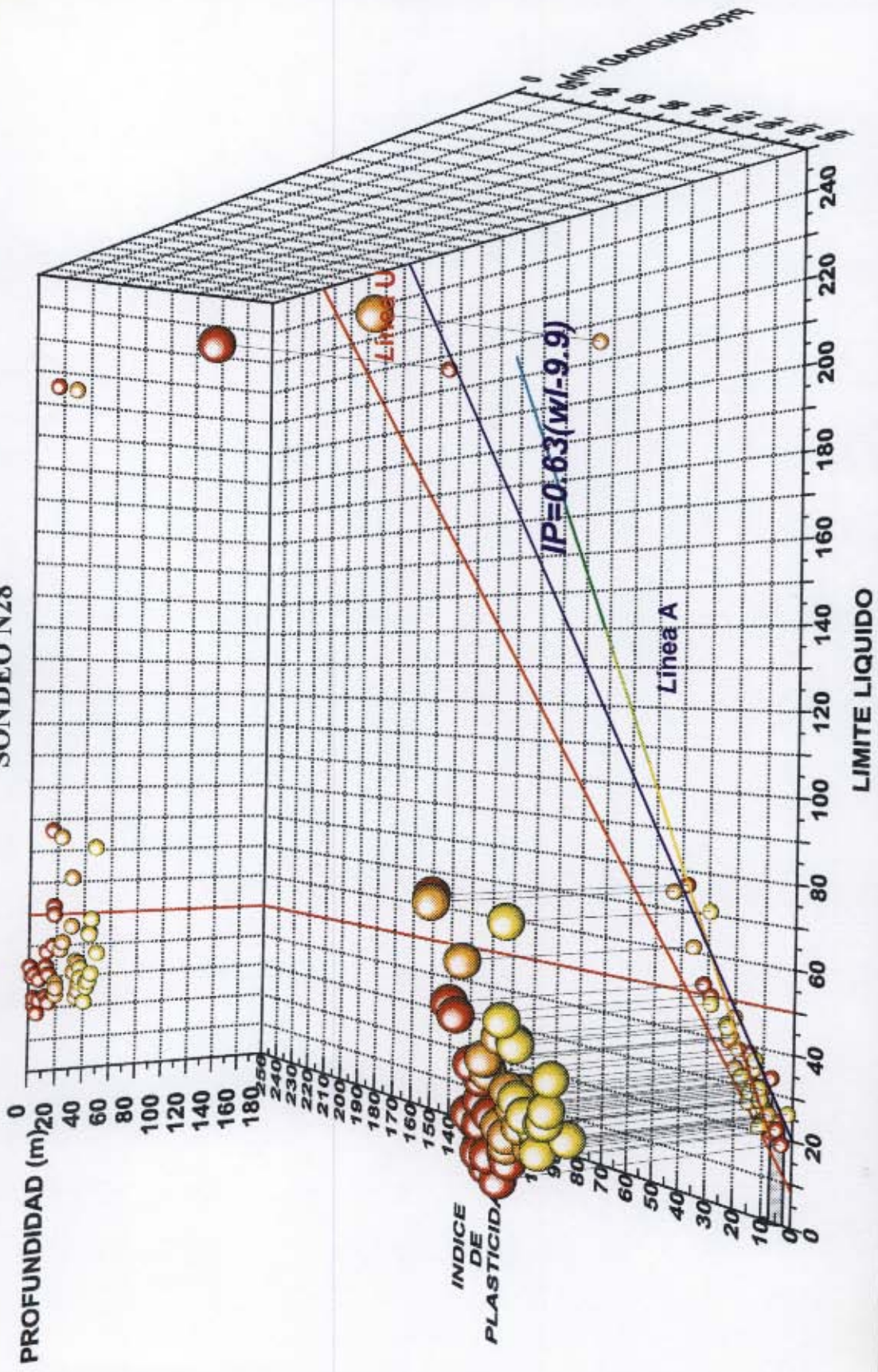


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.21

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N28

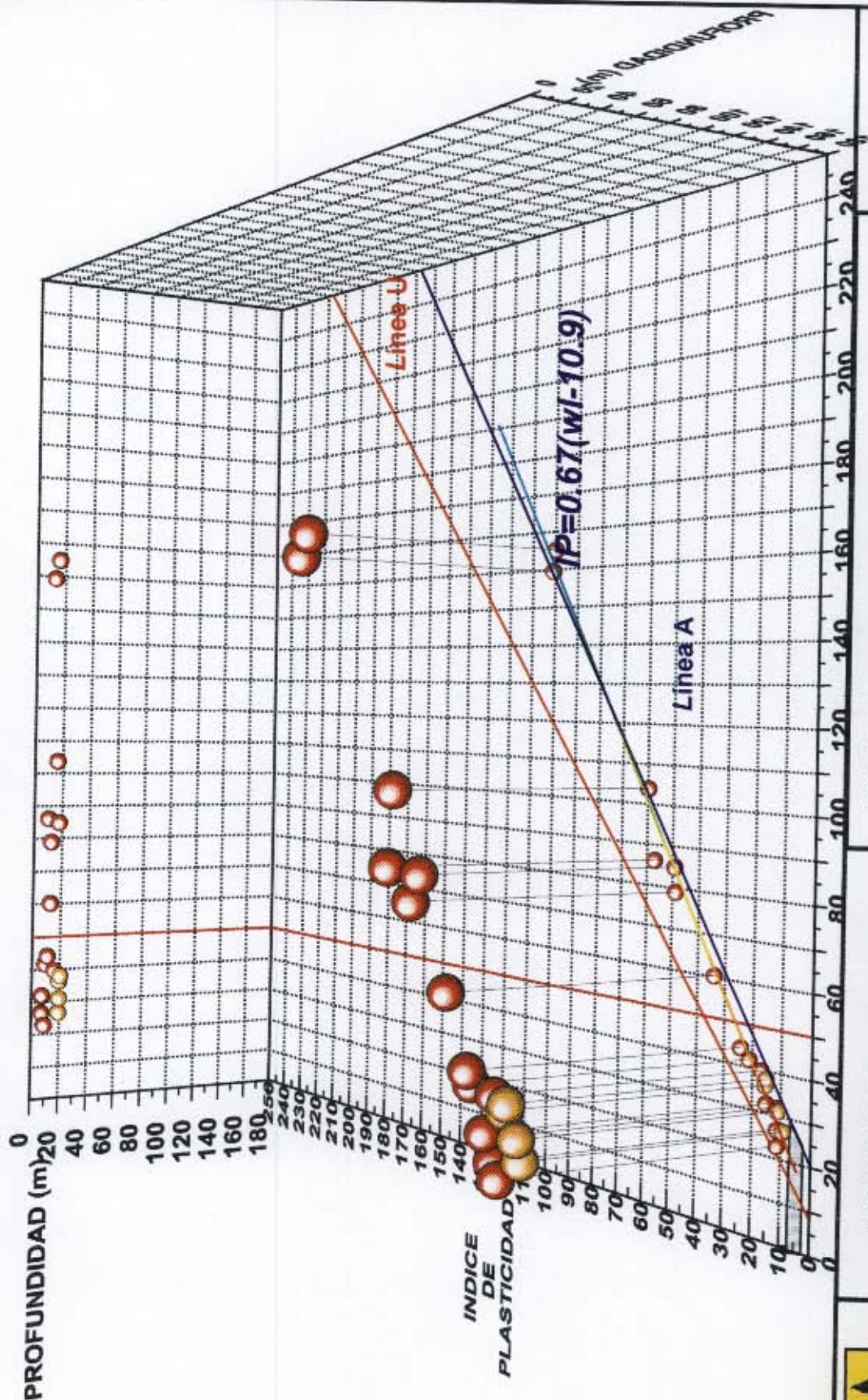


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.22

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N29

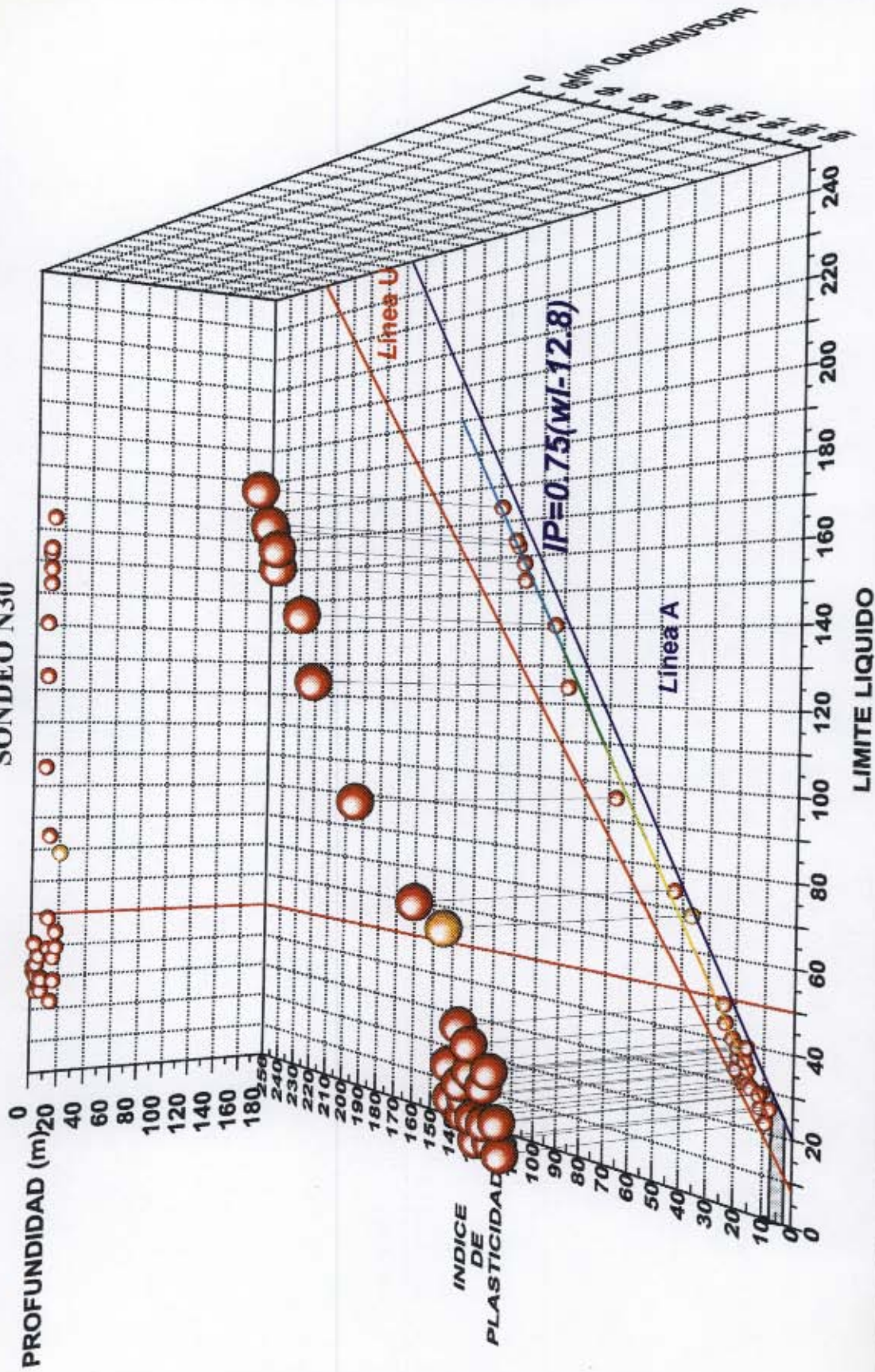


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

LIMITE LIQUIDO PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.23

**GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N30**

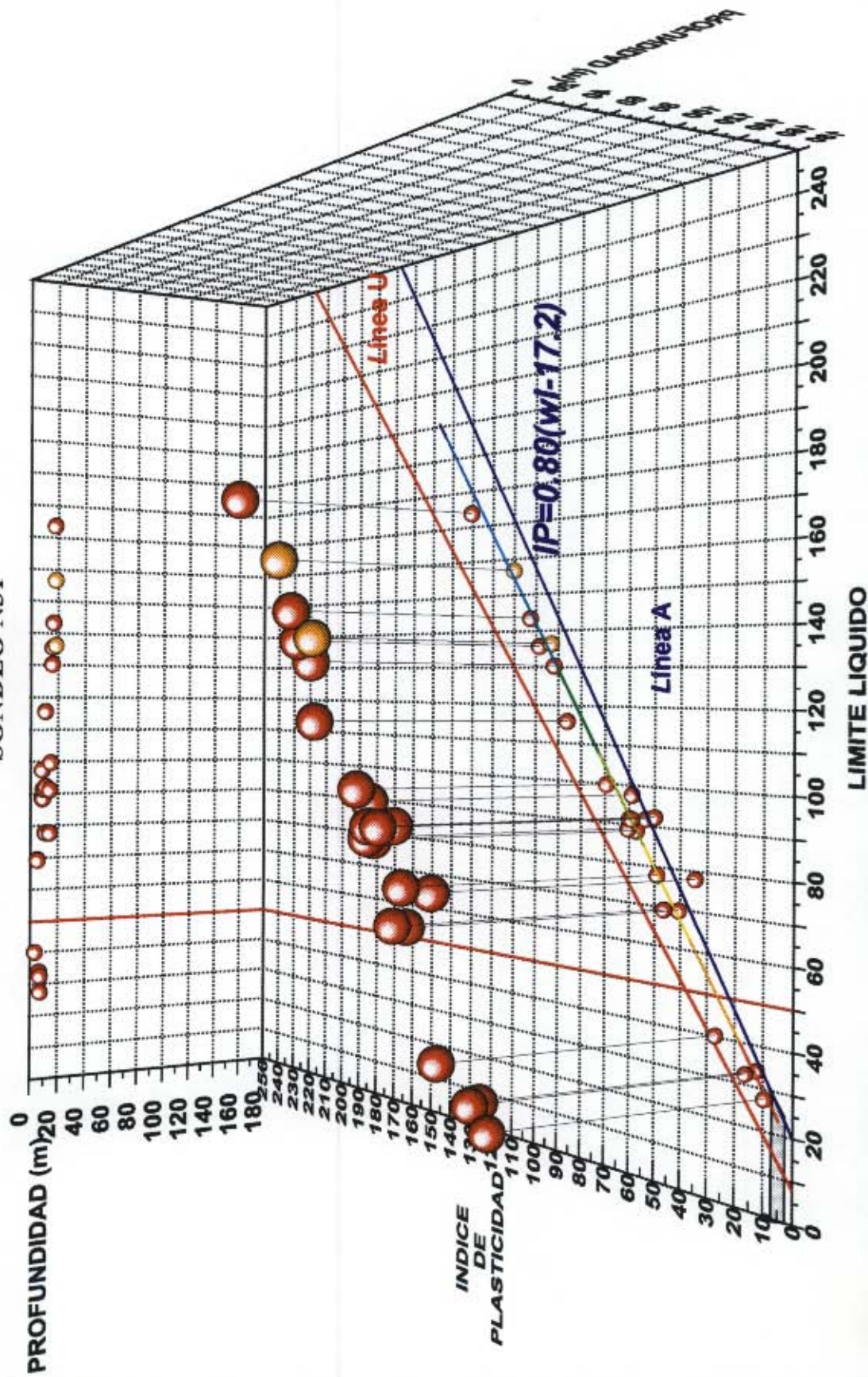


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.24

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRENDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N31

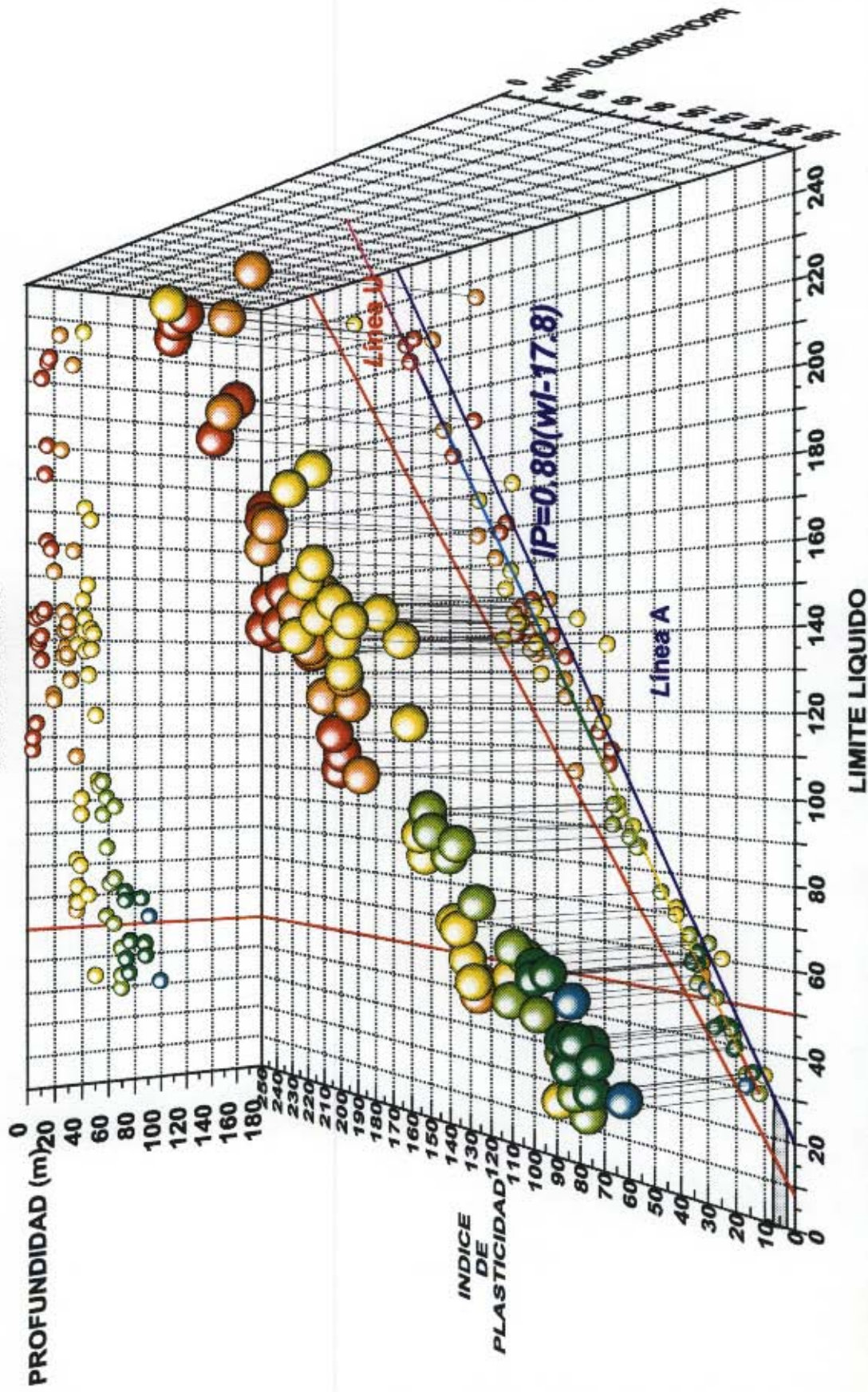


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.25

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N33

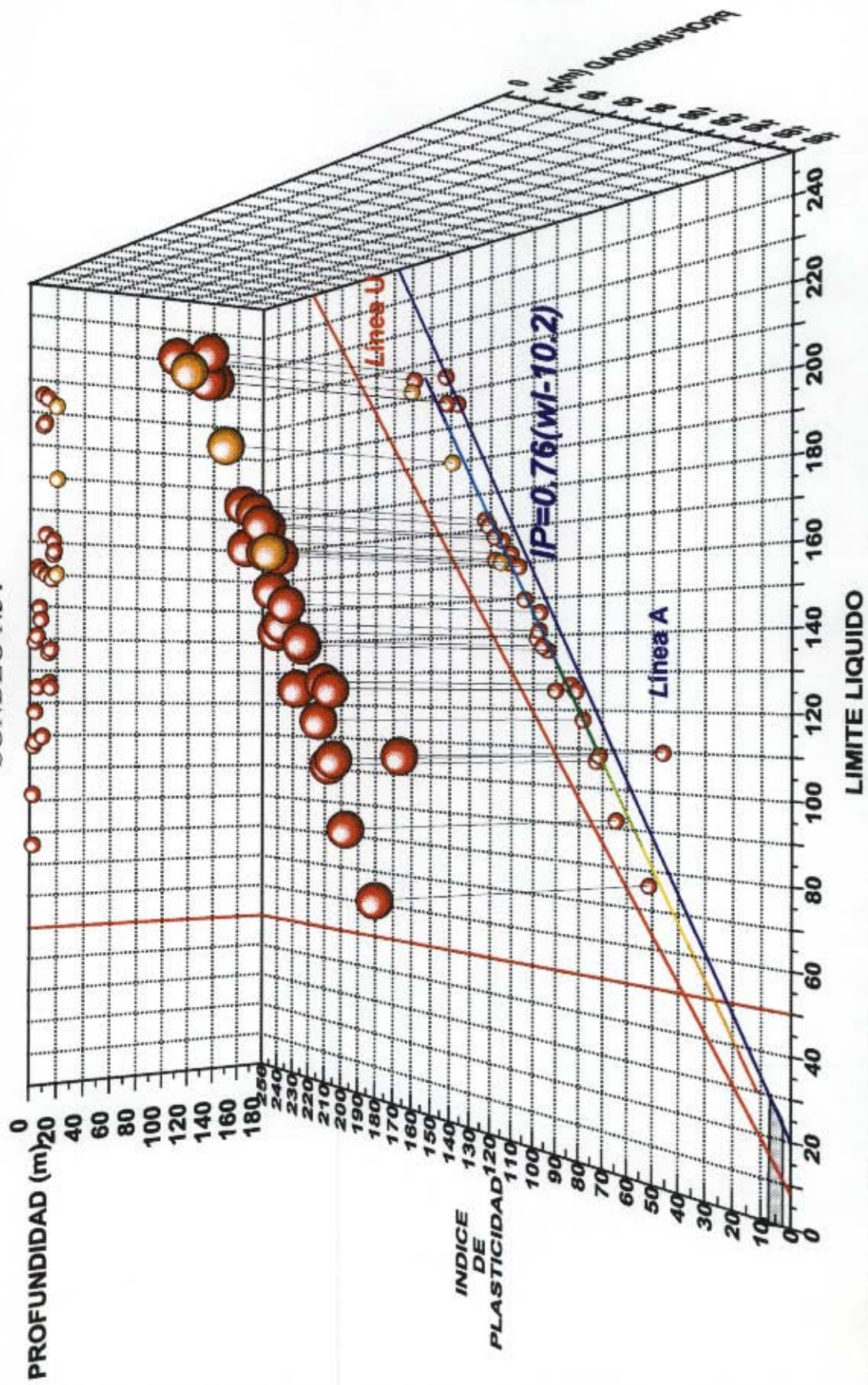


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.26

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N34

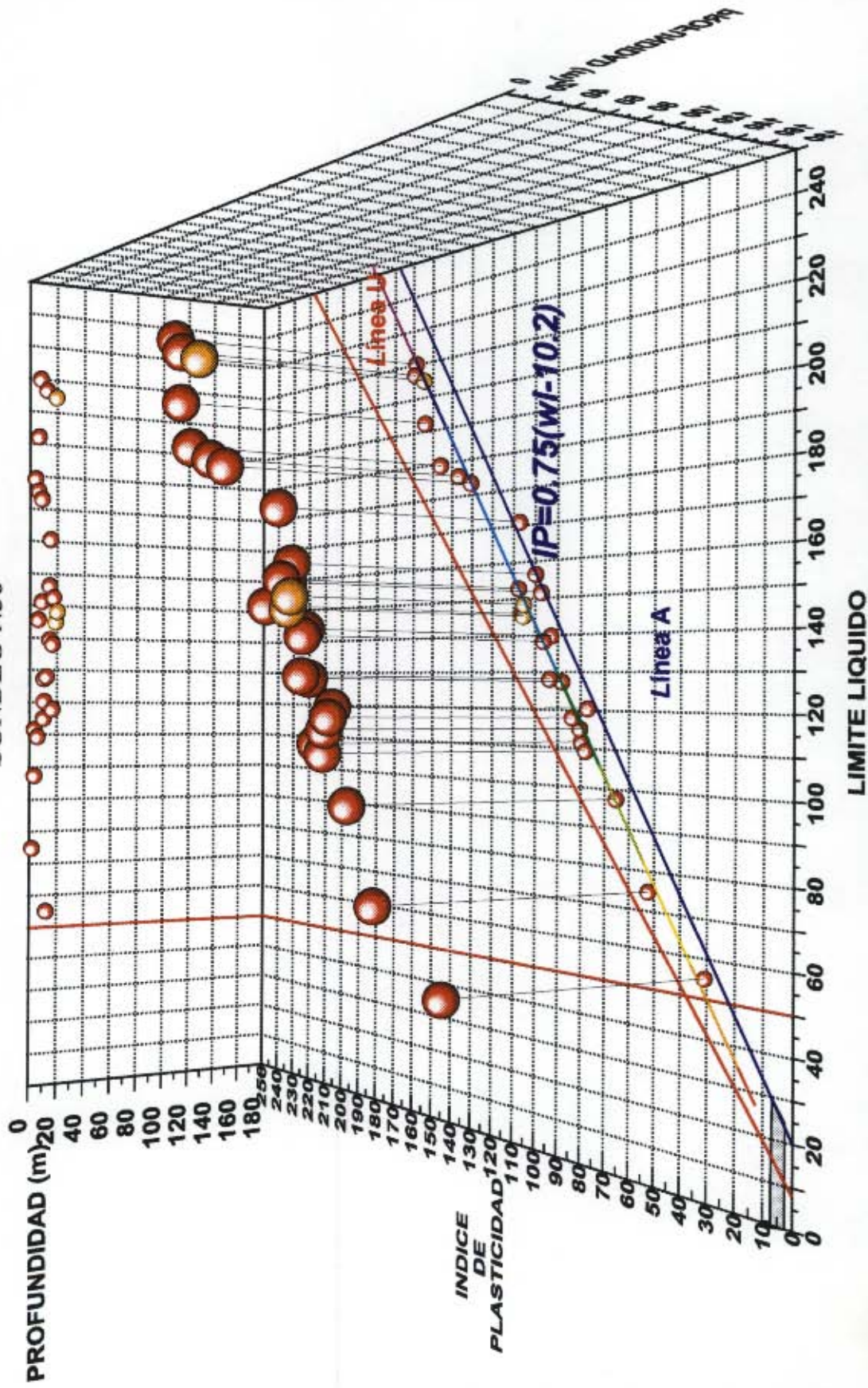


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.27

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N36

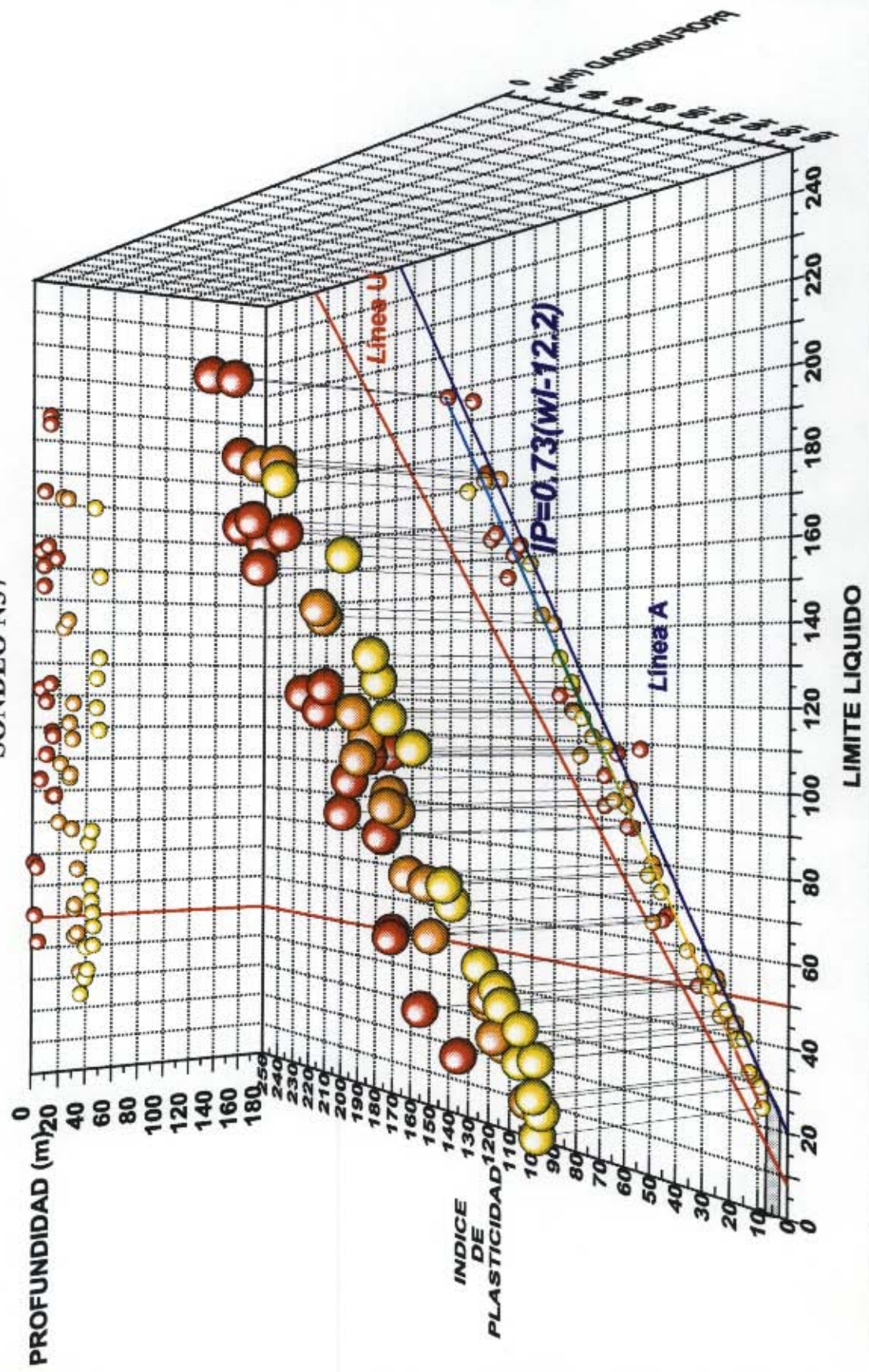


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.28

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRENDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N37

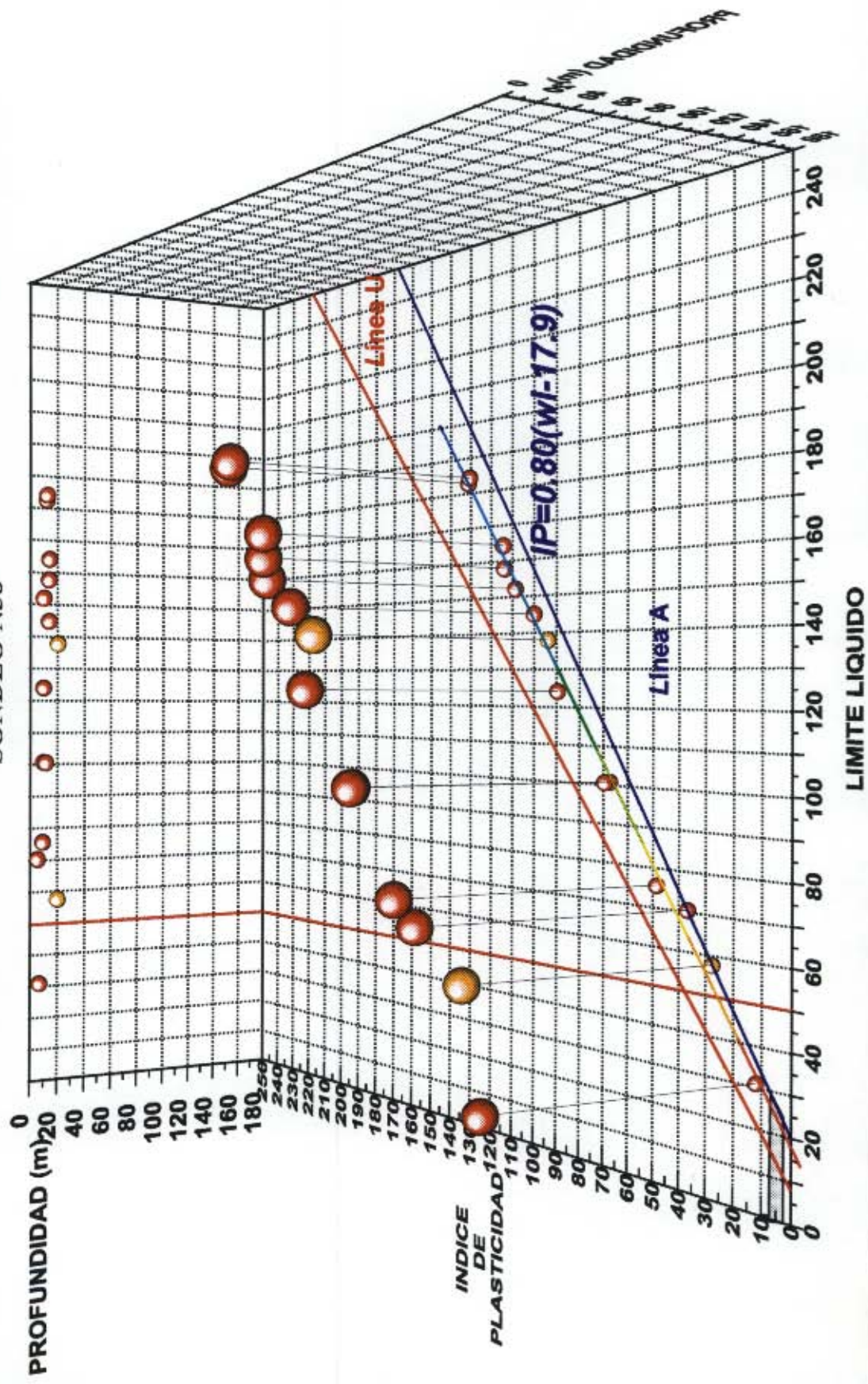


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.29

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N38

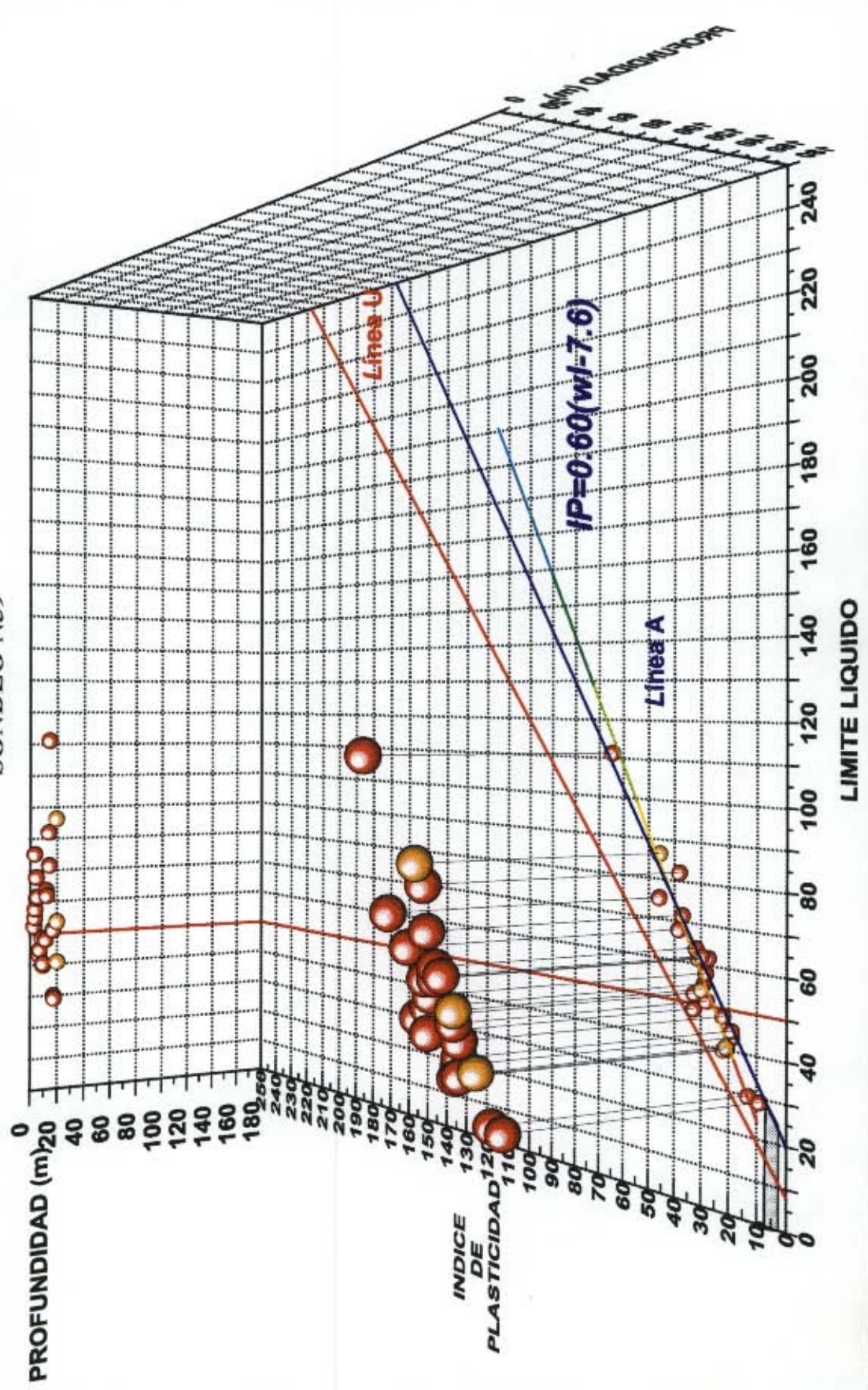


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.30

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N39

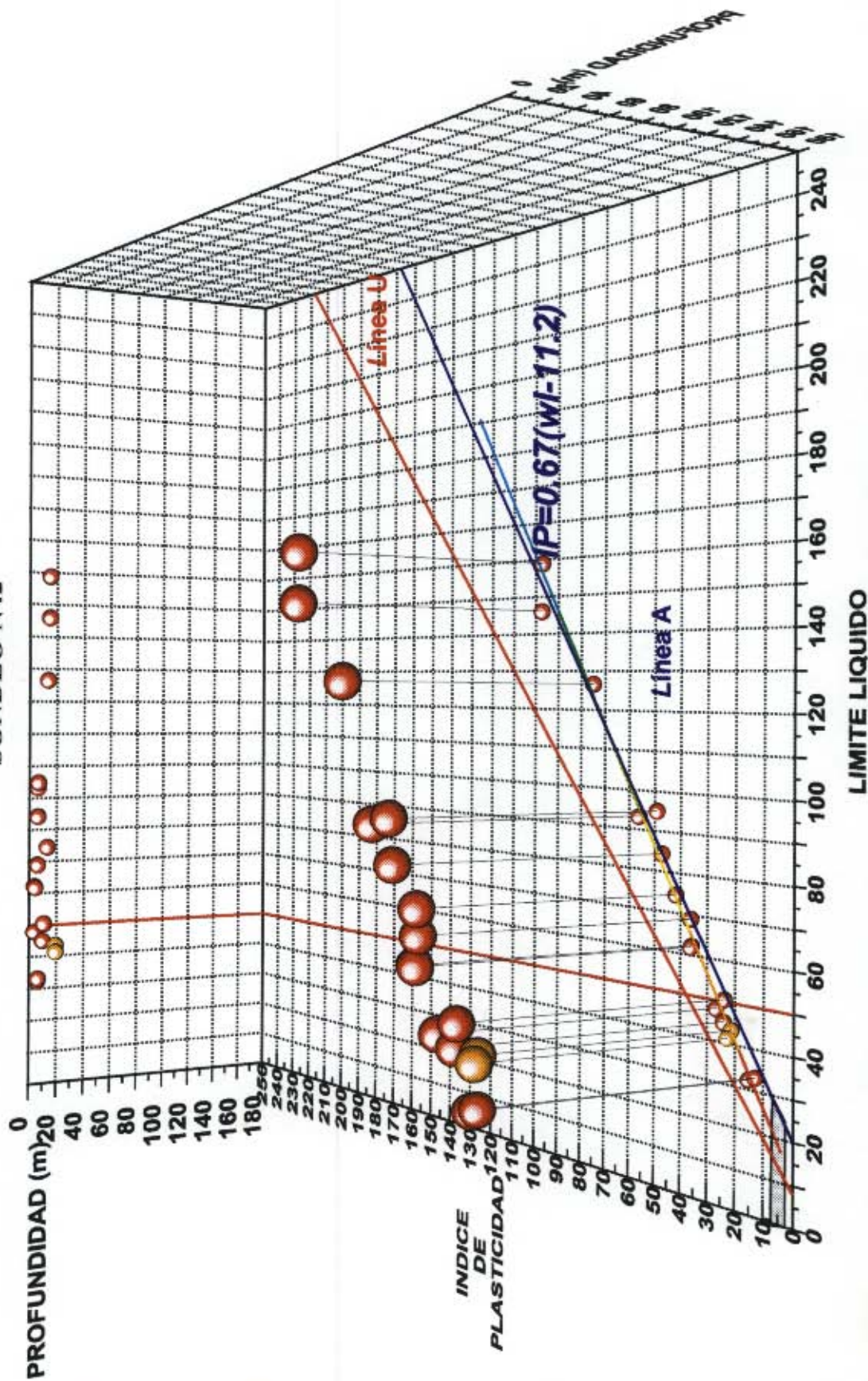


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.31

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRENDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N42

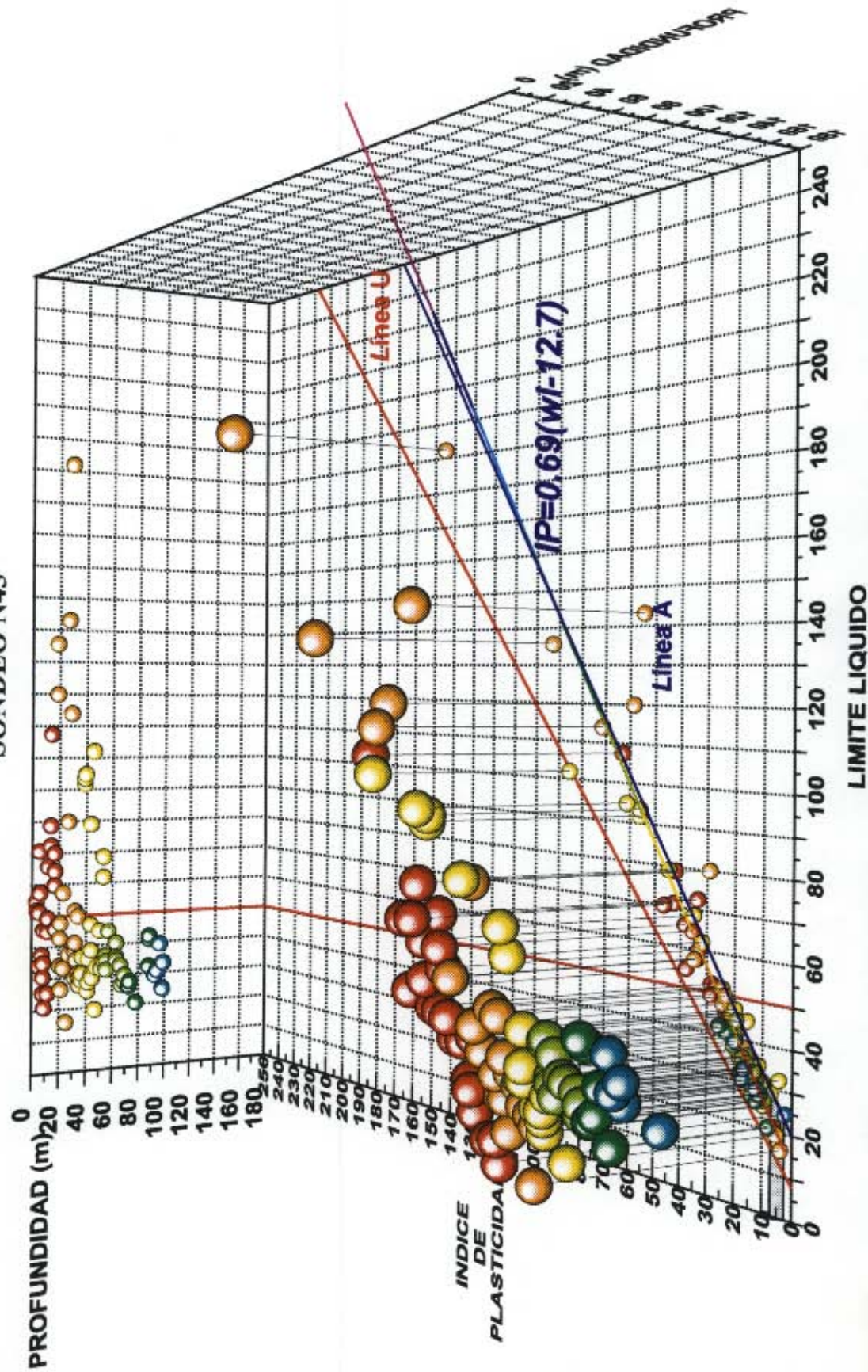


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.32

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N43

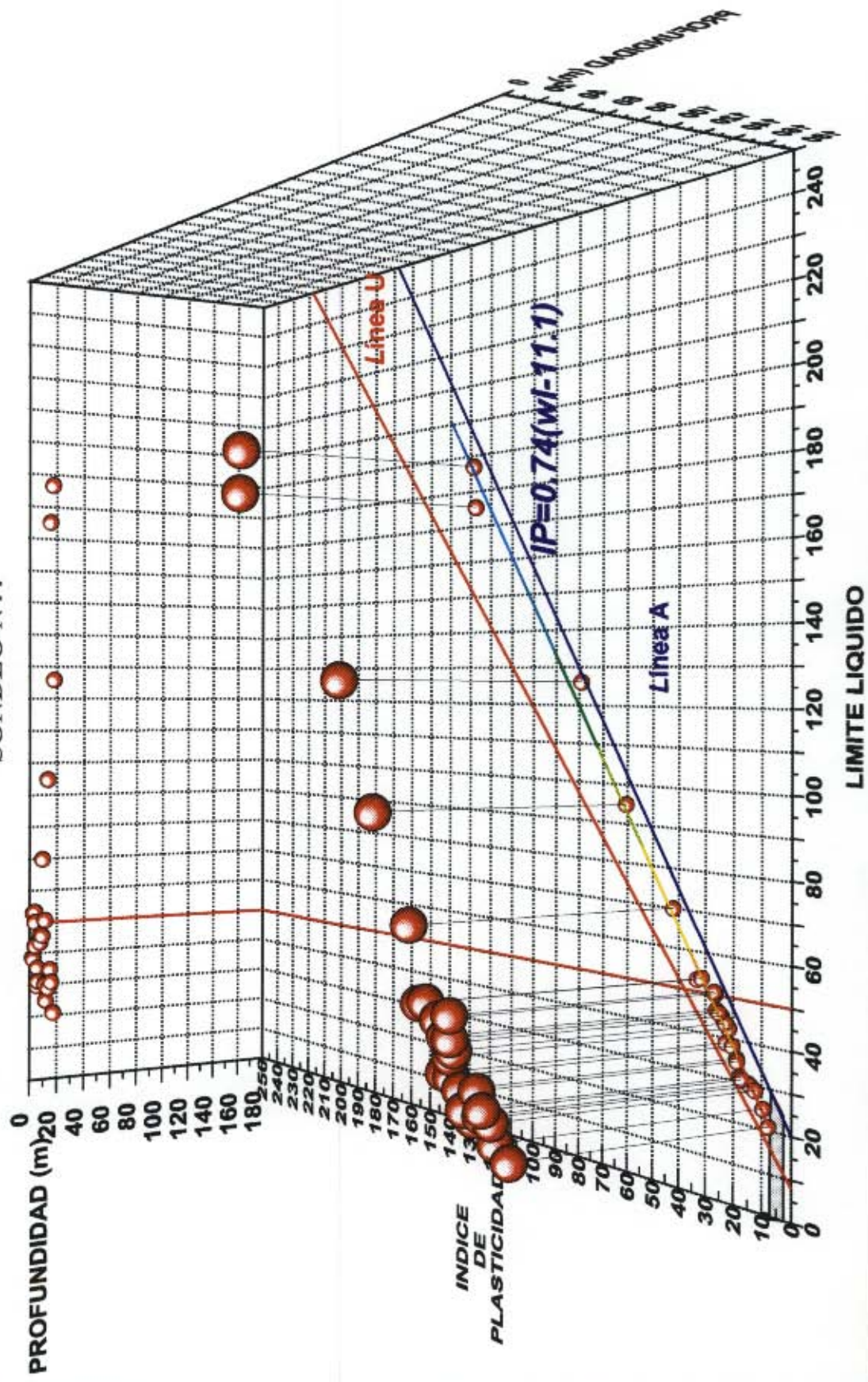


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.33

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N44

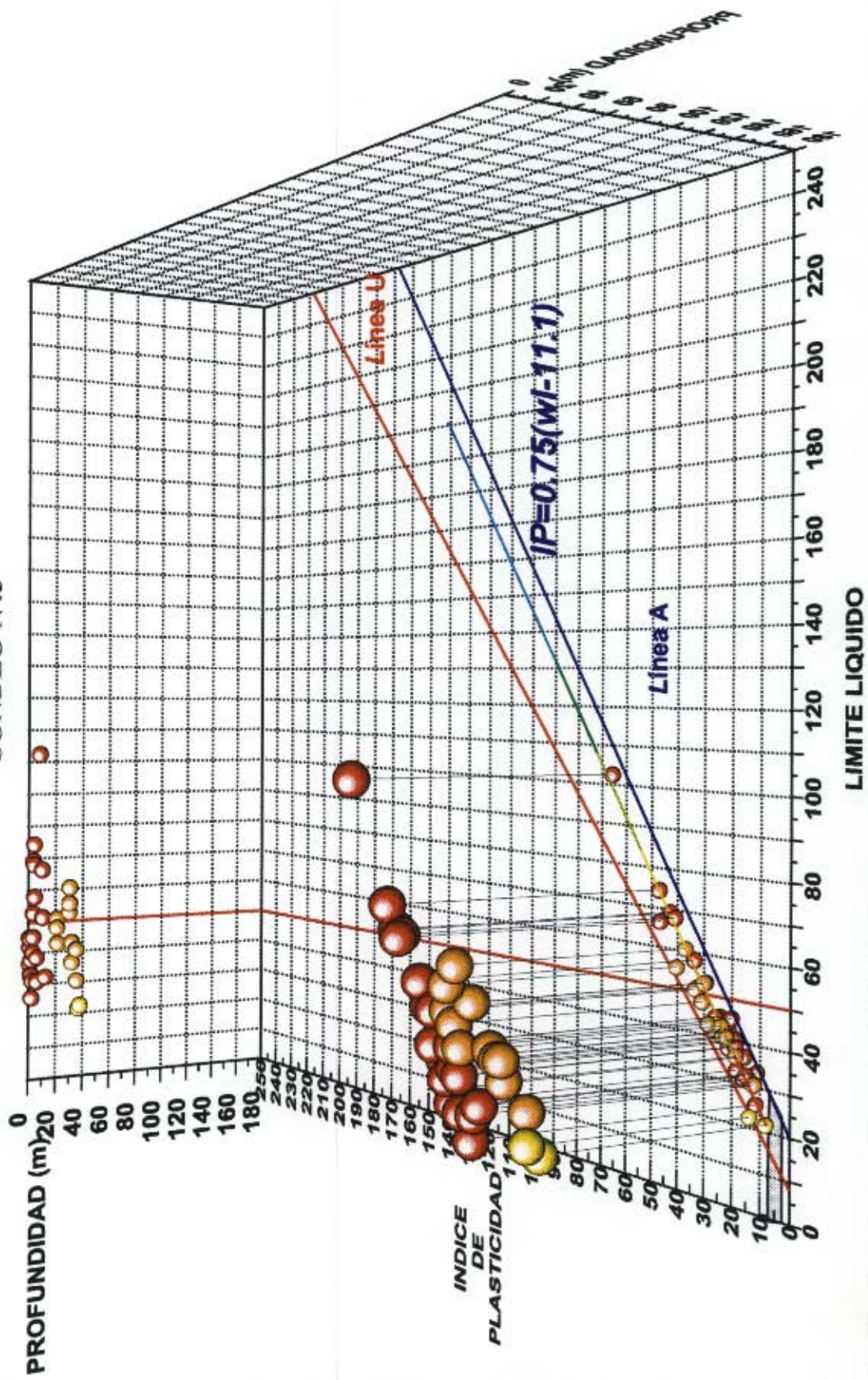


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.34

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N45

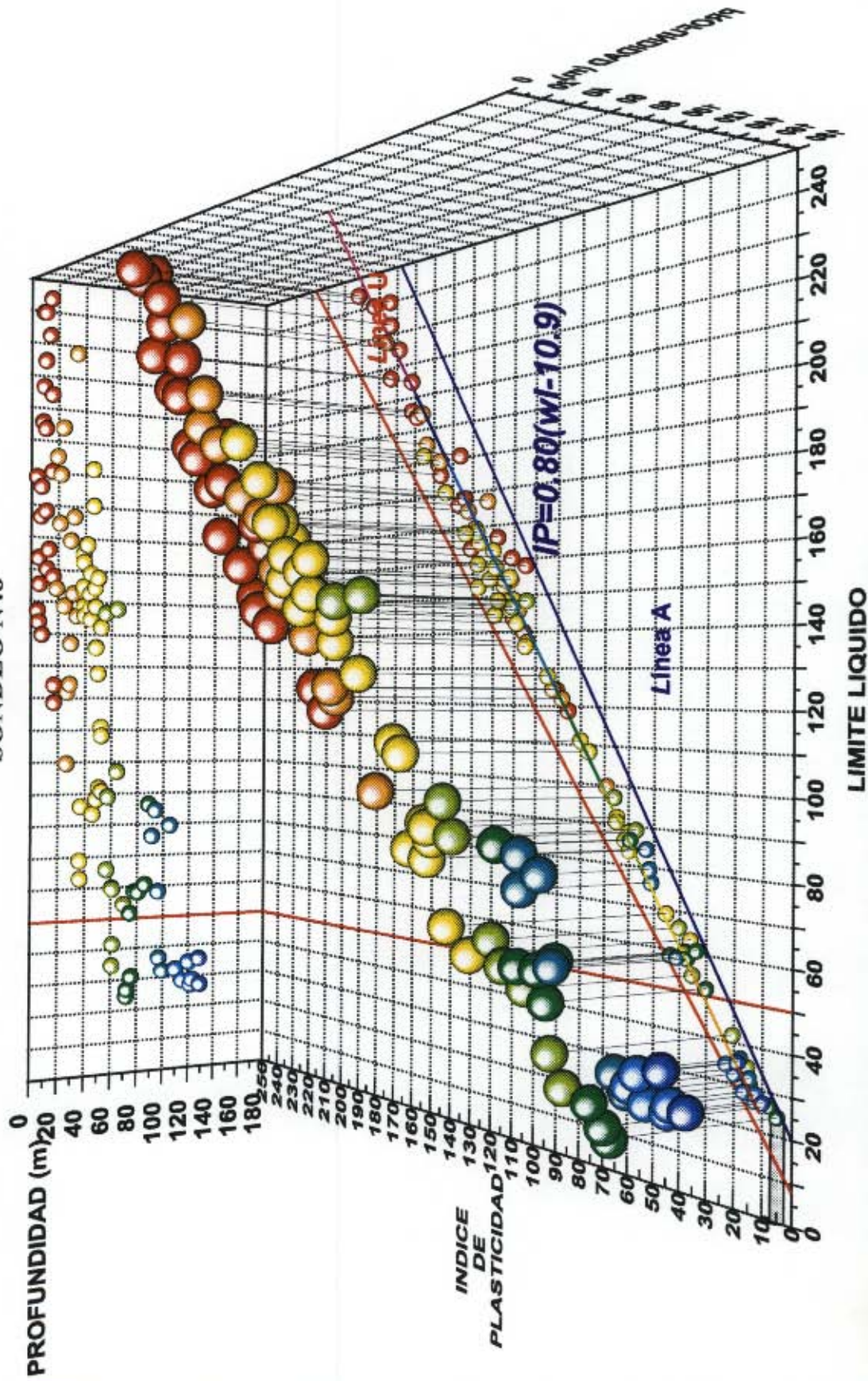


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.35

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRENDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N48

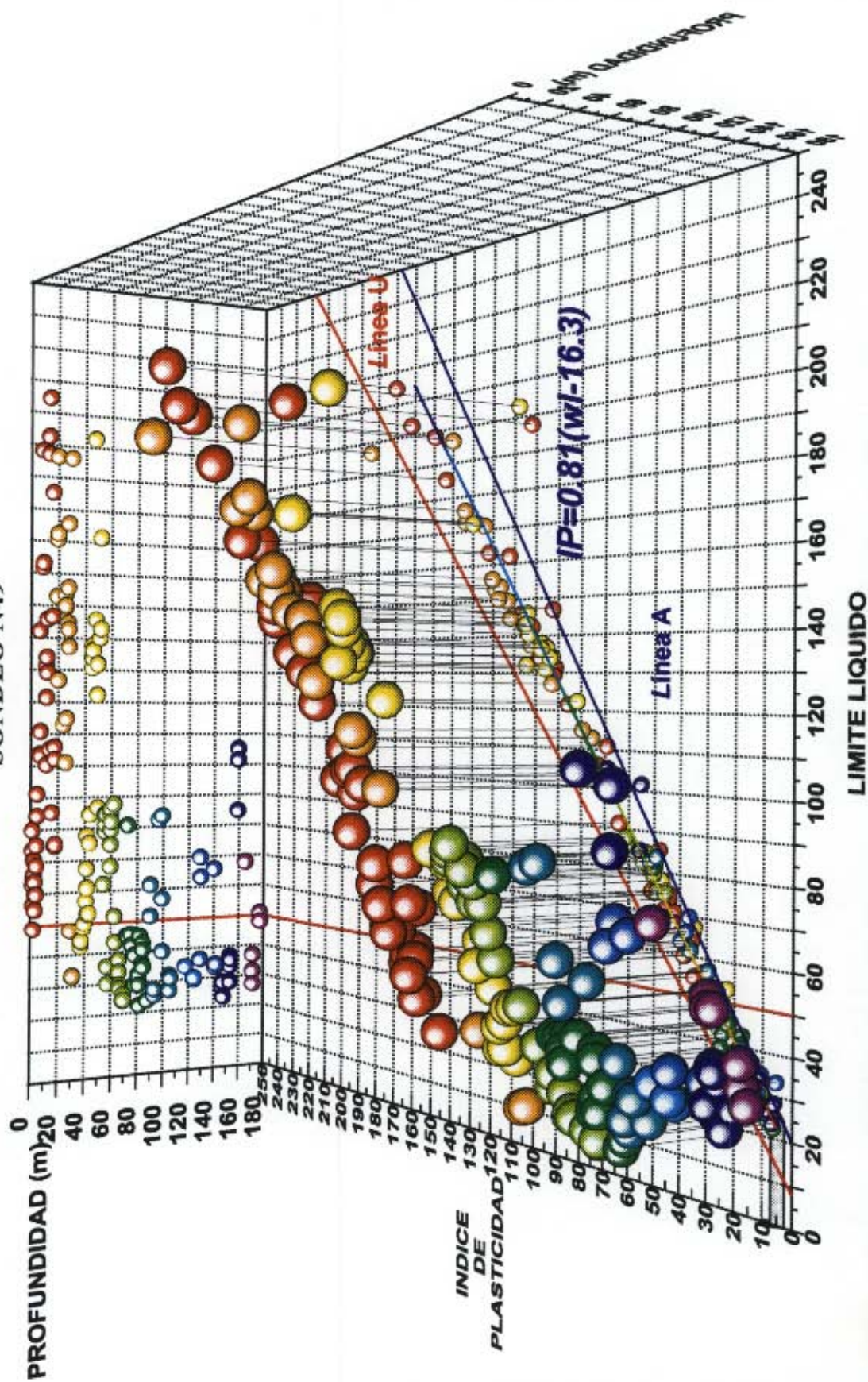


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.36

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N49

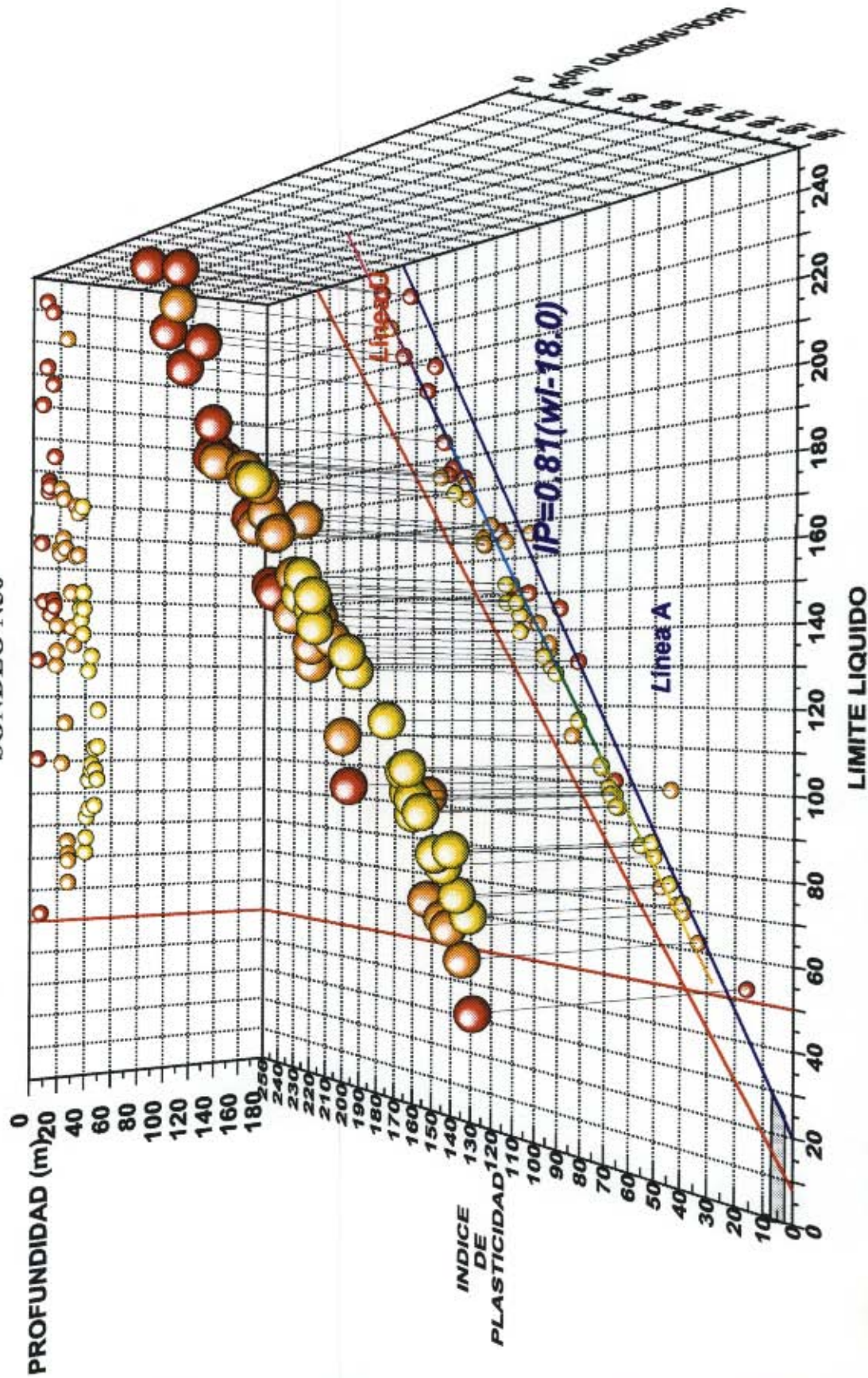


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.37

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N50

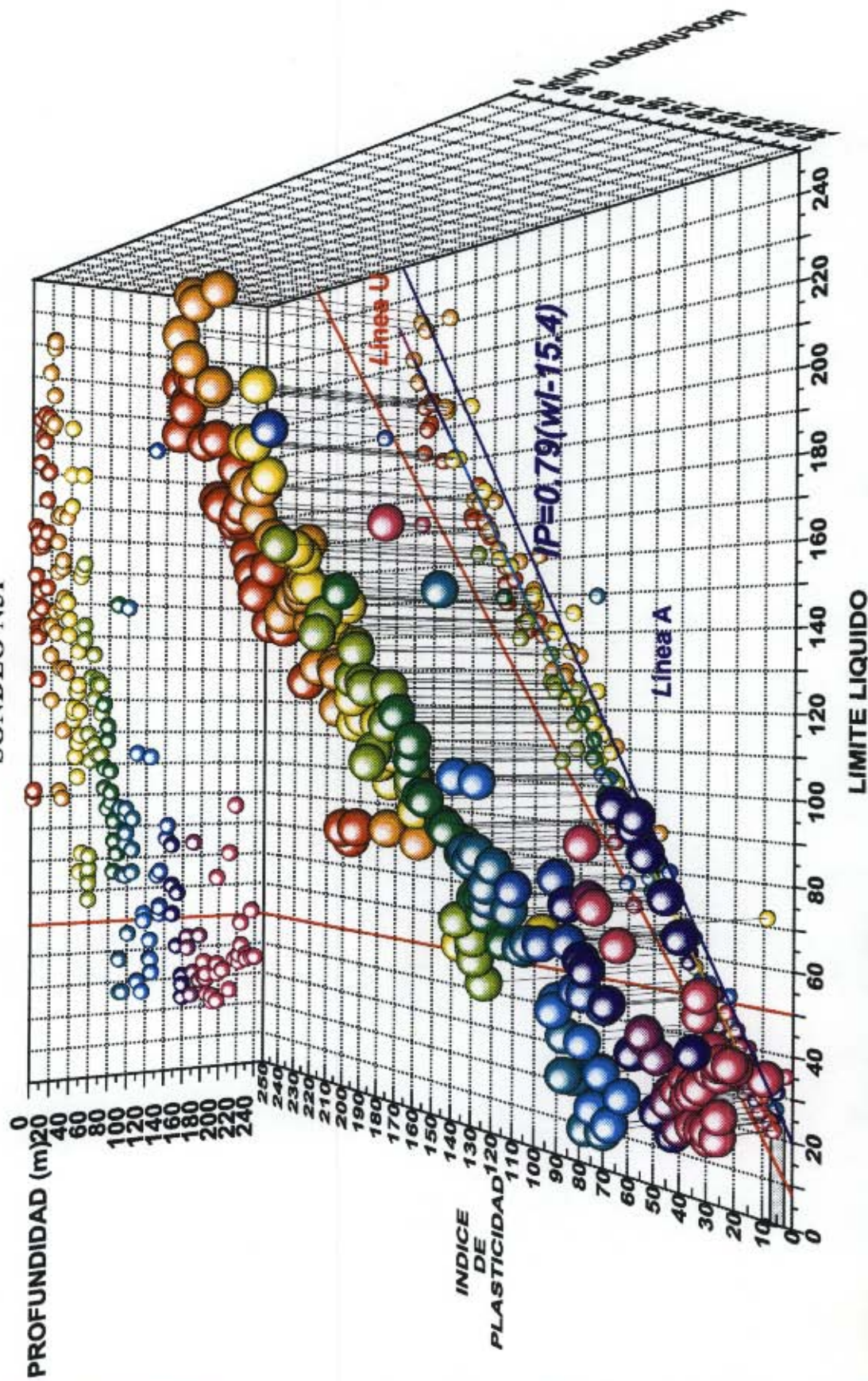


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.38

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRENDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
 SONDEO N51

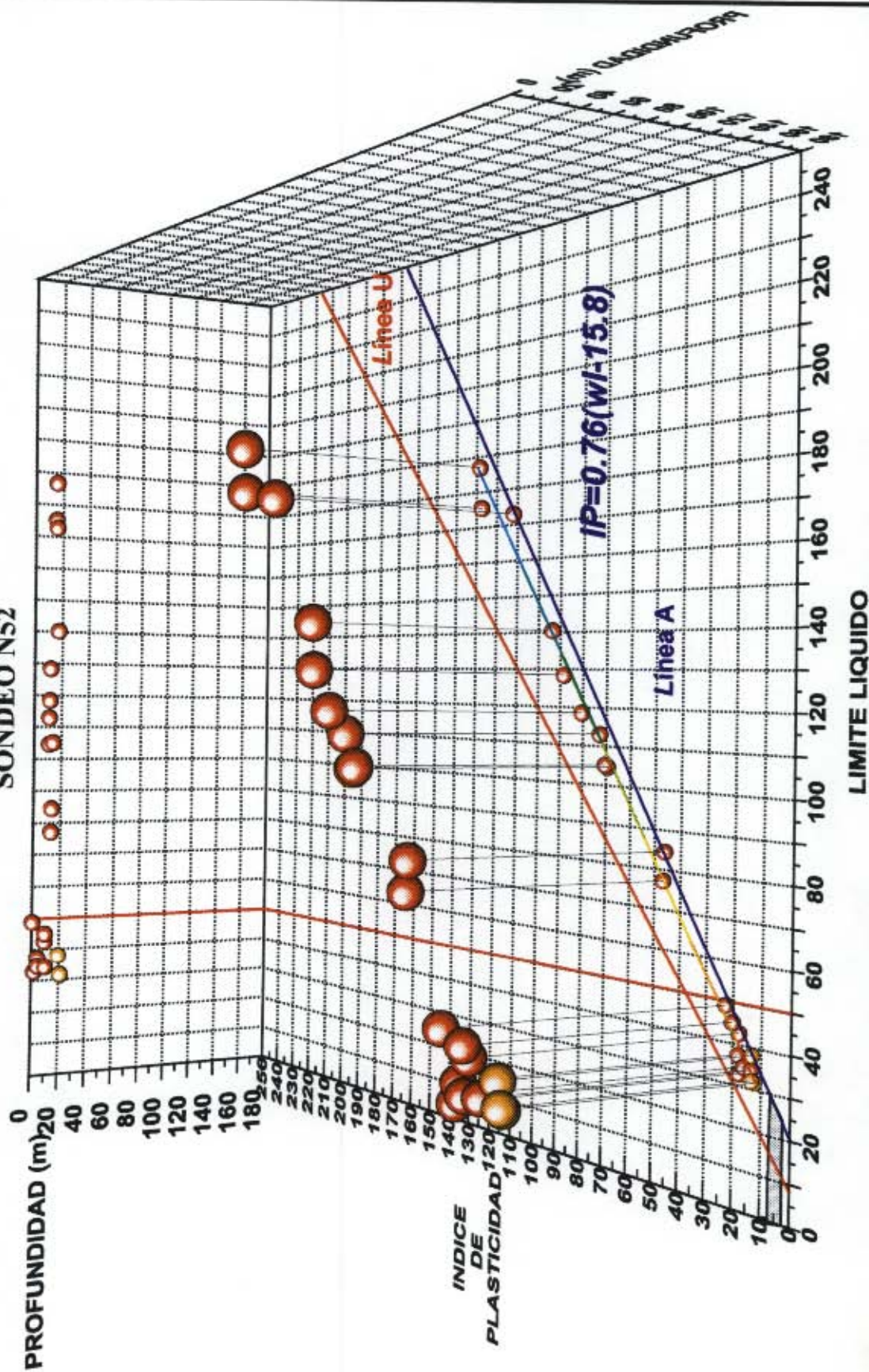


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.39

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO N52

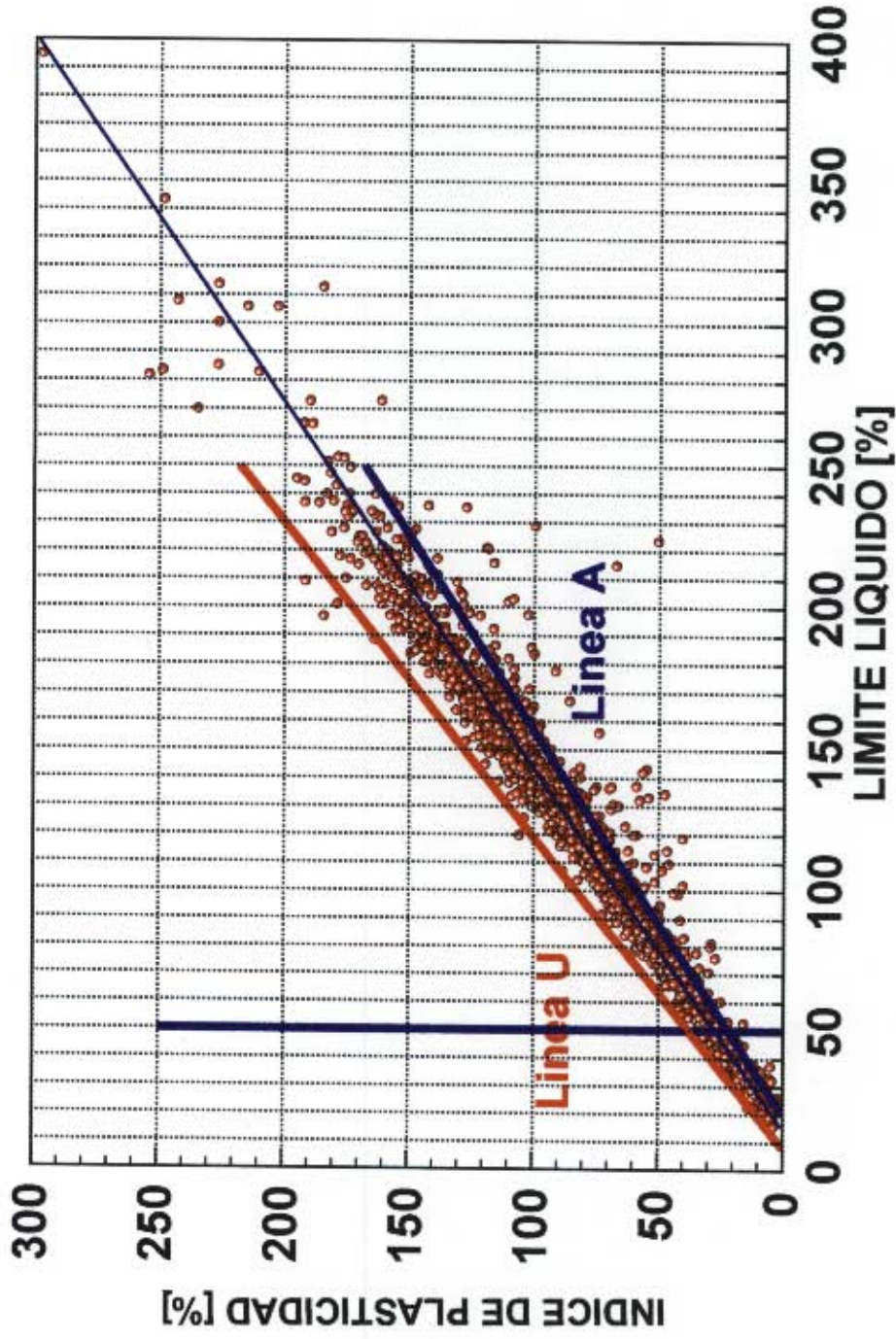


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.40

GRÁFICO DE PLASTICIDAD DE CASAGRANDE PARA TODOS LOS SUELOS ESTUDIADOS

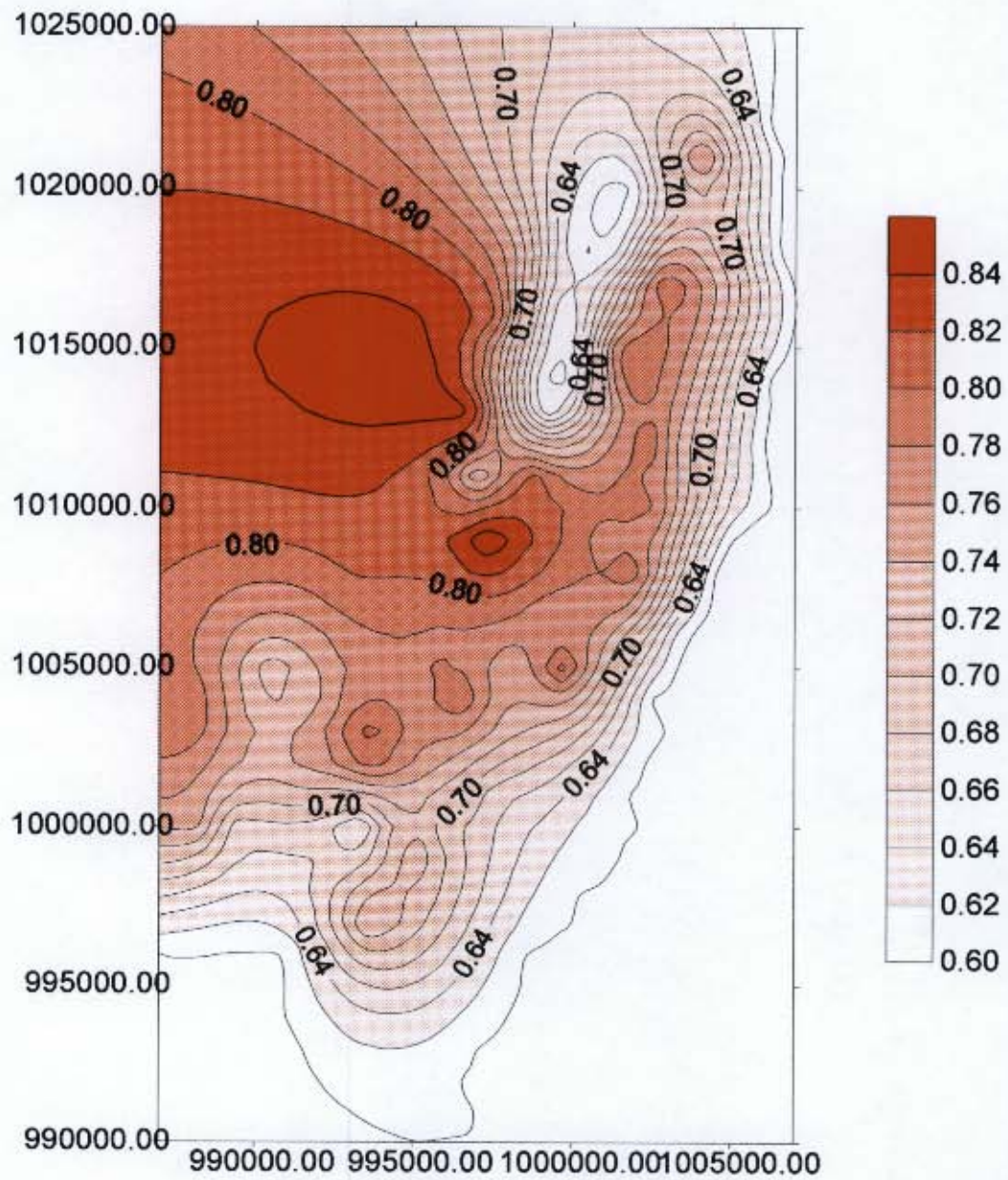


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 3.41

ISOVALORES DE PENDIENTE DE LA CORRELACIÓN W_i, I_p

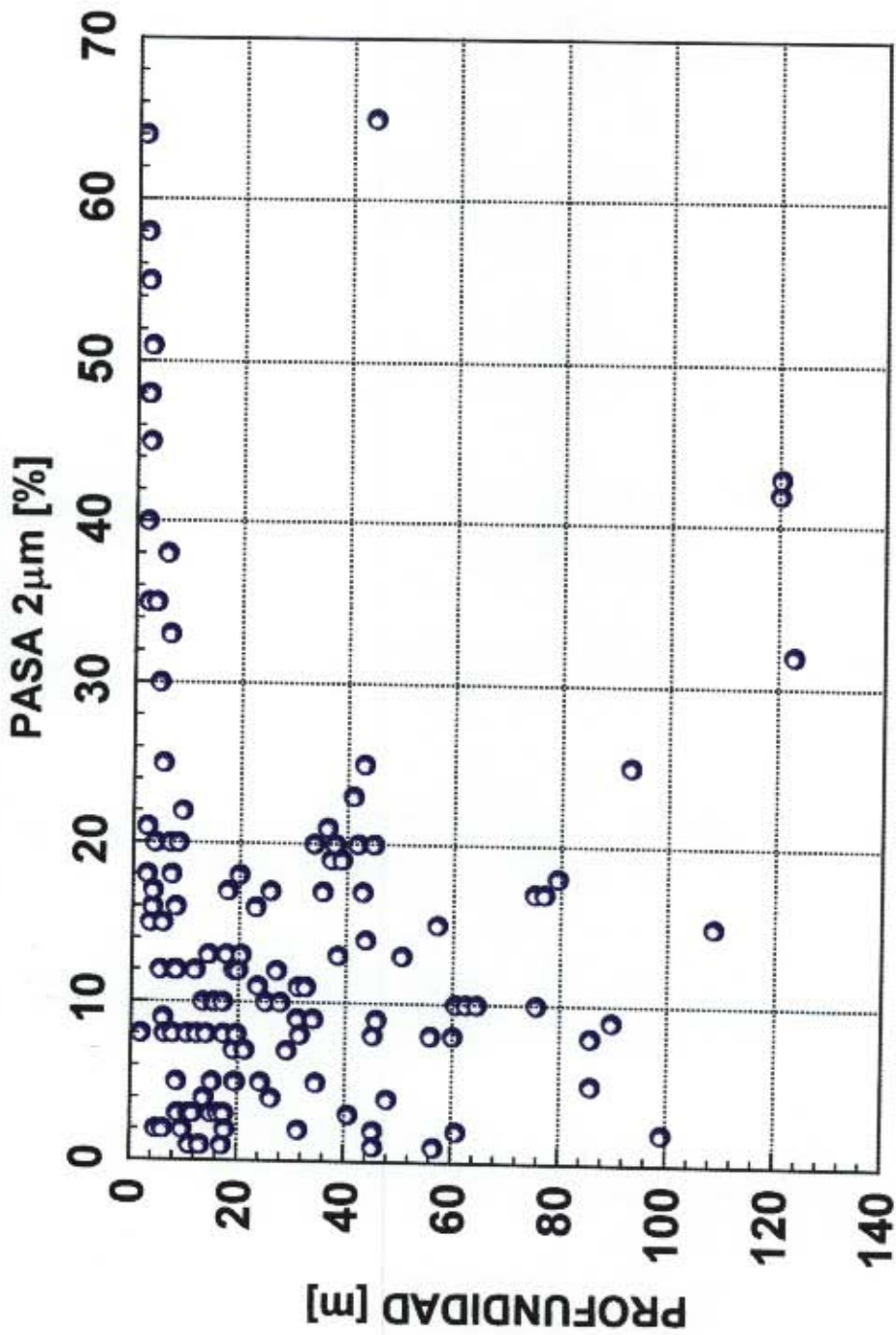


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO
ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura 3.42

GRÁFICO DE PORCENTAJE DE PARTÍCULAS INFERIORES A $2\ \mu\text{m}$ EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD

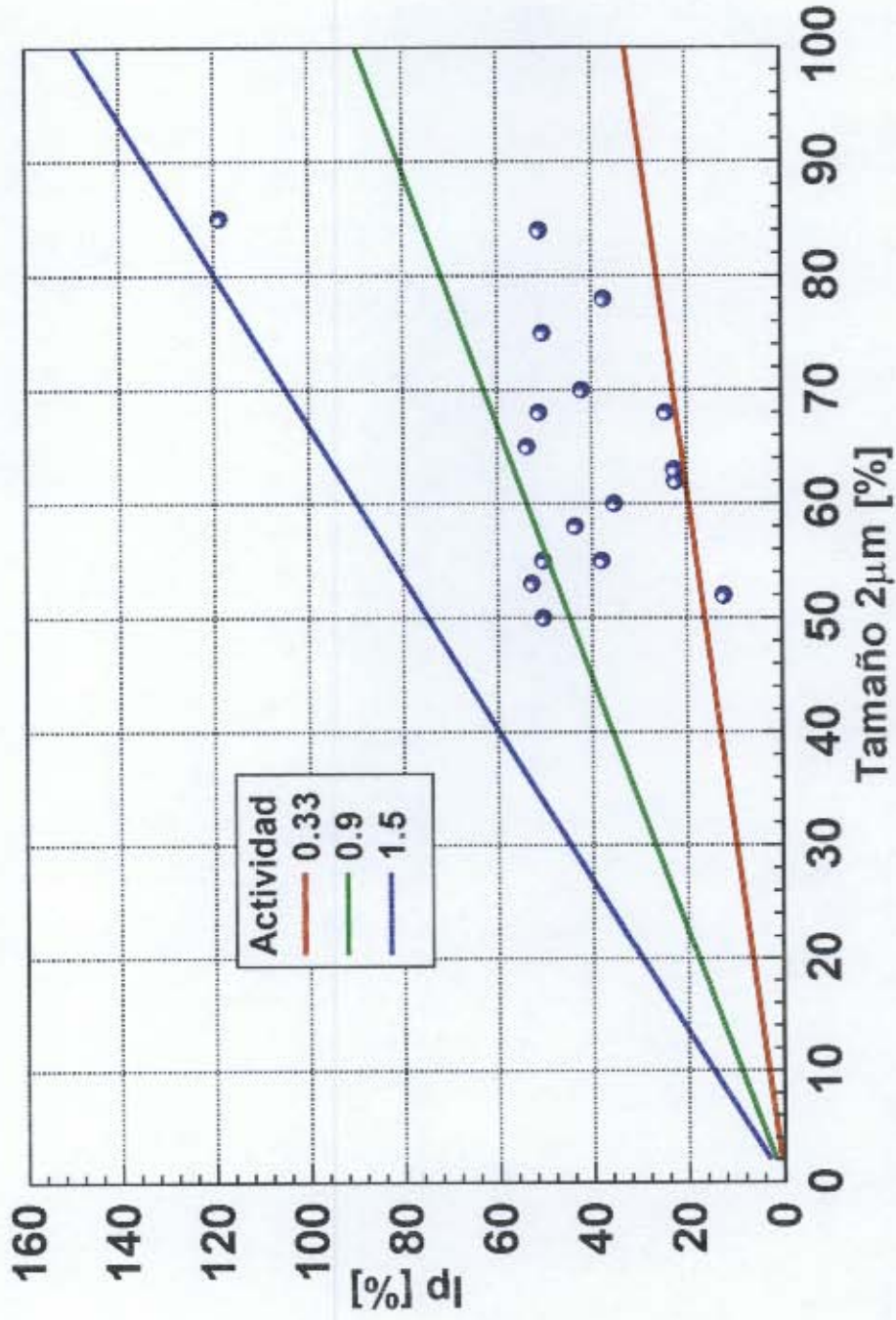


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.43

GRÁFICO DE ACTIVIDAD



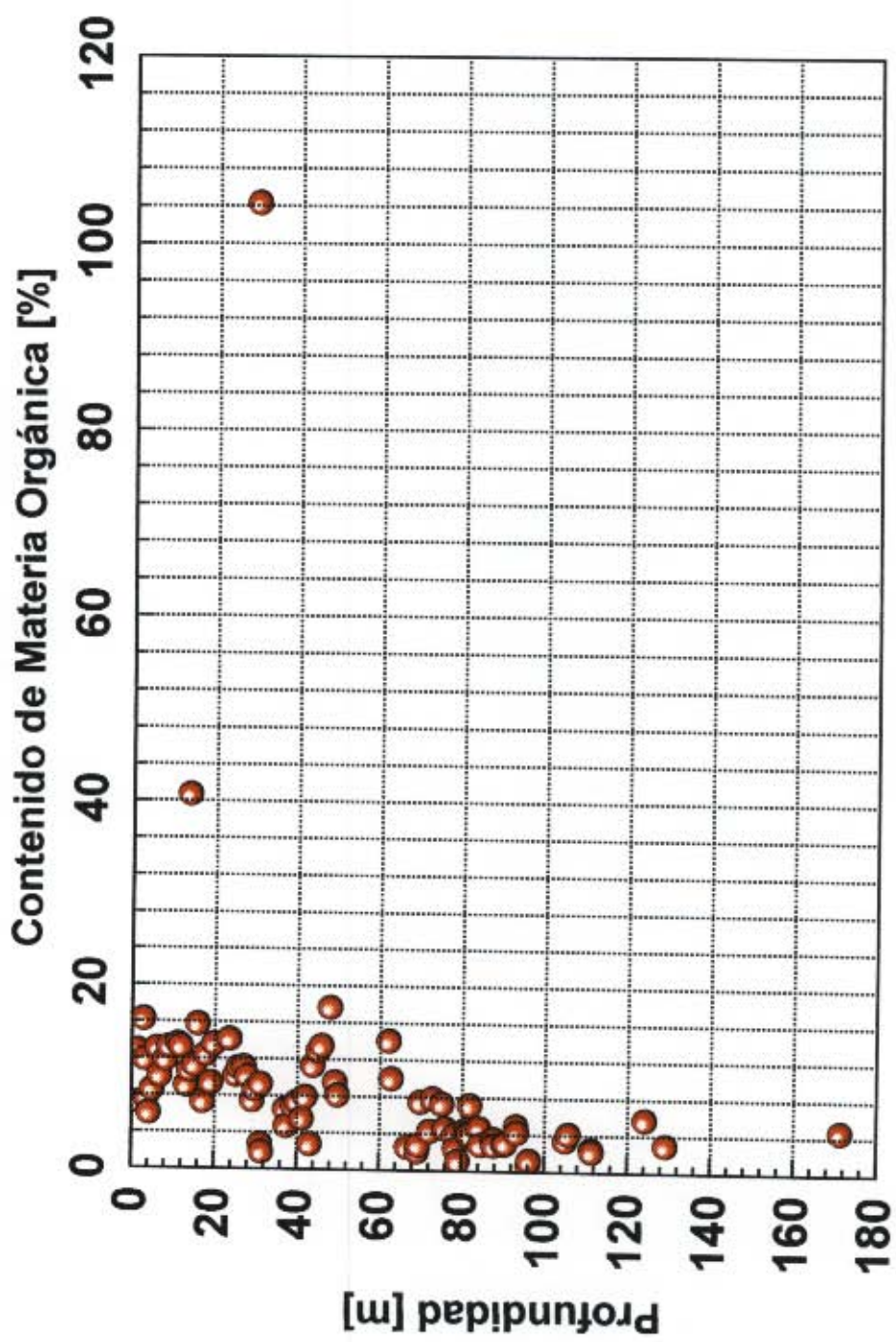
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE, 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
 SUBPROYECTO ZONIFICACION GEOTÉCNICA

Figura 3.44



**GRÁFICO DE PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
SONDEO INGEOMINAS**

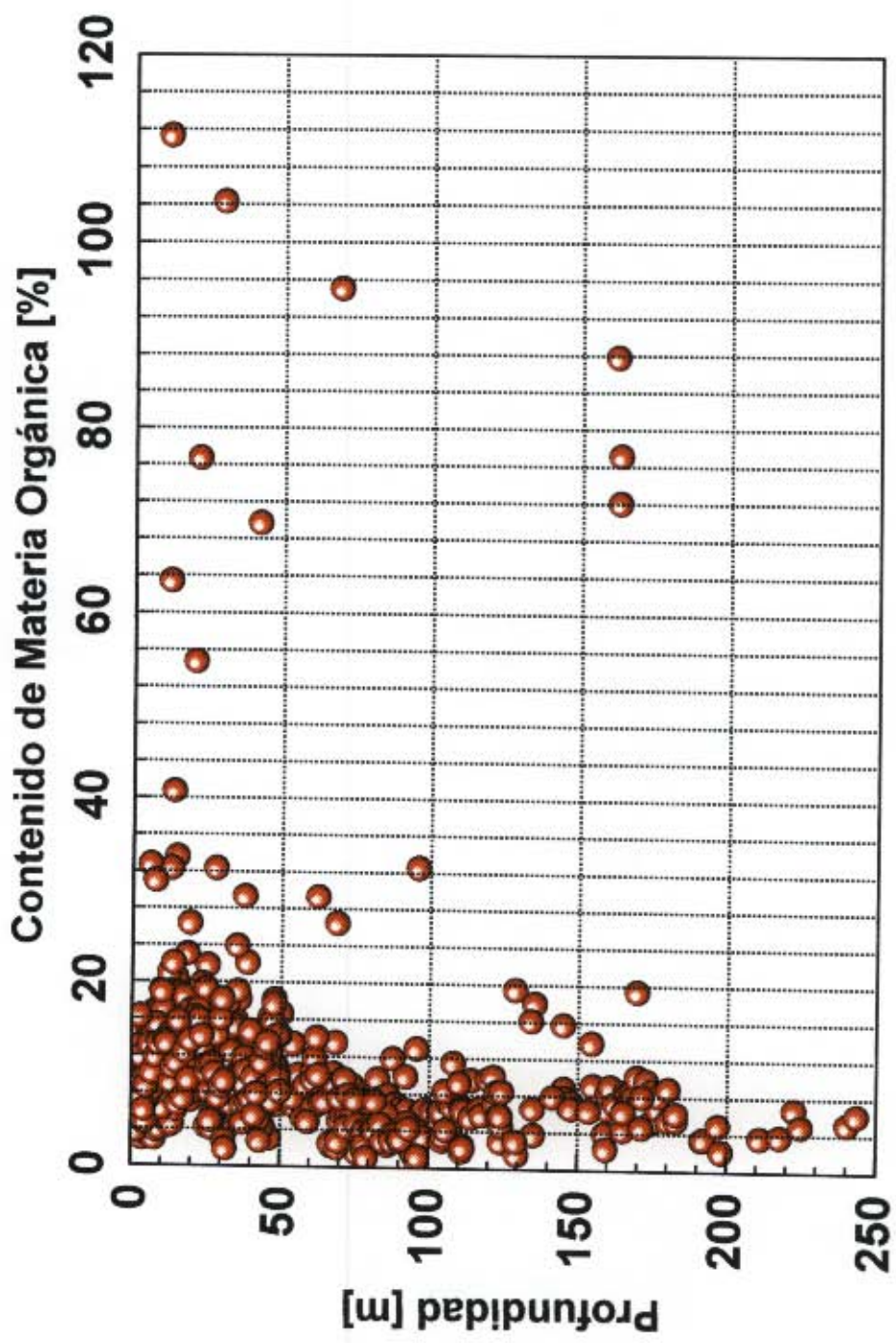


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.45

**GRÁFICO DE PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD
ZONA ARCILLAS BLANDAS**

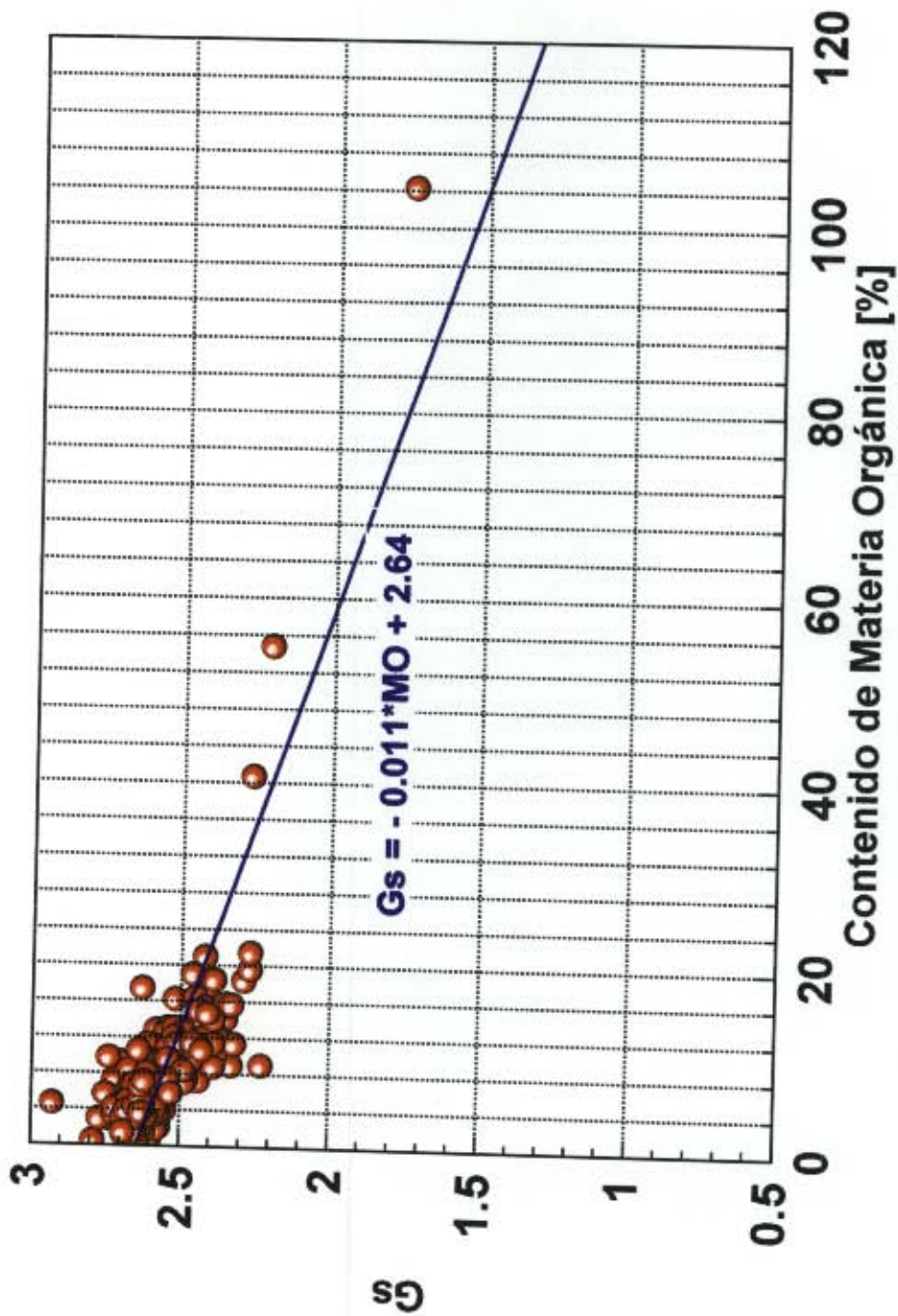


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.46

GRÁFICO DE PESO ESPECÍFICO DE SÓLIDOS EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA

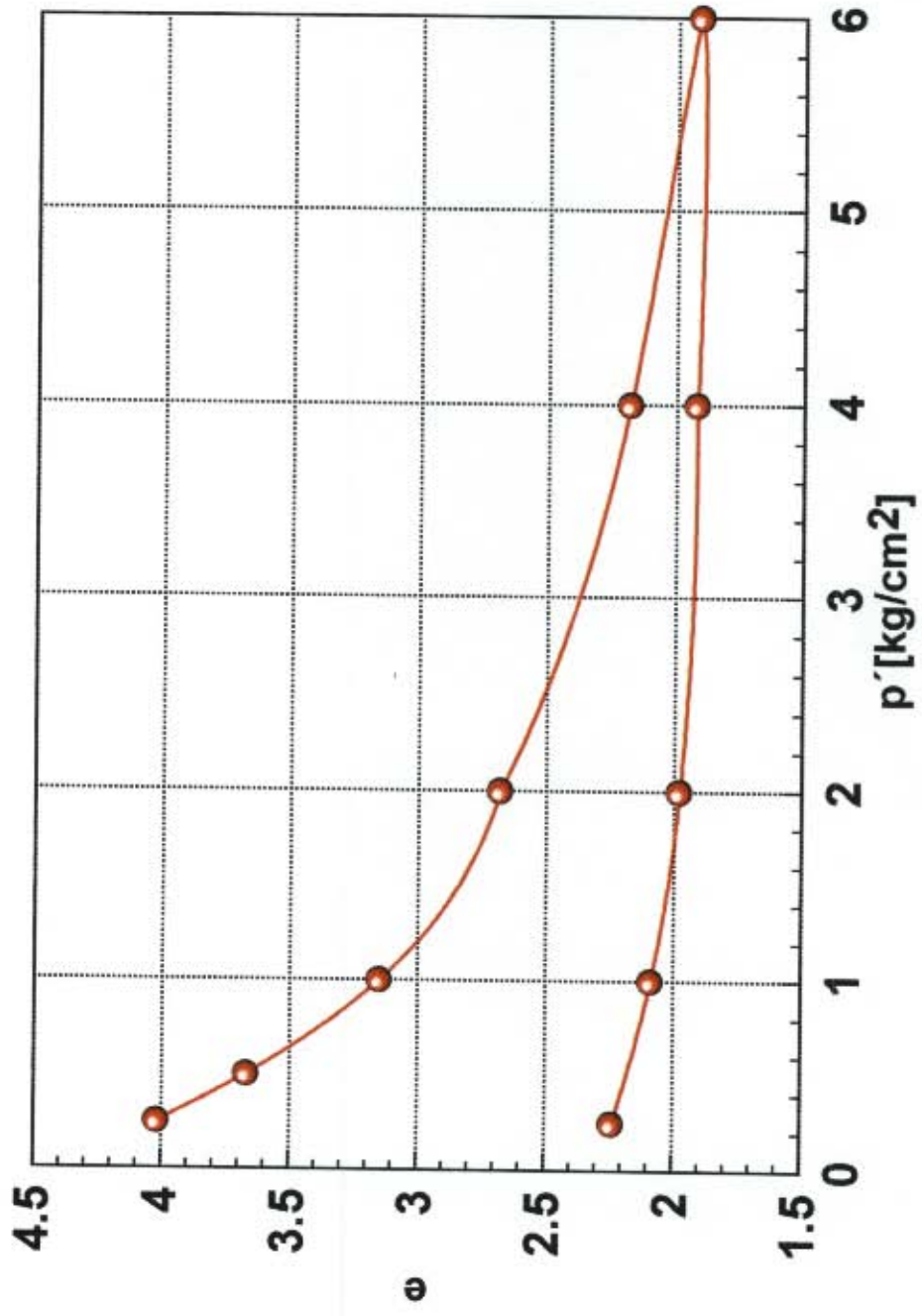


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 3.47

GRÁFICO DE COMPRESIÓN ISOTRÓPICA EN PLANO ARITMETICO

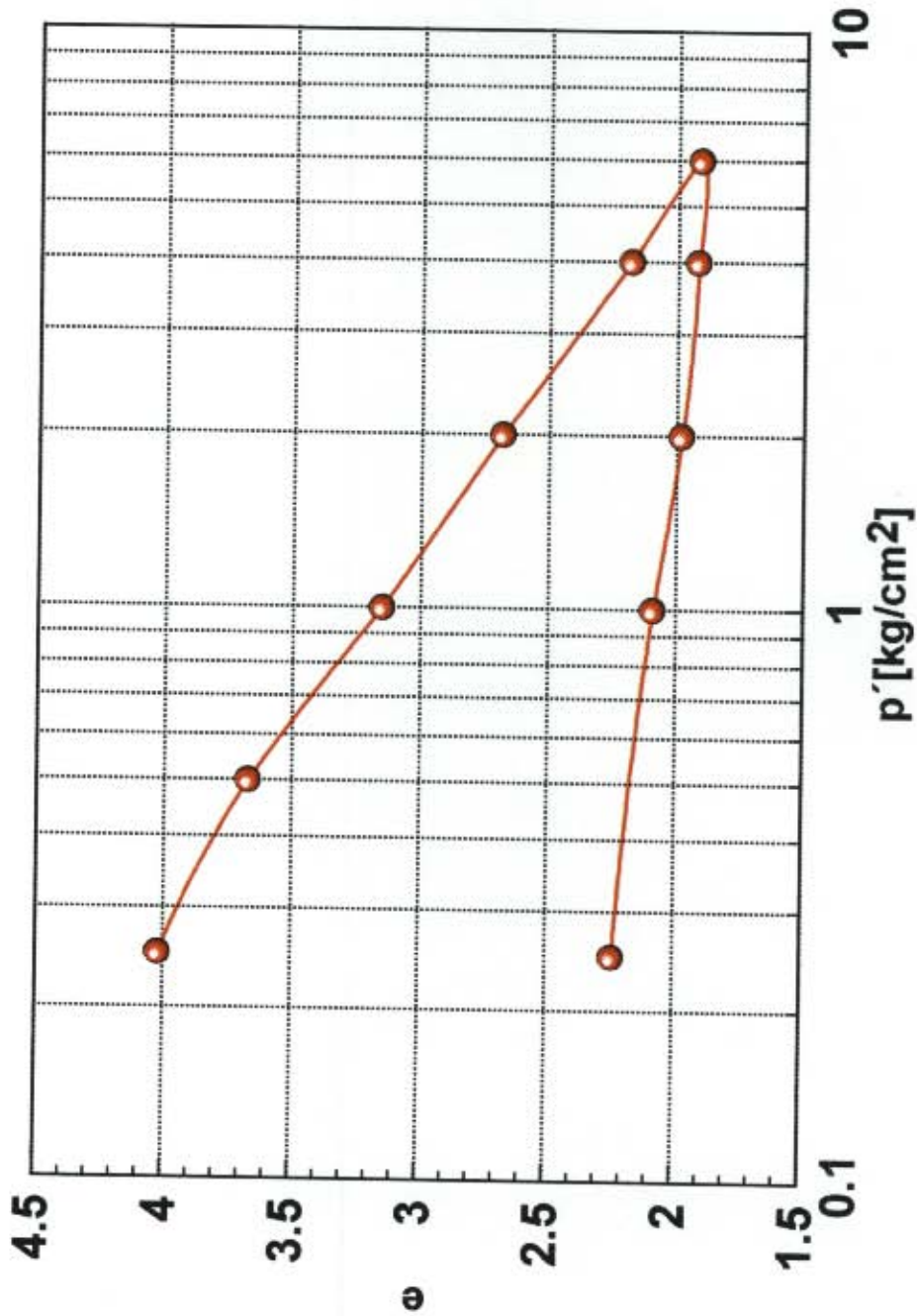


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.1

GRÁFICO DE COMPRESIÓN ISOTRÓPICA EN PLANO LOGARITMICO

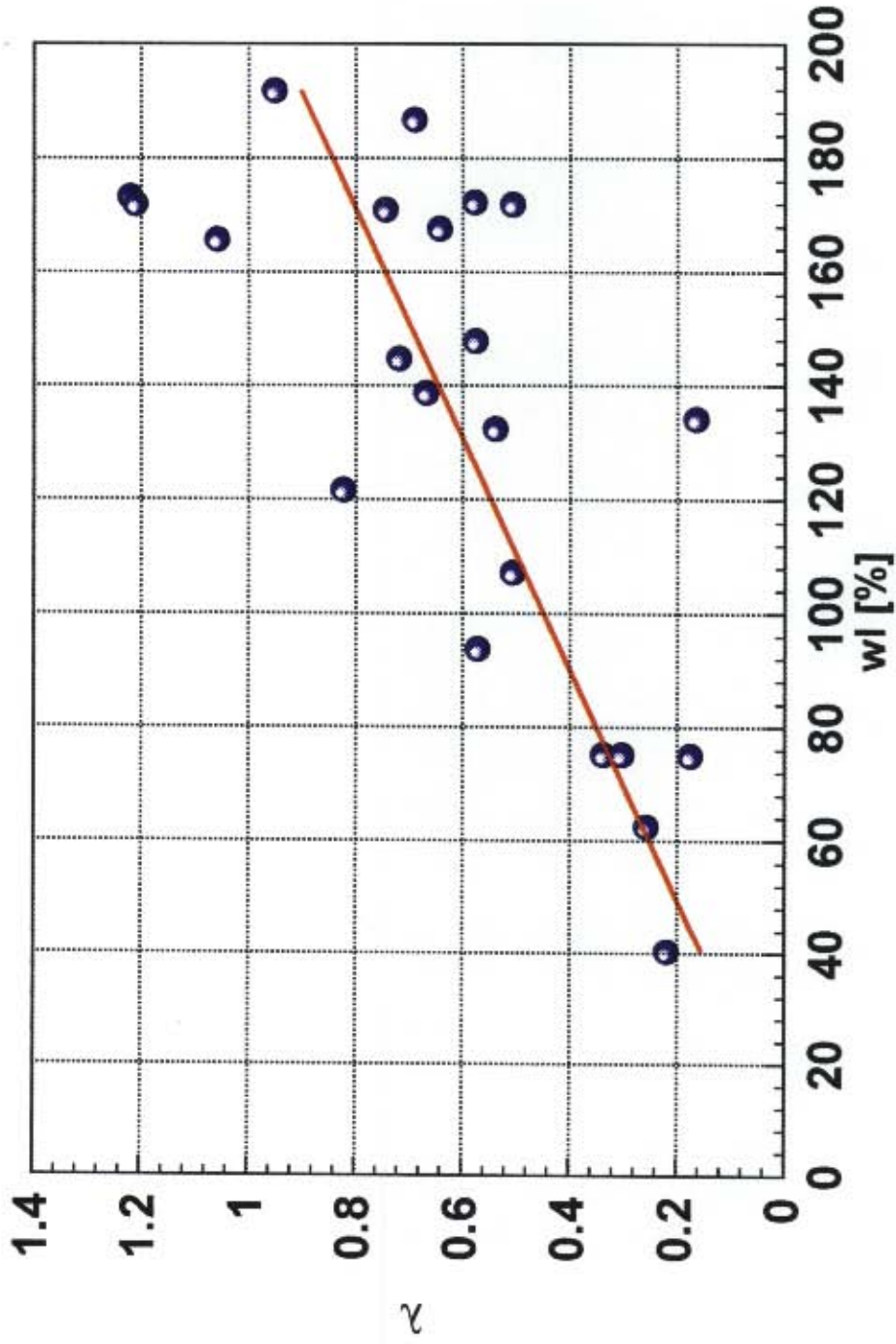


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.2

GRÁFICO DE CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO λ DE COMPRESIÓN ISOTRÓPICA Y EL LIMITE LÍQUIDO

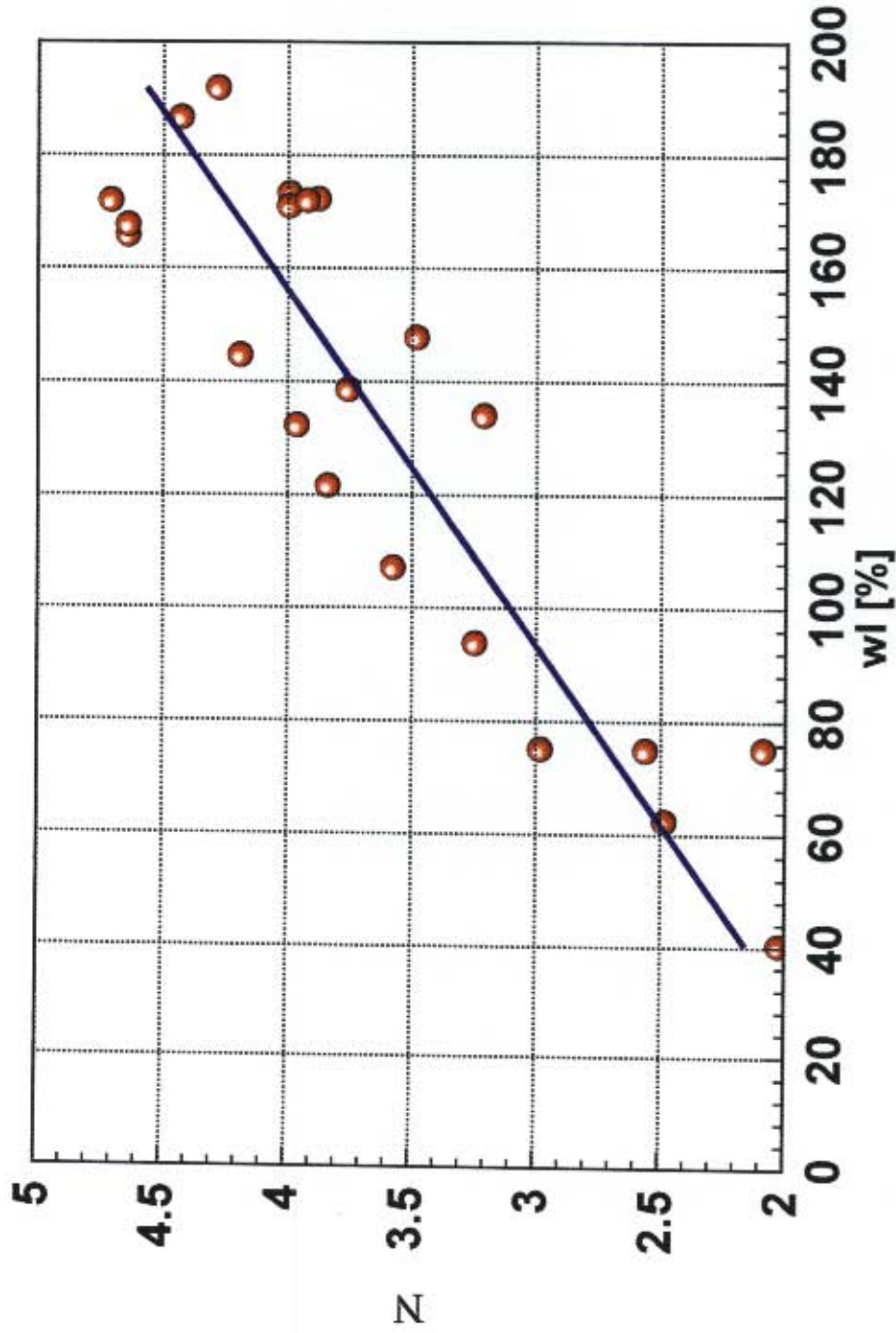


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.3

GRÁFICO DE CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO N DE COMPRESIÓN ISOTRÓPICA Y LIMITE LÍQUIDO

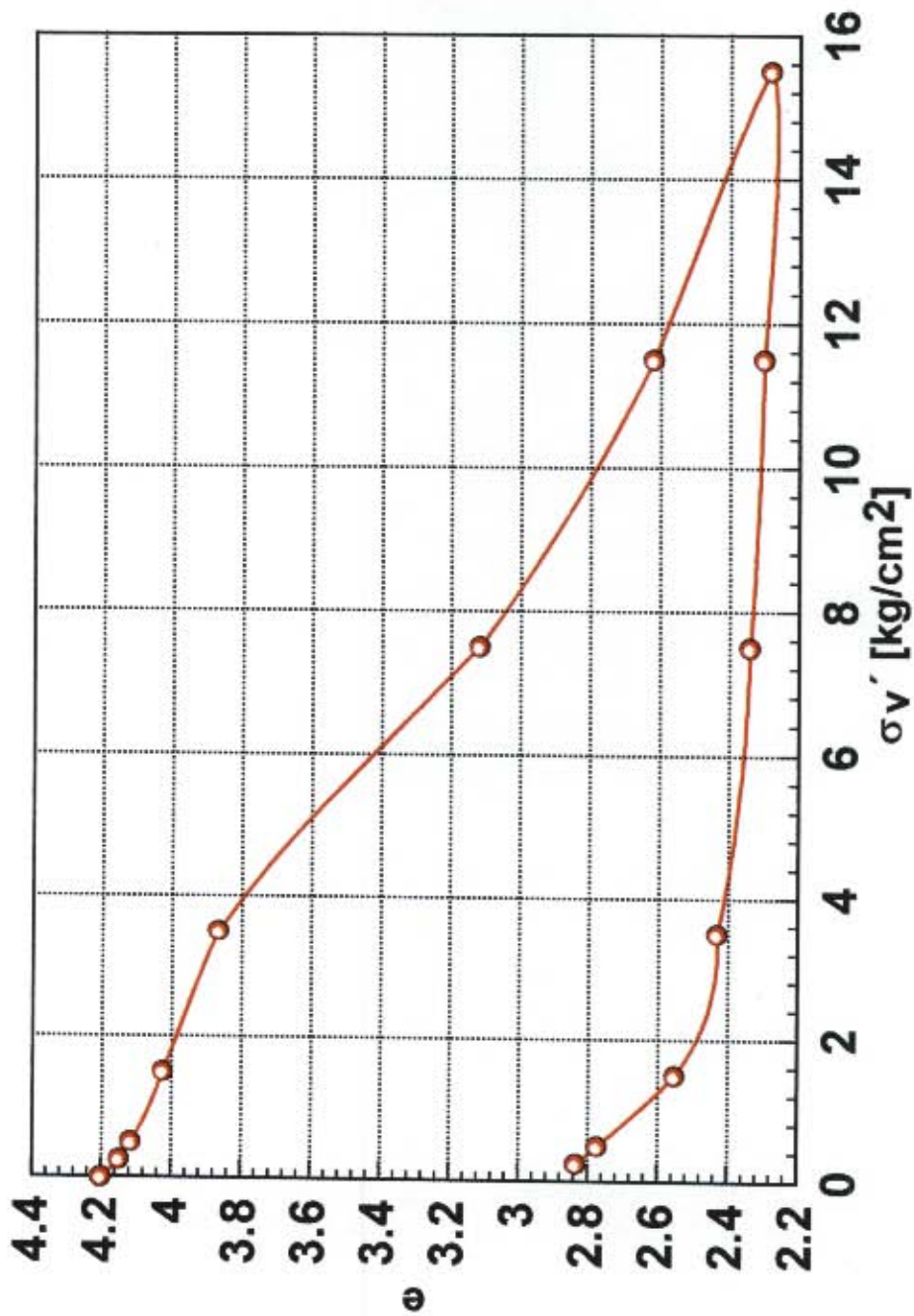


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.4

GRÁFICO DE COMPRESIÓN OEDOMÉTRICA EN PLANO ARITMÉTICO

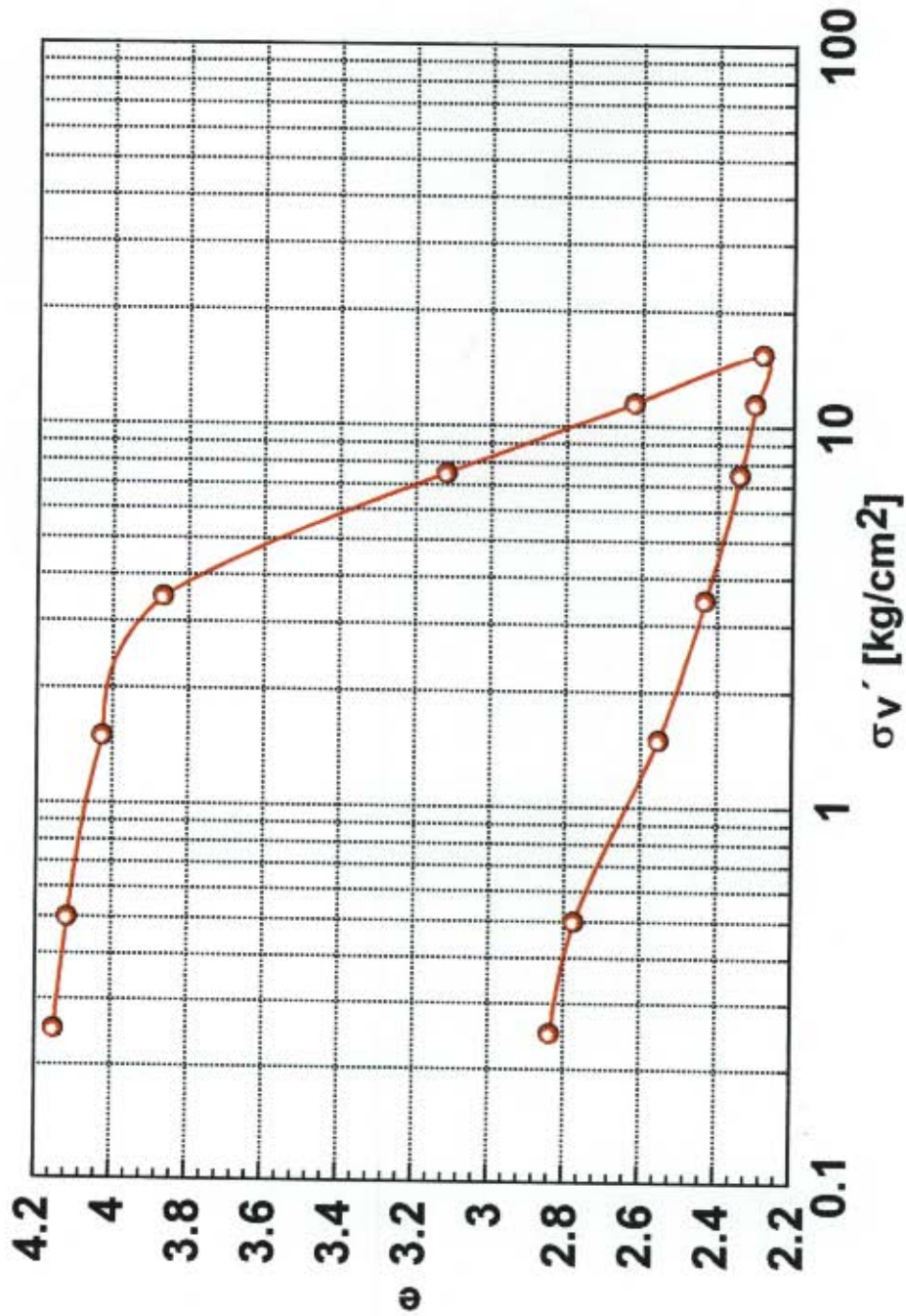


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.5

GRÁFICO DE COMPRESIÓN OEDOMÉTRICA EN PLANO LOGARÍTMICO

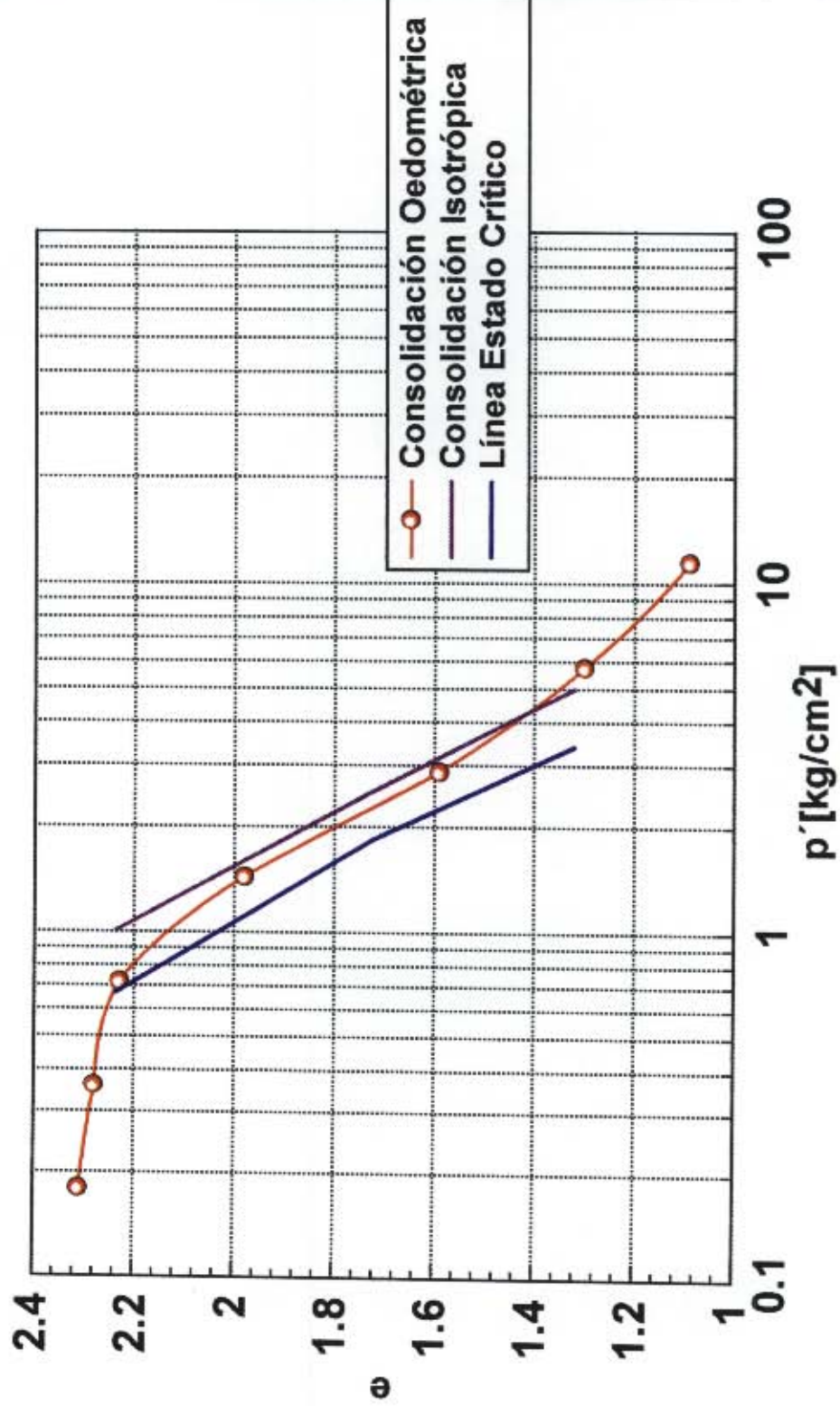


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.6

GRÁFICO DE SUPERPOSICIÓN COMPRESIÓN ISOTRÓPICA Y COMPRESIÓN OEDOMETRICA

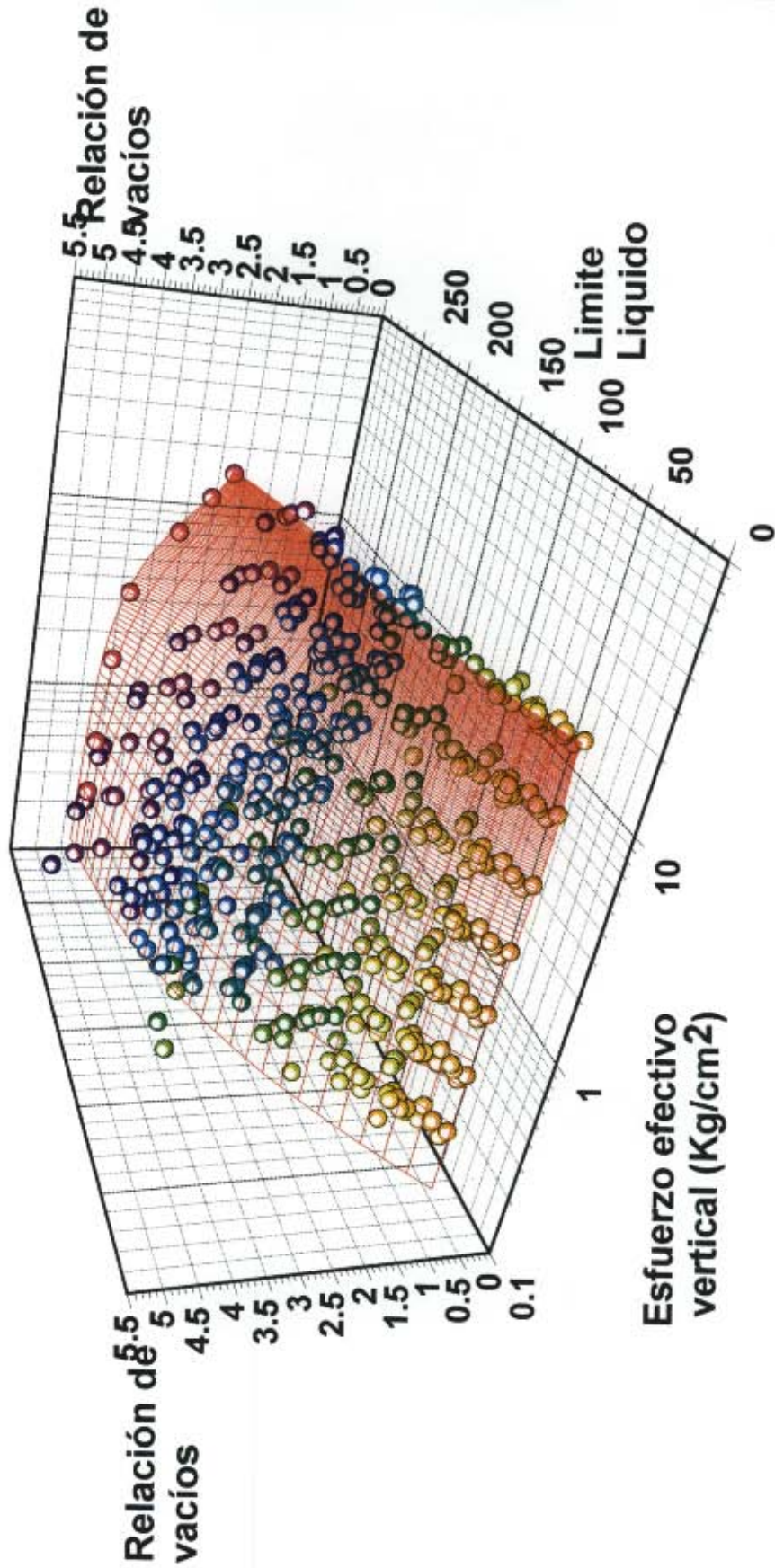


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.7

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONSOLIDACION OEDOMETRICA
EN FUNCION DEL LIMITE LIQUIDO

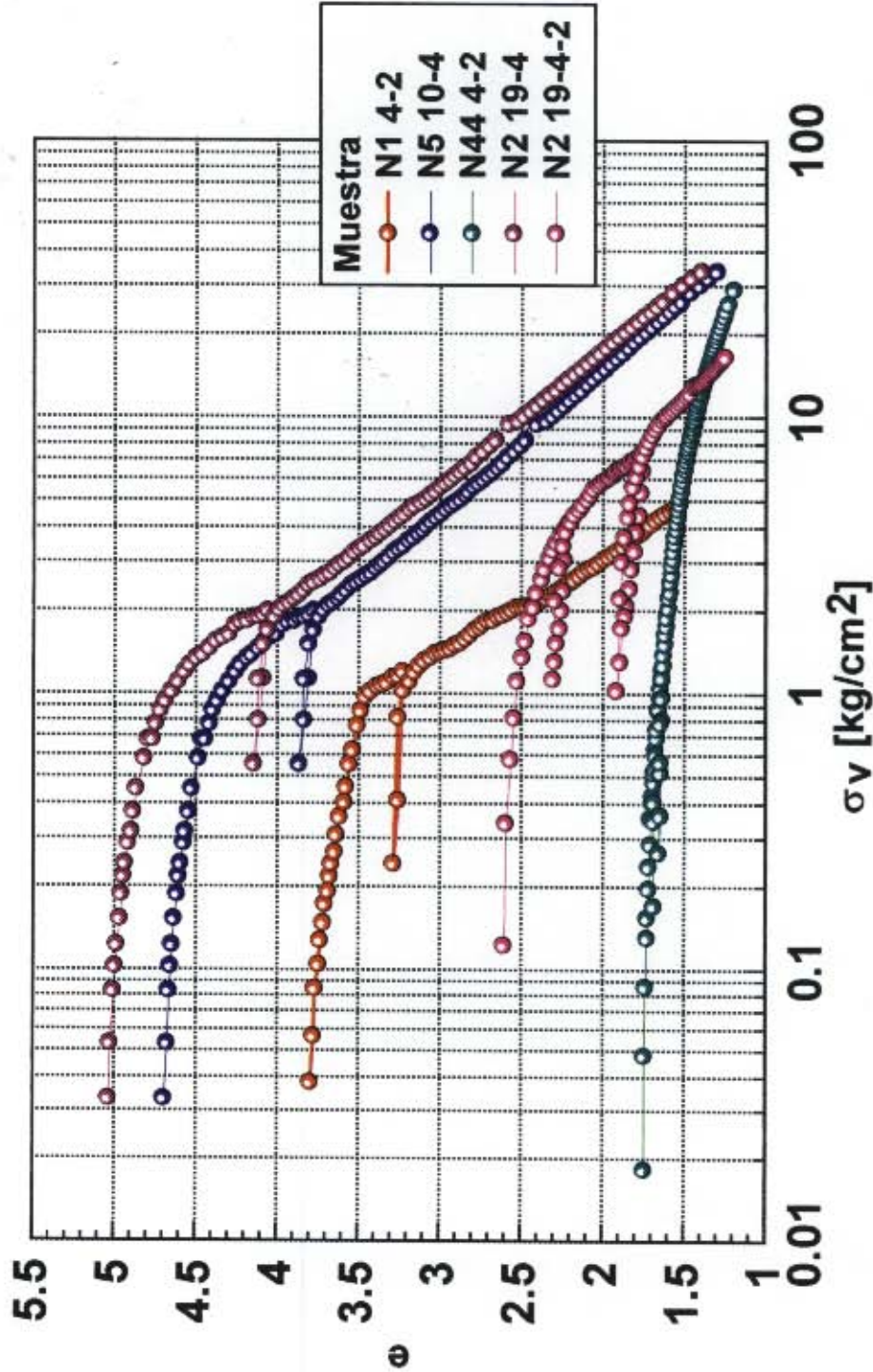


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.8

GRÁFICO DE COMPRESIÓN UNIDIMENSIONAL CON VELOCIDAD DE CARGA CONTROLADA

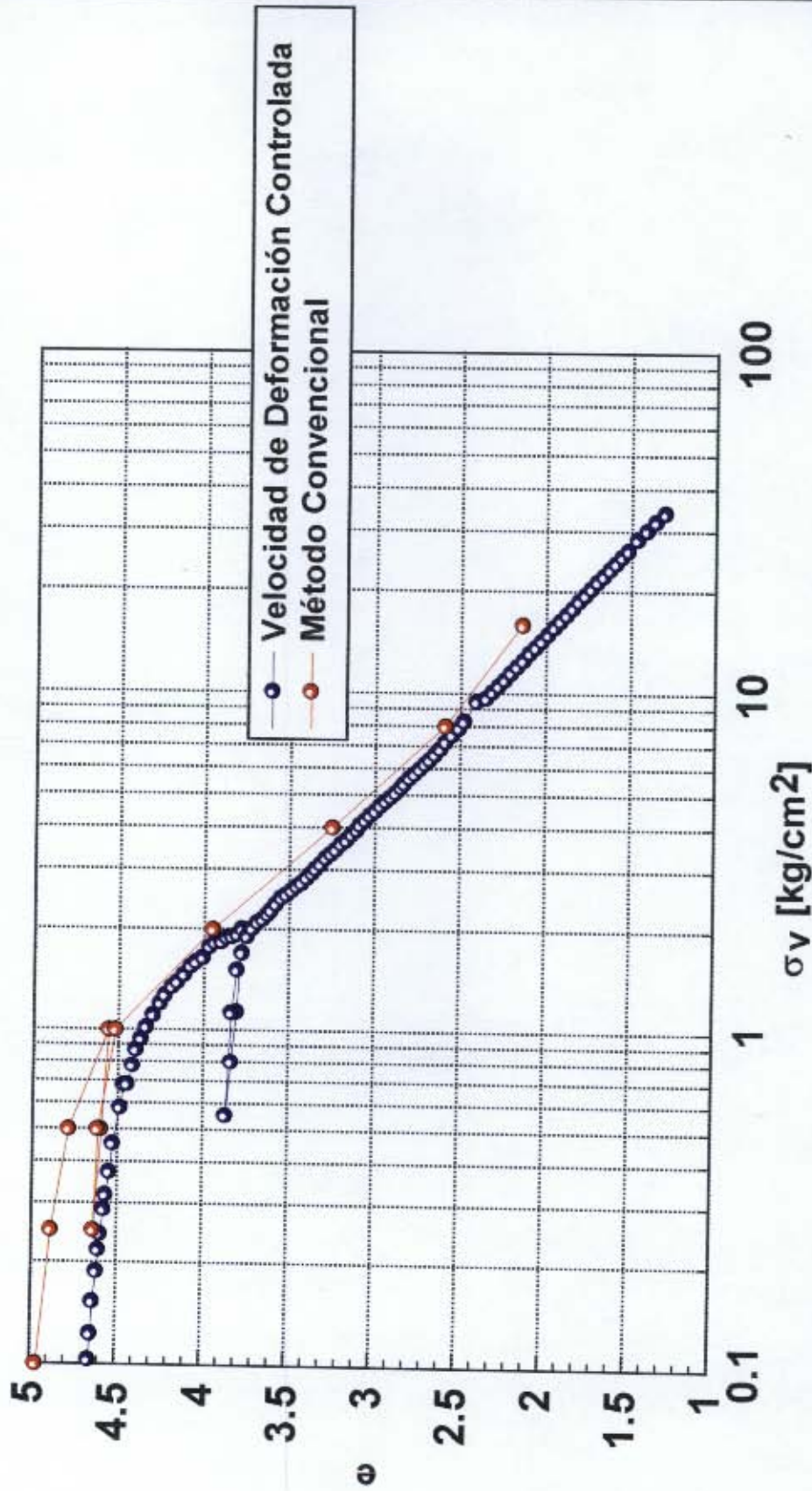


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.9

GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS PARA COMPRESIÓN UNIDIMENSIONAL

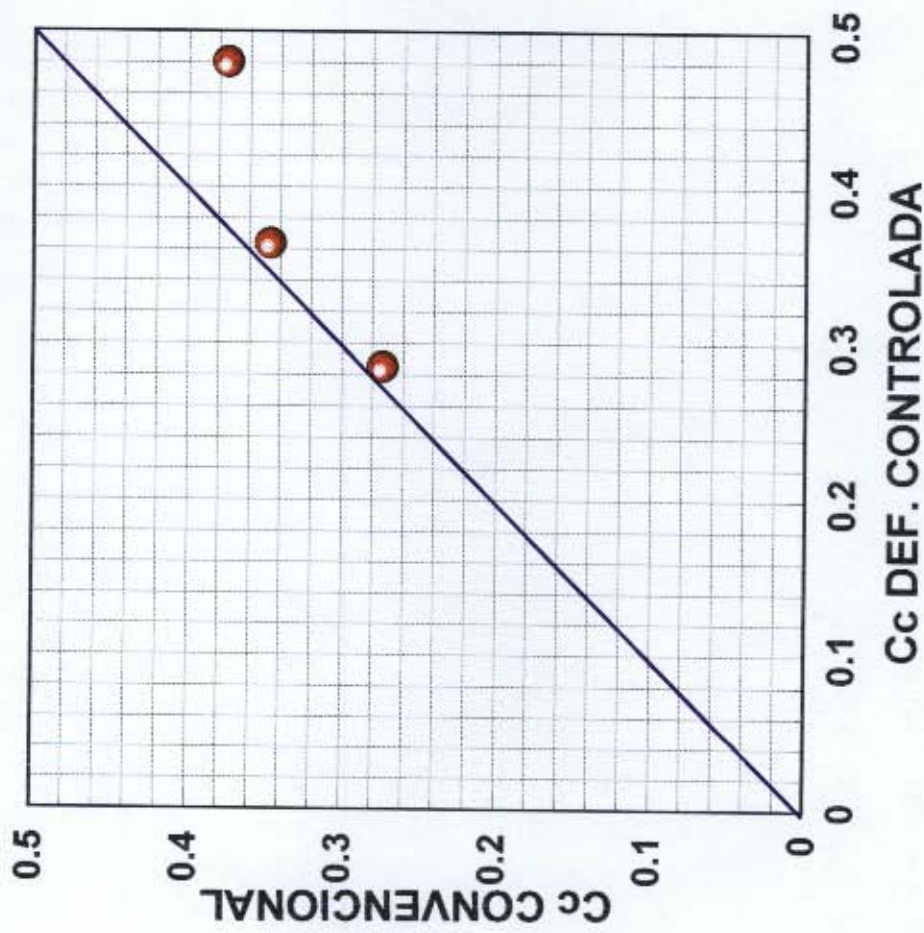


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.10

**COEFICIENTES DE COMPRESIBILIDAD COMPARACIÓN ENTRE
LOS METODOS CONVENCIONAL Y DE DEFORMACIÓN CONTROLADA**

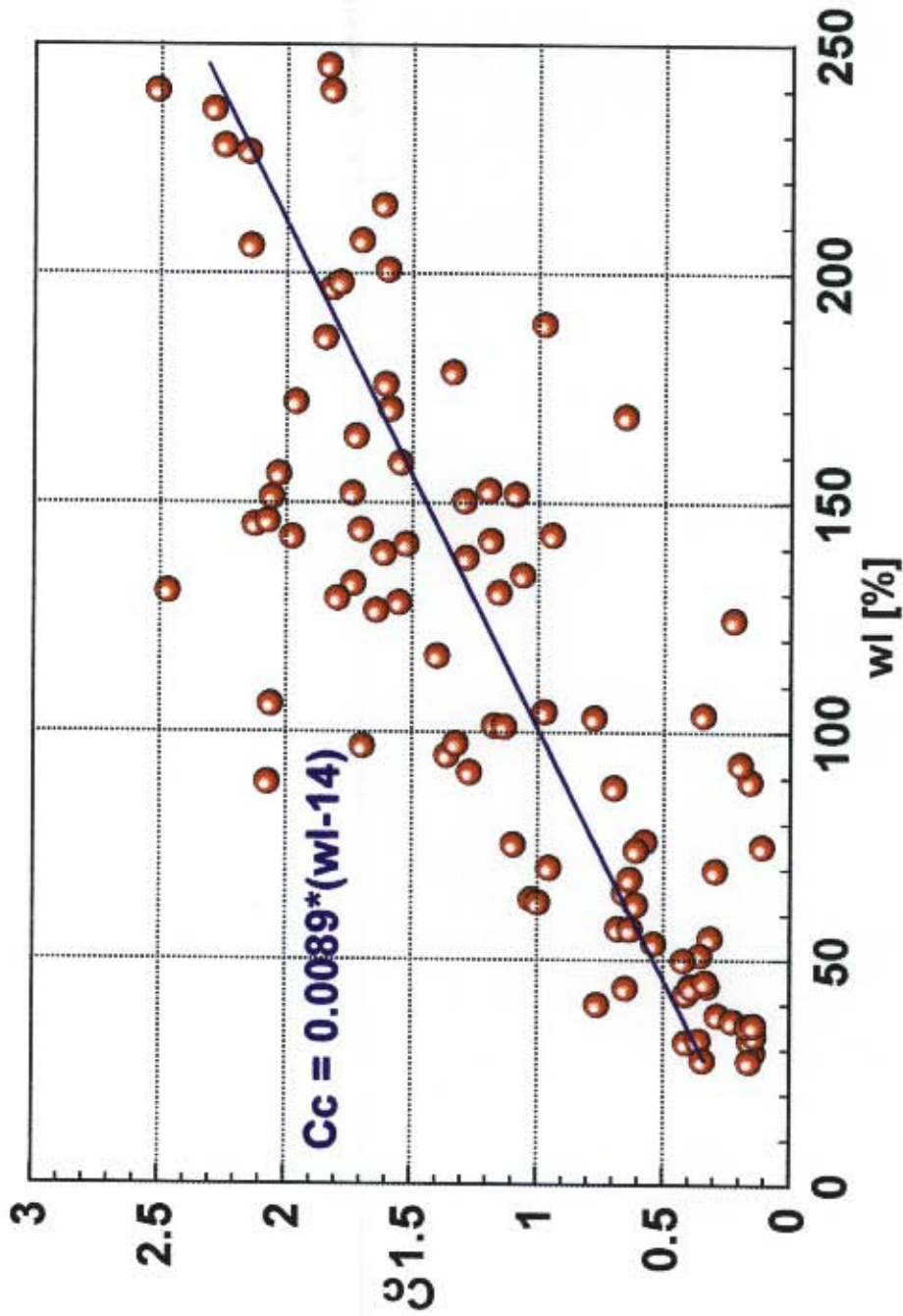


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.11

GRÁFICO DE COEFICIENTE DE COMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL LIMITE LÍQUIDO

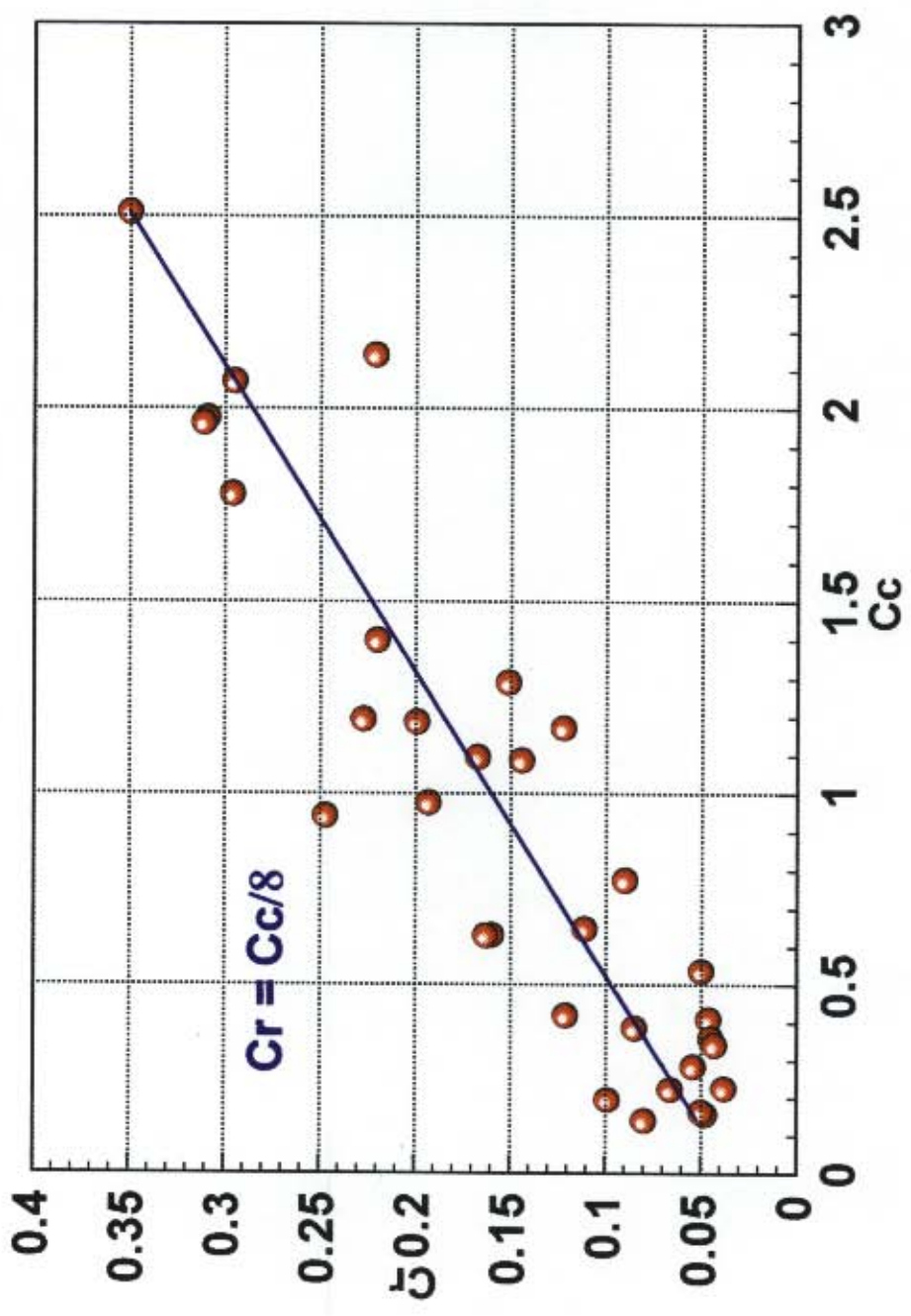


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.12

GRÁFICO DE COEFICIENTE DE RECOMPRESIÓN EN FUNCIÓN DEL
COEFICIENTE DE COMPRESIÓN

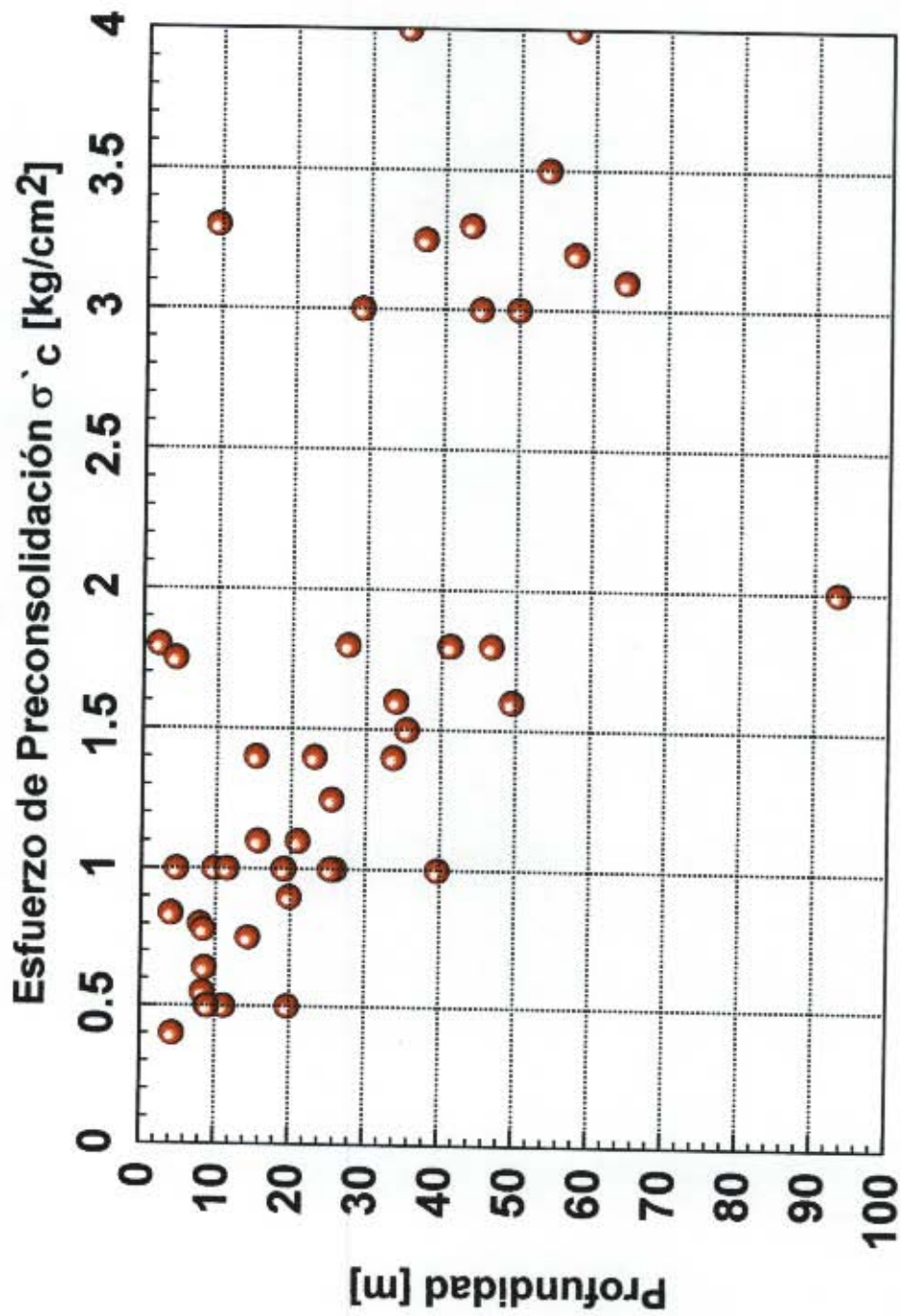


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.13

GRÁFICO DE ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD EN LA ZONA BLANDA

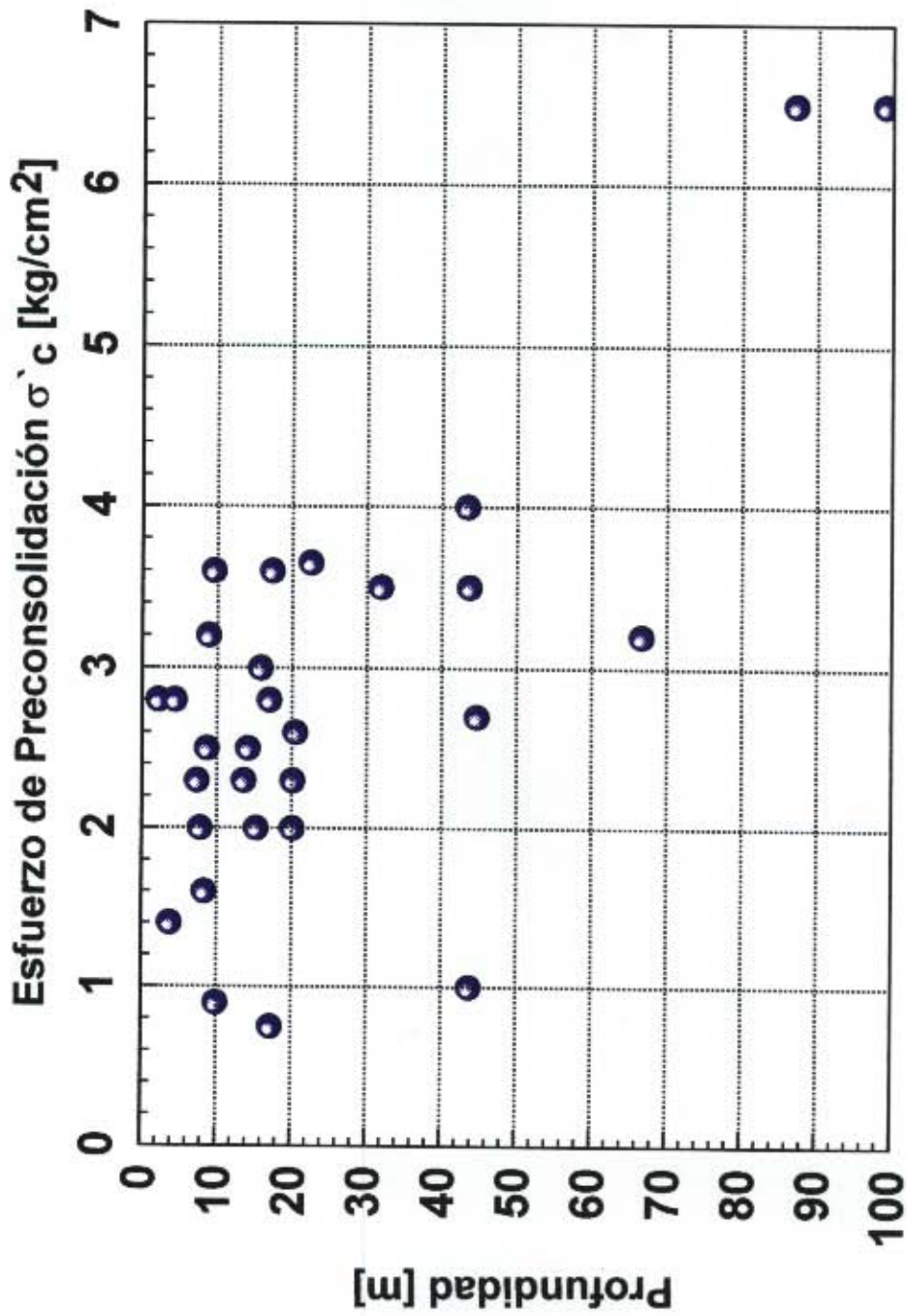


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.14

GRÁFICO DE ESFUERZO DE PRECONSOLIDACIÓN EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD EN LA ZONA DURA

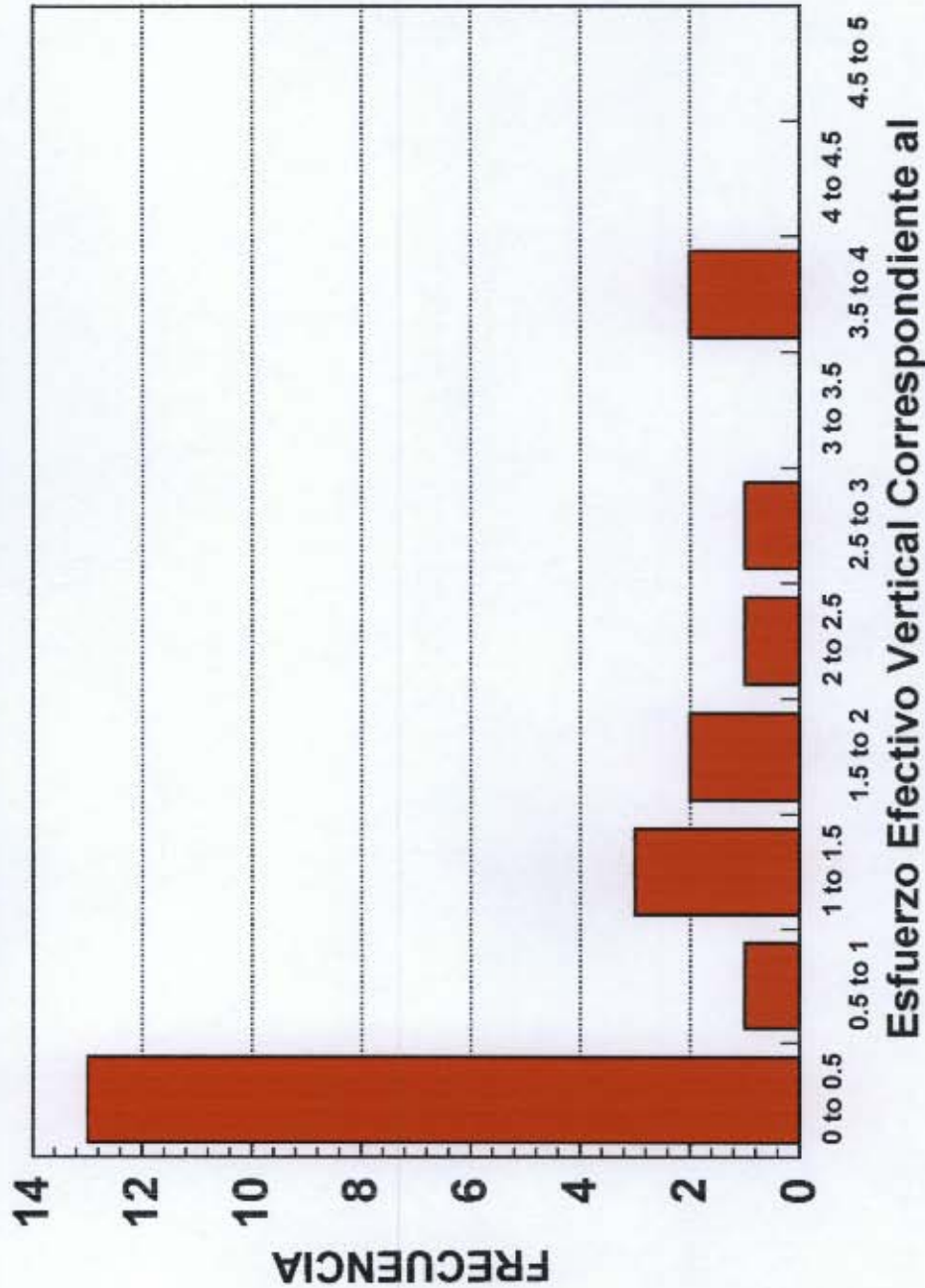


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.15

**GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL
CORRESPONDIENTE AL LÍMITE LÍQUIDO**



Límite Líquido [kg/cm²]

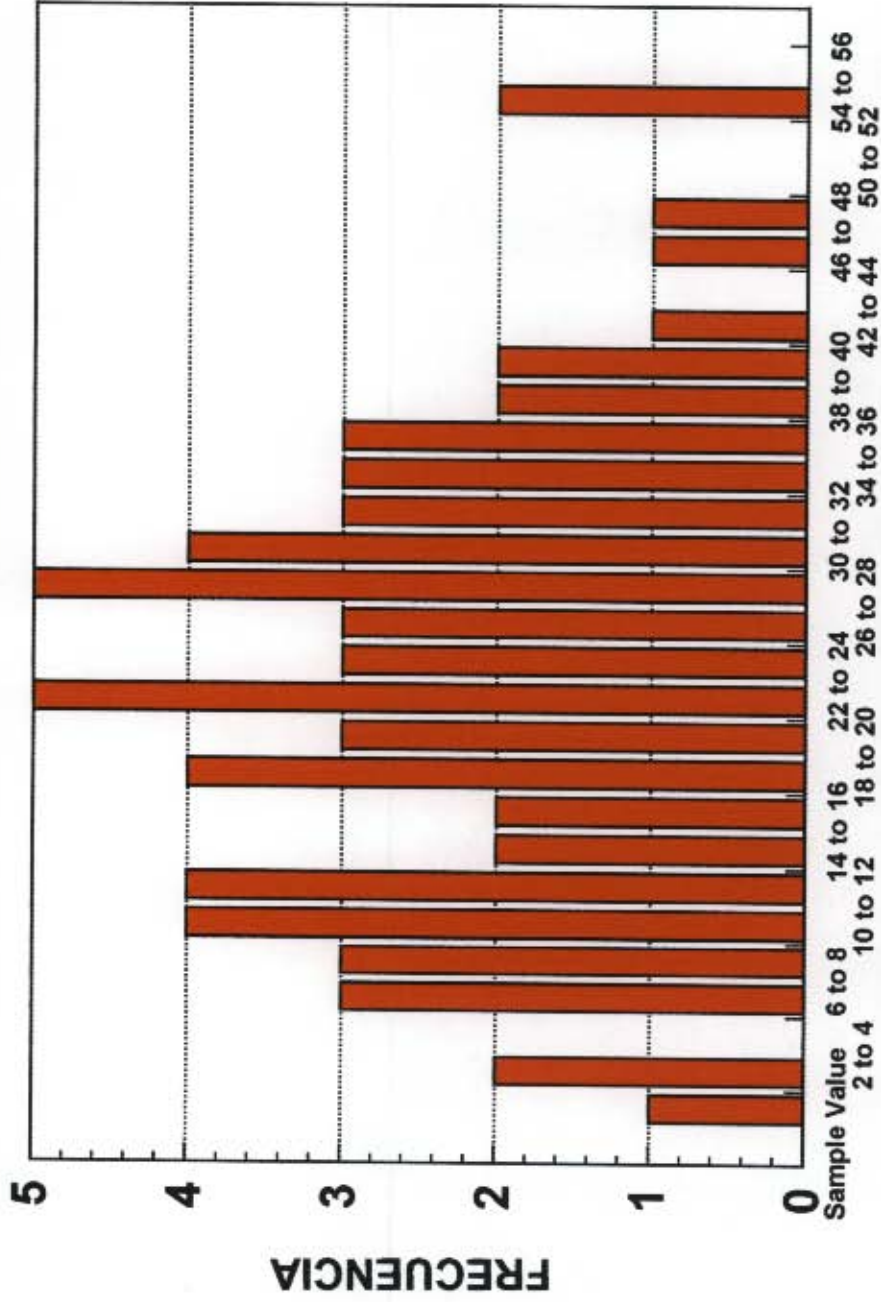


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.16

**GRÁFICO DE HISTOGRAMA DEL ESFUERZO EFECTIVO VERTICAL
CORRESPONDIENTE AL LÍMITE PLÁSTICO**



Esfuerzo Efectivo Vertical Correspondiente al

Límite Plástico [kg/cm²]



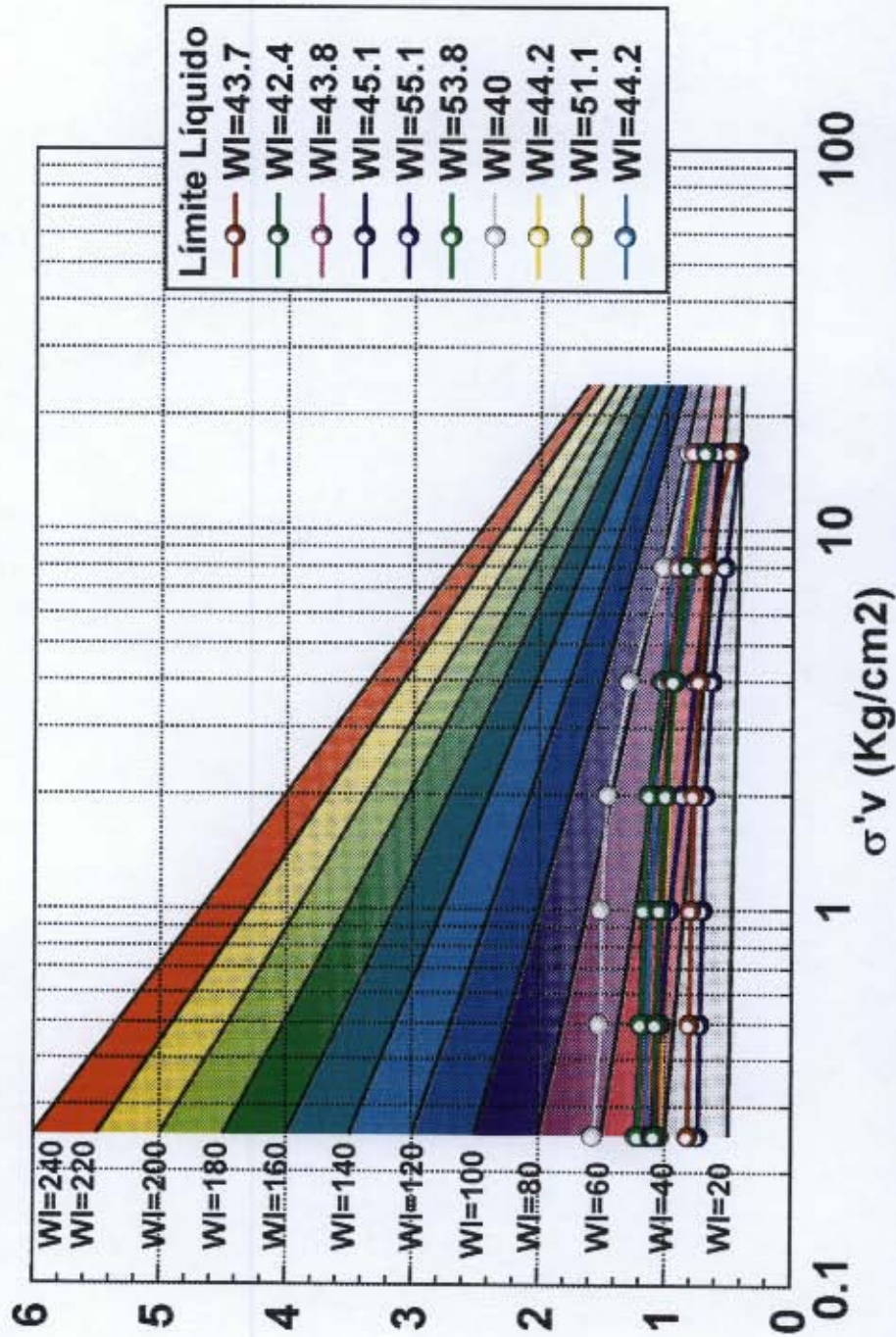
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.17

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD 40<WI<60 (Gs=2.5)

Relación de vacíos



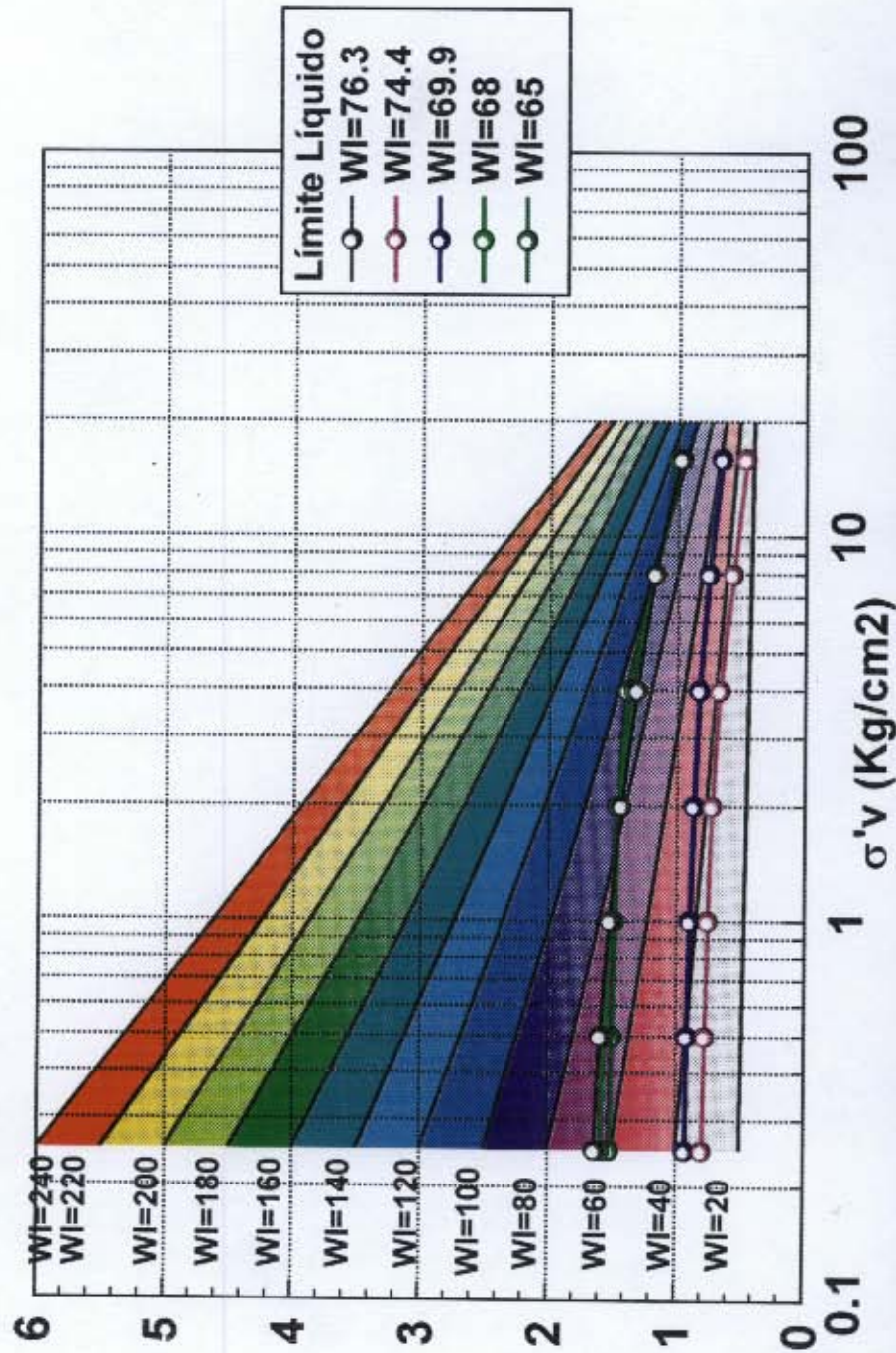
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.19

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD 60<WI<80 (Gs=2.5)

Relación de vacíos



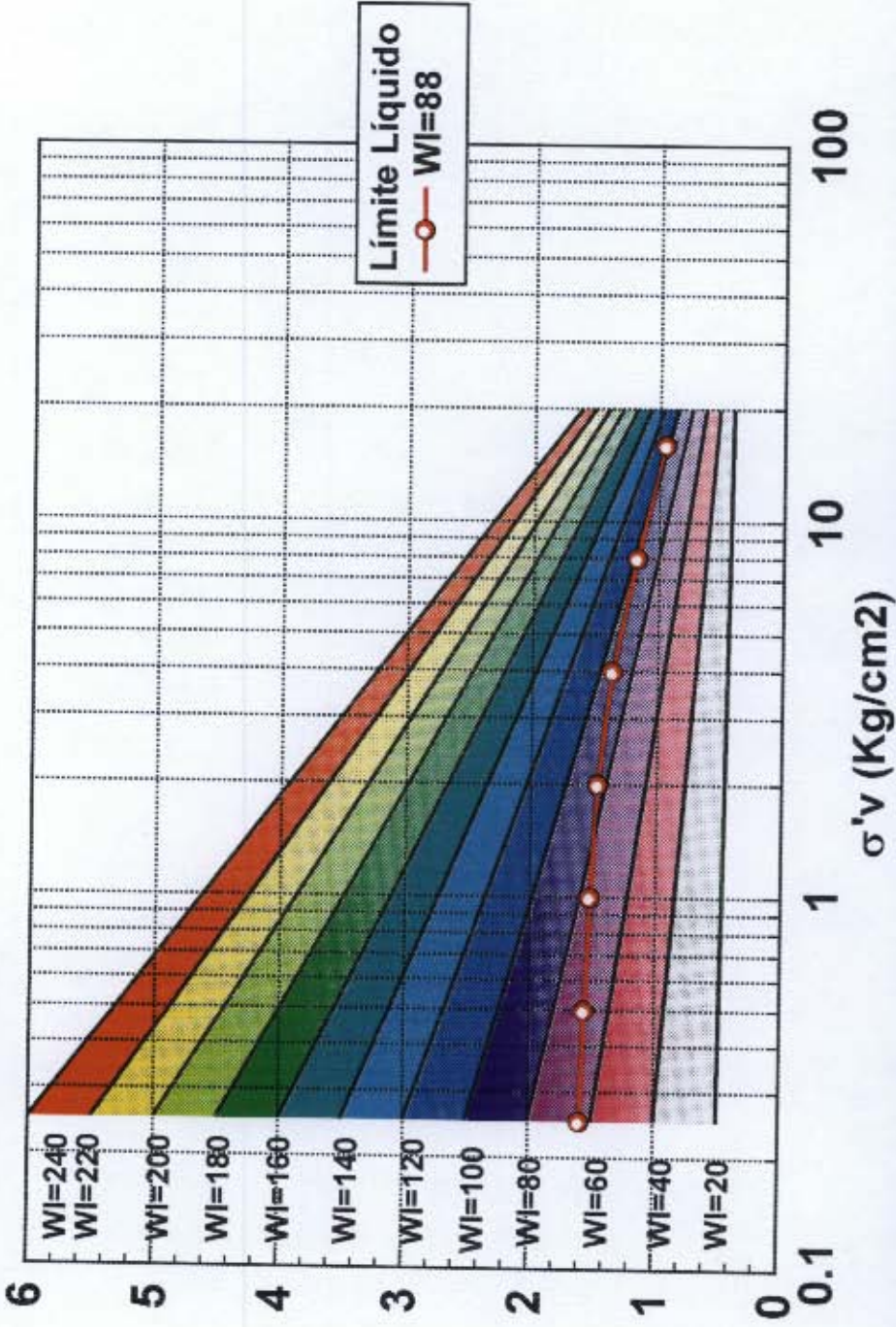
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.20

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD $80 < WI < 100$ ($G_s = 2.5$)

Relación de vacíos



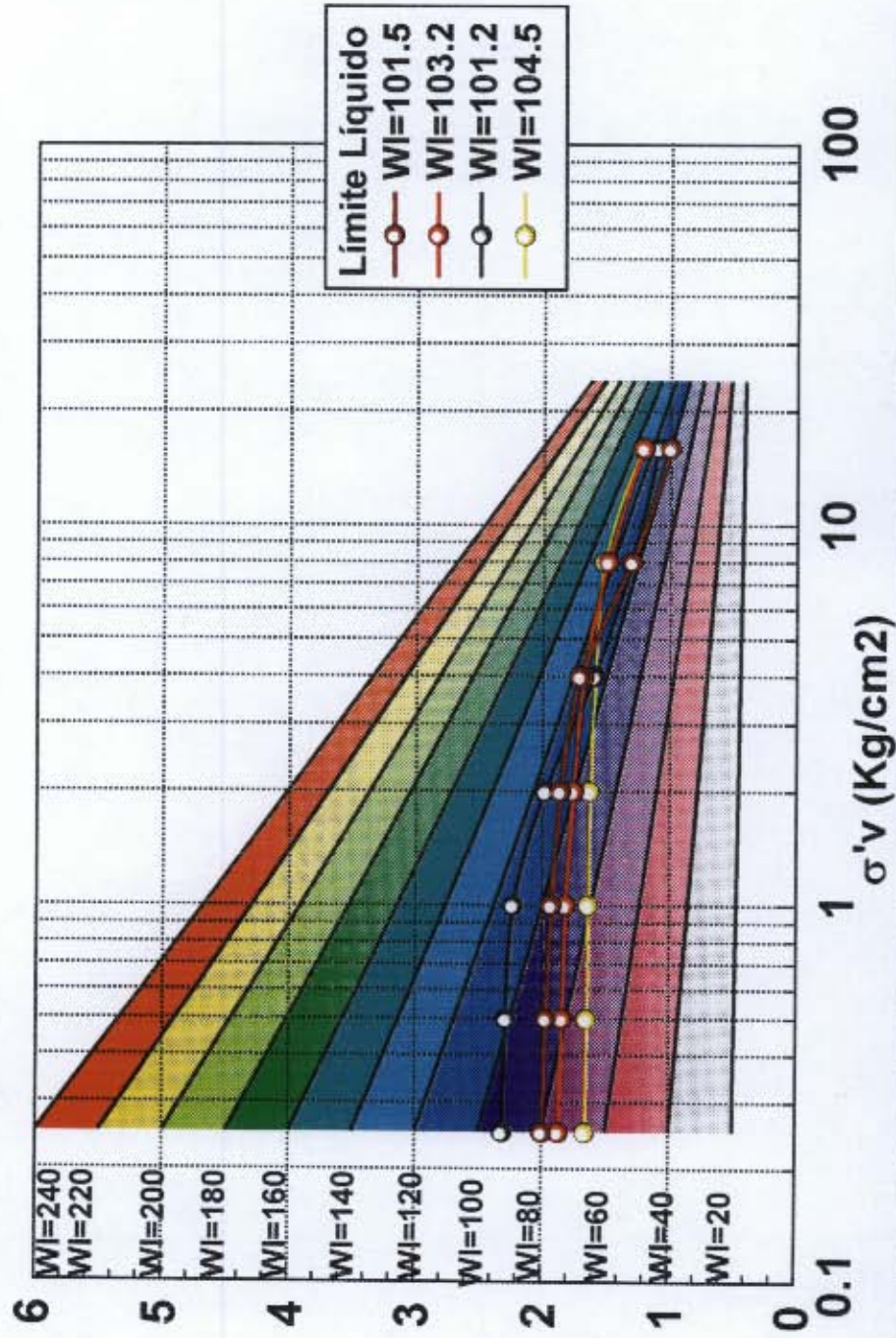
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.21

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD 100 < WI < 120 (Gs=2.5)

Relación de vacíos



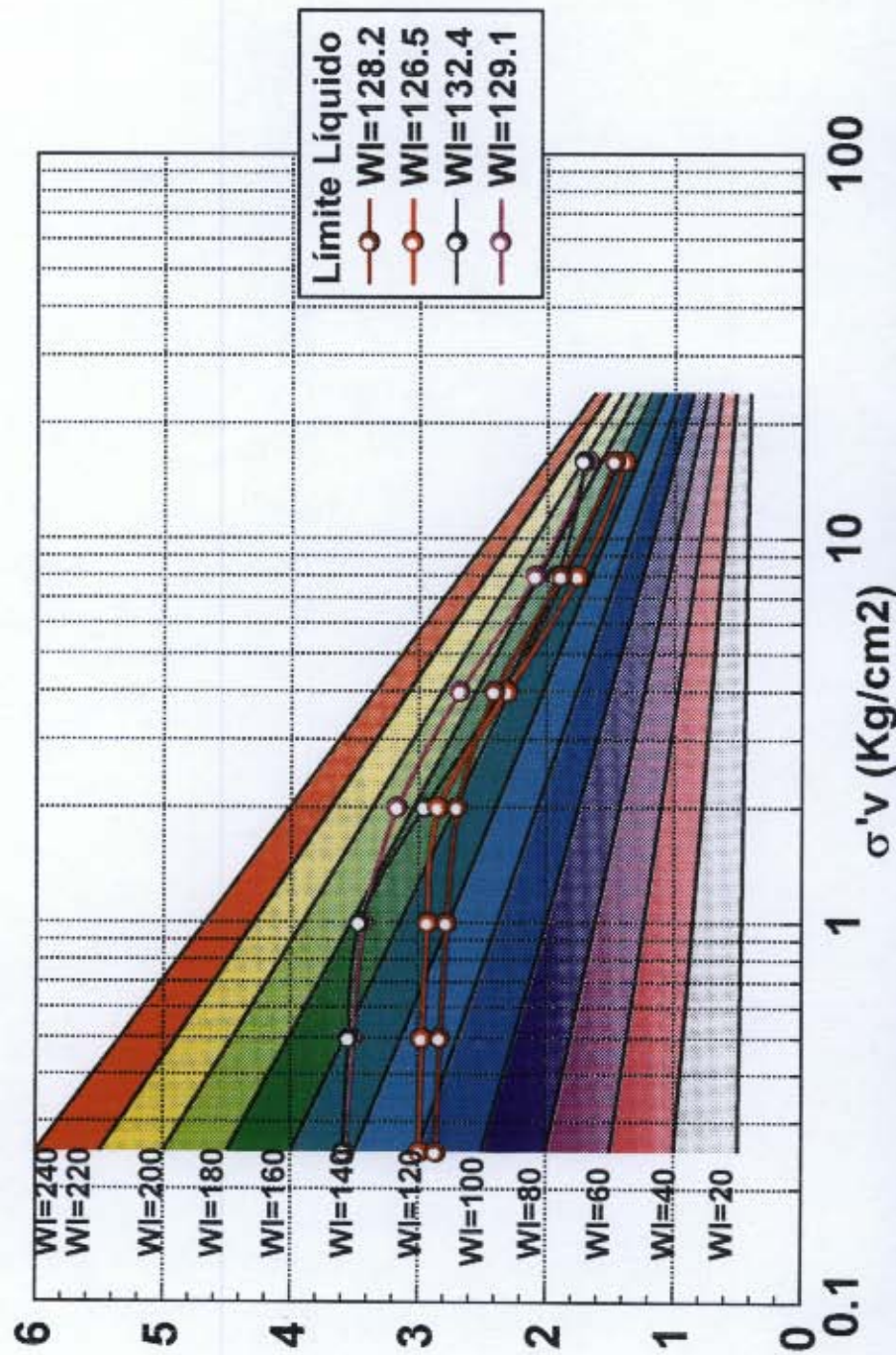
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.22

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD 120 <math>WI < 140</math> ($G_s = 2.5$)

Relación de vacíos



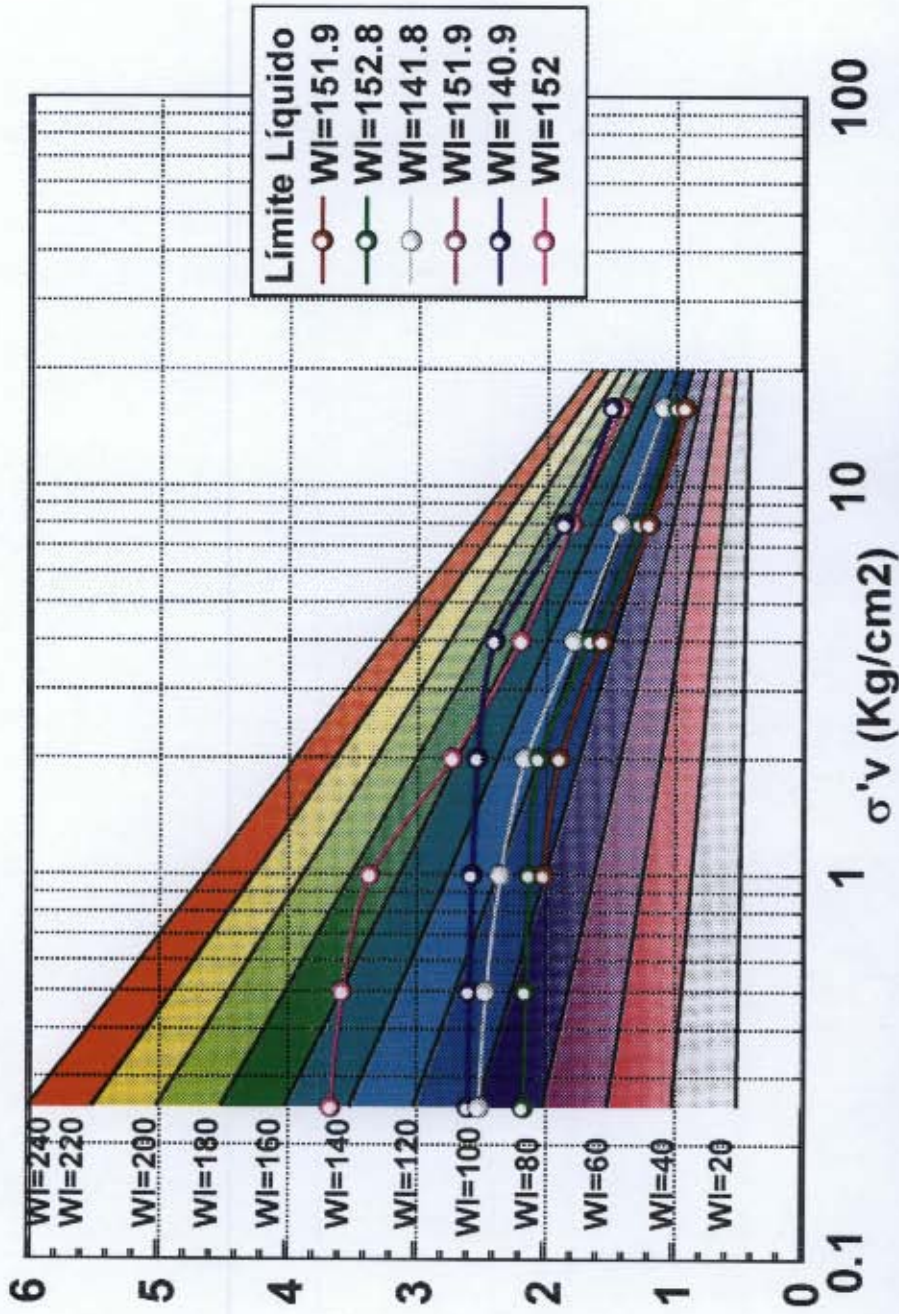
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.23

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD $140 < WI < 160$ ($G_s = 2.5$)

Relación de vacíos



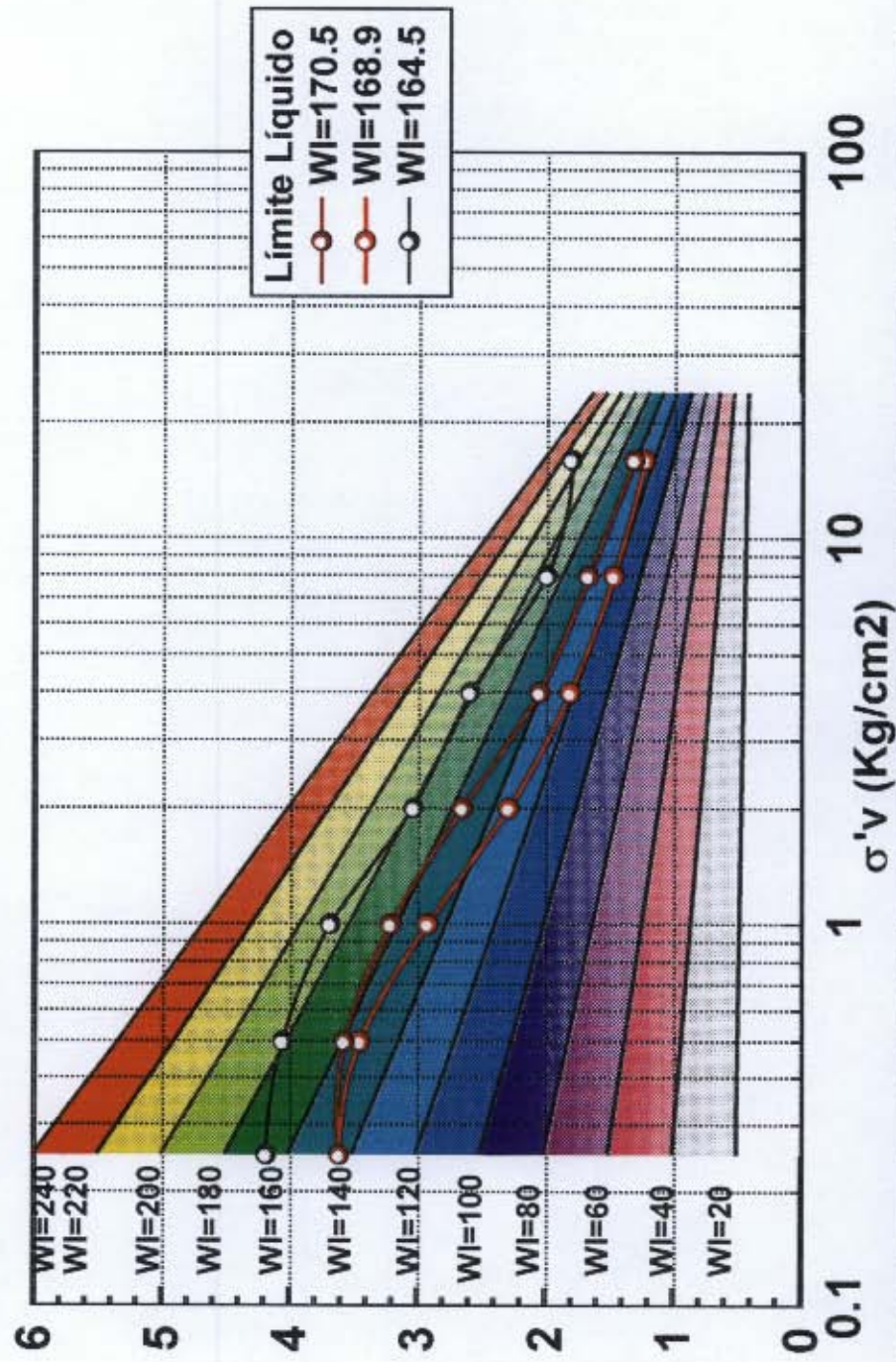
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.24

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD 160 < WI < 180 (Gs=2.5)

Relación de vacíos



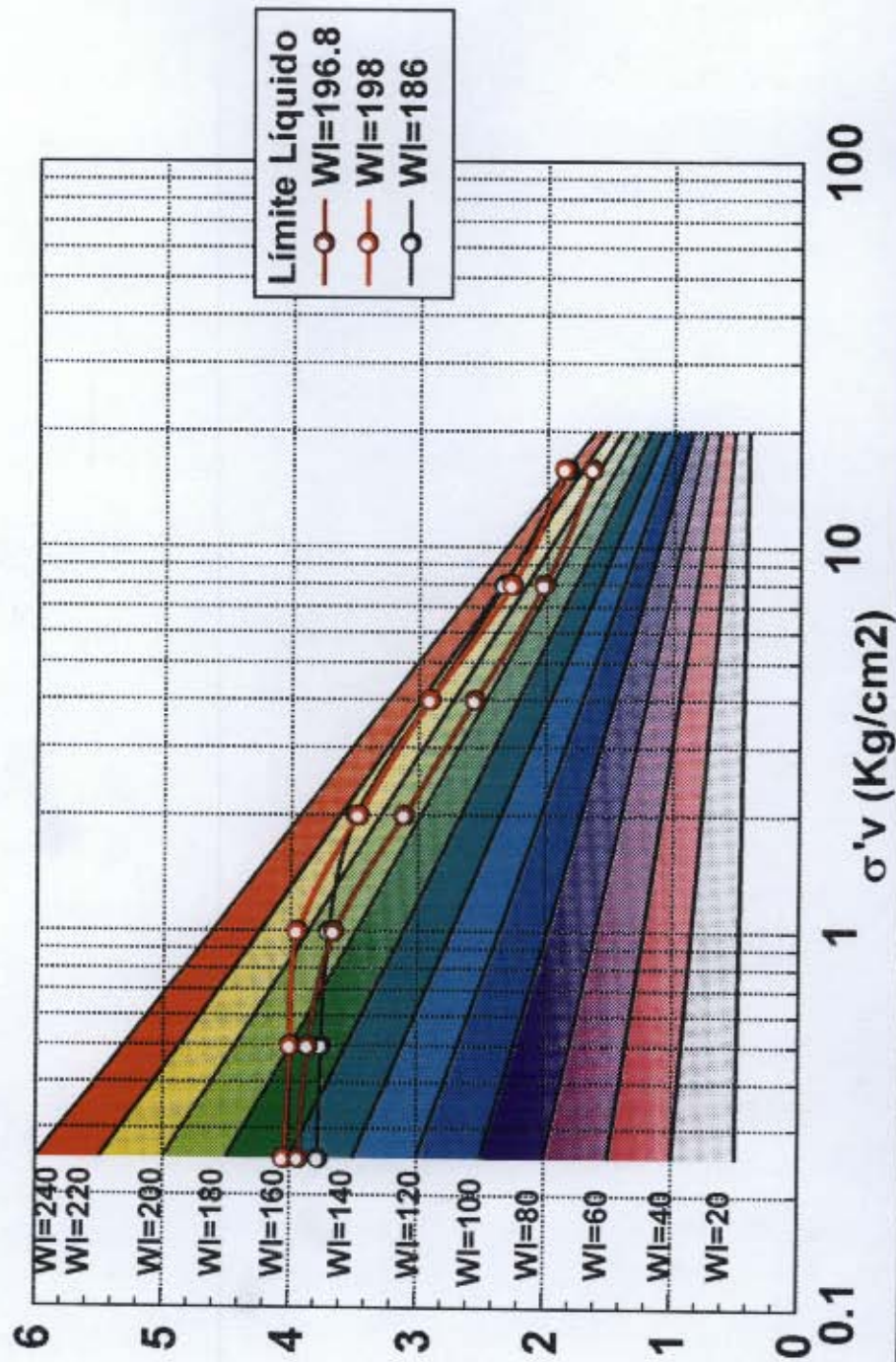
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.25

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD 180<WI<200 (Gs=2.5)

Relación de vacíos



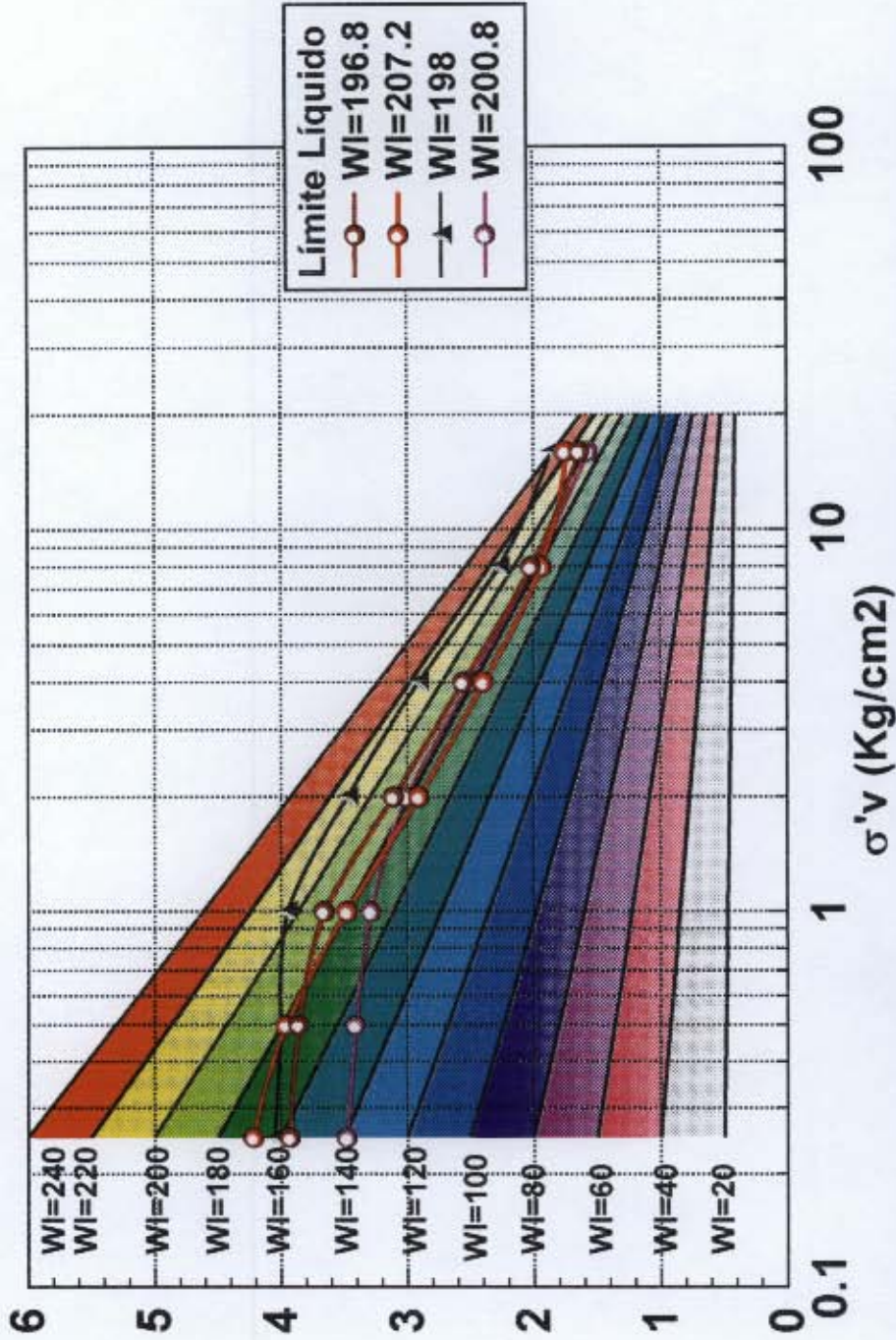
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.26

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD $200 < WI < 220$ ($G_s = 2.5$)

Relación de vacíos



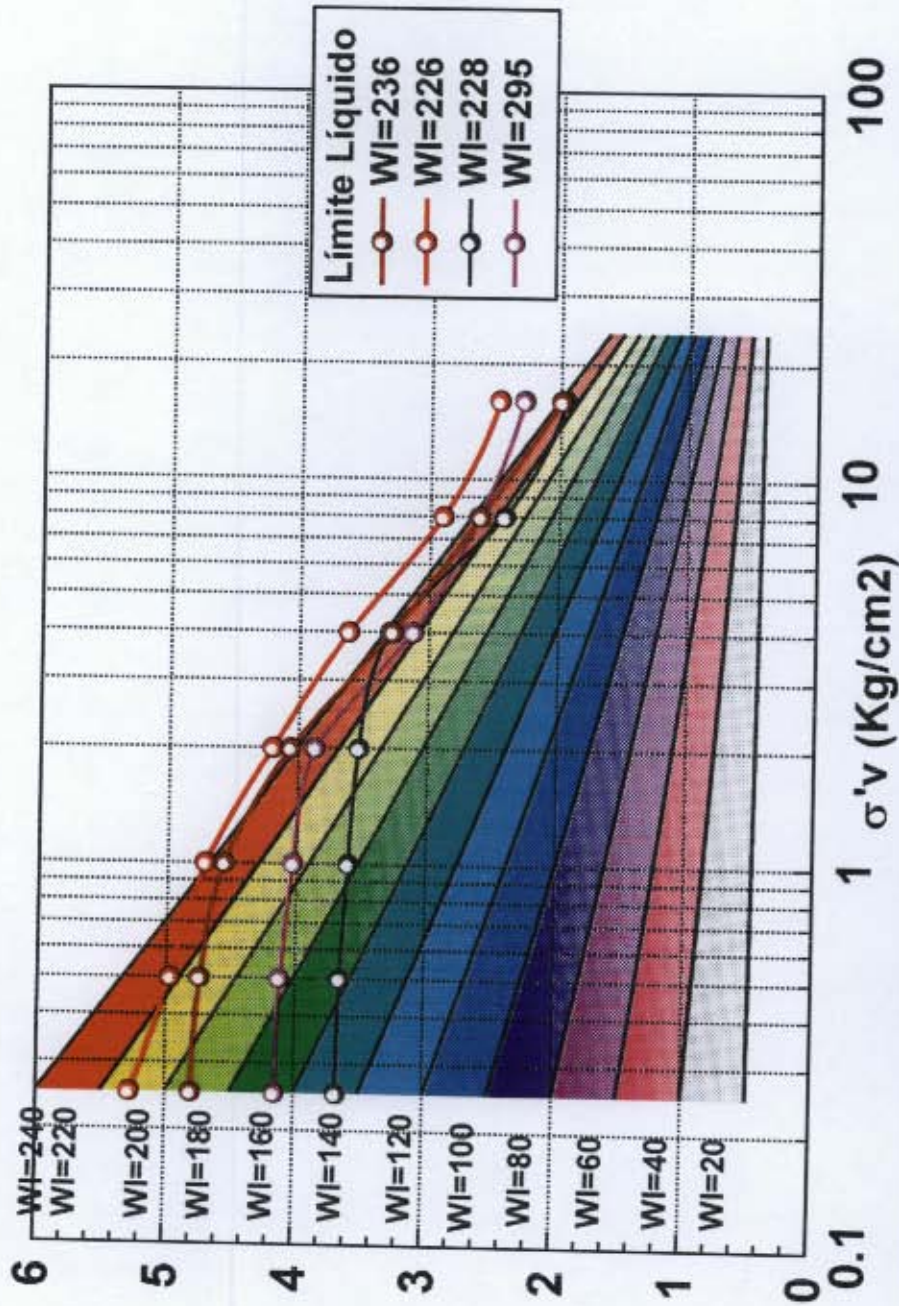
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.27

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD $220 < WI < 240$ ($G_s = 2.5$)

Relación de vacíos



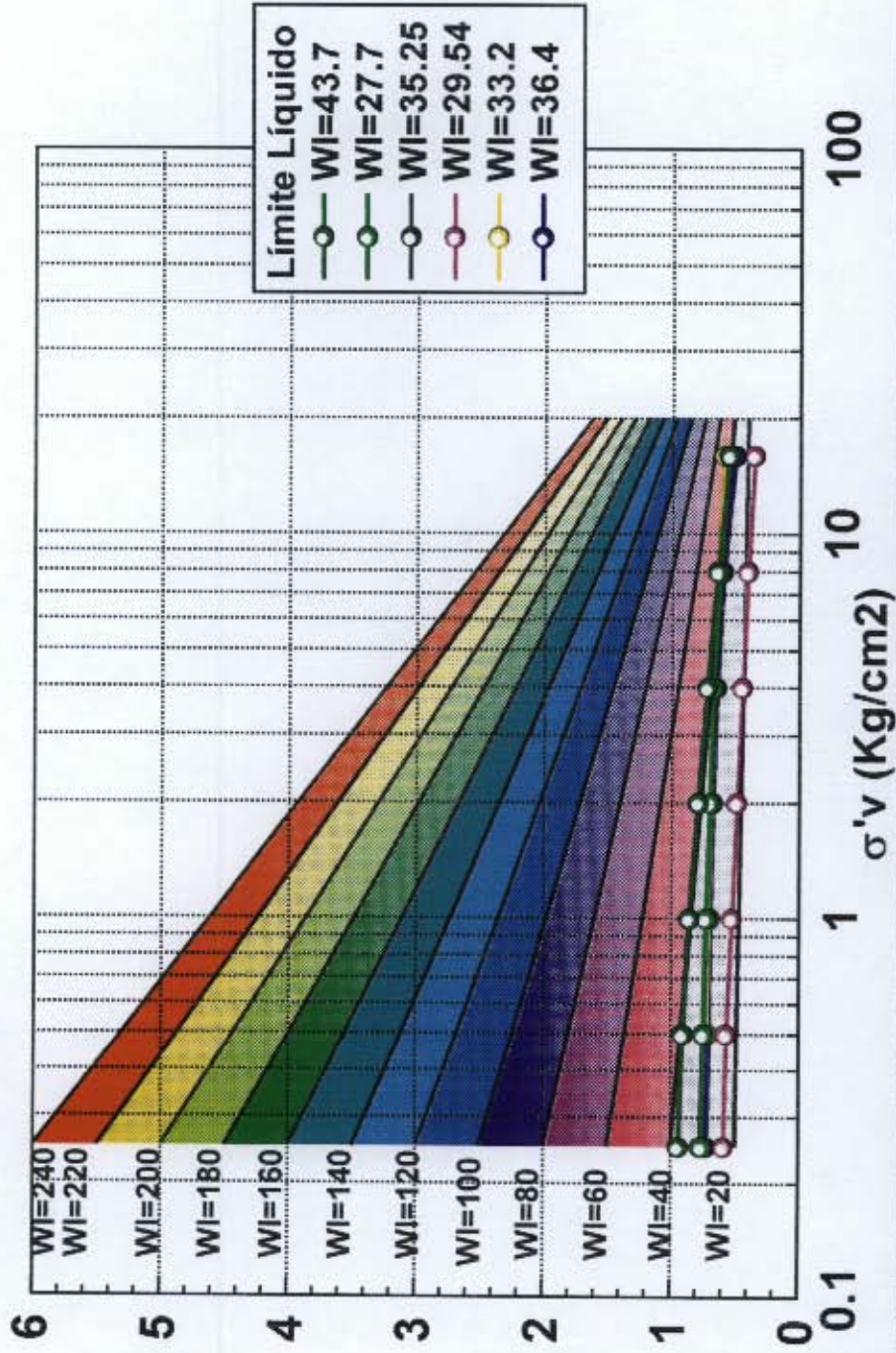
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 4.28

GRAFICAS DE CONSOLIDACION COMPARADAS CON EL
 MODELO DE COMPRESIBILIDAD $20 < WI < 40$ ($G_s = 2.5$)

Relación de vacíos

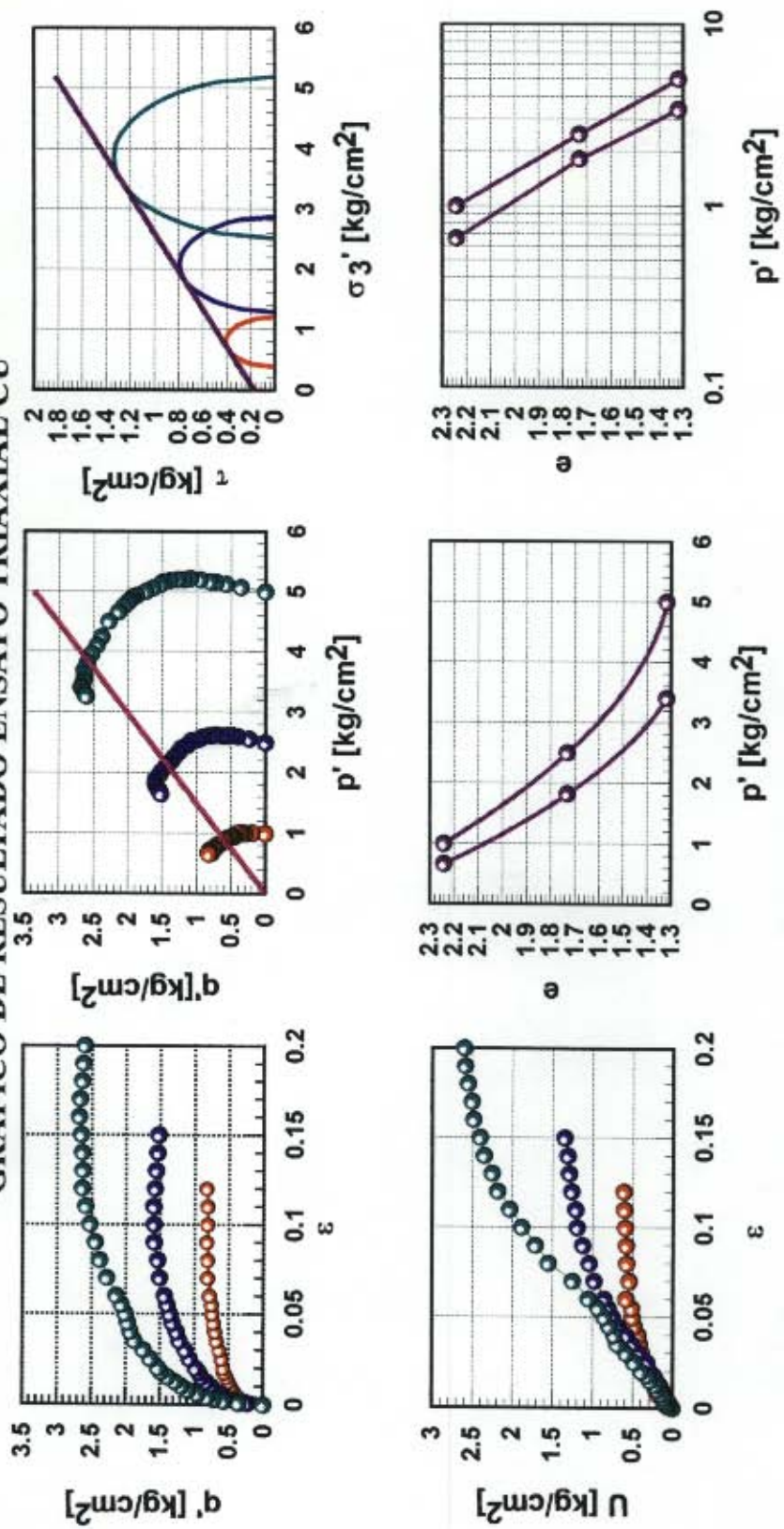


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura: 4.18

GRÁFICO DE RESULTADO ENSAYO TRIAXIAL CU



Muestra n14-18
 Prof 41.5 m

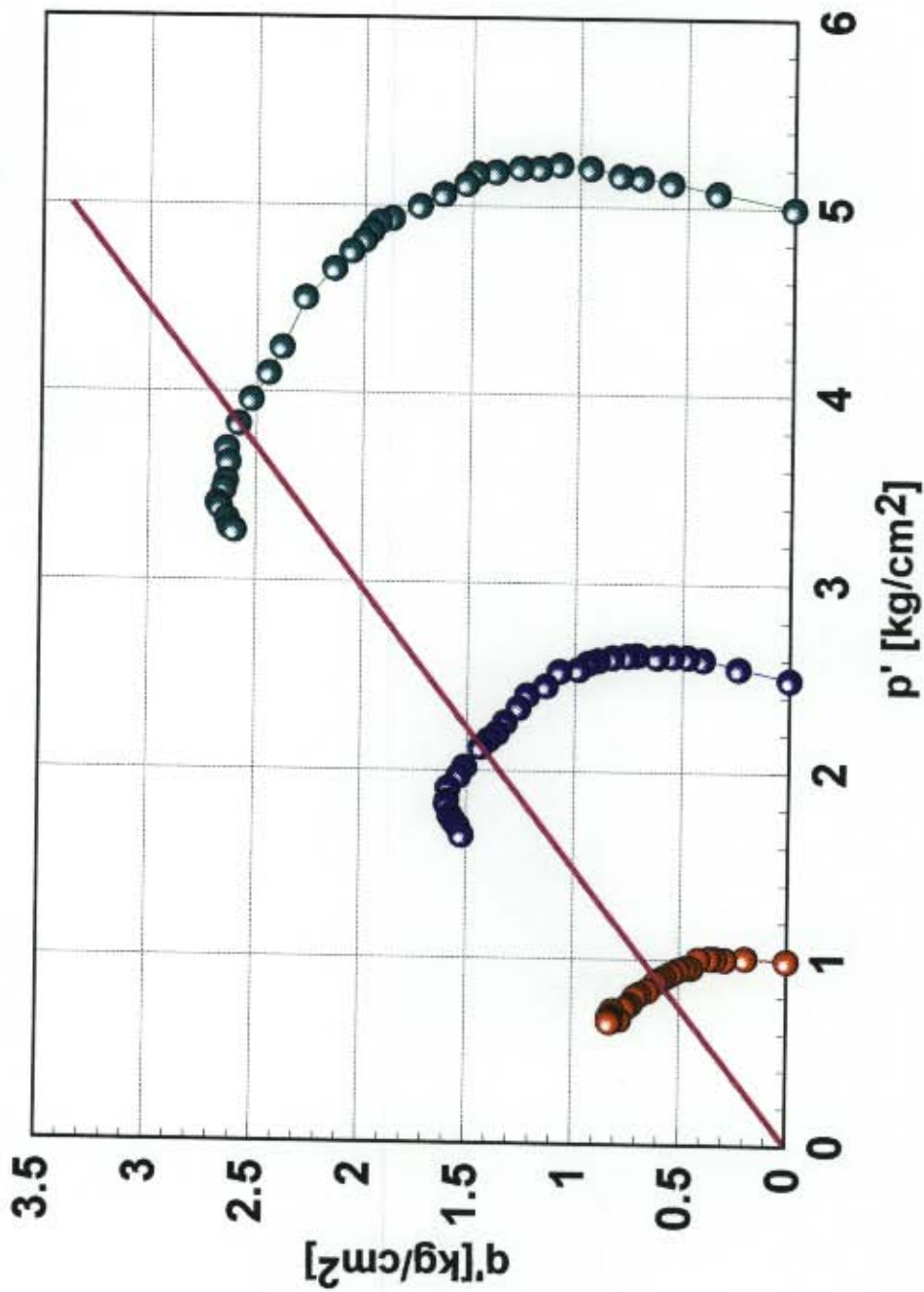


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 5.1

GRÁFICO DE LÍNEA DE ESTADO CRÍTICO EN PLANO q' p'

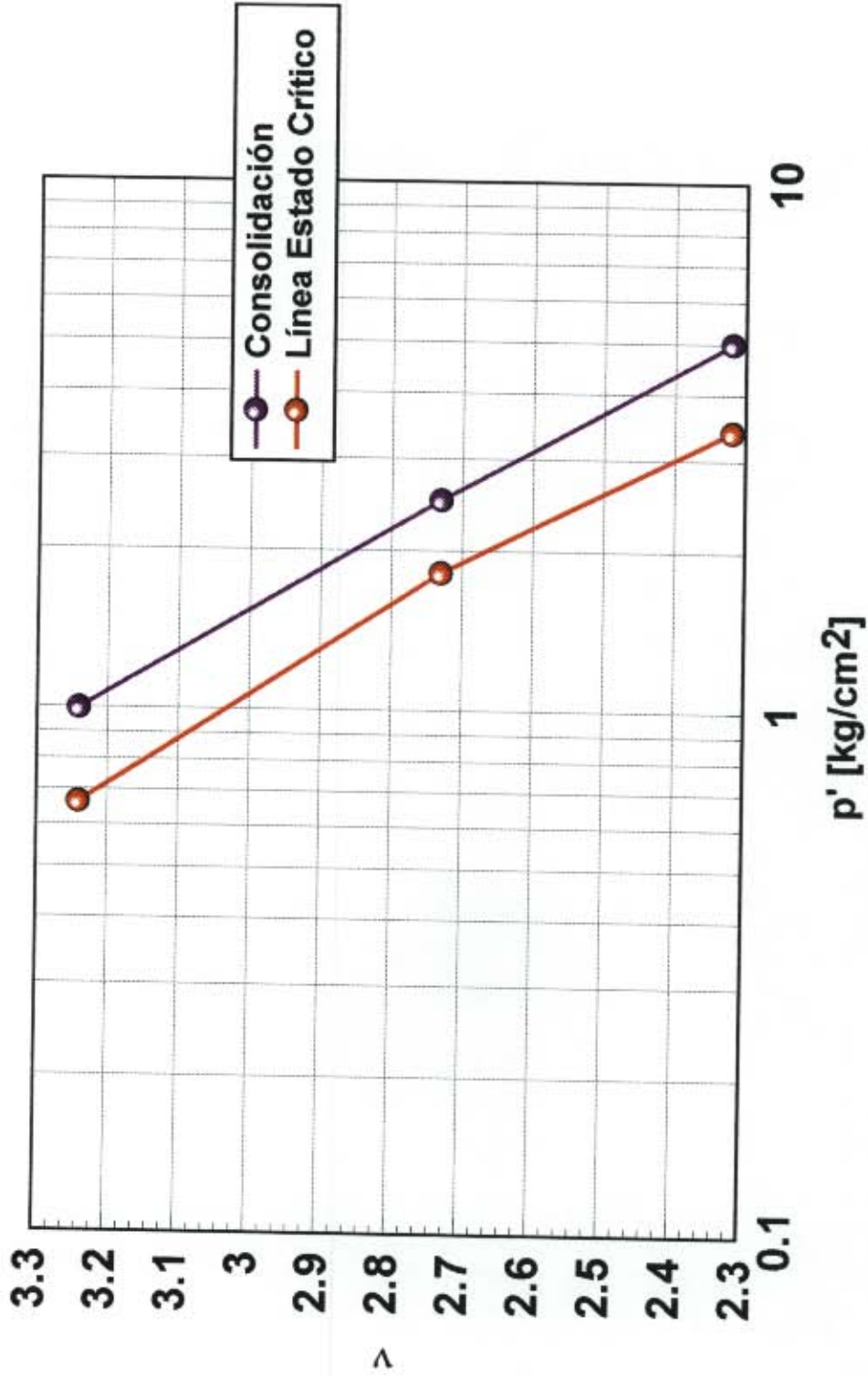


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 5.2

GRÁFICO DE LÍNEA DE ESTADO CRÍTICO EN PLANO v p'

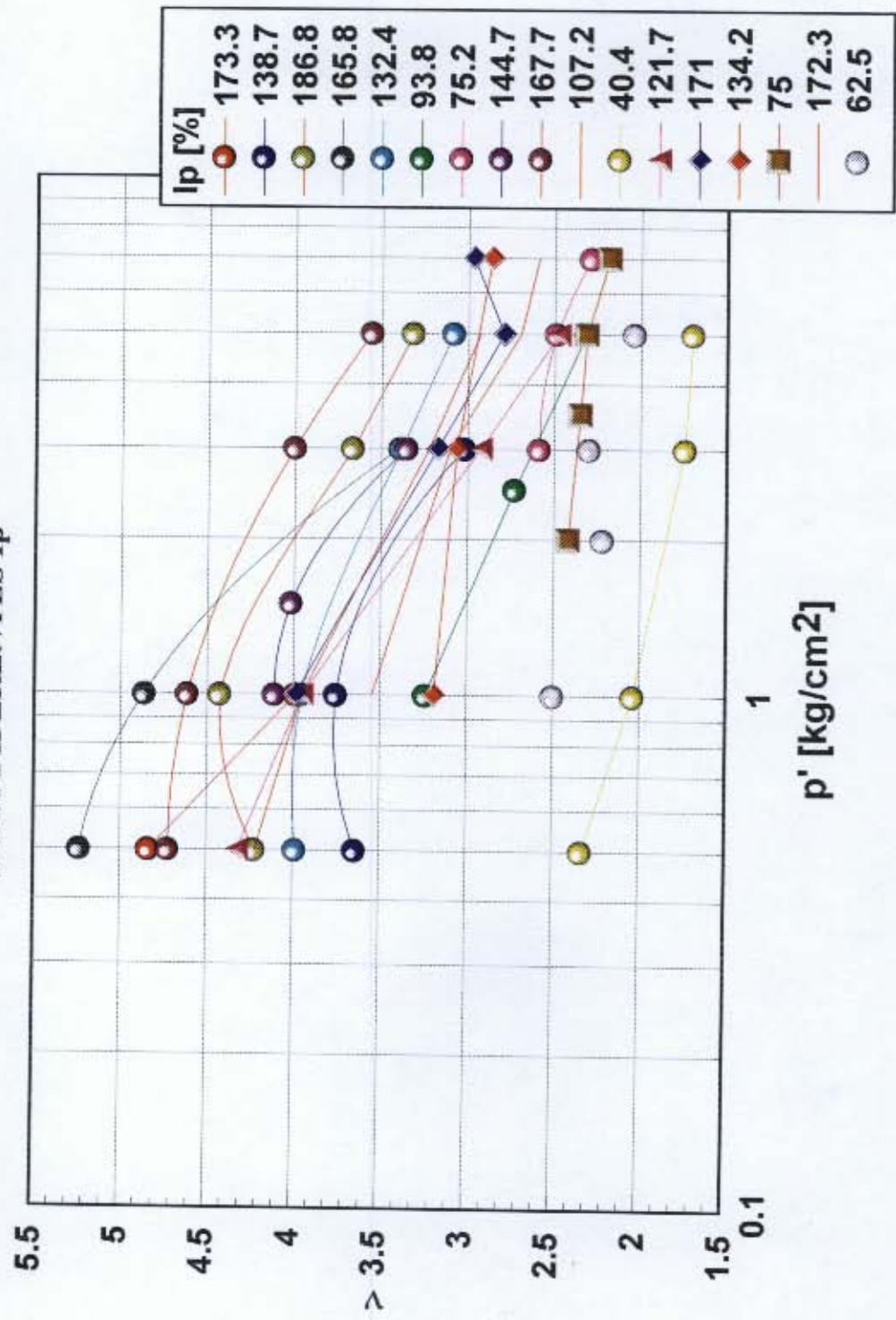


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 5.3

GRÁFICO DE POSICIÓN DE LA LÍNEA DE ESTADO CRÍTICO EN EL PLANO $v p'$
 PARA DIFERENTES I_p

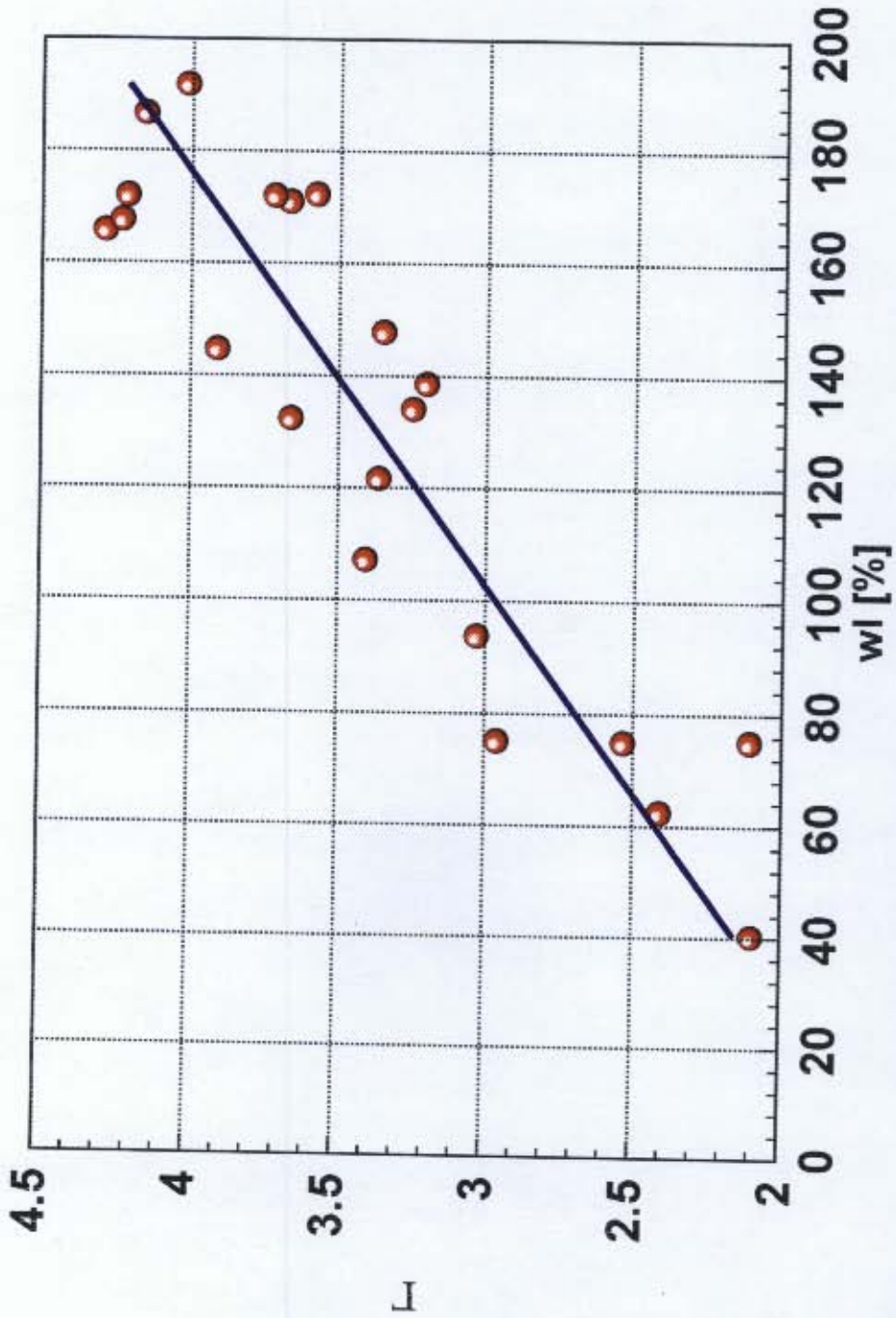


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 5.4

GRÁFICO DE CORRELACIÓN ENTRE EL PARÁMETRO Γ DE LA LÍNEA DE ESTADO CRÍTICO Y LÍMITE LÍQUIDO

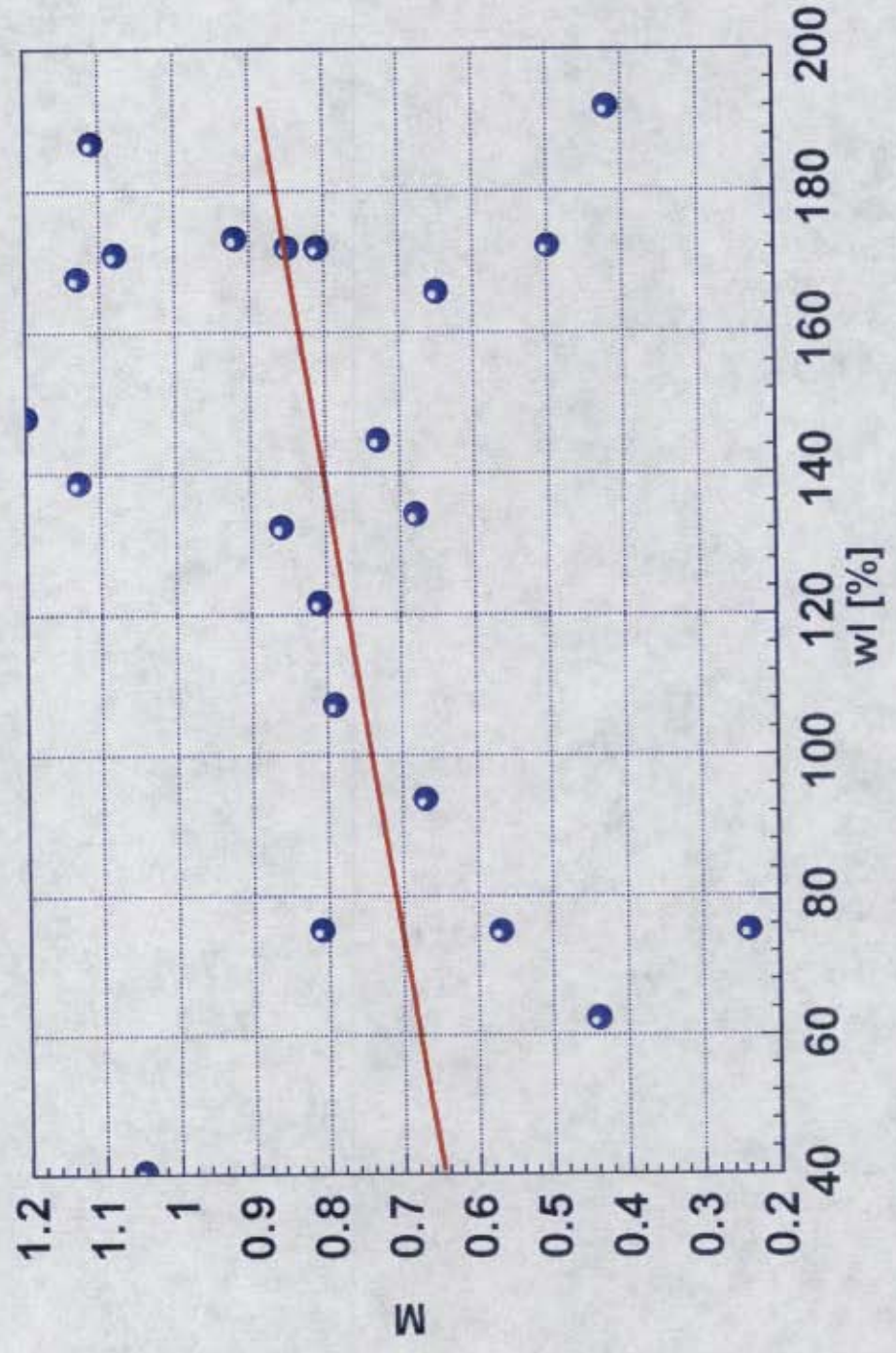


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 5.5

GRÁFICO DE PARÁMETRO M EN FUNCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

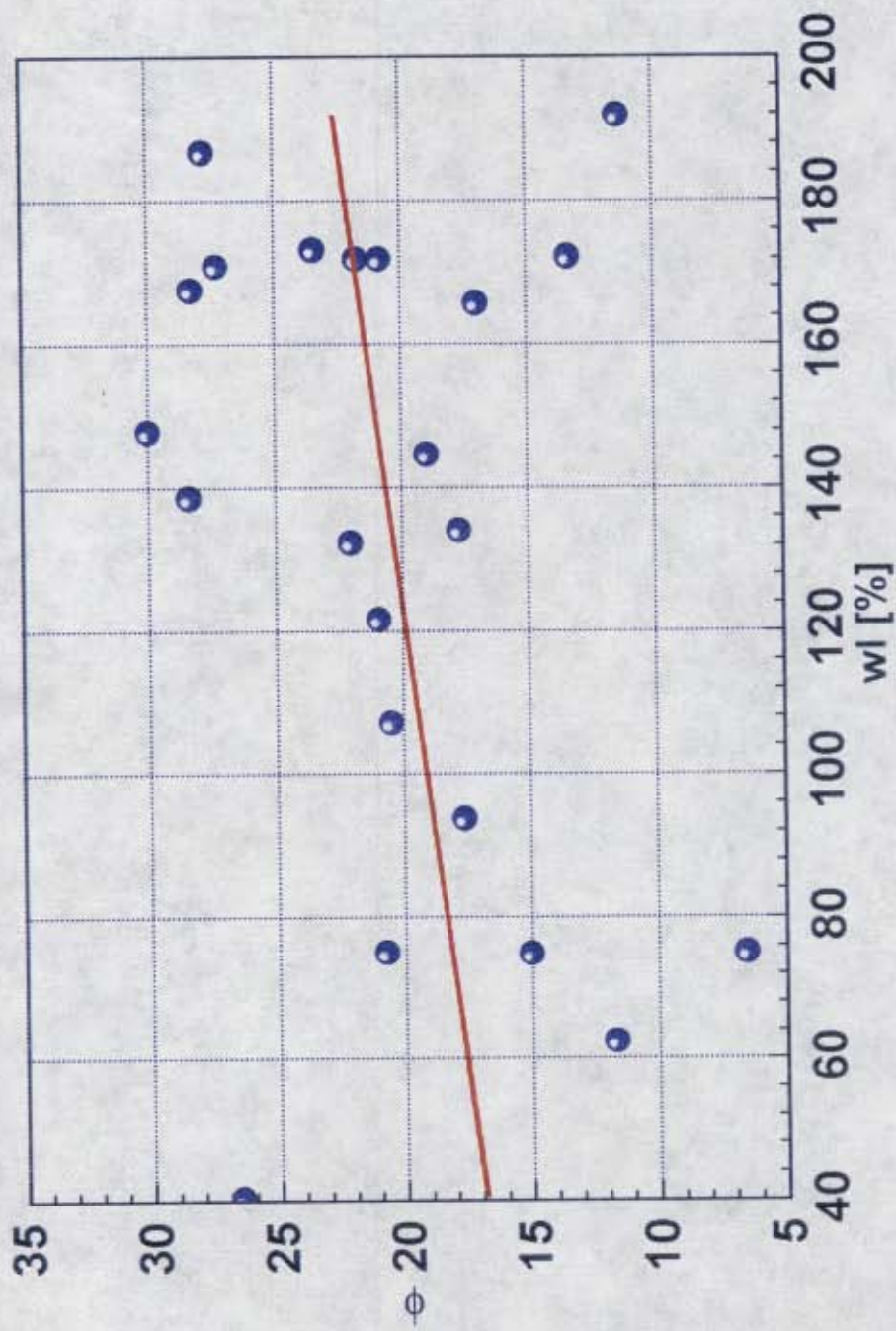


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERIA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO ZONIFICACION GEOTÉCNICA

FIGURA 5.6

GRÁFICO DE ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNO EN FUNCIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO

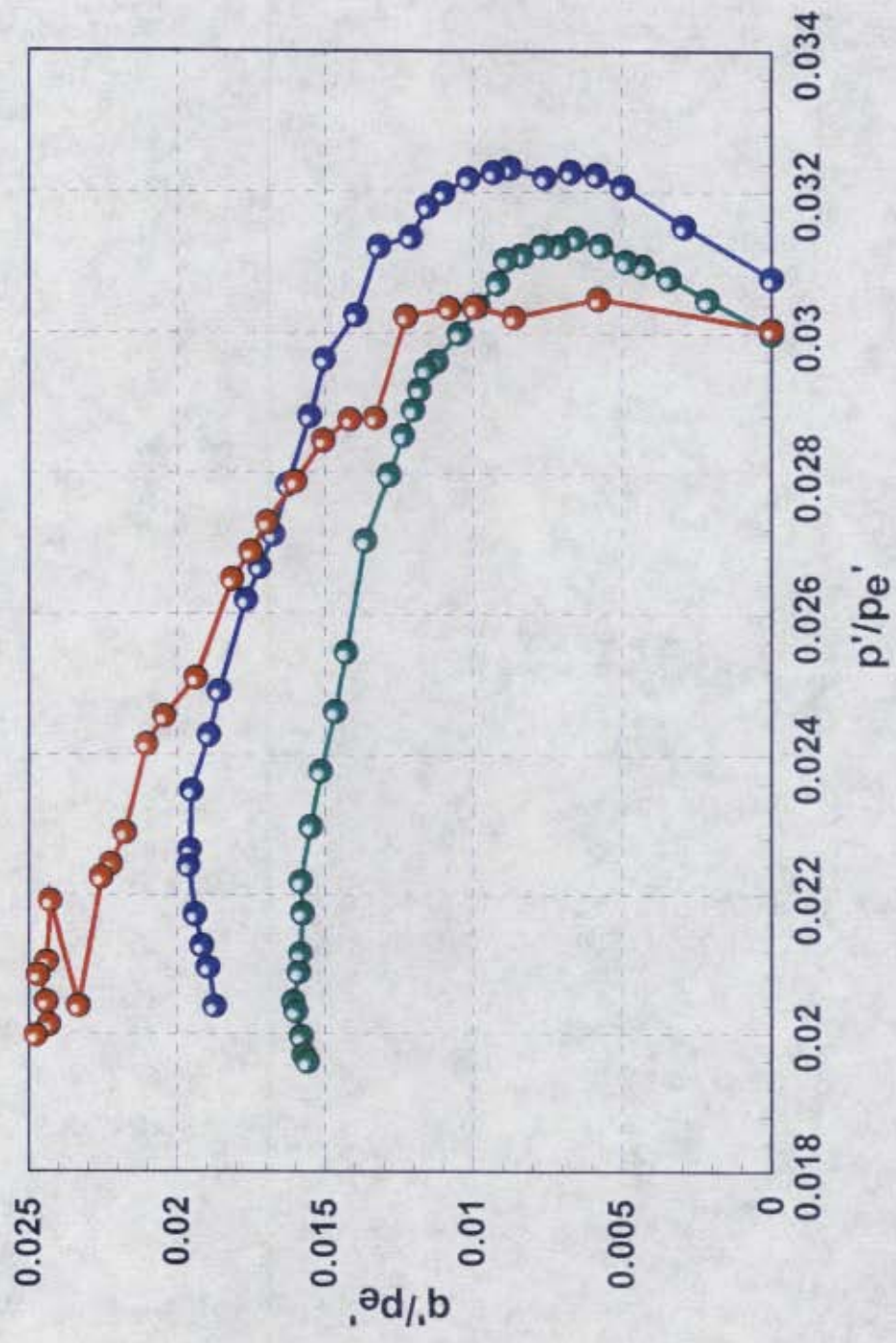


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTA FE DE BOGOTA
SUBPROYECTO ZONIFICACION GEOTÉCNICA

FIGURA 5.7

GRÁFICO DE TRAYECTORIAS NORMALIZADAS PARA UN ENSAYO TRIAXIAL

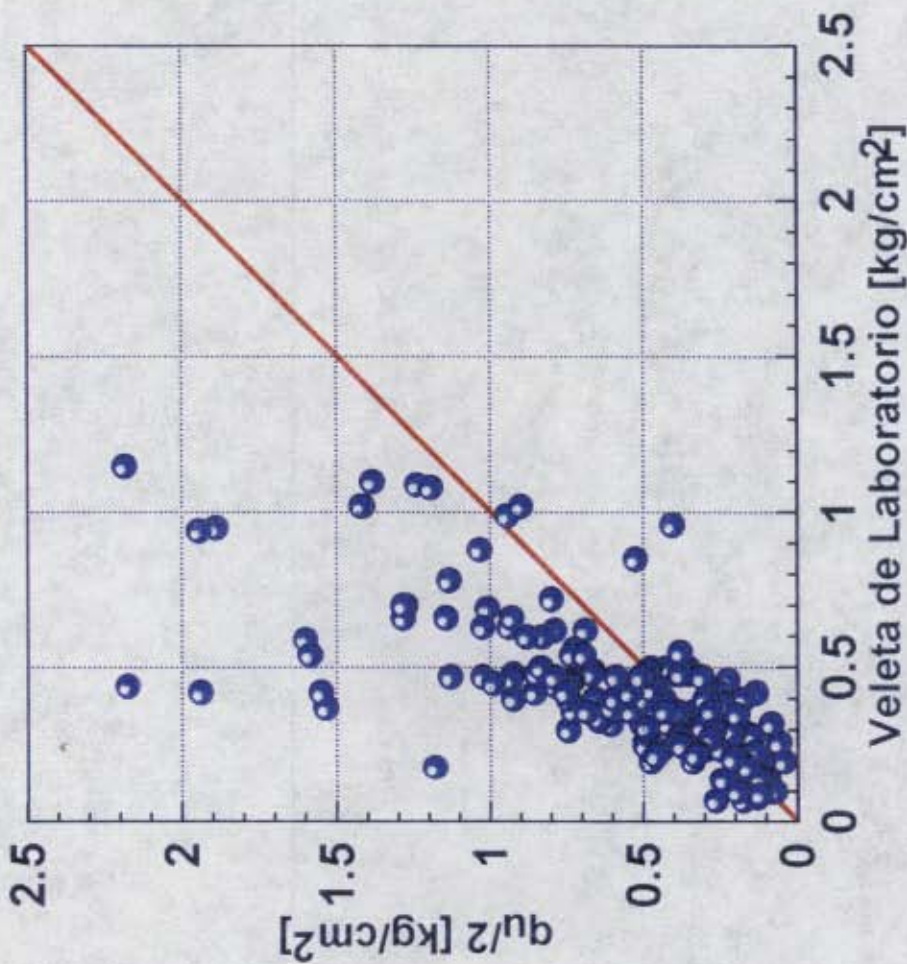


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO ZONIFICACION GEOTÉCNICA

FIGURA 5.8

GRÁFICO DE COMPARACIÓN ENTRE COMPRESIÓN INCONFINADA
Y VELETA DE LABORATORIO



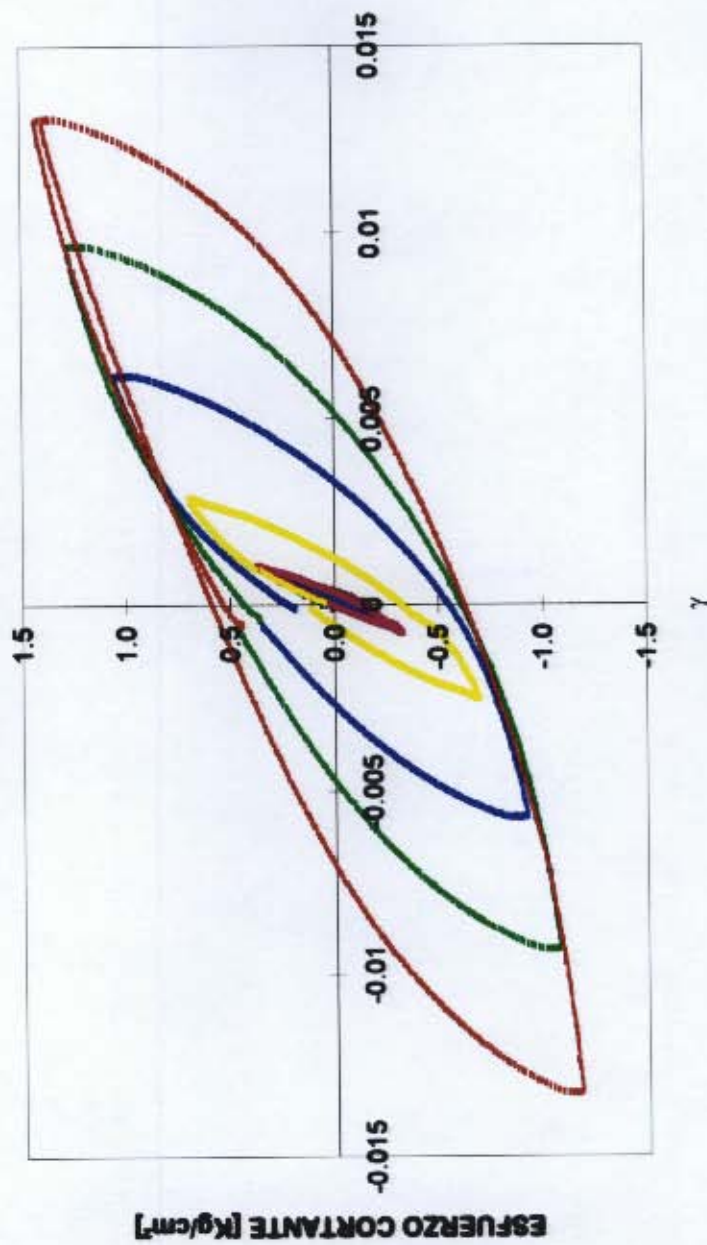
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO ZONIFICACION GEOTECNICA

FIGURA 5.9

GRÁFICO CICLOS DE HISTÉRESIS ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO

MUESTRA N51-91-4
 $\sigma_3 = 5.0 \text{ Kg/cm}^2$ Prof = 93.8 m

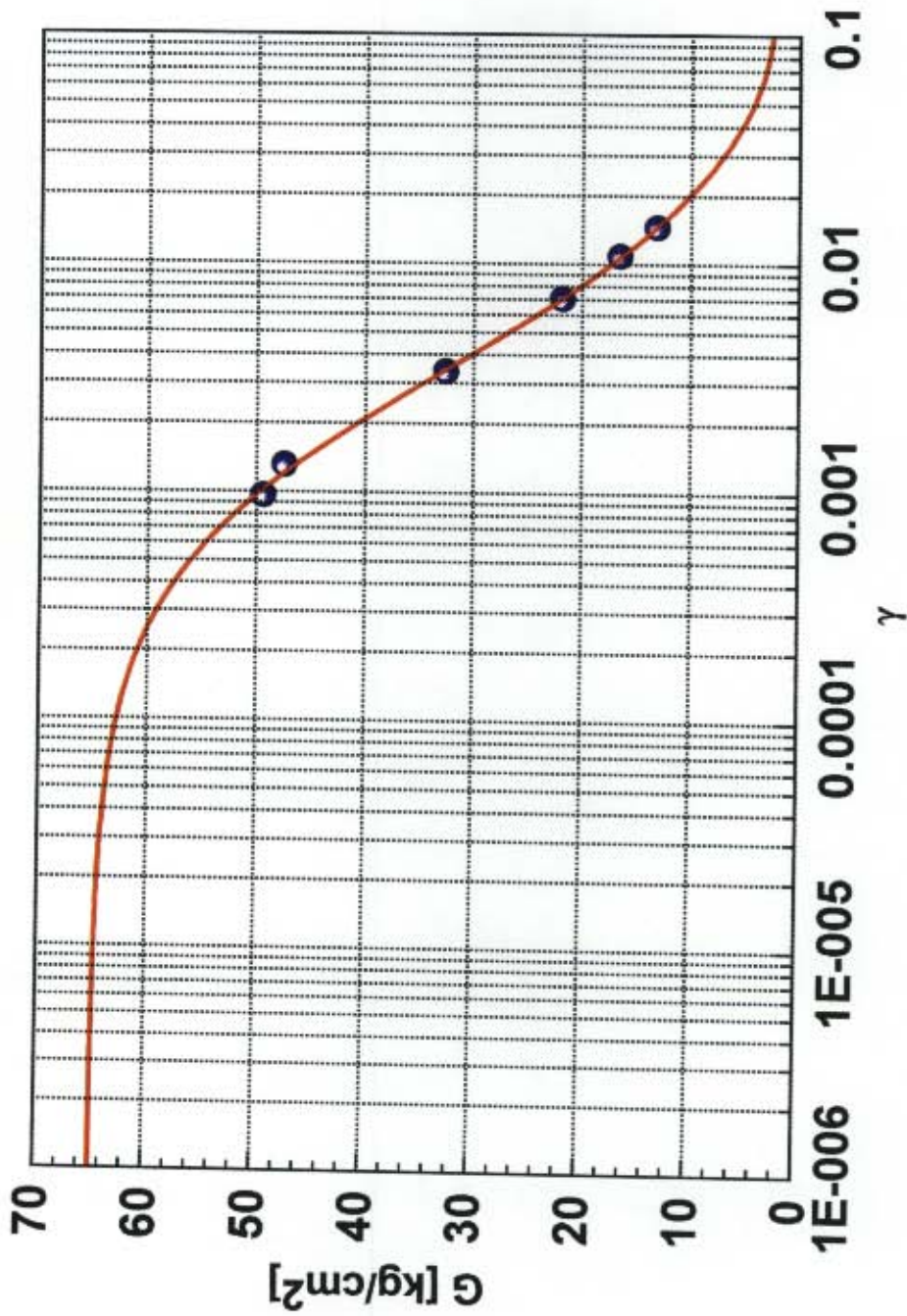


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE, 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO ZONIFICACION GEOTÉCNICA

Figura 6.1

**GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO
CURVA DE MODULO CORTANTE EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN**

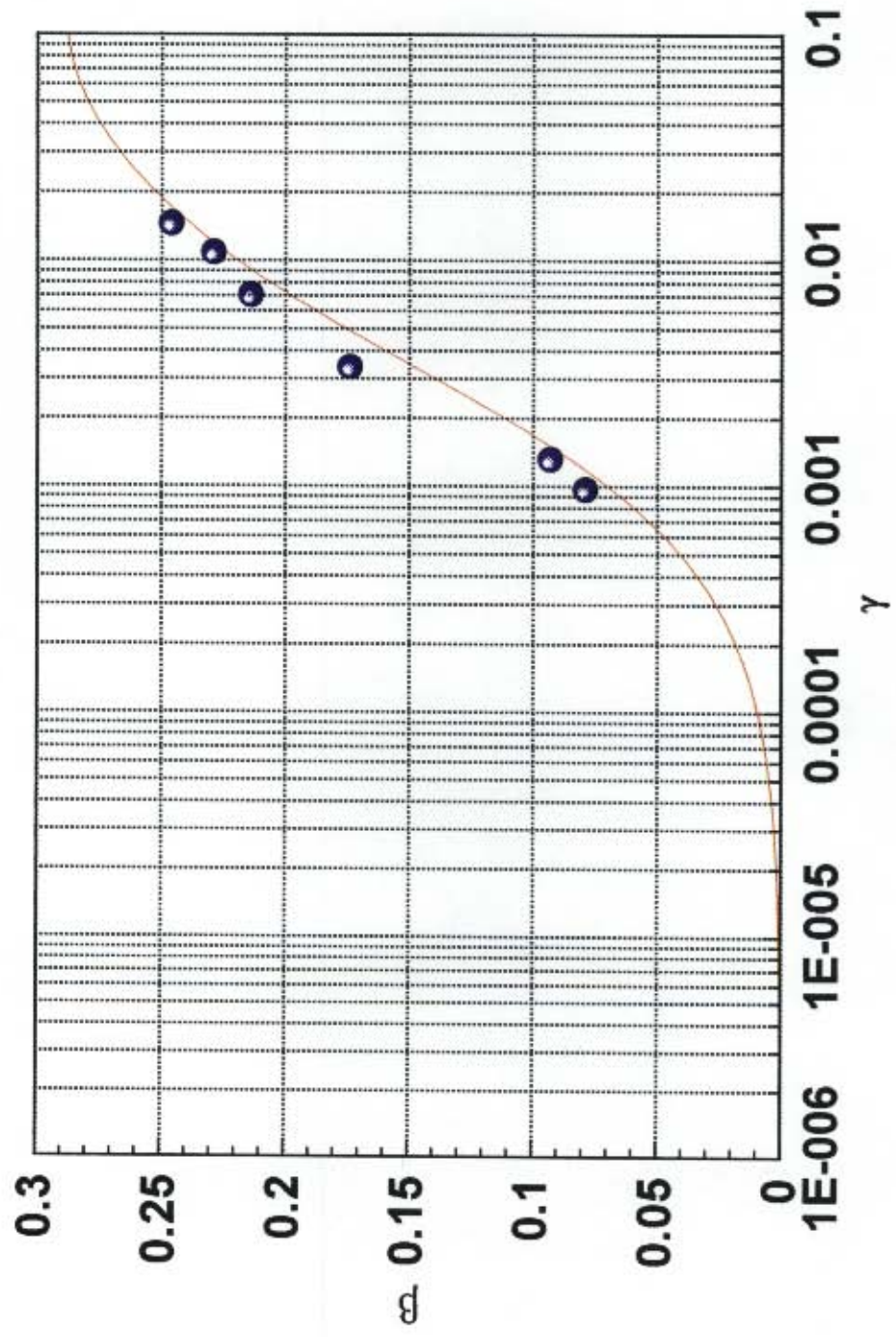


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 6.2

GRÁFICO DE RESULTADO TÍPICO DE ENSAYO TRIAXIAL CÍCLICO
 CURVA DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN

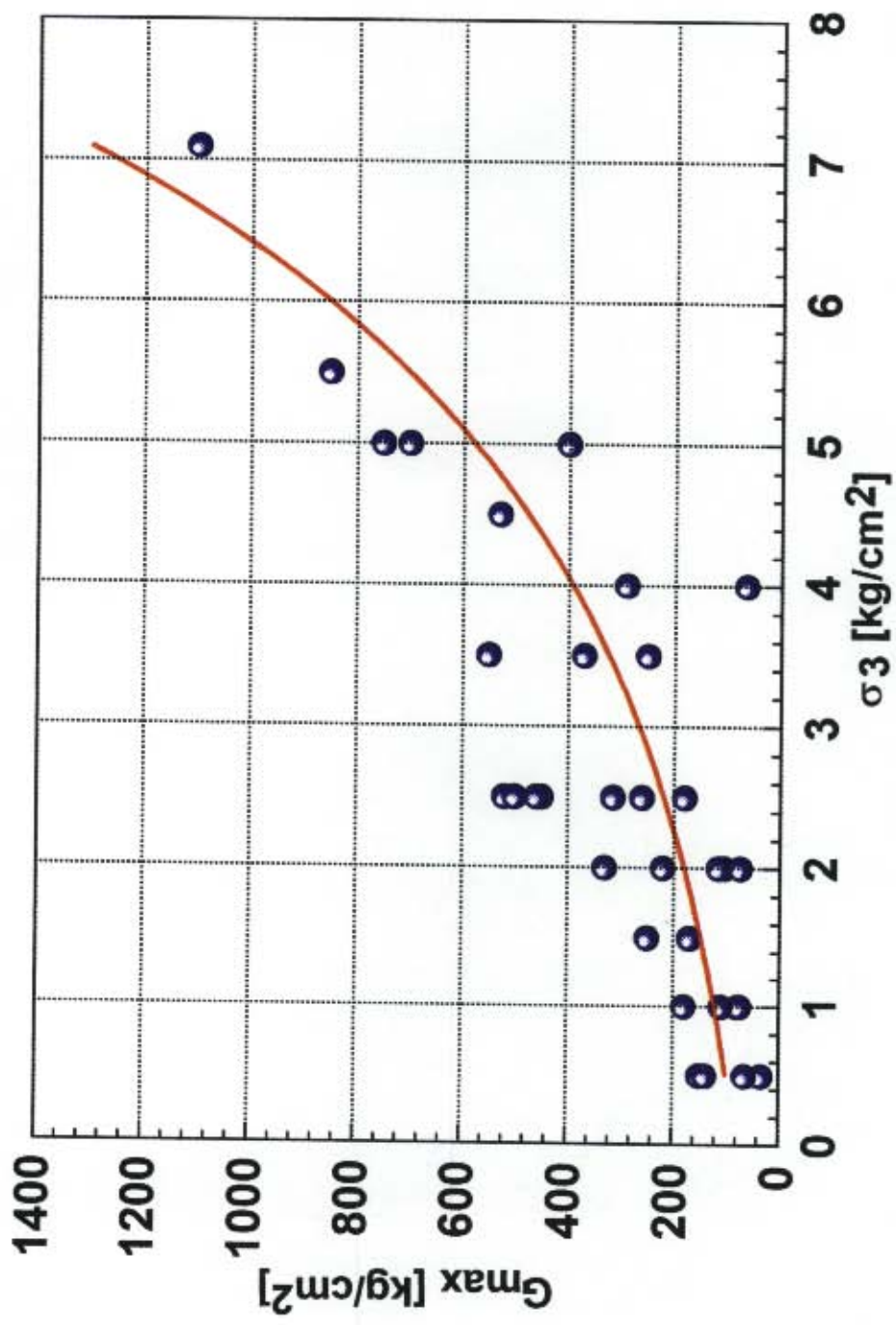


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 6.3

GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DEL ESFUERZO DE CONFINAMIENTO σ_3

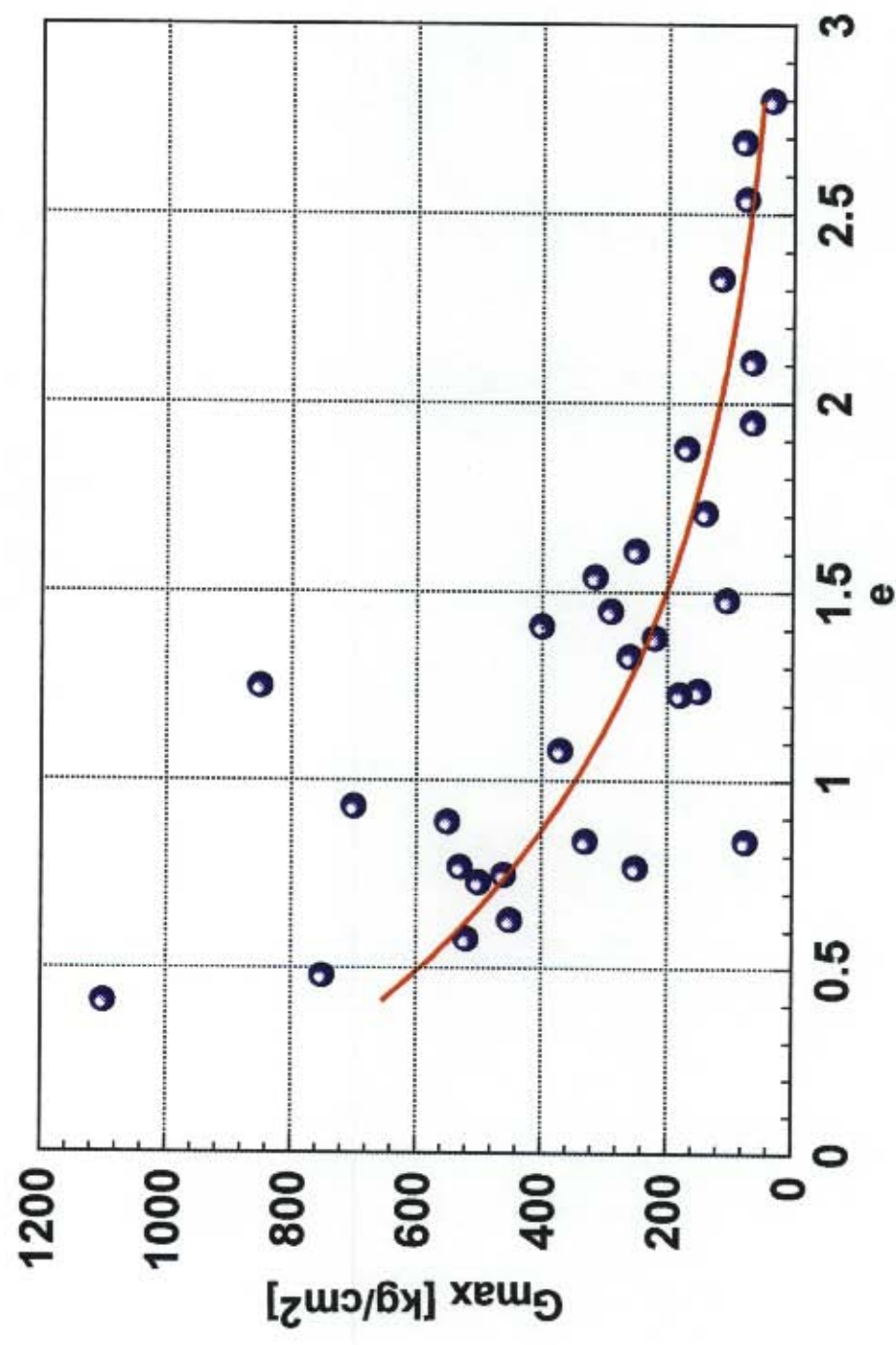


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
 LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
 SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 6.4

GRÁFICO DE G_{max} EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE VACIOS e

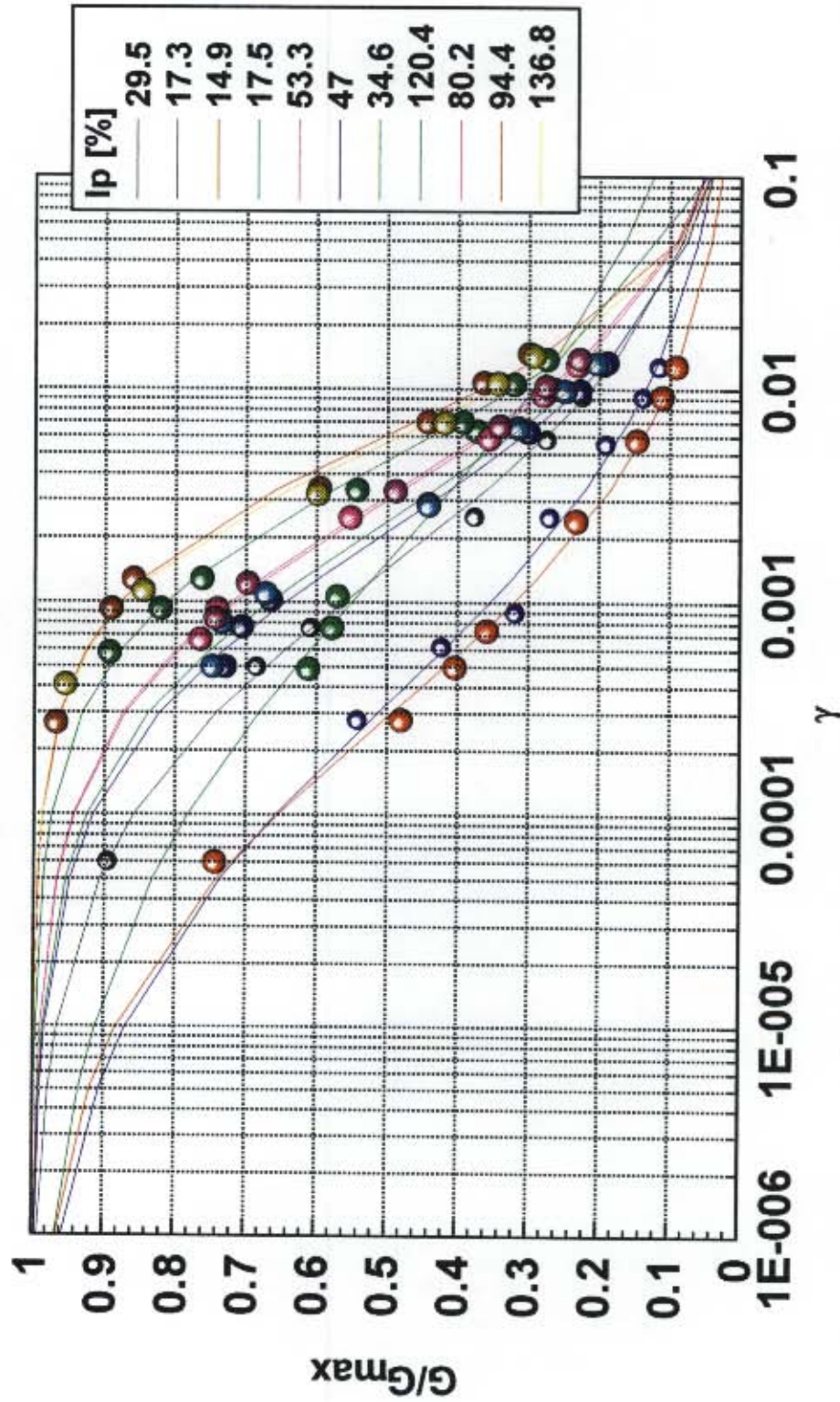


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 6.5

GRÁFICO DE CURVAS DE G/G_{max} EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN CORTANTE PARA DIFERENTES I_p



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
LABORATORIO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTAFÉ DE BOGOTÁ NOVIEMBRE 1996

PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

Figura : 6.6

CONVENIO 01 - 93

OFICINA PARA LA PREVENCION DE EMERGENCIAS - OPES -

**DIRECCION NACIONAL PARA LA PREVENCION Y ATENCION DE
DESASTRES - DNPAD -**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA - INGEOMINAS**

**PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA**

**SUBPROYECTO No 3
ESTUDIOS TECTONICOS Y NEOTECTONICOS
(Informe Definitivo)**

INGEOMINAS - UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

E 98,3

**Santafé de Bogotá, Colombia
Mayo de 1996**

CONTENIDO

PRÓLOGO

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE NEOTECTÓNICA

1.1.1. Actividad Neotectónica de Fallas.

1.1.2. EVIDENCIAS E INDICIOS NEOTECTÓNICOS

1.1.2.1. Evidencias.

1.1.2.3. Indicios.

1.1.2.4. Caracterización de actividad.

1.1.2.4.1. Tasa de actividad.

1.1.2.4.2. Porcentaje de tramo activo (A).

1.1.2.4.3. Magnitudes sísmicas.

1.2. METODOLOGÍA Y FASES DEL ESTUDIO

1.2.1. Magnitud(M) Vs longitud de ruptura superficial (LRS).

1.2.2. Magnitud(M) Vs longitud de ruptura en profundidad (LRP).

CAPITULO 2

2. MORFOTECTÓNICA

2.1. REGIÓN NOROCCIDENTAL

2.1.1. Sistema de Romeral.

2.1.1.1 Falla de Armenia.

2.1.1.2. Falla de Manizales.

2.1.1.3. Falla de Montenegro.

2.1.2. Sistema de Palestina.

2.1.2.1. Falla de Palestina.

2.1.3 Sistema Chapetón-Pericos.

2.1.3.1. Falla Chapetón.

2.1.4. Sistema del Cucuana-Río Bogotá.

2.1.4.1. Falla del Cucuana.

2.1.4.2. Falla del Cucuana Este.

2.1.5. Sistema de Ibagué.

2.1.5.1. Falla del Cocora.

2.1.5.2. Falla de Ibagué.

2.1.5.3. Falla de Piedras.

- 2.1.6. Sistema de Viani.
 - 2.1.6.1. Falla de Viani.
- 2.1.7. Sistema Samaria-La Colorada.
 - 2.1.7.1. Falla El Chocho.
 - 2.1.7.2. Falla de Doima.
- 2.1.8. Sistema del Magdalena.
 - 2.1.8.1. Falla de Mulatos.
 - 2.1.8.2. Fallas de Honda.
 - 2.1.8.3. Fallas de Cambras-Cambao.
 - 2.1.8.4. Falla Alto del Trigo.
 - 2.1.8.5. Falla de Bituima.
- 2.1.9. Sistema Noroeste.
 - 2.1.9.1. Falla El Palmar.
- 2.2. REGION SURORIENTAL
 - 2.2.1. Sistema Servitá-Santa María.
 - 2.2.1.1. Falla de Colepato.
 - 2.2.1.2. Falla de Servitá.
 - 2.2.1.3. Falla de Santa María.
 - 2.2.1.4. Falla de Guayuriba.
 - 2.2.1.5. Falla Lengupá.
 - 2.2.1.6. Falla Colonia.
 - 2.2.1.7. Falla de Acacias.
 - 2.2.1.8. Falla de Tesalia.
 - 2.2.2. Sistema del Guaicáramo.
 - 2.2.2.1. Falla de Cumaral.
 - 2.2.2.2. Falla del Guaicáramo.
 - 2.2.2.3. Falla del Guaicáramo W.
 - 2.2.2.4. Falla de Pajarito.
 - 2.2.3. Sistema de Yopal.
 - 2.2.3.1. Falla de Yopal.
 - 2.2.3.2. Falla de San Pedro.
 - 2.2.3.3. Falla de Upamena.
 - 2.2.4. Zona Axial de la Cordillera Oriental.
 - 2.2.4.1. Falla de Boyacá.
 - 2.2.4.2. Falla San Francisco.
 - 2.2.4.3. Falla de Soapaga.
 - 2.2.5. Sistema Noroeste.
- 2.3. REGIÓN CENTRAL
 - 2.3.1. Sistema al Oriente de la Sabana.
 - 2.3.1.1. Falla de Bogota.
 - 2.3.1.2. Falla de Ubaque.
 - 2.3.2. Sistema al occidente de la Sabana.
 - 2.3.2.1. Falla de Sabaneta.
 - 2.3.2.2. Falla Corraleja.
 - 2.3.2.3. Falla de Fusagasugá.
 - 2.3.2.4. Otras.
 - 2.3.3. Sistema al Sur de la Sabana.
 - 2.3.3.1. Falla La Cajita.

- 2.3.3.2. Falla del Río Tunjuelito.
- 2.3.4. Sistema de Facatativá.
 - 2.3.4.1. Falla de Facatativá SW.
 - 2.3.4.2. Falla El Mesón.
 - 2.3.4.3. Falla de Soacha.
- 2.3.5. Sistema de la Sabana de Bogotá.
 - 2.3.5.1. Falla de Usaquén.

CAPITULO 3

3. MICROTTECTÓNICA Y ESFUERZOS TECTÓNICOS

3.1. REGIÓN NOROCCIDENTAL

3.1.1. Sistema del Magdalena.

3.1.1.1. Fallas de Bituima y del Alto del Trigo.

3.1.1.2. Fallas de Cambao y de Honda.

3.1.1.3. Falla de Mulatos.

3.2. REGION SURORIENTAL

3.2.1. Sistema del Guaicáramo.

3.2.2. Sistema Servitá - Santa María.

3.2.3. Sistema Yopal.

3.3. REGION CENTRAL

3.3.1. Sistemas de fallas en el sector de la Sabana

3.3.3. Fallas de Boyacá y Soapaga

3.4. MAPA DE DIRECCIONES DE ESFUERZOS PRINCIPALES

CAPÍTULO 4

4. SÍNTESIS DE RESULTADOS

4.1. RASGOS MORFO-NEOTECTONICOS

4.2. ACTIVIDAD DE FALLAS

4.3. TASA DE ACTIVIDAD

4.4. MAGNITUDES MAXIMAS PROBABLES (MMP)

4.5. MMP Y TASA DE ACTIVIDAD Vs DISTANCIA MEDIA A BOGOTA

4.6. PERIODO DE RETORNO Vs MMP

4.7. ZONIFICACIÓN SISMOTECTÓNICA PRELIMINAR

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 1

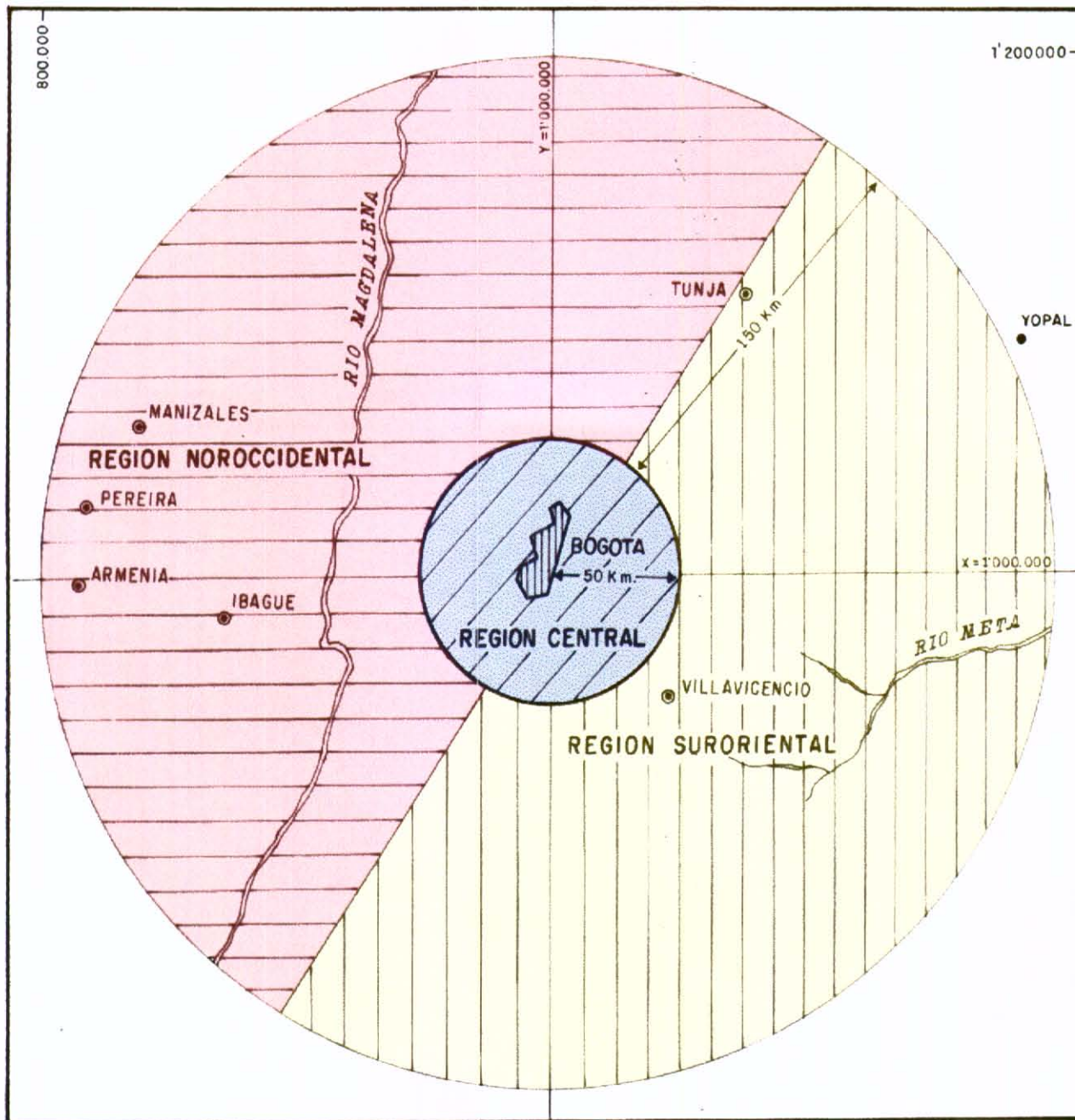
1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este estudio es identificar y caracterizar la actividad neotectónica de las principales fallas geológicas corticales, situadas dentro de una extensión de 200 km de radio alrededor de Santafé de Bogotá. La investigación se realizó a niveles de detalle regional y local, para lo cual se subdividió el área en tres regiones: Suroriental, Noroccidental y Central (Figura 1.1).

En el trabajo de carácter regional los resultados se sintetizan en un mapa neotectónico de fallas, a escala 1:500.000, el cual involucra el área comprendida entre 200 km y 50 km de radio. A esta escala se analizaron los sistemas de fallas mayores de la Región Suroriental, especialmente los del Piedemonte Llanero, y los de la Región Noroccidental, principalmente el de Romeral y los del sector del Magdalena.

El estudio regional comprende, entre otras, las fallas inversas que limitan el valle del Magdalena y las fallas de rumbo que lo atraviesan, las fallas de la Cordillera Oriental y las del flanco oriental de la Cordillera Central.

Mayor detalle (1:100.000) se realizó en la Región Central, en donde está incluida la Sabana de Bogotá, la cual comprende los primeros 50 km de radio alrededor de la capital.



ESCALA DE PRESENTACION

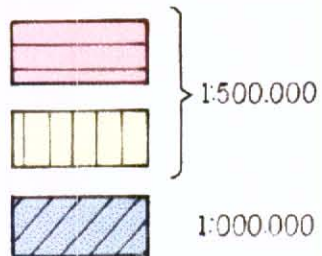


FIG 1.1- SUBDIVISIONES DEL AREA DE ESTUDIO
Y AREA DE INFLUENCIA

Se hace la identificación y caracterización de probables fuentes sismogénicas cercanas y se elabora el mapa neotectónico con las principales fallas activas y potencialmente activas. En esta región se destacan las fallas inversas de dirección N-S y fallas de rumbo de dirección NW-SE.

La geometría y el tipo de movimiento a lo largo de las fallas se investigó por medio de levantamientos geológicos, estudio de rasgos morfotectónicos y análisis de microestructuras. Se estimaron orientaciones de esfuerzos tectónicos a partir de mediciones de planos estriados, diaclasas y pliegues observados en distintos afloramientos. Igualmente se definieron los sectores en los cuales se observan rupturas de falla en superficie; allí se recomienda realizar trabajos especiales (i.e. trincheras, dataciones, etc.) con el objeto de estimar tasas de actividad, magnitudes y períodos de retorno a partir de estudios de paleosismicidad.

La caracterización de las fallas se refiere, básicamente, a la identificación de los principales indicios morfológicos de actividad neotectónica y a la determinación de la longitud de los segmentos de falla con rasgos activos y potencialmente activos.

A los principales segmentos de las fallas activas y potencialmente activas, se le estimaron las **Magnitudes Máximas Probables (MMP)**, mediante ecuaciones empíricas de regresión estadística, que correlacionan el valor de la magnitud con algunos parámetros de terremotos, tales como la longitud de ruptura en profundidad, la longitud de la ruptura en superficie y el tipo de movimiento.

La identificación y el análisis de los rasgos neotectónicos es una valiosa contribución para el proyecto de microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, pues se definen las principales fuentes sismogénicas y se estiman las magnitudes máximas probables. El estudio de fallas activas y potencialmente activas es, junto con la sismicidad instrumental e histórica, una herramienta complementaria y fundamental para la evaluación de la amenaza sísmica.

1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE NEOTECTÓNICA

Aunque el concepto de neotectónica abarca, en términos generales, la actividad tectónica Cuaternaria, algunas definiciones incluyen los movimientos y las deformaciones de la corteza y la litósfera terrestre, desde el Terciario superior hasta el Holoceno. Para el caso particular de este proyecto, se entiende como neotectónica el estudio de fallas corticales susceptibles de moverse bajo el campo de esfuerzo tectónico actual, el cual se presume activo en el lapso comprendido a partir del Plio-cuaternario, aproximadamente los últimos 5 m.a.

1.1.1. Actividad Neotectónica de Fallas. La noción de actividad neotectónica de una falla es variable, pero casi todas las definiciones consideran el factor tiempo como criterio fundamental. A pesar de que en la mayoría de los casos se denominan activas las fallas que han tenido movimientos en el Cuaternario, hay casos en este lapso varía de acuerdo con la finalidad del estudio, definiéndolo en términos de la importancia de las infraestructuras y vidas que puedan verse afectadas por un sismo generado por acción de una falla. Es así que para obras de infraestructura especiales (presas, hospitales, centrales nucleares, entre otras) el criterio de actividad es el más exigente, llegando en algunos casos a considerar como activas las fallas que han tenido movimientos inclusive en el Terciario; estas fallas pueden tener tasas de movimiento muy bajas y/o períodos de retorno muy largos, para sismos de magnitud variable provenientes de fuentes locales.

Para estructuras convencionales como viviendas, la definición de falla activa involucra movimientos en el Cuaternario, y aún el Holoceno (últimos 10.000 años), e involucra tasas de movimiento mayores, lo que conduce a normas de construcción sismo-resistente más tolerantes y menos costosas que en el caso anterior. La caracterización neotectónica utilizada en este trabajo está basada en el análisis de rasgos morfotectónicos, de acuerdo con los criterios de actividad de fallas mencionados por Cluff et al. (1972).

Estos autores definen tres categorías de falla cuyas características están resumidas en el la Tabla 1.1: a) falla activa; b) falla potencialmente activa ; c) falla de actividad incierta.

TABLA 1.1. CLASIFICACIÓN DE ACTIVIDAD (Cluff et al, 1972)

FALLA ACTIVA	POTENCIALMENTE ACTIVA	ACTIVIDAD INCIERTA
Rupturas en la superficie y sismos fuertes asociados	No hay informes sobre fallamiento superficial histórico	La información disponible no satisface suficientemente criterios para establecer la actividad de la falla
Depósitos jóvenes han sido desplazados por la falla	Rasgos geomórficos de falla activa están atenuados, erosionados y discontinuos	Si la falla está cerca del sitio de evaluación de amenaza, son necesarios estudios adicionales
Rasgos morfotectónicos frescos, característicos de falla activa, están presentes a lo largo de la traza de la falla	No se tienen evidencias que las fallas corten o desplacen depósitos jóvenes	
Se asignan epicentros sísmicos a fallas individuales, con alto grado de confiabilidad	Algunos epicentros sísmicos se alinean con la falla, pero las localizaciones tienen bajo grado de confianza	

1.1.2. EVIDENCIAS E INDICIOS NEOTECTÓNICOS

En la caracterización neotectónica de las fallas investigadas se utilizaron evidencias e indicios de actividad de edad Plio-cuaternaria, especialmente en las fallas mayores identificadas.

1.1.2.1. Evidencias. Se manifiestan como rupturas y deformaciones de la superficie asociadas directamente a la actividad de una falla en profundidad. Algunos ejemplos de evidencias neotectónicas son las dislocaciones o el plegamiento de una unidad geológica o geomorfológica situada sobre la traza de una falla principal, el desplazamiento de estratos en un perfil de suelo, las zonas de brecha, cizalla o "gauge" en depósitos del Plio-pleistoceno; en afloramientos, o en trincheras, se utilizan como criterios de actividad neotectónica zonas de brecha, cantos estriados y fracturados, estratos desplazados, depósitos basculados o deformados.

1.1.2.3. Indicios. Son rasgos alineados, de tipo morfotectónico y anomalías en la topografía y drenajes, tales como facetas triangulares, lomos de presión, depresiones cerradas, silletas, lomos de obturación, escarpes, cuencas de tracción, drenajes decapitados y controlados, abombamientos de la superficie, entre los más destacados.

De acuerdo con la calidad, cantidad, continuidad, grado de desarrollo y preservación de las geoformas desarrolladas, los indicios se categorizaron como fuertes, moderados y débiles. Se debe tener en cuenta que los procesos erosivos y la actividad antrópica, hacen que en muchos casos las geoformas neotectónicas se degraden rápidamente, lo cual dificulta su identificación en el terreno. Algo similar ocurre con la densa vegetación, la sedimentación y el relieve montañoso, que son factores que enmascaran los rasgos morfológicos de neotectónica.

1.1.2.4. Caracterización de actividad. Con base en los rasgos morfo-neotectónicos, las fallas activas y potencialmente activas se caracterizaron de acuerdo con la tasa de actividad semi-cuantitativa, el porcentaje de tramo activo y la magnitud máxima probable.

1.1.2.4.1. Tasa de actividad. El grado de actividad de una falla, es función de la cantidad de desplazamiento y de la frecuencia de los movimientos. Las rupturas en superficie con el tiempo crean geoformas características cuya amplitud crece con la repetición de eventos sísmicos.

La tasa de actividad se puede calcular a partir de los desplazamientos estratigráficos medidos, mediante dataciones de los suelos afectados, o estimar por medio de análisis de los rasgos morfotectónicos. Para horizontes desplazados por la falla, los cálculos se

realizan sobre el plano de ruptura, midiendo la longitud total del desplazamiento de un nivel cuya edad se puede establecer o datar.

La tasa de movimiento o velocidad de la falla se expresa en cm/año o en mm/año. De acuerdo con Matsuda (1975) (tomado de Slemmons, 1977), es posible inferir tasas de actividad de fallas, en términos cualitativos, a partir del análisis de los rasgos morfológicos de origen tectónico asociados con el movimiento. Este autor diferencia los rangos de actividad mostrados en la Tabla 1.2, los cuales se utilizaron con el objeto de calificar la tasa de actividad neotectónica de algunas de las fallas investigadas.

Estudios más recientes (Winter et al, 1993) utilizan métodos cuantitativos para estimar tasas de actividad, en donde utilizan la cantidad de dislocación rasgos topográficos, a ambos lados de la traza de falla, y que se pueden asociar con la edad de la respectiva unidad geomorfológica.

1.1.2.4.2. Porcentaje de tramo activo (A). Este parámetro indica el porcentaje de falla con evidencias e indicios de actividad neotectónica, mediante la siguiente ecuación:

$$A = L_{ei} \times 100\% / L_t,$$

L_{ei} = Longitud de falla con indicios + evidencias de actividad neotectónica

L_t = Longitud total de la falla (segmento)

Esta metodología es comparable a la utilizada en el estudio de Microzonificación Sismo-geotécnica de Popayán (C.E.E - INGEOMINAS, 1992).

TABLA 1.2. TASA DE ACTIVIDAD DE FALLAS (Matzuda, 1975)

TASA DE ACTIVIDAD	RASGOS MORFOTECTÓNICOS	VELOCIDAD (cm/año)
Muy baja (MB)	indicios ocasionales	< 0,001
Baja (B)	Indicios geomórficos de actividad esparcidos	0,001-0,01
Intermedia (I)	Indicios morfológicos de calidad moderada a buena	0,01-0,1
Alta (A)	Buenos y abundantes rasgos morfológicos, a veces discontinuos	0,1-1,0
Muy alta (MA)	Excelentes rasgos, especialmente en límites de placas	1,0-10
Extrema (E)	Solo sobre los límites de placa mayores	>10

1.1.2.4.3. Magnitudes sísmicas. El análisis neotectónico permite caracterizar la deformación sísmica durante un período de tiempo muy amplio, del orden de miles y decenas de miles de años, y de esta forma establecer el potencial sísmico de un segmento, para el cual no se tienen registros de sismicidad instrumental o información de sismicidad histórica. De esta manera, el análisis neotectónico permite estudiar el comportamiento de una falla activa durante un lapso muy superior al período para el cual

se tiene información sismológica de diferente índole, que en muchos casos es particularmente limitada.

Existen relaciones empíricas entre la magnitud de un terremoto y otros parámetros tales como: a) la longitud de la ruptura superficial del terreno, b) la longitud de ruptura subsuperficial (en profundidad), c) el área de ruptura, d) la cantidad de desplazamiento (Slemmons, 1977; Bonilla et al, 1984; Wells and Coppersmith, 1994). Estas relaciones se pueden utilizar para evaluar la amenaza sísmica a partir de información morfo-neotectónica, teniendo en cuenta algunos criterios:

a) A partir del mapa neotectónico se definen segmentos de falla relativamente continuos separados entre sí por saltos compresivos, saltos extensivos, zonas de transferencia o cambios abruptos de la geometría de la falla. En términos generales cada segmento presenta un tipo de movimiento bien definido (inverso, rumbo, normal, combinado).

Durante un evento sísmico se puede activar una porción del segmento de falla, cuya longitud de ruptura en profundidad no excede la longitud total del segmento en superficie. La estimación de la Magnitud Máxima Probable (MMP), suponiendo que todo el segmento se activa durante un solo evento, representa una cota superior para el valor estimado.

b) Durante un mismo evento sísmico se pueden activar distintos sectores de fallas vecinas. Por esta razón es importante considerar escenarios de ruptura en los cuales se activan varios segmentos de falla, incrementándose de esta manera el valor de MMP. El movimiento de una falla de rumbo se puede acompañar por la activación de fallas inversas o fallas normales, que amortiguan el movimiento de rumbo en las terminaciones de la falla principal.

c) Los indicios y evidencias de actividad neotectónica observados a lo largo de un segmento, corresponden al efecto de la deformación del terreno acumulada durante un gran número de sismos. Las rupturas de superficie asociadas con un sismo pueden estar limitadas a una determinada porción del segmento considerado. La estimación de MMP podría sobre estimarse, en caso de suponer que la longitud de ruptura en superficie coincida con la longitud total de rasgos de actividad neotectónica.

d) La acción de la meteorización, la erosión y la sedimentación, particularmente acentuada en las zonas tropicales, es la característica del área de estudio. Los rasgos morfotectónicos de actividad de fallas tienden a ser erosionados por los distintos procesos exógenos, disminuyendo en forma notoria la expresión de las geoformas. La vegetación densa también limita la observación, enmascarando rasgos geomorfológicos de neotectónica, aspecto que puede conducir a una subestimación de la longitud de rasgos de falla activa. En la medida en que la actividad de una falla sea menor (i.e. períodos de retorno largos) los rasgos de actividad neotectónica tienden a desaparecer, debido a que la tasa de erosión puede ser superior a la velocidad de deformación tectónica.

e) La expresión de las rupturas superficiales está condicionada por diversos factores locales que pueden inhibir la propagación de la falla hasta la superficie. En el caso de fallas inversas, por ejemplo, la presencia de suelos poco consolidados de gran espesor o la disminución del ángulo de buzamiento de la falla pueden contribuir al amortiguamiento de la dislocación sísmica en profundidad. Este tipo de situación es característica de los piedemontes de las Cordilleras Oriental y Central, donde algunas de las fallas inversas toman niveles de despegue sub-horizontales antes de propagarse hacia la superficie.

Para identificar la actividad reciente a lo largo de estos segmentos, es posible identificar otro tipo de estructuras tales como pliegues en terrenos jóvenes situados sobre el bloque cabalgante.

f) Las deficiencias del estudio neotectónico por falta de fotografías aéreas de escala adecuada o por las restricciones de tiempo y las dificultades de acceso para la verificaciones de campo, pueden conducir a cierta incertidumbre sobre el grado de actividad de la falla y a una sub-estimación de la longitud total de rasgos neotectónicos en superficie. Para evaluar este aspecto se ha definido un parámetro cualitativo, definido con el nombre factor de calidad A, B o C, que es una indicación del grado de conocimiento que se tiene de cada falla y que intenta medir la calidad de la información.

En cualquier caso, la longitud de los rasgos de actividad neotectónica, a lo largo de un segmento, corresponde a la longitud promedio de ruptura en superficie; este valor debe

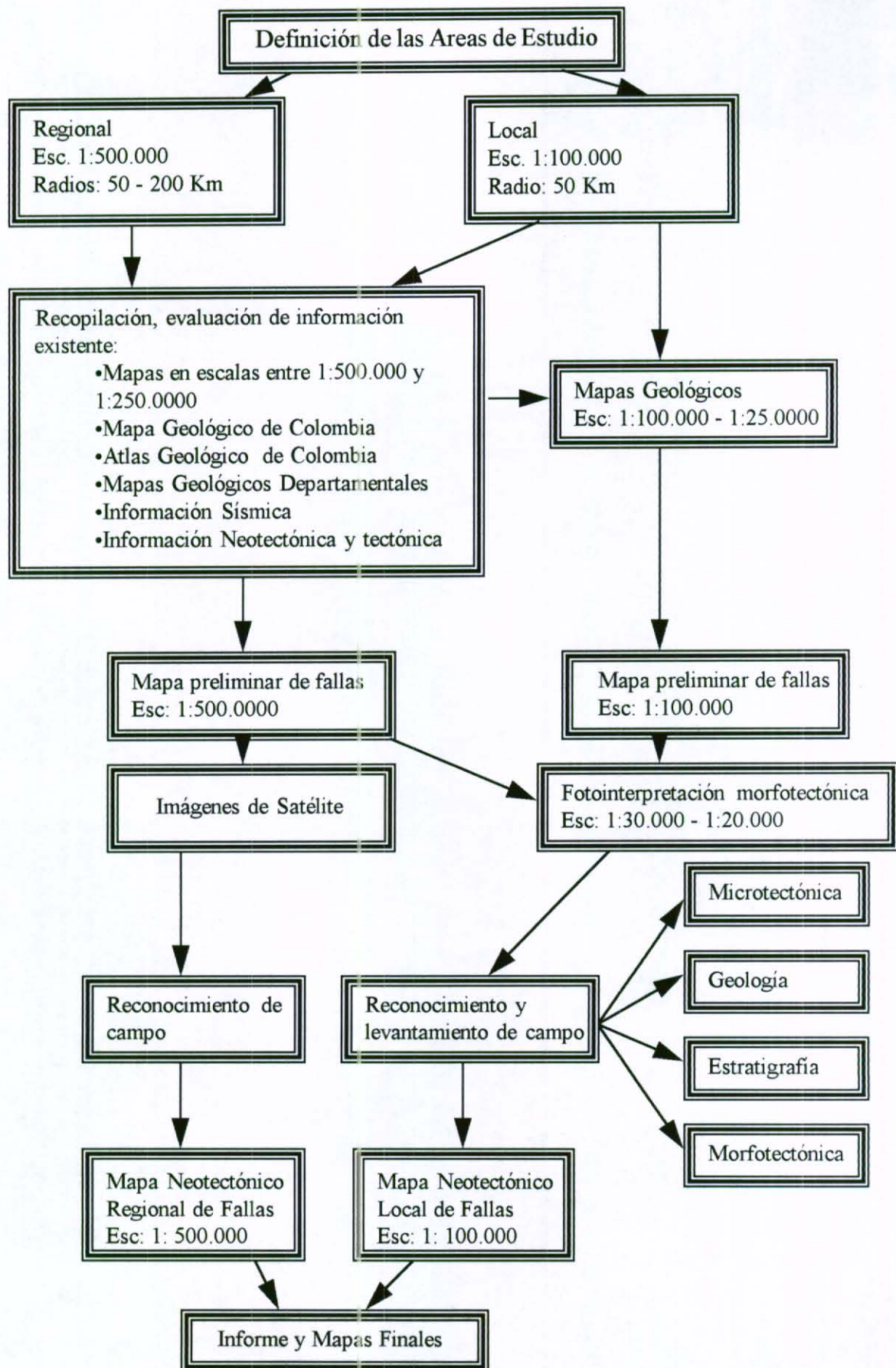
ponderarse de acuerdo con los criterios mencionados anteriormente y es susceptible de modificarse con un estudio más detallado de las fallas.

1.2. METODOLOGÍA Y FASES DEL ESTUDIO

Para la ejecución del trabajo se siguió el organigrama metodológico que se ilustra posteriormente y se adelantaron los siguientes pasos:

- a) compilación cartográfica, bibliográfica, aerofotográfica y análisis y evaluación de la información colectada;
- b) interpretación morfo-neotectónica a partir de fotos aéreas;
- c) verificación y toma de datos de campo;
- d) análisis e interpretación de la información de campo;
- e) redacción de informes y elaboración de mapas preliminares;
- f) revisiones y correcciones;
- g) informe final.

ORGANIGRAMA METODOLOGICO



La metodología para la caracterización neotectónica en escala 1:500.000, de las regiones Noroccidental y Suroriental, se basó en la extracción de las fallas identificadas y cartografiadas en el Atlas Geológico de Colombia (INGEOMINAS, 1977), con datos de mapas más actualizados, como se indica a continuación (Figura 1.2):

- La **Región Noroccidental** se complementó con información obtenida de mapas geológicos departamentales, a diferentes escalas, y de planchas geológicas a escala 1:100.000 (Raasveldt y Carvajal, 1956; Barrero y Vesga, 1976; Feininger, 1970; INGEOMINAS, 1988, 1989, 1991a, 1991b; Esquivel *et al.*, 1991; Kasen y Arango, 1974; Núñez *et al.*, 1984; Murillo *et al.*, 1982; Mosquera *et al.*, 1982; McCourt, 1984; McCourt *et al.*, 1984).

- En la **Región Suroriental** se tomó como referencia adicional los mapas geológicos de Ulloa *et al.* (1973), Ulloa *et al.* (1975), Ulloa y Rodríguez (1973, 1976, 1991), Renzoni (1967), Renzoni y Rosas (1977), Rodríguez y Ulloa (1994a, 1994b), Segovia y Renzoni (1965).

La **Región Central**, donde se ubica la Sabana de Bogotá y alrededores, se trabajó a escala 1:100.000 (Figura 1.3). Para el estudio de neotectónica de esta región, se tomó como referencia el mapa geológico del estudio de Zonificación Geotécnica de Bogotá (Caro y García 1988), el cual cubre la Sabana de Bogotá, complementándolo con la cartografía geológica a escala 1:100.000 de los alrededores de la sabana.

En general, gran parte de las fotografías aéreas obtenidas en el IGAC no tiene la escala requerida, para realizar la fotointerpretación de rasgos de probable origen morfo-neotectónico, que es del orden entre 1:30.000 y 1:18.000. No obstante, se se hizo una identificación y análisis con base en las fotografías aéreas que cumplieron requisitos de calidad y escala, logrando un cubrimiento adecuado para el reconocimiento de los indicios mas notorios y para la ubicación de las trazas principales de fallamiento activo.

Luego de la interpretación y el análisis del los mapas de fallas compilados durante las fases anteriores se realizó el trabajo de campo en cada uno de las regiones de estudio. Posteriormente, se procedio a la determinación de la longitud total de las diferentes fallas principales.

El procedimiento de campo consistió en identificar, verificar y describir los rasgos neotectónicos como tambien, en lo posible, la orientación, la inclinación y el sentido de movimiento de planos de falla. Igualmente, se determinó el campo de esfuerzos tectónicos a la escala del afloramiento por medio del análisis de planos estriados de orientación variable.

La interpretación de los datos permitió categorizar las fallas activas y potencialmente activas, considerando los siguientes parámetros: tipo de movimiento, longitud total de cada falla y longitud de tramos activos, porcentaje de tramo activo y magnitud máxima probable (MMP). Ante la ausencia de niveles datados para cuantificar movimientos de fallas, la tasa de actividad se definió semi-cuantitativamente en términos de los rasgos morfotectónicos presentes, de acuerdo con los valores especificados en la Tabla 1.2. Adicionalmente, se define un parámetro que mide el "Porcentaje de actividad", equivalente a la proporción de la longitud de falla con evidencias e indicios de actividad neotectónica.

Para el cálculo de MMP, se utilizaron ecuaciones empíricas que correlacionan la magnitud sísmica M_s (M) con la longitud de ruptura en superficie (LRS) (M Vs LRS), y magnitud sísmica con longitud e ruptura en profundidad (LRP) (M Vs LRP).

La magnitud M_s es equivalente a la denominada magnitud de momento M_w dentro del rango de magnitudes considerado en este estudio. Las longitudes se estimaron a partir de los datos geomorfológicos de campo, teniendo en cuenta los criterios mencionados. Para definir MMP se analizaron los valores de magnitud obtenidos mediante las diferentes relaciones estadísticas y luego se procedió a la determinación de un valor intermedio de mayor confiabilidad.

1.2.1. Magnitud(M) Vs longitud de ruptura superficial (LRS). Para obtener la magnitud máxima probable se emplearon las regresiones y parámetros utilizados por Slemmons (1977) y Wells & Coppersmith (1994), las cuales son ilustradas en la Tabla 1.3 y Tabla 1.4. La longitud de las rupturas de superficie (LRS) se tomó como equivalente a la longitud de los tramos de falla con rasgos de actividad neotectónica a lo largo de un segmento dado.

1.2.2. Magnitud(M) Vs longitud de ruptura en profundidad (LRP). A pesar de que no se tienen datos de longitud de ruptura de fallas en profundidad, se utilizó esta relación como método complementario para comparar con los valores obtenidos con longitud de ruptura en superficie.

Teniendo en cuenta que, según WELLS & COPPERSMITH, 1994, la longitud de ruptura en profundidad LRP es en promedio un 30% mayor que la longitud de ruptura en superficie (LRS), se calculó la magnitud (M) suponiendo un valor máximo de LRP equivalente a la longitud total de la traza de falla (L_t). Esta suposición implica que todo el segmento se puede activar durante un sismo mayor, generando una longitud de ruptura en profundidad equivalente a la longitud total del segmento en superficie. Las relaciones empíricas y los parámetros de regresión están dados en la Tabla 1.5.

**TABLA 1.3. REGRESION DE LONGITUD DE RUPTURA SUPERFICIAL (LRS) Vs
MAGNITUD (M) (Slemmons, 1977)**

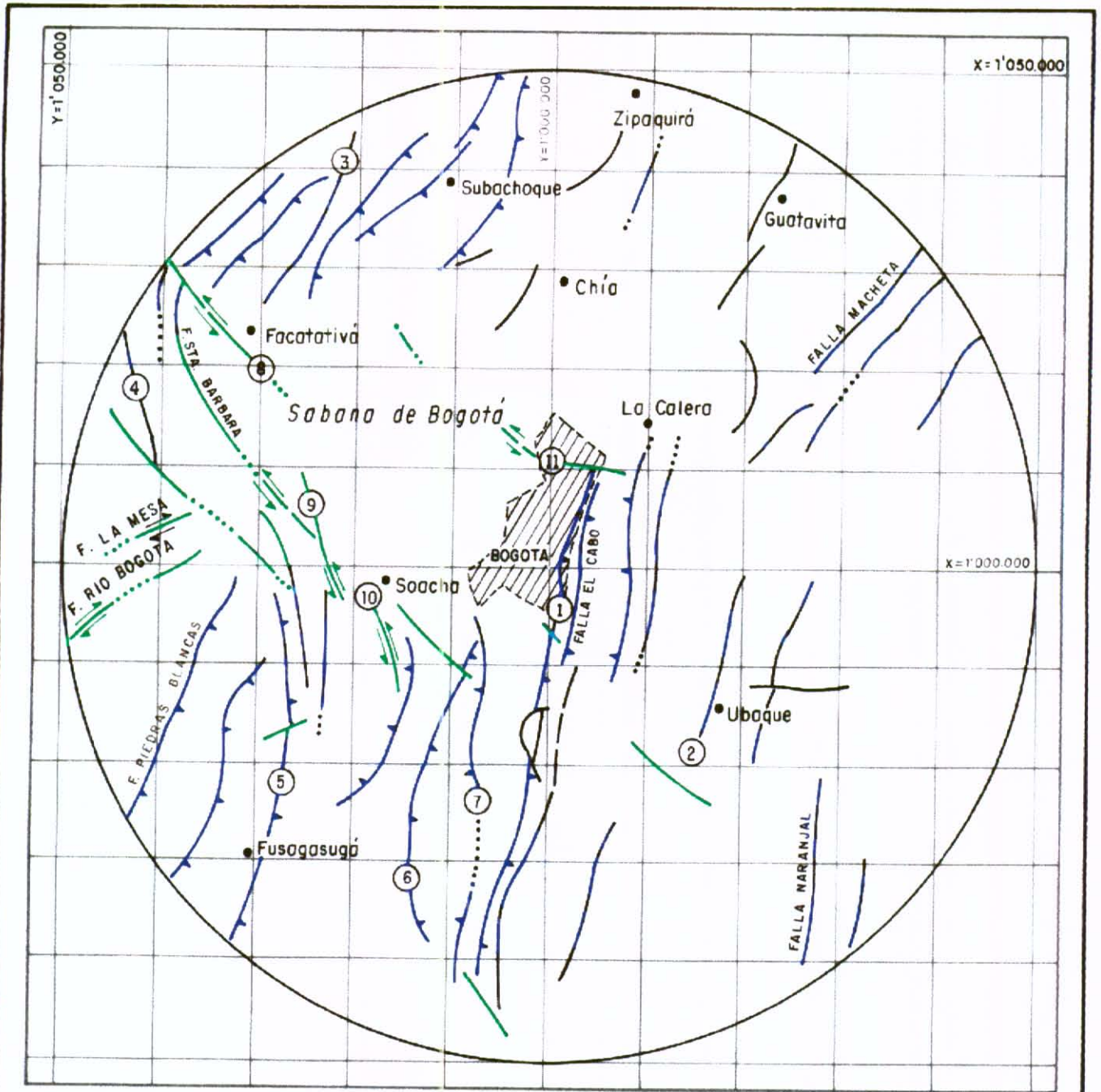
ECUACION	TIPO DE FALLA	a	b	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE CORRELACION
M = a + b.log LRS	Normal(N)	1,845	1,151	0,521	0,575
	Inversa (I)	4,145	0,717	0,167	0,932
	Rumbo(R)	0,597	1,351	0,694	0,775
	(I + R)	1,142	1,277	0,644	0,773

**TABLA 1.4. REGRESION DE LONGITUD DE RUPTURA SUPERFICIAL (LRS) Vs
MAGNITUD (Wells & Coppersmith, 1994)**




ECUACION	TIPO DE FALLA	a	b	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE CORRELACION
M = a + b.log LRS	Normal	4,86	1,32	0,34	0,81
	Inverso	5,00	1,22	0,28	0,88
	Rumbo	5,16	1,12	0,28	0,91
	Todos	5,08	1,16	0,28	0,89

TABLA 1.5. MAGNITUD Vs LONGITUD DE RUPTURA EN PROFUNDIDAD (LRP)
(Wells & Coppersmith, 1994)

ECUACION	TIPO DE MOVIMIENTO	a	b	DESVIACION ESTANDAR	COEFICIENTE CORRELACION
M=a +b.log LRP	Normal	4,34	1,54	0,31	0,88
	Inverso	4,49	1,49	0,26	0,93
	Rumbo	4,33	1,49	0,24	0,96
	Todos	4,38	1,49	0,26	0,94



CONVENCIONES

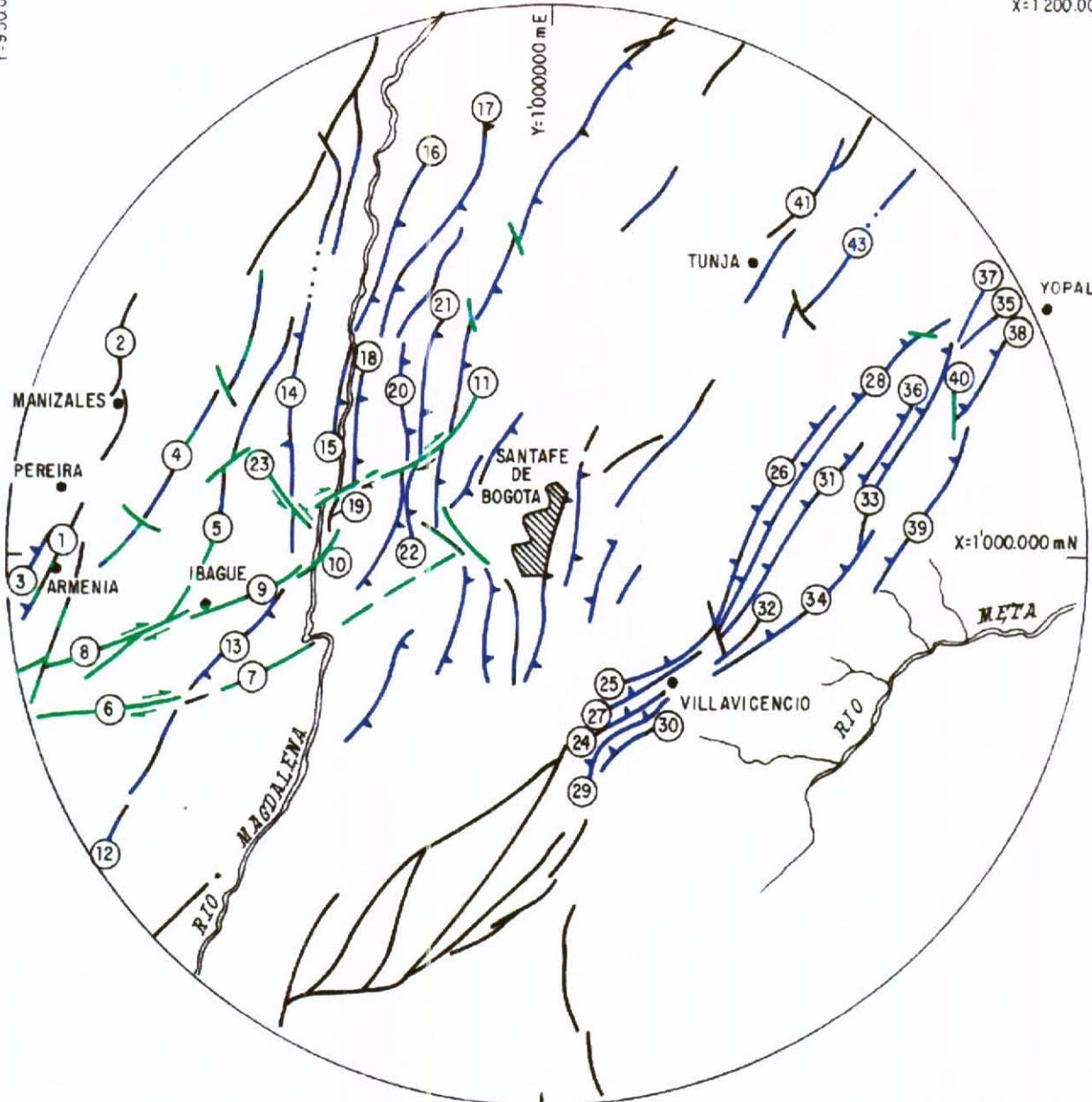
- ① Número de falla (Tabla N° 3.3)
-  Falla de movimiento principal de rumbo con sentido de movimiento
-  Fallas principales inversas
-  Fallas secundarias de rumbo e inversas

 INGEOMINAS	
<p>Mapa de fallas de la Región Central</p>	
Escala : 1 : 625,000	Fecha : Mayo / 96 Figura : 1.3

Y=950000

X=1'200.000

Y=1'000000 mE



- ① Número de falla (Tablas 3.1 y 3.2)
- Fallo Cubierta
- ▲▲▲ Fallo inversa
- Ciudad Capital de departamento
- - - Fallo Inferida
- Fallo con dirección de movimiento.

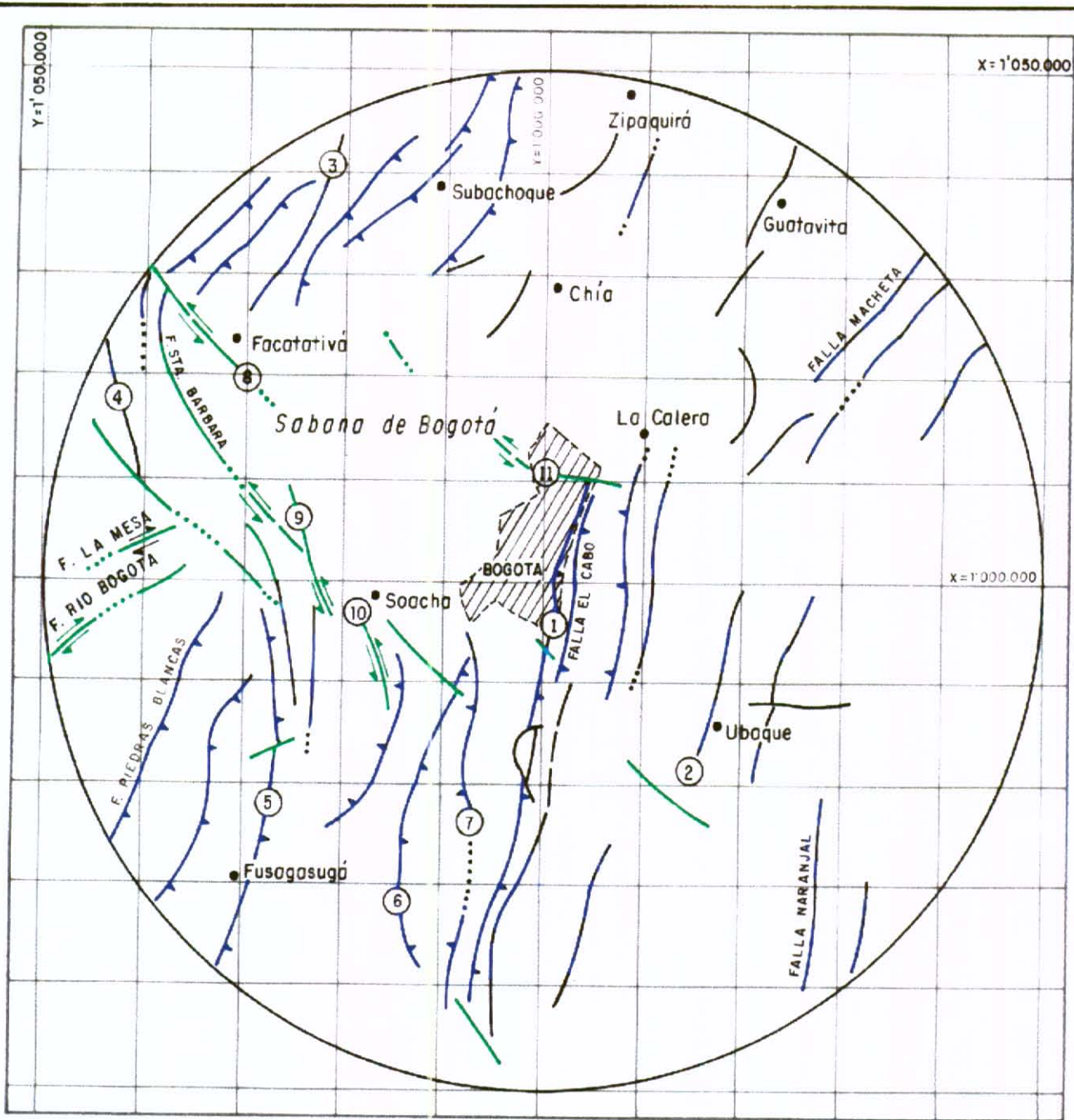


Mapa de fallas de las regiones Noroccidental y Suroriental

Escala: 1: 2,470,000

Fecha: Mayo / 96

Figura 1.2



CONVENCIONES

- ① Número de falla (Tabla 2.3)
- Falla de movimiento principal de rumbo con sentido de movimiento
- Fallas principales inversas
- Fallas secundarias de rumbo e inversas

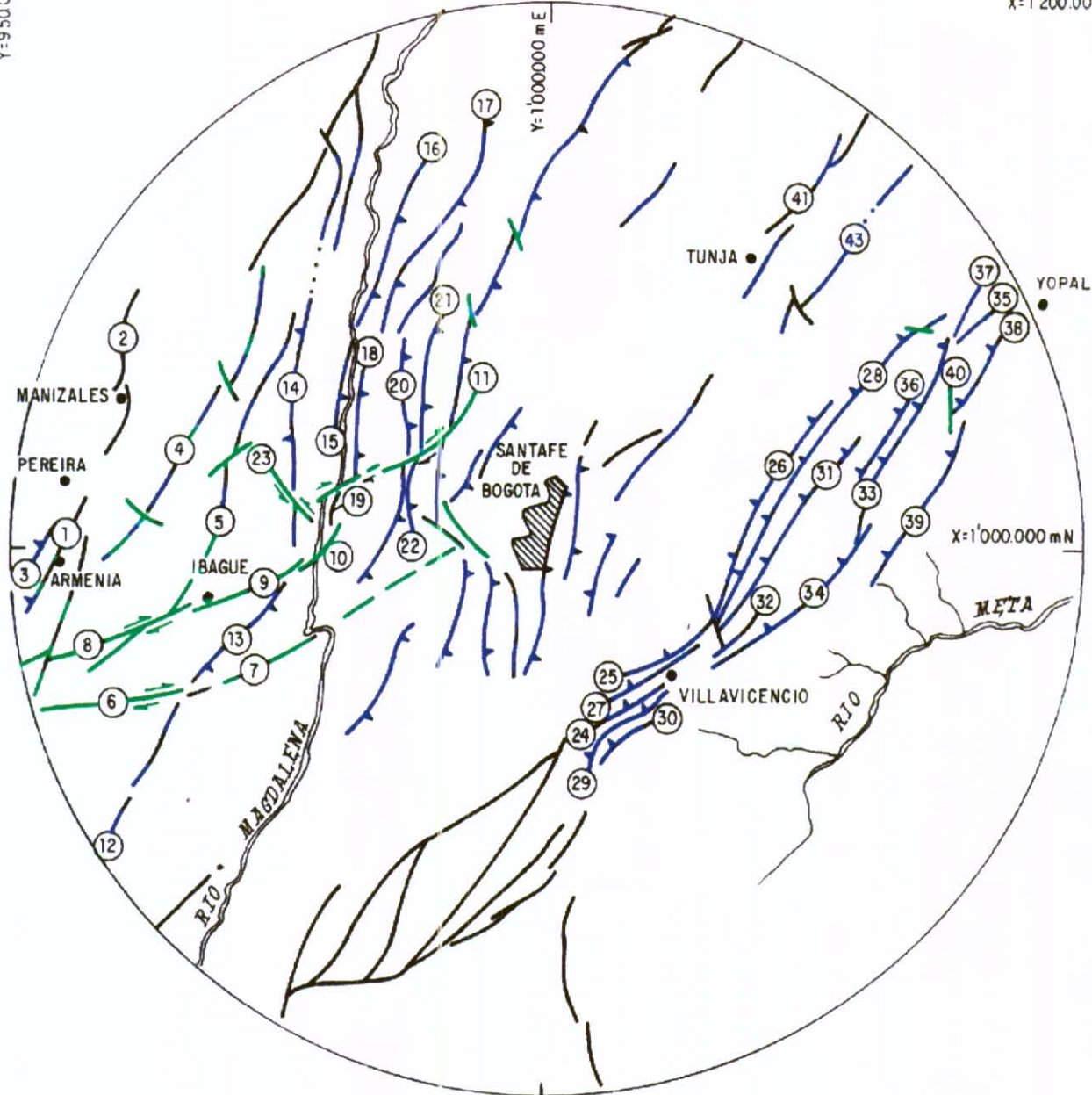
 INGEOMINAS	
<p>Mapa de fallas de la Región Central</p>	
Escala: 1 : 625,000	Fecha: Mayo / 96 Figura: 1.3

Y=950.000

X=1'200.000

Y=1'000.000 m E

X=1'000.000 m N



Número de falla (Tablas 2.1 y 2.2)

..... Falla Cubierto



Falla inversa



Ciudad Capital de departamento



Falla Inferida



Falla con dirección de movimiento.



Mapa de fallas de las regiones Noroccidental y Suroriental

Escala : 1 : 2,470,000

Fecha : Mayo / 96

Figura : 1.2

CAPITULO 2

2. MORFOTECTÓNICA

Además de la reflexión sísmica, gravimetría, magnetometría, geodesia, y estudios detallados en destapes y trincheras, las fallas activas se pueden estudiar con análisis de rasgos morfotectónicos obtenidos de sensores remotos, especialmente aerofotografías, y trabajo de campo.

Los rasgos neotectónicos se desarrollan por la acumulación, en el tiempo geológico, de formas topográficas producidas por rupturas y deformaciones sucesivas del terreno. El desarrollo y preservación de los rasgos morfológicos característicos de neotectónica requieren, en nuestro medio tropical andino, de la repetición de numerosos eventos sísmicos. En el presente trabajo se tuvieron en cuenta, principalmente, las geoformas cosísmicas, es decir los rasgos desarrollados cuando la falla rompe y deforma la superficie del terreno.

Los principales rasgos morfológicos de actividad neotectónica detectados son: escarpes de falla, facetas triangulares, valles y corrientes alineadas, drenajes desplazados y decapitados, ganchos de flexión, lomos de presión, lomos alineados, depresiones

cerradas y lagunas de falla, lomos de obturación, silletas o pasos de falla, basculamientos, interfluvios desplazados y cuencas de tracción, entre otros.

2.1. REGIÓN NOROCCIDENTAL

Se caracteriza por presentar fallas regionales de rumbo de orientación aproximada noreste-suroeste y este-oeste, con movimientos dextrales y sinistralas, y fallas inversas norte-sur. Para mayor ilustración, las fallas estudiadas se presentan en la Plancha No 1.

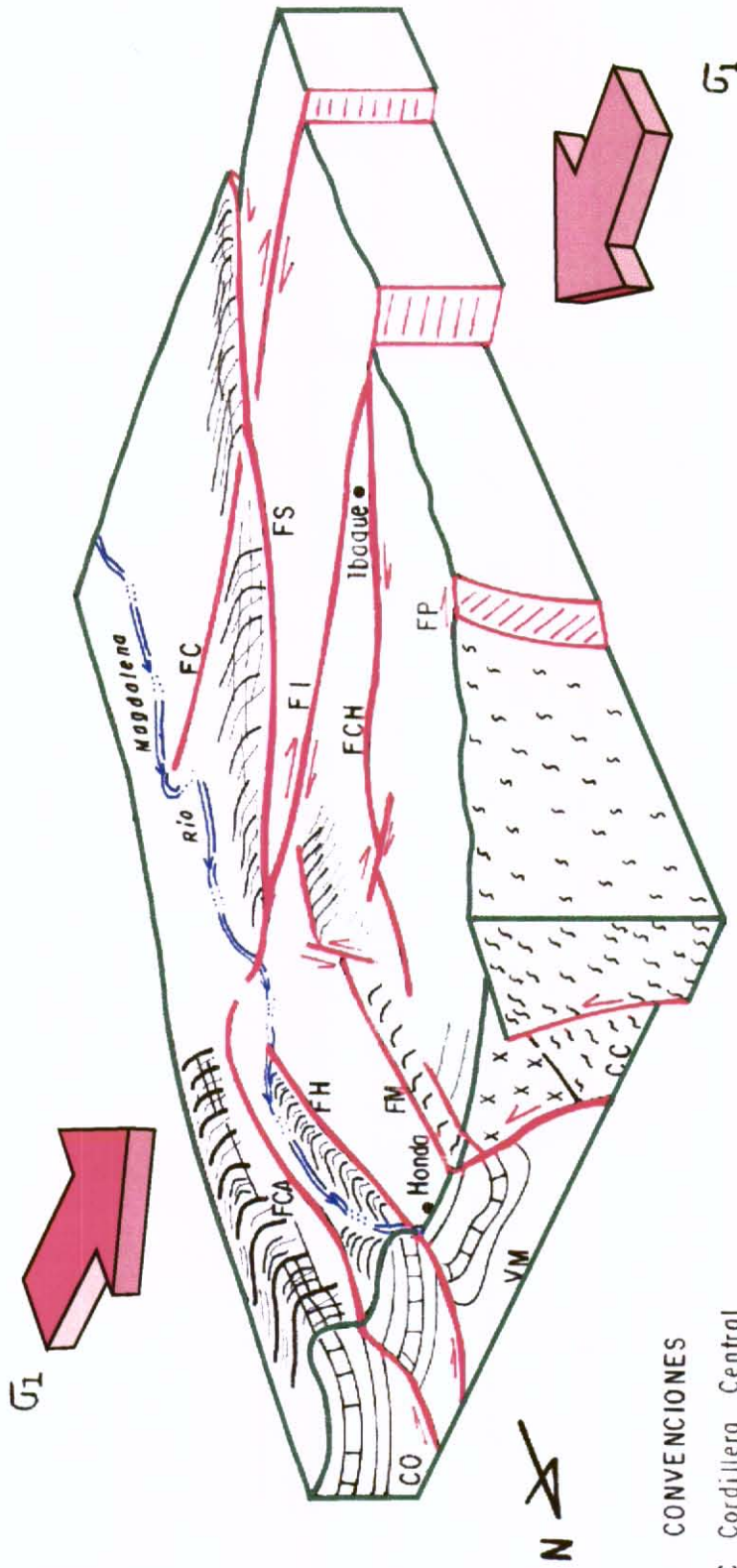
El Valle del Magdalena está limitado, con las Cordilleras Central y Oriental, por fallas inversas que buzcan al occidente y oriente, respectivamente. Las fallas inversas del Magdalena, especialmente las ubicadas en el borde occidental de la Cordillera Oriental, amortiguan el movimiento dextral de las fallas de rumbo de dirección este-oeste (Figura 2.1).

Las fallas seleccionadas para el estudio de neotectónica, se hizo con base a que son las de mayor cubrimiento e importancia regional. Estas fallas son las de Armenia, Manizales, Montenegro, Palestina, Chapetón, Cucuana, Ibagué, Doima, Viani, Samaria, El Chocho, Mulatos, Honda, Cambras, Cambao, Alto del Trigo, Bituima, La Salina y El Palmar. Se tomó en cuenta la información existente, especialmente de aquellas fallas ubicadas en sectores donde se carece de fotos aéreas a escala adecuada o áreas de difícil acceso.

A continuación se describen las fallas mencionadas, agrupándolas de acuerdo con el sistema principal a que pertenecen. Estas agrupaciones definen sistemas de falla cuyo movimiento responde cinemáticamente con la dirección de los esfuerzos tectónicos actuantes.

2.1.1. Sistema de Romeral. Este sistema de falla se extiende en Colombia, por aproximadamente 1.200 km de longitud, desde la frontera con Ecuador hasta la región del Caribe.

Su trazo se localiza en el flanco occidental de la Cordillera Central, en dirección N10°-20°E, y el plano principal de falla marca el contacto entre rocas Cretáceas de dominio oceánico y rocas Paleozoicas continentales.



CONVENCIONES

- CC Cordillera Central
- CO Cordillera Oriental
- FC Falla Cucuana
- FCA Falla de Comboo
- FCH Falla de Chapetón
- FH Falla de Honda
- FI Falla de Ibaque
- FM Falla de Mulatos
- FP Falla El Palmar
- FS Falla Samaria
- VM Valle del Magdalena



BLOQUE DIAGRAMA DE LA
REGIÓN NOROCCIDENTAL

Las fallas de Armenia, Manizales y Montenegro, están localizadas a 180 km aproximadamente, de Santafé de Bogotá. La caracterización neotectónica y sísmica de estas fallas, ha sido obtenida del análisis de información existente en la literatura geológica, sin trabajo de campo.

2.1.1.1. Falla de Armenia. Falla satélite del Sistema Romeral que atraviesa la ciudad de Armenia en dirección N10°E. Tiene como rasgo morfo-neotectónico sobresaliente, un escarpe de 20 metros de altura formado por levantamiento del bloque localizado al oeste de la falla.

La actividad neotectónica se evidencia por el desplazamiento de depósitos de flujos piroclásticos y lahares Cuaternarios, del denominado Glacis del Quindío (INGEOMINAS, 1991a), lo cual permite clasificarla como falla activa. Otros indicios de neotectónica son el control de parte del curso de la quebrada Quindío y afluentes de la quebrada Hojas Anchas, corte y desviación de drenajes y ruptura del terreno (Moreno y Vergara, 1993). La falla de Armenia está cartografiada por una longitud de 60 kms (INGEOMINAS, 1991a), de los cuales en 22 km se observaron indicios neotectónicos.

Con base en la tectónica de área, en la disposición geométrica de la traza de falla y las relaciones estratigráficas, la Falla de Armenia parece ser de movimiento inverso con plano buzando al oeste y con leve componente dextral. La Tabla 2.1 muestra las características neotectónicas más importantes de la Falla de Armenia, en donde se destaca una magnitud máxima probable de 6.8, un porcentaje de tramo activo del 37% y una tasa de actividad intermedia-alta a alta.

2.1.1.2. Falla de Manizales. No se dispone de adecuado conocimiento de la actividad neotectónica de esta falla. Se conoce por comunicación oral suministrada por profesores de la Universidad de Caldas, que la falla que afecta los depósitos que cubren la ciudad de Manizales. Según el Mapa Geológico generalizado del Departamento de Caldas (INGEOMINAS, 1993), la falla pasa por Manizales con dirección NNE-SSW, tiene una longitud total de alrededor de 40 km, de los cuales en 10 km la cartografiaron cortando los depósitos de flujos de lodo y fluvio-volcánicos del Cuaternario.

Aunque por la insuficiente información existente esta falla se incluye dentro del grupo de fallas de actividad desconocida, o incierta, se incluye en este informe un valor tentativo de la magnitud máxima probable la cual se calculó utilizando la longitud total de falla y el método de WELLS and COPPERSMITH (1994), obteniéndose un valor de MMP=6.5 (Tabla 2.1).

2.1.1.3. Falla de Montenegro. Falla activa, de orientación aproximada N10°E y buzamiento al oeste, cuya traza bordea el área urbana de Montenegro, en el Departamento del Quindío, formando un escarpe de aproximadamente 50 metros de altura sobre los depósitos Cuaternarios del Glacis del Quindío.

Según CLINE et al (1981) esta falla presenta evidencias e indicios de neotectónica por un trayecto de 20 km, lo que permite calcular un porcentaje de tramo activo de 44%, una magnitud máxima probable de 6.7 y una tasa de actividad intermedia-alta a alta (Tabla 2.1).

2.1.2. Sistema de Palestina. En el área de estudio, el Sistema de Palestina sigue una dirección promedio de N30°E. Está traza desde los alrededores del Volcán Nevado del Ruiz, prolongándose hacia el norte hasta la Serranía de San Lucas, por una longitud aproximada de 250 km. De acuerdo con FEININGER Y BARRERO (1970), el movimiento de la falla en el Terciario fue de 27,5 km en sentido dextral.

COLLINS et al (1981) estimaron una tasa de movimiento neotectónico entre 0,06 y 0,4 mm/año, equivalente a una tasa de actividad baja a intermedia. Según CLINE et al (1981), esta falla presenta indicios de actividad neotectónica en un trayecto de 200 km. De acuerdo con los mapas geológicos consultados, el sistema de la falla se compone de al menos 5 segmentos separados, pero continuos, que se distribuyen de manera escalonada (Plancha No 1). A continuación se caracteriza el segmento que cruza por el Nevado del Ruiz, el cual se denomina Falla de Palestina, debido a que parece corresponder al trabajado por COLLINS et al (1981).

2.1.2.1. Falla de Palestina. Segmento de aproximadamente 60 km de largo y plano de falla no determinado, probablemente subvertical. No se tienen datos sobre la extensión ni

la ubicación de los rasgos morfo-neotectónicos a lo largo de la traza de falla, sin embargo, considerando la longitud total y la ecuación de magnitud Vs longitud de ruptura en profundidad (LRP), se le calculó una magnitud máxima probable de 7.0 (Tabla 2.1).

2.1.3. Sistema Chapetón-Pericos. Limita esquistos Paleozoicos del Complejo Cajamarca, con neises y anfibolitas del Precámbrico.

Está conformado por varios segmentos que se extienden por aproximadamente 120 kms, siguiendo la traza una trayectoria variable entre N20°E y N50°E y plano de falla buzando desconocido, probablemente al oeste.

2.1.3.1. Falla Chapetón. Con esta denominación se describe un segmento de falla de 25 km de longitud, que hace parte del Sistema Chapetón-Pericos, que se reconoce en la Inspección de Policía de Cay, en el municipio de Ibagué.

De acuerdo con interpretaciones geológicas y con la dirección del campo de esfuerzos operante en la región, se considera que la falla es de movimiento principal inverso, con ligero componente dextral.

VERGARA y MORENO (1992) describen sobre esta falla, un trayecto de aproximadamente 5 km con los siguientes indicios débiles de neotectónica: alineamiento de las quebradas Cay y Las Animas, facetas triangulares, brecha, gauge y silletas (Mapa No 1); la calidad de los rasgos mencionados permite clasificarla como potencialmente activa.

De acuerdo con sus características morfotectónicas, dicha estructura presenta un porcentaje de tramo activo del 20% y se le calcula una magnitud máxima probable de 6.0 (Tabla 2.1).

2.1.4. Sistema del Cucuana-Río Bogotá. Atraviesa el Departamento del Tolima, en dirección N70°E, continuándose por Cundinamarca. Presenta una longitud superior a 150 km. La principal característica es el control estructural de los ríos Cucuana, Bogotá y parte del Magdalena; cruza la Cordillera Central, el Valle del Magdalena y se prolonga hasta el flanco occidental de la Cordillera Oriental (Plancha No 1).

Está compuesto por fallas de rumbo dextral, de plano subvertical y orientación paralela a las fallas de Ibagué y de Viani, que son sistemas de falla se caracterizados porque atraviesan las principales estructuras norte-sur de la cuenca del Magdalena.

FRANCO y GOMEZ (1978) cartografiaron este sistema de fallas desde el río Cucuana, lo continúan por la deflexión del río Magdalena en Girardot y la siguen por el río Bogotá. De acuerdo con estos autores, la actividad neotectónica se marca muy bien en imágenes ERTS.

El sistema del Cucuana está desplazado ligeramente por el Sistema de Falla Samaria-La Colorada, formando dos segmentos de 55 km de logitud cada uno: Falla del Cucuana y Falla del Cucuana Este (Plancha No 1).

2.1.4.1. Falla del Cucuana. Atraviesa el Batolito de Ibagué y controla el cauce del río Cucuana. En un trayecto de 22 km presenta indicios morfo-neotectónicos moderados y débiles, principalmente facetas triangulares, desplazamiento de corrientes e interfluvios y silletas. Los anteriores rasgos permiten clasificarla como falla potencialmente activa , con tasa de actividad intermedia y magnitud máxima probable de 6.7 (Tabla 2.1).

2.1.4.2. Falla del Cucuana Este. Falla potencialmente activa que cruza el Valle del Magdalena, donde está cubierto por depósitos volcano-clásticos recientes del Abanico del Espinal. En este trayecto se observaron indicios muy débiles de neotectónica.

VERGARA (1987) detectó en una distancia de alrededor de 5 km de longitud, en los alrededores de Flandes (Tolima), drenajes incipientes y pequeñas deformaciones superficiales del terreno posiblemente ocasionados por actividad de la falla. De acuerdo con lo anterior, se infiere para esta falla tasas de actividad baja, lo cual concuerda con el porcentaje de tramo activo del 9%. Con base en la longitud de la extensión de la deformación superficial, se calculó una magnitud máxima probable Ms de 6.5 (Tabla 2.1).

2.1.5. Sistema de Ibagué. Hace parte de un conjunto de fallas transversales, de dirección promedio N75°E, que cruza la Cordillera Central, el Valle del Magdalena y parte de la Cordillera Oriental.

Atraviesa el Departamento del Tolima, pasando por el casco urbano de Ibagué, donde afecta los depósitos del Plioceno Superior y Holoceno que conforman el Abanico fluvio-volcánico de Ibagué (Vergara, 1989). McCOURT y otros (1984) por medio de varios segmentos adicionales hacia el oeste, la prolongan hasta los Departamentos del Quindío y Valle del Cauca. En su extremo oriental, luego de atravesar el río Magdalena, la Falla de Ibagué flexiona y corta estructuras sinclinales y anticlinales del flanco occidental de la Cordillera Oriental.

El movimiento dextral de la Falla de Ibagué genera fallamientos inversos que se transmiten a la Falla de Cambao, y probablemente a la de Honda, localizadas sobre el cuadrante de compresión al noreste de la falla.

El Sistema de la Falla de Ibagué tiene por lo menos tres segmentos, dentro del área de estudio, que suman en total 125 km de longitud, denominados en este trabajo Falla del río Cocora, Falla de Ibagué y Falla de Piedras.

2.1.5.1. Falla del Cocora. Controla de manera rectilínea el cauce del río Cocora mostrando, en aproximadamente 33 km de longitud, indicios morfotectónicos fuertes a moderados, en rocas intrusivas del Jurásico. Los indicios morfotectónicos, entre los que sobresalen las facetas triangulares, silletas (Figura 2.2) e interfluvios desplazados, permiten calificarla como activa a potencialmente activa.

A esta falla se le calculó una tasa de actividad intermedia y magnitud máxima probable MMP de 6.9 (Tabla 2.1).

2.1.5.2. Falla de Ibagué. La traza de falla cruza la ciudad de Ibagué, donde deriva su nombre, y afecta los depósitos vulcano-clásticos Cuaternarios del Abanico de Ibagué (Figura 2.3). Su longitud total es de 45 km, desde el Boquerón hasta cerca de la localidad de Piedras. Se destaca por presentar los rasgos neotectónicos más variados, abundantes y contundentes de la región. RAASVELDT y CARVAJAL (1956) fueron los primeros en cartografiar su ruptura cuaternaria en el Abanico de Ibagué. Trabajos posteriores demuestran movimiento lateral derecho en el Cuaternario (Diederix et al, 1987; Murcia y Vergara, 1987).

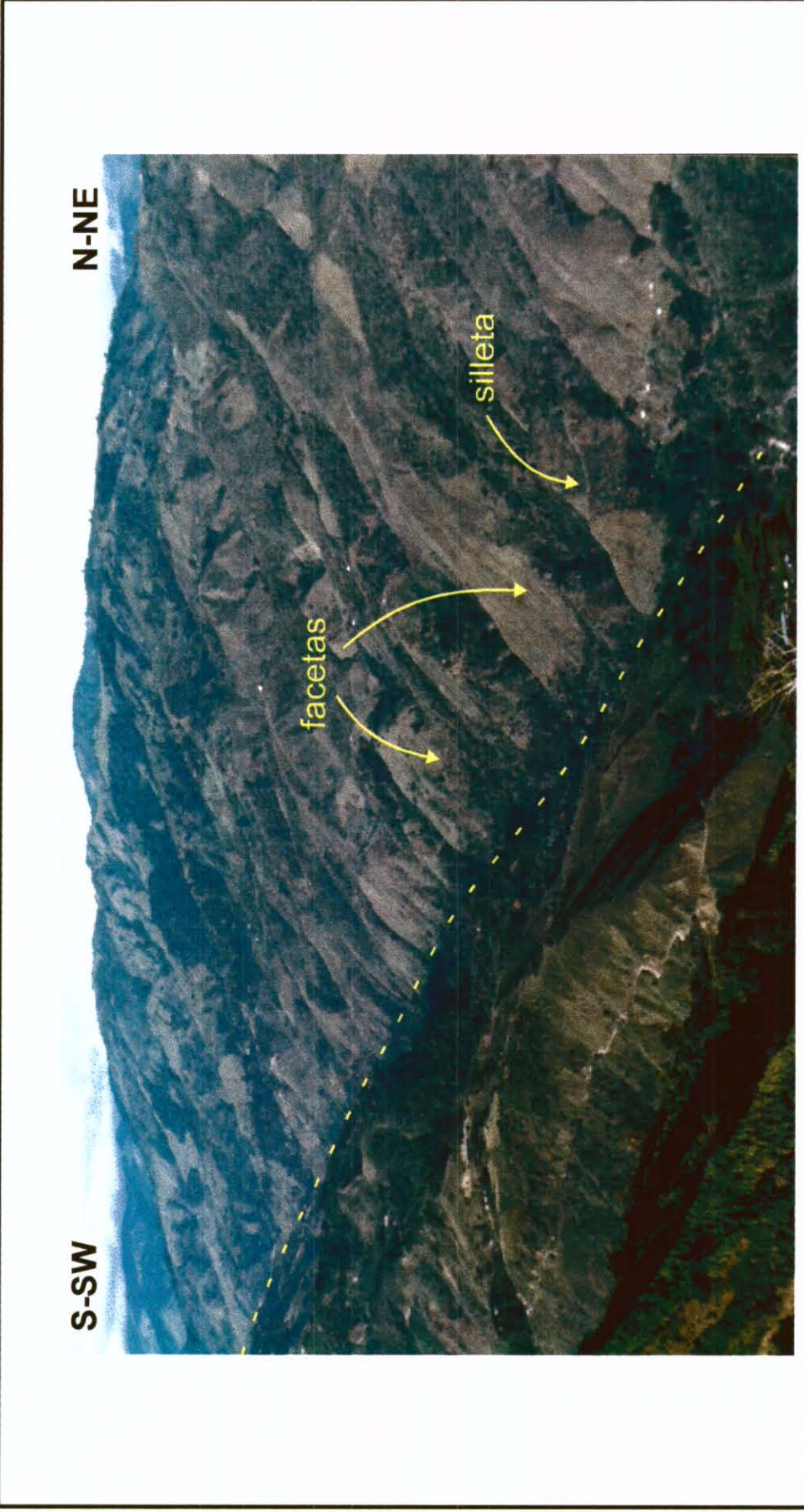


Figura 2.2 : Falla del Río Cocora : Control rectilíneo del río, facetas triangulares y silletas de falla afectando rocas metamórficas de la Cordillera Central. Falla de rumbo lateral derecha de orientación aproximada N70°E.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

NE

SW

Escarpe de falla



Figura 2.3 : Falla de Ibagué; escarpe de falla desarrollado sobre depósitos cuaternarios del Abanico de Ibagué, barrio El Jordán. Falla de rumbo lateral derecha de orientación aproximada N70°E.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

VERGARA (1989) encuentra evidencias de actividad tectónica en el Holoceno e identifica, sobre un trayecto de 40 km, más de 30 lomos de presión asociados al movimiento de la falla. A lo largo de su traza se observan, escarpes de falla bien definidos (Figura 2.4), estratos desplazados, estrias de fricción, corrientes alineadas y desplazadas, polvo de falla, depresiones cerradas y abombamientos de la superficie. Cerca de El Salado bascula y corta depósitos lagunares del Holoceno, lo que sumado a las demás características señaladas se le clasifica como falla activa.

DIEDERIX et al (1987) calcularon 600 metros de desplazamiento de rumbo, con base en un lomo cortado por la falla. De acuerdo con lo anterior, y considerando la calidad de los rasgos, la tasa de movimiento de la falla de Ibagué estaría comprendida en el rango alto.

La interpretación de datos geológicos, morfotectónicos y microtectónicos indican que es una falla rumbo-deslizante, con movimiento lateral derecho. La falla tiene porcentaje de tramo activo de 88% y se calculó una magnitud máxima probable de 7.0 (Tabla 2.1).

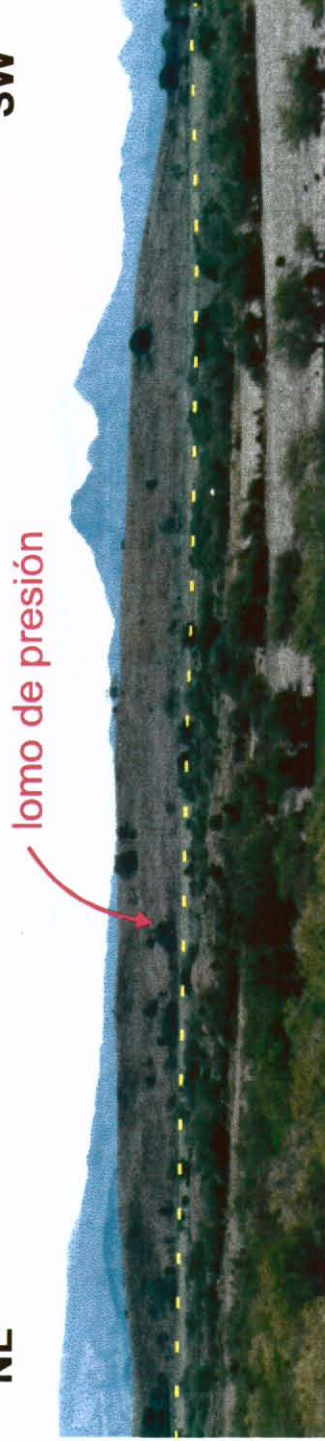
2.1.5.3. Falla de Piedras. Es la prolongación hacia el este de la Falla de Ibagué, y su dirección es aproximadamente N70°E. En el sector donde atraviesa el río Magdalena, la trayectoria de la falla cambia a dirección norte-sur. CORRIGAN (1967) la conecta con la Falla de Cambao, la cual podría ser su continuación. Este segmento, que hace parte del Sistema de Ibagué, mide 20 km de longitud total, de los cuales en 14 km presenta indicios moderados a débiles de neotectónica. Esta falla puede ser clasificada y descrita como potencialmente activa. De acuerdo con las características observadas, esta falla tiene porcentaje de tramo activo del 70%, tasa de actividad intermedia y magnitud máxima probable de 6.4 (Tabla 2.1).

NW



SE

NE



SW

Figura 2.4 : Vista frontal y lateral de un lomo de presión de escala hectométrica situado a lo largo de la traza de la falla de Ibagué (en punteado) en el Abanico de Ibagué.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

2.1.6. Sistema de Viani. De acuerdo con la Plancha geológica 227-La Mesa (Ingeominas, 1993b), la traza principal del sistema tiene dirección N60°E y movimiento de rumbo lateral derecho, con desplazamiento de aproximadamente 1000 metros en rocas del Cretáceo. Se localiza inmediatamente al norte del Sistema de Ibagué y podría obedecer al mismo campo de esfuerzos tectónicos. Hacia su extremo noreste, este sistema cambia de dirección paralelizándose con los sistemas de falla del Magdalena.

Hacia el sureste, su continuidad parece estar indicada por una desviación del cauce del río Magdalena y un salto en las unidades litológicas al sur de Ambalema (Tolima), rasgo que se aprecia muy bien en imagen Landsat.

2.1.6.1. Falla de Viani. Es el segmento ubicado al noreste del sistema, el cual atraviesa por la localidad de Viani (Plancha No 1). Su traza presenta una longitud aproximada de 40 km, de los cuales en 10 km muestra indicios muy débiles de neotectónica.

Entre las principales características dentro del Cuaternario se tienen, escarpes de falla erosionados, pasos de montaña en forma de silla, interfluvios desplazados, drenajes controlados y una probable cuenca de tracción. De acuerdo con lo observado, esta falla se clasifica como potencialmente activa, de tasa de actividad baja y de magnitud máxima probable de 6.5 (Tabla 2.1).

2.1.7. Sistema Samaria-La Colorada. Las fallas que conforman este sistema son principalmente de movimiento inverso dominante, con plano de falla buzando al sureste y una componente de rumbo lateral derecho.

Al norte de Chaparral, la Falla Samaria-La Colorada presenta una dirección promedio N 20° E (Núñez et al, 1984). Allí las rocas intrusivas del Batolito de Ibagué están cabalgado rocas sedimentarias del Cretáceo y Terciario. En el área de trabajo el sistema presenta una longitud total de 125 km, en donde se diferenciaron tres segmentos denominados Falla El Chocho, Falla de Doima y Falla Samaria-La Colorada. Se describen las dos primeras, por ser las que presentan indicios de neotectónica.

2.1.7.1. Falla El Chocho. Falla principalmente inversa, de plano inclinado al oriente y componente de rumbo en sentido lateral derecho, según se deduce de la dirección del

campo de esfuerzos tectónicos de la región. Su traza recorre el borde oriental del Batolito de Ibagué por 30 km y cruza por el área urbana de Chaparral (Tolima), en dirección general N30°E.

MORENO (1992) reporta ruptura de los sedimentos del Plioceno que conforman el Abanico de Chaparral. Este autor describe, en un trayecto aproximado de 6 km sobre el abanico, quiebres suaves en la superficie, rupturas del Cuaternario y corrientes alineadas. Analizando los datos compilados, la falla podría catalogarse como potencialmente activa, con tasas de actividad baja y magnitud máxima probable de 6.2 (Tabla 2.1).

2.1.7.2. Falla de Doima. Falla de 35 km que corresponde a la prolongación hacia el norte de la Falla Samaria-La Colorada. En el trayecto donde la falla cruza los depósitos Cuaternarios del Abanico de Ibagué, se detectaron indicios fuertes de actividad en el Cuaternario (Plancha No 1): entre el peaje del Alto de Gualanday y Doima, la falla presenta control y alineamiento de cauces de corrientes, trincheras y escarpes de falla (Figura 2.5), manantiales de agua y quiebres de pendiente.

Se clasifica como una falla activa, con porcentaje de tramo activo del 30%, tasa de actividad alta y magnitud máxima probable de 6.7 (Tabla 2.1).

NE

SW

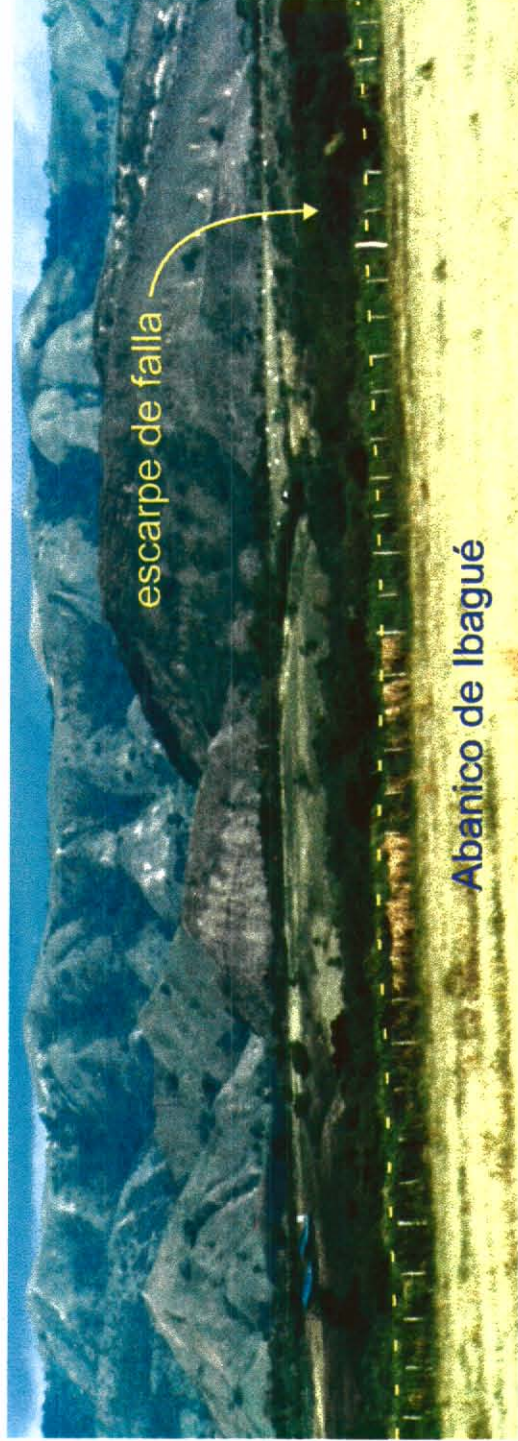


Figura 2.5 : Falla de Doima : escarpe de falla sobre el Abanico de Ibagué; se observa un drenaje alineado con la traza de falla (en punteado). La dirección de la falla es N30E y el sentido de movimiento es inverso - dextral. Al fondo se observan rocas sedimentarias de la formación Gualanday en el bloque cabalgante. El plano de falla buza al SE.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

2.1.8. Sistema del Magdalena. Son fallas principalmente inversas que buzanan al este, cuya traza es aproximadamente perpendicular al esfuerzo compresivo principal σ_1 . Las distintas geoformas de probable origen neotectónico son escasas, lo cual se atribuye a la poca variedad de geoformas de origen tectónico asociadas a fallas inversas.

Se agrupan en el sistema de Magdalena las fallas de Mulatos, Honda, Cambras, Cambao, Alto del Trigo, Bituima y La Salina. En rocas sedimentarias del Plio-cuaternario, y a lo largo de las fallas de Mulatos y Honda, se presentan depresiones, valles y corrientes alineados, silletas y cabalgamientos, mientras que en sedimentos del Cuaternario se observa deformación superficial muy leve y quiebres de pendiente suaves.

2.1.8.1. Falla de Mulatos. En el sector correspondiente al Departamento del Tolima, la falla limita rocas ígneas intrusivas de la Cordillera Central, de edad Jurásica, y rocas sedimentarias Plio-cuaternarias del Valle del Magdalena.

Es una falla de 60 km de longitud, ubicada entre las localidades de Venadillo y Mariquita (Plancha No 1). La traza tiene dirección aproximada norte-sur, con plano de falla buzando al oeste. Su trayectoria está bien definida por el cambio de pendiente rectilíneo entre la cordillera y el valle, a lo largo del cual se alinean corrientes de borde montañoso.

De acuerdo con el marco geológico, tectónico y con la orientación del campo de esfuerzo medido, el movimiento de la falla es principalmente inverso y de componente sinistral.

En un trayecto de 20 km, se detectaron los siguientes indicios neotectónicos débiles: abombamientos, drenajes alineados, facetas triangulares erosionadas y quiebres de pendiente en depósitos del Plioceno (Plancha 1). LOZANO (1984) reporta en el norte de La Victoria (Caldas), aluviones cuaternarios, en la parte occidental, colgados con respecto a sus equivalentes del bloque oriental.

A pesar de que fue catalogada por VERGARA (1988) como probablemente inactiva, a lo largo de esta falla se produjo un levantamiento de la Cordillera Central de 600 metros, medidos a partir de la depositación de la Formación Mesa, que fue datada por DUEÑAS y CASTRO (1981) con 5 m.a de edad, indicativo de actividad tectónica en el Plio-cuaternario.

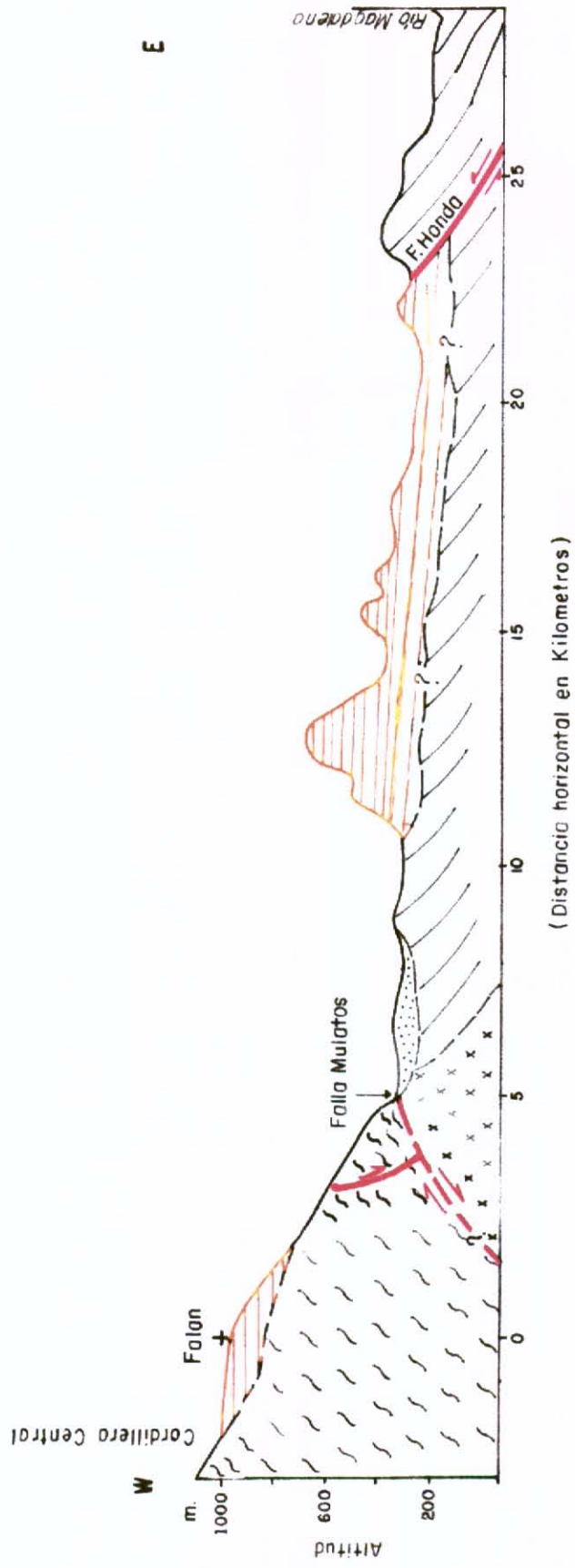
Tomando como referencia una antigua superficie de erosión, donde probablemente se depositó la Formación Mesa (Figura 2.6), y con base en las dataciones y los 600 metros de levantamiento de la cordillera, se calcula para esta falla una velocidad de movimiento de 0.12 mm/año, correspondiente a tasa de actividad baja a intermedia. La magnitud máxima probable calculada es de 6.7 (Tabla 2.1.)

2.1.8.2. Fallas de Honda. Son dos segmentos que siguen aproximadamente la misma trayectoria del río Magdalena, y que están ubicados entre Ambalema y Honda y entre Honda y el norte de La Dorada. Estas fallas se caracterizan por poner en contacto rocas del Mioceno del Grupo Honda, que constituye el bloque cabalgante, y rocas de la Formación Mesa del Plioceno. Son fallas de tipo inverso y probablemente con ligero movimiento de rumbo. La dirección de la traza es variable, en promedio N10°E, y el plano de falla tiene aproximadamente 30° de inclinación el oriente.

Los dos segmentos, el uno entre Honda y Ambalema (Falla de Honda Sur) y el otro entre Honda y el límite entre Cundinamarca y Boyacá (Falla de Honda Norte), suman en total aproximadamente 115 km de longitud.

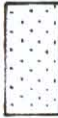



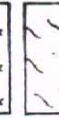
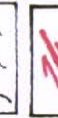
1. Falla de Honda Sur: Tiene alrededor de 45 km de longitud. El rasgo morfotectónico más destacado para definir su traza, es un escarpe que se extiende casi por toda su trayectoria, el cual representa un contraste topográfico entre las rocas del Grupo Honda, cuyos estratos se inclinan al oriente, y capas casi horizontales de la Formación Mesa. Trabajos anteriores, entre Honda y Ambalema, concluyen que esta falla es potencialmente activa (Vergara, 1988).

Durante el desarrollo del presente proyecto se identificaron, en 16 km de longitud, indicios morfotectónicos de actividad en el Plio-pleistoceno. Los rasgos encontrados son de intensidad moderada a débil: drenajes alineados, silletas, lomos lineares, escarpes erosionados, cabalgamientos de La Formación Mesa sobre el Grupo Honda (Figura 2.7), brecha y cantos estridados. En las llanuras aluviales y depósitos de terrazas del Holoceno, se presentan los siguientes indicios: depresiones, lagunetas, valles alineados y abombamientos en la superficie (Plancha No 1).



(Distancia horizontal en Kilometros)

LEYENDA

-  Aluviones Cuaternarios
-  Formación Mesa: Areniscas, conglomerados, arcillolitas (Plioceno)
-  Grupo Honda: Areniscas, conglomerados (Mioceno)
-  Stock de Mariquita: Granodiorita (Jurásico)
-  Complejo Cajamarca: Esquistos, filitas, cuarcitas (Paleozoico)
-  Fallo y Sentido del Movimiento



CORTE GEOLÓGICO E-W, VALLE DEL
MAGDALENA, SECTOR DE FALAN

W

E



Figura 2.7 : Falla de Honda : se aprecian las areniscas y conglomerados del grupo Honda (Th) del Mioceno, cabalgando sobre capas horizontales de la formación Mesa (Tm) del Plio-Pleistoceno. Foto tomada sobre la traza de falla, 1 km al norte de la intersección con el río Sabandija. Falla inversa de orientación aproximada NS.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

Teniendo en cuenta el número, longitud y preservación de los indicios de neotectónica, la Falla de Honda sur se define con un porcentaje de tramo activo del 35%, tasa de actividad baja-intermedia y magnitud máxima probable de Ms de 6.7 (Tabla 2.1).

2. Falla de Honda Norte: la longitud se calcula en 70 km, de los cuales en 5 km hay leves indicios de neotectónica. Lo anterior la cataloga como potencialmente activa. A esta falla se le asignan tasas de actividad muy baja a baja y magnitud máxima probable de 6.1 (Tabla 2.1).

2.1.8.3. Fallas de Cambras-Cambao. Se diferenciaron las fallas de Cambras (inversa), Cambao (inversa) y Cambao Sur (inversa dextral). Este sistema de falla separa rocas sedimentarias del Grupo Honda, de edad Terciario, y rocas sedimentarias del Cretáceo y del Terciario. Se ubican entre las fallas de Honda y del Alto del Trigo y se prolongan por aproximadamente 150 km (Plancha No 1).

1. Falla de Cambras: es una falla de tipo inverso, de dirección promedia N25°E y plano de falla buzando al oriente. Se reconoció en un trayecto de cerca de 70 km, entre Rioseco y la localidad de Cambras. En dicho recorrido se observó, en un tramo de aproximadamente 5 kms, interfluvios desplazados y facetas triangulares desgastadas. Esta falla tiene porcentaje de tramo activo del 7%, tasa baja de actividad y se cataloga como potencialmente activa. Su magnitud máxima probable es de 6.2 (Tabla 2.1)

2. Falla de Cambao Norte: cruza cerca del área urbana de Cambao, sobre la margen derecha del río Magdalena, y se prolonga en dirección N25°E por alrededor de 60 km. Frente a la Hacienda La Plata, en el Cerro Morrocoyal, municipio de Cambao, se presentan facetas triangulares en un trayecto de 3 km. Con estos pocos rasgos observados, a la Falla de Cambao se le cataloga como potencialmente activa, con tasa de actividad muy baja y magnitud máxima probable de 6.0 (Tabla 2.1).

3. Falla de Cambao Sur: tiene alrededor de 20 km y parece ser continuación del Sistema de Falla de Ibagué. Como rasgos de neotectónica, se observó un pequeño depósito de abanico cortado por la falla y abombamientos en depósitos de llanura aluvial. Estos indicios están presentes por un tramo de alrededor de 3 km. De acuerdo con las

características señaladas. esta falla se considera activa, con porcentaje de tramo activo del 15%, tasa de actividad intermedia y magnitud máxima probable de 6.2 (Tabla 2.1).

2.1.8.4. Falla Aito del Trigo. El sistema se ubica inmediatamente al oriente de las Fallas de Cambras y Cambao. Se describe el segmento norte, o Falla del Alto del Trigo, con 90 km de largo (Plancha 1).

Los principales rasgos de falla son pasos de montaña en forma de silletas e intensa deformación en rocas Pre-cuaternarias. En un tramo de 5 km, al noreste de Guaduas, se observaron los siguientes indicios débiles neotectónica: interfluvios desplazados, depósitos Cuaternarios confinados y facetas triangulares. Según lo anterior, esta falla se cataloga como de tasa de actividad muy baja y de magnitud máxima probable de 6.2 (Tabla 2.1).

2.1.8.5. Falla de Bituima. Se ubica al oriente de la Falla del Alto del Trigo y cruza cerca de las poblaciones de Utica y Viani. La Falla de Viani la divide en los segmentos norte y sur, cada uno de ellos con una longitud 60 y 30 km, respectivamente. Son fallas inversas, de dirección promedio N15°E y buzamiento al oriente, cuya traza tiene dirección paralela a las principales estructuras de la Cordillera Oriental.

1. Falla de Bituima Norte: se reconocieron algunos indicios neotectónicos de calidad moderada a débil, en los alrededores del municipio de Utica. En trayecto de aproximadamente 12 km se observan pasos de montaña en forma de silleta, facetas triangulares, drenajes controlados, lomos de obturación, interfluvios desplazados y cuaternarios confinados.

De acuerdo con lo anterior, este segmento tiene porcentaje de tramo activo del 20% y tasa de actividad baja. Así mismo, se clasificó como falla potencialmente activa y se calcula una magnitud máxima probable de 6.3 (Tabla 2.1).

2. Falla de Bituima Sur: en un trayecto de cerca de 7 km al sur de la localidad de La Sierra (Cundinamarca) se presentan geformas bien conservadas, alineadas con la traza de falla: silletas, trincheras y contraescarpes. SARRIA (1990) asocia algunos sismos ocurridos en esta zona, con la actividad de la falla. Las consideraciones anteriores

parecen sugerir que este segmento de falla es potencialmente activo y se le calcula una magnitud máxima probable de 6.2 (Tabla 2.1).

2.1.9. Sistema Noroeste. Son fallas de corta longitud, con movimiento principal en sentido lateral izquierdo. En la región considerada, se reconocieron entre las más importantes de este sistema, las fallas de El Palmar y la de Buenos Aires. Aunque esta última carece de estudios que permitan caracterizar su actividad neotectónica, VERGARA (1989) observó lomos lineares, depresiones y pequeños quiebres de pendiente probablemente relacionados con dicho accidente tectónico.

2.1.9.1. Falla El Palmar. Denominada Falla Megué-río Venadillo, por CUERVO et al (1989), quienes la catalogan como activa. Tiene movimiento rumbo-deslizante, lateral izquierdo, dirección N45°W y alrededor de 20 kms de longitud. Desplaza la roca ígnea intrusiva del Batolito de Ibagué, del Jurásico, a lo largo del cual se presentan facetas triangulares y corrientes alineadas. Estratos desplazados, manantiales y deflexión de corrientes, ocurren en depósitos de vertiente del Abanico de Lérida, de edad Pleistoceno (Mapa No 1). Estos indicios se observaron por aproximadamente 9 km. De acuerdo a los rasgos anotados, a la falla le corresponde un porcentaje de tramo activo del 45%, y se calcula una magnitud máxima probable de 6.2 (Tabla 2.1).

2.2. REGION SURORIENTAL

Comprende el flanco oriental de la Cordillera Oriental y los Llanos Orientales. Tiene las siguientes características: 1) la Cordillera está constituida por rocas sedimentarias, metamórficas y una serie de pequeños cuerpos intrusivos básicos que forman un angosto y discontinuo cinturón magmático en el borde llanero (Fabre, 1985); 2) los Llanos Orientales constituyen un relleno aluvial y aluvio torrencial de edad Plio-cuaternario.

Según FABRE (1985), la situación estructural de esta región se puede resumir en dos fases principales: a) una de subsidencia durante el Cretácico y Terciario Inferior; y b) una fase posterior compresiva, durante la cual los sedimentos son plegados, fallados y

levantados hasta su posición actual, cuyo resultado es una topografía abrupta y de alto relieve, con valles encañonados que han permitido el desarrollo de amplios depósitos aluvio-torrenciales en el piedemonte, que se conectan morfológicamente con los Llanos Orientales.

Los pliegues en rocas sedimentarias pre-cuaternarias de la cordillera son apretados y asimétricos, que vergen tanto al oriente como al occidente, mientras que en los llanos los pliegues cuaternarios son amplios y aparentemente simétricos. Las fallas de mayor expresión y longitud tienen dirección general SW-NE, localmente N-S, con trazos sinuosos y subparalelos. También se presentan fallas de dirección noroeste, algunas reconocidas recientemente.

Las fallas que se describen pertenecen a tres conjuntos de falla, de dirección y movimiento completamente diferente, que son: 1) Fallas del Borde Llanero; 2) Fallas de la Zona Axial de la Cordillera Oriental; 3) Fallas de Dirección Noroeste. En general, estos grupos de fallas tienen las características que se anotan a continuación:

a) Fallas de Borde Llanero: con este nombre se identifica el conjunto de fallas inversas de buzamiento al oeste, de dirección general N30-40°E y de 20 a 175 Km de longitud, las cuales separan terrenos, edades y ambientes geológicos diferentes (París y Romero, 1994). Morfológicamente es un corredor que marca el contraste, entre el frente montañoso de la cordillera y la zona plana-baja de los Llanos Orientales. Las fallas del Borde Llanero están constituidas por fallas paralelas y subparalelas que se distribuyen de manera escalonada sugiriendo movimientos de rumbo (Figura 2.8).

Este conjunto de fallas representa el límite entre el borde noroeste del Cratón de Guayana, de naturaleza estable, y el cinturón móvil de afinidad continental de los Andes en Colombia (París y Romero 1994), y es considerado por algunos autores como el límite entre las Placas de Suramérica y el bloque Andino (Aggarwal, 1983). Con el propósito de obviar las discusiones que puedan suscitar algunas diferencias de nomenclatura, se han denominado de la siguiente manera:

- Sistema Servita - Santa María
- Sistema del Guaicaramo
- Sistema Yopal

b) Fallas de dirección Noroeste: son fallas de corta longitud, poco conocidas, cuyo movimiento principal es de rumbo lateral izquierdo.

c) Fallas de la zona axial de la Cordillera Oriental: son accidentes tectónicos de dirección general NE-SW, que se localizan en el altiplano Cundi-boyacence, al noreste de Bogotá.

2.2.1. Sistema Servitá-Santa María. Corresponde a una serie de segmentos de fallas inversas, en dirección N20-40°E, buzamiento de 45° NW y posiblemente con componente de rumbo dextral, que se prolongan por aproximadamente 180 Km, desde Cumaral hasta un poco al norte de Santa María (Mapa No 1). Inmediatamente al sur y occidente de Villavicencio se distribuyen formando un corredor de 10 Km de ancho. Los segmentos de falla documentados son: Colepato, Servitá, Acacias, Colonia y Guayuriba; hacia el noreste de Restrepo, el corredor de fallas se angosta y se continúan hacia el norte con los nombres de fallas de Tesalia, Santa María, Lengupá y Chámeza (Ulloa et al 1975). Entre Acacias y Villavicencio, algunas fallas del sistema están desplazadas por fallas de dirección NW-SE.

2.2.1.1. Falla de Colepato. Falla inversa de dirección general N50° E, con plano de falla buzando aproximadamente 30° al occidente y cartografiada por un tramo de 40 Km, entre

Acacias y Villavicencio (Pulido et al, 1991). Dentro de los 40 km están incluidos 15 km de la Falla de Villavicencio.

Presenta en 18 km indicios moderados de actividad neotectónica, destacándose los siguientes rasgos: silletas, drenajes alineados y una terraza aluvial deformada. A lo largo de la traza de falla, en la zona urbana de Villavicencio, una colina alineada bloquea el desarrollo del Abanico del Caño Parrado, en lo que corresponde aparentemente con un cuaternario confinado.

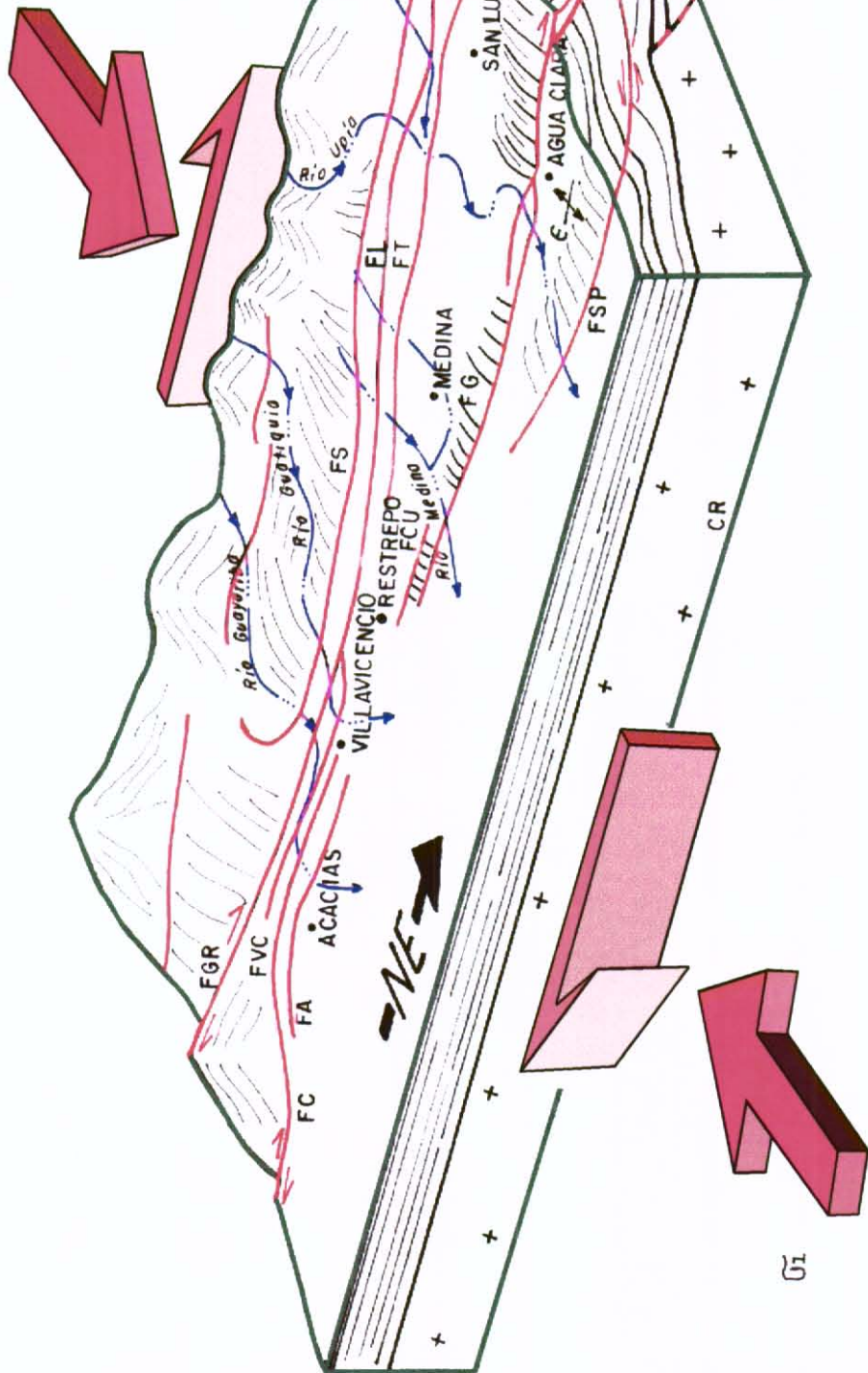
Del análisis de las características principales dicho accidente se clasifica como falla activa, se le deduce una magnitud máxima probable de 6.7, el porcentaje de tramo activo del 45% y tasa de actividad intermedia (Tabla 2.2).

2.2.1.2. Falla de Servitá. Falla inversa con indicios de movimiento de rumbo en sentido dextral, según lo sugieren algunos interfluvios desplazados en el área de Servitá. Se extiende por 60 Km, de los cuales 26 Km muestran indicios moderados de actividad reciente.

Tiene orientación N40°E y plano de falla con buzamiento variable hacia el noroeste (Pulido et al, 1991). En general se presenta como una franja, con varias trazas de fallas muy cercanas entre sí. Al occidente de Villavicencio rocas del Paleozoico cabalgan, a lo largo de esta falla, sobre rocas del Cretáceo Inferior y Superior.

Al Norte de Restrepo pone en contacto rocas del Paleozoico con unidades del Cretáceo y Terciario. Su traza se continua al norte de Cumaral, con el nombre de Falla de Santa María y se prolonga hasta cerca del municipio de Paez (Meta), dentro de rocas del Cretácico.

Gr



BLOQUE DIAGRAMA DE LA
REGIÓN SURORIENTAL

Fecha : Mayo / 96

Figura : 2.8

- | | | | |
|-----|-----------------------|-----|---------------------|
| FA | Falla Acacias | FT | Falla Tesalia |
| FC | Falla Colonra | FCU | Falla Cumaral |
| FSP | Falla San Pedro-Yopal | FS | Falla Servitá |
| FGR | Falla Guayuriba | FG | Falla del Guacaromo |
| FVC | Falla Colepoto | FL | Falla Lengupá |
| CR | Cratón | | |

La Falla de Servitá se identifica claramente por el contraste morfológico asociado al cambio de litología entre las unidades duras del bloque cabalgante y las blandas del bloque oriental. Se observan indicios moderados de actividad neotectónica, tales como colinas rectilíneas (lomos lineales), zonas de cizalla, quiebres de pendiente, silletas, facetas triangulares y replegamientos, rasgos que hacen su expresión muy notoria; se presenta además un gran número de deslizamientos en los quiebres de pendiente del bloque cabalgante (Figura 2.9).

En el abanico de Restrepo de edad cuaternaria, se observaron rasgos contundentes de actividad neotectónica, como son una contrapendiente sobre la traza más occidental y un quiebre del terreno, cerca del ápice del abanico. Cabe resaltar que en esta zona las trazas de las fallas Servitá y Guayuriba están muy cercanas. Al Noreste de Cumaral, en otros abanicos y terrazas, se observan escalones, quiebres de pendiente alineados, cambios en los patrones de drenaje y cauces rectilíneos.

Del análisis de las características anotadas, la Falla de Servitá se considera activa, con magnitud máxima probable de 6.9, porcentaje de tramo activo de 17% y tasa de actividad alta (Tabla 2.2).

2.2.1.3. Falla de Santa María. Es, junto con la Colepato, las fallas de la Región Oriental más cercanas a Bogotá. En general esta falla tiene características muy similares a la de Colepato, de la cual parece ser su continuación al norte. En un tramo de 15 km se encontraron indicios débiles de neotectónica, lo cual permitió clasificarla como potencialmente activa, inferir tasas bajas de actividad y magnitud máxima probable (MMP) de 6.8.

2.2.1.4. Falla de Guayuriba. También conocida como Guayuriba-Restrepo. Su trazo en superficie tiene una longitud aproximada de 60 Km, de los cuales 29 Km presentan indicios fuertes y moderados de actividad. Su rumbo general varía entre $N30^{\circ}$ - 45° E, es de movimiento inverso, con plano de falla buzando entre 30 y 45° al noroeste y, aparentemente, componente de rumbo lateral derecho. ULLOA et al (1975), la continúan inferida hacia el norte para empatarla con la Falla de Chámeza de dirección E-W. Entre las evidencias de actividad neotectónica se destaca un escarpe de falla, al noroeste de Restrepo sobre el abanico del mismo nombre, el cual tiene una altura cercana a 60 metros (Figuras 2.10, 2.11).

En este sector se observan pequeños lomos de presión, dispuestos en forma escalonada, y cauces aparentemente truncados por la falla; estas geoformas parecen indicar movimientos de cizalla en sentido dextral. Entre los rasgos moderados de actividad se encuentran abombamientos, quiebres de pendiente, sillas, drenajes alineados, cauces escalonados (río Caney) y drenajes desplazados (Plancha No 1).

Del análisis de las características principales, esta falla se considera activa, con magnitud máxima probable M_s de 7.0, porcentaje de tramo activo de 50% y tasa de actividad alta (Tabla 2.2).

2.2.1.5. Falla Lengupá. El segmento de Lengupá, que se conoce con el nombre de Chámeza en el extremo septentrional del sistema, cambia la dirección de $N45^{\circ}$ E a E-W a partir de Paez, y se prolonga hasta chocar con la Falla de Pajarito del Sistema del Guaicáramo (Ulloa, et al 1983).

De los 65 km de longitud, en 9 km presenta indicios moderados a débiles de actividad neotectónica, lo cual permitió catalogarla como potencialmente activa, con tasas de actividad baja y magnitud máxima probable de 6.6.

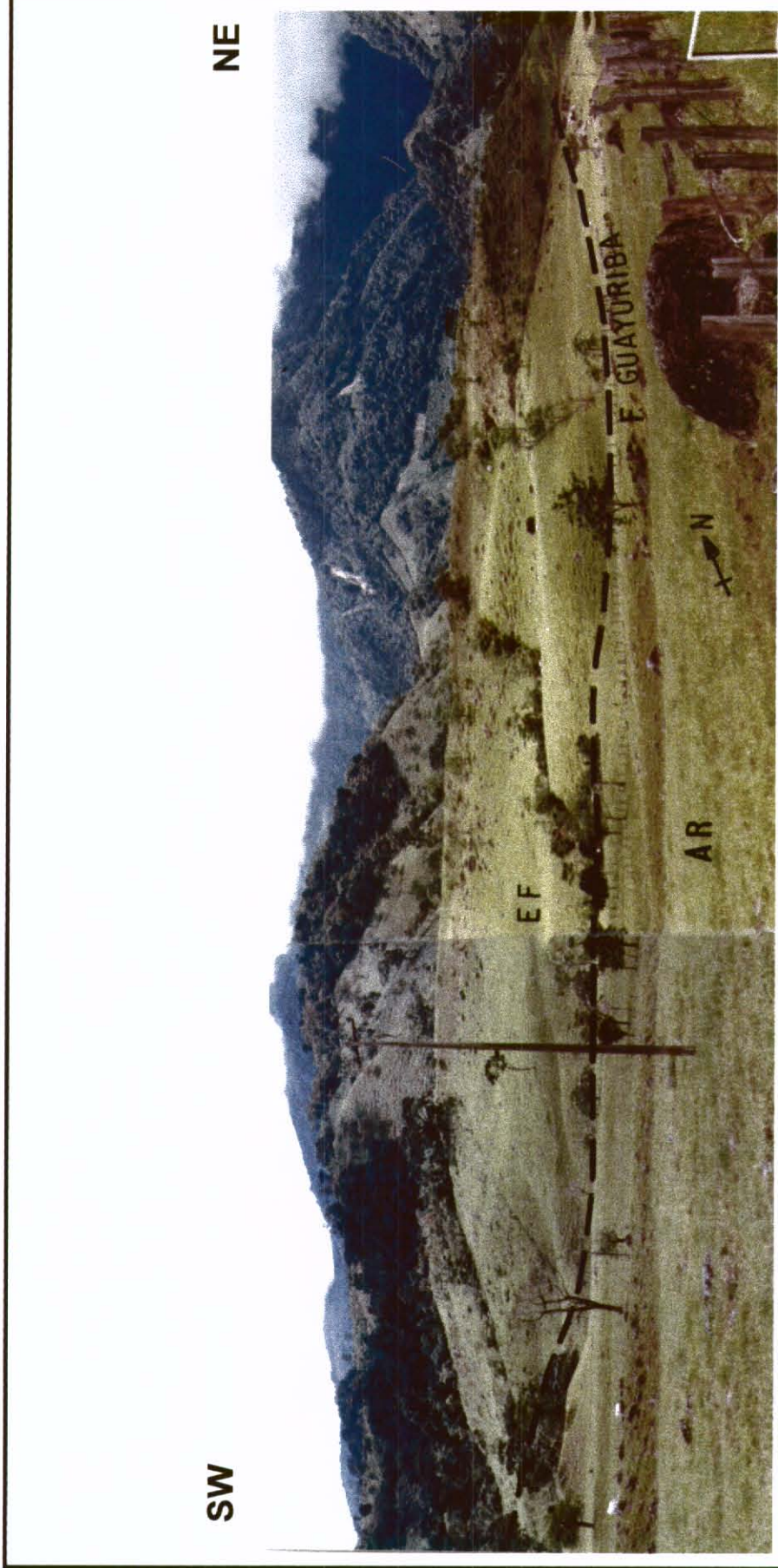


Figura 2.10 : Falla Guayuriba - Restrepo : el Abanico de Restrepo (flujo de escombros AR) presenta un escalonamiento que define un escarpe de falla (EF) de aproximadamente 50 m de altura. Falla predominantemente inversa con buzamiento al NW y orientación aproximada N45°E.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

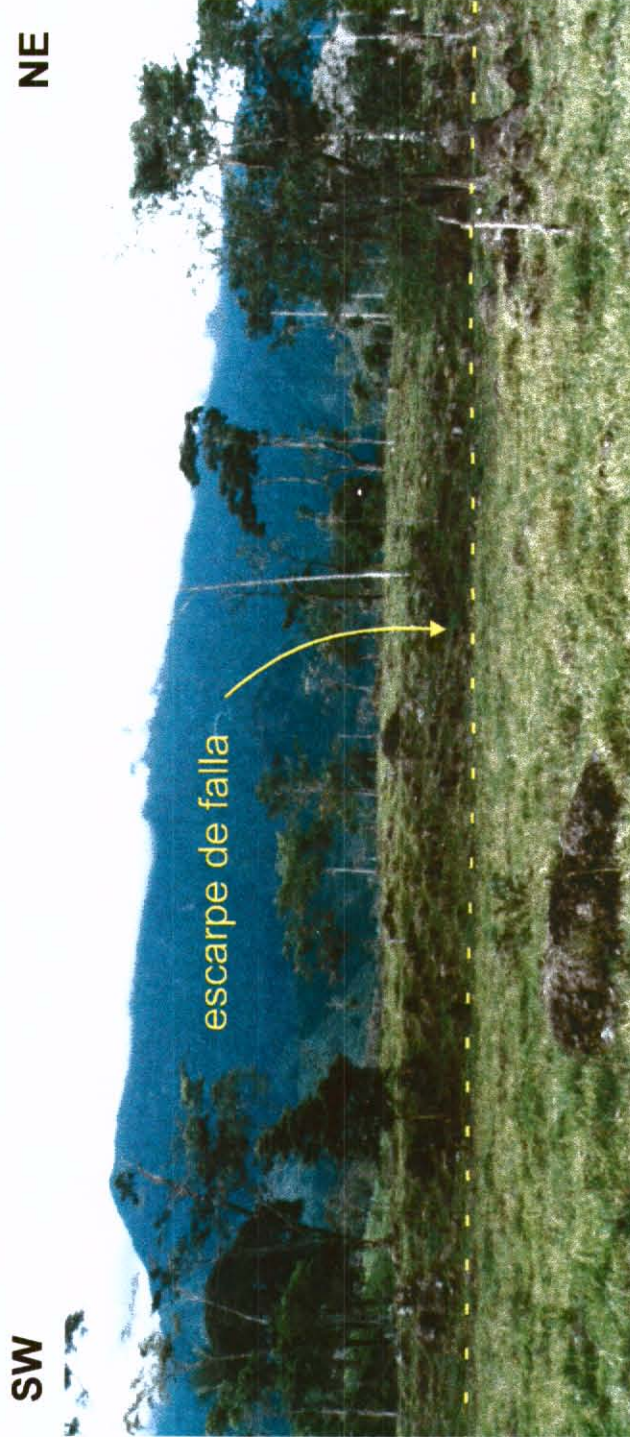
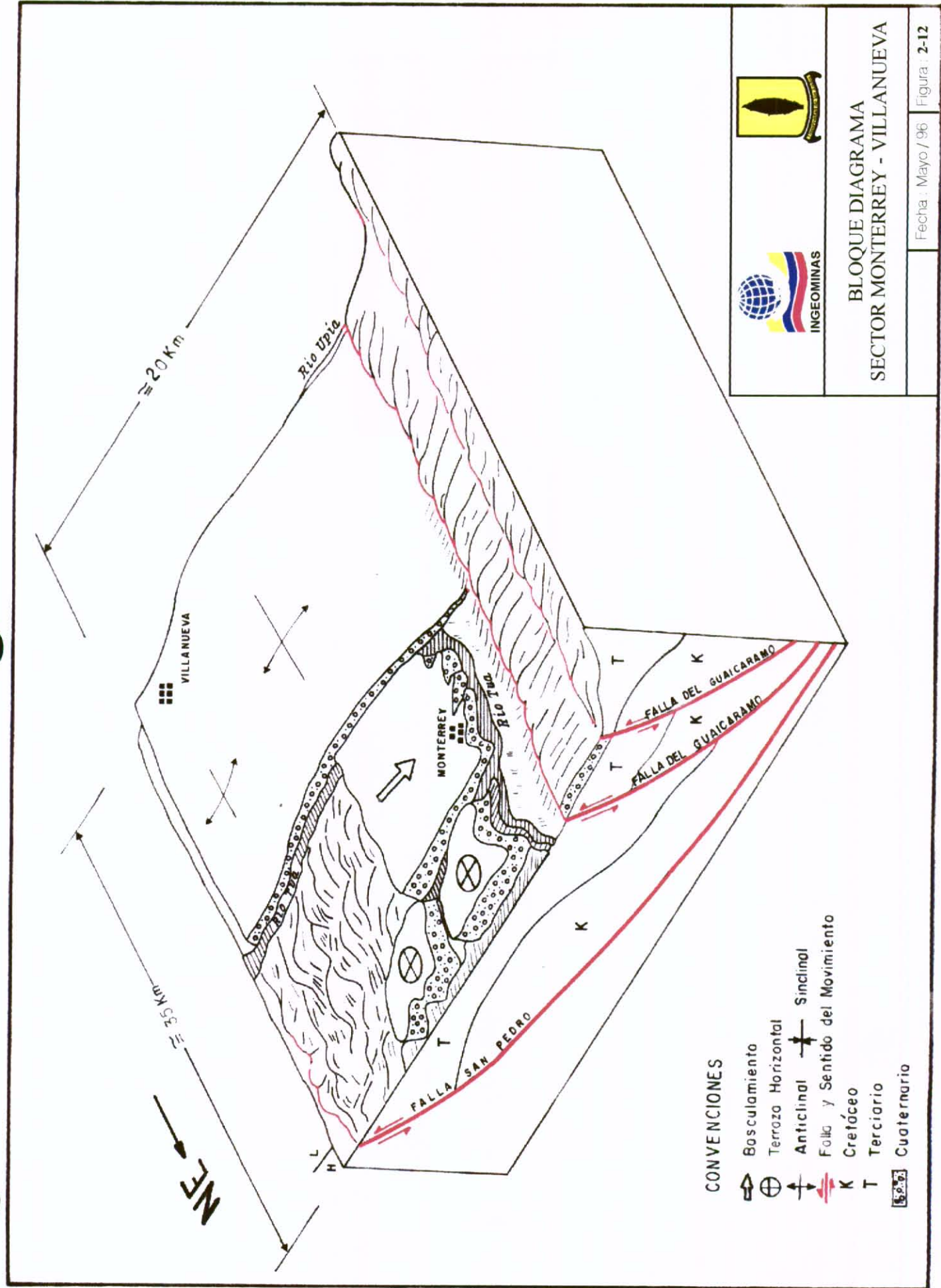


Figura 2.11 : Falla Guayuriba - Restrepo : escarpe de falla de aproximadamente 5 m en el Abanico de Restrepo. El escarpe es paralelo al anterior y está situado a unos 300 m al Este. Está asociado probablemente a un segmento de falla inversa (en punteado) con buzamiento al NW que se desprende del plano principal.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA



BLOQUE DIAGRAMA
SECTOR MONTERREY - VILLANUEVA

Fecha : Mayo / 96 Figura : 2-12

- CONVENCIONES**
- Basculamiento
 - Terrazo Horizontal
 - Anticlinal
 - Folds y Sentido del Movimiento
 - K
 - T
 - Cuaternario

2.2.1.6. Falla Colonia. Segmento de falla de 50 Km de longitud, que pasa por la Colonia Penal de Acacias, con dirección general N50°E, subparalela al occidente del tramo de la Falla Acacias. Es de tipo inverso con plano de falla buzando alrededor de 45° al Occidente. Presenta indicios moderados de actividad tales como silletas, drenajes alineados y escarpes de falla en un tramo de 10 Km.

Del análisis de las características descritas, la Falla Colonia se considera potencialmente activa, con tasa de actividad intermedia, se le calcula una magnitud máxima probable de 6.5 y porcentaje de tramo activo del 20% (Tabla 2.2).

2.2.1.7. Falla de Acacias. Es un segmento ubicado inmediatamente al W de Acacias, con una dirección N20° a 45°E, de tipo inverso con plano de falla buzando aproximadamente 30° al occidente. Hacia el sur de Acacias la dirección es cercana a N-S. La longitud total cartografiada es de 30 Km, de los cuales 13 Km presentan rasgos de actividad.

Indicios fuertes se observan en terrazas cuaternarias con escarpes y contraescarpes alineados que varían entre 10 y 20 m de altura, los cuales ocurren al SW del casco urbano de Acacias, quiebres de pendiente, deformación superficial y colinas alineadas; rasgos moderados incluyen abombamientos y escarpes menores de falla. Del análisis de las características principales esta es una falla activa, con magnitud máxima probable de 6.6, tasa de actividad intermedia y porcentaje de tramo activo de 41% (Tabla 2.2).

2.2.1.8. Falla de Tesalia. Ha sido cartografiada por 75 Km desde el río Humea hasta la Inspección de Policía de Santa Teresa, tramo donde afecta rocas del Terciario que constituyen el flanco Occidental del Sinclinal de Nazareth. Tiene una dirección general N40°E y plano de falla buzando alrededor de 35° hacia el noroeste. Su extremo sur se alinea con la Falla Guayuriba y podría corresponder a una bifurcación.

Con base en interpretación fotogeológica se determinaron en 22 Km, rasgos moderados y débiles de neotectónica, entre los cuales están: abombamientos de terrazas cuaternarias, silletas, quiebres de pendiente y valles alineados. De las características principales, a esta falla activa se le deduce una magnitud máxima probable de 6.8 y grado de actividad intermedio (Tabla 2.2).

2.2.2. Sistema del Guaicáramo. Corresponde a una serie de segmentos de dirección general N40°E, que se presentan al noreste del Sistema de Servitá-Santa María. Pone en contacto rocas del Cretácico que cabalgan rocas Terciarias y depósitos Cuaternarios ubicados en el frente montañoso y en la cuenca de los Llanos Orientales, respectivamente. Se incluyen en este sistema las fallas de Cumaral y de Pajarito.

2.2.2.1. Falla de Cumaral. Segmento de falla de dirección N45°E, con 25 Km de longitud de los cuales en 7 Km muestra rasgos fuertes de actividad neotectónica.

El bloque Oriental está levantado (Robertson, 1989), produciendo un escarpe contrario al frente montañoso; esta situación particular en la región, sugiere una falla inversa cuyo plano buza al sureste, conformando una falla conjugada-antitética de tipo "back thrust", asociada a la traza principal del Guaicáramo. Al norte y noreste de Cumaral, presenta escarpes de falla en terrazas (Robertson, 1989), deformaciones del cuaternario Holoceno y control de drenajes.

De las características principales anotadas se deduce un carácter de falla activa, se le calcula una magnitud máxima probable de 6.3 y tasa de actividad intermedia (Tabla 2.2).

2.2.2.2 Falla del Guaicáramo. Tiene dirección general N35°E y ha sido dividida en tres tramos, cuyas direcciones oscilan entre N45°E y N10°E (Mapa No 1): Guaicáramo Norte, Guaicáramo Centro y Guaicáramo Sur. Esta falla se extiende desde el río Guacavía, al sur, hasta cercanías a la quebrada Tablazo afluente del río Cravo Sur, al norte, fuera del área de estudio.

1. Guaicáramo Centro. Es la falla más extensa de la región de estudio, con una longitud total de 80 Km, de los cuales 44 Km tienen indicios fuertes y moderados de actividad neotectónica. Su plano de falla buza alrededor de 35° al noroeste (Renzoni, 1975).

Entre los rasgos fuertes se tienen: 1) rupturas del terreno, un poco al sur y al norte del río Upía; 2) La Terraza de Monterrey muestra una inclinación de unos 7° hacia el oeste y suroeste, contraria a la vergencia del frente cordillerano, sobre el flanco occidental del Anticlinal de la Florida, indicando esfuerzos compresivos recientes en sentido Noroeste-Sureste (Figura 2.12).

3) Entre los ríos Caja y Cusiana se observan quiebres de pendiente, sillas, facetas triangulares, escarpes de falla, con los bloques occidentales levantados. Lo anterior sugiere que esta estructura tiene características de falla activa (Figura 2.13).

Hacia el extremo norte, por la carretera Aguazul-Pajarito, la terraza fluvio-glacial donde está ubicado el caserío de Monterralo, ha sido deformada y basculada hacia el NW. Del análisis de las características principales se deduce una magnitud máxima probable de 7.2 y una tasa de actividad alta (Tabla 2.2).

2) Guaicáramo Sur. Se presenta con una longitud aproximada de 65 km, desde el río Guacavía hasta el río Upía, al NW de Villanueva. La parte meridional limita el flanco oriental de la Serranía de las Palomas (Segovia y Renzoni, 1965) y el tramo septentrional la Cuchilla del Guaicaramo de la cual deriva su nombre. Presenta trayectos cortos con indicios de actividad fuertes y moderados, lo cual permitió asignarle tasas de actividad intermedia y una magnitud máxima probable de 7.1 (Tabla 2.2).

3. Guaicáramo Norte. En la plancha geológica 211- Tauramena (Ulloa et al, 1975), se denomina Falla El Mirador. En el sitio la Guáimara (5 Km por la carretera al oriente de Monterralo), hay un afloramiento de areniscas con intercalaciones de limolitas de edad Cretácico, en el cual se aprecian rupturas con planos estriados que evidencian desplazamientos rumbo-deslizantes dextrales, fallas en cuña y otras estructuras de origen tectónico. Del análisis de los rasgos neotectónicos se deducen magnitudes máximas probables de 6.8, tasa de actividad intermedia y se cataloga como potencialmente activa (Tabla 2.2).

2.2.2.3. Falla del Guaicáramo W. Segmento ubicado 2 Km al occidente y paralelo a la traza principal de la falla del Guaicáramo, en el sector comprendido entre el río Upía y el río Caja. Tiene una longitud total aproximada de 35 Km, de los cuales 8 Km presentan rasgos de actividad neotectónica moderada; se destaca un posible lomo de obturación inmediatamente al norte de Villa Carola, que parece indicar un movimiento lateral derecho y basculamientos de terrazas del Plio-cuaternario, con alturas hasta 600 m por encima de los cauces de los ríos occidente de Tauramena (Robertson, 1989). La traza es muy nítida

SW

NE



Figura 2.13 : Escarpe de falla inversa asociado con el segmento de Guaicáramo Centro al sur de Monterrey. El escarpe tiene aproximadamente 5 m de altura y afecta abanicos cuaternarios provenientes de la cordillera. El azimut de la traza de falla (en punteado) es $N45^{\circ}E$ y el plano buza al NW.



PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ

NEOTECTÓNICA

al occidente de la escuela El Oso, municipio de Tauramena, en donde asocia una serie de escalones alineados y produce el basculamiento de niveles de terrazas cuaternarias.

Del análisis de las características principales se clasifica como potencialmente activa, con magnitud máxima probable de 6.5, porcentaje de tramo activo del 22% y tasa de actividad intermedia (Tabla 2.2).

2.2.2.4. Falla de Pajarito. Falla de dirección general N30°E, conformada por dos tramos, uno de dirección norte-sur y el otro N45°E; el extremo meridional del tramo norte-sur está unido a la Falla del Guaicáramo. Presenta una longitud total de 60 Km de los cuales 14 Km presentan rasgos de actividad fuertes y moderados.

Entre los rasgos alineados de actividad se tienen los siguientes: una laguna (5 Km al sur de la población de Pajarito), sillas y quiebres de pendiente. Al norte de Pajarito se presentan escarpes y sillas de falla, quiebres de pendiente e interfluvios desplazados; estos últimos sugieren una componente de movimiento lateral derecho (Figura 2.14).

Del análisis de las características principales se deduce una magnitud máxima probable de 6.7 y tasa de actividad intermedia y se cataloga como falla activa (Tabla 2.2).

2.2.3. Sistema de Yopal. En este trabajo se incluyen como parte del sistema, las fallas San Pedro, Yopal y Chámeza, de dirección general N40°E, y la Falla Upamena de dirección norte-sur la cual representa un salto compresivo entre las fallas Yopal y San Pedro. En conjunto el sistema parece corresponder al frente de deformación actual de la cordillera.

2.2.3.1. Falla de Yopal. Denominada también San Miguel-Yopal; es un trazo de falla de dirección general N40°E, que define el frente montañoso inmediatamente al W de la ciudad de Yopal. En perfiles sísmicos se observa que esta falla es una rampa de cabalgamiento, cuyo plano de despegue buza hacia el noroeste y corresponde en profundidad a un nivel sub-horizontal, paralelo a la secuencia terciaria (Colletta y otros, 1990). Incluyendo la prolongación meridional conocida con el nombre de falla de San Miguel, se identificaron 65 Km de longitud.

Al sur de Aguazul, se observaron en 24 Km de longitud los siguientes rasgos de actividad neotectónica, de calidad fuerte y moderada: escarpes de falla, quiebres de pendiente, drenajes desplazados, contrapendientes (Figura 2.15).

Entre Aguazul y Yopal, también se presentan quiebres fuertes de pendiente y depósitos cuaternarios deformados. Del análisis de las características descritas esta es una falla activa. Teniendo en cuenta la prolongación de la falla al norte de Yopal (Plancha 1; Tabla 2.2), se deduce una magnitud máxima probable de 7.1 y una tasa de actividad alta.

2.2.3.2. Falla de San Pedro. Es el segmento más oriental, con una orientación general de N38°E, el cual ha sido cartografiado por 80 Km con el nombre de San Pedro-Sisigua, entre los ríos Upia y Cusiana. La posición externa de esta falla prodría indicar la migración hacia el llano del frente de deformación durante el Cuaternario.

La terraza de la Mesa de San Pedro del Plio-pleistoceno, en Villanueva, se encuentra abombada en forma de anticlinal y corresponde a la prolongación del Anticlinal de la Florida. Hacia el borde oriental de esta terraza, hay una flexión sinclinal, cuyo eje es paralelo al escarpe que define la Falla de San Pedro.

SW

NE



Figura 2.15 : Escarpe de línea de falla sobre la traza de la falla Yopal (en punteado) entre Río Chiquito y Aguazul. Se observa un escalonamiento de 5 - 10 m en un abanico cuaternario. La orientación aproximada de la traza es N40°E. El plano tiene buzamiento hacia el NW y el sentido de movimiento es inverso.



PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ

NEOTECTÓNICA

Presenta rasgos de actividad moderados, tales como el escarpe de falla que bordea las mesetas de Sisigua y de San Pedro por un tramo de unos 38 Km y alturas que oscilan entre 50 y 80 metros. Un angostamiento y el cambio de pendiente del cauce del río Upia, en el sector de Barranca de Upia, podrían estar asociados con la actividad de esta falla. La profundización del cauce en el bloque oriental, sugiere mayor erosión del río para compensar el levantamiento de este bloque, por efectos de la componente vertical de la falla. De acuerdo con lo anterior, las características parecen corresponder a las de una falla activa. Se deduce una magnitud máxima probable de 7.2 y una tasa de actividad alta (Tabla 2.2).

2.2.3.3. Falla de Upamena. Es un segmento de falla de dirección N-S, de 20 Km de longitud de los cuales 10 Km muestran rasgos moderados de actividad en depósitos cuaternarios, tales como: abombamientos, deformación, escarpes de falla, drenajes alineados y basculamientos. El bloque oriental está aparentemente levantado; de esta forma el plano de falla debe estar buzando hacia el este, sugiriendo una falla de tipo inverso, como correspondería con los esfuerzos actuantes en la zona. Del análisis de las características principales (Tabla 2.2), se deduce una magnitud máxima probable de 6.4 y una tasa de actividad baja a intermedia.

2.2.4. Zona Axial de la Cordillera Oriental. Se incluyeron dentro de esta región, las fallas localizadas al noreste de Bogotá, en el Departamento de Boyacá. Se revisaron fallas mayores, entre las que se destacan las de Soapaga, Boyacá y San Francisco, todas ellas de movimiento principal inverso.

2.2.4.1. Falla de Boyacá. La traza se localiza aproximadamente 15 km al noroeste de la de Soapaga, con la cual tiende a unirse hacia el noreste, tiene una orientación promedio de N40°E y plano buzando el noroeste. En general, los rasgos de falla son menos sobresalientes que los de la Falla de Soapaga; además, a lo largo de su traza no se detectaron indicios confiables de neotectónica. Se incluye dentro del análisis neotectónico, debido a que es una falla importante por su longitud (unos 80 km todo el sistema) y porque un ramal, que se separa por el río Surba a la altura de Duitama,

presenta los siguientes rasgos alineados: facetas triangulares, silletas y quiebres de pendiente alineados.

Por lo anterior se clasifica como potencialmente activa, con porcentaje de tramo activo del 6%, tasa de actividad baja a muy baja y magnitud sísmica probable de 6.3 (Tabla 2.2)

2.2.4.2. Falla San Francisco. Es una falla de alrededor de 15 km de longitud aproximada, plano buzando al sureste y de dirección N30°E. Su traza se ubica al 10 km al oriente de Tunja, entre las fallas de Boyacá y Soapaga (Mapa No 1).

En la Vereda San Francisco se observaron, por un trayecto de 1 km, los siguientes rasgos morfológicos, los cuales podrían corresponder a indicios de neotectónica de calidad baja: facetas erosionadas, escarpes, depresión cerrada (Figura 2.16). Asociado con la traza de falla ocurren depósitos de deslizamientos. Se infiere para esta falla tasa de movimiento baja a muy baja y magnitud máxima probable de 5.3 (Tabla 2.2)

2.2.4.3. Falla de Soapaga. El sistema de falla se extiende por aproximadamente 100 km, longitud a lo largo de la cual es desplazada por varias fallas de rumbo de dirección noreste y sureste. El sistema cruza la ciudad de Sogamoso (Boyacá) y continúa hacia el norte siguiendo una dirección promedio N30°E, con plano de falla inclinado 10 a 40° hacia el noroeste (Vargas, 1995). En su extremo nororiental, la falla se ramifica y se disloca, y su expresión se pierde al mezclarse con el sistema de la Falla de Bucaramanga

En casi todo su recorrido, la traza de falla se destaca muy bien debido al marcado contraste morfológico y al control que ejerce sobre el cauce de algunas corrientes de agua, como el río Pesca. Pone en contacto rocas del Paleozoico y del Jurásico, las cuales cabalgan sobre unidades litológicas del cretáceo y del Terciario.

En el sector del Valle de Sogamoso no parece afectar el relleno cuaternario, pero podría ser la responsable de basculamientos y fracturamiento de cantos en depósitos de la Formación Tilatá de edad Plio-cuaternario.

En los sectores de Sativa y Tasco, se presentan los siguientes rasgos alineados, aparentemente indicios leves de actividad neotectónica: abanico cortado (?), silla, escarpe, lomo de obturación, facetas triangulares desgastadas, drenajes alineados.

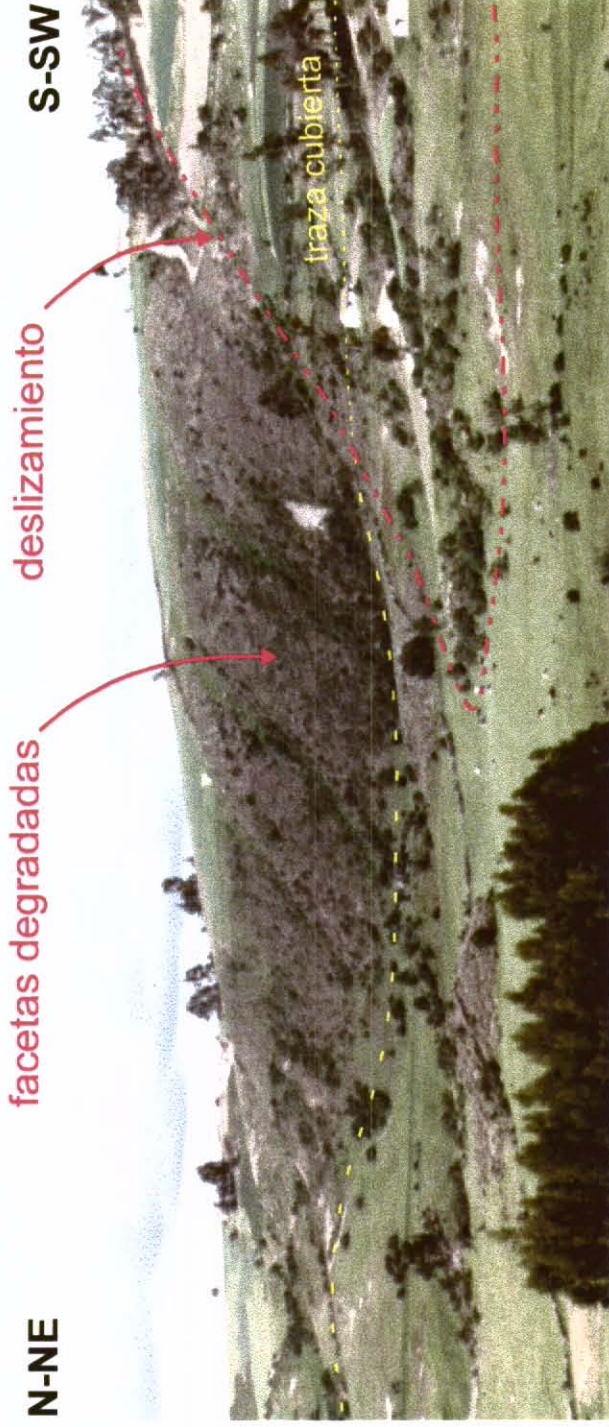


Figura 2.16 : Falla de San Francisco, carretera Oicatá - Toca (Boyacá) : geformas neotectónicas (i.e. facetas degradadas) a lo largo de la traza de falla (en amarillo). El segmento tiene dirección NE y buzamiento hacia el SE; probablemente corresponde a un retrocabalgamiento asociado con la falla de Soapaga situada al SE. Nótese el deslizamiento (en rojo) que cubre la traza de falla al SW (en punteado).



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

Estos indicios se observaron sobre un tramo de falla de aproximadamente 7 km de longitud. De acuerdo con las características anotadas, la Falla de Soapaga se considera potencialmente activa, con tasa de actividad baja a muy baja y magnitud sísmica probable de 6.5.

2.2.5. Sistema Noroeste. Existen fallas de dirección SE-NW, que se reflejan en interrupciones de unidades litológicas de edad cretácica. Estas fallas están relacionadas a fuertes cambios estratigráficos y representan, probablemente, fallas que se desarrollaron durante la fase de extensión del cretácico.

Las observaciones de campo efectuadas en este trabajo, sugieren que las fallas de dirección noreste controlan los principales rasgos del relieve y muestran una continuidad regional relativamente clara. También se observa que ciertas estructuras anticlinales y/o sinclinales de dirección NE-SW, son interrumpidas, tal es el caso del anticlinal de Monserrate y el sinclinal del Porvenir los cuales que pasan de invertidos a normales (Ulloa et al, 1975).

Debido a la escala de estudio, esta zona no se trabajó con mejor detalle. Sin embargo, estas fallas podrían representar algún tipo de barrera que interrumpen la continuidad de otras estructuras y ser zonas de acumulación de esfuerzos tectónicos. Aunque en términos regionales la sismicidad instrumental refleja concentraciones de sismos en forma alargada, siguiendo la dirección general del fallamiento principal NE-SW.

2.3. REGIÓN CENTRAL

Se delimita como región Central el área comprendida dentro de un círculo de 50 km de radio alrededor de Santafé de Bogotá, la cual se trabajó a escala 1:100.000. Esta región se caracteriza por la presencia, en la zona axial de la Cordillera Oriental, de la planicie intramontana de la Sabana de Bogotá la cual está limitada, con los sectores montañosos circundantes, por rasgos rectilíneos sugiriendo control tectónico. El régimen compresivo E-W actuante, la geometría de los sistemas de fallas inversas NNE y sinistralas NW-SE y la geología de la región, permitieron la elaboración del bloque diagrama generalizado que se muestra en la Figura 2.17.

Durante el estudio se analizaron rasgos morfológicos y anomalías de drenajes en depósitos sedimentarios del Plio-cuaternario, como también geoformas desarrolladas en rocas antiguas. En general, los indicios de posible origen neotectónico, detectados y analizados en esta región son relativamente escasos, si se compara con los observados en los sistemas del Borde Llanero, Magdalena, Ibagué y Romeral.

Con excepción del sector del Páramo de Sumapaz, en esta región no se detectaron rasgos de neotectónica en depósitos de edad reciente, aunque sí se encontraron abundantes indicios de actividad, de calidad moderada y baja, en rocas más antiguas al Holoceno, posiblemente relacionados con tectónica de edad Plio-pleistoceno.

La escasez de indicios típicos y evidencias de neotectónica, podría ser explicado con tasas bajas de actividad tectónica en el Holoceno. Además, existe alguna posibilidad de que las evidencias e indicios de neotectónica pudieron haber sido destruidos por la acción antrópica, especialmente la relacionada con la actividad agrícola y expansión urbana, desarrollada en la región durante varios siglos.

Por lo tanto, parte del análisis se basa en indicios obtenidos del comportamiento neotectónico con anterioridad al cuaternario más reciente. Se anota que todas las fallas trabajadas, con la excepción de la Falla La Cajita (activa) y la Falla de Bogotá (de actividad incierta o desconocida) se clasificaron como potencialmente activas. Algunas características morfoestructurales se destacan dentro del análisis neotectónico de esta región:

1) la mayoría de las estructuras de la región tienden a orientarse en dirección NNE. Sin embargo, entre el SE de Soacha y los alrededores de Facatativá, las formaciones geológicas del borde de la Sabana presentan un cambio marcado de la dirección de las estructuras hacia el NW

2) al norte de este sector, y pasando una porción de relleno cuaternario en la región de Mosquera, los pliegues recuperan la actitud regional al NNE, tal como se observa entre Subachoque y Suba, dejando entrever una marcada anomalía estructural en esta

dirección, que limitaría el relleno cuaternario al sur de la Sabana y que se ubicaría entre Facatativa y La Picota.

Desde el punto de vista morfológico, la región central comprende el área de la Sabana de Bogotá y del sector montañoso adyacente. Para el estudio se seleccionaron las fallas principales, ubicadas en la Sabana de Bogotá y en las zonas al oriente, occidente y sur, entre las que se destacan la Falla de Bogotá y las fallas del Río Tunjuelito, Facativá (sistema de dirección noroeste), Mochuelo, Usaquen, Fusaguasugá, La Cajita y Corraleja.

Las fallas investigadas se agruparon por regiones geográficas y se les describen los principales rasgos neotectónicos, destacando y evaluando los indicios posiblemente relacionados con actividad neotectónica. Las características más importantes, de cada una de las fallas investigadas, se resumen en la Tabla 2.3 y en la Plancha No 2.

2.3.1. Sistema al Oriente de la Sabana. Se incluyen dentro de este sector, la falla de Bogotá y la denominada Falla de Ubaque, esta última ubicada al oriente de la anterior.

Se aclara que la información geológica sobre fallas en esta zona, está restringida prácticamente hacia los bordes inmediatos de la sabana. Más al E la cartografía geológica existente incluye muy pocos datos sobre fallas y lineamientos

En la Sabana de Bogotá cualquier deformación Holocénica, o mas tardía, no es fácilmente identificable debido a la densa presencia de edificaciones. Sin embargo, el rasgo rectilíneo del borde oriental de la sabana, las características topográficas abruptas y la linearidad geométrica con el valle de Usme, donde se han observado algunos indicios de neotectónica, conduce a pensar que este ha sido un sector tectónicamente activo durante gran parte del Cuaternario, del cual hacen parte la Falla de Bogotá y la del río Tunjuelito.

2.3.1.1. Falla de Bogota. Es el límite estructural más sobresaliente que bordea la Sabana por el costado E. Su dirección promedio es N10°E, con plano buzando al oriente. En este sector las areniscas del Grupo Guadalupe, del Cretáceo, cabalgan sobre arcillolitas de la Formación Guaduas de edad Terciario, estando la traza de falla definida morfológicamente, por cambio topográfico entre las rocas duras y blandas.

Es notable el contraste morfológico y la fuerte linearidad de la topografía abrupta que se presenta al oriente de Bogotá, donde las corrientes de agua que caen hacia la Sabana no han alcanzado a profundizar sus cauces hasta el nivel base actual lo cual sugiere levantamientos, relativamente rápidos de los cerros orientales, con anterioridad al Cuaternario reciente.

El sistema de falla está cartografiado por aproximadamente 50 km, de los cuales el rasgo de falla es muy claro por 20 km desde Los Rosales (calle 80) hasta el boquerón de Chipaque, sobre la vía a Villavicencio.

En este trayecto no se detectaron indicios claros de actividad neotectónica, siendo los rasgos observados de calidad muy baja. En un tramo de 10 km sobre la traza de falla, en la base de los Cerros de Guadalupe y Monserrate (Figura 2.18), se presenta cambio fuerte en la pendiente topográfica, pequeños escarpes y superficies estructurales sobre las areniscas.

En la calle 53 con carrera 4a, se estudió un afloramiento bastante cizallado, sobre arcillolitas de la Formación Guaduas, probablemente relacionado con la Falla de Bogotá situada la traza principal un poco al este. El análisis microtectónico permitió corroborar el movimiento principal inverso de la falla, con plano buzando al oriente, e inferir que algunas de las microfallas estudiadas son neoformadas. Se observó que la llanura aluvial que conforma del valle río Sopó, al occidente de la Estación del Ferrocarril de Briceño, está aproximadamente 15 metros más elevada que el valle del río Bogotá. Dicho cambio de nivel está marcado por un escarpe retrocedido y un control y alineamiento de parte del cauce de los ríos Sopó y Bogotá, rasgos que coinciden con la posible prolongación al norte de la Falla de Bogotá.

De acuerdo con lo anterior, los indicios que muestra la falla de Bogotá tienen algo de incertidumbre, por lo que se catalogó como de actividad incierta. Ante la importancia que reviste conocer la actividad neotectónica de esta falla, se hacen necesarios estudios detallados y especializados. No obstante esta situación, se calcula como dato preliminar una magnitud sísmica probable de 6.4 y tasa de actividad baja (Tabla 2.3).



Figura 2.18 : Falla de Bogotá : cabalgamiento de dirección N-S y buzamiento hacia el Este. Se aprecia el cambio topográfico entre las rocas de edades Cretáceo y Terciario (contacto fallado); igualmente se observa el marcado contraste morfológico entre estas rocas y los depósitos de la zona plana de la Sabana de Bogotá.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA

2.3.1.2. Falla de Ubaque. Es un rasgo rectilíneo de quiebre de pendiente, que se observó detrás de la Falla de Bogotá, entre las poblaciones de Ubaque y Choachí, el cual parece poner en contacto rocas de los Grupos Guadalupe y Chipaque. El alineamiento tiene aproximadamente 15 km de longitud y dirección N15°E; en razón de la situación estratigráfica y tectónica, parece tratarse de una falla inversa con plano buzando al oeste.

Los siguientes son los rasgos, probablemente indicativos de actividad neotectónica: depósitos Cuaternarios colgados y basculados, silletas, laguna alineada, fuente termal de Santa Mónica, depresiones y escarpes de línea de falla. Considerando 5 km de indicios neotectónicos, se le calculan tasas de movimiento bajas y magnitud probable (MMP) de 6.0 (Tabla 2.3)

2.3.2. Sistema al occidente de la Sabana. Se caracterizan las fallas de Sabaneta, Corraleja y Fusagasugá. Dentro de esta introducción se hace un corto análisis de la Falla de La Mesa. También se recorrió un sector pequeño en la localidad de Canoas, a la salida hacia Mesitas, en el sitio donde el río Bogotá abandona la Sabana de Bogotá.

2.3.2.1. Falla de Sabaneta. Tiene su traza una dirección promedio N35°E, plano buzando al W y aproximadamente 15 km de largo. Se localiza sobre el flanco occidental de la Cordillera Central y es atravesada por la carretera bajando hacia La Vega.

Los siguientes rasgos fueron interpretados como originados por actividad tectónica, los cuales se presentan sobre depósitos de flujo de escombros del cuaternario antiguo, asociados al río Sabaneta: escarpes de falla, facetas desgastadas y drenajes alineados. Estos indicios se presentan por 3 km de longitud aproximada, lo que permite calcular una magnitud máxima probable de 5.7 (Tabla 2.3)

2.3.2.2. Falla Corraleja. Cruza por la población de Anolaima y podría ser la prolongación al sur del Sistema de Fallas de La Salina (Planchas No 1 y No 2). Este segmento tiene 10 km de longitud aproximada, dirección N10°W y plano de falla inclinado al oriente.

Los depósitos de Anolaima, que son antiguas terrazas colgadas y disectadas, están ubicados sobre la trayectoria de la falla, presentan dislocaciones y abombamientos, sugiriendo un control tectónico. Estos indicios bajos se observan por unos 3 km.

De acuerdo con los datos obtenidos se considera, tentativamente, de actividad muy baja, potencialmente activa y se le calcula una magnitud máxima probable de 5.8 (Tabla 2.3)

2.3.2.3. Falla de Fusagasugá. Tiene dirección N5°E, buzamiento al W y cruza por un costado de la ciudad de Fusagasugá formando un escarpe bastante notorio. Esta falla con 10 km de longitud, forma parte de un sistema segmentado de más de 50 km de longitud total. Los indicios de neotectónica tienen calidad baja y son aparentes basculamientos de la terraza de Fusagasugá y quiebres de pendiente que coinciden con la trayectoria de la traza de falla. De acuerdo con los rasgos descritos, la actividad de esta falla se categoriza como potencialmente activa. Con base en 5 km de longitud de indicios, se calcula tentativamente una magnitud máxima probable de 6.0 y tasas muy bajas de movimiento (Tabla 2.3)

2.3.2.4. Otras. El rasgo de falla de La Mesa tiene dirección N70°E, compatible con la Falla de Ibagué, y alrededor de 5 km de longitud total. El indicio neotectónico es un aparente basculamiento de una terraza Plio-cuaternaria, al NW del casco urbano; sin embargo, se necesita un poco más de investigación para hacer una clasificación de actividad.

A la salida de Bogotá hacia Mesitas podría existir una falla inversa, debido a que existen indicios débiles de actividad en neotectónica, con plano inclinado al oeste y que se prolongaría al sur por el borde del embalse del Muña.

2.3.3. Sistema al Sur de la Sabana. Está conformado por las fallas de La Cajita y la del Río Tunjuelito, que son las fallas más activas de la Región Central.

2.3.3.1. Falla La Cajita. Esta falla está cartografiada por una longitud de 35 km, en dirección N10°E y plano de falla probablemente al E. Esta falla ha sido objeto de cortas investigaciones, en donde se describen rasgos de actividad tectónica en el Holoceno.

Aunque esta falla no fue trabajada en campo, debido a situación de orden público, hay una referencia de MENDIVELSO (1989) de que en el área del Páramo de Sumapaz, se presentan morrenas desplazadas por la falla y otros rasgos de neotectónica. ACOSTA Y HERNANDEZ (1991), detectan indicios fuertes de neotectónica al oeste de Pasca, sobre

depósitos glaciares del Cuaternario; por un trayecto aproximado de 10 Km describen lagunas de falla, escarpes, sillas, depresiones cerradas y trincheras, y le atribuyen movimientos inversos y de rumbo en sentido lateral derecho. Dicha estructura podría tener relación con los sismos históricos reportados al sur de Bogotá.

Dea análisis de los rasgos de neotectónica y la posible sismicidad asociada, permite clasificarla como falla activa, con tasa de actividad moderada y magnitud sísmica probable de 6.4 (Tabla 2.3.)

2.3.3.2. Falla del Río Tunjuelito. Este accidente geológico está trazado en el Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Caro y García, 1988), el cual fue elaborado para el Proyecto de Zonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá. Tiene dirección promedio N5°E, plano de falla inclinado al W y sigue la trayectoria aproximada del río Tunjuelito. El rasgo morfológico, que define su traza, es un escarpe de altura superior a 100 metros.

La falla pone en contacto areniscas de la Formación Regadera, de edad Terciario (Eoceno Medio), con lutitas y areniscas conglomeráticas de la Formación Usme del Eoceno-oligoceno.

Se destaca la depresión del Valle del río Tunjuelito, por su forma asimétrica y su alargamiento en dirección norte-sur: el lado occidental, donde se localiza la Falla del río Tunjuelito, tiene paredes abruptas mientras que en el lado oriental la pendiente topográfica es moderada, lo cual sugiere control tectónico.

La Falla de Tunjuelito se analizó por un trayecto aproximado de 10 km (frente a la Población de Usme), donde se observaron indicios moderados de actividad neotectónica: facetas triangulares, aluviones cuaternarios colgados (Figura 2.19), basculamiento en depósitos de lavado de piedemonte, escarpe de línea de falla, quiebre de pendiente, cabalgamiento de Terciario sobre Cuaternario antiguo y corrientes alineadas.

Al norte de Usme donde la falla pierde su expresión, mostrando una curvatura hacia el NW debido, posiblemente al movimiento del sistema de Fallas NW-SE.

S-SE

N-NW



Figura 2.19 : Falla de Tunjuelito: borde montañoso rectilíneo, paralelo al río Tunjuelito, donde se presentan facetas triangulares (FT - en amarillo) en rocas del Terciario, aluviones colgados (AC) y basculamientos en depósitos del Cuaternario. Foto frente a la población de Usme.



PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ

NEOTECTÓNICA

La falla continúa hacia el sur, siguiendo el curso del río Tunjuelito y podría pertenecer, junto con la Falla La Cajita, al sistema que afecta tectónicamente los depósitos morrénicos cuaternarios del Páramo del Sumapaz y tener relación con los sismos históricos reportados al sur de Bogotá. A esta falla se le calcula una magnitud máxima probable de 6.4 y tasa de actividad intermedia (Tabla 2.3)

2.3.4. Sistema de Facatativá. Así se denomina el conjunto de fallas de SE-NW que define el límite suroeste de la Sabana de Bogotá. Como la casi totalidad de fallas de la Región Central, los indicios de neotectónica fueron observados en rocas pre-cuaternarias

El sistema parece estar conformado por fallas en distribución escalonada, de corta longitud, que se van relevando. Se prolongan desde Facatativá, Soacha y se continúan por ese borde de la sabana hasta la intersección con el río Tunjuelito. Se describe una de las fallas paralelas, ubicadas inmediatamente al sur del área urbana de Facatativá, la cual se denominó en este informe Falla de Facatativá SW.

2.3.4.1. Falla de Facatativá SW. Tiene dirección aproximada N30°W, plano de falla probablemente con leve buzamiento al suroeste (Plancha No 2).

De acuerdo con la dirección del campo de esfuerzos tectónicos del área, y la orientación del plano de falla, este accidente tiene movimiento principal lateral izquierdo, con componente inversa subordinada.

Se calcula una longitud de 10 km, de los cuales aproximadamente en 4 km se observaron los siguientes indicios débiles de neotectónica: valles angostos alineados y confinados, control de drenajes, depósitos colgados y aparentes corrientes deflectadas. Prolongando la traza de falla dentro del Cuaternario de la Sabana de Bogotá, se observa alineamiento de parte de los cursos de los ríos Bojacá, Bogotá y Tunjuelito. El porcentaje de tramo activo es del 40%, la tasa de actividad es baja y la magnitud máxima probable (Ms) de 5.8 (Tabla 2.3)

2.3.4.2. Falla El Mesón. Se localiza entre las localidades de Facatativá y Soacha, caracterizándose por su traza notoria en fotos aéreas. Atraviesa rocas del Cretáceo en dirección N15°W, extendiéndose por alrededor de 20 km de longitud (Mapa No 2). Ha

sido catalogada como falla de rumbo con movimiento sinistral, similar a las fallas de Facatativá y Soacha. Como indicios bajos de neotectónica se identificaron: valles y drenajes alineados, control de drenajes, contra-escarpes, lomos lineares, silletas y lomos de obturación (?). Los anteriores indicios moderados y débiles se presentan por aproximadamente 5 km de longitud, aparentemente afectando el Cuaternario de la Sabana. Según estos rasgos, se le calcula porcentaje de tramo activo de 25%, se infieren tasa de actividad baja y magnitud máxima probable de 6.1 (Tabla 2.3)

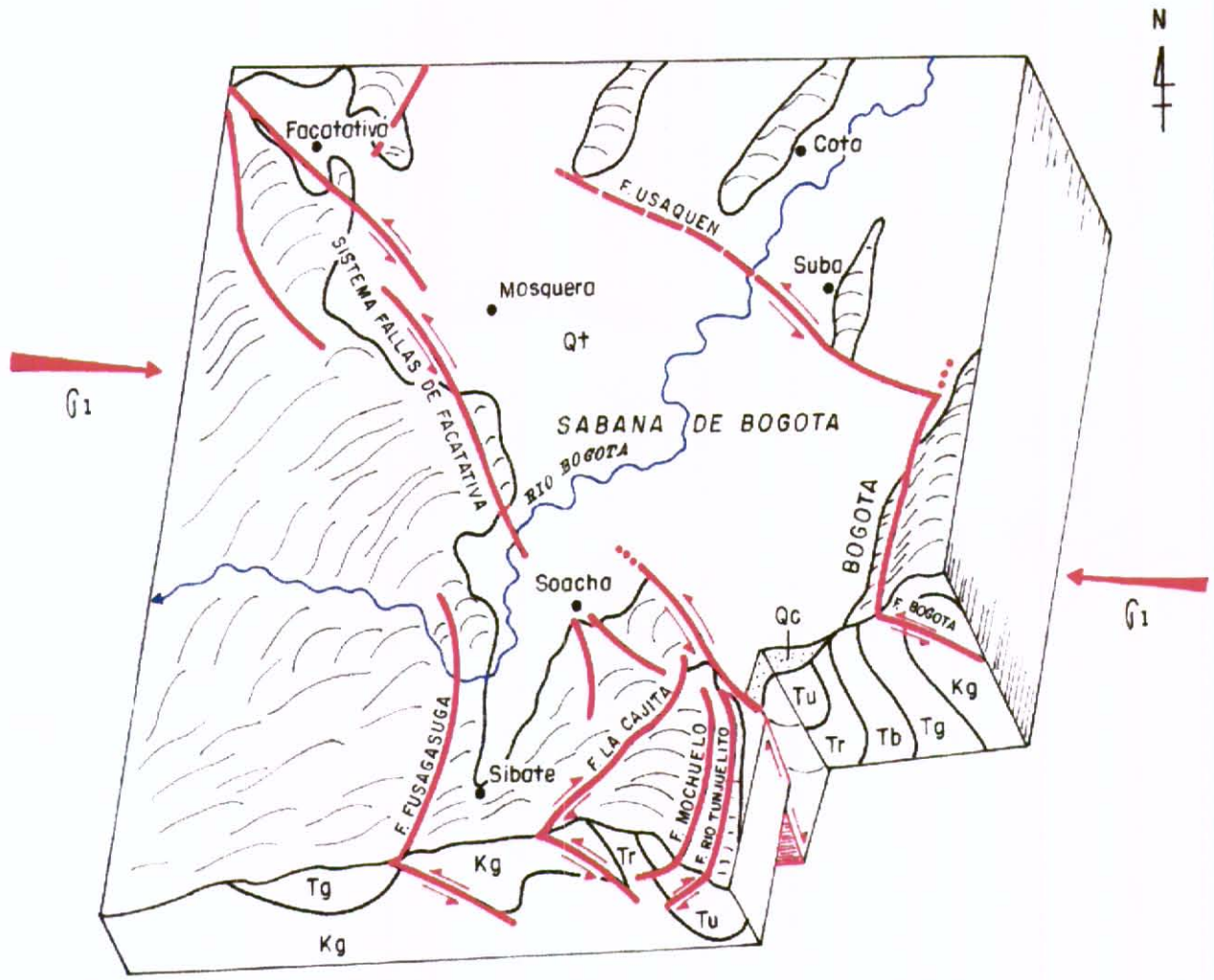
2.3.4.3. Falla de Soacha. Su traza se marca muy bien sobre los cerros al suroeste de dicha población, extendiéndose en dirección N5°W por aproximadamente 10 km, trayecto en el cual afecta rocas Cretáceas del Grupo Guadalupe. En este tramo se presenta un alineamiento notorio, donde se observan por cerca de 3 km de longitud, valles atrapados, trincheras, contraescarpes, silletas y control de cauces. Aunque dichas geoformas se presentan en rocas antiguas, la intensidad y características de los indicios sugiere edad de formación neotectónica, probablemente Plio-pleistoceno. De acuerdo con la longitud de los indicios de neotectónica y con el tipo movimiento (de rumbo lateral izquierdo) se le calcula una MMP de 5.8 (Tabla 2.3).

2.3.5. Sistema de la Sabana de Bogotá. Corresponde a la altiplanicie donde se localiza el Distrito Capital. De los diversos lineamientos y fallas analizadas, solamente se caracteriza la Falla de Usaquén, debido a que algunos rasgos asociados a dicha estructura podrían indicar actividad neotectónica. Esta falla aparece inferida en el Mapa geológico del estudio Zonificación Geotécnica de Bogotá (Caro y García, 1988).

2.3.5.1. Falla de Usaquén. Cruza la Sabana de Bogotá en dirección promedio S60°E, prolongándose dentro de los cerros orientales por los lados de Usaquén. Su longitud se estima en 30 km y el plano de falla podría ser subvertical, con tendencia al SW. De acuerdo con la dirección del campo de esfuerzos actuante, con la orientación del plano de falla y de las estructuras sedimentarias del Grupo Guadalupe, dicha falla es de rumbo y sentido de movimiento sinistral. La falla podría estar ejerciendo control tectónico sobre el límite sur de los cerros de Suba, Cota y Tabio-Tenjo. Se observaron los siguientes posibles indicios débiles de actividad: control de la quebrada Juan Amarillo, depresiones,

lagos y zonas de pantano. Parece que el bloque al sur de la falla está levantado entre 5 y 10 metros, con respecto al bloque norte.

Con los anteriores argumentos, la Falla de Usaquén se clasifica como potencialmente activa y su magnitud sísmica probable, calculada con base en 5 km de indicios bajos, es de 6.0 (Tabla 2.3).



LEYENDA

- Qt Terrazas
- Qc Cono del Tunjuelito
- Tu Formación Usme
- Tr Formación Regadera
- Tb Formación Bogotá
- Kg Grupo Guadalupe

 INGEOMINAS	 UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
<p>BLOQUE DIAGRAMA DE LA REGIÓN CENTRAL</p>	
Fecha: Mayo/96	Figura 2.17

TABLA 2.1 Caracterización de fallas sísmogénicas de la Región Noroccidental

SISTEMA	No	Nombre de la falla	Longitud Total (km)	Longitud con rasgos neotectónicos (km)			% Tramo activo	TAS	Calidad del dato	Tipo de falla	Azuimut; Buzamiento	Magnitud Sísmica Calculada			Hipótesis de Ruptura		DNI (km)	
				Fuerte	Moderado	Débil						total	Ms1	Ms2	Ms3	Ms4		No
Romeral	1(*)	Armenia	60	3	10	9	22	37	A-IA	B	ID	30,W	6,7	6,6	7,1	6,8		180
	2(-)	Manizales	40								I?	10,W?				6,5		165
	3(*)	Montenegro	45	10	10		20	44	A-IA	C	ID	45,W	6,6	6,6	7,0	6,7		190
Palestina	4(*)	Palestina	60						B-I		IS?	30,W?			7,0	7,0		180
	5(+)	Chapelón - Pericos	25			5	5	20	B	B	ID	45,W	5,9	5,9	6,4	6,0		125
Cuciana Rio Bogotá	6(+)	Chapelón	55			14	22	40	I	B	D	75,V	6,5	6,7	6,9	6,7		170
	7(+)	Cuciana Este	55			5	5	9	B	B	D	75,V	5,6	6,0	6,9	6,5		115
Ibaque	8(*)	Cocora	60	8	25		33	55	I	B	D	65,V	6,7	6,9	7,0	6,9		160
	9(*)	Ibaque	45	35	5		40	88	A	A	D	75,V	6,8	7,0	6,8	7,0	+10	110
	10(+)	Piedras	20			8	14	70	I	B	DI	55,V	6,3	6,4	6,3	6,4		85
Viani	11(-)	Viani	40			2	8	10	B	C	D	60,V	6,0	6,3	6,7	6,5		75
	12(+)	El Choho	30			5	6	20	B	C	ID	30,E	6,0	5,9	6,7	6,2		190
Samaria - La Colorada	13(*)	Domia	35	5	9	2	16	30	A	B	ID	30,E	6,5	6,5	6,9	6,7		115
	14(+)	Mullatos	60			20	20	33	B-I	B	I	10,W	6,9	6,8	6,9	6,7		110
Magdalena	15(+)	Honda Sur	45			9	16	35	B-I	B	I	10,E	7,1	6,5	6,9	6,7		90
	16(+)	Honda Norte	70			5	5	7	MB-B	B	IS?	20,E	5,9	5,9	7,2	6,1		125
	17(+)	Cambas	70			5	5	7	B	C	IS	25,E	5,9	5,9	7,1	6,2		130
	18(+)	Cambao Norte	60			3	3	5	MB	B	I	15,E	6,6	5,6	7,2	6,0		90
	19(+)	Cambao sur	20	3			3	15	I	B	ID	20,E	5,3	5,6	7,2	6,2	+10	75
Noroccidente	20(+)	Alto del trigo	90			6	6	7	MB	C	ID	15,E	6,0	5,9	7,4	6,2		80
	21(+)	Bituma Norte	60			10	12	20	B	B	IS	20,E	6,3	6,3	7,1	6,3		80
	22(+)	Bituma Sur	30			7	7	23	B	C	I	NS,E	6,9	6,0	6,7	6,2		70
	23(*)	El Palmar	20	1	8		9	45	I	B	S	150,V	5,9	6,2	6,4	6,2		100

Ms1: Siemmons (1977).
Ms2 y Ms3: Wells and Coppersmith (1994).
Ms 4: Magnitud considerando dos segmentos.
MMP: Magnitud máxima probable
TAS: Tasa de actividad semicuantitativa
DM: Distancia media a Bogotá
(*): Falla activa
(+): Falla potencialmente activa
(-): Falla de actividad incierta

TIPO DE FALLA:
 I: Inversa
 N: Normal
 D: Dextral
 S: Sinistral

INCLINACIÓN:
 V: Vertical
 W: Oeste
 E: Este

CALIDAD DEL DATO:
 A: Buena
 B: Aceptable
 C: Deficiente

TASA DE ACTIVIDAD (TAS):
 MB: Muy baja
 B: Baja
 I: Intermedia
 A: Alta

TABLA 2.3 Caracterización de fallas Sismogénicas de la Región Central

SISTEMA	No	Nombre de la falla	Longitud Total (km)	Longitud con rasgos neotectónicos (km)			% Tramo activo	TAS	Calidad del indicio	Tipo de falla	Azimut; Buzamiento	Magnitud Sísmica Calculada			DM (Km)
				Fuerte	Moderado	Débil						Ms1	Ms2	Ms3	
Oriente	1(-)	Bogotá	50			10	B	C(?)	I	10E		6.2	7.0	6.4	3
	2(+)	Ubaque	15			4	B	C	I	15W		5.8	6.2	6.0	20
	3(+)	Sabaneta	15		1	2	20	MB-B	C	I	35W	6.6	6.2	5.7	40
	4(+)	Corraleja	10			3	30	MB	C	I	170E	6.6	6.0	5.8	45
	5(+)	Fusagasugá	10			5	33	MB	C	I	5W	6.8	6.2	6.0	40
Sur	6(+)	La Cajita	35		5	5	28	I	B	ID	10E	7.0	6.8	6.4	30
	7(+)	Río Tunjuelito	35		5	5	28	I	B	I	5W	7.0	6.2	6.4	25
	8(+)	Facatativa S-W	10		2	2	40	B	C	SI	120SW	5.7	5.8	5.8	40
Facatativa	9(+)	El Mesón	20		2	3	25	B	C	SI	165SW	5.9	6.3	6.1	25
	10(+)	Soaacha	10		3		30	B	B	IS	175NE	5.6	6.0	5.8	15
Sabana de Bogotá	11(+)	Usaquén	30(?)		5		17	B	C	S	120V	5.9	6.5	6.0	15

Ms1 :

Ms2 y Ms3:

Ms4:

MMP:

(+):

(-):

DM:

Stiemmons (1977)

Wells and Coppersmith (1994)

Magnitud considerando dos Segmentos.

Magnitud máxima probable

Falla activa

Falla potencialmente activa

Falla de actividad incierta

Distancia media a Bogotá

TIPO DE FALLA:

I: Inversa

N: Normal

D: Dextral

S: Sinistral

INCLINACIÓN:

V: Vertical

W: Oeste

E: Oriente

CALIDAD DEL DATO:

A: Bueno

B: Aceptable

C: Deficiente

TASA DE ACTIVIDAD SEMICUANTITATIVA (TAS):

MB: Muy Baja

B: Baja

I: Intermedia

CAPITULO 3

3. MICROTTECTÓNICA Y ESFUERZOS TECTÓNICOS

El conocimiento del régimen de esfuerzos tectónicos que actúan dentro de la corteza terrestre, permite caracterizar en forma más precisa el tipo de movimiento y la geometría de las fallas activas. Se asume, de manera general, que la dirección del movimiento a lo largo de un segmento de falla está materializada por la estría que se observa sobre el plano de falla. En términos mecánicos se puede suponer que la estría es paralela, al esfuerzo tectónico de cizalla que se ejerce sobre el plano. Esta interpretación sencilla permite estimar la dirección de la estría, sobre las fallas mayores, a partir del conocimiento del estado de esfuerzos regional a proximidad de estas.

Los métodos microtectónicos del dominio frágil, tal como el estudio de la fracturación de la roca en afloramientos deformados, da información sobre el régimen de esfuerzos tectónicos. Estos métodos suponen que el estado de esfuerzos es homogéneo, a la escala del afloramiento, y que las deformaciones son relativamente pequeñas.

El régimen de esfuerzos se define por medio de la orientación y la magnitud relativa de los ejes de esfuerzos: σ_1 (principal), σ_2 (intermedio) y σ_3 (extensivo). Algunas estructuras típicas que pueden interpretarse en función de los esfuerzos son :

- las fallas menores estriadas de orientación variable ;
- las grietas de tensión, perpendiculares al eje extensivo σ_3 ;
- los pliegues, cuyo eje es perpendicular al eje compresivo σ_1 ;
- las estructuras de disolución (estilolitas), cuyos picos son paralelos a σ_1 .
- los cantos estriados y rotos en depósitos de conglomerado

La medición en campo de estas estructuras y el análisis posterior por medio de métodos apropiados permite calcular numéricamente el estado de esfuerzos que les dio origen (Etchecopar et al., 1981, Combes 1984, Ritz 1991, Taboada et al. 1991, Taboada 1993, Ritz & Taboada 1993). Se estudiaron varios afloramientos, en cercanías de las fallas del Magdalena, del borde llanero y de la Sabana de Bogotá, con el propósito de establecer la cinemática de estas fallas. La mayoría de los afloramientos están localizados sobre las carreteras principales y en zonas de canteras.

En cada afloramiento se midió la orientación de las microestructuras, por medio de una brújula de neotectónica, y su análisis se efectuó utilizando el método automático de Etchecopar et al. (1981), el cual está basado en la determinación del tensor de esfuerzos que más se ajusta a un determinado porcentaje de las fallas medidas en el campo. El criterio de ajuste consiste en la minimización de una función, que depende de las diferencias angulares entre las estrias medidas y las calculadas a partir del tensor solución. La aplicación del método permite estimar el azimut y el buzamiento de los ejes principales, lo mismo que un parámetro adicional $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ que define la forma del elipsoide de esfuerzos.

En algunos afloramientos de rocas antiguas, las fallas que se midieron están asociadas con varias fases de deformación tectónica. En estos casos se supuso que la fase de deformación más reciente, compatible con la orogénesis de la Cordillera Oriental, es representativa del estado de esfuerzos actuales. En determinadas situaciones las fallas han sido basculadas por el plegamiento y es necesario "desbascular" el estado de esfuerzos, de manera que la estratificación recupere la posición horizontal.

Cabe señalar que la ubicación de afloramientos para el estudio de la deformación de la roca fue particularmente difícil en razón de la espesa vegetación y el alto grado de meteorización.

A continuación se describen los afloramientos estudiados, asociando cada estación de campo al sistema de falla geográficamente más cercano. Dentro de esta presentación se incluyen las estaciones realizadas durante una campaña de microtectónica en la Cordillera Oriental, efectuada en 1989 (A. Taboada, Informe Inédito, Ingeominas 1990).

Se presentan los principales rasgos de deformación y fallamiento, observados en cada estación microtectónica, como también la orientación de los esfuerzos principales calculados a partir de las mediciones de campo. El análisis microtectónico detallado se presenta en el Anexo 2.

3.1. REGIÓN NOROCCIDENTAL

Se estudiaron afloramientos ubicados en la vecindad de las fallas del Sistema del Magdalena.

3.1.1. Sistema del Magdalena. Se describen los análisis efectuados en la zona de influencia de las fallas de Bituima, Alto del Trigo, Cambao, Honda y Mulatos.

3.1.1.1. Fallas de Bituima y del Alto del Trigo. Las siguientes estaciones fueron estudiadas:

1. Estación Las Golondrinas: cantera en rocas calcáreas Cretáceas (Formación Socotá), localizada a algunos kilómetros al este de la Falla Bituima y a proximidad de una falla regional de rumbo (Falla de Viani). La mayor parte de las microfallas tienen planos conjugados neoformados. Los planos de falla son subperpendiculares a la estratificación (So), y la estría es subparalela a So. Esto sugiere que podría tratarse de una familia de planos de falla subverticales que fueron basculados posteriormente, al mismo tiempo que la estratificación.

El origen del basculamiento de So no es claro, ya que el eje de basculamiento es paralelo a σ_1 .

El eje principal compresivo es subhorizontal y con N277° de azimut (medido en sentido horario a partir del norte). La orientación de σ_3 coincide con la estratificación, lo que confirma el basculamiento del tensor. El valor de $R = 0.5$ indica un régimen de esfuerzos en falla de rumbo, probablemente asociado con el accidente regional mencionado anteriormente. La dirección de la compresión es compatible con el movimiento inverso del sistema de Bituima.

2. Estación Río Contadora: ejecutada en un afloramiento de limolitas calcáreas del Cretáceo inferior, dentro de un pliegue hectométrico asociado al bloque cabalgante de la Falla de Bituima. La orientación del tensor y la relación R indican un régimen de esfuerzos en fallamiento inverso y de rumbo. La orientación de la compresión es N109° de azimut, compatible con la orientación del pliegue principal y con la laminación de plano axial del mismo. Esta dirección sugiere un movimiento inverso, con una ligera componente lateral izquierda sobre el sistema de Falla de Bituima. La deformación parece ser relativamente reciente, puesto que el tensor de esfuerzos es subhorizontal.

La localización de los planos sobre el círculo de Mohr es consistente con el grado de penetración de las estrías; dicho valor se evaluó en una escala de 0 a 5: para planos muy penetrativos (estrilolitas), es cercano a 0 y el esfuerzo normal al plano es relativamente alto (cercano a σ_1), mientras que para planos poco penetrativos (con cristalizaciones), el valor es cercano a 5 y el esfuerzo normal al plano es relativamente bajo (cercano a σ_3).

3. Estación Viani: efectuada en areniscas conglomeráticas y lutitas del Terciario inferior localizadas 2 km al oeste de la población de Viani, sobre la carretera que conduce a San Juan de Rioseco. Desde el punto de vista estructural, los afloramientos están situados sobre el flanco oriental del sinclinal de Guaduas. La flexión de las capas cuyo buzamiento es hacia el NW puede asociarse con el movimiento inverso de la falla del Alto del Trigo que pasa al oriente de Viani. El flanco oriental del sinclinal de Guaduas, constituye el bloque inferior cabalgado por el sistema de Bituima.

Los afloramientos de roca presentan una deformación intensa y penetrativa, que pudo haberse iniciado a varios kilómetros de profundidad. Los principales sistemas de falla que se observaron en la roca son : fallas inversas de dirección NE y buzamiento al SE ; fallas de rumbo dextrales de dirección E-W; fallas inversas-sinistrales de dirección SSE. Las dimensiones de algunas de estas fallas superan los 20 metros y en términos generales el sentido de movimiento se determinó por medio de las fracturas en echelon, o riedels, observadas sobre el plano de ruptura (Figuras 3.1, 3.2). La dirección del esfuerzo principal compresivo es N304° de azimut, perpendicular al eje de plegamiento y paralelo a las grietas extensivas que afectan los cantos del conglomerado.

El régimen de esfuerzos es principalmente en falla inversa con σ_1 subhorizontal, aunque el eje extensivo σ_3 tiene una inclinación de 60°. Se observan también algunas perturbaciones locales de los esfuerzos tectónicos que indican una deformación compatible con un régimen de esfuerzos en falla de rumbo (i.e. grietas subverticales de dirección SE). La dirección SE de la compresión es compatible con un movimiento inverso dominante a lo largo del sistema de Bituima cuya dirección es NNE en este sector. Sin embargo esta dirección de esfuerzos sugiere la posibilidad de una componente menor de movimiento de rumbo sobre este sistema de fallas en sentido lateral izquierdo.

SW

NE

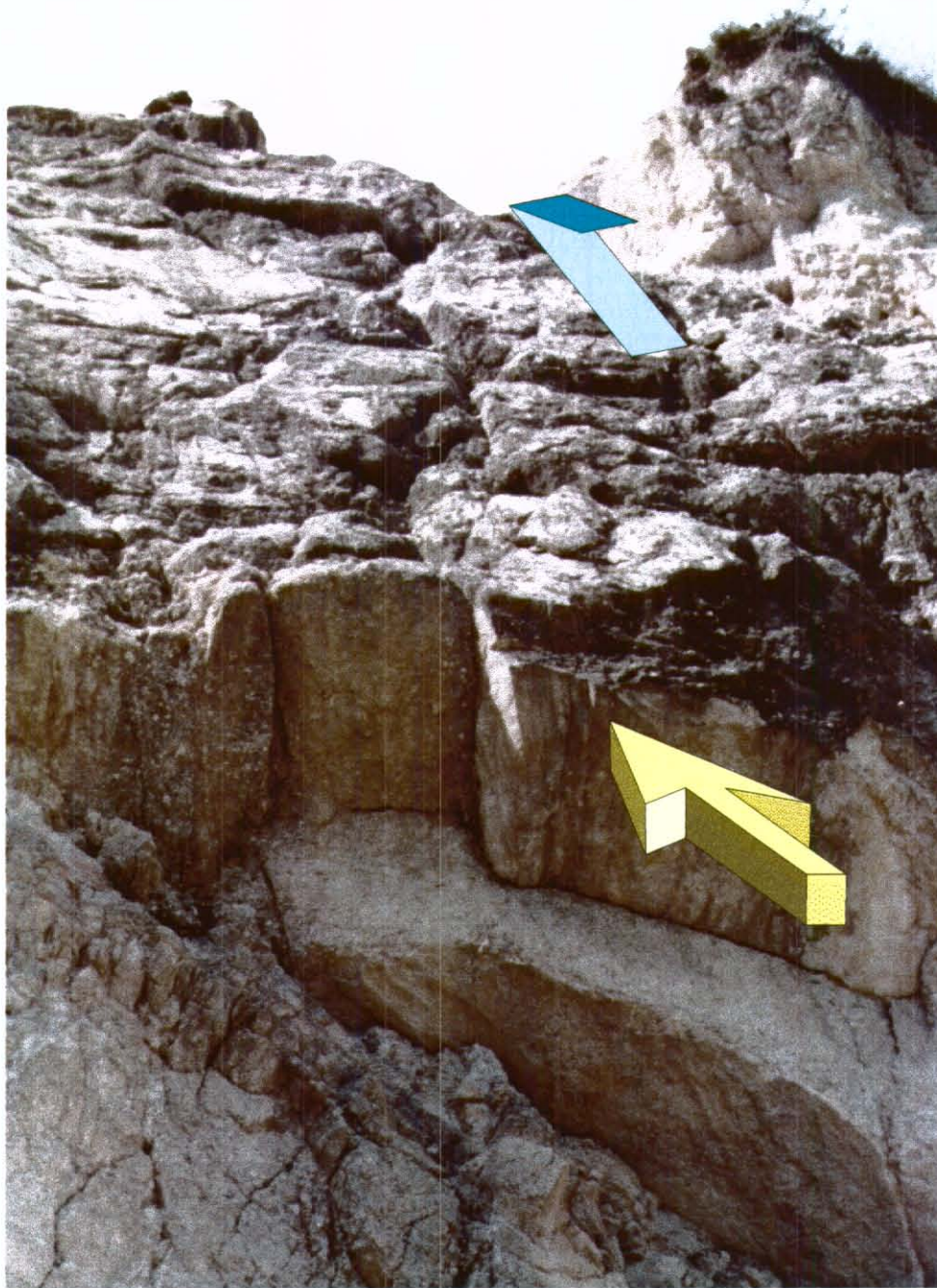


Figura 3.1 : Detalle de planos decamétricos en falla inversa buzando al SE, observados en el afloramiento de Vianí. Nótese el plano de estratificación buzando hacia el NW, desplazado por una falla. La superficie fallada presenta estrías y planos penetrativos (Riedels) - la flecha azul indica el sentido de movimiento sobre el plano. La flecha amarilla indica la dirección de la compresión tectónica ($\sigma_1 = N125^\circ$).



PROYECTO

MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

MICROTECTÓNICA

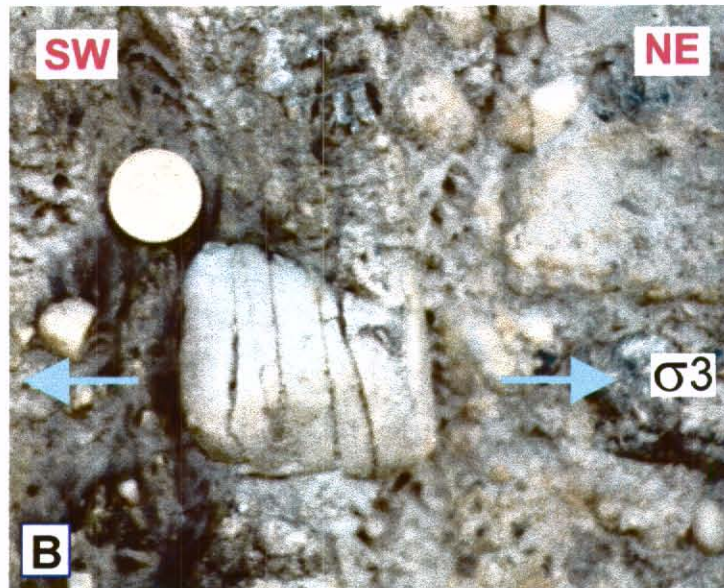


Figura 3.2: Detalle de microestructuras de deformación frágil observadas en areniscas conglomeráticas del afloramiento de Vianí - A) Plano penetrativo (Riedel) asociado con falla inversa ; B) Grietas de tracción asociadas con eje principal extensivo σ_3 de dirección N135°E (flechas azules), perpendicular al eje compresivo - contexto tectónico en falla de rumbo.

4. Otros Afloramientos : Además de las estaciones mencionadas anteriormente, se visitaron distintos afloramientos en los cuales se midieron microestructuras que confirman el carácter regional de la dirección de esfuerzos calculada para este sector.

En términos generales se observa una intensa deformación compresiva dentro de la secuencia de sedimentos del Cretáceo y del Terciario. En el bloque cabalgante de la falla de Bituima existen varios afloramientos caracterizados por fallas inversas y repliegues en niveles de areniscas, lutitas carbonosas y shales del Cretáceo Inferior (Figuras 3.3, 3.4). La vergencia de la deformación es hacia el W-NW lo cual sugiere que los cabalgamientos de dirección N-S tienen una ligera componente de rumbo lateral izquierda. El espesor considerable de niveles poco competentes induce una deformación dúctil dentro de las rocas, cuya intensidad aumenta cerca de la zona de falla presentando una esquistocidad incipiente. Los niveles más resistentes se encuentran replegados y fallados, presentando pliegues asimétricos de espesor variable con flancos invertidos.



Figura 3.3 : Venas de cuarzo cizalladas por la deformación continua de un nivel de baja competencia - afloramiento de shales a proximidad de Villeta. Las venas de cuarzo se vuelven paralelas a un plano de falla inversa paralelo a la estratificación ($N150^{\circ}E, 74^{\circ}E, 79^{\circ}S, IS$). Se observan igualmente fallas inversas sub-horizontales que cortan los niveles más resistentes. La deformación tectónica tiene vergencia hacia el Oeste y es compatible con la compresión de dirección E-SE.



Figura 3.4 : Pliegue asimétrico con flanco invertido en lutitas y areniscas del Cretáceo inferior, carretera La Vega - Villeta. La vergencia de la deformación es hacia el Oeste y está asociada con el movimiento de las fallas de Bituima y del Alto del Trigo (cabalgamientos con buzamiento hacia el Este).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

MICROTECTÓNICA

3.1.1.2. Fallas de Cambao y de Honda. Los siguientes afloramientos fueron analizados:

1. Estación Hollón: realizada en un afloramiento de conglomerados Terciarios de la Formación Hollón, localizado entre la falla de Bituima y la falla de Cambao, sobre el flanco occidental del Sinclinal de Guaduas. Este flanco constituye el bloque cabalgante de la falla de Cambao que buza hacia el este. La orientación del tensor de esfuerzos y el valor de R indican que el contexto tectónico es de fallamiento de rumbo. El eje principal compresivo está orientado en dirección N282° de azimut, compatible con el movimiento inverso de la Falla de Cambao.

El basculamiento de σ_1 puede estar asociado a una desviación del esfuerzo en el bloque cabalgante mencionado. Los planos están localizados en el círculo de Mohr dentro de la zona de neoruptura, y corresponden a una familia de planos conjugados. El criterio que se utilizó para deducir el sentido de movimiento, a lo largo de los espejos de falla, fue el de planos penetrativos R (Riedels).

2. Estación Pico de las Águilas : realizada en un afloramiento de areniscas conglomeráticas localizado sobre la carretera principal Honda - Guaduas, a 12 km de Honda.

Desde el punto de vista estructural el afloramiento se sitúa a proximidad de la falla de Cambao, sobre el bloque cabalgante. El carácter penetrativo de la deformación en este afloramiento, indica que las rocas fueron deformadas a gran profundidad. La orientación de la estratificación es NNE y el buzamiento de 40°E. Estos valores son representativos de la orientación general del bloque cabalgante de la falla Cambao. La deformación tectónica está caracterizada por una familia de fallas conjugadas neoformadas, de dimensión decamétrica, y por grietas de tensión subverticales de dirección E-SE.

Las fallas son subperpendiculares a la estratificación y la estría es subparalela a la intersección entre S_0 y el plano de falla. Estas observaciones sugieren que los planos conjugados corresponden a fallas de rumbo subverticales que se formaron en la fase inicial de deformación, cuando la estratificación era horizontal, y que posteriormente

fueron basculadas durante el plegamiento. El azimut y el buzamiento del esfuerzo principal compresivo ($\sigma_1 = N108^\circ, 36^\circ$) coincide con el plano de estratificación, lo cual corrobora la hipótesis del basculamiento.

El régimen de esfuerzos, anterior al basculamiento de la estratificación, corresponde a un fallamiento inverso y de rumbo. La orientación de σ_1 indica un movimiento principalmente inverso sobre la falla de Cambao, cuya dirección en este sector es $N10^\circ E$.

3.1.1.3. Falla de Mulatos. Sobre esta falla solamente se realizó una estación de microtectónica.

1. Estación Lérica: efectuada en un afloramiento de roca ígnea de composición granodiorítica, localizado sobre la carretera principal a Ibagué, entrando al puente sobre el río Recio, al sur de Lérica. La granodiorita se encuentra en el bloque cabalgante de la Falla Mulatos y presenta una deformación frágil intensa de carácter complejo.

La deformación tectónica está caracterizada principalmente por fallas de rumbo sinestrales de dirección N-S, y fallas de rumbo dextrales de dirección E-NE. Los planos son relativamente inclinados y presentan una dispersión moderada alrededor de estas direcciones. Sobre un mismo plano se observan con frecuencia varias estrías, lo cual sugiere que la roca ha sido deformada durante distintas fases tectónicas. La dirección de los ejes principales de esfuerzos para la fase de deformación más marcada (i.e. más reciente) indica una extensión subhorizontal de dirección NE y una compresión de dirección SE ($\sigma_3 = N48^\circ, 3^\circ$; $\sigma_1 = N140^\circ, 35^\circ$). El eje compresivo presenta una inclinación que puede estar asociada con el basculamiento del bloque cabalgante de la Falla de Mulatos. El régimen de esfuerzos es en falla de rumbo.

La orientación de los esfuerzos principales sugiere un movimiento inverso-sinistral a lo largo de la falla Mulatos en este sector, aunque un estudio más detallado de la zona es necesario para precisar estos resultados.

3.2. REGION SURORIENTAL

Las principales fallas estudiadas pertenecen al denominado Piedemonte o Borde Llanero, entre las que se encuentran los Sistemas del Guaicaramo, Servitá-Santa María y Yopal.

3.2.1. Sistema del Guaicáramo. Se describen las siguientes estaciones:

1. Estación Medina : realizada en afloramientos de areniscas y lutitas del Terciario del Grupo Medina, localizados sobre la vía a Medina, 6 km al NW de la traza de Falla del Guaicáramo. La deformación de la roca está caracterizada por fallas de rumbo sinestrales de escala decamétrica y de dirección N-S (Figura 3.5). Igualmente se observaron planos conjugados secundarios de dirección E-NE y sentido de movimiento dextral-inverso.

La dirección de la estratificación es NE con buzamiento hacia el NW. Esta dirección es coherente con la tendencia regional que se observa en la serranía de Las Palomas que constituye el bloque cabalgante de la Falla del Guaicáramo. El azimut y buzamiento del eje principal de esfuerzos es $\sigma_1 = 311^\circ, 18^\circ$. De la misma forma que en la estación Terciario Hollón, el basculamiento de σ_1 puede estar asociado a una desviación del esfuerzo en el bloque cabalgante de Guaicáramo.

Otra hipótesis consiste en suponer que σ_1 era subhorizontal, durante la deformación, y la masa rocosa fue basculada posteriormente, durante el movimiento de las fallas. El régimen de esfuerzos tectónicos es en falla de rumbo. La familia principal de fallas de rumbo de dirección N-S corresponde aparentemente a planos subverticales neoformados que luego fueron basculados hacia el NW por el plegamiento asociado con el frente cabalgante del Sistema del Guaicáramo. La deformación compresiva de la falla de Guaicáramo se observa claramente en rocas del Terciario Superior situadas en cercanía de la zona de falla (i.e. Figura 3.6).

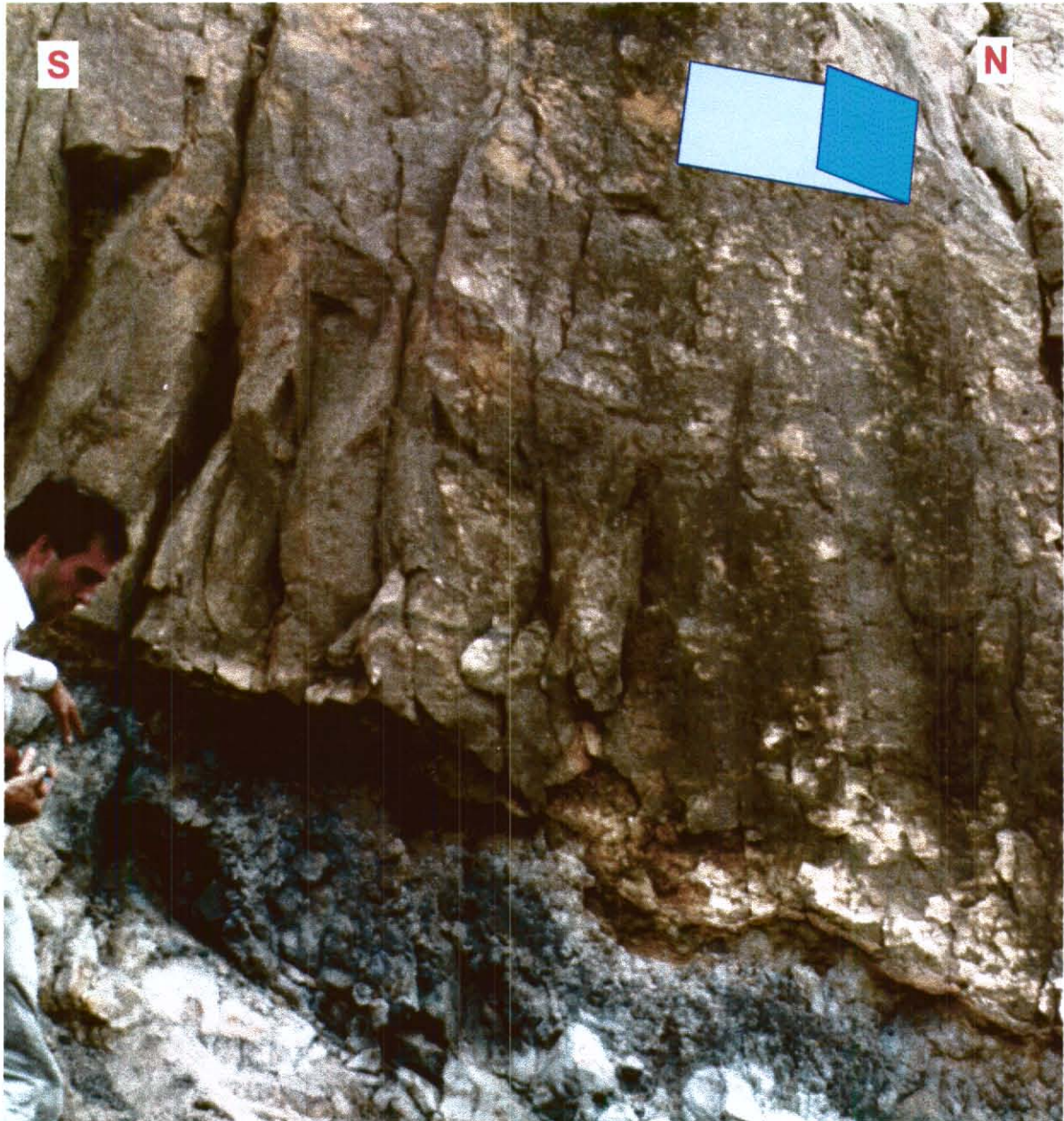


Figura 3.5: Falla de rumbo lateral izquierda en areniscas del Terciario a proximidad de la falla de Guacáramo (Estación Medina). El sentido de movimiento se deduce a partir de la orientación de planos penetrativos (Riedels) y cristalizaciones fibrosas. La dirección de la falla es N-S, y el sentido de movimiento es compatible con la dirección regional de la compresión tectónica (N130°E).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

MICROTECTÓNICA

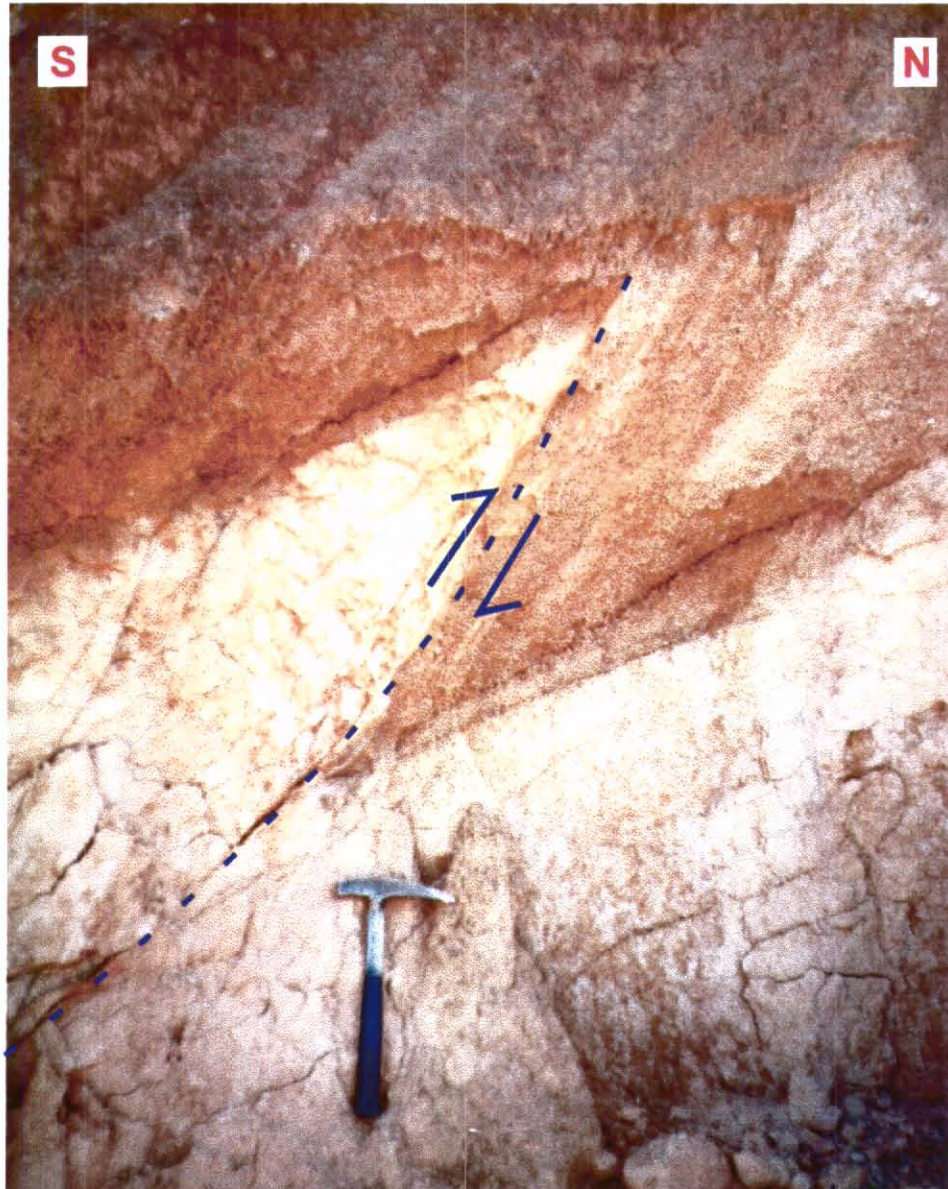


Figura 3.6 : Falla inversa en rocas del Terciario Superior, carretera Cumaral - Villanueva.

2. Estación Monterralo: realizada en un afloramiento de areniscas Cretáceas sobre la vía Aguazul - Monterralo, a proximidad de la traza de la Falla del Guaicáramo. La deformación de la roca es particularmente intensa, presentando planos de falla de orientaciones muy variadas. Los principales sistemas de falla que se observaron en la roca son: fallas inversas-dextrales de dirección NE y buzamiento al SE ; fallas de rumbo sinestrales de dirección SSE ; fallas inversas de dirección NNE.

El azimut y el buzamiento de la compresión principal es $\sigma_1 = N284^\circ, 16^\circ$, en contexto tectónico de falla inversa y de rumbo. Muchas de las fallas corresponden a planos pre-existentes, reactivados durante la última fase de compresión, algunos de ellos con varias direcciones de estrías. La dirección general de la Falla del Guaicáramo en este sector es NE. La orientación de los esfuerzos principales a lo largo de la falla, sugiere un movimiento inverso con una ligera componente dextral.

3.2.2. Sistema Servitá - Santa María. Sobre este sistema se analizó la siguiente estación microtectónica:

1. Estación Quetame: realizada en un afloramiento de roca metamórfica del Paleozoico, ubicado 3 km al sur de Puente Quetame sobre la carretera a Villavicencio.

La roca presenta una deformación frágil de carácter penetrativo, caracterizada por planos de falla neoformados de gran dimensión. Los principales sistemas de falla que se observaron son: fallas de rumbo sinestrales de dirección NNE relativamente inclinadas; fallas de rumbo dextrales de dirección NW subverticales. Los azimuts y buzamientos de los ejes compresivo y extensivo son $\sigma_1 = N340^\circ, 10^\circ$ y $\sigma_3 = N248^\circ, 12^\circ$, definiendo un estado de esfuerzos en falla de rumbo. Estas direcciones no son representativas del régimen tectónico de la orogénesis actual y corresponden, probablemente, a una fase de deformación anterior (i.e. extensión del cretáceo).

3.2.3. Sistema Yopal. De manera similar al anterior, sobre este sistema se tomaron datos de un solo afloramiento.

1. Estación Río Chiquito: realizada sobre depósitos del Cuaternario, principalmente conglomerados con niveles limo-arenosos intercalados. El afloramiento está

localizado sobre el escarpe de la falla San Miguel, 8 km al SW de Aguazul, sobre la carretera principal.

La edad de estos depósitos parece muy reciente ya que los cantos no presentan indicios de meteorización. La deformación de los niveles más finos está caracterizada por diaclasas subverticales regularmente espaciadas y con azimut N100°, y fallas inversas de dirección NNE y buzamiento al NW, compatibles con la orientación de la falla principal (Figura 3.7-A).

La deformación de los conglomerados es muy intensa, presentando cantos fracturados y cizallados (Figura 3.7-B). La superficie de los fragmentos de roca aparece estriada por una matriz compuesta de materiales finos. La fracturación de los cantos sugiere que la magnitud de los esfuerzos tectónicos que generaron esta deformación fue particularmente intensa. Esta deformación pudo haberse originado durante rupturas superficiales asociadas a sismos sucesivos a lo largo de la falla San Miguel.

La deformación dinámica asociada a un sismo podría generar un aumento local de los niveles de esfuerzos en superficie, a proximidad de la zona de ruptura, trayendo como consecuencia el cizallamiento de los conglomerados en superficie.

La dirección y el buzamiento del esfuerzo principal compresivo es $\sigma_1 = N112^\circ, 35^\circ$. La inclinación de σ_1 puede estar asociada a la deformación superficial debida al movimiento a lo largo de la falla de San Miguel. La componente inversa de esta falla se expresa, en superficie, por un pliegue anticlinal en el compartimiento cabalgante y un pliegue sinclinal de menor amplitud en el bloque inferior cabalgado. El eje de estos pliegues es subparalelo a la falla ; la traza de falla esta localizada en el punto de inflexión entre los dos pliegues.

El régimen de esfuerzos tectónicos se sitúa entre falla inversa y falla de rumbo. La dirección de la falla San Miguel en este sector es alrededor de N35°. El estado de esfuerzos sugiere un movimiento principalmente inverso a lo largo de esta falla, con una pequeña componente dextral.

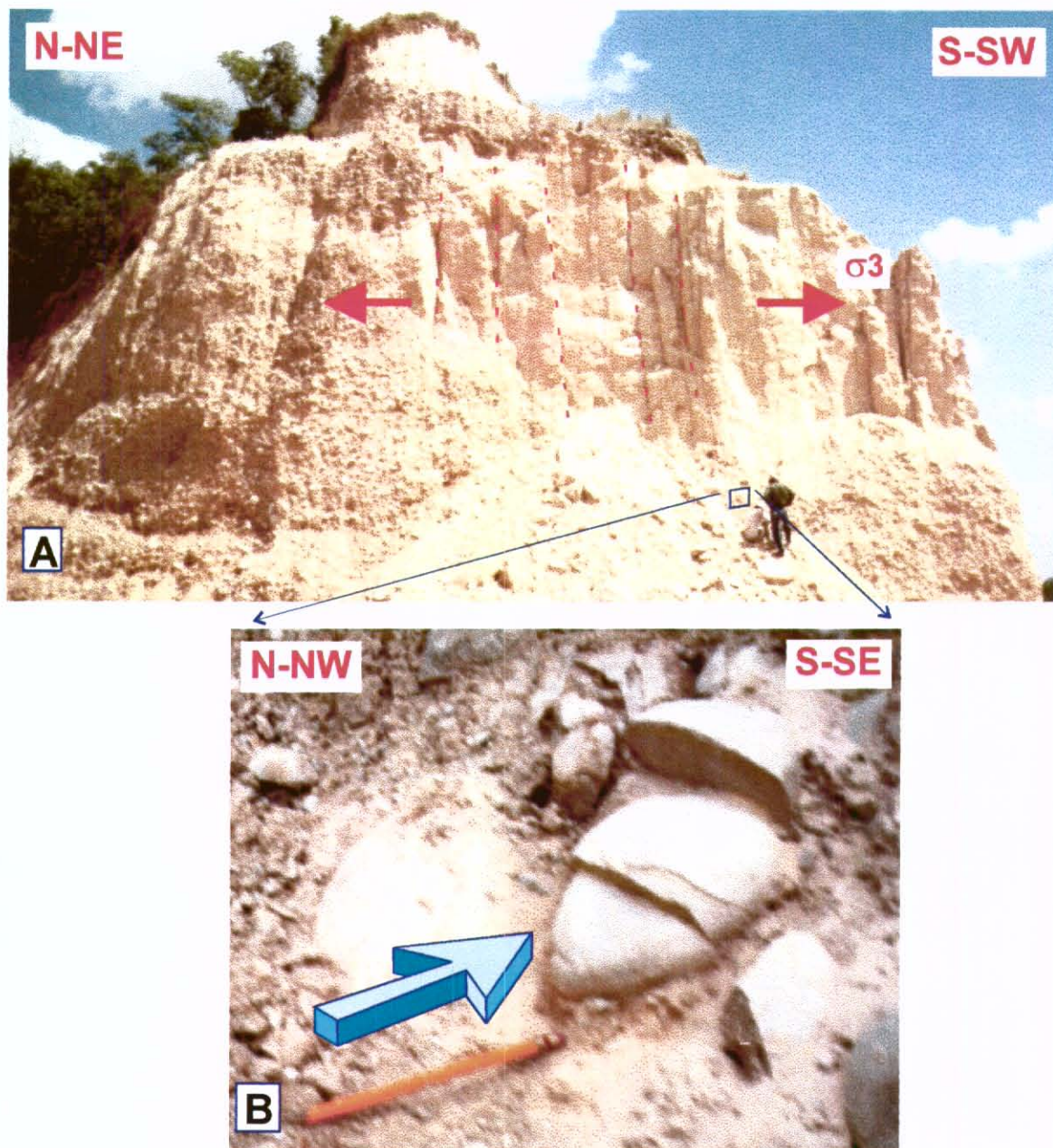


Figura 3.7 : Deformación tectónica de conglomerados cuaternarios con niveles limo-arenosos intercalados, sobre el escarpe de la falla Yopal al Sur de Aguazul - Estación Río Chiquito. A) Vista general del afloramiento ilustrando diaclasas verticales perpendiculares al eje de tensión σ_3 ; B) Detalle de canto de conglomerado cizallado en compresión - la flecha azul indica la dirección de σ_1 (N112°E).



PROYECTO
 MICROZONIFICACION SISMICA DE
 SANTA FE DE BOGOTA

MICROTECTÓNICA

3.3. REGION CENTRAL

3.3.1. Sistemas de fallas en el sector de la Sabana

1. Estación Circunvalar: realizada en un afloramiento de arcillolitas y areniscas de grano fino de la formación Guaduas (Cretáceo superior), ubicado en la Cra 4 con Cl 53 en un lote en construcción. El afloramiento está caracterizado por una falla inversa decamétrica de dirección NNE y buzamiento al SE.

Esta falla está relacionada con la deformación tectónica de la Falla de Bogotá situada aproximadamente 500 m al este del afloramiento.

La falla pone en contacto la arcillolita, localizada en el bloque cabalgante con la arenisca situada en el bloque cabalgado. La deformación intensa de la roca está caracterizada por una gran variedad de fallas que presentan una componente inversa dominante. El azimut y el buzamiento del esfuerzo principal compresivo es $\sigma_1 = N101^\circ, 28^\circ$. Esta inclinación sugiere que el volumen rocoso ha sido basculado posteriormente al funcionamiento de las fallas, asumiendo que el eje principal de esfuerzos σ_1 era subhorizontal durante la fase de deformación (i.e. estación Pico de las Aguilas). En este tipo de situaciones generalmente se supone que el eje de rotación del volumen rocoso es paralelo al azimut de la estratificación.

La estratificación tiene una dirección NNE y un buzamiento de 54° al SE. Esta hipótesis del basculamiento se ajusta bastante bien a las observaciones ya que la inclinación actual de la falla decamétrica es de 75° al SE. Este valor parece muy alto, y se reduce sensiblemente al desbascular el plano de manera que σ_1 quede horizontal. El régimen de esfuerzos al desbascular el tensor es en falla inversa. El azimut de σ_1 , al desbascular el tensor, es $N106^\circ$. La distribución de los planos en el diagrama de Mohr sugiere que algunas fallas son neoformadas y otras reactivadas. El esfuerzo correspondiente a fallas reactivadas permite trazar una recta de fricción. El plano de falla principal está localizado en la zona de neoformación del diagrama de Mohr (plano No 24) y presenta un movimiento inverso-dextral. El estado de esfuerzos sugiere un movimiento principalmente inverso a lo largo de la falla Bogotá.

2. Estación El Cajón: localizada en una cantera donde afloran rocas sedimentarios del Cretáceo, de la Formación Plaeners, en la autopista a Medellín. En este afloramiento se observan, además de planos estriados, otras microestructuras tales como estilolitas, grietas y pliegues de escala métrica. El análisis de este conjunto de datos conduce a un tensor de esfuerzos cuyo eje compresivo tiene azimuth y buzamiento $\sigma_1 = N285^\circ, 1^\circ$. Esta dirección es similar a la que se obtuvo sobre el sistema de fallas del Magdalena. El régimen tectónico que se determinó es de tipo fallamiento de rumbo.

Algunas de las estructuras observadas en este afloramiento indican una desviación de esfuerzos a proximidad de una falla de rumbo lateral izquierda, subvertical, de escala decamétrica y cuyo azimuth es $N134^\circ$ (Figura 3.8). En efecto, la dirección de las estilolitas y las grietas tiende a paralelizarse al plano de falla a proximidad del mismo. Esta desviación de esfuerzos es compatible con el modelo clásico de trayectorias de esfuerzo cerca de una falla de rumbo. La localización de los planos es compatible con el grado de penetración de las estrías medidas en el terreno.

3. Estación Subachoque : Realizada en una cantera localizada 9 km antes de Subachoque, en la vía Bogotá-Subachoque. En este caso la dirección de la compresión deducida a partir del análisis microtectónico es similar a la que se obtuvo más al sur en la cantera El Cajón ($\sigma_1 = N105^\circ, 10^\circ$). El valor de R y la orientación del tensor definen un contexto tectónico en fallamiento inverso y de rumbo. La orientación de la estratificación es consistente con la dirección del eje compresivo σ_1 . El tensor de esfuerzos está ligeramente basculado, lo cual sugiere una deformación del volumen rocoso contemporánea al plegamiento (basculamiento) de las capas. Algunas de las estrías se midieron sobre el plano de estratificación. Estas estrías son representativas del movimiento relativo entre las capas.

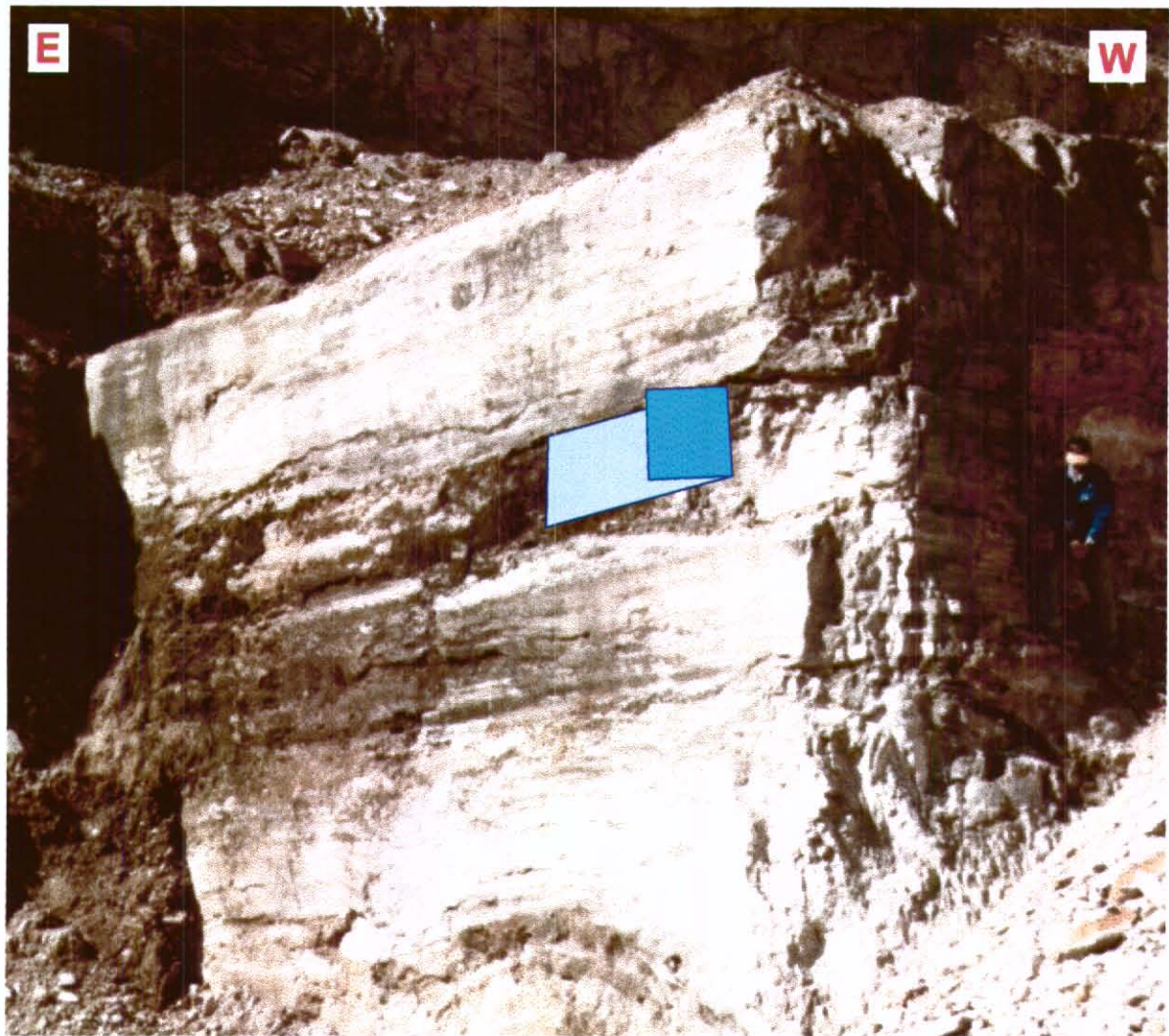


Figura 3.8 : Plano de falla vertical de dirección SE y sentido de movimiento lateral-izquierdo en rocas del Cretáceo Superior (formación Plaeners) - Estación El Cajón, Subachoque. El sentido de movimiento es compatible con la dirección de la compresión ($\sigma_1 = N105^\circ E$).

4. Estación Boquerón de Tabio : Realizada en un afloramiento de rocas cretáceas (formación Plaeners), situado en la divisoria de aguas del relieve entre Subachoque y Tabio. La dirección y buzamiento de la compresión $\sigma_1 = N319^\circ, 19^\circ$; el contexto tectónico del afloramiento es en falla de rumbo. La orientación de las diaclasas observadas es compatible con la orientación de los esfuerzos principales. Gran parte de los planos observados en el terreno presentaba estrías penetrativas.

La localización de estos en el círculo de Mohr es compatible con el grado de penetración de las estrías. Sin embargo, varios de los planos observados no son compatibles con el tensor solución, y un análisis más detallado de este afloramiento es necesario, antes de poder concluir que las rocas fueron afectadas por otra fase de deformación tectónica.

5. Otros Afloramientos : Se visitaron algunas canteras y afloramientos al Sur de la Sabana con el propósito de determinar la orientación de los esfuerzos en vecindad de la falla de rumbo de Facatativá (de dirección N-W). En el sector de Mondoñedo y de Soacha, las estructuras tectónicas kilométricas (i.e. ejes de pliegues) situadas al SW de la falla de Facatativá tienen una orientación N-NW. Esta orientación es distinta de la dirección regional N-S observada más hacia el Sur, y probablemente está asociada con una rotación antihoraria de las estructuras debida al movimiento lateral izquierdo del accidente de Facatativá. La orientación del campo de esfuerzos en este sector es diferente de las direcciones obtenidas más hacia el Norte. En términos generales, el esfuerzo compresivo σ_1 tiene una dirección cercana de $N80^\circ E$ y es subhorizontal. La presencia de fallas de rumbo conjugadas y fallas inversas sugiere un contexto tectónico intermedio entre régimen compresivo y de rumbo. Las fallas inversas tienen generalmente azimuth N-NW y buzamiento hacia el E-NE y hacia el W-SW. El movimiento inverso de estas fallas absorbe y amortigua el desplazamiento de rumbo a lo largo de la falla de Facatativá. Igualmente se observan repliegues invertidos en cercanía de las fallas mayores dentro de la secuencia del Cretáceo Superior que aflora en el sector. En particular, la formación Plaeners se destaca por la intensa deformación compresiva.

Se observan también estructuras extensivas de dirección perpendicular a las compresivas. Los niveles plegados presentan grietas de tracción, diaclasas y en menor grado fallas normales de dirección N-NE. Estas estructuras son compatibles con un eje extensivo de dirección N-NW, perpendicular al eje compresivo (Figura 3.9). Adicionalmente, se observan grietas de tracción asociadas con la flexión de las capas debida al plegamiento.



Figura 3.9 : Flanco oriental de pliegue asimétrico asociado probablemente al amortiguamiento de un cabalgamiento del sistema de Facatativá - Estación Mondoñedo 1. Las diaclasas inclinadas de dirección E-NE (en azul) y la falla de rumbo sinistral de dirección E-W (en amarillo) resultan de una compresión de dirección E-NE (flecha verde perpendicular al eje del pliegue) y una extensión de dirección N-NW (estructuras anteriores al basculamiento); las diaclasas en rojo están asociadas con la flexión de las capas durante el plegamiento.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

MICROTECTÓNICA

3.3.3. Fallas de Boyacá y Soapaga

1. Afloramientos Estudiados : La falla de Soapaga se estudió en cercanía de Pesca (al Sur), y entre Corrales y Paz del Río (al Norte). Se observaron estructuras compresivas en rocas sedimentarias del Cretáceo y del Terciario, tales como repliegues de escala variable y fallas inversas. La dirección del esfuerzo principal compresivo σ_1 asociado con estas estructuras es cercana de N120°E, lo cual sugiere que la falla de Soapaga (de dirección N30°E) tiene un movimiento inverso dominante. En algunos sectores se observaron fallas normales y grietas de tracción de azimuth E-SE, compatibles con un eje extensivo σ_3 de dirección N-NE (Figura 3.10). Estas estructuras extensivas son perpendiculares a la compresivas y sugieren localmente un régimen tectónico de rumbo.

La falla de Boyacá se analizó en el sector de Cómbita, al Norte de Tunja, donde se observaron afloramientos situados en el bloque yacente del accidente. Las estructuras tectónicas de pequeña escala son generalmente de tipo compresivo, destacándose los repliegues, los fallamientos inversos y los planos de disolución (estilolitas) presentes en la formación Plaeners del Cretáceo Superior. El análisis de estas estructuras es compatible con una dirección de la compresión σ_1 vecina de N125°E. Esta dirección es sub-perpendicular al azimuth de las trazas principales de los cabalgamientos observados en el sector. El eje del anticlinal de Arcabuco situado en el bloque cabalgante de la falla de Boyacá tiene una dirección NE por lo cual se concluye que, al igual que la falla de Soapaga, este accidente tiene una componente inversa dominante (cabalgamiento con vergencia al SE). Como característica de interés para la neotectónica, se constató que la formación Tilatá del Plioceno - Pleistoceno Inferior, está deformada y basculada en cercanía de la traza de falla de Boyacá (Figura 3.11). Esta deformación está probablemente asociada a la activación de este accidente mayor durante el Plio-Cuaternario.

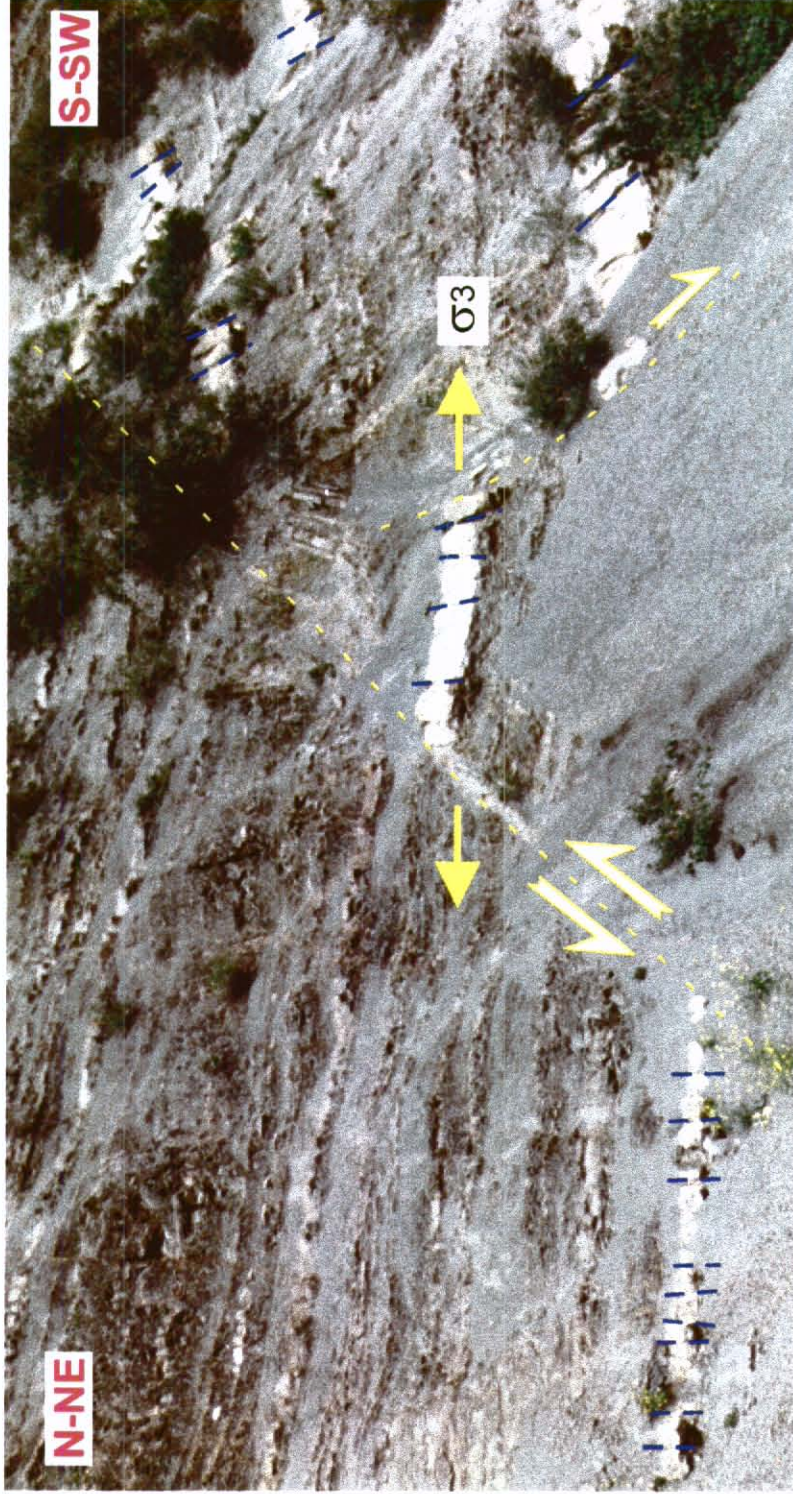


Figura 3.10 : Fallas normales (en amarillo) y diaclasas verticales (en azul) observadas en afloramiento de Cretáceo Superior al SW de Tasco (Boyacá). El plano de estratificación tiene dirección N-S y buzamiento hacia el Este. Estas estructuras son compatibles con un régimen de esfuerzos en falla de rumbo con σ_1 de dirección E-SE y σ_3 de dirección N-NE (flechas amarillas).



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

MICROTECTÓNICA



Figura 3.11 : Terciario Superior (formación Tilatá) deformado y basculado hacia el NW en el bloque yacente de la falla de Boyacá - sector del sinclinal de Los Medios.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

MICROTECTÓNICA

3.4. MAPA DE DIRECCIONES DE ESFUERZOS PRINCIPALES

A partir del análisis microtectónico es posible construir un mapa preliminar de las direcciones principales de esfuerzos tectónicos horizontales (Plancha 3). Esta información es de gran interés para caracterizar el tipo de movimiento de las distintas fallas activas. De manera general, el esfuerzo principal compresivo (σ_1) es subperpendicular a la cadena de montañas, concluyéndose que las principales fallas activas y potencialmente activas tienen movimiento inverso dominante. A lo largo del Piedemonte llanero se observa una rotación del eje principal compresivo: al sur de Medina, la dirección de σ_1 es sudeste (perpendicular a la traza de falla del Guaicáramo), mientras que hacia el norte (Aguazul) la dirección es E-SE. Este cambio de dirección podría indicar un aumento de la componente dextral, hacia el noreste de los Sistemas del Guaicáramo y Yopal, a medida que las fallas remontan la Cordillera Oriental.

La dirección de σ_1 en el Sistema de fallas de la Sabana de Bogotá y del Magdalena, es relativamente homogénea y cercana a E-SE. Esta dirección podría sugerir una ligera componente lateral izquierda a lo largo de algunas trazas de falla, cuya dirección es norte-sur, tales como la Falla del Alto del Trigo, en la proximidad de Vianí, y la Falla de Mulatos cerca a Lérída. Muchos de los tensores de esfuerzos obtenidos definen un fallamiento de rumbo (σ_3 horizontal), compatible con las hipótesis formuladas. Los movimientos de los diversos sistemas de falla, que afectan la Cordillera Oriental, indican un acortamiento notable de dirección media E-SE. Las componentes de rumbo, a lo largo de las fallas, sugieren un levantamiento suave de la cordillera a través de los sistemas dextrales del Piedemonte Llanero y de los sinestrales en el Magdalena. Todos estos resultados deben precisarse y confirmarse por medio de estudios sismo-tectónicos más detallados.

CAPÍTULO 4

4. SÍNTESIS DE RESULTADOS

A partir de la caracterización de las fallas estudiadas, se presenta una síntesis de los resultados con el propósito de comparar y destacar las diferentes fuentes sismogénicas. Cabe señalar que para cada segmento de falla analizado se han calculado parámetros tales como la magnitud máxima probable MMP, la tasa de actividad (semi-cuantitativa) y los rasgos neotectónicos (Tablas 2.1; 2.2; 2.3). Estos parámetros permiten estimar un rango de edades para el período de retorno de los sismos a partir de relaciones estadísticas. Para evaluar la peligrosidad relativa de los diferentes segmentos, se han correlacionado estos parámetros de manera a identificar las fallas más críticas desde el punto de vista de la amenaza sísmica.

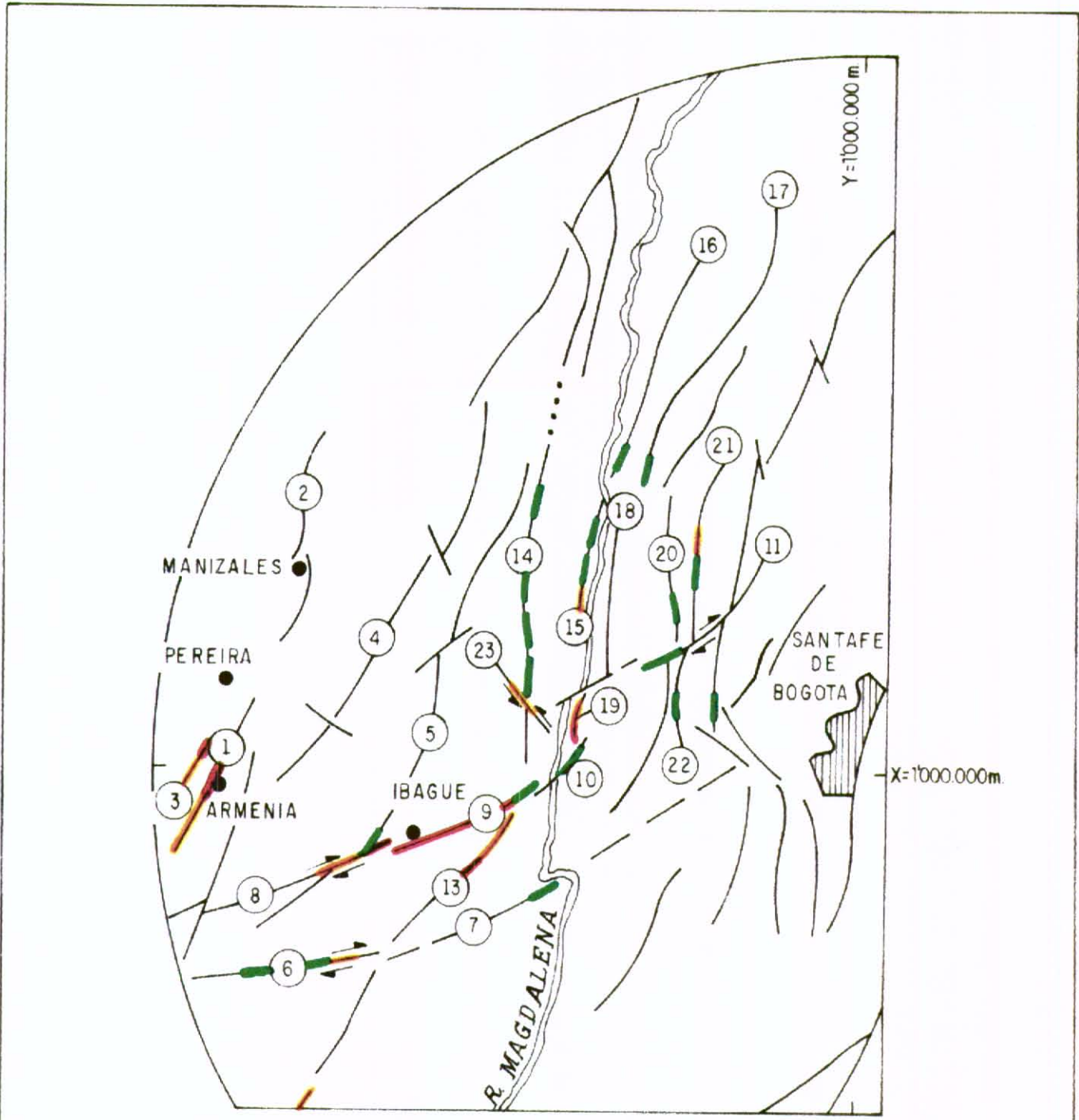
4.1. RASGOS MORFO-NEOTECTONICOS

Como se ilustra en las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3, se diferenciaron tres categorías de indicios de Neotectónica: fuertes, moderados y débiles. En la Figura 4.1 se muestra la calidad de los rasgos morfológicos de actividad neotectónica encontrados en las fallas de la Región Noroccidental. Obsérvese que los rasgos de mayor grado de desarrollo se presentan en las fallas de Ibagué, Doima, Cambao sur, Armenia y Montenegro.

Los mejores rasgos neotectónicos de la Región Suroriental (Figura 4.2) se observaron en las fallas de Guayuriba y Acacias (Sistema de Servitá - Santa María), Cumaral y Guaicáramo Centro (Sistema del Guaicáramo), Upamena y Yopal (Sistema de Yopal).

De igual forma en la Figura 4.3, donde se ilustran los indicios neotectónicos de los segmentos de la Región Central, se aprecia la baja calidad de los rasgos de actividad; en esta región solamente se detectaron indicios fuertes sobre un tramo de la Falla La Cajita, en el área del Páramo del Sumapaz, y algunos indicios moderados en el conjunto de fallas de dirección SW y la Falla del río Tunjuelito.

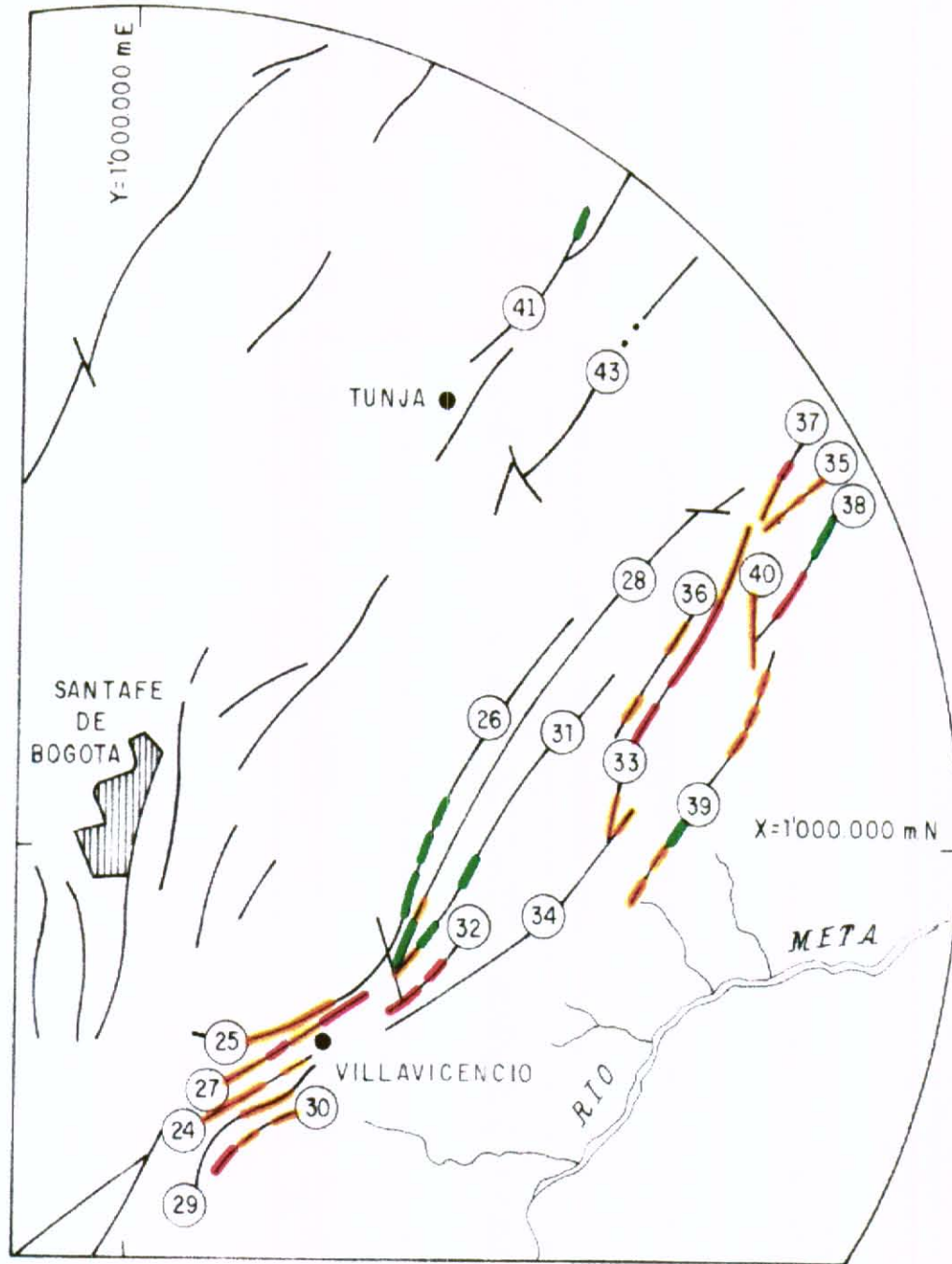
En general, los rasgos fuertes de neotectónica están relacionados con las fallas consideradas activas, mientras que los indicios moderados y débiles, con algunas excepciones, corresponden a fallas catalogadas potencialmente activas.



CONVENCIONES

- ① N° de Falla (Tablas 2.1 y 2.2)
- Falla definida
- Falla inferida
- Falla Cubierta
- Indicios fuertes
- Indicios moderados
- Indicios débiles

 INGEOMINAS		
MAPA DE RASGOS NEOTECTÓNICOS DE LA REGIÓN NOROCCIDENTAL		
Escala : 1 : 1,600,000	Fecha : Mayo / 96	Figura : 4.1

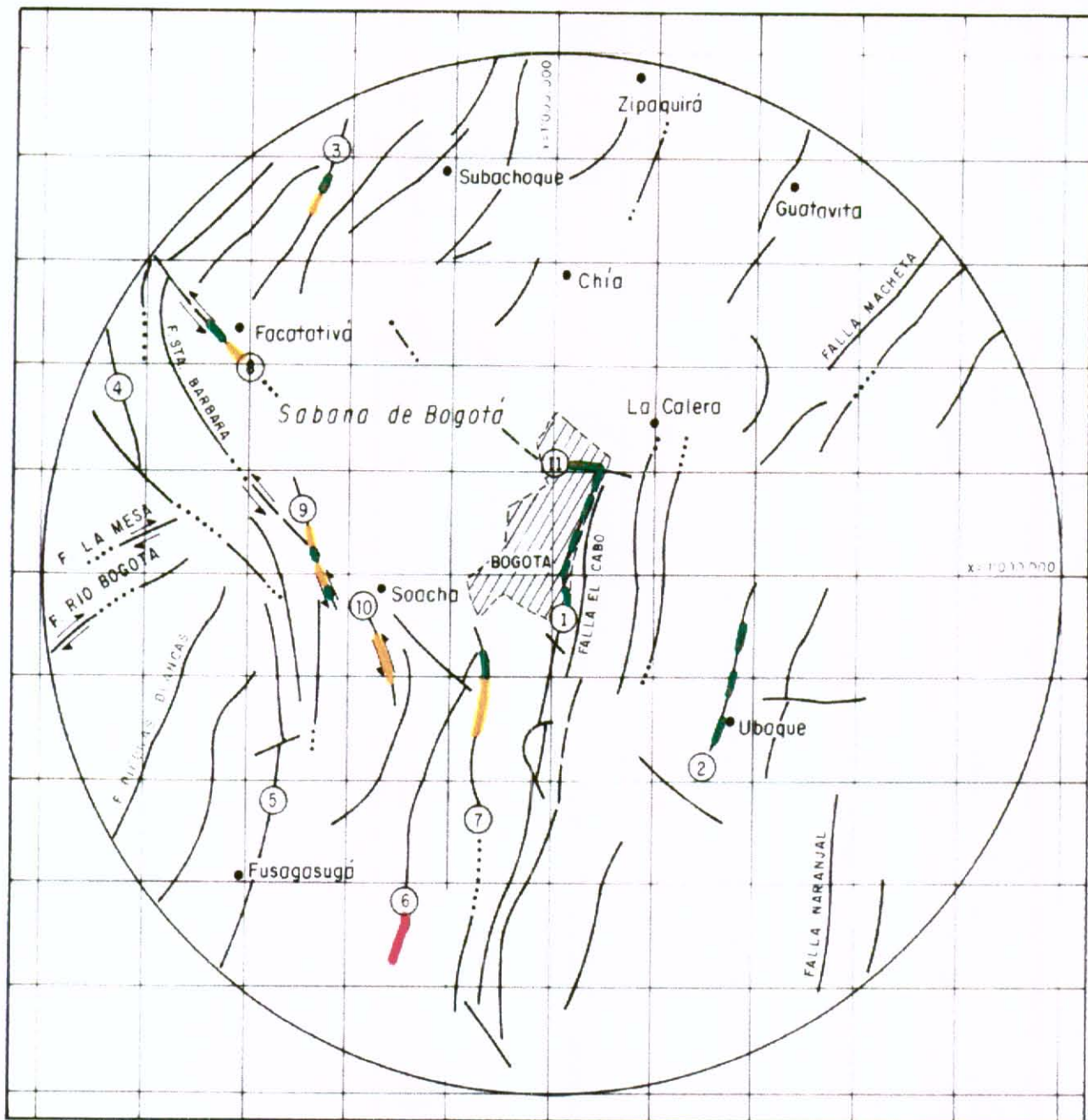


CONVENCIONES

- ① N° de Falla (Tablas 2.1 y 2.2)
- Falla definida
- Falla Inferida
- Falla Cubierta
- Indicios fuertes
- Indicios moderados
- Indicios débiles



MAPA DE RASGOS NEOTECTÓNICOS DE LA REGIÓN SURORIENTAL



CONVENCIONES

- ① Número de falla (Tabla 2.3)
- Falla de movimiento principal de rumbo con sentido de movimiento
- Fallas principales inversas
- Indicios Moderados**
- Indicios Débiles**
- Indicios Fuertes**

 INGEOMINAS	 Escudo Nacional de Colombia
MAPA DE RASGOS NEOTECTÓNICOS DE LA REGIÓN CENTRAL	
Escala : 1 : 625,000	Fecha : Mayo / 96 Figura : 4.3

4.2. ACTIVIDAD DE FALLAS

De acuerdo con la clasificación presentada en el Tabla 1.1, se definieron tres rangos posibles de actividad de fallas: a) activas; b) potencialmente activas; y c) actividad incierta. Esta clasificación se basa, tanto en la información tectónica, como en el análisis de la información referente a sismicidad histórica e instrumental.

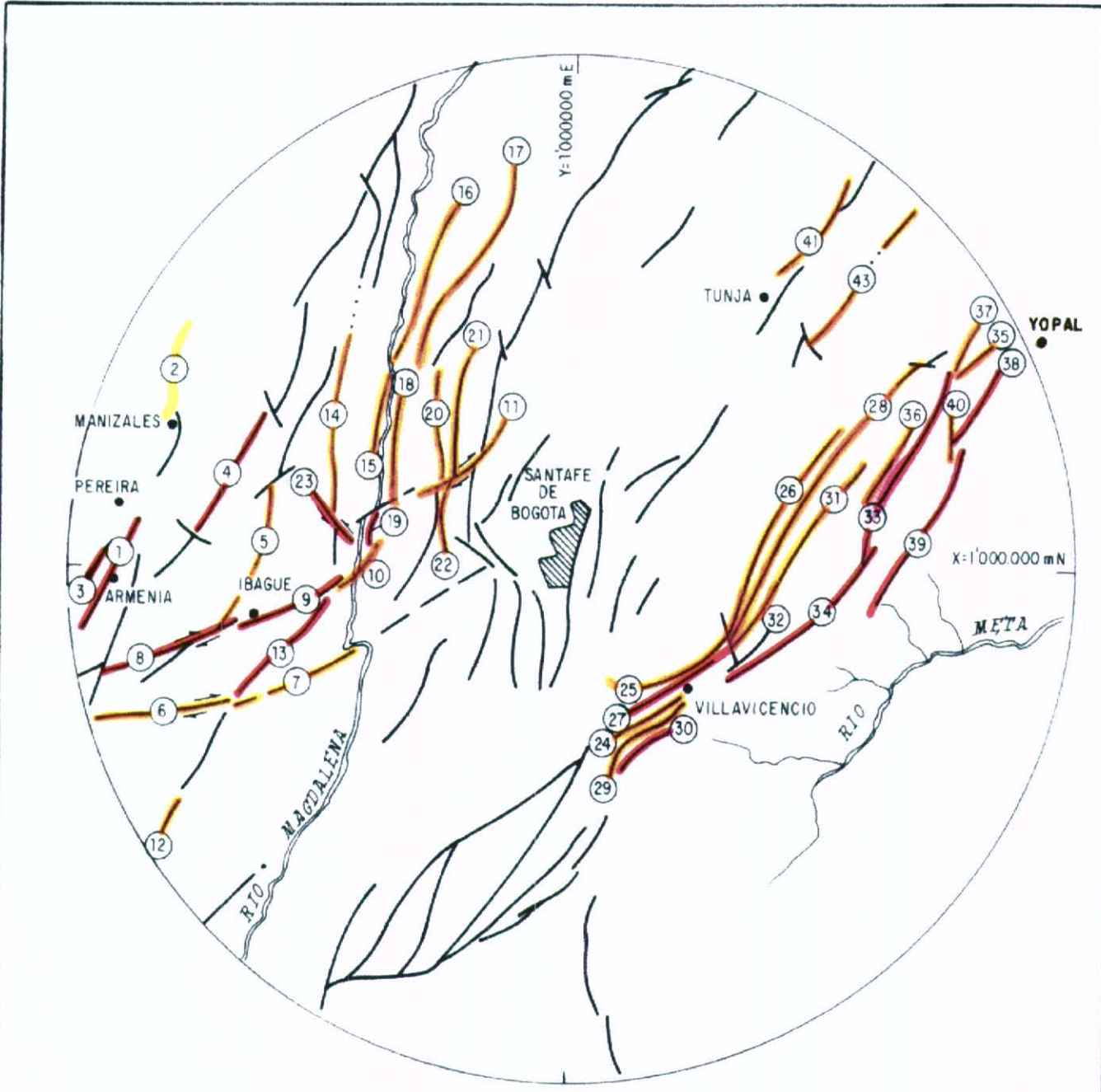
En la Figura 4.4 se ilustra, sobre un mapa regional simplificado, la actividad de las fallas de las regiones Noroccidental y Suroriental. En ambas regiones se aprecian varios segmentos activos relacionados con los Sistemas de Servitá-Santa María, Guaicáramo y Yopal, en el piedemonte llanero, y el Sistema de Ibagué en la zona del Magdalena.

Se aprecia que las fallas activas de la Región Suroriental se sitúan hacia la parte más externa de la Cordillera Oriental, en límite con el llano. Inversamente las fallas *potencialmente activas* se ubican hacia la parte interna de la cordillera. Esta distribución de la actividad sugiere que la deformación neotectónica es mayor en los sistemas de falla del piedemonte llanero y disminuye progresivamente hacia la zona axial de la cordillera. Es probable que la deformación tectónica haya migrado a través del tiempo, activando sucesivamente nuevos sistemas de falla cada vez más externos.



En la Región Noroccidental los sistemas de falla rumbo-deslizantes parecen ser más activos, que las fallas inversas que limitan el Valle del Magdalena. Esto es compatible con un régimen de esfuerzos tectónicos en falla de rumbo.

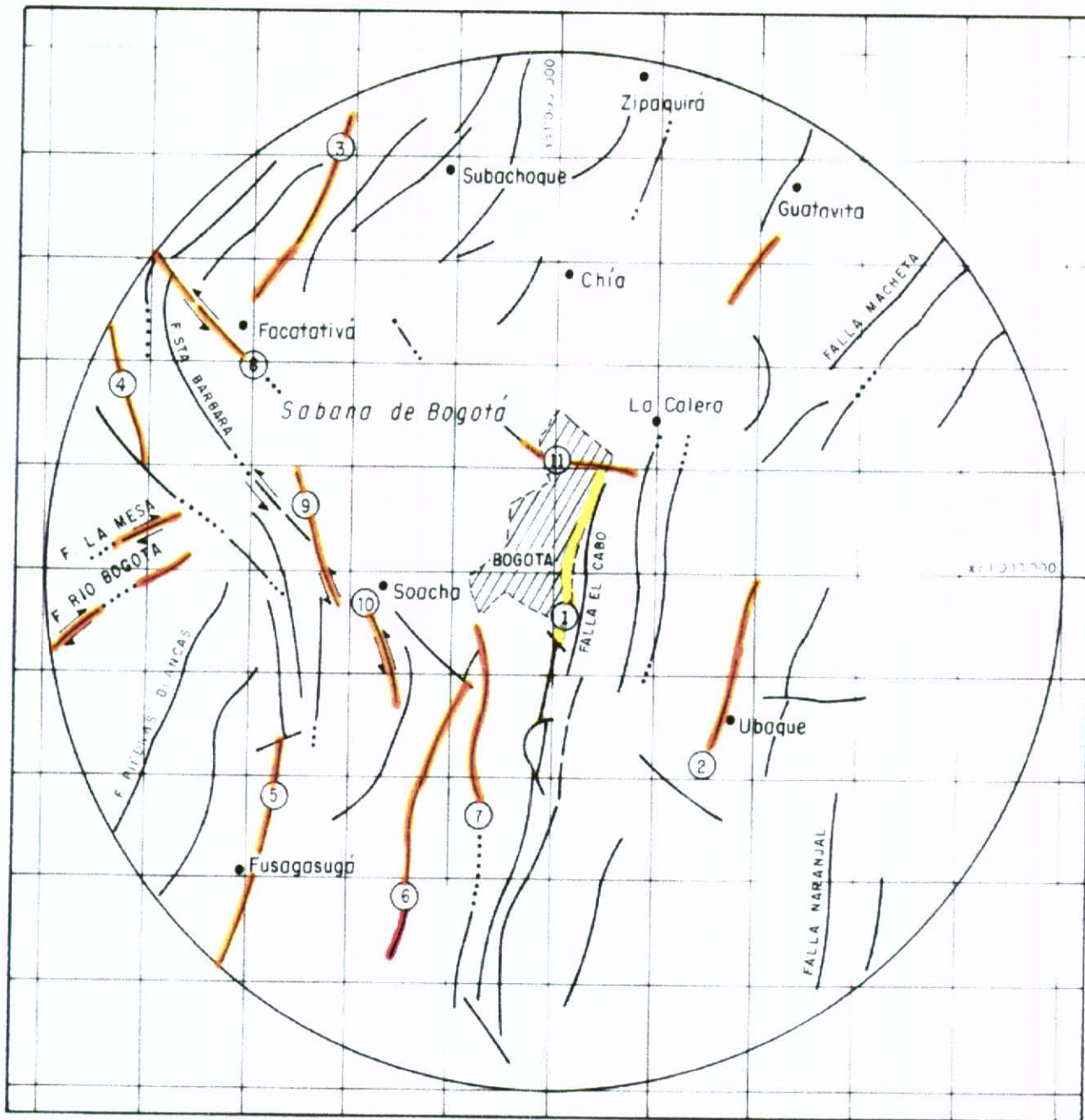
En la Región Central se identificaron únicamente fallas potencialmente activas, entre las cuales cabe mencionar las fallas inversas paralelas al eje de la cordillera y las fallas de rumbo sinestrales de dirección NW-SE (Figura 4.5). Estas observaciones son compatibles con una disminución de actividad tectónica en la zona axial de la Cordillera Oriental.

La Falla de Bogotá es una estructura que no mostró indicios concluyentes de actividad neotectónica, probablemente por la intensa actividad antrópica. Debido a su cercanía a la Capital se le catalogó como de actividad incierta, lo cual sugiere que son necesarios estudios detallados de trincheras para tratar de determinar su actividad neotectónica.








- ① Número de falla (Tablas 2.1 y 2.2)
- Fallo Cubierta
- Fallo definida
- - - Fallo inferida
- Fallo activo
- Fallo potencialmente activo
- Fallo actividad incierta
- Ciudad Capital de departamento

 INGEOMINAS	
MAPA DE ACTIVIDAD DE FALLAS DE LAS REGIONES NOROCCIDENTAL Y SURORIENTAL - Tabla 1.1.	
Escala : 1 : 2,470,000	Fecha : Mayo / 96
Figura . 4.4	



CONVENCIONES

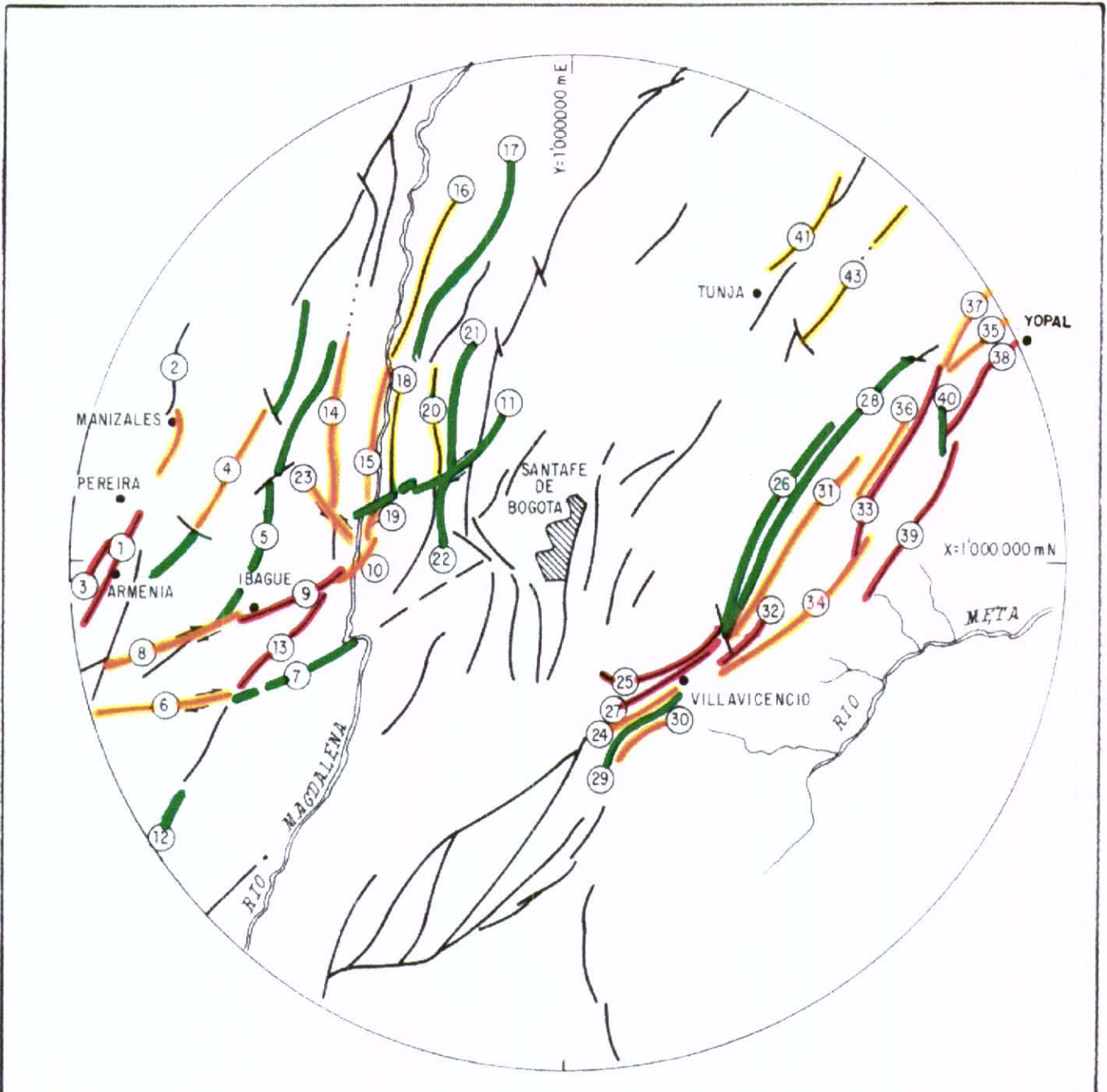
- ① Número de falla (Tabla 2.3)
-  Falla de movimiento principal de rumbo con sentido de movimiento
-  Fallas principales inversas
-  Falla potencialmente activa
-  Actividad incierta
-  Falla Activa

 INGEOMINAS	 REPUBLICA DE COLOMBIA
MAPA DE ACTIVIDAD DE FALLAS DE LA REGIÓN CENTRAL	
Escala : 1 : 625,000	Fecha : Mayo / 96
Figura : 4.5	

4.3. TASA DE ACTIVIDAD

La tasa de actividad semi-cuantitativa está relacionada con la calidad y la extensión de los rasgos morfológicos de actividad neotectónica, observados en campo y fotos aéreas (Tabla 1.2). Nótese que a mayor tasa de actividad, el período de retorno de un sismo de una magnitud dada es menor. Los segmentos de tasa de actividad alta pertenecen a los sistemas de Servitá-Santa María, Guaicáramo y Yopal, en el piedemonte llanero, y a los sistemas de Ibagué y Romeral en la Región Noroccidental (Figura 4.6). Algunas fallas de la zona axial de la Cordillera Oriental, del Valle del Magdalena y algunas del sistema del borde llanero, se les determinó una tasa de actividad entre intermedia y baja.

En la zona aledaña a Bogotá, en la Región Central (Figura 4.7), se destaca que los segmentos con mayor movilidad corresponden a las Fallas del Río Tunjuelito y La Cajita, a las cuales se les asignó una tasa de actividad intermedia (0,01-0,1 cm/año). Lo anterior sugiere que la sismicidad local posiblemente tiene magnitudes menores y períodos de retorno más largos que los sismos provenientes de las regiones Nororiental y Suroccidental.

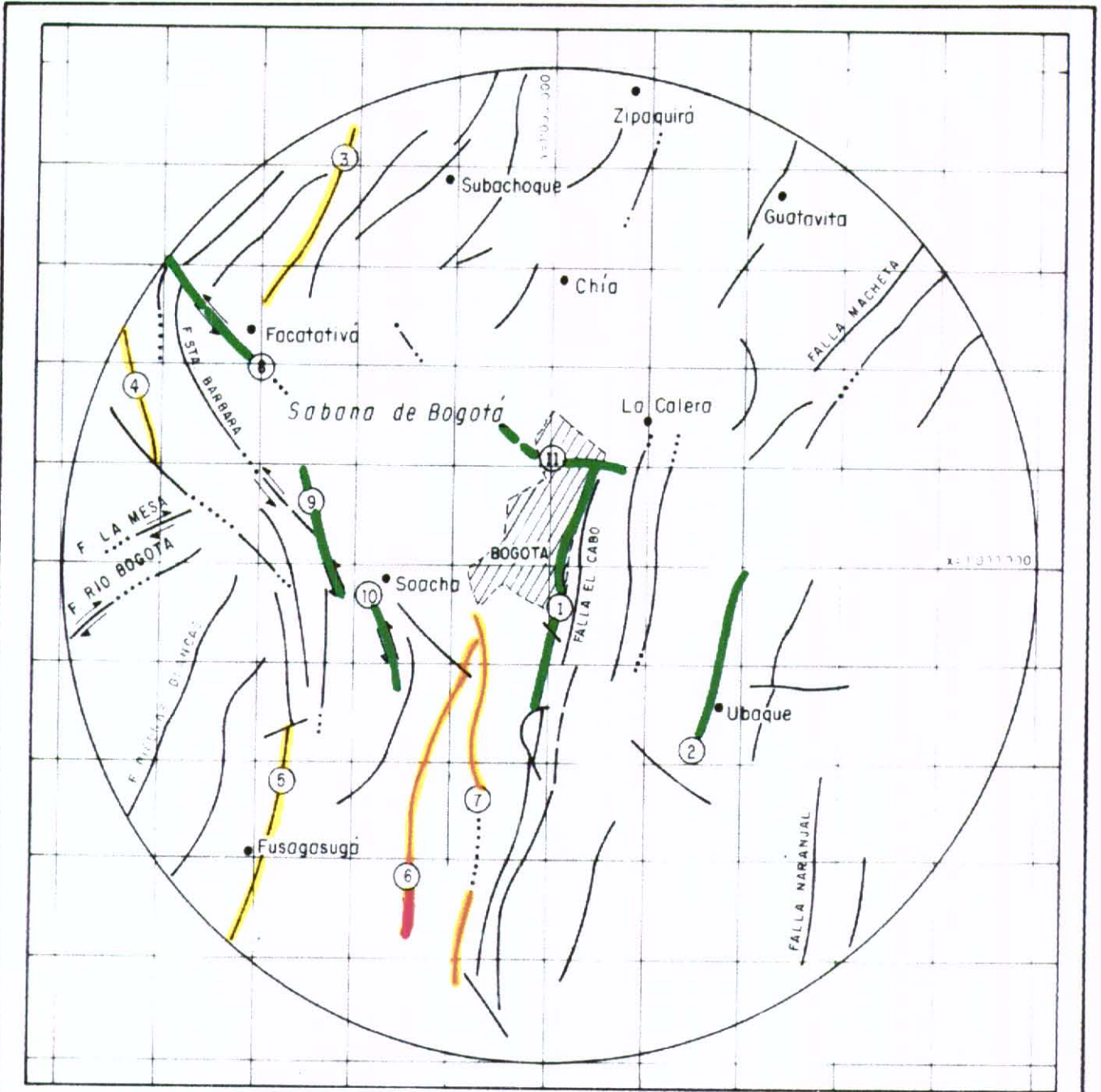


- ① Número de falla (Tablas 2.1 y 2.2)
 - Falla Cubierta
 - Falla definida
 - - - - - Falla Inferida
 - Ciudad Capital de departamento
 - Alta (A); Alto inter. (A-I)
 - Intermedia (I) - (B-I)
 - Baja (B)
 - Muy bajo (MB)
- } Ver Tabla 1.2




TASA DE ACTIVIDAD SEMICUANTITATIVA DE FALLAS DE LAS REGIONES NOROCCIDENTAL Y SURORIENTAL

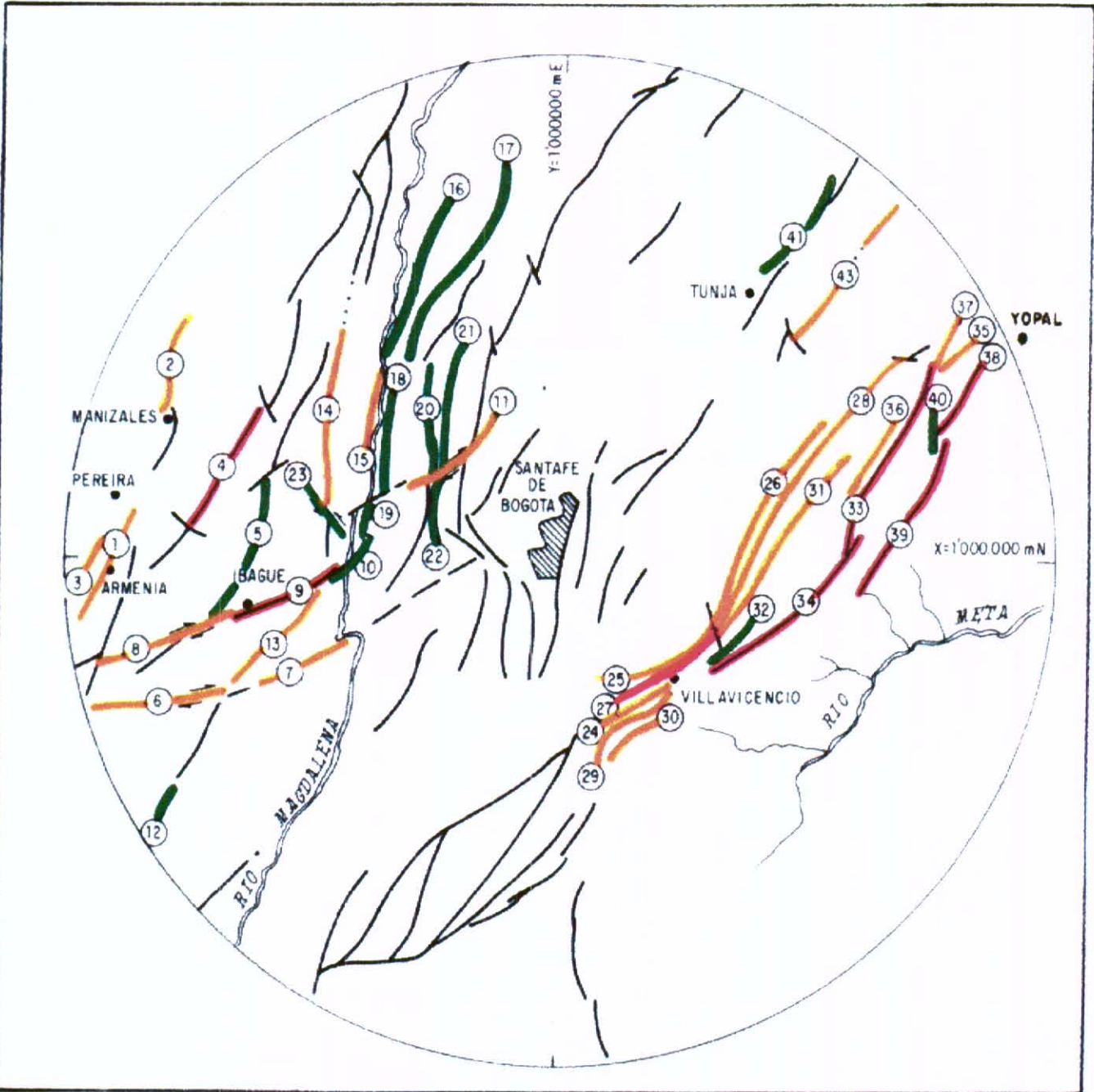
Escala: 1 : 2,470,000	Fecha: Mayo / 96	Figura 4.6
-----------------------	------------------	------------





CONVENCIONES

- ① Número de falla (Tabla 3.3)
- Falta de movimiento principal de rumbo con sentido de movimiento
- Alta inter. (A-I)
- Intermedia (I)
- Bajo (B)
- Muy baja (MB)

 INGEOMINAS	
TASA DE ACTIVIDAD SEMICUANTITATIVA DE FALLAS DE LA REGIÓN CENTRAL (Tabla 1.2).	
Escala 1 : 625,000	Fecha : Mayo / 96
Figura 4.7	



- ① Número de falla (Tablas 2.1 y 2.2)
- Falta Cubierta
- Falta definida
- Falta inferida
- Ciudad Capital de departamento
- 7.0 ≤ MMP (Ms)
- 6.5 ≤ MMP < 7.0 (Ms)
- 6.0 ≤ MMP < 6.5 (Ms)

MAPA DE MAGNITUDES MÁXIMAS PROBABLES (MMP) DE LAS REGIONES NOROCCIDENTAL Y SURORIENTAL

Escala : 1 : 2,470,000
Fecha : Mayo / 96
Figura 4.8

4.4. MAGNITUDES MAXIMAS PROBABLES (MMP)

Los mayores valores esperados de MMP corresponden a los segmentos de mayor longitud, con indicios de actividad neotectónica de intensidad variable presentes a lo largo de gran parte de la traza de falla. En términos generales son accidentes con un movimiento inverso dominante. Las fallas de mayor potencial sísmico se localizan en la Región Suroriental (Figura 4.8) y corresponden al conjunto de fallas del borde llanero de las cuales sobresalen, en orden de importancia, las fallas de Guaicáramo Centro, San Pedro, Guaicáramo Sur, Yopal y Guayuriba ($MMP \geq 7.0$).

En la Región Noroccidental se destacan las fallas de Ibagué y Palestina, con MMP igual a 7.0 (Figura 4.8) y en la Región Central las fallas de La Cajita y Río Tunjuelito con MMP de 6.4 (Tabla 2.3; Figura 4.9).

4.5. MMP Y TASA DE ACTIVIDAD Vs DISTANCIA MEDIA A BOGOTA

En las Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se ilustran, para las tres regiones estudiadas, histogramas indicando la magnitud máxima probable de las diferentes fuentes sismogénicas en función de la distancia media de la traza de falla a la ciudad de Bogotá. Igualmente se indica la tasa de actividad de las fallas por medio de colores distintos.

El análisis de estas figuras confirma el mayor potencial sísmico de las fallas de la Región Suroriental, mostrando además que es la región con el mayor número de fallas activas en el rango de tasa de movimiento alto y alto-intermedio. Se aprecia en la figura 4.11 que de las fallas con tasa de actividad alta en la Región Suroriental, la Falla de Servitá (No. 25, MMP = 6.9) se ubica a alrededor de 65 km de Bogotá, la Falla de Guayuriba (No. 27, MMP = 7.0) a 80 Km, Guaicáramo Centro (No. 33, MMP = 7.2) a 135 km y San Pedro (No. 39, MMP = 7.2) a 145 km.

De las fallas de la Región Noroccidental se destacan como mayores fuentes sísmicas potenciales la Falla de Ibagué (No. 9, MMP = 7.0), ubicada a una distancia media de Bogotá de aproximadamente 110 km y la Falla de Doima (No. 13, MMP=6.7) (Figura 4.10).

Cabe señalar la presencia en ambas regiones de varias fuentes sismogénicas con tasas de actividad intermedia, magnitud máxima probable vecina de 7 y distancia media a Bogotá inferior a 100 km. De estas se destacan la falla de Guaicáramo Sur (No. 34, MMP = 7.1) en el sector Suroriental, y la falla de Honda Sur (No. 15, MMP=6.7) en el sector Noroccidental.

Entre las fuentes cercanas con tasa de actividad intermedia (Región Central) sobresalen la Falla La Cajita (No. 6, MMP=6.4) y la falla del Río Tunjuelito (No. 7, MMP=6.4) (Figura 4.12).

HISTOGRAMA DE MAGNITUD MÁXIMA PROBABLE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA MEDIA DE LA FALLA A BOGOTÁ - REGIÓN NOROCCIDENTAL (FALLAS No. 1 - 23, TABLA 2.1)

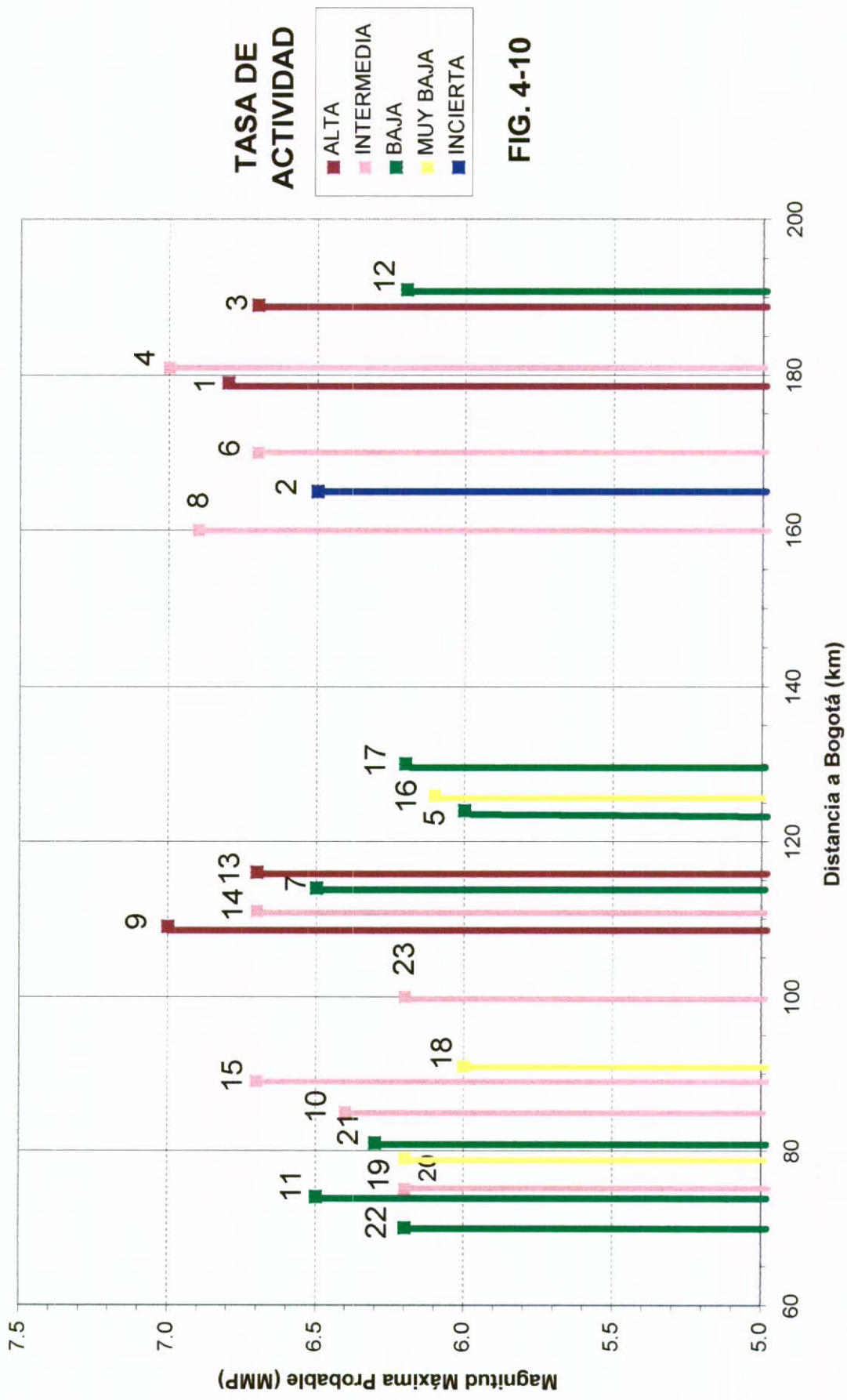


FIG. 4-10

HISTOGRAMA DE MAGNITUD MÁXIMA PROBABLE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA MEDIA DE LA FALLA A BOGOTÁ - REGIÓN SURORIENTAL (FALLAS No. 24 - 43, TABLA 2.2)

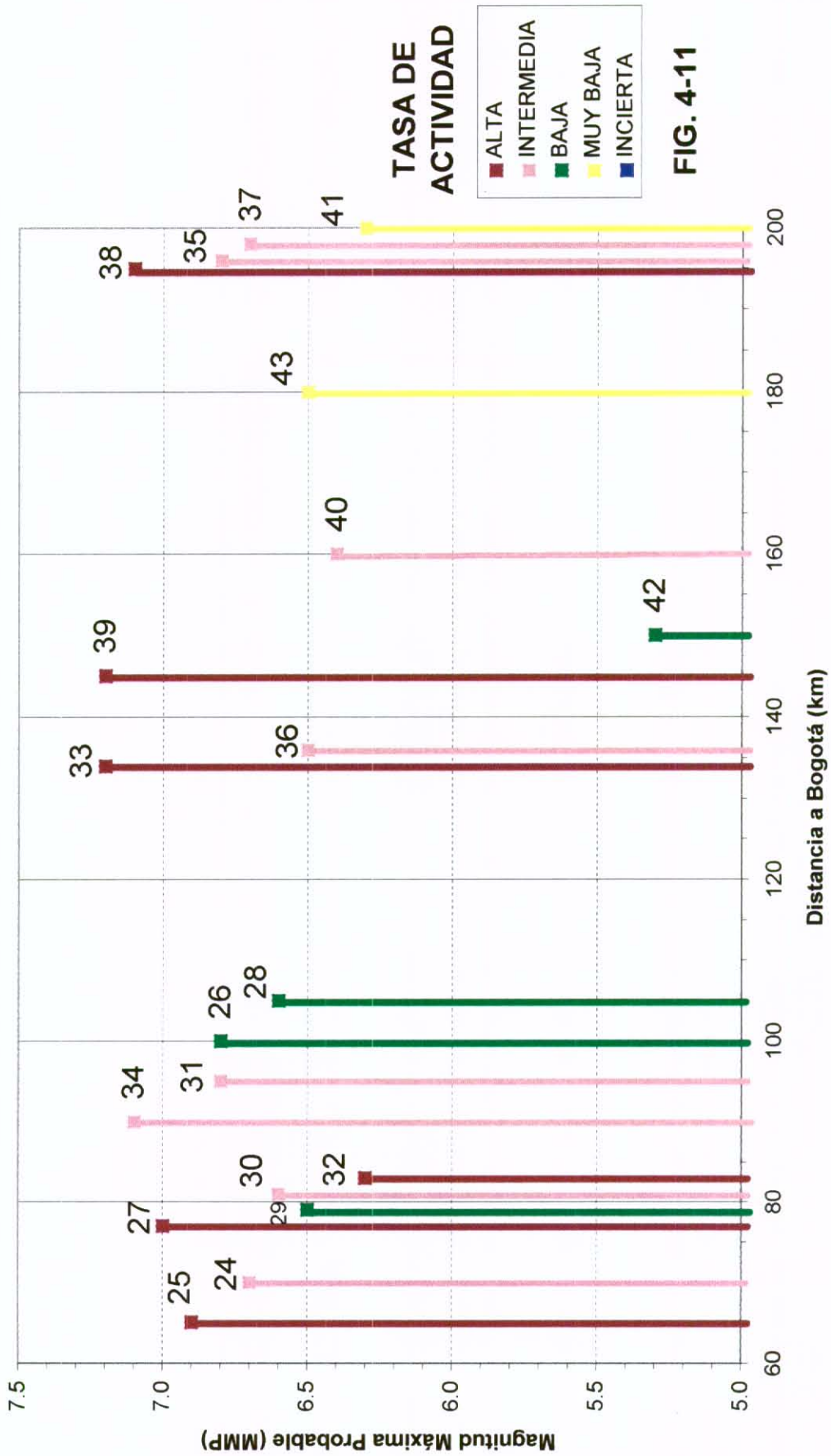


FIG. 4-11

HISTOGRAMA DE MAGNITUD MÁXIMA PROBABLE EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA MEDIA DE LA FALLA A BOGOTÁ - REGIÓN CENTRAL (FALLAS No. 1 - 11, TABLA 2.3)

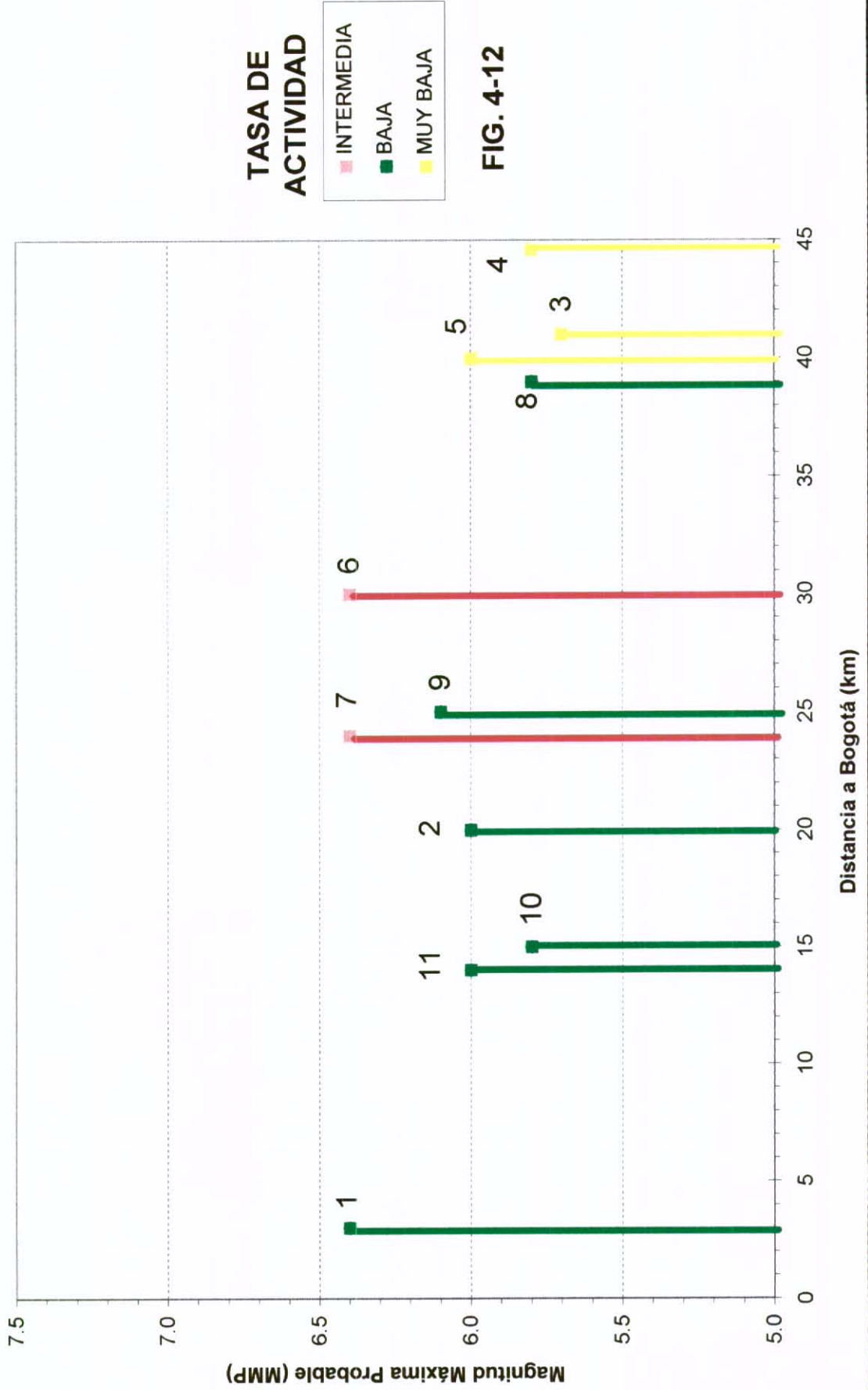


FIG. 4-12

4.6. PERIODO DE RETORNO Vs MMP

A partir del valor estimado de la magnitud máxima probable y de la tasa de actividad semi-cuantitativa es posible estimar un intervalo de tiempo correspondiente al periodo de retorno de los sismos mayores. Esta estimación utiliza la tabla propuesta por Slemmons (1982), en la cual se define el periodo de retorno en función de la magnitud y la velocidad promedio de la falla.

La Figura 4.13 ilustra los intervalos de periodo de retorno estimado para las fuentes sismogénicas de la Región Noroccidental. A cada falla se le asocia un intervalo de tiempo considerando el rango de velocidad de movimiento a lo largo del segmento. Por ejemplo, para la falla de Ibagué (No. 9, MMP = 7.0) el periodo de retorno de sismos mayores esta comprendido entre 200-1500 años considerando una tasa de actividad alta (entre 0.1 - 1 cm/año). En el sector Noroccidental se destacan, además de la falla de Ibagué, las fallas de Doima (No. 13, MMP = 6.7), Montenegro (No. 3, MMP = 6.7) y Armenia (No. 1, MMP = 6.8) cuyos periodos de retorno son similares al de la falla de Ibagué.

Las fallas cuya tasa de actividad es intermedia tienen periodos de retorno mayores, por lo general superiores a un millar de años. Las fallas con tasas de actividad baja y muy baja presentan periodos de retorno comprendidos entre 3,000 - 20,000 años y 20,000 - 100,000 años, respectivamente. Nótese que para una tasa de actividad fija, el periodo de retorno aumenta en función de la magnitud.

En general a medida que aumenta la tasa de actividad, el valor de MMP también se incrementa (esta observación es igualmente válida en las otras regiones de estudio). Esto implica que las fuentes sismogénicas mayores corresponden generalmente a fallas con tasa de actividad alta.

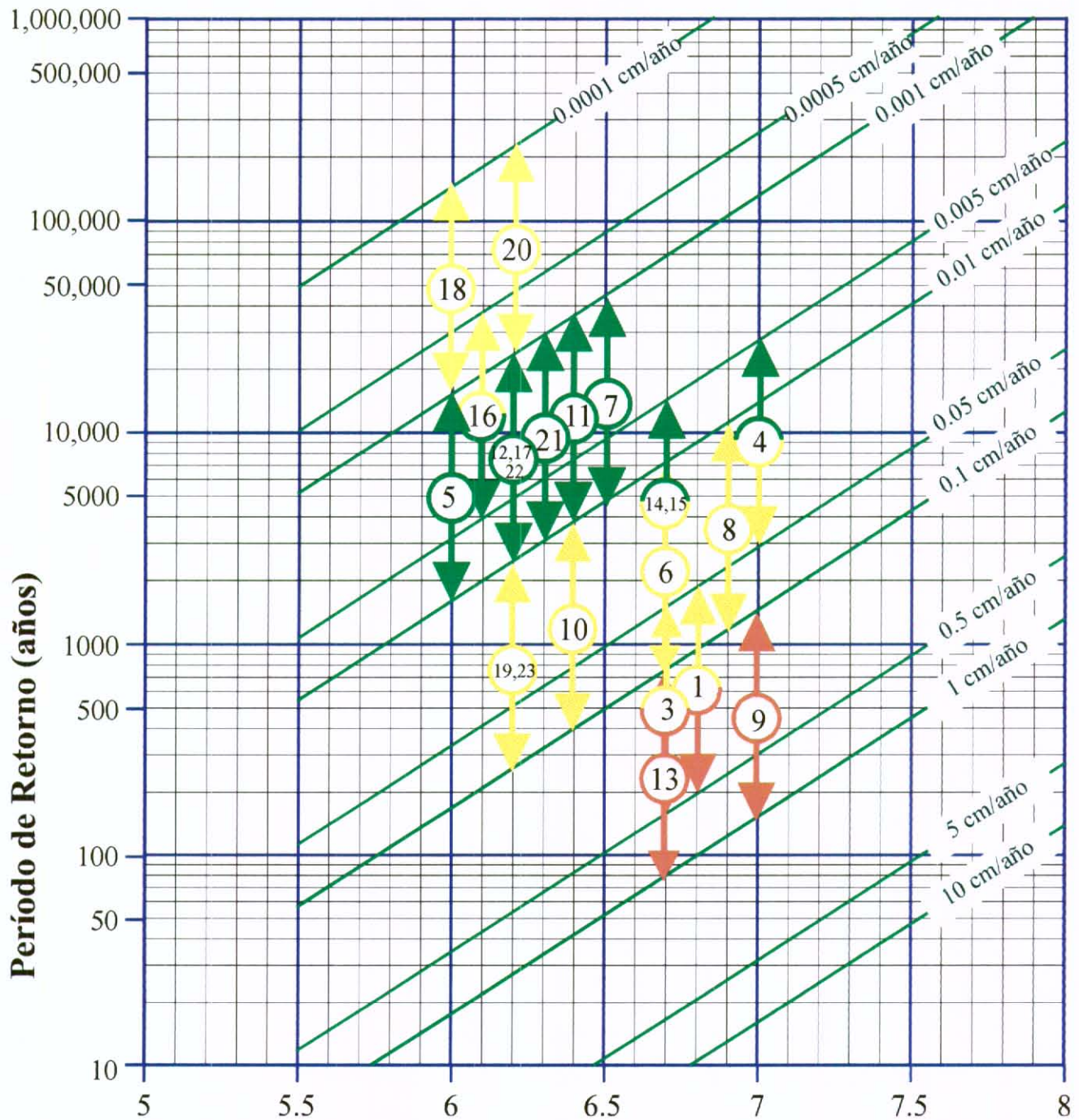
La Figura 4.14 ilustra los intervalos de periodo de retorno estimado para las fuentes sismogénicas de la Región Suroriental. Se destacan las fallas de Guayuriba (No. 27, MMP = 7.0), Yopal (No. 38, MMP = 7.1), Guaicáramo Centro (No. 33, MMP = 7.2), San Pedro (No. 39, MMP = 7.2) y Servitá (No. 25, MMP = 6.9) cuyos periodos de retorno están comprendidos entre 200 - 1800 años. Considerando tasas de actividad del orden de 3

mm/año, el periodo de retorno de sismos mayores es de aproximadamente 600 años. La falla de Cumaral (No. 32, MMP = 6.3) tiene un periodo de retorno menor puesto que el valor de MMP es inferior al de las otras fallas con tasa de actividad alta.

Las fallas con tasas de actividad intermedia y baja en la Región Suroriental tienen periodos de retorno comprendidos entre 1,000 - 5,000 años y 5,000 - 50,000 años, respectivamente.

La estimación de periodos de retorno para las fallas de la Región Central se ilustra en la Figura 4.15. Se destacan las fallas de La Cajita (No. 6, MMP = 6.4) y Río Tunjuelito (No. 7, MMP = 6.4), cuyos periodos de retorno están en el intervalo entre 400 - 3,500 años. Las fallas con tasas de actividad baja y muy baja en la Región Central tienen periodos de retorno comprendidos entre 2,000 - 20,000 años y 10,000 - 100,000 años, respectivamente.

Estas estimaciones de periodos de retorno pueden mejorarse sustancialmente por medio de estudios de paleosismología en los cuales se realicen dataciones de niveles cuaternarios deformados y desplazados por fallas activas. Este tipo de observaciones pueden efectuarse en trincheras situadas a lo largo de escarpes de falla.

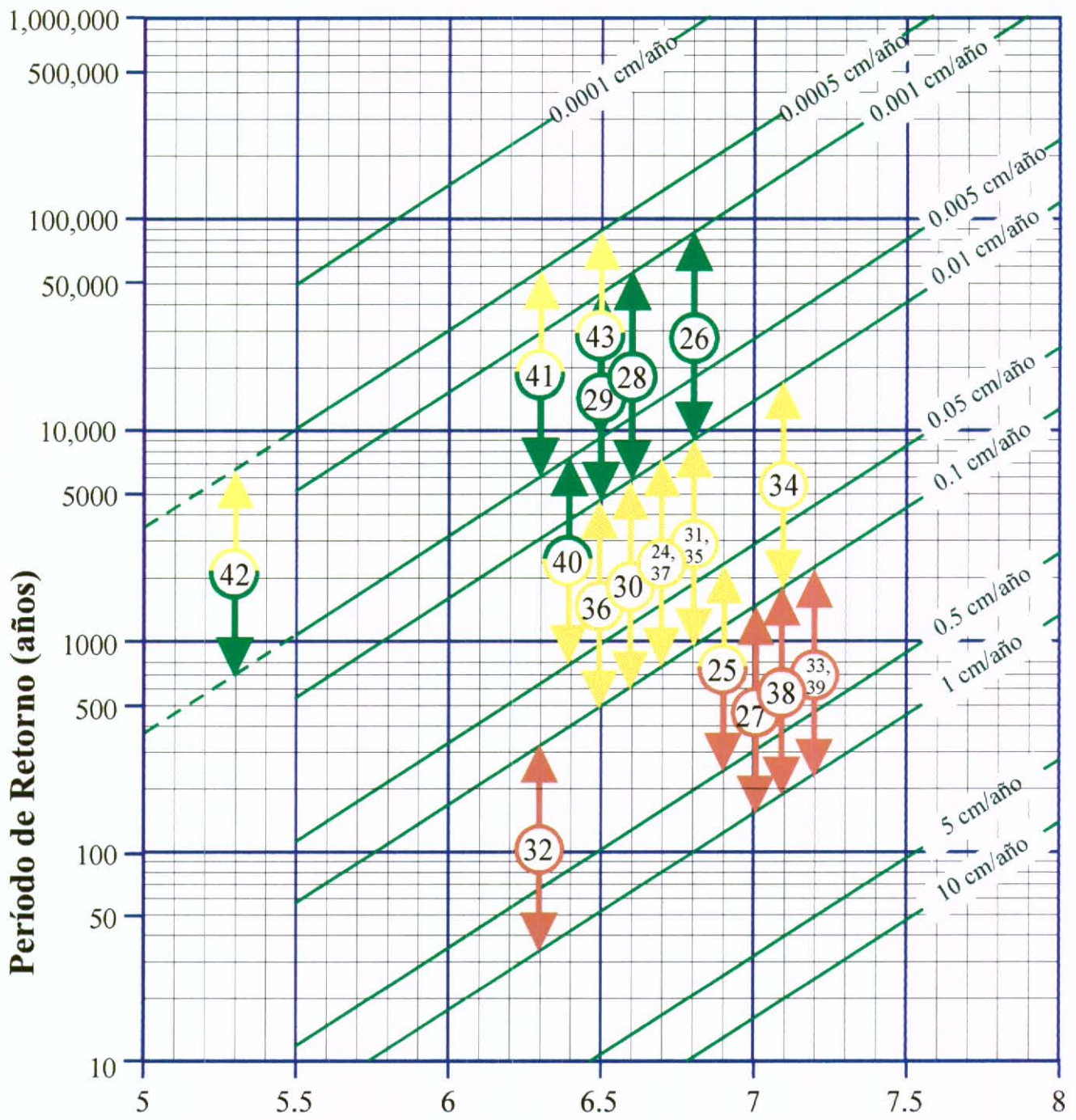


Tasa de Actividad (cm/año)						
Alta	A-I	Intermedia	I-B	Baja	B-Mb	Muy baja
0.1	0.05	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	0.5	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001

NF = Número de la Falla (ver Tabla 2.1).

Magnitud (Ms)

Fig. 4.13 : Estimación del Intervalo de Período de Retorno en función de la Tasa de Actividad Semicuantitativa y de la Magnitud Máxima Probable (Slemmons 1982), para las Fallas Sismogénicas de la Región Nor-Occidental (ver Tabla 2.1).

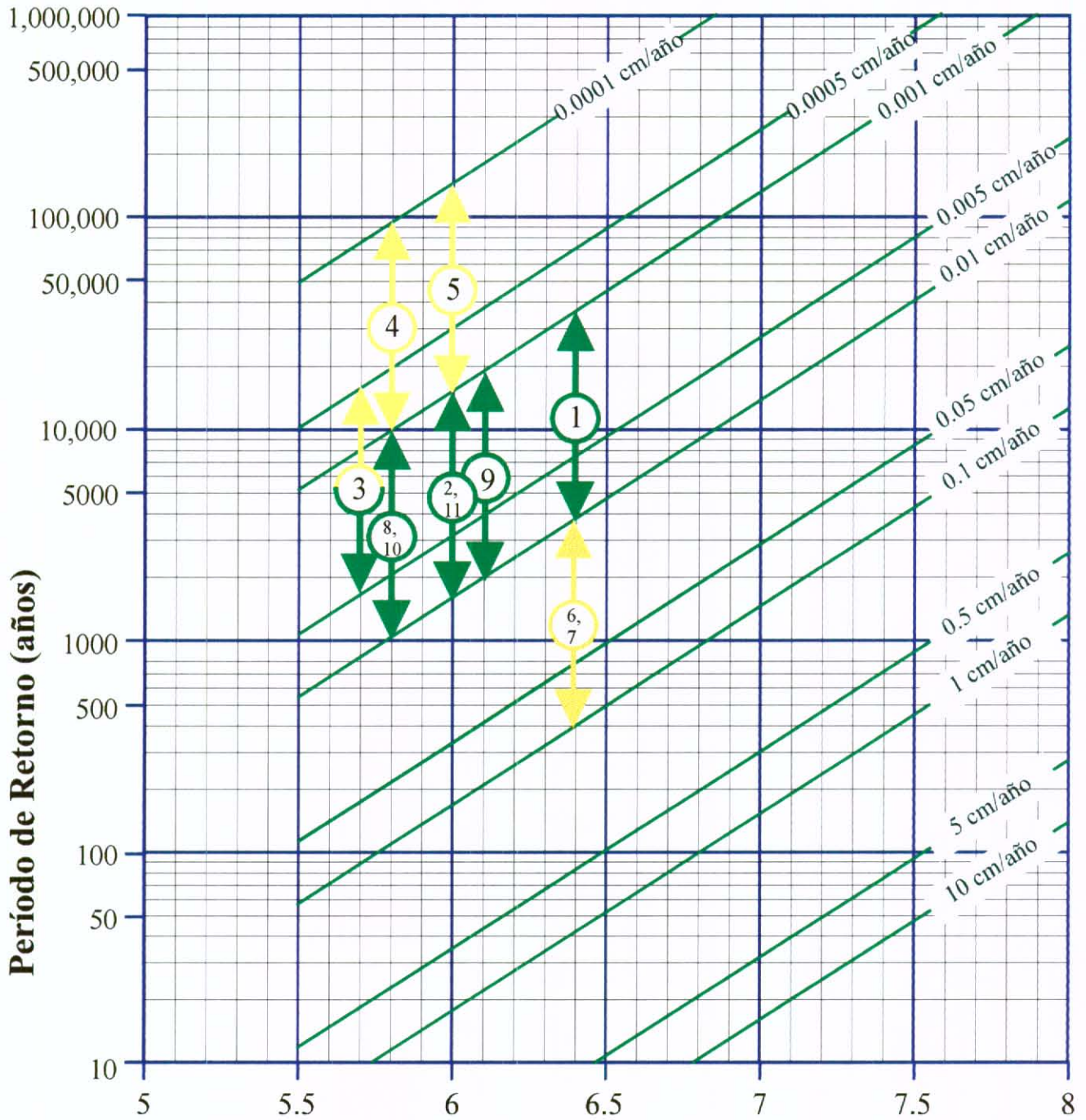


Tasa de Actividad (cm/año)						
Alta	A-I	Intermedia	I-B	Baja	B-Mb	Muy baja
0.1	0.05	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	0.5	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
NF = Número de la Falla (ver Tabla 2.2).						

Magnitud (Ms)

--- Extrapolación de relación

Fig. 4.14 : Estimación del Intervalo de Período de Retorno en función de la Tasa de Actividad Semicuantitativa y de la Magnitud Máxima Probable (Slemmons 1982), para las Fallas Sismogénicas de la Región Suroriental (ver Tabla 2.2).



Tasa de Actividad (cm/año)						
Alta	A-I	Intermedia	I-B	Baja	B-Mb	Muy baja
0.1	0.05	0.01	0.005	0.001	0.0005	0.0001
↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
NF	NF	NF	NF	NF	NF	NF
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	0.5	0.1	0.05	0.01	0.005	0.001
NF = Número de la Falla (ver Tabla 2.3).						

Magnitud (Ms)

Fig. 4.15 : Estimación del Intervalo de Período de Retorno en función de la Tasa de Actividad Semicuantitativa y de la Magnitud Máxima Probable (Slemmons 1982), para las Fallas Sismogénicas de la Región Central (ver Tabla 2.3).

4.7. ZONIFICACIÓN SISMOTECTÓNICA PRELIMINAR

El conocimiento de la tasa de actividad y del tipo de movimiento a lo largo de las diferentes fallas analizadas permite subdividir la región de estudio en función del estilo y la intensidad de la actividad neotectónica.

El estilo de la deformación está determinado por el régimen de esfuerzos tectónicos a escala regional. La orientación y la magnitud relativa de los esfuerzos principales determina la dirección y el sentido de movimiento sobre los planos de falla.

Para efectos de caracterizar la zona se definen tres regímenes de esfuerzos fundamentalmente distintos (Ritz & Taboada, 1993) :

- 1) El régimen compresivo, caracterizado por un eje extensivo σ_3 vertical y los dos ejes restantes (σ_1 , σ_2) de dirección horizontal. La deformación asociada está caracterizada por fallas inversas de dirección perpendicular a la compresión.
- 2) El régimen de rumbo, caracterizado por un eje intermedio σ_2 vertical y los dos ejes restantes (σ_1 , σ_3) de dirección horizontal. Se observan generalmente fallas de rumbo conjugadas relativamente inclinadas.
- 3) El régimen extensivo, caracterizado por un eje compresivo σ_1 vertical y los dos ejes restantes (σ_2 , σ_3) de dirección horizontal. Asociado usualmente al funcionamiento de fallas normales de dirección perpendicular a la extensión.

La Figura 4.16 ilustra la zonificación sismotectónica preliminar de la región de estudio. Las zonas caracterizadas por un régimen compresivo, de rumbo o extensivo están indicadas en azul, verde o rojo, respectivamente. La intensidad del color es proporcional a la intensidad de los esfuerzos desviadores principales de dirección horizontal - que varían de acuerdo con el régimen considerado. Se asume que este parámetro es indicativo del grado de actividad sismotectónica en distintos sectores. En cada caso se indican los valores correspondientes al esfuerzo horizontal máximo y mínimo (σ_{hmax} , σ_{hmin}) con respecto al valor promedio de los esfuerzos principales (esfuerzo diferencial o desviador).

A manera de ejemplo, el régimen compresivo está caracterizado por un valor del esfuerzo diferencial $\sigma_{hmax} = \sigma_1$ relativamente elevado y un valor de $\sigma_{hmin} = \sigma_2$ despreciable.

Se observa que el contexto tectónico de la región se sitúa entre el régimen compresivo y el régimen de rumbo. El sector del Piedemonte Llanero presenta la mayor actividad tectónica en compresión, la cual disminuye abruptamente en dirección del cratón. La zona axial de la Cordillera Oriental presenta un nivel bajo de actividad tectónica compresiva con un ligero aumento al sur de Bogotá.

El valle del Magdalena, al norte, registra un nivel intermedio de actividad tectónica compresiva. La intensidad de la actividad tectónica aumenta progresivamente hacia el sur (zona de Armenia, Ibagué) y los esfuerzos cambian de régimen compresivo a régimen de rumbo. Esta transición se manifiesta en el aumento progresivo de la componente de rumbo con respecto a la componente inversa de movimiento sobre las fallas, en dirección del sistema de Ibagué.

La zona de régimen de rumbo se extiende desde la Cordillera Central hacia la Sabana de Bogotá englobando fallas de rumbo como las de Vianí y Facatativá. Se observa una disminución progresiva de la intensidad de la actividad tectónica y un aumento de la componente inversa en dirección de la Sabana.

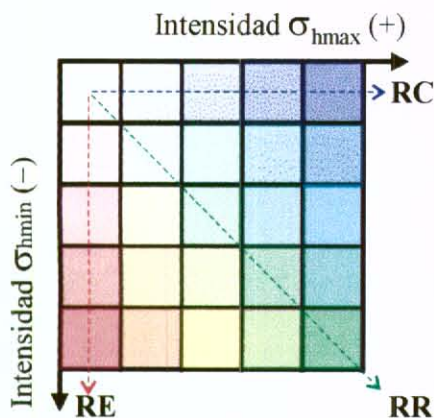
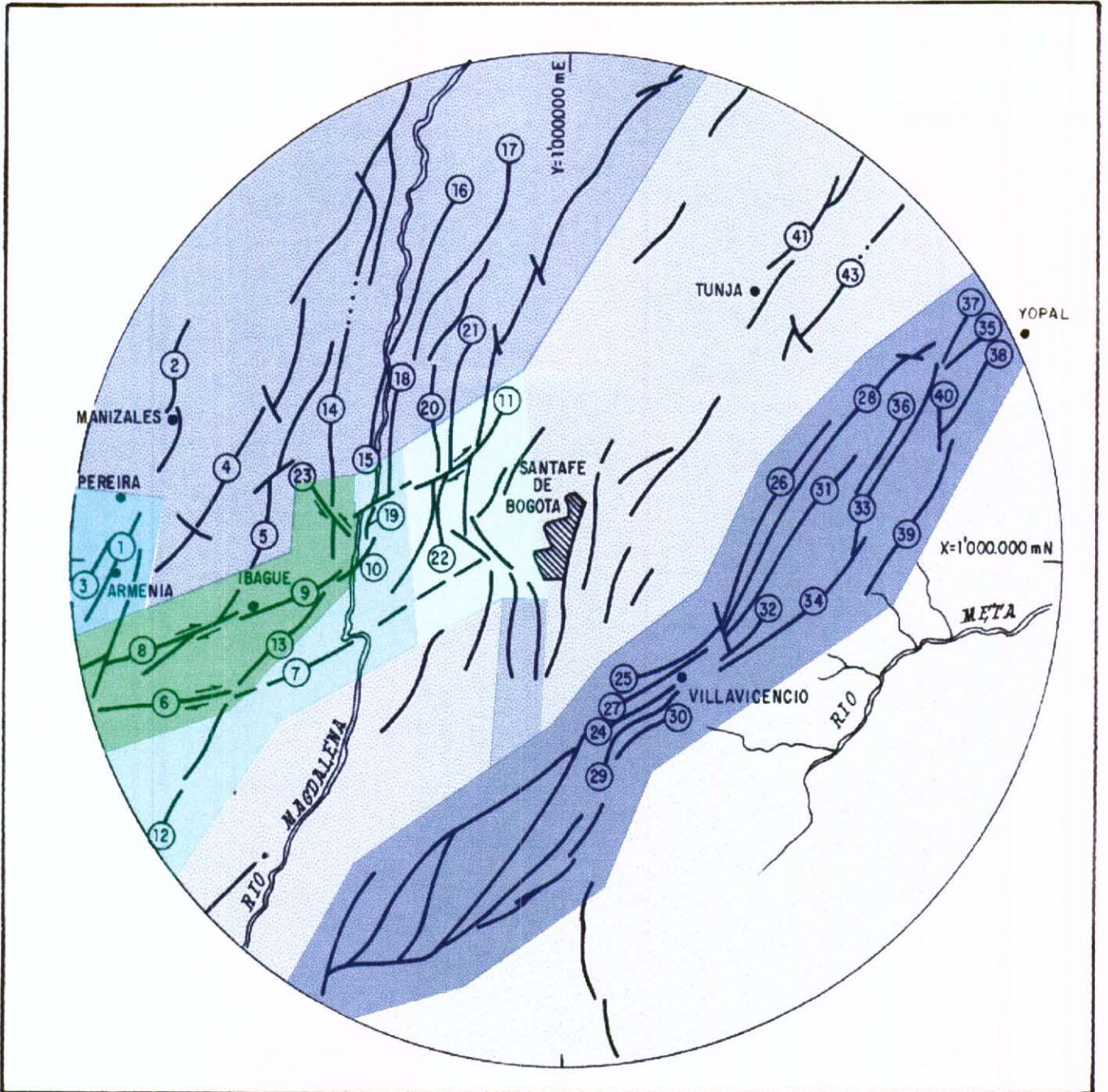


Figura 4.16 : Mapa preliminar de Zonificación Sismotectónica

σ_{hmax} = Esfuerzo diferencial horizontal máximo (Compresión > 0)

σ_{hmin} = Esfuerzo diferencial horizontal mínimo (Extensión < 0)

RC = Régimen Compresivo ($\sigma_{hmax} = \sigma_1, \sigma_{hmin} = \sigma_2$)

RR = Régimen de Rumbo ($\sigma_{hmax} = \sigma_1, \sigma_{hmin} = \sigma_3$)

RE = Régimen Extensivo ($\sigma_{hmax} = \sigma_2, \sigma_{hmin} = \sigma_3$)

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los resultados de este proyecto han permitido realizar una primera estimación de las magnitudes máximas probables (MMP) y los períodos de retorno para las principales fallas activas y potencialmente activas situadas dentro de un radio de 200 km alrededor de Santafé de Bogotá. Estas estimaciones constituyen una primera aproximación para la evaluación de la peligrosidad sísmica de las fallas, con miras a la cuantificación de la amenaza sísmica de la ciudad.

Las fallas de mayor potencial sismogénico están situadas en la región Suroriental y hacen parte del sistema del Piedemonte Llanero. Varios segmentos de las fallas de Servita - Santa María, Guaicáramo y Yopal presentan valores estimados de MMP superiores a 7 Ms con períodos de retorno del orden de 600 años (suponiendo una tasa de actividad de 3 mm/año). Algunos de ellos están situados a una distancia de 50 - 100 km de Santafé de Bogotá por lo cual representan fuentes sismogénicas particularmente peligrosas para la ciudad. Estas fallas, cuyo movimiento predominante es de tipo inverso, tienen una actividad dentro del rango moderado - alto.

Cabe resaltar los segmentos activos de Guayuriba y Servitá, cuya distancia media a Bogotá es inferior a 80 km y cuya ubicación coincide con una zona de sismicidad anormalmente baja a lo largo del sistema del Piedemonte Llanero. Esta zona podría corresponder a un silencio sísmico en el cual se está acumulando energía elástica que se liberaría durante un evento sísmico mayor.

La región Noroccidental presenta fallas cuyas magnitudes máximas probables no exceden el valor de 7 Ms. Cabe destacar la falla de Ibagué, considerada como la más activa de este sector, cuyos indicios y evidencias de actividad lateral derecha se siguen prácticamente a lo largo de toda la traza. El plano de falla de Ibagué está alineado con la ciudad de Bogotá y es de esperarse que, tratándose de una falla de rumbo, los efectos de un movimiento sísmico sean particularmente notorios en Bogotá. En efecto, la amplitud de las ondas de cizalla es mayor en dirección paralela al sentido de movimiento sobre el plano de falla. Este efecto de directividad puede acentuarse si la propagación de la ruptura se hace en dirección N-NE (hacia Bogotá).

Otras fallas de importancia en la Región Noroccidental son las de Cambao Sur, Honda, Doima, Cocora y Cucuana cuyos valores de MMP son superiores a 6.0 y cuyo rango de actividad es moderado - alto. La distancia media de todas estas fallas a Santafé de Bogotá es de 80 - 120 km.

La región central está caracterizada porque la mayoría de las fallas presenta actividad baja a moderada cuyas magnitudes estimadas son inferiores a 6.5 Ms. Los rasgos neotectónicos son de menor contundencia sugiriendo una actividad sísmica muy inferior a las otras regiones, con períodos de retorno más largos. Sin embargo, la actividad potencial de estas fallas es de gran interés debido a la cercanía entre los tramos potencialmente activos y la ciudad de Santafé de Bogotá. Se destaca la Falla de la Cajita por su característica de falla activa (MMP = 6.4) y sismo histórico probablemente asociado.

La cinemática de las fallas activas de las diferentes regiones es coherente con el campo de esfuerzos determinado a partir de observaciones microtectónicas. El contexto sismo-tectónico regional es intermedio entre fallamiento inverso y fallamiento de rumbo, y está caracterizado por un eje compresivo horizontal σ_1 de dirección ESE-WNW. Los esfuerzos tectónicos son compatibles con el movimiento inverso de los cabalgamientos que limitan ambos flancos de la Cordillera Oriental. Adicionalmente se observan movimientos de rumbo a lo largo de fallas inclinadas de direcciones E-NE (lateral derecho) y SE-NW (lateral izquierdo).

Cabe señalar que el estudio que se presenta es de carácter preliminar, ya que se limitó al reconocimiento parcial de las principales estructuras morfo-tectónicas de probable origen neotectónico. Se anota que muchas de las fallas consideradas no se cubrieron en su totalidad y en ningún caso se evaluó la tasa de actividad de manera cuantitativa. Nótese que dentro de las tablas de caracterización de las fallas, el factor de calidad que mide el grado de conocimiento del segmento es aceptable a deficiente. En la región central en particular, casi todas las fallas tienen un factor de calidad bajo a medio, ya que los rasgos son menos visibles y se requiere de estudios especiales para el reconocimiento de la actividad tectónica reciente.

Esta investigación plantea la necesidad de realizar trabajos suplementarios en los cuales se profundice dentro del conocimiento de la actividad neotectónica. Estos trabajos especiales deben conducir a una cuantificación de las tasas de actividad de los segmentos de mayor potencial sismogénico. Igualmente se debe realizar un cubrimiento más detallado de algunas de las fallas, cuyo grado de conocimiento actual es insuficiente para una mejor estimación de MMP y de los períodos de retorno de sismos mayores.

La adquisición de imágenes de satélite Spot de toda la región y de fotografías aéreas a escala 1:15.000 de algunos sectores específicos podrían suplir en gran parte las deficiencias existentes.

La realización de trincheras en sectores donde se observen rupturas de depósitos recientes podría dar una información fundamental para caracterizar el comportamiento sísmico de las fallas. La medición de horizontes desplazados y la datación de los mismos pueden conducir a una estimación de la magnitud y el período de retorno de los eventos sísmicos pasados.

Los estudios de paleo-sismicidad pueden complementarse con levantamientos topográficos detallados de la zona de ruptura y análisis de la geometría de las fallas en profundidad, estos últimos por medio de geofísica y levantamientos de columnas estratigráficas del Cuaternario.

En el área de la Sabana de Bogotá son necesarios estudios más completos de las posibles trazas de fallas potencialmente activas, para tratar de identificar evidencias de

actividad neotectónica. Sería de gran interés ejecutar tres trincheras a través de trazas de falla sobre el Cuaternario, para precisar la edad y la magnitud de posibles paleosismos en cercanías de Bogotá.

En el piedemonte Llanero se han seleccionado tres zonas dentro de las cuales es conveniente realizar estudios detallados de las trazas superficiales de fallas para cada sistema principal de fallamiento: a) sistema Servitá-Santa María al occidente de Restrepo entre los ríos Upin y Caney; b) Sistema del Guaicáramo, entre Aguaclara y Monterrey; c) Sistema Yopal, en inmediaciones del río Seco (río Chiquito), al suroccidente de Aguazul.

En el área del Magdalena se ubicaron sectores para estudios de detalle, con el propósito de cuantificar tasas de actividad. En la falla de Mulatos se recomienda un corte sísmico y topográfico minucioso perpendicular al accidente, para determinar la deformación tectónica plio-cuaternaria a través del análisis del levantamiento y basculamiento de abanicos aluviales. En la falla de Ibagué se recomiendan por lo menos dos trincheras entre las localidades de El Salado y Piedras.

La ejecución de estos trabajos adicionales permitirá un análisis determinista de la amenaza sísmica, en el cual se tenga un conocimiento más completo de la actividad sismogénica de las fallas activas responsables de los sismos superficiales que ocurren en la corteza superior.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, J., HERNANDEZ, O., 1991. Fotointerpretación neotectónica al oriente del municipio de Pasca, Cundinamarca. Artículo presentado para publicación en la revista geológica de la UIS, Bucaramanga, 18 p.

AGGARWALL., 1983. Present-day boundary and the motion of the Caribbean Plate relative of the South America. 10 a Conferencia Geológica del Caribe, Cartagena (resumen), P. 156.

BARRERO, D., VESGA, J., 1976. Mapa geológico del cuadrángulo K-9 Armero y parte sur del J-9 La Dorada. esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

BONILLA, M., MARK, R., LIENKAEMPER, J., 1984. Statistical relations among earthquake magnitude, surface rupture length and surface fault displacement. BSSA, 74, 6, 2379, 2379-2411.

CARO, P., GARCÍA, J., 1988. Zonificación geotécnica del Distrito Especial de Bogotá, INGEOMINAS, 169p, Bogotá.

C.E.E - INGEOMINAS., 1992. Microzonificación Sismogeotectónica de Popayán. Publicaciones Especiales del INGEOMINAS, cap. 3, p.28-49, Santafé de Bogotá.

CLINE, K., et al., 1981. Quaternary activity on the Romeral and Cauca Faults, northwest Colombia. Revista CIAF, VI (1-3), p.115-116, Bogotá.

CLUFF et al., 1972. Site Evaluations in Seismically Active Regions: an interdisciplinary team approach. International Conference on Microzonation.

COLETTA et al, 1990. Tectonic Style and Crustal Structure of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross section: J. Letousey ed. Petroleum and Tectonic in Mobile belts, Paris, p. 81-100.

COLLINS, D., BENALCAZAR, G., PAGE, W., 1981. Quaternary activity on the Palestina Fault zone, northwestern Colombia. Revista CIAF, VI (1-3), p.117-118, Bogotá.

COMBES, Ph., 1984. La tectonique récente dans la Provence Occidentale : Microtectonique, caractéristiques dynamiques et cinématiques. Méthodologie de zonation tectonique et relations avec la sismicité. Tesis de Doctorado, Univ. Montpellier II, Francia, 182 pp.

CORRIGAN, H., 1967. The geology of the upper Magdalena Valley (northern portion). 8th Field Conf. Col. Soc. Petr. Geol. Geophys.

CUERVO, P., GAITAN, M., ROA, A., 1989. Cartografía y principales características estratigráficas del Abanico de Lérída, Tolima. Tesis de grado, Universidad Nacional, 255 p, Bogotá.

DIEDERIX, H., et al., 1987. Indicios neotectónicos de la Falla de Ibagué en el sector Ibagué - Piedras, Departamento del Tolima, Colombia. Revista CIAF, XI (1-3), p.242-252, Bogotá.

DUEÑAS, H., CASTRO, G., 1981 Asociación palinológica de la Formación Mesa en la región de Falan, Tolima. Geología Norandina, INGEOMINAS, No 3, p. 27-36, Bogotá.

ESQUIVEL, J., FLOREZ, A., NÚÑEZ, A., 1991. Mapa geológico de la plancha 301, Planadas, INGEOMINAS, Bogotá.

ETCHECOPAR, A., VASSEUR, G. & DAIGNERES, M., 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. Jour. Struct. Geol., V. 3, 1, pp 51 - 65.

FABRE, A., 1985. Dinámica de la sedimentación Cretácica en la región de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia). Publ. Espec. INGEOMINAS, 16, Cap. XIX; p.1-20, Bogotá

FEININGER, T., BARRERO, D., et al., 1970. Mapa geológico del oriente de Antioquia (cuadrángulos Y-9 y parte de los H-9, H-10, I-10, J-9, J-10), esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

FEININGER, T., 1970. Mapa Geológico del Departamento de Antioquia, Colombia. INGEOMINAS, Bogotá.

FRANCO, R., GOMEZ, H., 1978. La geología del Valle alto del Magdalena y áreas circundantes, mediante uso de imágenes ERTS. Revista CIAF, IV (1), p.39-43, Bogotá.

INGEOMINAS., 1977. Atlas Geológico de Colombia, esc. 1:500.000, Bogotá.

INGEOMINAS., 1988. Mapa Geológico de Colombia, esc. 1:1'500.000, Bogotá.

INGEOMINAS., 1989. Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Huila, esc. 1:400.000, Bogotá.

INGEOMINAS., 1991a. Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Quindío, Esc. 1:100.000. Bogotá.

INGEOMINAS., 1991b. Mapa Geológico del Departamento del Tolima, esc. 1:200.000. Unidad operativa Ibagué (en preparación).

INGEOMINAS., 1992. Evaluación de amenazas geológicas y zonificación geotécnica preliminar de la ciudad de Armenia, 105 p. Ibagué.

INGEOMINAS., 1993. Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Caldas, Esc. 1:250.000, Bogotá.

INGEOMINAS. 1983b. Plancha Geológica 227- La mesa, Esc. 1:100.000, Bogotá.

KASEN, T., ARANGO, J., 1974. Mapa Geológico generalizado del Departamento del Tolima, esc. 1:250.000. INGEOMINAS, Bogotá.

LOZANO, H., 1984. Distrito aurífero de La dorada, Caldas. IV Congreso Nacional de Minería: desafíos de la minería en Colombia para el siglo XXI, INGEOMINAS, Ibagué.

McCOURT, W., 1984. Mapa geológico preliminar de la Plancha 262-Génova, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

McCOURT, W., MOSQUERA, D., NIVIA, A., NUÑEZ, A., 1984. Mapa geológico preliminar de la plancha 243- Armenia, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

MENDILVIESO, D., 1991. Geomorfología aplicada a la identificación y zonificación de riesgos naturales: Páramo de Sumapáz, Colombia. Tesis, ITC, Holanda.

MORENO, M., 1992. Estudio geológico-geotécnico e identificación de amenazas geológicas en la cabecera municipal de Chaparral (Tol), INGEOMINAS, 61 p, Ibagué.

MORENO, M., VERGARA, H., 1993. Zonificación geotécnica de Armenia, Departamento del Quindío. II Congreso Colombiano de Geología Ambiental, Memorias, Armenia.

MOSQUERA, D., NUÑEZ, A., VESGA, J., 1982. Mapa geológico generalizado preliminar de la plancha 244-Ibagué, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

MURCIA, A., VERGARA, H., 1987. Riesgos geológicos potenciales de la ciudad de Ibagué, Departamento del Tolima, Colombia. Revista CIAF, XI (1-3), p.330-345, Bogotá.

MURILLO, A., ESQUIVEL, J., ARBOLEDA, C., FLORES, D., 1982. Mapa geológico de la plancha 281, Rioblanco, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

NUÑEZ, A., MOSQUERA, D., VESGA, J., 1984. Mapa geológico preliminar de la plancha 263-Ortega, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

- PULIDO, O. G., GÓMEZ, L., 1991. Geología de la Plancha 266-Villavicencio, Esc. 1:100.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- PARIS, G., ROMERO, J., 1994. Fallas Activas en Colombia. Boletín Geológico No 34 (1-3), INGEOMINAS, Bogotá.
- PEREZ, V., RINCON, G., ULLOA, C., CARO, P., PEREZ, G., 1985. Excursión pre-simposio Sección geológica Bogotá-Villavicencio, Campos Apiay y Castilla. II Simposio Bolivariano de exploración petrolera en cuencas subandinas. Asociación Colombiana de geólogos y geofísicos del petróleo, Bogotá, 45p.
- RAASVELDT, H., CARVAJAL, J., 1956. Mapa geológico de la plancha L-9, Girardot, esc. 1:200.000, Servicio Geológico Nacional., Bogotá.
- RENZONI, G., et al., 1967. Mapa geológico de la plancha 191, Tunja, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.
- RENZONI, G., 1975. Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana. Universidad Nacional, Bogotá.
- RENZONI, G., ROSAS, H., 1977. Mapa geológico de la plancha 171, Duitama, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.
- RITZ, J.F., 1991. Evolution du champ de contraintes dans les Alpes du sud depuis la fin de l'Oligocène. Implications sismotectoniques. Tesis de Doctorado, Univ. Montpellier II, Francia, 187 pp.
- RITZ, J.F. & TABOADA, A., 1993. Revolution stress ellipsoids in brittle tectonics resulting from an uncritical use of inverse methods. Bull. Soc. Geol. France, 164, 4, pp. 519-531.
- ROBERTSON, 1989. Actividad Neotectónica del Piedemonte de la Cordillera Oriental, sector Villavicencio-Tauramena, Colombia. V Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Tomo I, Pg.170
- RODRIGUEZ, E., ULLOA, C., 1994a. Mapa geológico de la plancha 189- La Palma, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.
- RODRIGUEZ, E., ULLOA, C., 1994b. Mapa geológico de la plancha 169- Puerto Boyacá, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.
- SEGOVIA, A., RENZONI, G., 1965. Geología del Cuadrángulo L-12-Medina. Servicio Geológico Nacional, Esc. 1:200.000.
- SARRIA, A., 1990. Ingeniería sísmica, Universidad de los Andes, Bogotá.

SLEMMONS, D., 1977. Faults and Earthquake Magnitude: State of Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States. Mackay Schools of Mines, University of Nevada, Reno. Report 6, 129p.

TABOADA, A., 1993. Stress and strain from striated pebbles. Theoretical analysis of striations on a rigid spherical body linked to a symmetrical tensor. *Jour. Struct. Geol.*, V. 15, 11, pp. 1315-1330.

TABOADA, A., TOURNERET, C. & LAURENT, P., 1991. An interactive program for the graphical representation of striated faults and applied normal and tangential stresses. *Comp. & Geosc.*, V. 17, 9, pp. 1281-1310.

ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E., GUERRA, A., 1973. Mapa geológico de la plancha 172-Paz del Río, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E., 1973. Mapa geológico de la plancha 192- La Tota, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

ULLOA, C., CAMACHO, R., ESCOBAR, R., 1975. Mapa geológico del cuadrángulo K-12, Guateque, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E., et al., 1976. Mapa Geológico plancha 211-Tauramena, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

ULLOA, C., RODRÍGUEZ, E., 1991. Mapa geológico de la plancha 190, Chiquinquirá, esc. 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá.

VARGAS, G., 1995. *Developpment de Methodes de Cartographie des Mouvements de Masse et de Zonage de L'alea Dans les Andes de Colombie.* Université Pierre et Merie Currie; These de Doctorat, Paris.

VERGARA, H., 1987. Deslizamientos y tectónica reciente en el área del municipio de Flandes (Tol), INGEOMINAS, 27p, Ibagué.

VERGARA, H., 1988. Rasgos neotectónicos en el noreste del Departamento del Tolima. *Boletín Geológico*, INGEOMINAS, p.23-42, Bogotá.

VERGARA, H., 1989. Tectónica cuaternaria de la Falla de Ibagué: edad y algunos aspectos sedimentológicos del Abanico de Ibagué. INGEOMINAS, 51p, Ibagué.

VERGARA, H., MORENO, M., 1992. Estudio geologico-geotécnico de la Cuenca del río Combeima, municipio de Ibagué, INGEOMINAS, 173p, Ibagué.

WELLS, D., COPPERSMITH, K., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. of Seismological Society of América*, Vol. 84, No 4m, pp. 974-1002.

WINTER, TH., AVOUAC, J., LAVENU, A., 1993. Late Quaternary Kinematics of the Pallatanga Strike-slip fault (Central Ecuador) from Topographic Measurements of displaced Morphological Features. *Geoph. Jour. Int.*, 115. pp. 905-920.

ANEXO 1

FOTOGRAFÍAS DE NEOTECTONICA

- 1. Región Noroccidental**
- 2. Región Suroriental**
- 3. Región Central**



Figura 1.1 : Falla del Río Cocora : detalle de rasgos morfo-neotectónicos tales como facetas triangulares y sillitas de falla a lo largo de la traza (en punteado) afectando rocas metamórficas de la Cordillera Central. Falla de rumbo lateral derecha de orientación aproximada N70°E.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

**NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico**

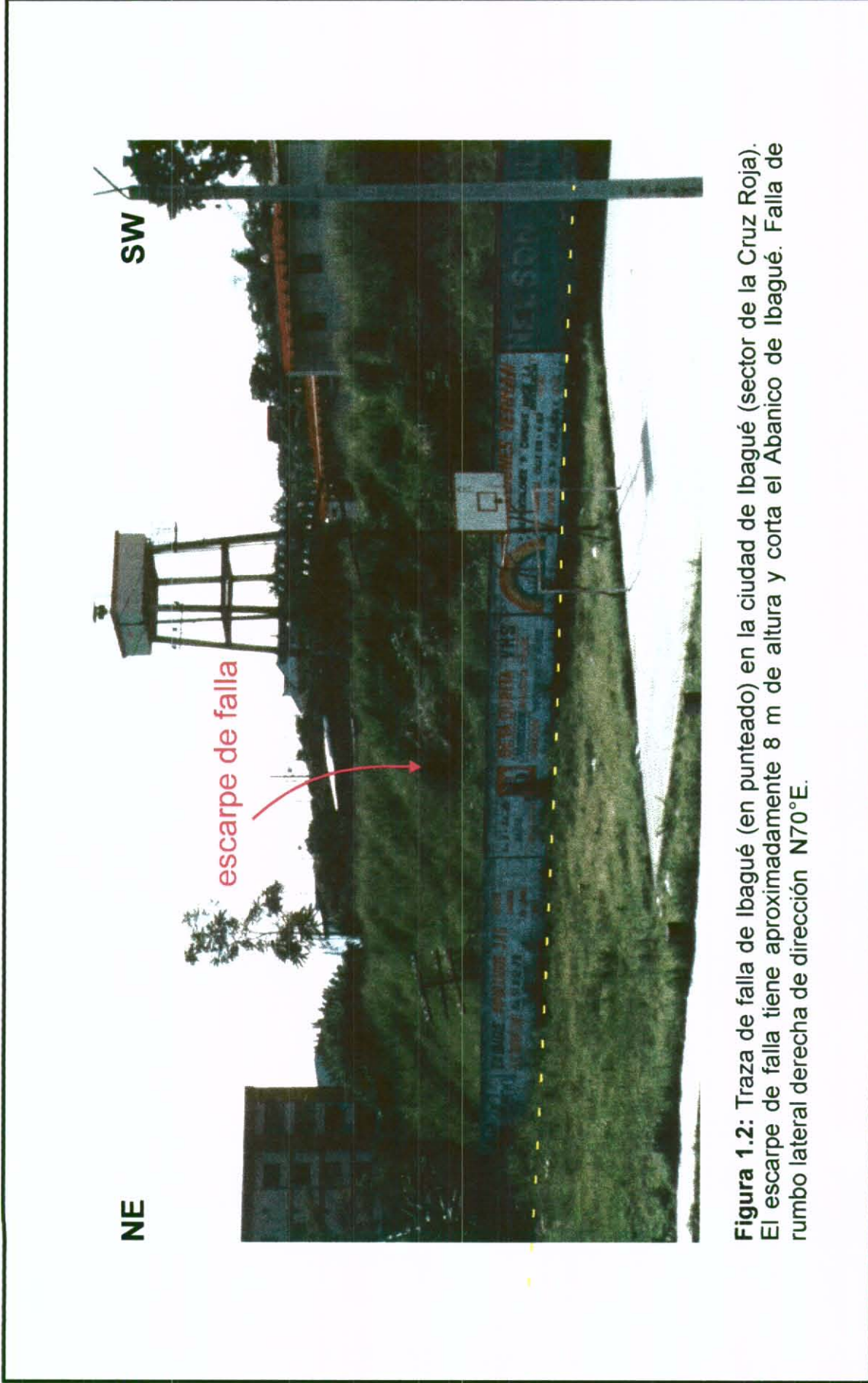


Figura 1.2: Traza de falla de Ibagué (en punteado) en la ciudad de Ibagué (sector de la Cruz Roja). El escarpe de falla tiene aproximadamente 8 m de altura y corta el Abanico de Ibagué. Falla de rumbo lateral derecha de dirección N70°E.

	<p align="center">PROYECTO MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ</p>	<p align="center">NEOTECTÓNICA Anexo Fotográfico</p>
---	--	---

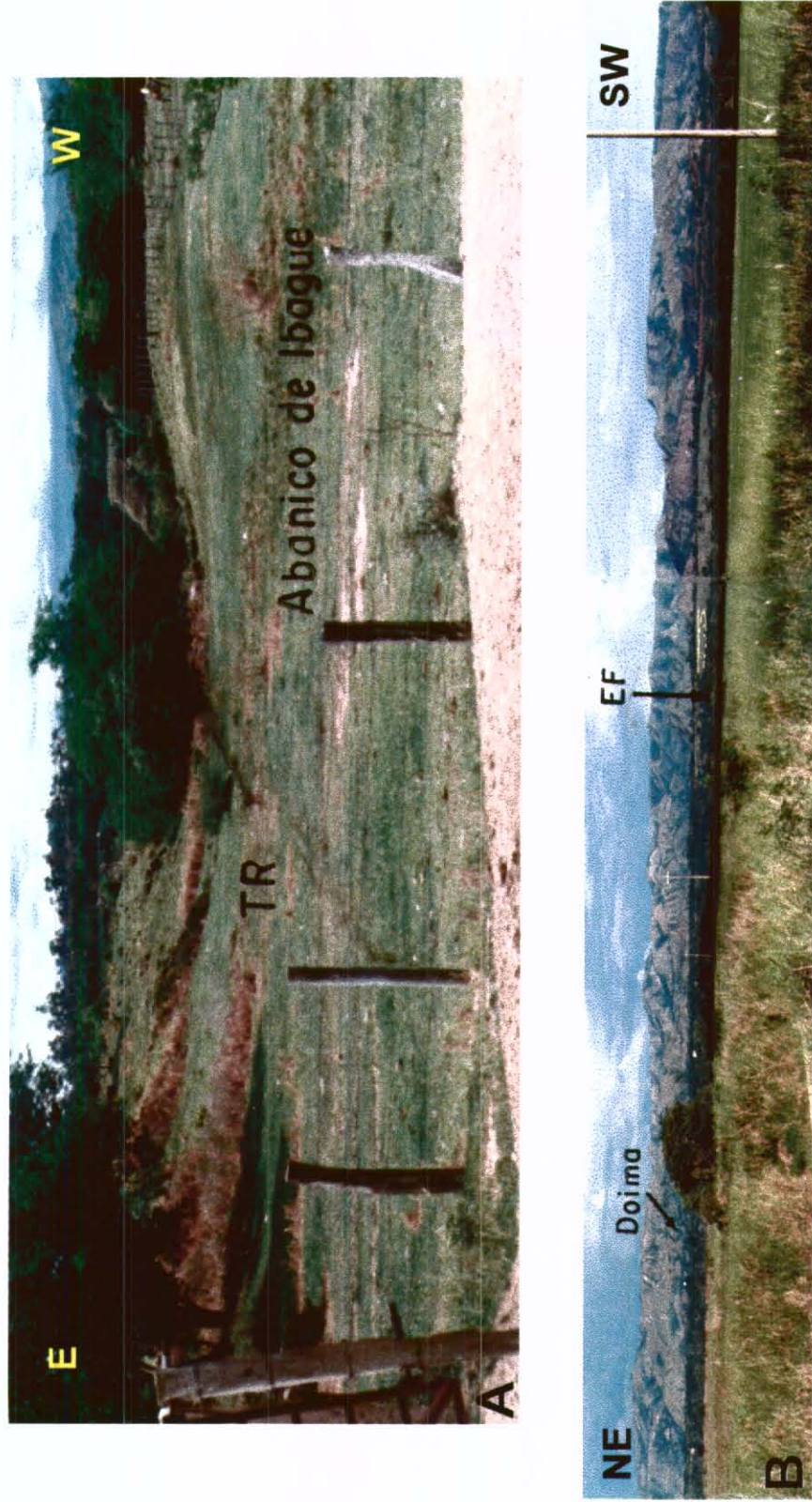


Figura 1.3 : Falla de Doima : A - Trinchera de falla (TR) sobre el Abanico de Ibagué en el sector del Alto de Gualanday. B - Escarpe de falla (EF) sobre el Abanico de Ibagué ; al fondo se aprecian rocas sedimentarias de la formación Gualanday.



**PROYECTO
 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
 SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
 Anexo Fotográfico

SW

NE



Figura 1.4 : Falla El Palmar : capas desplazadas en el Abanico de Lérica (carretera La Sierra - Venadillo).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

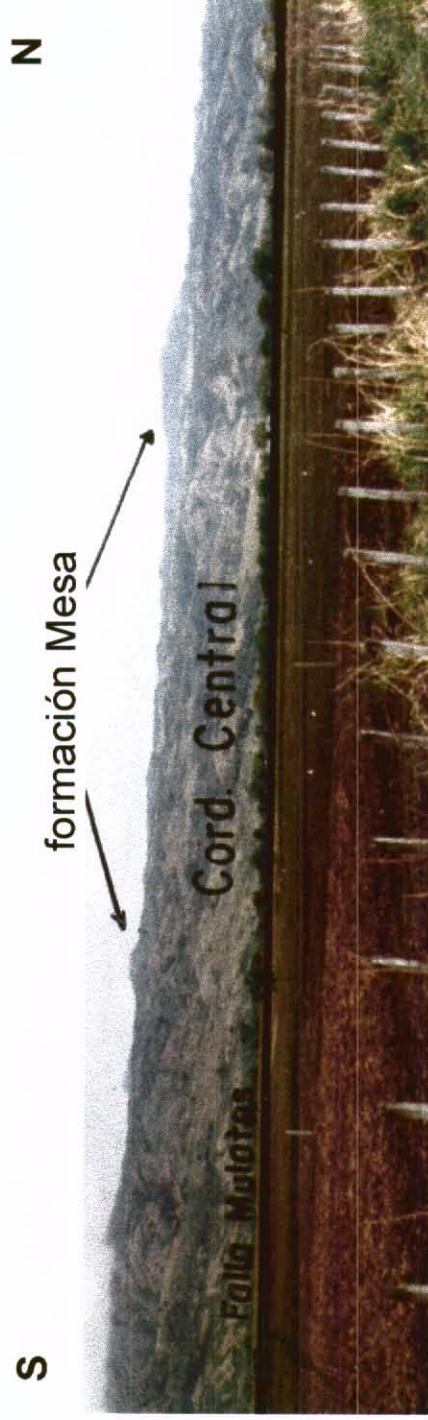


Figura 1.5 : Falla de Mulatos : La traza se define a lo largo del quiebre de pendiente entre la Cordillera Central y el Valle del Magdalena. El bloque cabalgante está caracterizado por una superficie de erosión levantada y basculada tectónicamente hacia el Este, con algunos remanentes de la formación Mesa del Terciario Superior. Falla predominantemente inversa con buzamiento al W y orientación N-S.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

NE

SW



Figura 1.6 : Falla de Honda a proximidad de la ciudad de Honda. Pone en contacto rocas del Mioceno (grupo Honda) en el bloque cabalgante con rocas del Plioceno (formación Mesa). En este sector la traza de falla (en punteado) está cubierta por una terraza reciente que no presenta indicios de deformación tectónica. Falla inversa con buzamiento al Este y orientación aproximada N-S.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

NW

SE



Figura 1.7 : Falla Alto del Trigo en la vía Guaduas - Villeta. Pone en contacto rocas del Cretáceo en el bloque cabalgante con rocas del Terciario en el bloque yacente. La traza de falla (en punteado) coincide con el cambio de pendiente. Falla predominantemente inversa con buzamiento al E y orientación aproximada N-S.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

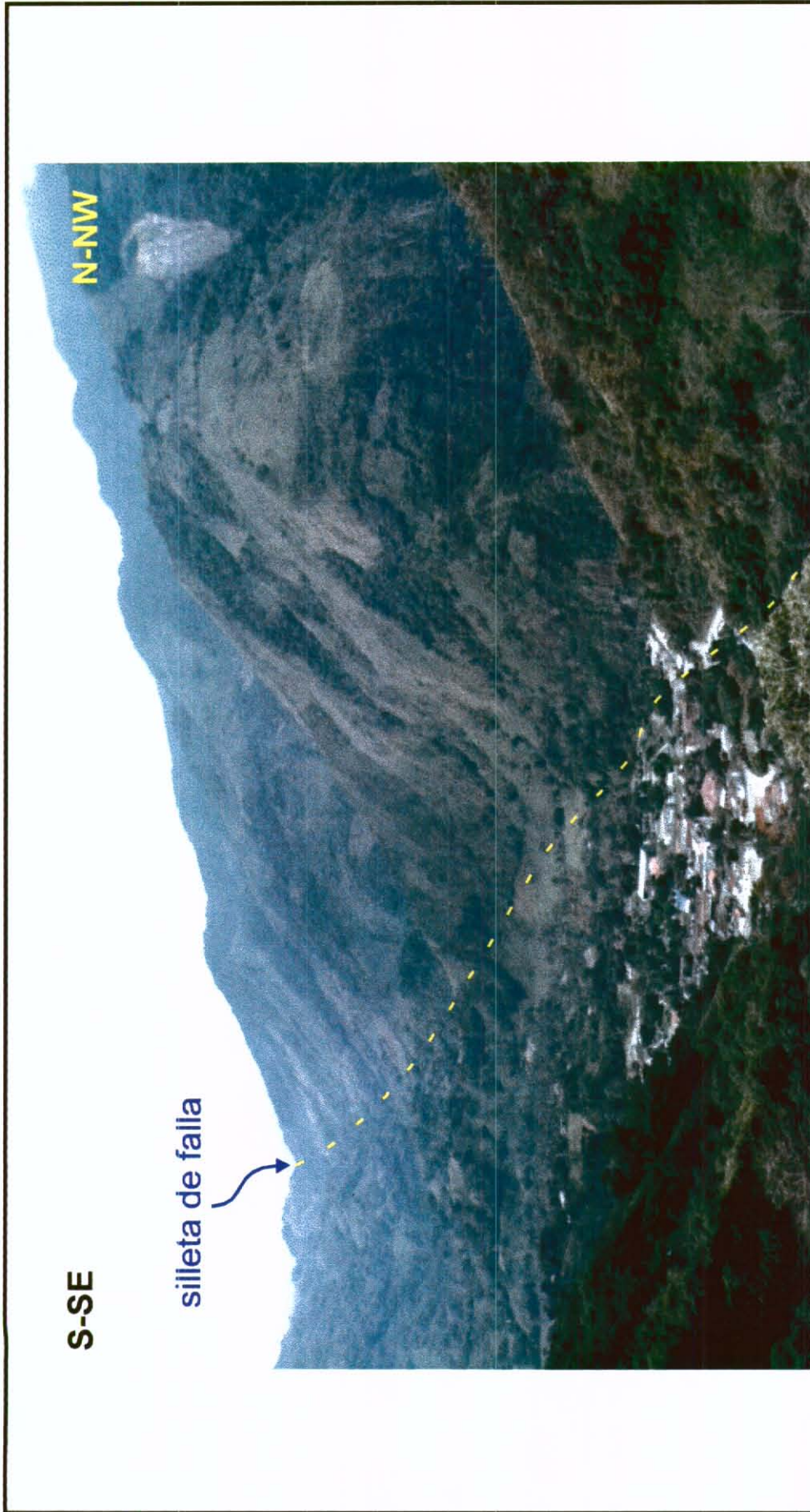


Figura 2.1 : Falla de Santa María de dirección N30°E en cercanía de la población de Santa María. Pone en contacto rocas del Jurásico (form. Batá) en el bloque cabalgante al NW con rocas del Cretácico Inferior en el bloque yacente. La traza de falla (en punteado) está definida en la zona de cambio de pendiente por medio del contraste morfológico. Nótese la silleta de falla sobre la traza.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

**NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico**

SW

NE

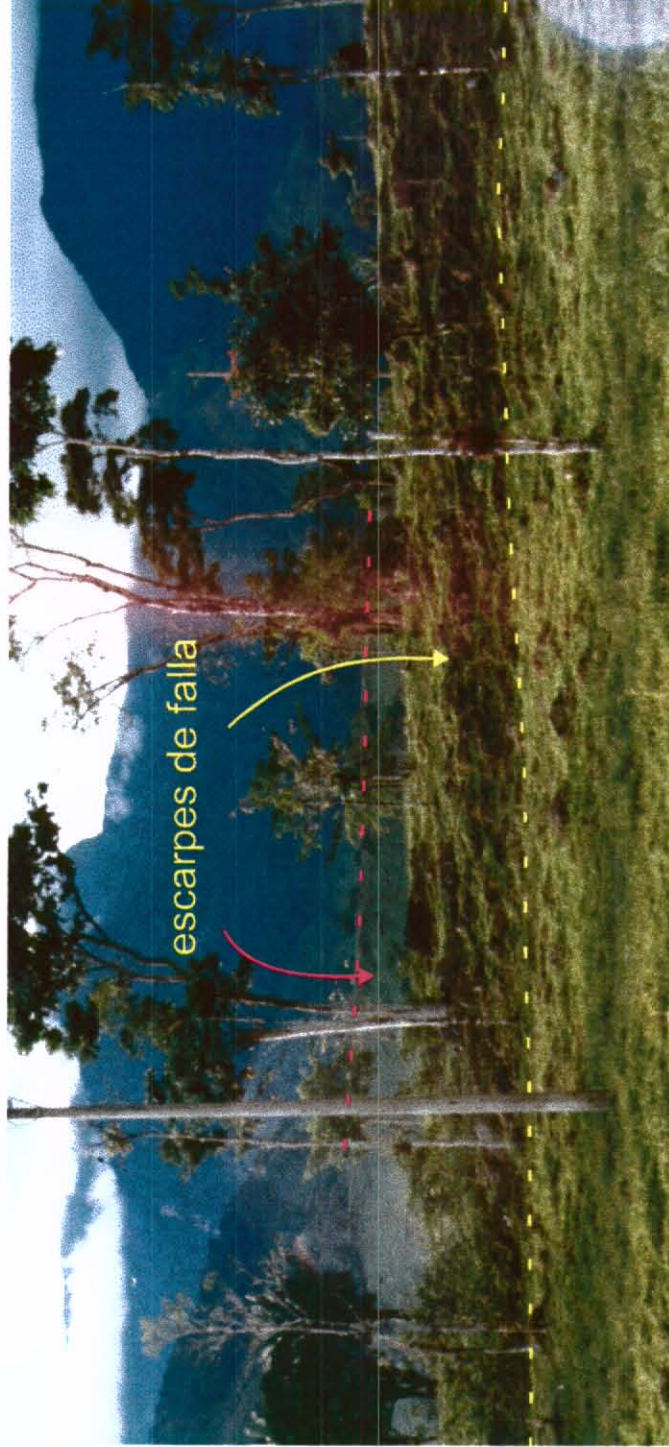


Figura 2.2 : Falla Guayuriba - Restrepo : escarpe de falla de 3 - 5 m (en amarillo punteado) en el Abanico de Restrepo. Se observa igualmente el abanico levantado (en rojo punteado) a lo largo de un segundo escarpe mucho mayor situado a unos 300 m al Este.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

SW

NE



Figura 2.3 : Segmento de Guaicáramo Centro en el sector de Monterrey. La falla pone en contacto rocas del Cretácico Superior (grupo Palmichal) en el bloque cabalgante al NW con rocas del Plioceno (formación Caja). Se observan niveles de terrazas cauterarias que presentan escalones paralelos a la traza principal de dirección N45°E. La continuidad y persistencia de estos rasgos permite asimilarlos en determinadas situaciones con escarpes de línea de falla (en punteado).



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

W

E



Figura 2.4 : Escarpes de línea de falla (en punteado) asociados con la traza de Guaicáramo Centro al sur de Monterrey. Se observan escalones de 5 - 10 m de altura en terrazas caaternarias deformadas.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

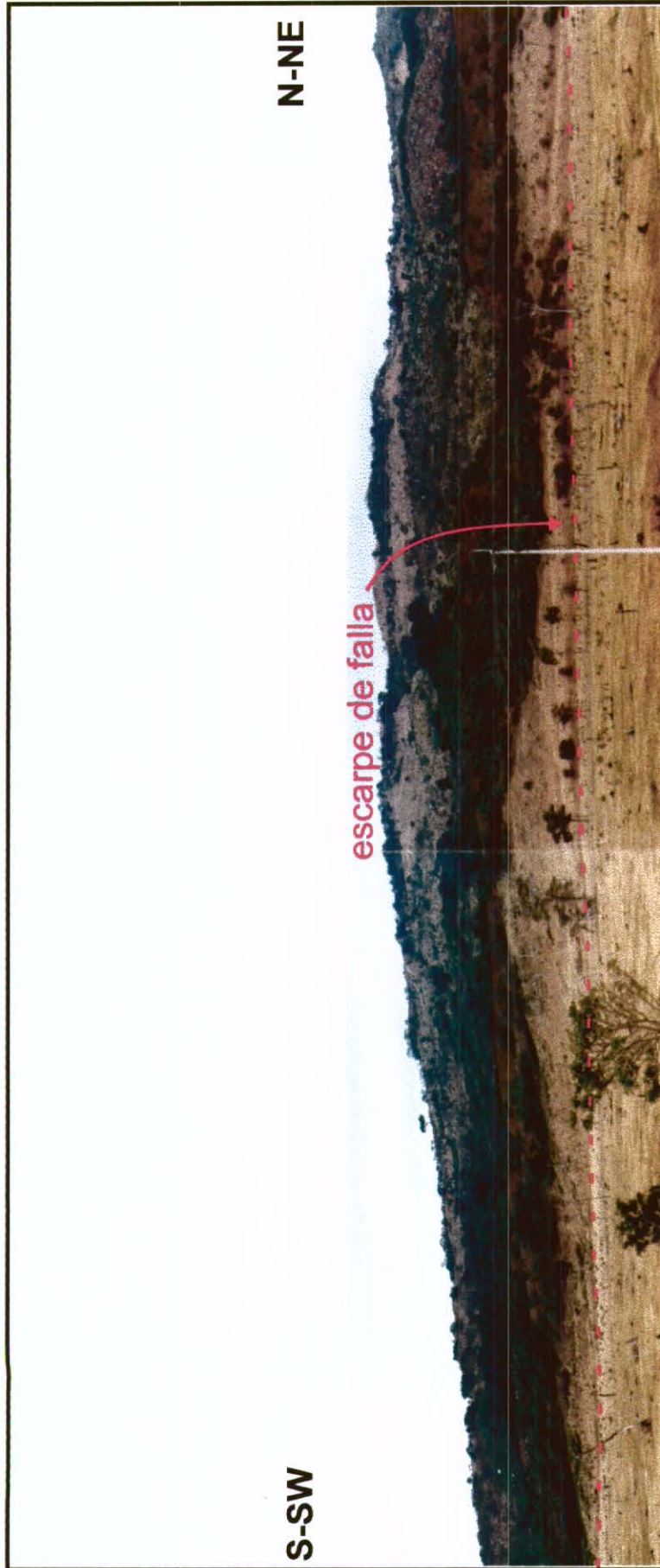


Figura 2.5 : Escarpe de línea de falla de aproximadamente 5 m de altura en terrenos cuaternarios a lo largo del segmento Yopal, entre Río Chiquito y la ciudad de Yopal. Falla inversa con buzamiento al NW y orientación aproximada N30°E. En el relieve, al fondo, se observan rocas del Terciario Oligoceno (formación San Fernando) situadas en el bloque cabalgante.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

SE

NW



Figura 2.6 : Superficie de erosión de edad cuaternaria, basculada hacia el E-SE (loma de Capigua), situada al sur de Río Chiquito. La traza principal de la falla Yopal está situada al NW de la figura, y probablemente existe una segunda traza al SE de la superficie de erosión. Nótese la discordancia angular entre las rocas sedimentarias plegadas del Plio-Pleistoceno (formación caja - en punteado) y la superficie de erosión.



PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

SW

NE



Figura 2.7 : Traza de falla (en punteado) del segmento Yopal al norte del río Cusiana. Se observan rocas del Terciario Oligoceno al NW cabalgando sobre rocas del Plio-Pleistoceno (formación Caja).



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

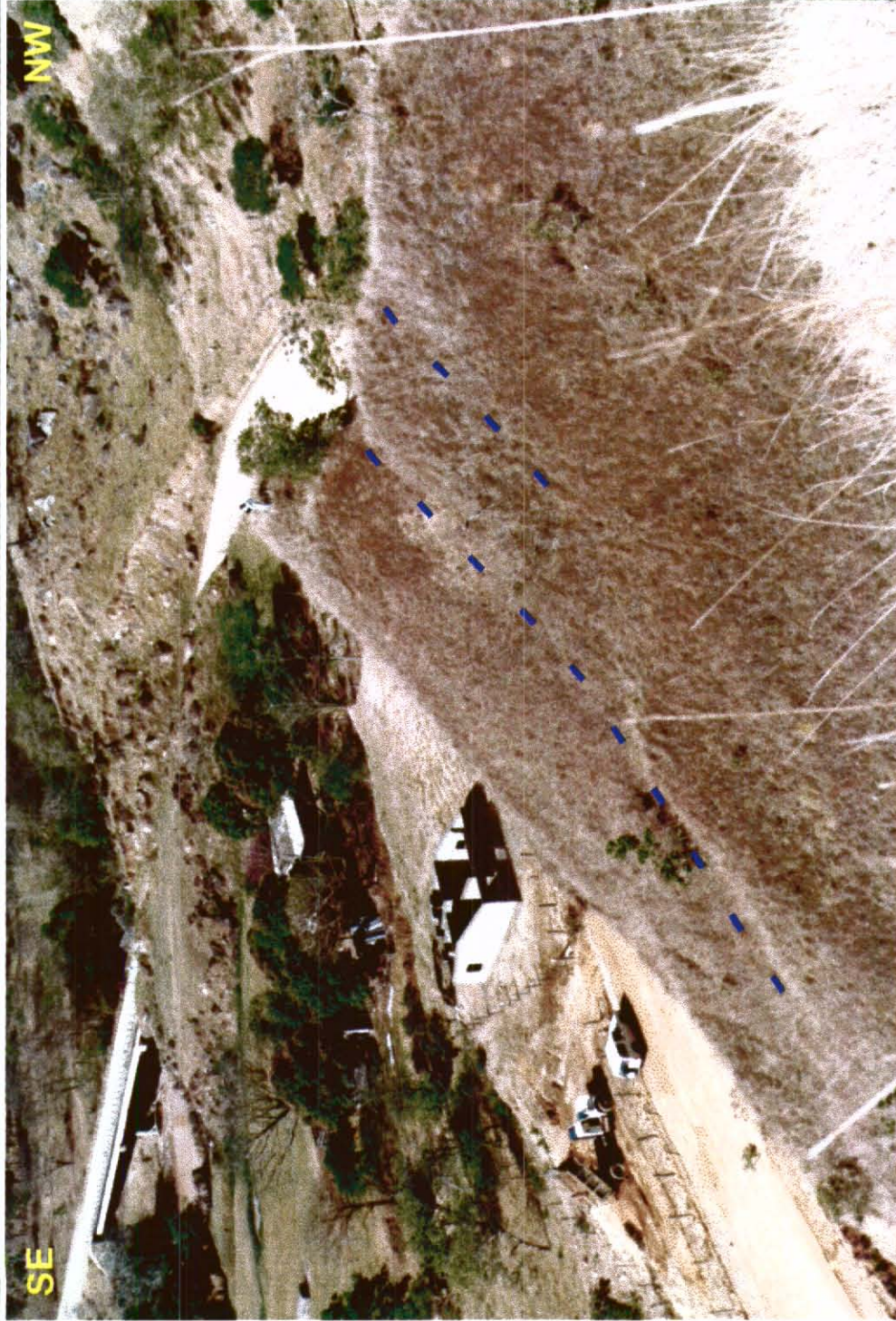


Figura 2.8 : Cuaternario deformado (formación la Corneta) en proximidad de la traza de falla del segmento Yopal en el sector de Río Chiquito. La terraza presenta cantos fracturados por la compresión tectónica y fracturas verticales (en punteado) de dirección N120°E.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

**NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico**



Figura 3.1 : Vista del flanco oriental del anticlinal de Arcabuco, asociado al movimiento inverso de la falla de Boyacá en profundidad - carretera Tunja - Arcabuco. Se observan capas del Cretáceo fuertemente inclinadas hacia el SE. El plano de falla tiene dirección NE y buza al NW; nótese los depósitos cuaternarios horizontales sobre el bloque yacente.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

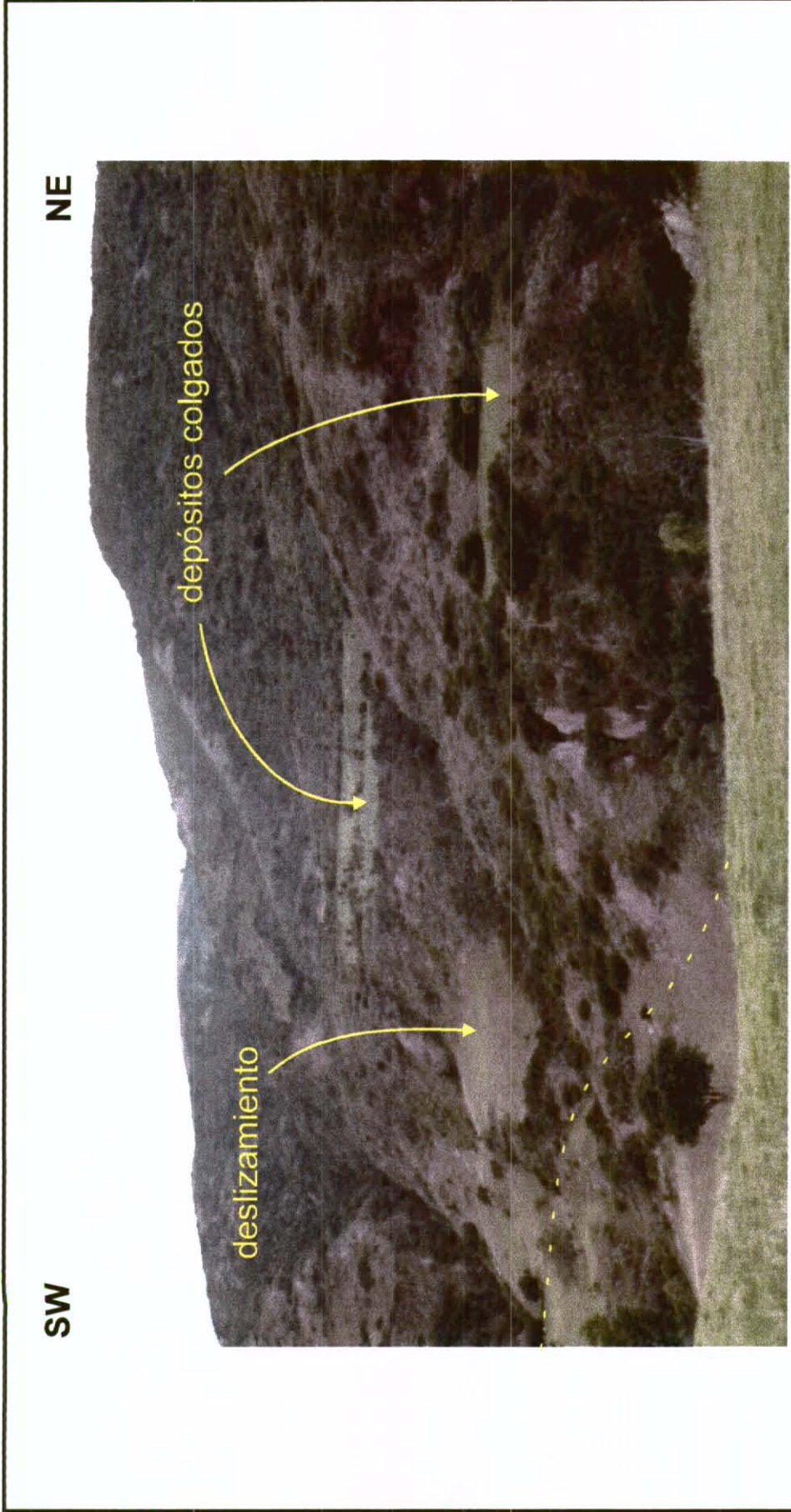


Figura 3.2 : Falla de Soapaga al SW de Paz del Río : se observan depósitos cuaternarios colgados y deformados que suprayacen sobre rocas del Jurásico (formación Girón) situadas en el bloque cabalgante. Los depósitos están afectados por numerosos deslizamientos. La traza de falla está indicada en amarillo y tiene dirección NE (el plano buza al NW).



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

SW

NE



Figura 3.3 : Falla de Bogotá en el sector norte de la Capital : se aprecia el contraste morfológico entre las rocas del Cretáceo situadas en el bloque cabalgante y los sedimentos cuaternarios de la Sabana de Bogotá. La traza de falla (en amarillo) es paralela al piedemonte.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico

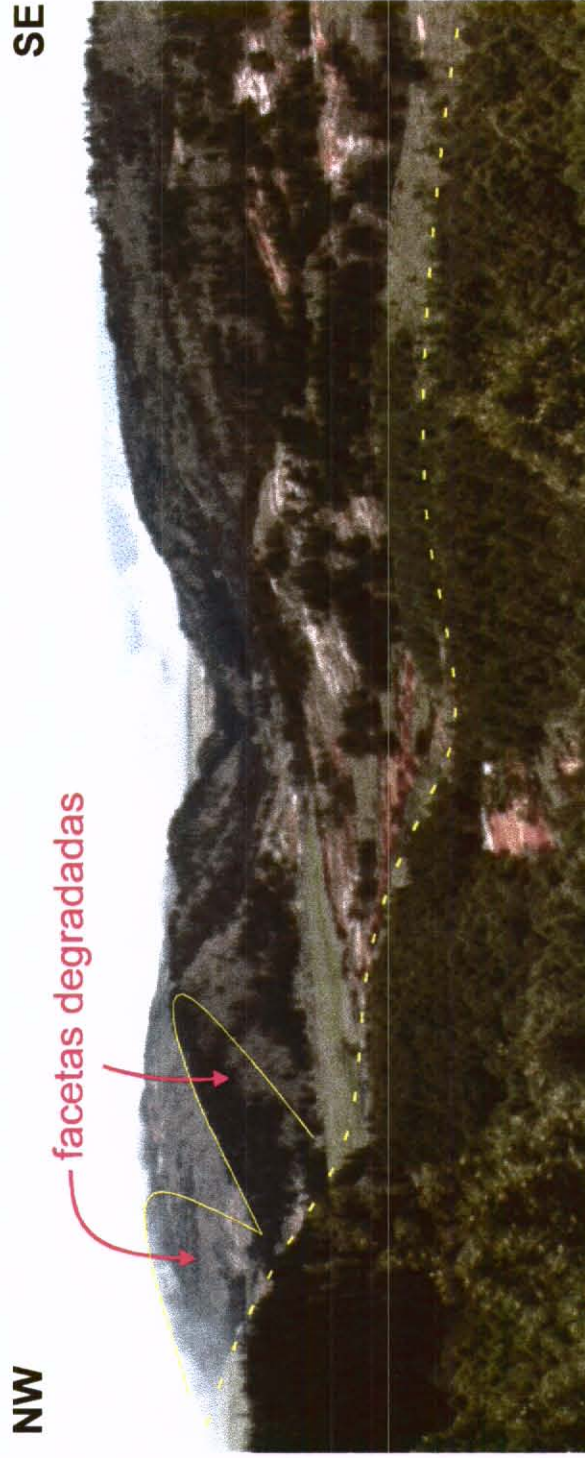


Figura 3.4 : Traza de falla de dirección N-S en el sector de Mondoñedo (sistema de Facatativá). Se aprecian indicios debiles de actividad tales como facetas degradadas.



**PROYECTO
MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE
SANTAFÉ DE BOGOTÁ**

NEOTECTÓNICA
Anexo Fotográfico



**Microzonificación Sísmica de Santafé
de Bogotá**

**Estudios Geológicos
Subproyecto No. 2**

E 98,2

Diciembre de 1995

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y QUIMICA

Lista de Figuras

- Figura 1** Localización de la Formación Chipaque (Ksch)
- Figura 2** Localización del Grupo Guadalupe (Ksg) conformado por: Formación Arenisca Dura (Ksgd), Formación Plaeners (Ksgp) y Formación Labor Tierna (Ksglt)
- Figura 3** Localización de la Formación Guaduas (Ktg)
- Figura 4** Localización de la Formación Cacho (Tpc)
- Figura 5** Localización de la Formación Bogotá (Tpb)
- Figura 6** Localización de la Formación Arenisca de la Regadera (Ter)
- Figura 7** Localización de la Formación Usme (Tsu)
- Figura 8** Localización del Terciario Superior- Cuaternario

Introducción

Santafé de Bogotá se localiza en el núcleo de la cordillera Oriental, en el Departamento de Cundinamarca, a una altura variable entre 2630 y 2900 m.s.n.m. Es la capital del país y cuenta con unos 6'500.000 de habitantes, localizándose el mayor número de población en sus sectores sur y suroccidental.

El área de estudio presenta dos zonas geomorfológicas importantes: una plana ubicada en su parte central donde se concentra la mayoría de la población, y una montañosa parcialmente habitada. La zona plana es drenada por el río Bogotá, que corre en sentido NNE-SSW y algunos afluentes tales como los ríos Juan Amarillo y Fucha. La parte montañosa es drenada por los ríos Tunjuelito y San Francisco, lo mismo que por algunas quebradas de menor caudal que descienden en sentidos S-N y E-W y que al entrar a la parte plana (poblada), sirven de canales para transportar las aguas servidas al río Bogotá.

Desde el punto de vista geológico, Santafé de Bogotá se localiza dentro de la zona de influencia de 4 cuadrángulos, El K₁₀-Villeta, el K₁₁-Zipaquirá, el L₁₀-Fusagasugá, y el L₁₁-Villavicencio; esto ha dificultado que no exista un mapa geológico a una sola escala, pues en la actualidad, el cuadrángulo L₁₁ publicado es fotogeológico a escala 1:200.000; el cuadrángulo K₁₀ también es fotogeológico a escala 1:200.000 y los cuadrángulos K₁₁ y L₁₀ se encuentran publicados a escala 1:100.000. Helmens K., (1990) presentó un mapa de Bogotá y sus alrededores a escala 1:80.000, que tuvo como objetivo principal las dataciones de los depósitos del Terciario Superior-Cuaternario. Teniendo en cuenta lo anterior, se amerita para efectos de alcanzar los objetivos del proyecto de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá, la publicación del mapa geológico de esta ciudad a una a escala mayor.

El presente trabajo ha sido elaborado por los geólogos Pablo Caro y Justo Padilla quienes se han basado en trabajos anteriores donde, además, han participado los geólogos Carlos Ulloa, Erasmo Rodríguez, Giancarlo Renzoni, Antonio Rodríguez, Pedro Mojica, Humberto Rosas y Alfonso Arias.

El mapa geológico de Bogotá se ha digitalizado utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (ARC_INFO) teniendo en cuenta los diferentes niveles de información. Esto se ha hecho a escala 1:25.000 y la edición final del mapa esta en 1:50.000. Además, se implantó una base de datos con la información existente. En este trabajo han participado las ingenieras Carolina Pérez y Blanca Oviedo quienes han desarrollado su tesis de pregrado con el modelo de SIG (I Fase).

Dentro del área de la presente plancha, se han realizado algunos trabajos entre los que se cuentan: Scheibe (1933), Hubach (1952,1957), Van Der Hammen (1957,1958,1960,1973), Julivert (1961,1963), Pérez y Salazar (1973), Ujueta (1961), Ambientec (1988), Mosquera y otros (1986), Molano y Ulloa (1987), Hoorn y otros (1987, 1988) y Helmens (1990). Dichos estudios, constituyen un gran aporte al conocimiento geológico del área de la Sabana de Bogotá.

El INGEOMINAS durante los años de 1986 a 1988 efectuó el proyecto "Zonificación geotécnica del Distrito Especial de Bogotá" mediante un convenio de esta entidad con la Alcaldía Mayor de Santafé de Bogotá y el Departamento Administrativo de Planeación Distrital (D.A.P.D). Dentro dicho proyecto se hizo el levantamiento geológico a escala 1:50.000 del perímetro urbano de Santafé de Bogotá y sus alrededores, abarcando una superficie de 600 km². Este trabajo fué el resultado de la investigación de la geología aplicada al campo económico y de amenazas geológicas.

Para la cartografía geológica del proyecto de "Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá" se ha usado como base los resultados del proyecto anteriormente mencionado. Además, se ha recopilado información geológica de la zona, se interpretaron fotografías aéreas a escala 1:20.000 del I.G.A.C y se realizó un reconocimiento de campo, detallando áreas hacia el sur y hacia el norte, sectores en los cuales se ha presentado un desarrollo urbanístico notable a partir de 1988. Es importante resaltar que para el estudio de neotectónica y la evaluación de la respuesta del subsuelo se han delimitado los depósitos cuaternarios que cubren un área correspondiente al 81% del área de estudio.

Capítulo 1

Litoestratigrafía

En el área de estudio afloran rocas, sedimentarias de orígenes marino y continental, y depósitos poco consolidados a no consolidados, cuyas edades van del Cretáceo Superior al Reciente.

A continuación se describen las unidades cartografiadas de la más antigua a la más joven.

1.1. Formación Chipaque (Ksch)

El nombre de esta unidad fue empleado inicialmente por Hubach E. en 1957; posteriormente fue redefinida por Renzoni G. en 1968. Ulloa y Rodríguez (1991), proponen elevar la Formación Chipaque al rango de Grupo conformado por las Formaciones Simijaca, La Frontera y Conejo. En el presente trabajo y dado que no aflora en el área toda la secuencia litoestratigráfica de esta unidad, se utilizará la nomenclatura de Renzoni G, es decir Formación Chipaque. (Figura 1)

Esta unidad aflora en su parte superior en el núcleo de las estructuras anticlinales de Bogotá y Cheba (Caro P. y García J., 1988). Está conformada por lutitas negras, limo-arcillosas, carbonosas, piritosas, finamente laminadas, en bancos hasta de 10 m de espesor, con intercalaciones de areniscas de grano muy fino, en estratos de 0.2 a 0.8 m de espesor; hacia el tope de la unidad se acentúan los bancos arenosos, con disminución del contenido de lutitas hasta pasar a una secuencia predominante arenosa correspondiente a la parte basal de la Formación Arenisca Dura.

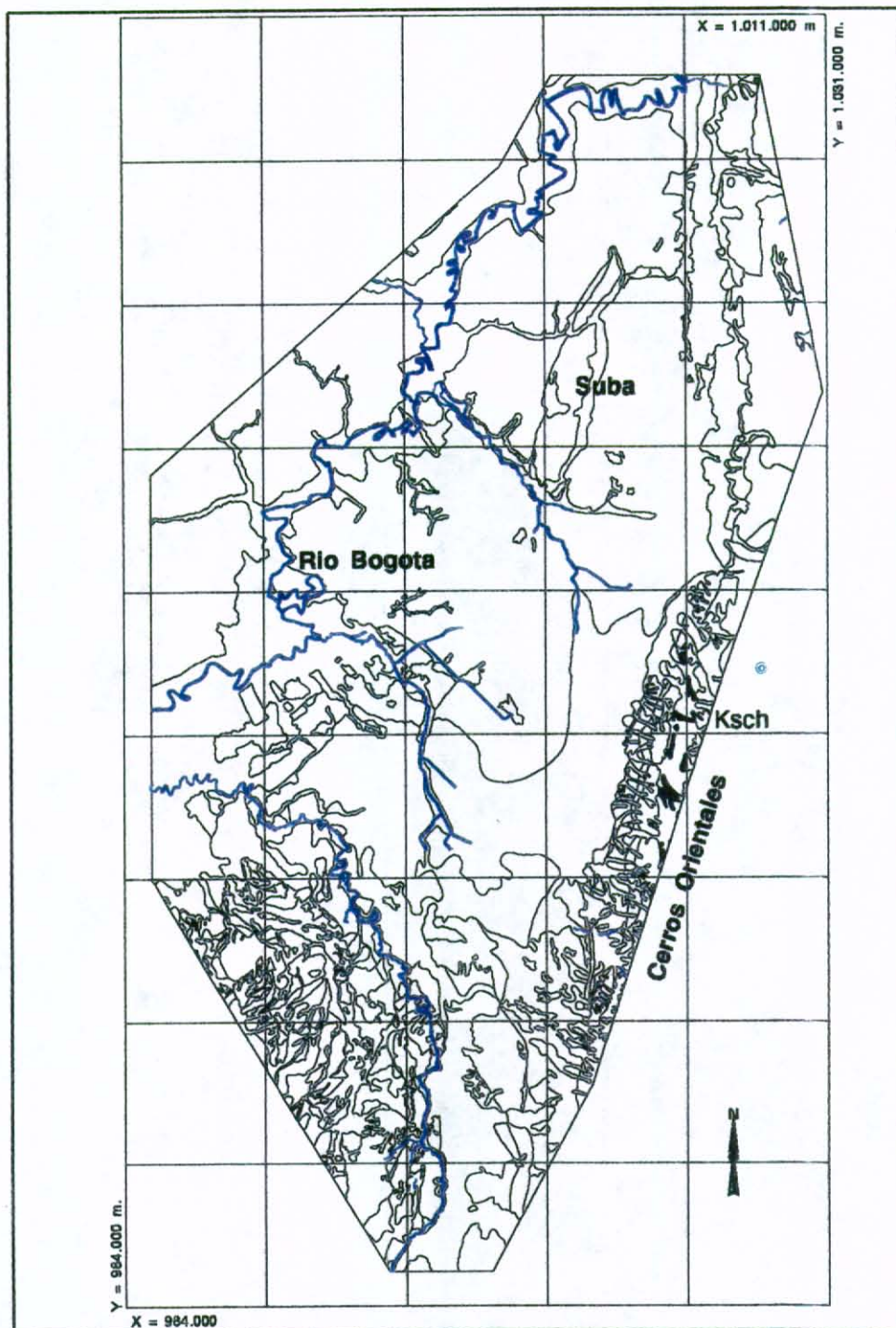


Figura 1 Localizacion de la Formacion Chipaque (Ksch)

La secuencia que aflora en el anticlinal de Bogotá, presenta un espesor 130 m y en el anticlinal de Cheba el espesor es de 205 m. La edad de esta unidad se considera Cenomaniano- Santoniano y su depósito ocurrió en un ambiente marino poco profundo.

Dado que su composición es predominante lutítica, sus características geomecánicas son pobres para la construcción de obras civiles, aunque las intercalaciones arenosas pueden tener importancia como acuíferos y también como material para recibos.

1.2. Grupo Guadalupe (Ksg)

Hettner en 1892, habló por primera vez del Piso de Guadalupe, posteriormente Renzoni en 1968 lo elevó al rango de Grupo, constituido por las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna. (Figura 2)

1.2.1. Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Esta unidad, definida por Hubach E en 1931, aflora hacia la parte central y flancos de los anticlinales de Bogotá y Cheba (mapa geológico); constituye los cerros más prominentes de las partes oriental y suroccidental del área, tales como Guadalupe, Monserrate, Alto El Cable, La Cruz, La Viga y Cheba.

La descripción estratigráfica de esta unidad se hace con base en columnas estratigráficas levantadas por la carretera Bogotá-Choachí, Cerro de Cheba y el Cerro de La Cruz (Caro y García 1988), y el carreteable al Cerro El Cable (Pérez y Salazar, 1973). La Formación está constituida por una secuencia de areniscas cuarzosas, de color gris claro a blanco, de grano fino a muy fino, subredondeado, con esfericidad media a alta, bien seleccionada en estratos de 0.05 a 2 m, dura, compacta, bien cementada, con intercalaciones esporádicas de limolitas y arcillolitas silíceas en bancos hasta de 5 m de espesor. El espesor total de acuerdo a las columnas estratigráficas levantadas varía entre 308 y 460 m.

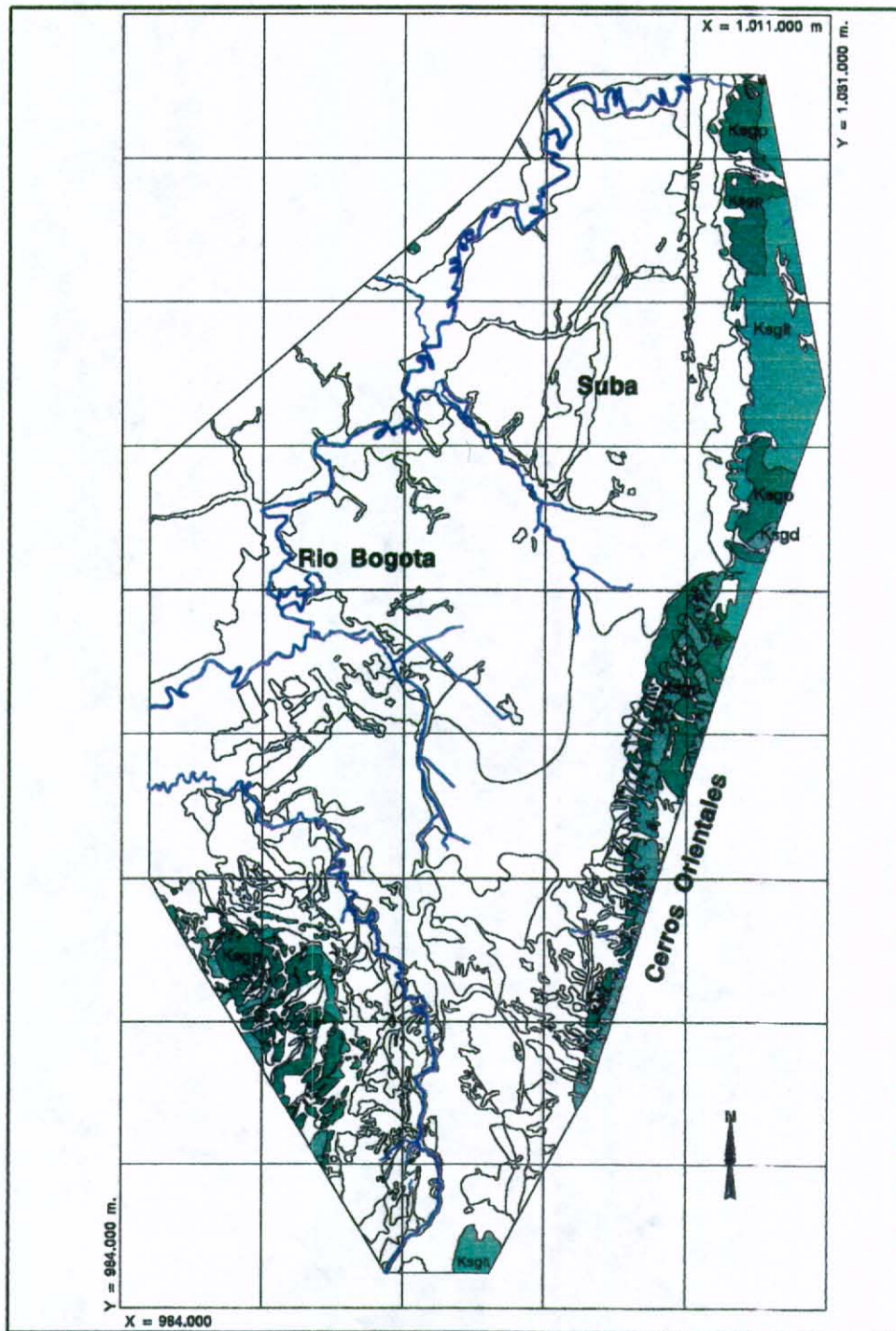


Figura 2

Localización del Grupo Guadalupe (Ksg) conformado por: Formación Arenisca Dura (Ksgd), Formación Plaeners (Ksgp), Formación Labor Tierna (Ksglt)

1:1'500 000

Esta Formación suprayace concordantemente a la Formación Chipaque e infrayace normalmente a la Formación Plaeners, y se considera que se depositó en un ambiente litoral a sublitoral (Pérez y Salazar, 1971). Su edad es del Coniaciano-Campaniano, sin mayor precisión debido a la carencia de dataciones.

Su importancia económica radica en que, sus arenas y rocas trituradas son utilizadas como material de construcción, existiendo grandes reservas dentro del área estudiada como también en sus alrededores.

1.2.2. Formación Plaeners (Ksgp)

Unidad definida por Hubach en 1931 y redefinida por Renzoni en 1968; aflora en los flancos de los anticlinales de Bogotá y Cheba, presentando un relieve con pendiente topográfica moderada.

Litoestratigráficamente se pueden diferenciar tres conjuntos: el inferior con predominio de arcillolitas, arcillolitas silíceas y limolitas; el intermedio donde hay alternancia de arcillolitas, limolitas y areniscas, y el superior con predominio de limolitas y arcillolitas silíceas.

Las columnas estratigráficas levantadas en la quebrada Carrizal (sector oriental del área) y en el flanco oriental del anticlinal de Cheba, dan un espesor de 40 m para el conjunto inferior; un espesor entre 70 y 117 m para el conjunto medio, y un espesor entre 45 y 55 m para el conjunto superior (Ulloa y Rodríguez, 1987).

Esta unidad suprayace normalmente a la Formación Arenisca Dura e infrayace también normalmente a la Formación Labor-Tierna. Se considera que su depósito ocurrió en un ambiente marino de llanura de lodo (Pérez y Salazar, 1971), con influencia de sedimentación en barras o canales. Su edad es del Maestrichtiano Inferior (Gutiérrez, 1973 y Etayo, 1964, en Pérez y Salazar, 1971). Su textura y composición mineralógica hace que esta unidad tenga importancia económica como material de recebo y como fuente de caolín en zonas meteorizadas. Su comportamiento geomecánico se considera aceptable para la fundación de obras civiles, excepto en zonas de falla.

1.2.3. Formación Labor-Tierna (Ksglt)

Esta unidad fue definida por Renzoni en 1968. En el área de estudio aflora en los sectores NE y hace parte de los flancos del anticlinal de Bogotá-Usaquén y del sinclinal de Usme-Tunjuelito. Presenta una morfología abrupta y escarpada que contrasta con la de la Formación Plaeners y Guaduas, que la infrayacen y suprayacen respectivamente.

La secuencia litológica está constituida hacia la base por un conjunto de areniscas cuarzosas de las siguientes características: color gris claro y de grano muy fino a medio y esporádicamente grano grueso a muy grueso, subangular a subredondeado, de moderadamente a bien seleccionadas, de ligeramente friables a duras, en estratificación de muy delgada a gruesa; con delgadas intercalaciones de limolitas y arcillolitas silíceas. Hacia la parte media se presenta un conjunto de arcillolitas, arcillolitas silíceas y limolitas de unos 10 a 15 m de espesor, el cual aflora muy bien en el flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelito en los sectores de El Porvenir y El Rincón; en el anticlinal de Bogotá en los sectores del Alto El Cabo y por la vía Bogotá- Choachí, los dos conjuntos presentan un espesor variable de 177 m en las quebradas El Higuierón y La Vieja en el flanco occidental del anticlinal de Bogotá (Pérez y Salazar 1971); de 150 m en el Alto El Cabo (Ulloa y Rodríguez 1987), y de 180 m en el sector de Usaquén (Ujueta, 1961). Los dos conjuntos descritos corresponden a la denominada Formación Arenisca de Labor, por algunos autores.

El conjunto superior aflora en los flancos del anticlinal de Bogotá-Usaquén y sinclinal de Usme-Tunjuelito. Está constituido por areniscas cuarzo-feldespáticas y feldespáticas, de color gris claro, de grano medio a grueso, friables, con estratificación cruzada, en estratos de 0.2 a 3.0 m, con esporádicas intercalaciones de bancos de lodolitas y arcillolitas. En el flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelito (sectores de Peña Colorada) presenta un espesor de 110 m; en el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá-Usaquén el espesor es de 90 m (Ujueta, 1961). Este conjunto ha sido denominado Formación Arenisca Tierna por algunos autores tales como Julivert (1963), Mclaughlin (1975) Perez y Salazar (1971), sin embargo

dentro del presente trabajo no se logró diferenciar claramente, razón por la cual se utilizó la nomenclatura empleada por Renzoni (1968).

Se considera que esta unidad se depositó en un ambiente litoral o sublitoral y se le ha asignado una edad Maestrichtiano Inferior a Medio (Gutierrez, 1973 y Etayo, 1964, en Pérez y Salazar, 1971).

Constituye el acuífero más importante del Grupo Guadalupe, dadas sus características textuales, su friabilidad y su posición estructural que facilita la recarga de agua. Es además la principal unidad del Grupo Guadalupe que produce arena de peña para la construcción.

1.3. Formación Guaduas (KTg).

Esta unidad fué definida por Hettner en 1932 y redefinida por Hubach E. en 1957. Aflora en los Cerros de Suba, Piedemonte Oriental, sectores Sur y Suroeste de Santafé de Bogotá, presentando geformas onduladas de suave pendiente, contrastando con las geformas de las Formaciones Labor-Tierna y Cacho que infrayacen y suprayacen respectivamente. (Figura 3)

Litológicamente esta unidad consta de tres conjuntos: el inferior predominantemente arcilloso, el intermedio con predominio arenoso y el superior arcilloso. Dentro de los tres conjuntos existen intercalaciones importantes de mantos de carbón. El conjunto inferior aflora en el flanco occidental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito, en los sectores de Sierra Morena y Peña Colorada, y consta de arcillolitas gris claras a amarillentas, con delgadas intercalaciones de areniscas cuarzosas y feldespáticas, de grano fino, duras, compactas, en estratos de 0.05 a 0.4 m con un espesor total de 70 m.

El conjunto medio aflora en el flanco oriental del anticlinal de Bogotá-Usaquén, en la margen derecha del río San Cristobal (mapa geológico), en los Cerros de Suba y en el flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelito al sureste del barrio Perdomo Alto.

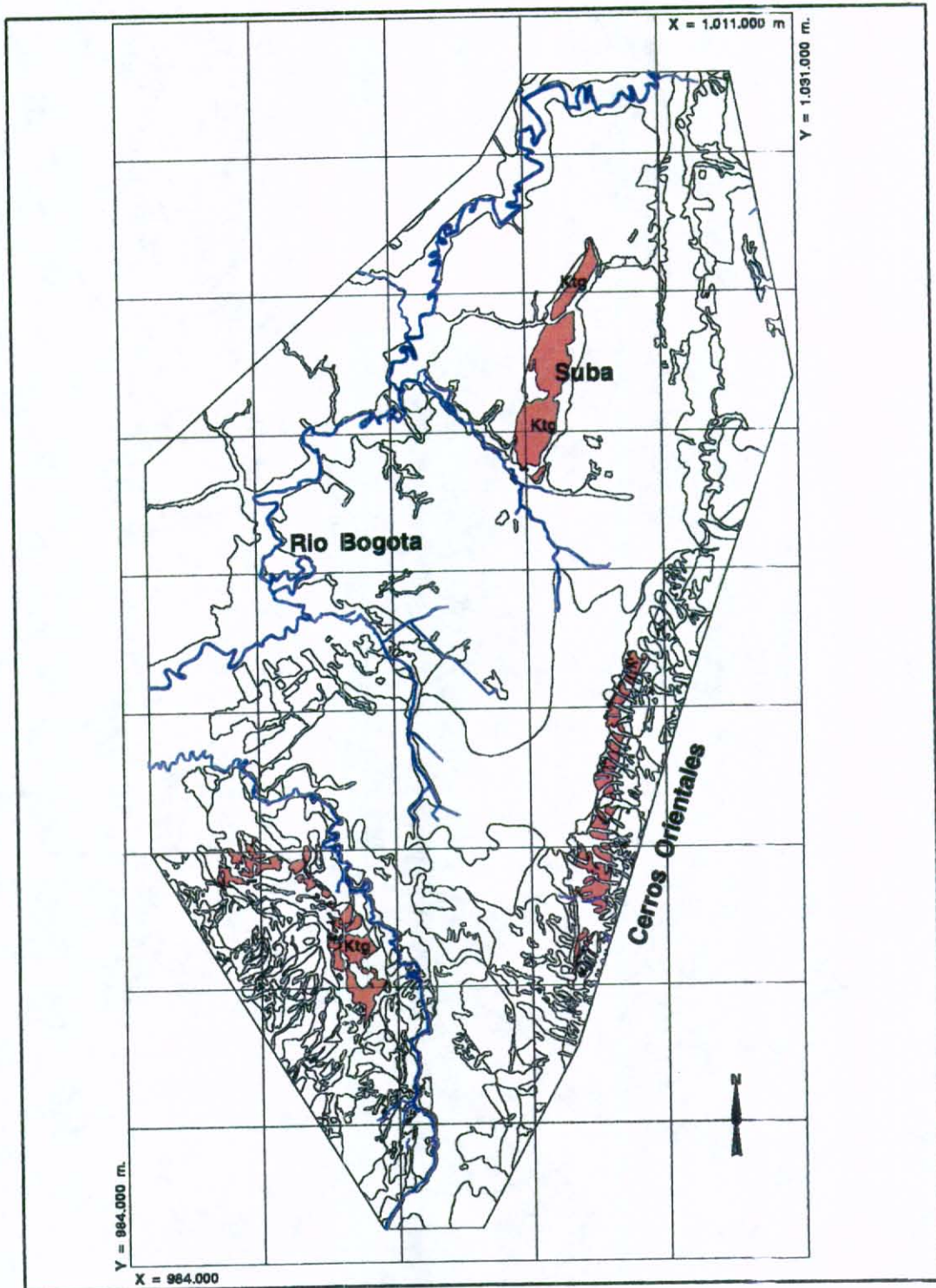


Figura 3 Localización de la Formación Guaduas (Ktg)

Este conjunto consta de areniscas cuarzosas, gris claras a amarillas, de grano fino a conglomerático, subangular a subredondeado, esfericidad media, moderadamente a bien seleccionadas; presenta intercalaciones de arcillolitas gris oscuras, blandas, con restos de plantas, en bancos hasta de 50 m; en la parte media del conjunto se presenta un manto de carbón de 0.4 m de espesor. El espesor total del conjunto medido fue de 606 m (Ulloa y Rodríguez 1987).

El conjunto superior aflora en el flanco oriental del Anticlinal de Bogotá-Usaquén, y en el flanco occidental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito. Este conjunto está constituido por arcillolitas de color gris oscuro a negro, y amarillo rojizo a morado por meteorización, con esporádicas intercalaciones de areniscas cuarzosas, gris claras, de grano medio a grueso, subredondeado, de esfericidad media, de moderadamente a bien seleccionadas, friables, en estratos de 0.3 a 2.0 m; presenta un espesor de 324 m.

El contacto inferior es normal con la Formación Labor-Tierna, aunque en algunos sectores tales como en el piedemonte oriental es fallado. El contacto superior con la Formación Cacho es disconforme (Sarmiento Gustavo, comunicación verbal); en el flanco occidental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito este contacto es fallado con la Formación Bogotá (Caro y García, 1988).

Los depósitos de esta Formación ocurrieron en un ambiente marino para la parte inferior, y un ambiente transicional y aluvial para la parte media y superior. Su edad se considera Maestrichtiano Superior-Paleoceno Inferior (Sarmiento 1992 b).

La variación de la textura hacen que cada uno de estos conjuntos tengan un comportamiento geomecánico diferente. Económicamente es la unidad que posee el carbón a nivel comercial en la Sabana de Bogotá, con un número de mantos de espesor variable entre 5 y 21m (Hubach, 1957). Las arcillas, como producto de meteorización de la roca, se utilizan para la fabricación de ladrillo, bloque, teja y tubería; del nivel granular se extrae arena para construcción, además se considera importante como acuífero.

1.4. Formación Cacho (Tpc).

Esta unidad fue definida por Scheibe en 1918, y redefinida por Huchach en 1945 y por Campbell, en 1962. Aflora a lo largo del piedemonte de los Cerros Orientales de Bogotá haciendo parte del flanco occidental del Anticlinal de Bogotá. Presentan geoformas escarpadas en contraste al relieve de pendiente topográfica moderada de la infrayacente Formación Guaduas.

Consta de areniscas conglomeráticas y areniscas de color amarillo a rojizo, de grano grueso, subangular a subredondeado, moderadamente seleccionadas, friables, con estratificación cruzada, en estrato de 0.1 a 2.0 m de espesor; presenta intercalaciones esporádicas de arcillolitas de color claro. El espesor total es de aproximadamente 50 m.

Varios autores tales como Julivert (1963) y Hubach (1957), mencionan la existencia de la Formación Cacho en el flanco occidental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito. De acuerdo a las observaciones de campo y teniendo en cuenta la secuencia estratigráfica de la Formación Cacho en el flanco occidental del Anticlinal de Bogotá y la secuencia inferior de la Formación Bogotá en el mismo flanco, se considera que en el flanco occidental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito no aflora la Formación Cacho debido a la acción de una falla que afecta la continuidad estratigráfica; por lo tanto, lo que se ha denominado aquí como Formación Cacho, puede corresponder a la parte inferior de la Formación Bogotá, donde existen intercalaciones importantes de bancos arenosos similares a los de la Formación Cacho.

El contacto de esta unidad con la Formación Bogotá es normal y su depositación se considera que ocurrió en un ambiente fluvial de ríos trezados y meándricos (Hoorn, 1987). Su edad asignada se considera del Paleoceno Superior. Teniendo en cuenta sus características texturales y su friabilidad, se infiere una porosidad primaria importante que permite clasificarla como un acuífero; su comportamiento geomecánico para la fundación de obras civiles se considera bueno y se constituye en una fuente importante de arena de peña para la construcción.

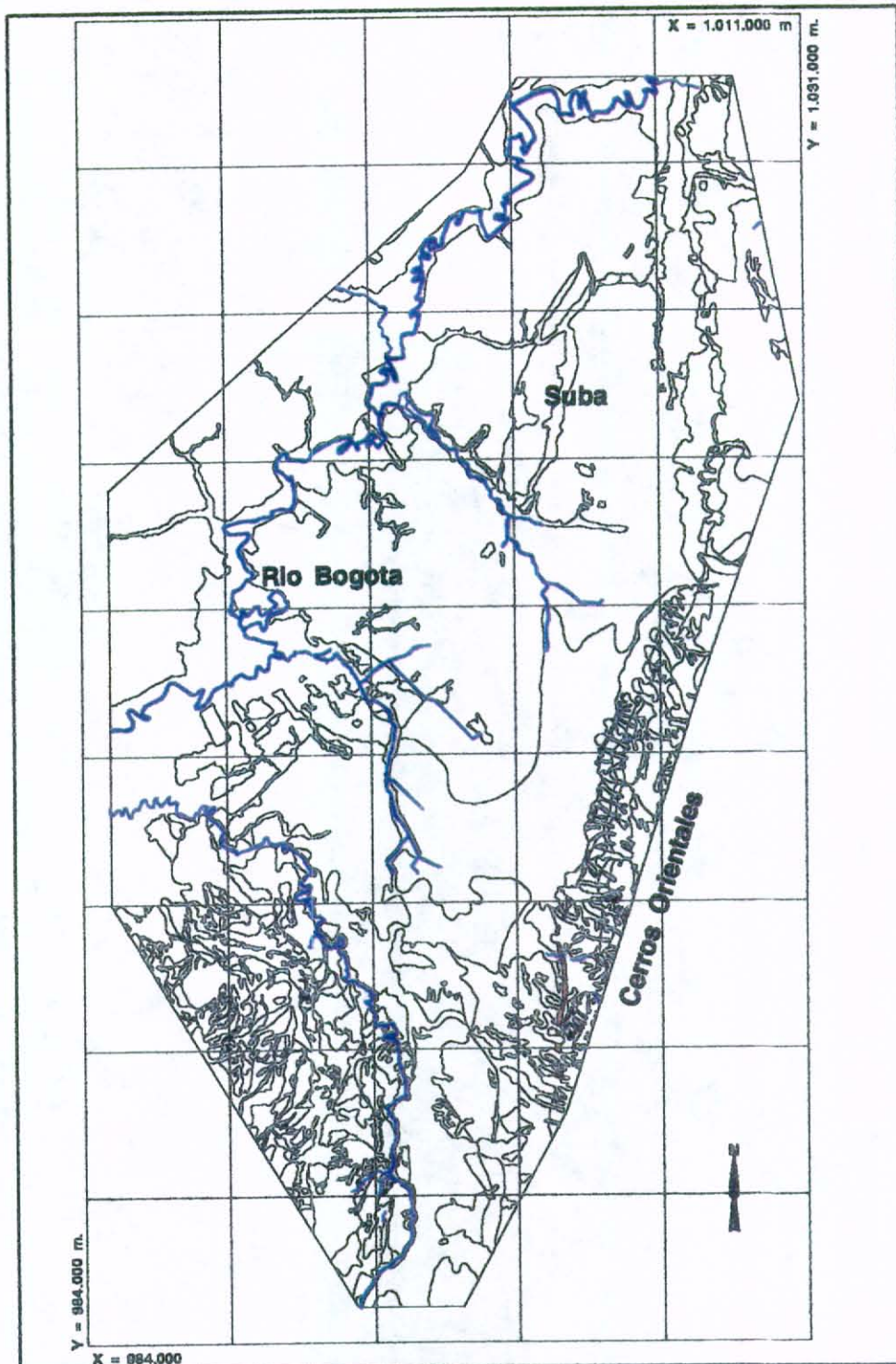


Figura 4 Localización de la Formación Cacho (Tpc)

1.5. Formación Bogotá (Tpb).

Esta unidad fue definida por Hubach en 1945 y redefinida por el mismo autor en 1957. En el área del presente estudio aflora en los flancos oriental y occidental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito. (Figura 5)

Sus mejores exposiciones se observan en el flanco oriental del Sinclinal de Usme-Tunjuelito, al sur del río San Cristóbal, entre los barrios el Triángulo y Juan Rey, por la antigua vía a Villavicencio.

Esta unidad consta de dos conjuntos: el inferior constituido por alternancia de areniscas y arcillolitas; las areniscas son cuarzo-feldespáticas, de color gris claro a gris verdoso, de grano fino hacia la base y grueso hacia el tope, subredondeado, con esfericidad media, moderadamente seleccionadas, friables, en estratos de 0.5 a 4 m. Las arcillolitas son de color gris oscuro y violáceo por meteorización, blandas y plásticas. El espesor de este conjunto supera los 1000 m en su localidad tipo al sur de Bogotá (Hoorn, 1987).

El conjunto superior es arcilloso, relativamente pobre en afloramientos. Las arcillolitas son de color gris oscuro a gris verdoso y marrón rojizo al estar meteorizada. Su espesor total se estima que puede sobrepasar los 1000 m.

El contacto superior de la Formación Bogotá es discordante (Julivert, 1963; Hoorn, et al 1988). Por dataciones polinológicas se ha logrado establecer una edad de Paleoceno Superior-Eoceno Inferior y su depósito ocurrió en un ambiente de llanura aluvial y ríos meándricos (Helmens, 1990).

Las arcillas como producto de meteorización de las arcillolitas se utilizan para fabricación de ladrillo, bloque y tubería, además se utilizan como lechos impermeables para depósitos de basura.

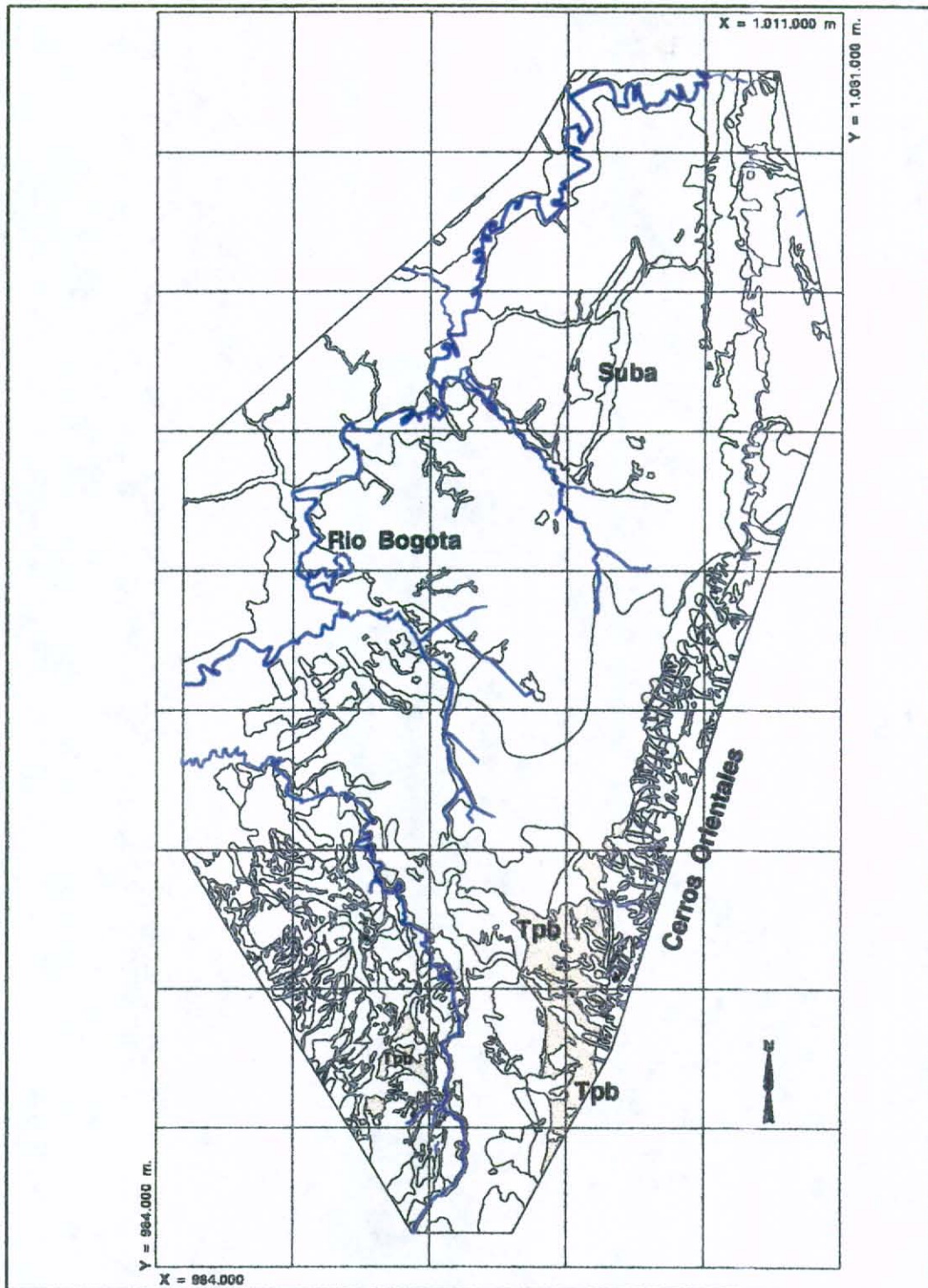


Figura 5 Localizacion de la Formacion Bogota (Tpb)

1.6. Formación Arenisca La Regadera (Ter).

Esta unidad fue descrita por Hubach en 1957, aflora muy bien hacia la parte central del Valle de Usme en ambos flancos del Sinclinal Usme-Tunjuelito. (Figura 6).

La unidad está conformada por areniscas conglomeráticas y areniscas con intercalaciones de bancos de arcillolitas, los cuales van aumentando de base a tope. Las areniscas son de color gris claro y violáceo por meteorización; están compuestas de cuarzo y fragmentos de rocas sedimentarias dentro de abundante matriz arcillosa. El tamaño de grano varía de fino a grueso, subangular a subredondeado, de esfericidad media, pobremente seleccionadas, con estratificación cruzada, friables, en bancos de 5 a 15 m; las arcillolitas son de color gris claro a oscuro y violáceas por meteorización, blandas, plásticas, en bancos de 1 a 30 m. El espesor varía entre 360 y 600 m (Hubach, 1951; Julivert, 1961; Angel, 1988).

El depósito de esta unidad ocurrió en un ambiente fluvial de río trezado para la parte inferior y de río meándrico para la parte superior (Helmens, 1990). Por dataciones palinológicas se le asigna una edad de Eoceno Medio (Hoorn, 1987).

En el Valle de Usme se perforaron dos pozos con profundidades de 500 metros, para evaluar su potencial como acuífero, concluyéndose de que los bancos arenosos no son buenos almacenadores de agua, posiblemente debido a su contenido de matriz arcillosa. Tiene importancia como material de construcción, pues de ella se extrae arena .

1.7. Formación Usme (Tu).

Esta unidad fué definida por Hubach, en 1957 y redefinida por Julivert en 1963. Dentro del área de este estudio aflora la parte inferior de la secuencia, conformando el núcleo del Sinclinal de Usme-Tunjuelito y sus mejores exposiciones se presentan al noroeste del casco urbano de Usme. (Figura 7)

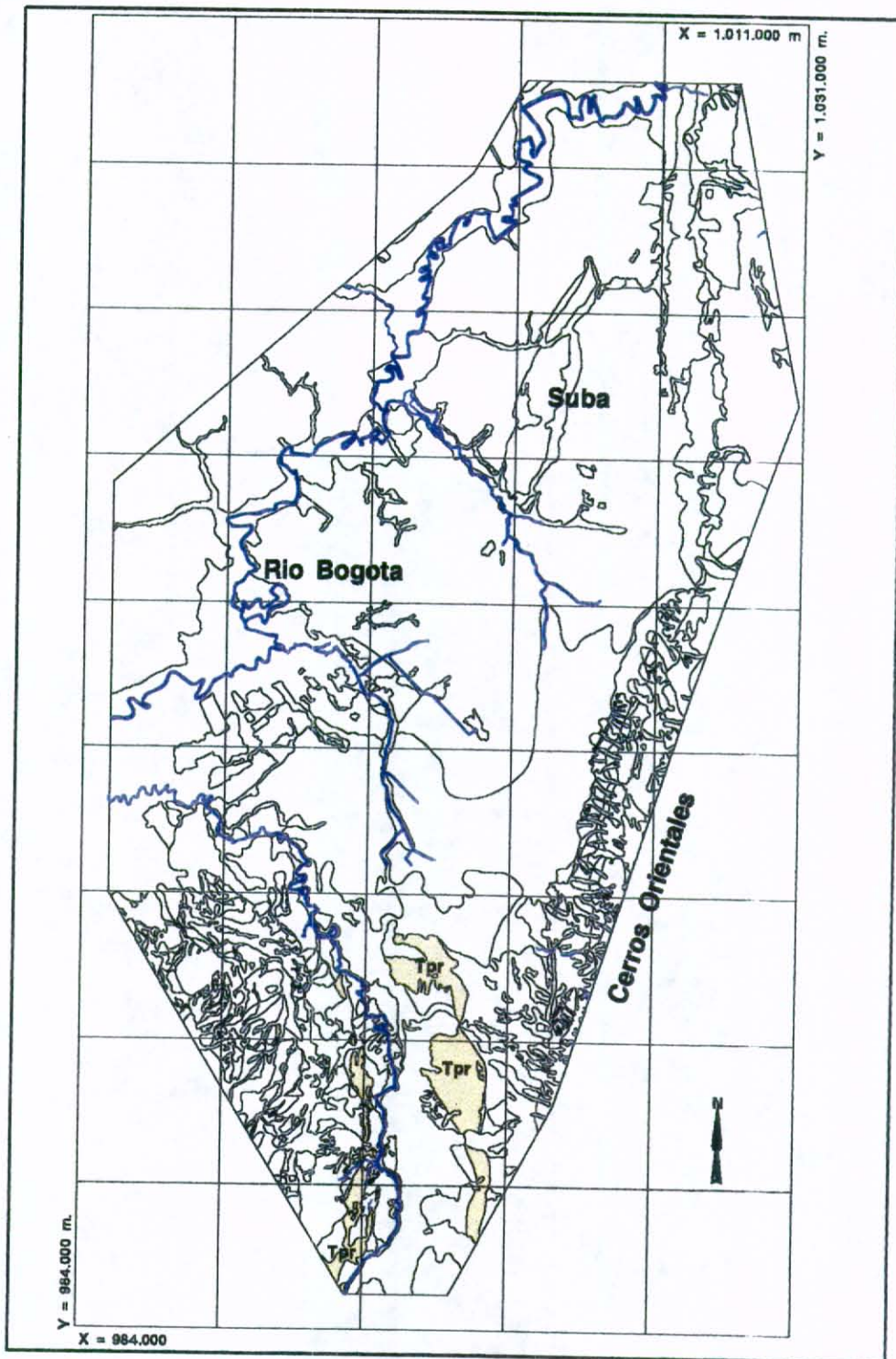


Figura 6 Localización de la Formación Arenisca de la Regadera (Ter)

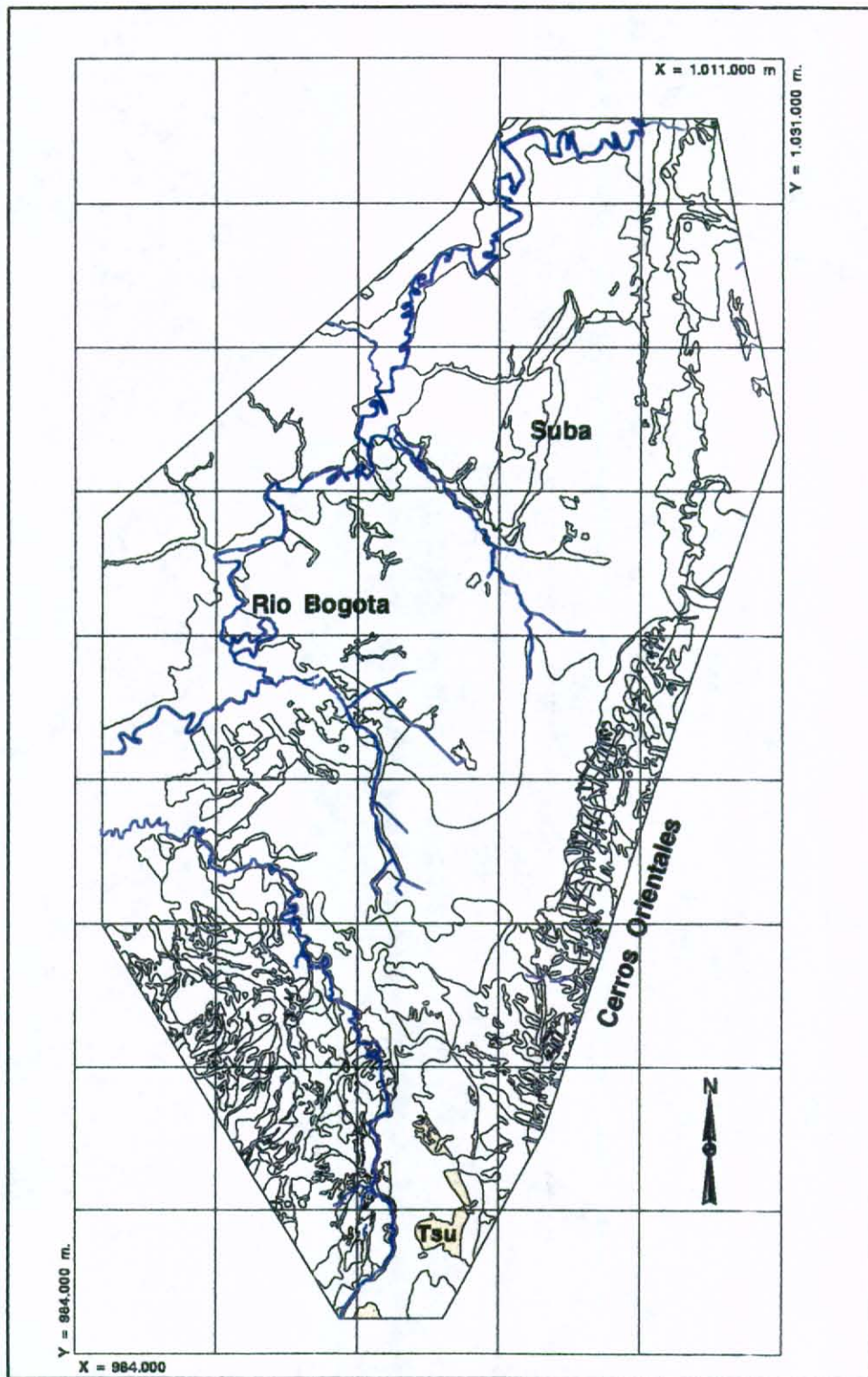


Figura 7 Localización de la Formación Usme (Tsu)

La parte de la unidad que aflora consta de limolitas y arcillolitas de color gris oscuro y amarillo rojizo cuando están meteorizadas; blandas en bancos de 4 a 20 m, con intercalaciones esporádicas de areniscas de color gris claro, cuarzosas, de grano muy fino a medio, dentro de abundante matriz arcillosa, en bancos de 2 a 6 m de espesor.

El contacto inferior es aparentemente normal de acuerdo a las observaciones de campo y se presenta un paso gradual de areniscas (Formación Regadera) a arcillolitas (Formación Usme); sin embargo algunos autores tales como (Hoorn et al, 1987) hablan de un contacto discordante entre estas dos formaciones y plantean una interrupción en la depositación entre dichas unidades. Su contacto con los depósitos más jóvenes es discordante; el espesor total de la secuencia aflorante en el área es de unos 150 m.

La secuencia inferior de esta unidad se cree que se depositó en un ambiente marino por la fauna (foraminíferos) encontrada en la parte baja de la Formación Usme. La parte superior se depositó en un ambiente deltáico, con influencia de pantanos y depósitos aluviales.

De acuerdo con dataciones palinológicas tiene una edad de Eoceno Superior-Oligoceno Inferior (Hoorn et al, 1988).

1.8. Depósitos del Terciario Superior-Cuaternario

Estos depósitos afloran hacia la parte central del área de estudio, presentando geoformas planas y aterrazadas; otros cubren parcialmente las rocas, acondicionándose a la pendiente topográfica de las diferentes unidades estratificadas y otros depósitos conforman la parte del piedemonte en forma de Conos o Abanicos.

Dentro de estos depósitos se han logrado diferenciar las siguientes unidades: Complejos de Conos o Abanicos (Qcc), Terraza Alta (Qta), Terraza Baja (Qtb),

Llanuras de Inundación (Qlla), Coluvión o Derrubios de Pendiente (Qdp), Suelo Residual (Qrs), Rellenos de Excavación (Qr) y Rellenos de Basuras (Qb).

(Figura 8)

1.8.1. Complejos de Conos o Abanicos (Qcc).

Dentro de esta unidad se agrupan: el Cono del Río Tunjuelito, el Cono de Terreros, Depósitos de Flujos Torrenciales y los Conos del piedemonte Oriental de Bogotá. La composición, la textura, el espesor y la edad, son variables; las fuentes de aporte, distancia y tipo de transporte difieren para cada depósito.

El Cono del Río Tunjuelito ha sido denominado por Helmens, (1990) como Formación Río Tunjuelito; es el depósito más importante dentro de esta unidad. Está constituido principalmente por bloques, guijarros y guijos, dentro de una matriz areno-arcillosa; los clastos son bien redondeados, indicando un transporte fluvial de gran distancia.

Este depósito aflora a lo largo del valle del río Tunjuelito, extendiéndose de sur a norte hasta los Barrios de Bosa, Class, Kennedy, Bavaria y San Rafael. Los mejores afloramientos se pueden apreciar en los cortes verticales hasta de 50 m de altura que se han ejecutado para su explotación como material de construcción en los alrededores de la Escuela de Artillería y de la Penitenciaría La Picota.

Este depósito descansa discordantemente, sobre las Formaciones Regadera y Usme, y en su parte distal se interdigita con las Terrazas Altas; su espesor puede variar entre 80 y 100 m. Se depositó en un ambiente fluvial. Dataciones palinológicas y de carbono 14, dan una edad de 50.000 años para la parte mas alta; algunos autores sugieren una edad de Plioceno Superior para la parte inferior de este depósito denominado por Helmens (1990), como Miembro Subchoque de la Formación Río Tunjuelito.

A lo largo del Río Tunjuelito un poco hacia el norte de Usme, Helmens (1990), delimitó parte de esta unidad denominándola como Formación Marichuela. Se trata

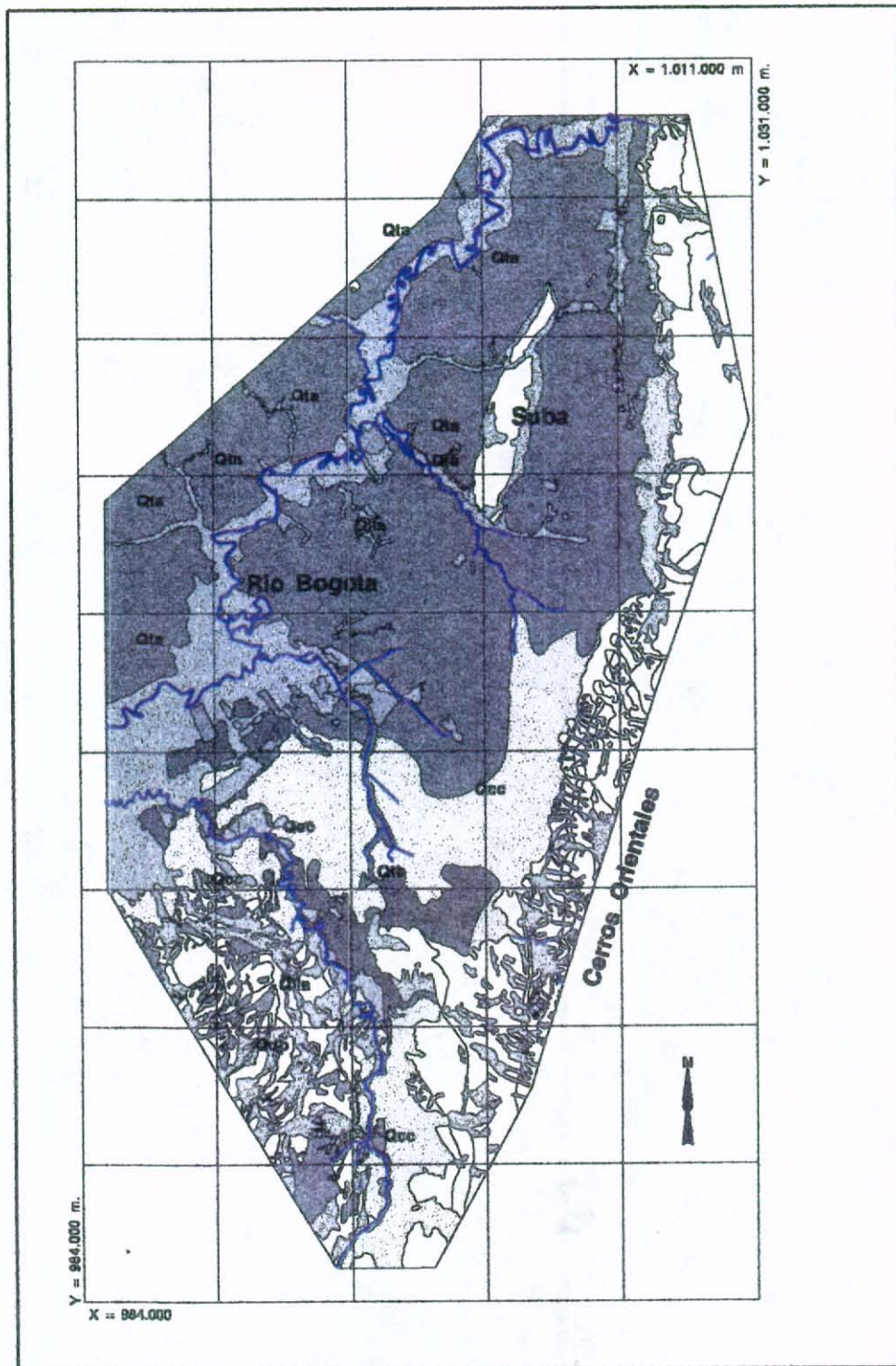


Figura 8 Localización del Terciario Superior - Cuaternario

de flujos conformados por grandes bloques angulares dentro de una matriz arenociliosa y le asigna una edad Oligoceno Inferior-Pleistoceno Inferior.

Los Conos del piedemonte Oriental pueden corresponder también en parte a antiguos flujos provenientes de un relieve inmediato (Grupo Guadalupe) ubicado hacia el oriente. Allí se destacan los conos del río San Cristóbal y del Claret.

1.8.2. Depósitos Fluvio - Lacustres (Terraza Alta, Qta)

Esta unidad ha sido denominada por varios autores de diferente manera: Hubach, (1957), la denominó Formación Sabana; Julivert (1963), como Formación Tiltatá; Helmens (1990), como Formación Sabana. En el presente trabajo se diferenció teniendo en cuenta sus características geomorfológicas como Terraza Alta.

Este depósito está constituido por arcillolitas plásticas de color gris oscuro, en capas de 0.4 a 1.0 m de espesor, con lentes de arena suelta interestratificada y con intercalaciones de cenizas volcánicas de color gris blancuzco, las cuales se acentúan hacia la parte media del depósito (de acuerdo a la columna litológica del pozo Funza II, levantada por Sarmiento, en 1989). En algunos sectores tales como en Tibaitatá abundan niveles de grava de cuarzo y chert, mal seleccionadas, mientras que en otros sectores tales como en el noreste de Cota presenta varios niveles de turbas hasta de 1 m de espesor, de acuerdo a los registros de perforaciones para pozos de agua.

Los bancos arenosos y de gravas son importantes acuíferos, de ellos se extrae agua principalmente para riego en la industria de las flores; el nivel freático dentro de esta unidad varía entre 1 y 39 m de profundidad. La mayor profundidad se registra en las zonas de influencia de los pozos de producción. El espesor total puede llegar a 320m.

El contacto con las unidades de Terraza Baja y Llanura Inundación es neto en algunos sectores y se manifiesta por un escarpe, mientras que en otros sectores existe solamente un ligero cambio de pendiente.

Esta unidad constituye el relleno más importante de la Sabana, siendo su origen lacustre y con una edad variable de 23.000 años para la parte superior (dataciones de C14) y de un millón de años para la parte inferior (dataciones en cenizas volcánicas), es decir que su depositación debió iniciarse a mediados del Pleistoceno.

1.8.3. Depósitos Fluvio - Lacustres (Terraza Baja, Qtb)

Esta unidad ha sido diferenciada por Renzoni en 1987, dentro del proyecto "Zonificación Geotécnica de Bogotá" y corresponde a depósitos originados por los ríos Bogotá, Tunjuelito, Juan Amarillo y Fucha. Presenta geoformas planas a ligeramente onduladas, muy poco disectadas, las cuales se elevan unos 5 m en promedio sobre las llanuras aluviales. Esta unidad ha sido denominada por algunos autores tales como Helmens (1990) como Formación Chía (Valle del Tunjuelo) y como Formación Sabana (Barrios Quiroga y Country Sur).

Su composición es predominante limo-arcilloso, su contacto con el Cono de Tunjuelito es neto y se marca por la presencia de un ligero escarpe, su ambiente de depósito se considera fluvial.

1.8.4. Llanura de Inundación (Qlla).

Son los depósitos más jóvenes de los ríos Bogotá, Tunjuelito y algunos de sus afluentes. Esta unidad ha sido denominada por Helmens (1990), como Formación Chía. Dentro del presente trabajo se ha diferenciado teniendo en cuenta su aspecto geomorfológico como Llanuras de Inundación.

A lo largo del río Bogotá presenta una orientación noreste-suroeste conformando una faja de un ancho variable de unos pocos metros en las cercanías de Cota, ampliándose hacia el suroeste hasta alcanzar unos 7 Km de ancho al noreste de Soacha.

Esta unidad se encuentra todavía en proceso de formación, acumulándose una apreciable cantidad de sedimentos durante inviernos acentuados, cuando la corriente ocupa su llanura de inundación.

A lo largo del valle del río Tunjuelito, aflora desde el cruce de este drenaje con la vía a Villavicencio, presentándose un ancho de unos 200 m y ampliándose hacia el noreste hasta confundirse con la llanura aluvial del río Bogotá.

Estos depósitos constan de arcillas y limos, de color gris, moteados de amarillo, con un espesor promedio de unos 5 m. Son materiales de ambiente fluvial y localmente lacustres. Por dataciones de C₁₄, se ha determinado una edad entre 9000 años y la época actual, es decir, fueron depositados durante el Holoceno.

1.8.6. Suelo Residual (Qrs).

Es el material resultante de la meteorización de las rocas y que no han sufrido transporte. Las unidades que han permitido un amplio desarrollo de estos suelos son las formaciones de composición arcillosa: Chipaque, Plaeners, Guaduas, Bogotá, Usme, Regadera y algunos suelos más antiguos.

Pueden presentar espesores hasta de 10 m en donde las rocas han sufrido una intensa erosión (cárcavas), abundan en los sectores de ciudad Bolívar y alrededores de Usme (mapa geológico).

1.8.7. Coluvión o Derrubios de Pendiente (Qdp).

Son materiales no consolidados, producto de la fracturación de las rocas estratificadas y en general del resultado de la degradación de las laderas, que se originan especialmente en zonas muy fracturadas, con alta pendiente, ayudados por la acción de la gravedad, transportados y acumulados especialmente en las partes bajas de las montañas.

Dentro del área del presente trabajo se encuentran dos tipos de depósitos de esta clase: coluviones, donde existe predominio de matriz fina sobre material grueso, y talus donde (predomina el material grueso).

Los depósitos provenientes de unidades arenosas tales como la Arenisca Dura, Labor-Tierna, conjunto arenoso de la Formación Guaduas, Cacho y parte inferior de la Regadera son principalmente talus; se presentan a lo largo del piedemonte oriental, en cañadas de las laderas de los Cerros Orientales y Suroccidentales. Los coluviones provienen principalmente de las Formaciones Chipaque, Guaduas, Bogotá, Regadera y Usme; este tipo de depósitos presenta espesores muy variables, los cuales oscilan desde pocos centímetros (piedemonte de los cerros de suba) hasta algunos metros (cerros orientales y suroccidentales).

1.8.8. Depósitos de Rellenos de Excavación (Qr).

Se localizan en zonas bajas o pantanosas y provienen de excavaciones para urbanizaciones; pueden alcanzar hasta 5 m de espesor, algunos de estos materiales los han compactado y los han utilizado para cimentar urbanizaciones. Abundan en la margen izquierda del río Bogotá, en sectores aledaños a los aeropuertos de El Dorado y Guaimaral, y al norte de Bosa.

1.8.9. Rellenos de Basura (Qb).

Están conformados por los desechos sólidos, que produce la Capital y que se han depositado en zonas relativamente impermeables, previa excavación y acondicionamiento. Los principales rellenos sanitarios o de basuras son: el cortijo, ubicado al occidente de La Capital; Gibraltar, Santa Cecilia, y Doña Juana en el sur de Santafé de Bogotá (mapa geológico).

Capítulo 2

Geología Estructural

Estructuralmente el área del presente trabajo se puede dividir en dos grandes bloques: un bloque norte, delimitado en su extremo sur por la falla de Usaquén-Sasaima (Gómez, 1991), el cual se caracteriza por presentar en su sector oriental el anticlinal de Bogotá-Usaquén con orientación noreste y cabeceo hacia el norte, con sus flancos en posición normal, y pliegues menores anticlinales y sinclinales (corte A-A'). Esta estructura es cortada transversalmente por las fallas de Usaquén-Sasaima, Torca, La Floresta y Novita. La falla de Usaquén-Sasaima presenta un desplazamiento dextral y también en la vertical donde el bloque norte a subido. Esta falla estaría controlando el curso del río Juan Amarillo, limitando por su parte sur las estructuras de plegamiento (sinclinal y anticlinal) que conforman los Cerros de Suba. Se considera que entre los Cerros de Suba y los Cerros Orientales debe existir una estructura sinclinal (Sinclinal de Bogotá; Mclaughlin, 1975; Lobo-Guerrero, 1992), el cual continua hacia el Norte fuera del área de estudio o afectada por las fallas inversas de Bogotá y Alto El Cabo, las cuales están enmascaradas en superficie por Depósitos Cuaternarios (Terrazas y Conos).

El bloque sur está delimitado al norte por la falla de Usaquén-Sasaima; hacia el sur continúa fuera del área de estudio, y corresponde al sinclinal de Usme-Tunjuelito en su parte central, al anticlinal de Bogotá en su sector oriental y al anticlinal de Cheba en el sector occidental.

El bloque sur es afectado en su sector oriental (cerros orientales) por las fallas de cabalgamiento de Bogotá y del Alto El Cabo, cuyos planos buzcan hacia el oriente (cortes geológicos).

La falla de Bogotá delimita formaciones del Cretáceo con unidades del terciario. La falla del Alto El cabo afecta al anticlinal de Bogotá-Usaquén a lo largo de su eje. La estructura anticlinal y las fallas de Bogotá y Alto El cabo son cortadas por la falla sinistral de Santa Bárbara. Los estratos aflorantes en este sector de unidades del cretáceo como también del terciario suelen presentar frecuentes inversiones.

El flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelito o flanco oriental del anticlinal de Cheba se encuentra afectado por una tectónica muy intensa, destacándose la falla de cabalgamiento de Mochuelo, cuyo plano buza hacia el occidente; hacia el occidente del Barrio Meisen pone en contacto estratos de la Formación Regadera con rocas de la Formación Guaduas, es decir falta la secuencia de la Formación Bogotá, cuyo espesor supera los 1500 m. Dentro de este flanco y al occidente de la fractura de Mochuelo se presentan fallas inversas, con su plano buzando hacia el occidente, entre las que se tienen las fallas de Limas, Terreros y Calderón. Estas fracturas hacen que se repitan las unidades y en especial la Formación Plaeners (ver corte B,B'B"). Estos pliegues y fallas son afectados por fallas transversales de poco desplazamiento en la vertical.

Las estructuras descritas dentro de bloque sur al entrar al sector plano de la Sabana son cubiertas por sedimentos cuaternarios pertenecientes a las unidades de conos y terrazas. Los conos en algunos sectores tales como a lo largo de la vía a Villavicencio suelen presentarse afectados por fallas y diaclasas, las cuales presentan una orientación NE-SW. Es posible que algunas de estas fracturas hayan ocurrido a comienzos del cuaternario.

Capítulo 3

Evolución Geológica

La evolución geológica del área de estudio se enmarca dentro de la historia geológica de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, constituida en el área de estudio por rocas sedimentarias de composición variada, y cuyas edades oscilan entre el cretáceo inferior y el reciente.

La acumulación de los sedimentos que conforman en su gran parte la Cordillera Oriental en el área de la Sabana de Bogotá, se depositaron en una cuenca Miogeosinclinal desde el Cretácico Inferior hasta el Maestrichtiano Medio, sobre un basamento complejo de rocas metamórficas y sedimentarias pertenecientes al Paleozóico y Mesozóico inferior, que constituían la incipiente Cordillera Oriental. Estos materiales cretácicos en la parte central de la cordillera alcanzaron espesores mayores de 12.000 m (Burgl, 1966).

En el lapso comprendido entre el Maestrichtiano Medio y Paleoceno Inferior, en la provincia Oriental de los Andes Colombianos se presentan movimientos tectónico-orogénicos donde la cordillera es emergida y por lo tanto cambiando rápidamente de condiciones marinas a un ambiente lagunar y lacustre, donde se acumularon apreciables cantidades de materia orgánica, las cuales dieron origen a importantes mantos de carbón dentro de los sedimentos de la Formación Guaduas.

Como consecuencia de las anteriores condiciones tectónicas se presenta entre el Paleoceno Medio-Eoceno inferior una etapa de regresión muy intensa, donde la cordillera es emergida, originando un sedimentos fluviales de grano grueso y conglomerático que conforman las Formaciones Cacho y Bogotá.

En los principios del Eoceno Medio los movimientos orogénicos son más fuertes y prolongados, los cuales traen como consecuencia la depositación de areniscas de grano grueso hasta conglomeráticas de la Formación Arenisca La Regadera (Van der Hammen, 1960). Estos movimientos del eoceno medio, son reducidos durante el Eoceno Superior-Oligoceno Inferior, donde las facies son más arcillosas, como lo demuestran los sedimentos de la Formación Usme. La tranquilidad tectónica continúa en el Oligoceno Medio, siendo interrumpida a finales del mismo reanudándose movimientos tectónico-orogénicos de gran importancia, los cuales propician un levantamiento considerable de la Cordillera Oriental y la terminación de la sedimentación cretácea-terciaria en esta región.

En el intervalo oligoceno Superior-Mioceno Superior se presentan importantes fases de plegamiento y fallamiento en los sedimentos Cretáceo-Terciarios de la cordillera Oriental, dando origen a pliegues (sinclinales y anticlinales) importantes, en parte ya presentes como proto-sinclinales y proto-anticlinales desde épocas anteriores (Van der Hammen, 1960; Irving, 1971). Como consecuencia de las fases de compresión intensas durante este intervalo, tienen lugar en los comienzos del mioceno superior lo que es considerado por algunos autores como Orogenia Andina; se presentan fallas importantes con desplazamientos hasta de 5.000 m (Burgl, 1961 y 1966), dando origen al levantamiento y cabalgamiento de la cordillera sobre la región oriental (Llanos Orientales) y occidental (Valle del Magdalena) y por consiguiente la conformación de cuencas (cuenca del Magdalena), las cuales fueron rellenadas por sedimentos de tipo molásico. Las deformaciones compresivas principales en su fase de plegamiento más intensa terminan a finales del Mioceno (Van der Hammen, 1960; Helmens, 1990).

Como consecuencia de la fase de plegamiento anterior se deduce la presencia en el área de sistemas de cordilleras y colinas bajas tanto al este como al oeste de la actual Sabana de Bogotá, las cuales conforman un complejo sinclinorio con una orientación aproximada N-S a NE-SW (Van der Hammen, 1960 y 1973; Irving, 1971).

En el intervalo Mioceno Superior-Plioceno Inferior y en un ambiente sedimentario que no está relacionado con la topografía actual, fueron depositados en los sectores perimetrales del área de la actual Sabana de Bogotá, en especial en el sector sureste del área (parte media-alta de la cuenca del hoy río Tunjuelito), sedimentos fluviales del Complejo de Conos (Formación Marichuela); mientras que en los sectores oeste y suroeste, se depositan los sedimentos correspondientes a la Formación Tilatá Inferior, (Helmens, 1990).

En el Plioceno Medio-Superior se presenta el levantamiento final de la cordillera oriental, el cual tuvo su máxima entre 5 y 3 millones de años; la tasa de levantamiento para la altiplanicie de Bogotá puede haber sido entre 1 y 5 mm por año (Van der Hammen, 1973; Helmens, 1990).

Como resultado de la anterior fase de movimientos tectónico-orogénicos se origina el desarrollo de la cuenca sedimentaria de la actual Sabana de Bogotá, la cual se inicia alrededor de hace 3.5 millones de años. En consecuencia, las condiciones de sedimentación de las partes marginales de la cuenca, fueron gradualmente trasladadas a la parte central, y dentro de un ambiente lacustre-fluvial se depositaron en el Plioceno Superior-Pleistoceno Inferior los sedimentos de la Formación Tilatá Superior. Durante el Pleistoceno Inferior hubo un desarrollo gradual de la cuenca que da como resultado la configuración actual de la misma y dentro del mismo ambiente o complejo lacustre-fluvial, se depositan los sedimentos de la Formación Subachoque.

La sedimentación en el Pleistoceno estuvo influenciada notablemente por las condiciones de las secuencias glaciales e interglaciales presentes en las montañas circundantes a la Sabana. La iniciación de las glaciaciones tuvo lugar entre 2.7-2.4 millones de años, (límite Plioceno-Pleistoceno). Una importante fase de reajustamiento tectónico de la cuenca de la Sabana de Bogotá, que resultó en un ambiente lacustre de mayor profundidad (transición Formaciones Subachoque-Sabana), tuvo lugar alrededor de la hace 1 millón de años. Durante el Pleistoceno Medio y Superior el área correspondiente a lo que hoy es la parte central de la Sabana, fué por mucho tiempo ocupada por un gran lago, el cual originó la depositación de los sedimentos de las Terrazas Altas.

En los períodos seguidos y con la influencia de las condiciones de alternancia glacial e interglacial en los alrededores montañosos (Páramo de Sumapaz), se depositaron localmente en la región sureste (parte media-inferior, cuenca río Tunjuelito), los sedimentos fluvio-glaciales que conforman el cono de Tunjuelito.

Durante la parte superior de la última glaciación, un marcado descenso del nivel de las aguas de la gran laguna de la Sabana, que finalmente llevó a su desaparición, fue datada entre alrededor de 40.000 y 28.000 años.

En cuanto al desarrollo glacial se tiene que en el intervalo comprendido entre los 22.500 y los 14.000 años, se originaron en las altas montañosas o cordilleras de los alrededores de la Sabana sistemas morrénicos, de los cuales se distinguieron 4 complejos de morrenas: El más antiguo, complejo 1, puede tener una edad pleniglacial medio (del último glacial); Los Complejos 2 y 3, fueron formados durante el muy frío estadal de Fúquene temprano-tardío, entre cerca de 22.500-19.500 años (complejo 2) y entre cerca de 18.000-14.000 años (complejo 3); el complejo más nuevo de morrenas 4, fue formado durante el relativamente frío estadal de la Ciega (cerca de 13.000-12.400 años) (Helmens, 1990).

Durante los últimos 10.000 años (desde Holoceno) de tiempo geológico se llegó a la colmatación final de los lagos de la Sabana y al proceso de desecación de los mismos, en el cual ríos que la cruzaron depositaron arcillas de inundación (Llanuras Aluviales), mientras que desde aproximadamente 3000 años, probablemente inducidos por la acción antrópica (deforestación), localmente fueron depositados sedimentos limosos correspondientes a las Llanuras Aluviales (Formación Chía; Helmens 1990).

Como fuentes complementarias a la información litológica, geomorfológica y bioestratigráfica (palinológica) de la secuencia estratigráfica que conforma los sedimentos del terciario superior y cuaternario, se pueden añadir elementos importantes como son las dataciones de paleosuelos por carbono 14 y radiométricos (huellas de fisión) de capas delgadas de cenizas volcánicas, intercaladas en algunas unidades. Es así como muestras de ceniza volcánica

proveniente del intervalo 38 a 43,5 m de profundidad del pozo de Funza han sido datadas (método fisión Tracks), obteniéndose una edad de 0,5 millones de años, (Van der Hammen, 1978, en Dueñas H, 1980); igualmente, de muestras del mismo material, obtenidas a una profundidad de 184 m se obtuvo una edad aproximada de 1,91 m.a.

Referencias

ANGEL, C., 1988- *Estudio Hidrogeológico de las Zonas de Soacha y Ciudad Bolívar*. INGEOMINAS- E.A.A.B., Bogotá.

BURGL, H., 1957.- *Bioestratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores*. Serv. Geol. Nat. Bol. Geol. Vol.V, No.2. Bogotá.

BURGL, H., 1961.- *Historia Geológica de Colombia*. Rev. Acad. Colombiana Cienc. Exact., Fis, Nat., 11; 137-191.

BURGL, H., 1966.- *The Orogenesis in the Andean System of Colombia*. Tectonophysics, 4(4-6). Bogotá.

CARO, P. y GARCIA, J., 1988.- *Zonificación Geotécnica del Distrito Especial de Bogotá*. INGEOMINAS D.A.P.D, Bogotá.

DUEÑAS, H., 1980.- *Palinología de los sedimentos Pliocénicos y Cuaternarios de la Sabana de Bogotá*. Geología Norandina No 2. Bogotá.

FANDIÑO, E., 1967.- *Compilación de las perforaciones realizadas en el área de la Sabana de Bogotá*. INGEOMINAS. Informe 1533.

GOMEZ, M. H., 1985.- *Principales Rasgos Estructurales al Suroccidente de la Sabana de Bogotá*. Revista CIAF, Vol.10, Bogotá.

GOMEZ, M. H., 1991.- *La Paleomegacizalla Transversal de Colombia, Base de un nuevo Esquema Geotectónico*. Revista CIAF, Vol 12, Bogotá.

HELMENS, K., 1990.- *Neogene-Quaternary Geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombiana*. Berlin. Stuttgart. 1990.

HETTNER, H., 1892.- *La Cordillera de Bogotá, resultados de viajes y estudios.* Primera Versión Castellana de E. GUHL, edición del Banco de la Republica, Bogotá.

HOORN, C., et al, 1987.- *Tertiary Sediments of the Usme Valley, Colombia: A palynological and stratigraphical Aproach.* Bogotá, Colombia.

HUBACH, E., 1957.- *Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores.* Serv.Geol.Nal, Bol. Geol. Vol.5. Bogotá.

IRVING, E., 1971.- *La Evolución Estructural de Los Andes más Septentrionales de Colombia.* INGEOMINAS Bol. Geol. Vol. XIX, Bogotá.

JULIVERT, M., 1951.- *Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá.* Bol. Geol. Bucaramanga. Colombia.

JULIVERT, M. 1963 a.- *Rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación estructural* Bol.Geol.U1S, No 13-14, Bucaramanga, Colombia.

JULIVERT, M., 1963 a.- *Rasgos tectónicos de la Región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de la formación de las estructuras* Bol. Geol, U1S, No. 11. Bucaramanga, Colombia.

LOBO-GUERRERO, A., 1992.- *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana.* VII Jornadas Geotecnicas de la Ingeniería de Colombia; Bogotá.

Mc LAUGHLINI, Jr y ARCE, M., 1975.- *Mapa geológico del cuadrangulo Zipaquirá (K-11);* INGEOMINAS, Bogotá.

PEREZ, G., Y SALAZAR, A., 1971.- *Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe.* Geol.Colombiana. No. 10, U.N. Bogotá

RENZONI, G., 1968.- *Geología del Macizo de Quetame*; Geología. Colombiana No 5, Bogotá.

SARMIENTO, G., 1989.- *Perforación Estratigráfica del pozo Funza-II*. Reporte Interno. INGEOMINAS. Bogotá

SARMIENTO, G., 1994.- *Estratigrafía, Palinología y Paleoecología de la Formación Guaduas*. Cap 4, Publicación Especial, INGEOMINAS. Bogotá.

SGHEIBE, R., 1943.- *Observaciones casuales sobre la estructura geológica de la Cordillera Oriental*. Comp. Est. Geol. Bogotá, Colombia.

UJUETA, G., 1961.- *Geología del Noreste de Bogotá*. Serv. Geol. Nal. Bol. Geol. Vol IX; Bogotá.

VAN der HAMMEN, T., 1960.- *Estratigrafía del Terciario y Maestrichtiano Continentales y Tectogénicos de los Andes Colombianos*. Serv. Geol. Nal. Bol. Geol, N.6. Bogotá Colombia.

VAN der HAMMEN, Th., et al, 1973.- *Palynological Record of the Upheaval of the Northern Andes: a study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian eastern cordillera and the early evolution of its High-Andean biota*. Paleobot. Palynol. El Cuaternario de Colombia, vol. 2, Bogotá

de l

y y Quir

IN

ANEXO FOTOGRAFICO

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10



Foto 1. Sector de Guaymaral. Excavación para construcción. Obsérvese dos horizontes oscuros (correspondientes a suelos, separados por un nivel de color amarillo limo-arcilloso de la Terraza Alta).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 2. Relleno de material de excavación y demolición a unos 600 m al S de donde parte la vía a Guaymaral, por el costado occidental de la Autopista Norte.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 3. Cantera El Cedro arriba de la carrera 7 con calle 160. Esta cantera inicialmente presentaba un gran deslizamiento en su parte alta la cual tiene taludes de corte verticales, se han venido perfilando durante su explotación, sin embargo todavía existe amenaza por deslizamiento.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 4. Cantera El Bohío, calle 162 con cra. 7ª. Nótese la amenaza que existe por caída de bloques y aporte de sedimentos para las redes de drenaje. Este problema es común en esta zona de los orientales



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 5. Sector de la cantera El Codito. Nótese El impacto ambiental (modificación del medio físico) po la explotación de material para construcción, con cortes verticales.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 6. Contacto entre la Terraza Alta (sector plano) y los depósitos de piedemonte (coluvión) dado por un ligero cambio de pendiente en el sector de Torca-Francia, abajo de la carretera 7a.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 7. Cantera ubicada sobre la Cra 7a frente al colegio El Rosario Campestre. Nótese los cortes verticales, causando un notable impacto en el medio físico.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 8. Valle de La Quebrada Novita. Nótese el contraste morfológico entre el macizo rocoso y el cono aluvial ubicado en la parte central del Valle.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 9. Sector Altos de Torca. Nótese un afloramiento de lalitas (Formación Plaeners) buzando unos 60° en sentido de la pendiente.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 10. Sector de San José de Guauza al N del área de estudio. Nótese el macizo rocoso (Formación Labor-Tierna), un cono aluvial (parte media e inferior de la foto).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 11. Sector de San José de Guauza. Nótese que parte de los Cerros Orientales están siendo intervenidos para urbanizaciones, afectando la flora nativa.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 12. Sector de Fusca, arriba de la cra 7^a. Nótese que los Cerros Orientales están siendo intervenidos para urbanizaciones, afectando su flora nativa. Hacia la derecha las canteras de Trabajos Urbanos y Villa Escocia.



PROYECTO

MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO

MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE BOGOTA



Foto 13. Urbanización altos de Torca en los Cerros Orientales; la excavación para la vía se ha efectuado en estratos de la Formación Plaeners.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 14. Cantera ubicada arriba de la Cra 7ª frente a Nimaya. Obsérvese el corte vertical de excavación y el impacto físico en este sector de los Cerros Orientales.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 15. Coluvión de más de 20 m de espesor cubriendo a estratos de la Formación Plaeners, en la cantera de Terreros.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 16. Expresión morfológica de la Falla de Sucre al SW de la cantera de Terreros. En la Parte superior La Arenisca Dura con estratos invertidos. Hacia la parte inferior la Formación Plaeners en posición normal.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 17. Estructura sinclinal o pliegue por la vía Bogotá-La Calera.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 18. Sector NW de la Represa de Terreros. Nótese el intenso Carcavamiento que afecta a esta zona y el embalse cubierto por vegetación.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 19. Contacto fallado entre las Formaciones Guaduas y Plaeners (parte derecha de la foto) al N de la Represa de Terreros.



PROYECTO

**MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE
BOGOTA**

ANEXO FOTOGRAFICO

**MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA**



Foto 20. Ciudadela Sucre al SW de la represa de Terreros. La morfología suave corresponde a la Formación plaenens. Hacia la parte central derecha el cono de Terreros y hacia la parte superior La Terraza Alta.



PROYECTO

**MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE
BOGOTA**

ANEXO FOTOGRAFICO

**MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA**



Foto 21. Afloramiento de la Formación Plaeners en la Ciudadela Sucre. Obsérvese que las construcciones se efectuaron sobre una pendiente estructural.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 22. Cantera ubicada en la zona de Falla de Sucre. La excavación se efectuó dentro de la Arenisca Dura, al SW de la represa de Terrenos.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 23. Contacto fallado entre la Arenisca Dura (zona escarpada y con vegetación) y la Formación Plaeners (parte inferior de la foto).



PROYECTO

**MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA**

ANEXO FOTOGRAFICO

**MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA**



Foto 24. Parte superior de la foto, la expresión morfológica de la falla de Bogotá; parte central el Cono de Tunjuelo y parte inferior el relleno Sanitario Doña Juana.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 25. Cerro de la Repetidora: En la parte central y superior la Formación Arenisca Dura abrupta. La parte media la Formación Plaeners y hacia la parte inferior suelos residuales.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 26. Contraste morfológico entre las Formaciones La Regadera (escarpada) y Bogotá (ligeramente ondulada).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 27. Sinclinal de Usme-Tunjuelito



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 28. Textura del depósito fluvioglacial del Cono de Tunjuelo, ligeramente inclinado hacia el norte (15°). Afloramiento por la vía La Aurora-Usme.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 29. Afloramiento de la Formación Regadera en la margen izquierda del río Tunjuelito por la vía a Pasquilla, al S del área de estudio.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 30. Relleno Sanitario de Doña Juana dentro de la Formación Bogotá. La loma del sector derecho corresponde a la Formación Regadera. Hacia el centro de la foto se aprecia el Valle del sinclinal Usme-Tunjuelito.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 31. Expresión morfológica de la Formación Regadera constituida por alternancia de niveles arenosos resistentes y arcillosos blandos, en el flanco occidental del sinclinal de Usme-Tunjuelito.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 32. Contacto fallado (Falla de Mochuelo) entre las Formaciones Arenisca Dura y Plaeners con la Formación Bogotá



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 33. En la parte central y superior de la foto se aprecia la ciudad de Bogotá vista desde la Escuela de Quiba Baja. Parte intermedia unas lomas con escarpes y cantera dentro de la Formación Labor-Tierna. Parte inferior la Formación Plaeners de morfología suave.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 34. Parte SW del área de estudio. Parte superior Barrio Simón Bolívar, construido en gran parte sobre antiguas canteras. En la parte media de la foto se denota el cono de Terreros, ligeramente inclinado hacia el SW.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 35. Canteras en la Formación Guaduas hacia el NW de la represa de Terreros.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 36. Espejos de falla del Alto El Cabo por la vía Bogotá-Choachi (Km 6+190 m, contados a partir de La Circunvalar), con una orientación N20E/34NW, en areniscas.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 37. Expresión morfológica de la Formación Cacho, en el sector de carrera 7E con calle 1B. Nótese la presencia de dos conjuntos arenosos y duros, separados por un conjunto arcilloso blando constituyendo una depresión.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 38. Falla de Bogotá, poniendo en contacto a la Formación Arenisca Dura (Ksgd) en la parte superior de la foto con el conjunto arenoso de la Formación Guaduas (parte inferior de la foto), en el sector Barrio El Dorado.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 39. Expresión morfológica de la Falla de Bogotá. En la parte superior de la foto la Formación Arenisca Dura (Ksgd) en la depresión del conjunto arcilloso de la formación Guaduas (Ktg) y hacia la parte inferior izquierda del valle del río San Cristobal.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 40. Expresión morfológica de las formaciones Labor-Tierna y Guaduas en el sector de La Caro. Hacia la parte inferior de la foto un cono aluvial.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 41. Panorámica que muestra la terraza alta, la llanura aluvial del río Bogotá y rocas del grupo Guadalupe, entre las localidades de Cota-Chia, al W de la Autopista Norte.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 42. La parte central de la foto se puede observar la Ciudad de Bogotá, vista desde la carretera Bogotá -Choachi; hacia la parte inferior la arenisca dura en posición invertida (margen derecha del Cañón San Francisco).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA



Foto 43. Expresión morfológica de la falla el Alto el Cabo.



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA

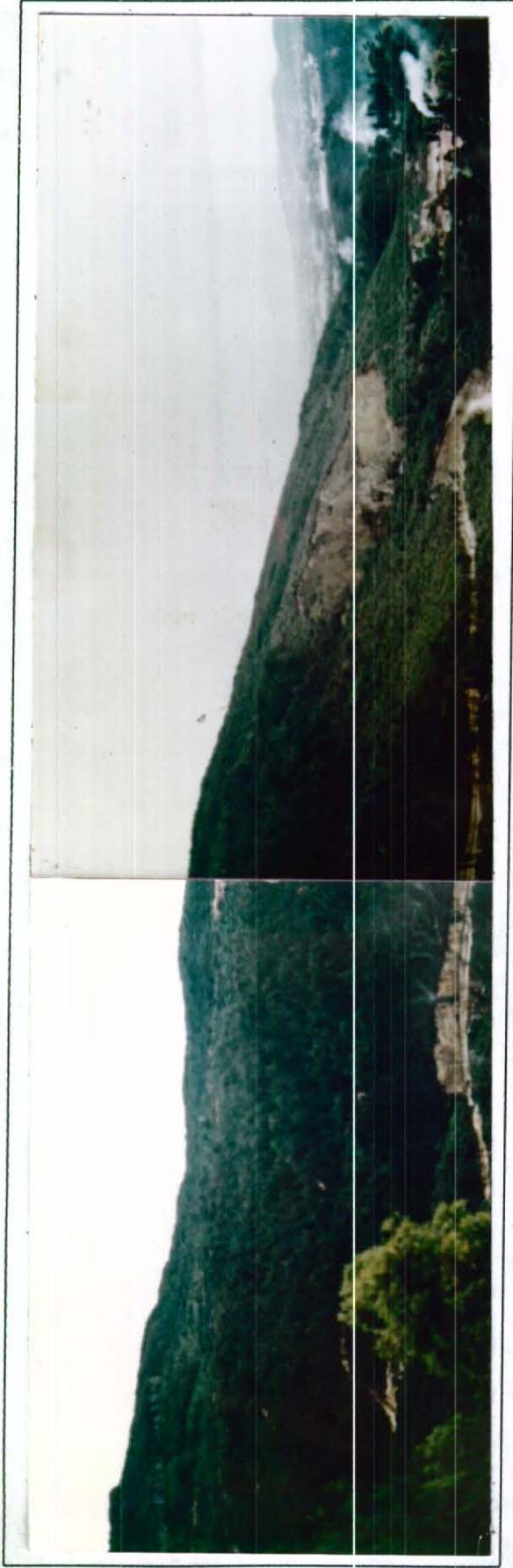


Foto 44. Expresión morfológica de la Formación Plaeners en el sector de Fusca constituyendo el núcleo de un anticlinal. Nótese que este sector de los Cerros Orientales es intervenido para urbanizaciones y explotación de materiales de construcción.



PROYECTO

MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO

MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE BOGOTA



Foto 45. Expresión morfológica del núcleo del Anticlinal de Bogotá. La parte superior de topografía abrupta corresponde a la Formación Arenisca Dura, donde se localiza el cerro de Guadalupe (esquina derecha de la Foto). La parte central e izquierda de topografía ondulada corresponde a la formación Chipaque (Carretera Bogotá- Choachi).



PROYECTO

MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTA FE DE
BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO

MAPA GEOLOGICO DE SANTA FE DE
BOGOTA



Foto 46. Expresión morfológica de las Formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Guaduas (Tkg), Cacho (Tpc) y Bogotá (Tpb), en el sector comprendido entre La Torre de Telecom y los Barrios La Victoria y San Isidro.



PROYECTO

MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO

MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE BOGOTA



Foto 47. Núcleo del Anticlinal de Bogotá visto por la carretera Bogotá-Choachi (Km6+ 615 m, contado apartir de La Circunvalar). El núcleo de esta estructura lo constituyen lutitas negras con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano muy fino).



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE
SANTAFE DE BOGOTA

ANEXO FOTOGRAFICO
MAPA GEOLOGICO DE SANTAFE DE
BOGOTA

OPES



CONVENIO 01 - 93

OFICINA PARA LA PREVENCION DE EMERGENCIAS - OPES -

*DIRECCION NACIONAL PARA LA PREVENCION Y ATENCION DE
DESASTRES - DNPAD -*

*INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN GEOCIENCIAS, MINERIA Y
QUIMICA - INGEOMINAS*

*PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA*

*SUBPROYECTO No 7
ESTUDIOS GEOFISICOS
(Informe Definitivo)*

E 98,7

INGEOMINAS

*Santafé de Bogotá, Colombia
Junio de 1996*

**Instituto de investigaciones en Geociencias, Minería y
Química**

INGEOMINAS

**Proyecto de Microzonificación Sísmica de
Santafé de Bogotá**

Subproyecto No. 7

Estudios Geofísicos

Junio de 1996

INTRODUCCIÓN

Capítulo 1. ESTUDIOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

1.1 METODOLOGÍA

1.1.1 Toma de datos de campo

1.1.2 Procesamiento de los datos

1.1.3 Interpretación de resultados

1.1.4 Secciones y mapas geoelectricos

1.1.4.1 Zona plana

1.1.4.2 Zona cerros Orientales

1.1.5 Correlación de los resultados con registros geofísicos de pozos y sondeos mecánicos

Capítulo 2. ESTUDIOS GRAVIMÉTRICOS

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1 Marco teórico

2.1.2 Hipótesis de trabajo

2.1.3 Levantamiento de campo

2.1.4 Procesamiento de los datos

2.1.4.1 Ajuste de la red de bases gravimétricas

2.1.4.2 Cálculo de diferencia de gravedad entre bases

2.1.4.3 Cálculo de la gravedad observada para las bases
gravimétricas

2.1.4.4 Cálculo de la gravedad observada para las estaciones

2.1.4.5 Cálculo de la gravedad teórica

2.1.4.6 Correcciones gravimétricas

2.1.4.7 Cálculo de la anomalía de Bouguer total

2.2 MAPAS GRAVIMÉTRICOS

2.2.1 Mapa de gravedad observada

2.2.2 Mapa de anomalía de Bouguer total

2.2.3 Mapa de anomalía de Bouguer residual

ESTUDIOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

En la programación inicial del proyecto se tenía contemplado la realización de 50 Sondeos Eléctricos Verticales, (SEV), en el perímetro urbano de Santafé de Bogotá. No obstante, se aprovechó la información adicional de Sondeos eléctricos Verticales realizados por otros proyectos en el mismo área de estudio, para un total final de 130 SEV. Estas mediciones se efectuaron en la gran mayoría de parques y zonas verdes de la ciudad sobre una topografía en su mayoría plana.

El método de resistividad eléctrica consiste fundamentalmente en estudiar las variaciones, en el subsuelo, de la propiedad física conocida como resistividad eléctrica, la cual es el inverso de la conductividad eléctrica. La resistividad eléctrica es la propiedad que poseen los diferentes tipos de materiales, artificiales o naturales, de oponerse al flujo de la corriente eléctrica en presencia de un campo eléctrico en cualquiera de las direcciones x, y, z. A través de los contrastes en los valores obtenidos es posible diferenciar distintas clases de materiales existentes en el subsuelo.

1.1 Metodología.

Para la consecución de los objetivos propuestos se empleó la técnica del Sondeo Eléctrico Vertical, el cual consiste en hacer varias mediciones de la resistividad eléctrica bajo un punto dado y establecer su variación en profundidad.

1.1.1 Toma de datos de campo.

Para la toma de los datos se utilizó equipo de resistividad eléctrica marca OYO; el arreglo de electrodos utilizado fue tipo Schlumberger. La apertura promedio de $AB/2$ fue de 100 m, hasta un máximo de 600 m.

La escogencia de los sitios para la realización de los SEV estuvo condicionada por la disponibilidad de espacio y el ruido causado por la presencia de líneas de alta tensión. Por lo anterior, el número de SEV por km^2 resultó bastante irregular.

En la Figura 2, se observa la localización de SEV realizados.

1.1.2. Procesamiento de los datos.

El procesamiento de los datos se realizó con la ayuda del programa Resix Plus de la Interpex Ltda, el cual está basado en la metodología de "aproximaciones sucesivas". Esta metodología consiste en comparar las curvas de campo con curvas sintéticas generadas a partir de modelos hipotéticos. Esta comparación se realiza hasta cuando las curvas de campo y las sintéticas alcanzan un grado de ajuste pre-determinado.

Con todos los valores procesados se establecieron relaciones entre los diferentes puntos de observación mediante la elaboración de perfiles y mapas, para poder analizar la variación de la resistividad del subsuelo tanto lateralmente como en profundidad.

2.3 INTERPRETACIÓN

Capítulo 3. ESTUDIOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 Adquisición de los datos sísmicos

3.1.2 Procesamiento de los datos de refracción sísmica

3.1.3 Resultados del procesamiento de los datos sísmicos

3.2 INTERPRETACIÓN

3.2.1 Interpretación de las líneas de reflexión sísmica

3.2.2 Interpretación de las líneas de refracción sísmica

Capítulo 4. MODELO GEOLÓGICO-GEOFÍSICO

4.1 INTERPRETACIÓN CONJUNTA DE LOS MAPAS DE ANOMALÍA RESIDUAL, TOPOGRÁFICO Y GEOLÓGICO.

4.2 MODELAMIENTO EN 2D

4.3 MAPA DE LA PROFUNDIDAD DEL TECHO DE LA ROCA

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

5.2 RECOMENDACIONES

Bibliografía

Lista de Figuras

- Figura No. 1 Mapa de Localización del área de los estudios geofísicos
- Figura No. 2 Mapa de localización de Sondeos y perfiles geoelectricos
- Figura No. 3 Perfiles geoelectricos Sector Norte
- Figura No. 4 Perfiles geoelectricos sectores Norte y Centro
- Figura No. 5 Perfiles geoelectricos sectores Sur y Occidente
- Figura No. 6 Mapa de de la profundidad de la interface sedimentos - roca
- Figura No. 7 Mapa al techo de la roca
- Figura No. 8 Perfil geoelectrico zona del Bosque de Medina
- Figura No. 9 Perfil geoelectrico zona del Rosal
- Figura No. 10 Perfil geoelectrico zona del Bosque Calderón
- Figura No. 11 Perfil geoelectrico zona del Parque Nacional
- Figura No. 12 Perfil geoelectrico zona Escuela de Moralva
- Figura No. 13 Mapa de ubicación de estaciones gravimétricas
- Figura No. 14 Curva de calibración por deriva para el gravimetro Scintrex CG3
- Figura No. 15 Red de bases gravimétricas
- Figura No. 16 Mapa de gravedad Observada
- Figura No. 17 Mapa de anomalía de Bouguer total
- Figura No. 18 Mapa de Anomalía Residual
- Figura No. 19 Mapa de anomalía de Bouguer Residual, con efecto de sombra, iluminado con fuente ubicada con azimut 270° e inclinación 30° .
- Figura No. 20 Mapa de Anomalía de Bouguer Residual, con efecto de sombra, iluminado con azimut 20° e inclinación 30° .
- Figura No. 21 Mapa de Gradiente Horizontal
- Figura No. 22 Mapa de ubicación de líneas sísmicas

- Figura No. 23 Diagrama de flujo del procesamiento de los datos de refracción sísmica
- Figura No. 24 Línea de reflexión sísmica J-78-08
- Figura No. 25 Columnas sísmicas generalizadas
- Figura No. 26 Modelo Geológico-Geofísico Calle 170
- Figura No. 27 Modelo Geológico-Geofísico Ingeominas-Funza
- Figura No. 28 Mapa de la profundidad del techo de la roca

Tablas

Tabla N. 1 Variaciones de la resistividad con la profundidad en algunos sondeos geotécnicos.

Tabla No. 2 Estaciones de Calibración

Tabla No. 3 Bases de amarre del presente estudio gravimétrico a la línea CM10 y al estudio gravimétrico realizado por Pérez, C. R. 1988.

Tabla No. 4 Especificaciones de la estación MGLS-1967, Obsevatorio Astronómico Universidad Nacional.

Tabla No. 5 Especificaciones de las estaciones base del presente estudio.

Tabla No. 6 Principales anomalías gravimétricas

Tabla No. 7 Sectores de toma de datos de refracción sísmica

Tabla No. 8 Valores medidos de V_p , V_s y V_s/V_p .

Anexos

- Anexo 1: Lecturas, cierres y gravedad observada
- Anexo 2: Longitud, latitud, altura, gravedad teórica
- Anexo 3: Correcciones por latitud, altura (corrección de aire libre y corrección de Bouguer).
- Anexo 4. Corrección topográfica
- Anexo 5. Anomalía de Bouguer
- Anexo 6. Mapas de Anomalía de Bouguer Total, Anomalía Residual y del Espesor de los Sedimentos a escala 1: 50.000

INTRODUCCION

El presente informe corresponde al subproyecto No. 7 "Estudios Geofísicos", en el marco del proyecto de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá que adelantan el INGEOMINAS y la Universidad de los Andes para la Administración Distrital y la Nación. Dentro del subproyecto se realizaron mediciones de Resistividad Eléctrica, de Refracción Sísmica y de Gravimetría, cuyos resultados una vez interpretados, y complementados con la información geológica de campo, y con información geofísica de estudios anteriores, información de pozos y de sondeos mecánicos, permitieron obtener un modelo geofísico estructural del perímetro urbano de Santafé de Bogotá y sus alrededores.

Objetivos.

General.

Establecer un modelo geológico-geofísico estructural de la cuenca del perímetro urbano de Santafé de Bogotá, mediante la caracterización de su geometría y de sus propiedades físicas: velocidad de propagación de las ondas, densidad y resistividad eléctrica de los sedimentos y rocas.

Específicos.

1. Determinar el espesor de los sedimentos y la profundidad de la roca, así como las velocidades de propagación de las ondas en los mismos, mediante

la realización como mínimo de 10 km de refracción sísmica, repartidos en líneas en diferentes sentidos, N-S y E-O de Santafé de Bogotá.

2. Determinar la profundidad de la roca, mediante la realización como mínimo de 50 Sondeos eléctricos verticales (SEV) y 20 registros de pozos.
3. Determinar la configuración de la cuenca de la Sabana de Bogotá, mediante el levantamiento como mínimo de 200 estaciones gravimétricas.
4. Correlacionar los resultados sísmicos, geoelectrónicos y gravimétricos con la geología de superficie y obtener un modelo geológico-geofísico en profundidad de la Sabana de Bogotá.

Localización Geográfica.

Los estudios geofísicos se realizaron en el perímetro urbano de Santafé de Bogotá y en sus alrededores, (Fig.1).

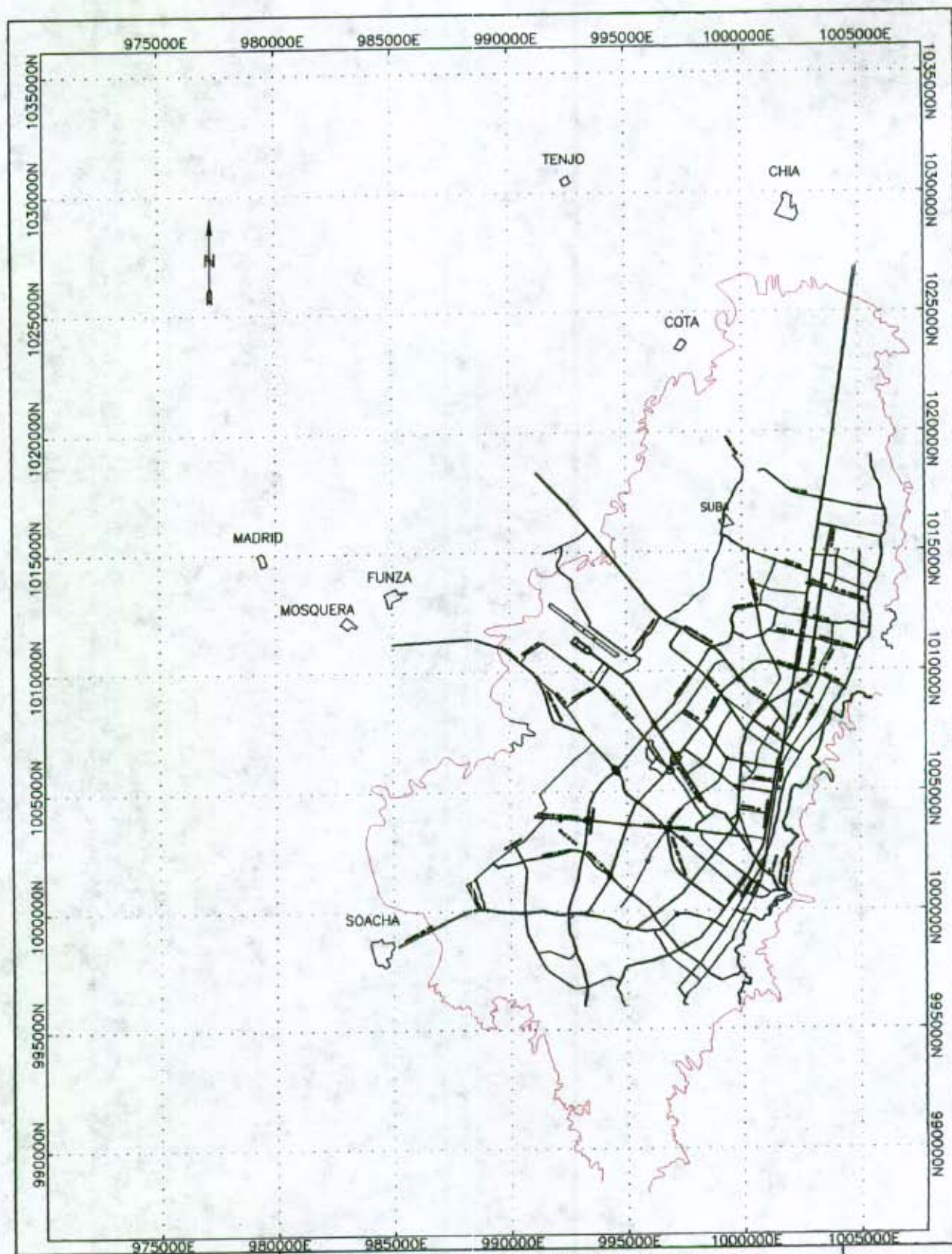
Recopilación de la información geofísica de estudios anteriores.

La información recopilada de estudios anteriores fue la siguiente:

- Del proyecto Mapa Gravimétrico de Colombia, del INGEOMINAS-IGAC, se recopilaron 70 estaciones pertenecientes a la línea CM-10 y 86 pertenecientes al trabajo de tesis "Modelo Gravimétrico de la Cuenca de la Sabana de Bogotá, en los alrededores de Funza, Mosquera y Madrid", (Pérez, C. R., 1988).

- De los proyectos CAR-INGEOMINAS y Zonificación Geotécnica de Bogotá se recopilaron 198 SEV, de los cuales dentro del perímetro del proyecto se localizaron 50 SEV.
- Del programa Juaiuca de Ecopetrol se recopilaron 8 líneas sísmicas, de las cuales la línea J-78-08 fue la única que se encontró dentro del perímetro del proyecto,
- Del Inventario Hidrogeológico de Colombia, manejado por el INGEOMINAS, se recopiló la información de 172 pozos, de los cuales 75 se encuentran dentro del perímetro del proyecto.

Los Métodos Geofísicos empleados : refracción sísmica, geoelectricidad y gravimetría fueron ejecutados por el Geofísico Alfredo Rivera Ortega y los Geólogos Luis Eduardo Vázquez Ávila y Rosalbina Pérez Cerón de la Subdirección de Geofísica del INGEOMINAS. En la adquisición de datos de campo participaron el Geólogo Arturo Bermúdez, el Geofísico Hugo Gravini y el Topógrafo Rodrigo Esquivel. En la edición de mapas colabó el Físico Harold Esquivel.



MAPA DE UBICACION DEL AREA DEL PROYECTO

PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO NO. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS



Escala 1 : 250.000

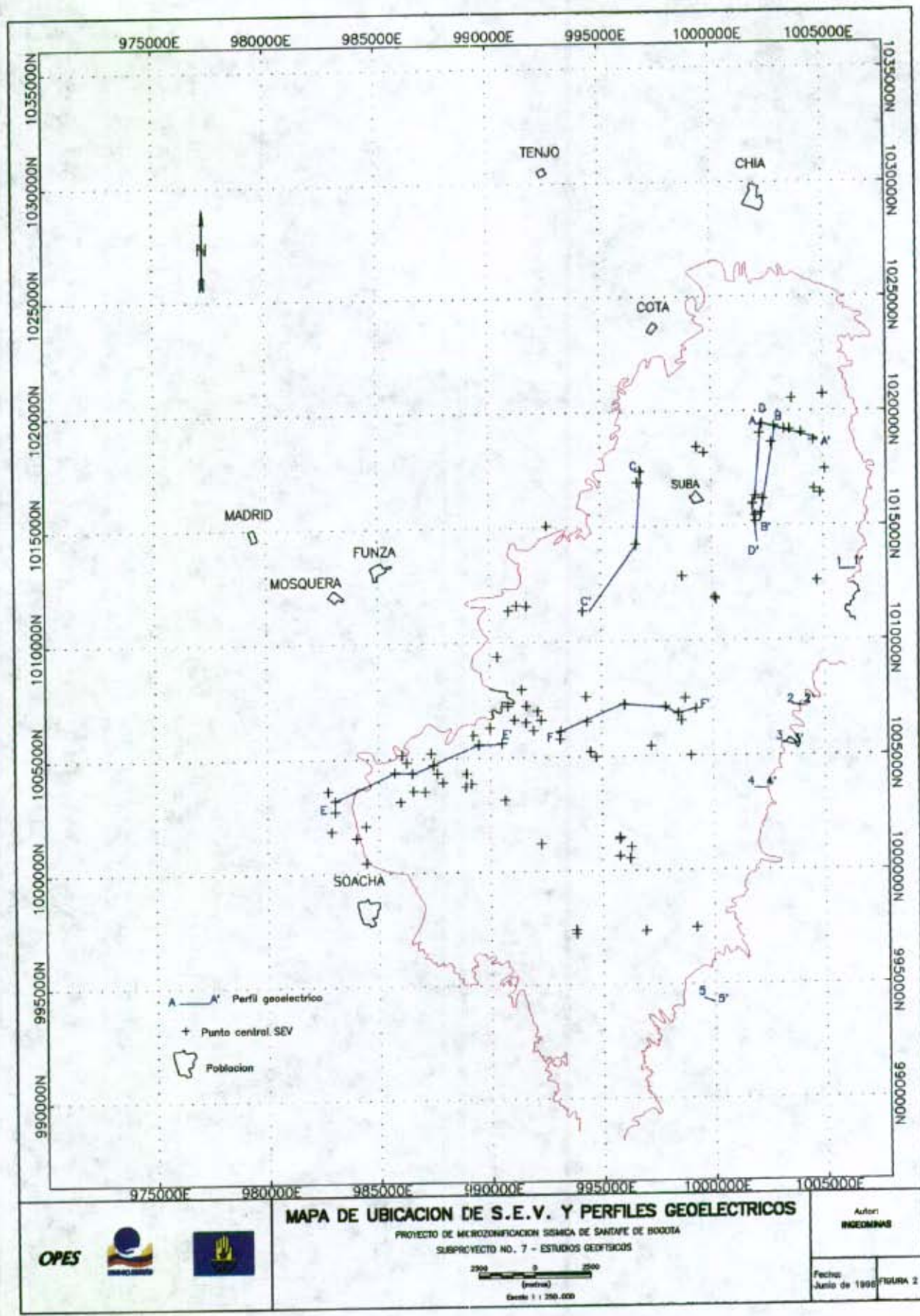
Autor:
INGENIEROS

Fecha:
Julio de 1994

FIGURA 1

OPES





OPES



MAPA DE UBICACION DE S.E.V. Y PERFILES GEOELECTRICOS

PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTÁ
SUBPROYECTO NO. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS



Escala 1 : 250.000

Autor:
INGEOMINAS

Fecha:
Junio de 1998

FIGURA 2

1.1.3 Interpretación de resultados.

Los resultados obtenidos se agruparon en cinco (5) rangos de valores de resistividad, a los que se denominó en este trabajo como "Zonas de Resistividad"; a saber:

Zona de resistividad 1. Comprende la parte que va desde la superficie hasta aproximadamente 25 m de profundidad y presenta un rango de valores de resistividad entre 15 y 60 ohm-m. Se estima que estos valores pueden corresponder a una alternancia de arcillas, limos y algunas arenas parcialmente saturadas con agua. Esta unidad se distribuye por todo el subsuelo de Santafé de Bogotá.

Zona de resistividad 2. Se encuentra inmediatamente debajo de la zona anterior entre los 25 y 50 m de profundidad, aunque presenta variaciones hasta de 70 m en algunos sectores. Presenta un rango de valores de resistividad entre 10 y 20 ohm-m, los cuales corresponden principalmente a arcillas con algunas intercalaciones de limos. Esta zona es poco permeable, a diferencia de la anterior y también está distribuida por todo el subsuelo de Santafé de Bogotá.

Zona de resistividad 3. Se localiza debajo de la anterior, entre los 50 y algo más de 200 m de profundidad de manera variable. Presenta un rango de valores entre 25 y 60 ohm-m, los cuales corresponden a una serie de intercalaciones de arenas con capas delgadas de arcillas y algunos limos. Esta zona es más permeable que las dos anteriores. Se distribuye por la gran mayoría del subsuelo de Bogotá.

Zona de resistividad 4. Situada a mayor profundidad que las anteriores, entre 200 m y más de 300 m de profundidad, superando en muchos casos la profundidad de investigación del arreglo utilizado. Presenta un rango de valores de resistividad entre

10 y 19 ohm-m, los cuales pueden corresponder bien a arcillas hacia la parte occidental de la ciudad o bien a arcillolitas en la parte central y norte de la misma.

Zona de resistividad 5. Se encuentra en forma esporádica a menos de 500 m de profundidad, especialmente en áreas aledañas a los afloramientos de las rocas más antiguas(Terciario y Cretáceo), como en el caso de los cerros orientales de Santafé de Bogotá, los cerros de Suba y los cerros al sur de Soacha. Infrayace a la zona anterior y presenta un rango de valores superiores o iguales a 100 ohm-m que corresponden a unas areniscas con intercalaciones de limolitas, saturadas con agua subterránea.

Las determinaciones de profundidad obtenidas deben considerarse con precaución puesto que el error promedio de precisión del método es del 15 % y en muchos casos hasta del 20 %, dependiendo en cada caso de la inhomogeneidad del medio.

1.1.4 Secciones y mapas geoelectricos.

1.1.4.1 Zona plana.

Los resultados fueron plasmados en cortes geoelectricos y mapas temáticos que permitieron hacer una interpretación areal y en profundidad de los resultados obtenidos.

Se elaboraron 8 cortes geoelectricos y 2 mapas de contornos.

Perfiles Geoelectricos.

Los seis primeros cortes muestran que las zonas de resistividad 1, 2 y 3 se encuentran prácticamente en posición horizontal en el subsuelo de Bogotá, variando únicamente su espesor en sentido lateral. La zona de resistividad 5, en cambio, presenta inclinaciones en dos sentidos y hacia profundidad, (Fig. 3 y 4).

Los cortes del sector de los cerros orientales muestran una situación diferente, con una zona de resistividad alta correspondiente a un coluvión sobre una serie de rocas intercaladas de distinta resistividad e inclinadas hacia el oriente. Tal situación se presenta hacia la parte sur de la ciudad de Bogotá, (Fig. 5 y 8-12).

Mapas Geoelectricos

Mapa de la profundidad del limite Sedimentos - Roca

Este mapa, (Fig. 6), muestra la variación de la profundidad del contacto entre los sedimentos no-consolidados y las rocas en el casco urbano de la ciudad de Santafé de Bogotá. Dicho límite se encuentra entre las zonas de resistividad 3 y 4 ; lo cual

significa que las tres primeras zonas de resistividad (1, 2 y 3) corresponden a sedimentos o materiales no consolidados, mientras que las zonas 4 y 5 corresponden a rocas de distinto tipo. Las curvas o líneas de contorno están trazadas a intervalos de 100 m. La paleta de colores muestra la variaciones de los espesores de los sedimentos; desde menos espesos (tonalidades moradas y rojas), hasta mas espesos (tonalidades azules).

Se puede observar entonces que el contacto sedimento-roca se encuentra a menos de 100 m de profundidad en torno a los afloramientos de las rocas que conforman las cadenas montañosas en los cerros de Suba, Soacha y cerros orientales. A medida que se aleja de ellos el límite aumenta progresivamente a más de 100 m, llegando a ser mayor de 200m de profundidad hacia el sector occidental de la ciudad.

Mapa de contornos de la profundidad al techo de la roca más compacta

Este mapa muestra la variación de profundidad hasta la cual se encuentra el techo de la roca más compacta y estable dentro del perímetro de Santafé de Bogotá. La roca en referencia se identificó como la zona de resistividad 5, correspondiente principalmente a areniscas. Las curvas de contorno fueron trazadas también a intervalos de 100 m, (Fig. 7).

Se puede observar que este tipo de roca se encuentra desde la superficie en la gran mayoría del área plana, tanto en los cerros orientales como en los cerros de Soacha y Suba, hasta profundidades superiores a los 500 m. En el sector de Soacha puede observarse como la variación de la profundidad muestra una estructura anticlinal al Oeste de dicha población con el eje en dirección Norte-Sur y, al contrario, en el sector norte entre el cerro de Suba y los cerros orientales puede observarse que tal variación de profundidad muestra una cuenca o estructura sinclinal con una dirección también Norte-Sur.

1.1.4.2 Zona Cerros Orientales.

Con el objetivo de determinar los espesores de los depósitos coluviales adyacentes a las montañas y la profundidad a la roca subyacente, se programó la realización de Sondeos Electricos Verticales, SEV, en sitios específicos, los cuales se describen a continuación (Figuras 8-12):

- * *Sector Bosque de Medina, (Fig. 2, perfil 1-1', Fig. 8)* Se realizaron 2 SEV. El espesor del coluvión en este sitio es de aproximadamente 6 metros y yace discordante sobre un paquete de intercalaciones de areniscas y arcillolitas de la Formación Labor-Tierna (Ksglt). Los espesores para los niveles de arcillolitas se encuentran entre 2 y 3.5 metros, mientras que para los niveles arenosos varían entre 1.5 m y 10 m Las resistividades para el depósito coluvial varía entre entre 177 y 890 Ohm-m Para los niveles arcillosos entre 39.4 y 78 Ohm-m y para los niveles arenosos entre 169 y 1403 Ohm-m

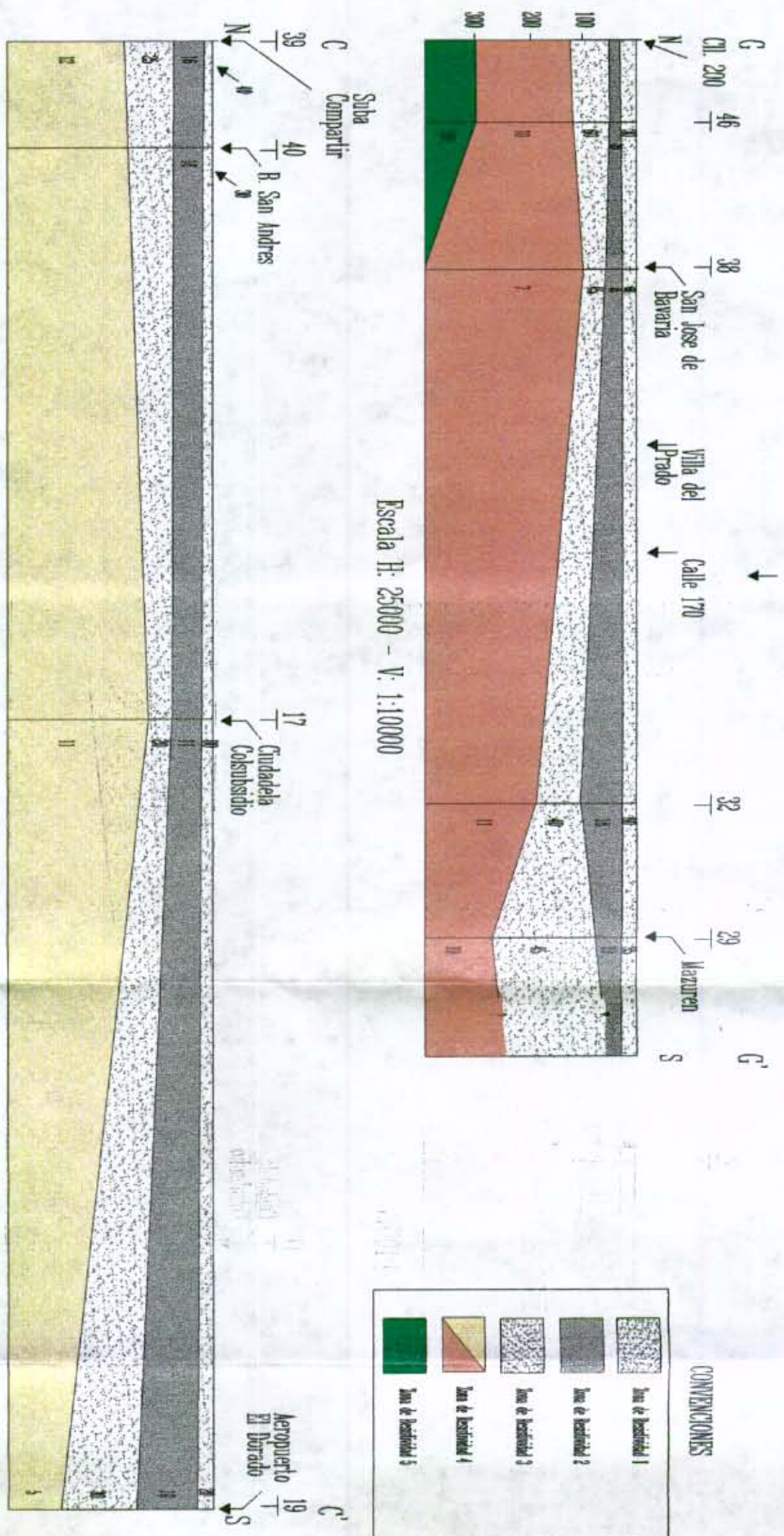
- * *Sector de los Rosales. (Fig. 2, perfil 2-2', Fig. 9)* Se realizaron 3 SEV. El espesor máximo registrado para este depósito es de 10 m y el mínimo de 5.5 m Los niveles arenosos tiene espesores aproximados de 20 m y los niveles de arcillolitas de 10 metros. Las rocas fueron asociadas a la Formación Arenisca Dura (Ksgd). Se presentan resistividades de 3243 Ohm-m para los niveles arenosos y de 69.7 Ohm-m para las arcillolitas. Esta situación indica una muy baja saturación de agua en las rocas. Algún tipo de saturación se presentaría hacia la base del coluvión a una profundidad de 6 metros.

- * *Sector Bosque de Calderón, (Fig. 2, perfil 3-3', Fig. 10).* Se realizaron 2 SEV. El depósito en este sector es de carácter netamente arcilloso residual muy saturado de agua, como lo denotan sus bajos valores de resistividad, los cuales varían entre 1 y 7 Ohm-m Además se presume una contaminación por aguas

de desechos, las cuales estarían contribuyendo a disminuir notoriamente el valor de la resistividad. Las rocas fueron asociadas a la Formación Guaduas (Ktg).

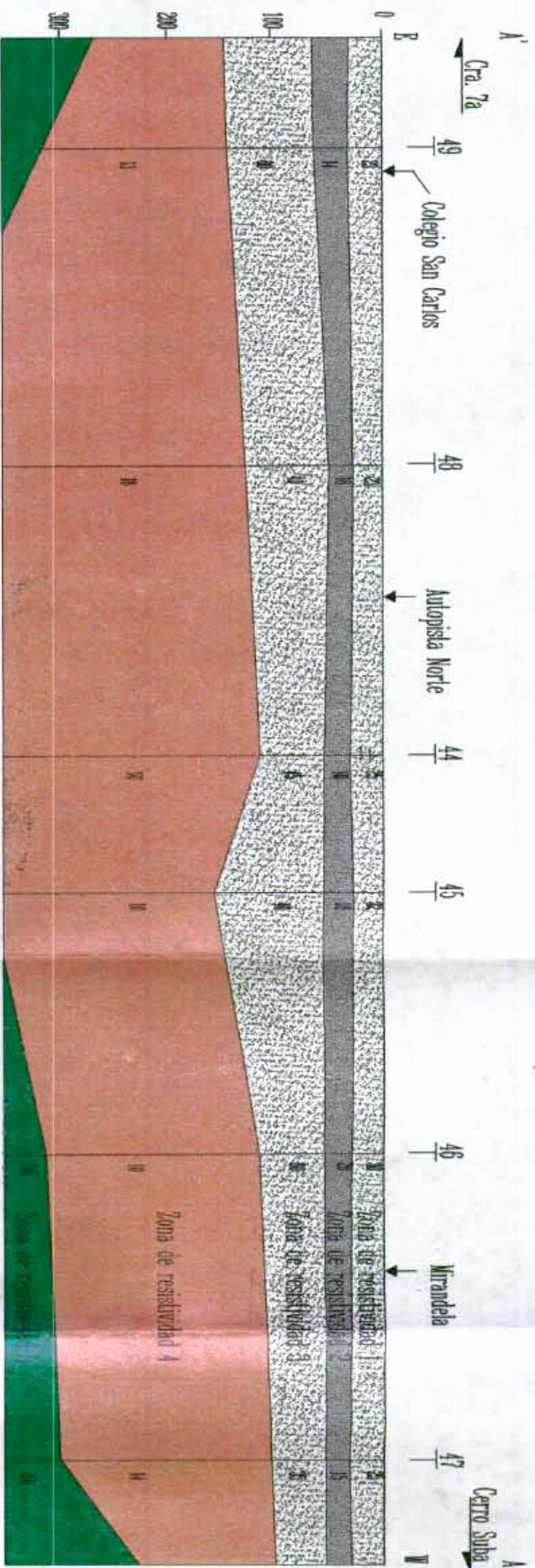
- * *Sector Parque Nacional, (Fig. 2, perfil 4-4', Fig. 11)* Se realizaron 3 SEV. Al igual que en los Rosales y el Bosque Medina, en este sector también existe un depósito discordante sobre los paquetes rocosos de la formación Guaduas (Ktg); sin embargo, en este sitio el buzamiento de los estratos es contrario a la pendiente. Se determinó un espesor para el depósito entre 2.0 y 4.5 metros, para las areniscas los espesores varían entre 4 y 11 metros. En este sector las rocas presentan resistividades comparativamente bajas; para las areniscas varían entre 63.6 y 638 Ohm-m y para las arcillolitas entre 2.9 y 7.4 Ohm-m, lo cual hace presumir que se encuentran bastante saturadas.

- * *Sector Escuela Moralva, (Fig. 2, perfil 5-5', Fig. 12)* Se realizaron 2 SEV. En este sector no se detectó depósito coluvial. La parte más superior corresponde a un suelo arcilloso seco, con espesores hasta de 1 metro, y resistividades entre 13.11 y 74 Ohm-m. Subyaciendo este primer nivel, se detectó una sucesión de niveles arcillosos y arenosos de la Formación Bogotá (Tpb), con resistividades entre 1 y 2.1 Ohm-m y 13.4 y 54.2 Ohm-m, también relativamente bajas, indicando fuerte saturación de estas capas.

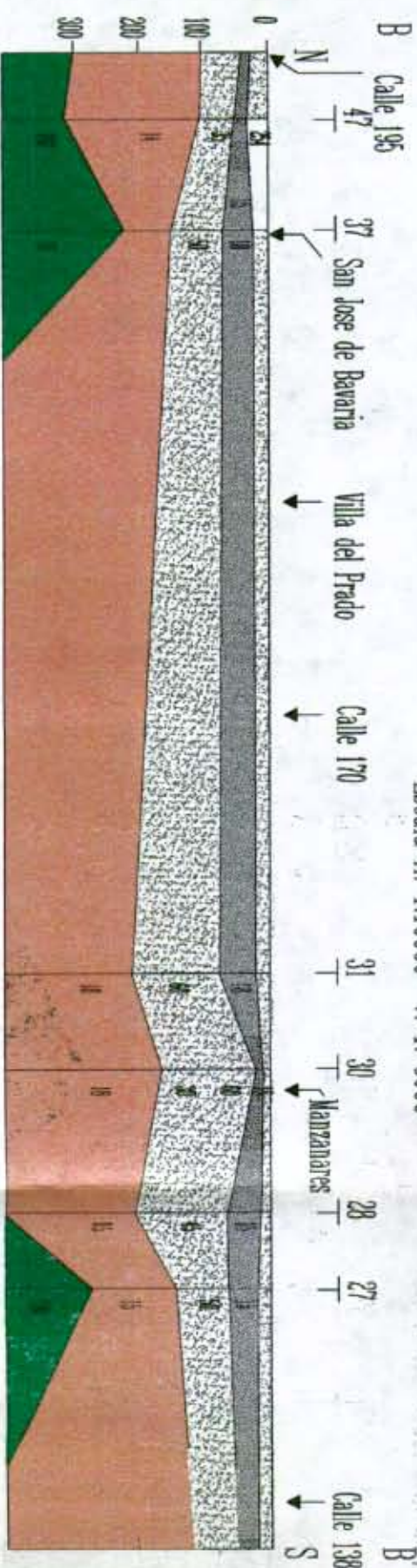


Escala H: 25000 - V: 1:10000

  	PROYECTO MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA	
	ESTUDIOS GEOTISICOS SUBPROYECTO No 7	PERFILES GEOELECTRICOS (Sectores Centro y Norte)
		FIGURA 3



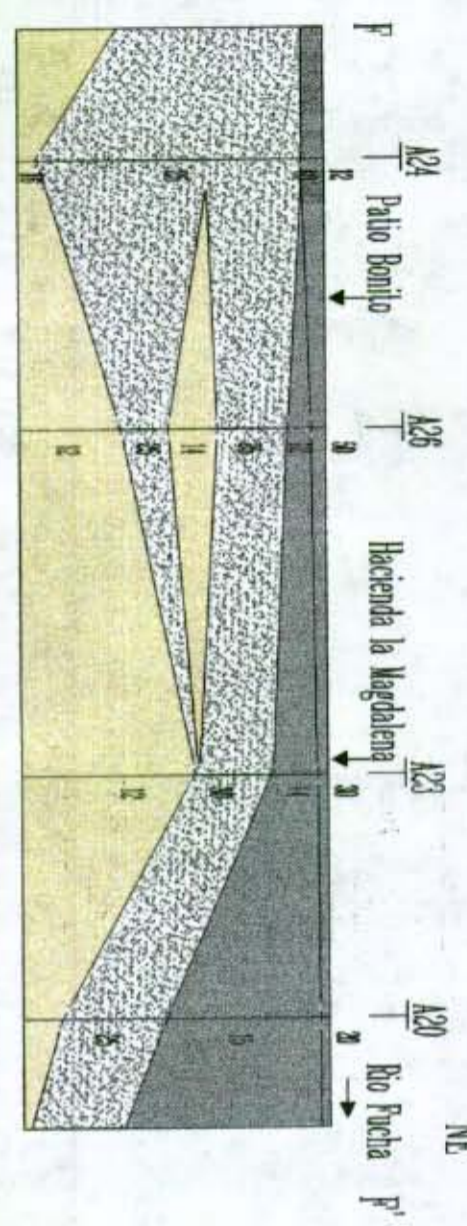
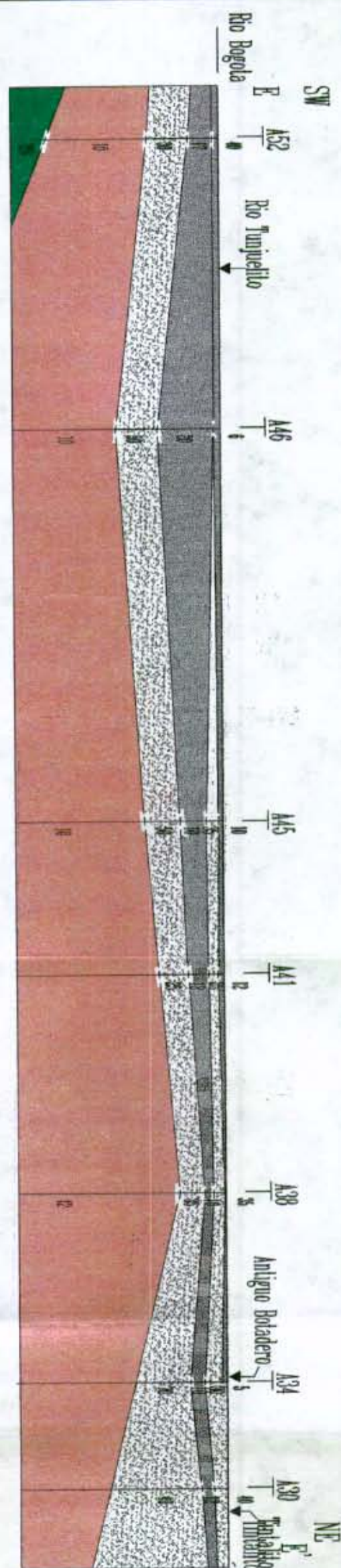
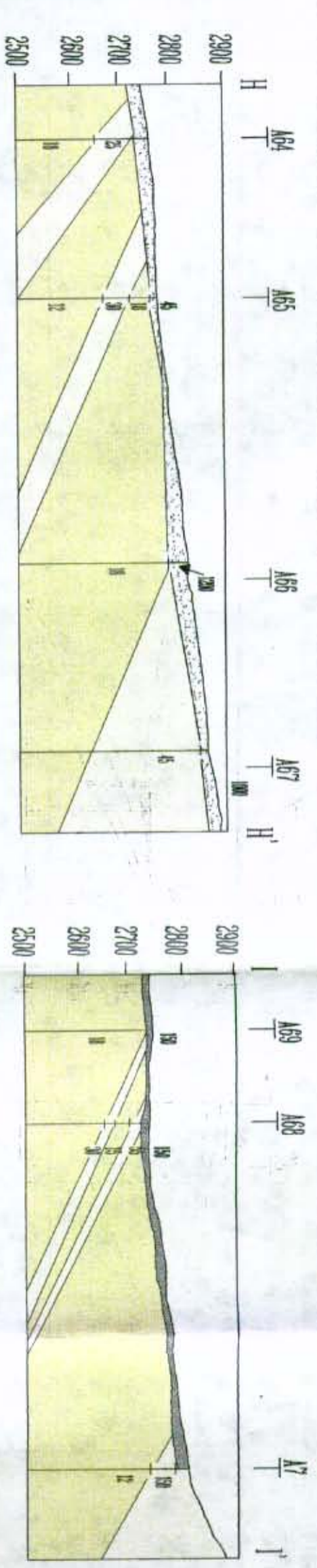
Escala H: 1:10000 V: 1: 5000



Escala H: 25000 - 1:10000

CONVENCIONES

	Zona de Resistividad 1
	Zona de Resistividad 2
	Zona de Resistividad 3
	Zona de Resistividad 4
	Zona de Resistividad 5



CONVENCIONES

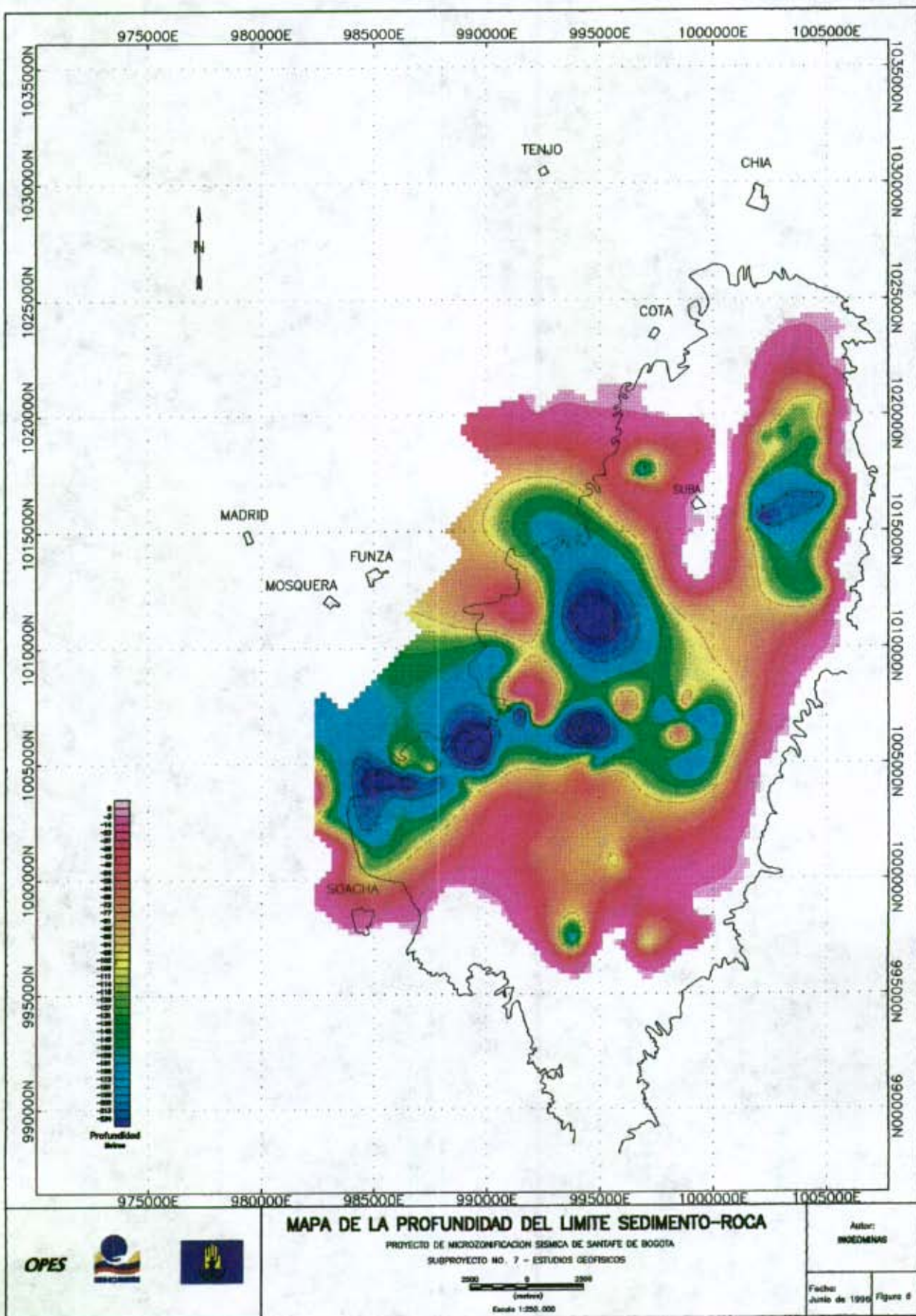
	Zona de Residualidad 1		Zona de Residualidad 5
	Zona de Residualidad 2		hacienda Purocinosa baja
	Zona de Residualidad 3		hacienda Purocinosa alta
	Zona de Residualidad 4		

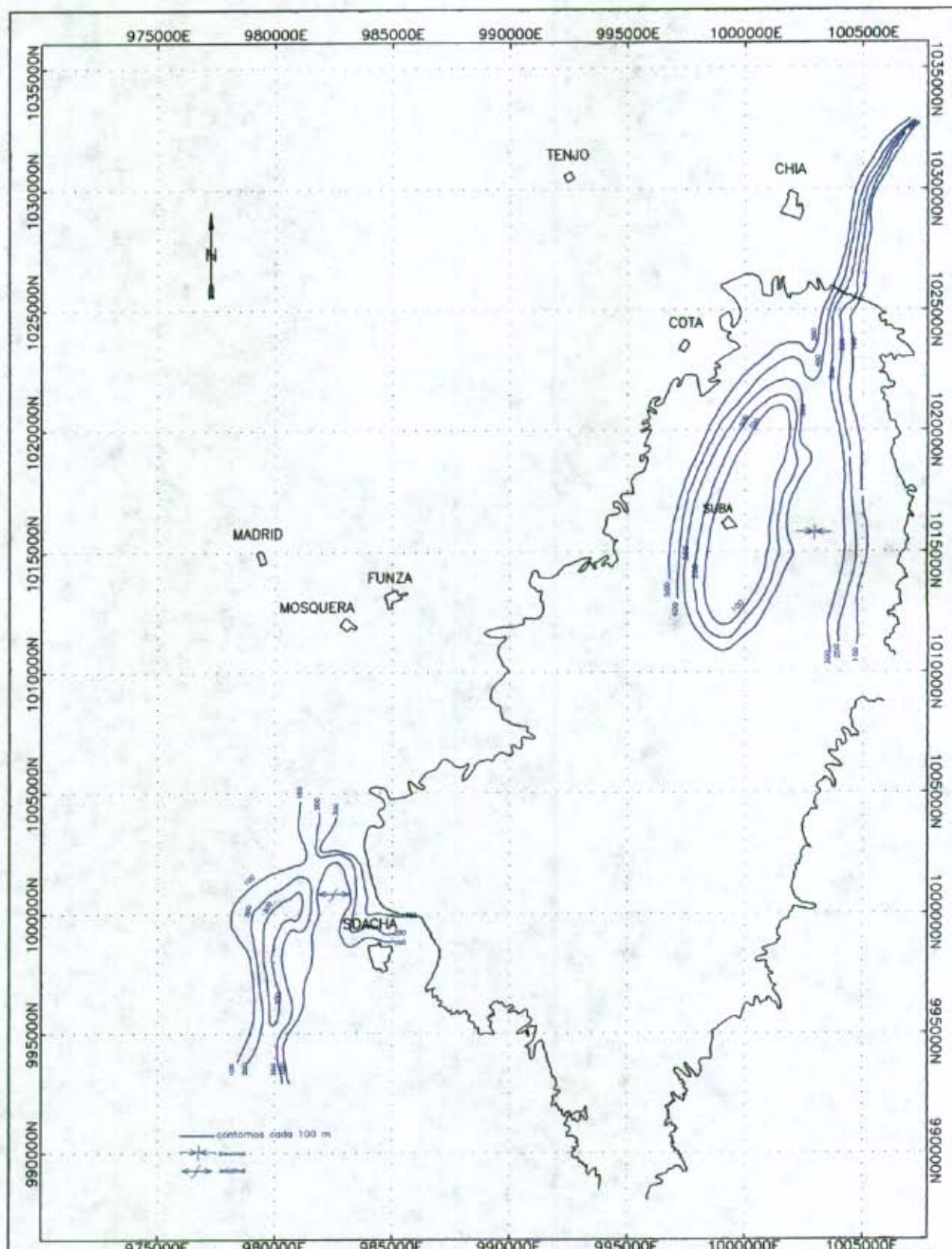
ESTUDIOS GEOFISICOS SUBPROYECTO No 7

PERFILES GEOELECTRICOS (Sector Sur y Occidente) FIGURA 5

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA







**MAPA DE CONTORNOS DE LA PROFUNDIDAD DEL TECHO
DE LA ROCA MAS COMPACTA**

PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO NO. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS

0 2000
(metros)
Escala 1:250.000

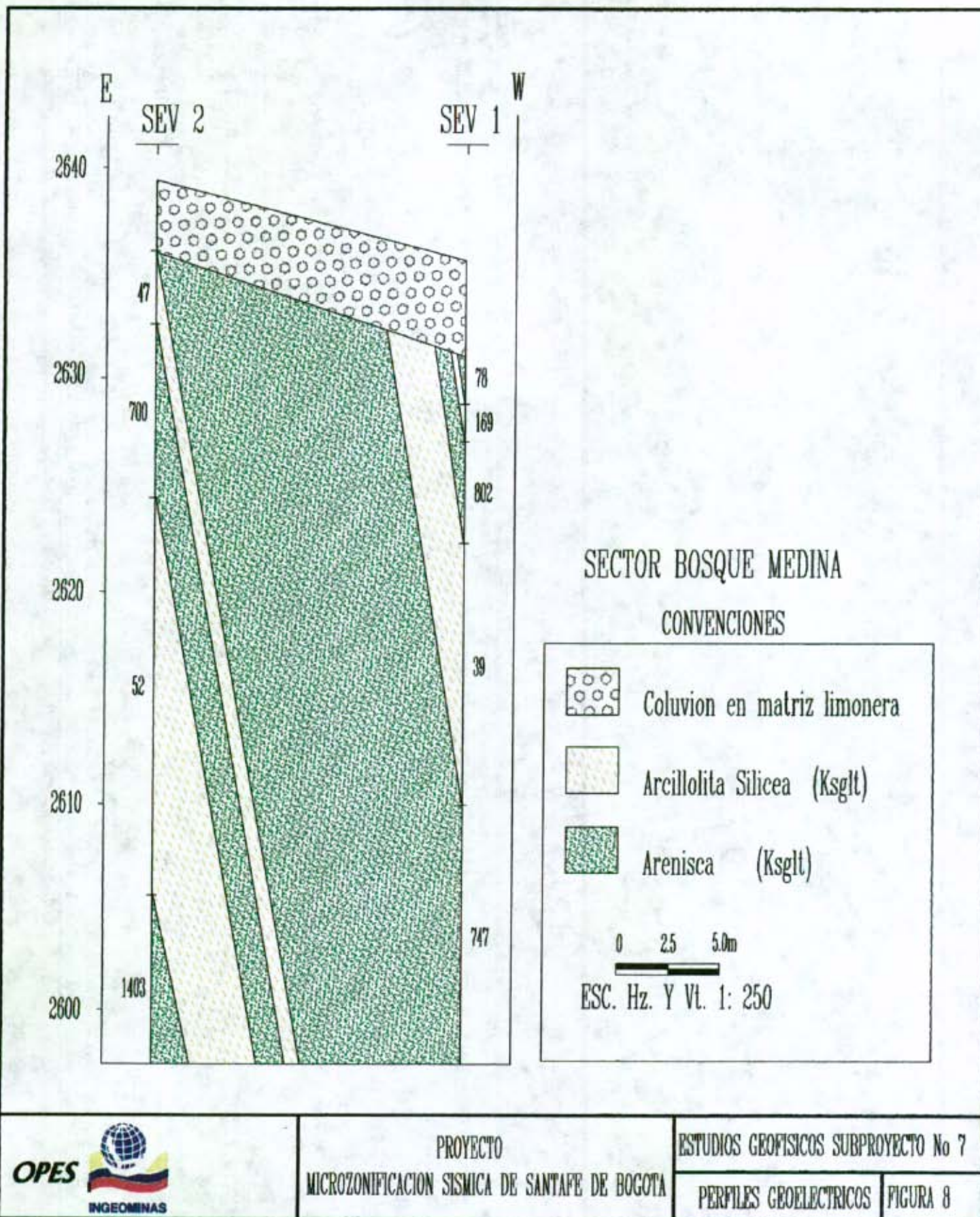
Autor:
INGEDMMS

Fecha:
Junio de 1998

Figura 7

OPES

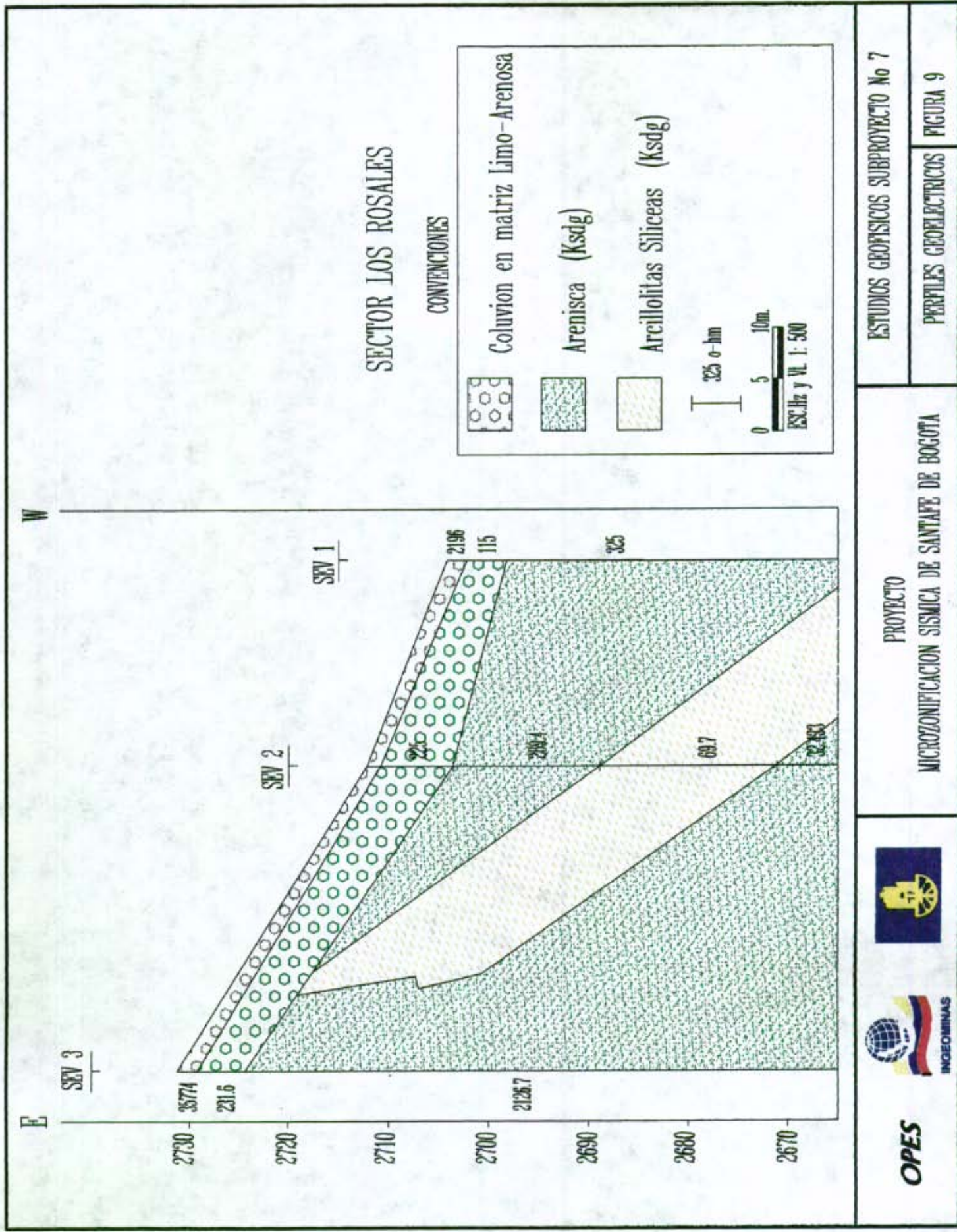




PROYECTO
 MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA

ESTUDIOS GEOFISICOS SUBPROYECTO No 7

PERFILES GEOELECTRICOS FIGURA 8



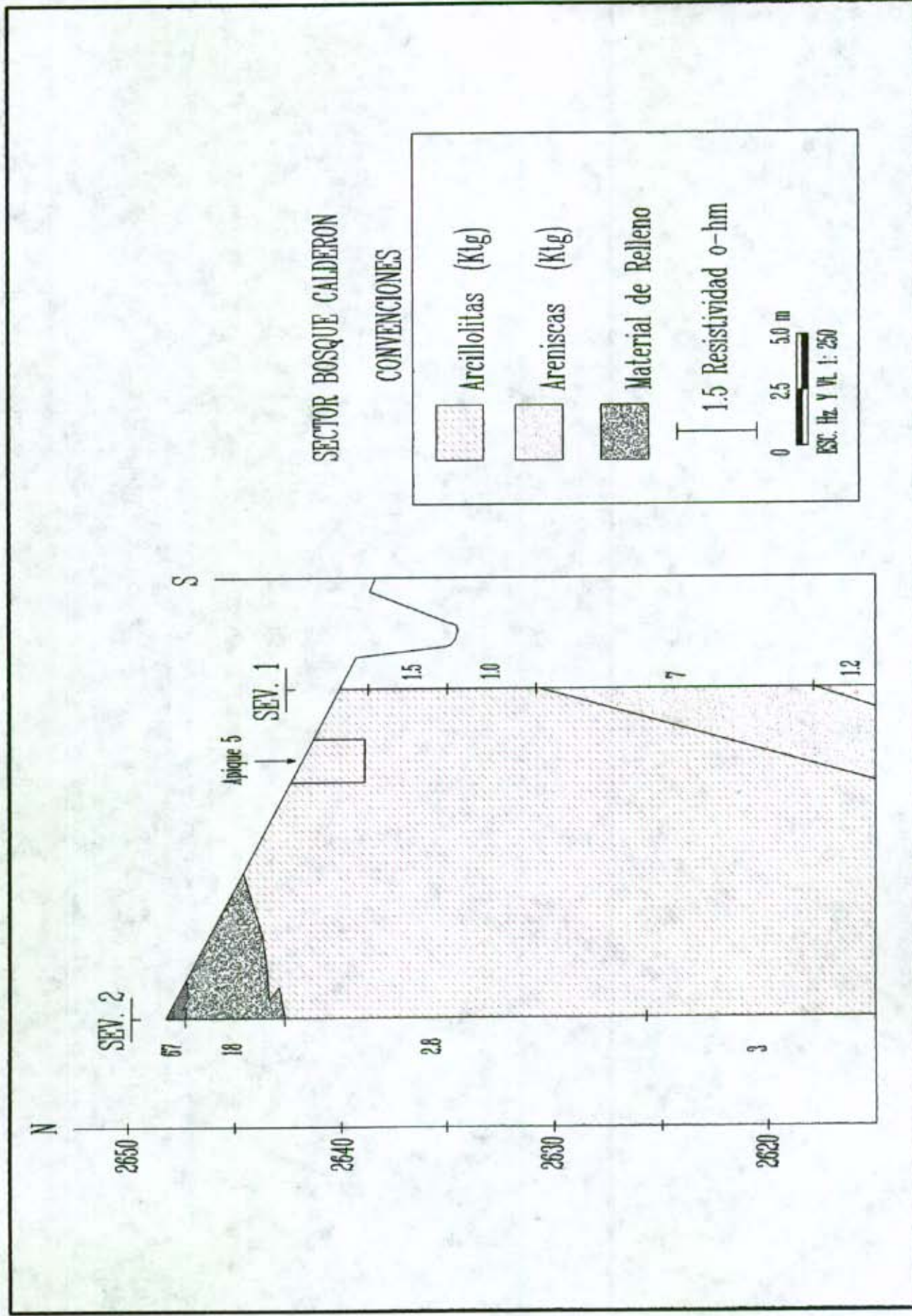
ESTUDIOS GEOFISICOS SUBPROYECTO No 7

PERFILES GEOELECTRICOS FIGURA 9

PROYECTO
 MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA



OPES



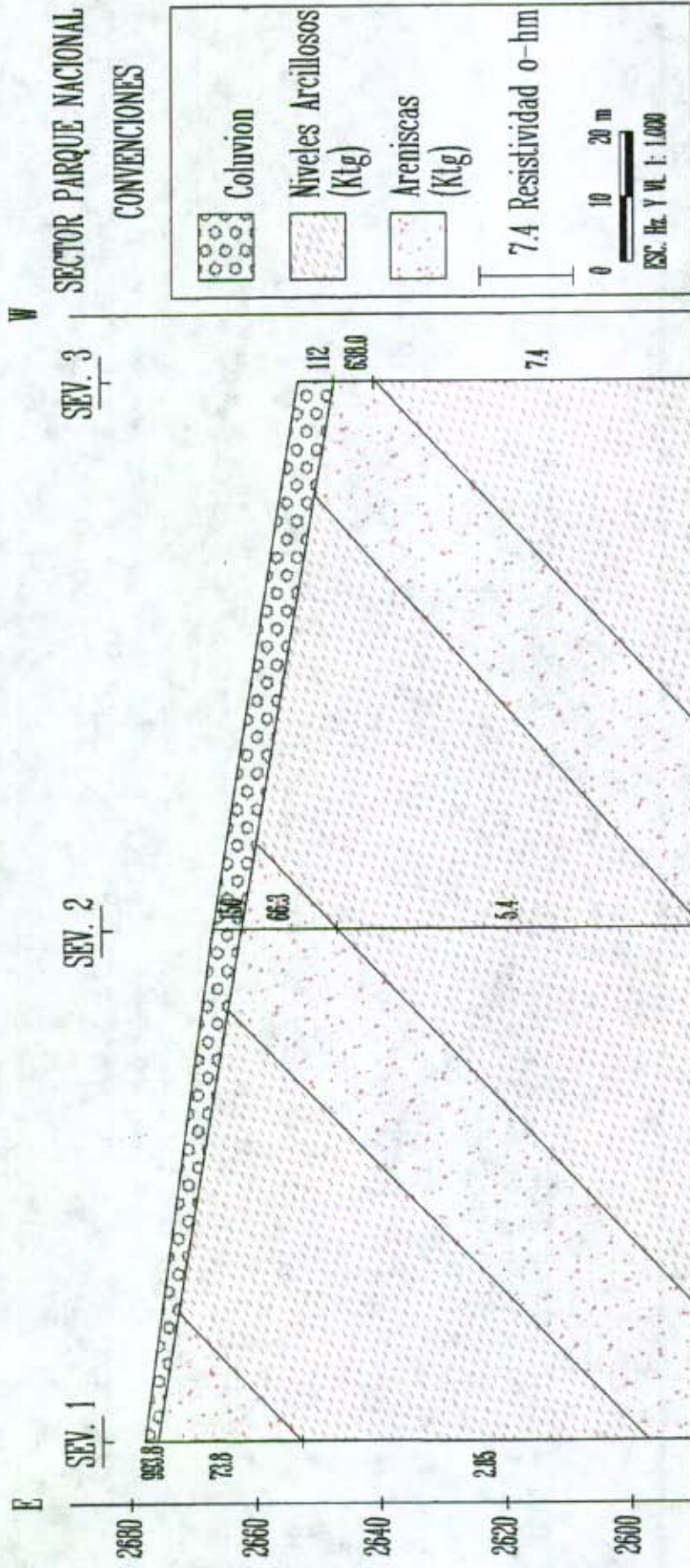
OPES



PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTIAFE DE BOGOTA

ESTUDIOS GEOFISICOS SUBPROYECTO No 7

PERFILES GEOELECTRICOS FIGURA 10



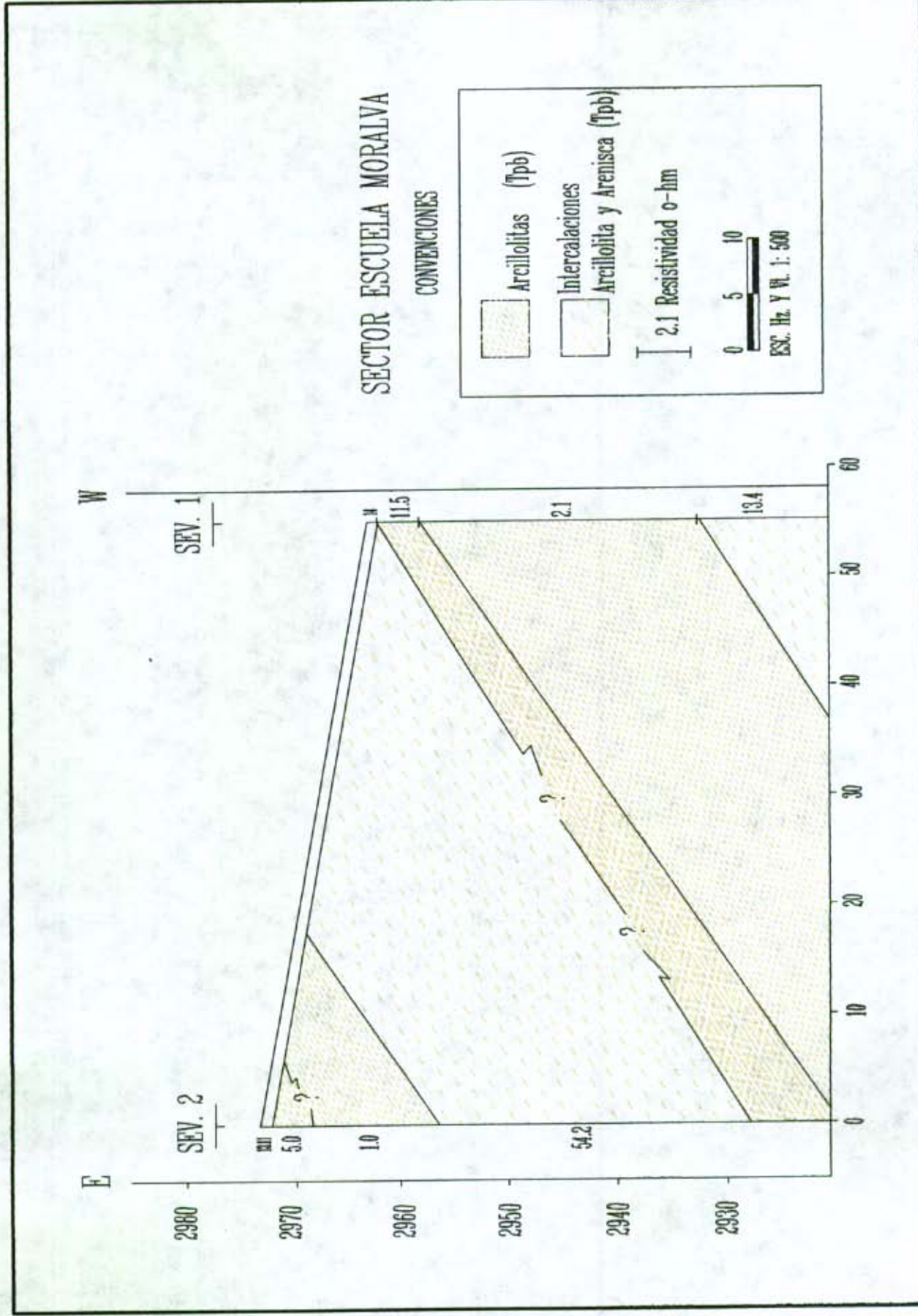
ESTUDIOS GEOFISICOS SUBPROYECTO No 7

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAPE DE BOGOTA



OPES

PERFILES GEOELECTRICOS
FIGURA 11



ESTUDIOS GEOFISICOS SUBPROYECTO No 7

PERFILES GEOELECTRICOS | FIGURA 12

PROYECTO
MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA



OPES

1.1.5 Correlación de los Resultados con Registros Geofísicos de Pozos y Sondeos Mecánicos.

Dentro del proyecto se realizaron sondeos geotécnicos, a los cuales se les tomaron registros geofísicos, utilizando sondas convencionales de resistividad (normal corta y normal larga), gamma y SP. Estas mediciones permiten conocer con precisión los límites en profundidad existentes entre los distintos tipos de materiales. Por eso, se tomaron los datos de los registros de Resistividad de algunos de ellos para confrontar los resultados encontrados con el método de superficie. En la tabla 1, se encuentran relacionados los valores de resistividad y de profundidad obtenidos con los registros y su identificación con las diferentes zonas de resistividad encontradas con el método de superficie.

POZO	PROFUNDIDAD	RESISTIVIDAD	TIPO DE MATERIAL	ZONA DE RESISTIVIDAD
	(M)	(OHM-M)		
ECI	0 - 26	30	Sedimentos no consolidados (arcillas, limos y algunas arenas)	1
	26 - 42.5	19	Sedimentos no consolidados (arcillas)	2
	42.5 - 54	32	Sedimentos no consolidados (arenas, arcillas, limos con turba)	3
UNIAGRARIA	0 -25	30	Sedimentos no consolidados (arcillas, limos y algo de arenas)	1
	25 - 58	14	Sedimentos no consolidados (arcillas)	2
	58 - 120	15 - 60	Sedimentos no consolidados (arenas, arcillas, limos y turbas)	3
	120 - 124	20	Roca (arcillolitas)	4
LOS HEROES	0 - 32		Sedimentos no consolidados (arcillas y limos)	1
	32 - 64	10	Sedimentos no consolidados (arcillas)	2
	64 - 98.9	10 - 60	Sedimentos no consolidados (arenas, arcillas, limos y turba)	3
INGEOMINAS	0 - 36	25 - 50	Sedimentos no consolidados (arcillas, limos y algunas arenas)	1
	36 - 52	16	Sedimentos no consolidados (arcillas)	2
	52 - 179	10 - 65	Sedimentos no consolidados (arena, limos, arcillas y turba)	3
	179 - 270	6 - 100	Rocas (arcillolitas y areniscas)	4

Tabla No.1. Variación de la Resistividad con la profundidad en algunos Sondeos Geotécnicos.

Puede observarse que la profundidad a la cual se encuentra la roca en los pozos de Uniagraria e Ingeominas coincide con aquella suministrada por el mapa de profundidad del límite sedimento-roca. Los valores de resistividad (registro de pozo) también están de acuerdo con los resultados obtenidos en superficie, identificándose las diferentes zonas de resistividad planteadas. De esta forma puede entonces dársele un buen grado de confiabilidad a los resultados obtenidos con el método de superficie.

Puede expresarse entonces que las rocas en el subsuelo presentan una forma geométrica tal que indican el sometimiento a un proceso de deformación y esfuerzos, el cual no han sufrido los sedimentos más recientes; todo esto de acuerdo con los cortes geoelectricos y los mapas realizados. Así mismo, puede decirse que el espesor de los sedimentos no consolidados se va incrementando hacia el occidente de Santafé de Bogotá.

ESTUDIOS GRAVIMÉTRICOS

El método gravimétrico tuvo como objetivo primordial en el presente proyecto, el modelamiento de la cuenca sedimentaria en el perímetro urbano de Santafé de Bogotá y sus alrededores, en términos de profundidades y densidades de las diferentes unidades litológicas. El modelo también incluye una interpretación de los elementos tectónicos más sobresalientes, que han afectado el área de estudio.

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1 Marco teórico

La investigación del subsuelo, con el empleo del método gravimétrico busca medir las pequeñas variaciones (del orden de centésimas de mGal, $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$, $1 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ cm/s}^2 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$) del valor de la gravedad, causadas por cambios de densidad de los materiales del subsuelo, tanto en forma lateral como con la profundidad. Estos cambios son reconocidos en términos de anomalías gravimétricas, las cuales son generadas por cuerpos o estructuras que poseen una densidad (**d**) y se encuentran a una profundidad específica (**h**). En otras palabras existe una relación directa entre anomalías gravimétricas y anomalías de masa.

Por ejemplo, la anomalía gravimétrica debida a un disco circular homogéneo, de radio **a** y de masa ΔM , puede ser calculada numéricamente, y está dada por:

$$\frac{\Delta g a^2}{2G\Delta M}$$

Donde **G** es la constante de gravitación universal, Δg es la anomalía gravimétrica producida por la masa **M**

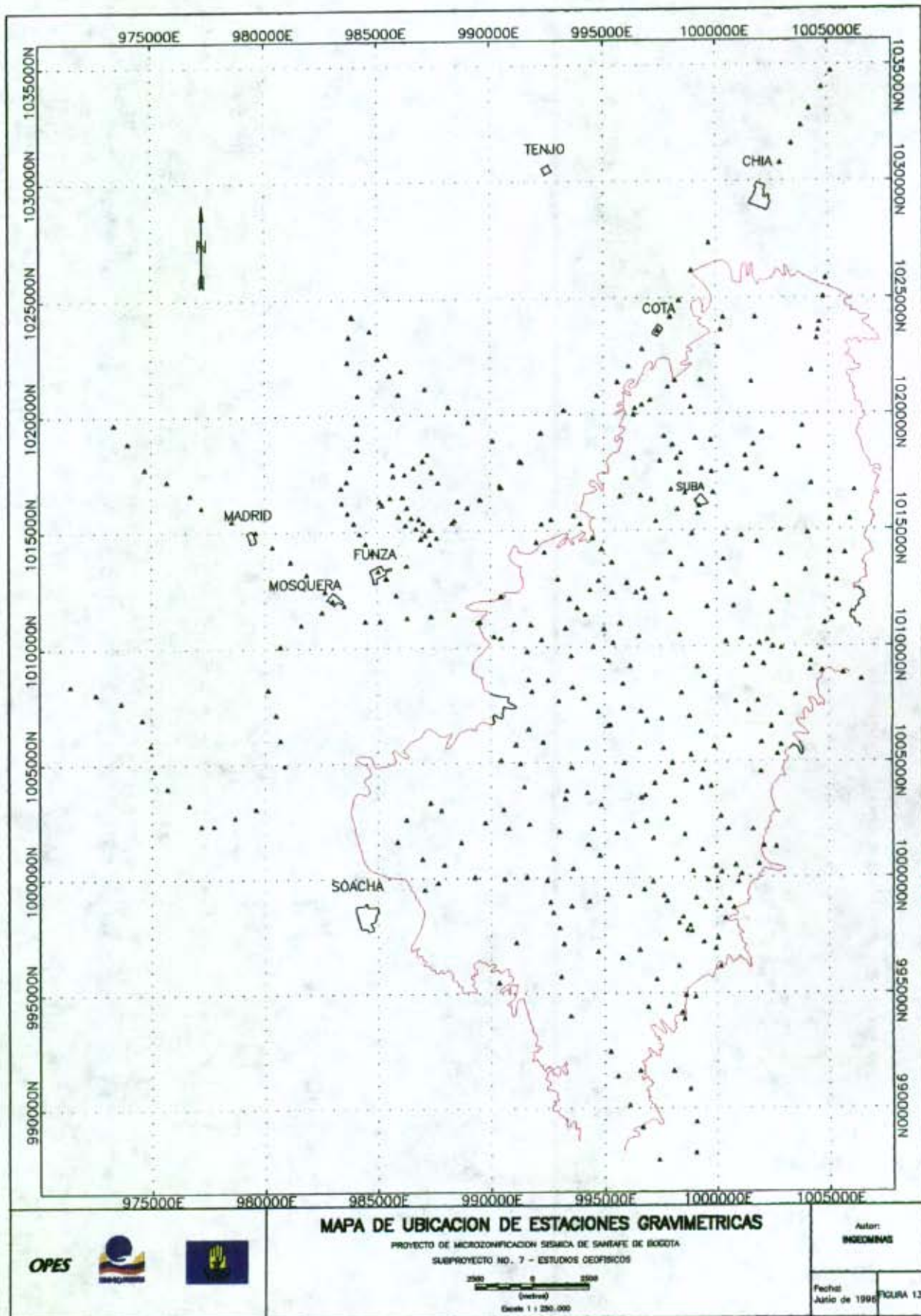
El total de la masa responsable de una anomalía gravimétrica está dada por el teorema de Gauss, el cual relaciona la integral de la anomalía sobre un plano horizontal con el límite de la anomalía gravimétrica detectable Civeta et. al. (1974) y está dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta M = \frac{1}{2\pi G}$$

A partir del desarrollo matemático del teorema de Gauss es posible estimar, aproximadamente, la forma, densidad o profundidad del cuerpo que está produciendo dicha anomalía. Para obtener las anomalías antes mencionadas, es necesario aplicar una serie de correcciones, con el fin de eliminar efectos secundarios causados, por la posición del punto de lectura con relación al geoide, efectos causados por la atracción que ejerce el sol y la luna sobre nuestro planeta y efectos debidos a la fatiga instrumental del aparato de medición. Las correcciones aplicadas se discutirán con mayor detalle en el capítulo de procesamiento.

2.1.2 Hipótesis de trabajo

La Sabana de Bogotá es una cuenca sedimentaria en la cual, sobre un basamento de rocas antiguas constituido por arcillolitas y areniscas (Terciario y Cretácico), se depositó un gran espesor de sedimentos, en un ambiente fluviolacustre, litológicamente compuestos por arcillas, arenas, gravas, cenizas volcánicas y turbas. Esta diferenciación de materiales tanto arealmente como en profundidad



- * *Cálculo de deriva instrumental:* Se realizaron varias curvas de deriva, con mediciones cada 10 minutos, por periodos de hasta 24 horas continuas, y utilizando la siguiente relación (Scintrex, 1989):

$$DER = DERK + ((L2-L1)/T2-T1))$$

Donde:

DERK = constante de deriva del instrumento durante las lecturas

L1 = lectura en el tiempo 1

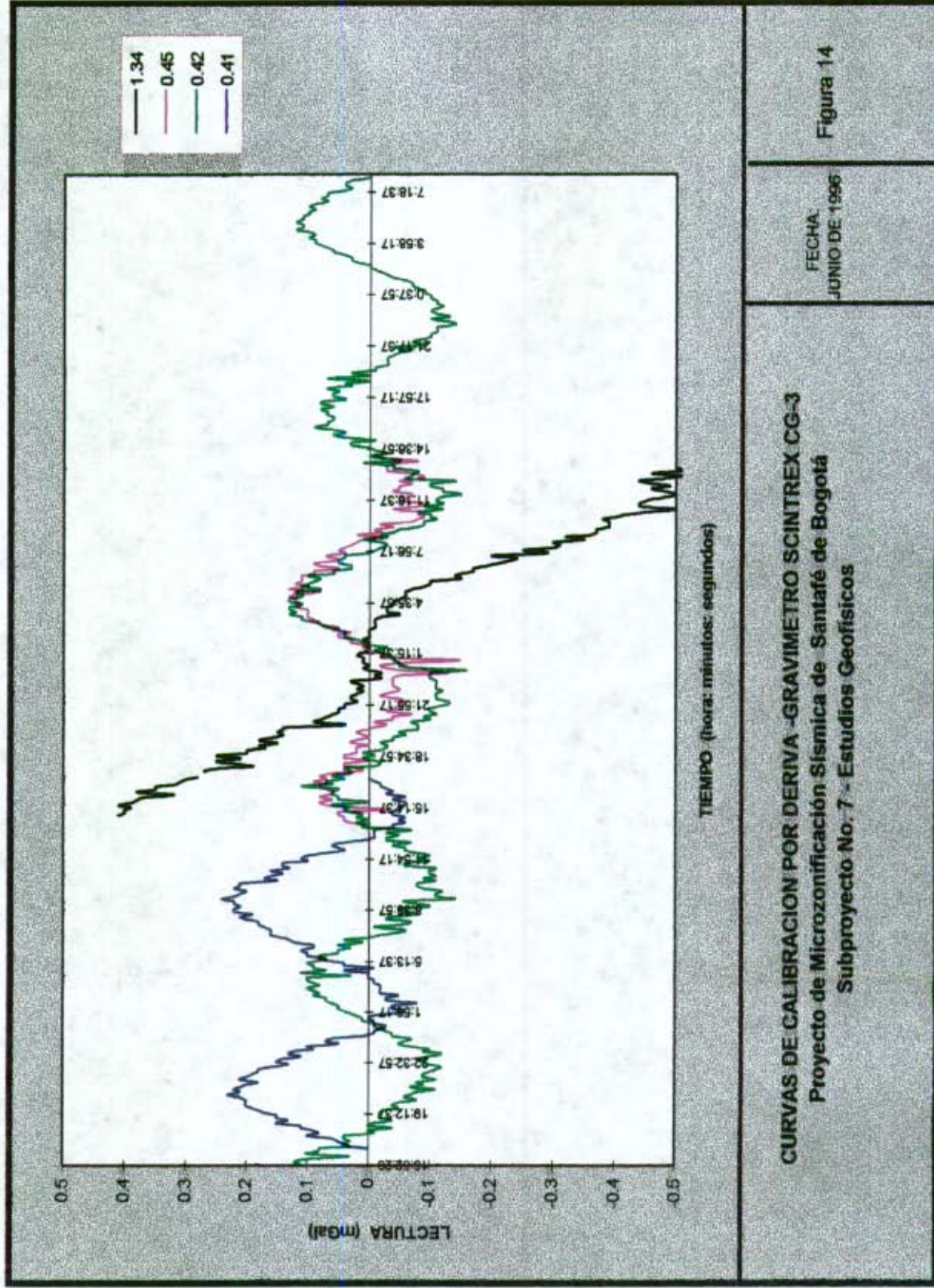
L2 = lectura en el tiempo 2

T1 = tiempo 1

T2 = tiempo 2

En la Fig.14 se observan las cuatro curvas de calibración de la deriva; la primera calculada el 10 de enero de 1995, con una deriva de 1.34 mGal/día, muestra una fuerte pendiente. Calculado el factor de deriva para esta curva, se obtuvo una segunda curva el 11 de enero de 1995 con una deriva de 0.45 Mgal/día, calculada de la anterior curva, cuya pendiente es mínima comparada con la anterior, y así sucesivamente hasta obtener una pendiente cercana a cero, para la cual la deriva es de 0.41 mGal/día. Este último valor fue tomado como constante de deriva para el levantamiento gravimétrico.

- * *Ajuste por mareas:* Una vez corregidos los datos por deriva, queda como remanente una influencia causada por la atracción Sol-Luna-Tierra, la cual se manifiesta en las curvas de calibración, como sinusoidales sobre el plano X, (Fig.14). El gravímetro Scintrex permite, a través del software preinstalado en él, corregir los datos por variaciones soli-lunares. Para ello es necesario introducir al gravímetro como constantes, la latitud, la longitud, la fecha, la hora de medición de la estación y la diferencia horaria con relación a Greenwich del área de estudio.



- * *Ajuste por inclinación:* El ajuste de la compensación por inclinación tiene como objetivo asegurarse que los puntos de referencia en los niveles del gravímetro, correspondan con los valores de mínimos y máximos de desplazamiento. De acuerdo con lo anterior el gravímetro establece unos rangos máximos de desplazamiento, por debajo de los cuales se aplica una compensación, y por encima la muestra es descartada.
- * *Compensación por temperatura:* Dado que el gravímetro es un sistema mecánico, éste es afectado por los cambios bruscos de temperatura. El gravímetro está protegido de estos cambios por un sistema de termostatos, los cuales mantienen el sistema mecánico a una temperatura constante evitando así la influencia de los cambios de temperatura sobre los valores leídos.
- * *Cálculo de la constante del gravímetro:* Para que el gravímetro proporcione valores en miligales es necesario asegurarse de que la constante de transformación K , tenga el valor correcto. Esta constante debe calibrarse con cierta regularidad, y entre puntos cuya diferencia de gravedad sea de por lo menos 20 miligales. Para el presente trabajo, se estableció un circuito de calibración, ocupando las estaciones de gravedad absoluta, recientemente medidas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, entre las estaciones NPA2E1, ubicada en el Instituto Geofísico de los Andes en Santafé de Bogotá, y la estación 900695, ubicada en el Museo del Río Magdalena en el municipio de Honda (Tolima), (Tabla 2).

Estación	Ubicación	Latitud	Longitud	Altura	Gravedad	Lectura
NPA-2E1	Bogotá	4.620N	74.063W	2664.0	977373.680	7400.53
900695	Honda	5.208N	74.738W	205.490	977928.153	7949.01

Tabla No. 2: Estaciones de calibración de la constante de transformación K .

El valor de la constante **K** se calculó mediante la siguiente relación:

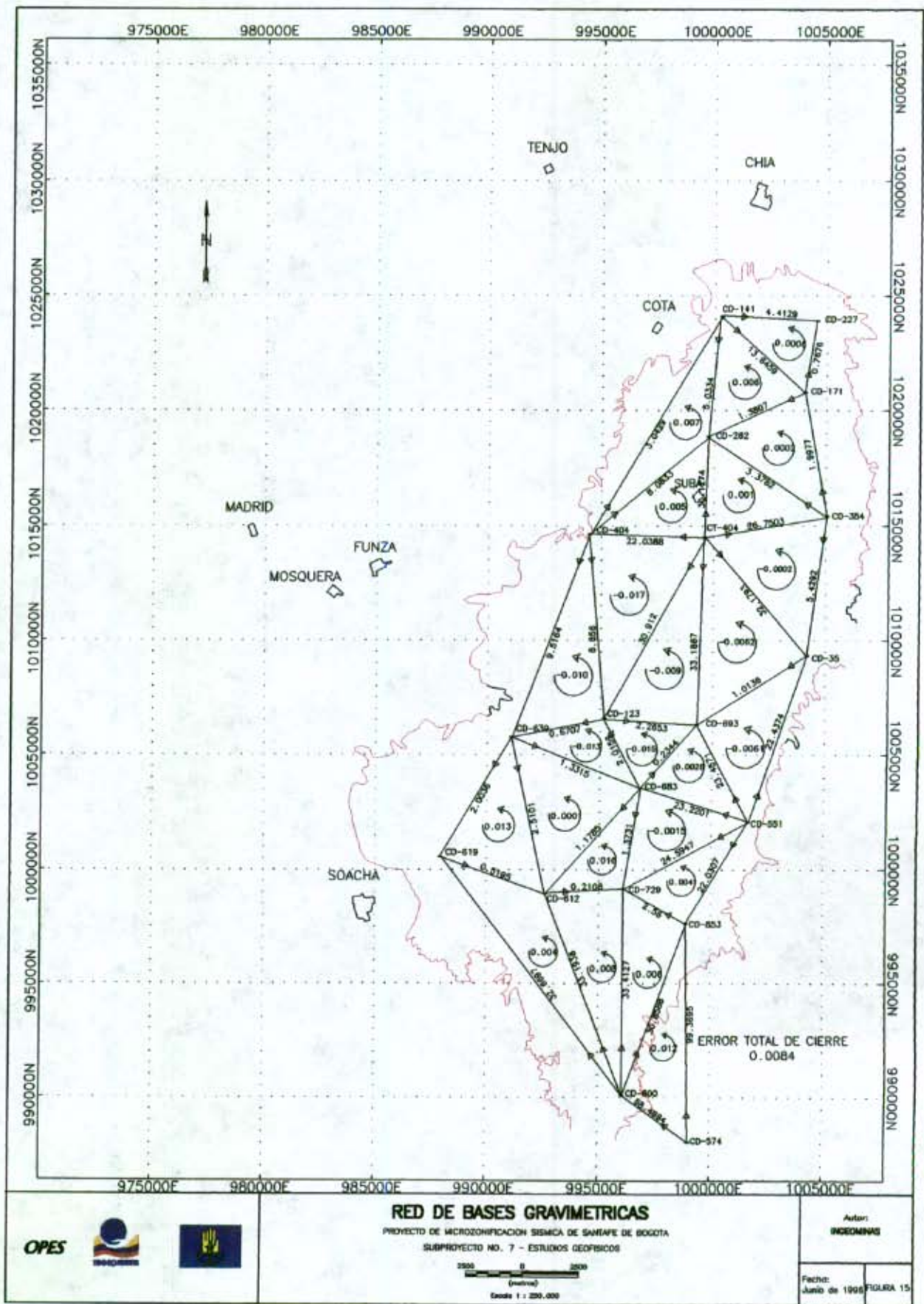
$$K = \frac{\Delta G}{\Delta L}$$

Donde ΔG es la diferencia del valor de la gravedad entre las estaciones de calibración, y ΔL , la diferencia de la lectura dada por el gravimétero en calibración. Teniendo esta constante, se modifica la constante interna del aparato de acuerdo con:

$$Gcal1 = Gcal1 * K$$

Donde **Gcal1** es un factor de las constantes iniciales de fabricación del aparato, las cuales se van modificando con el tiempo. El valor de la constante **K** calculado durante el circuito de calibración fue de **1.00898553**

Levantamiento de la red de bases gravimétricas. Con el objetivo de minimizar las variaciones residuales de gravedad por deriva instrumental y mareas, se levantó una red de bases, cuya ubicación permitió obtener circuitos o ciclos de retorno (tiempo entre una base y otra, o el retorno a la misma base), en el menor tiempo posible. Las bases se distribuyeron en el área de estudio, conformando una red de 24 polígonos triangulares y 20 bases (Fig. 15). Los lados de los polígonos fueron medidos con circuitos dobles o triples, con un tiempo de retorno a cada vértice no mayor de tres horas. Esta red de bases se amarró a la red Nacional de gravimetría a través de la estación MGLS-1967, ubicada en la puerta del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional, la que a su vez fue trasladada de la estación de gravedad absoluta NPA2E1 ubicada en el Instituto Geofísico de los Andes.

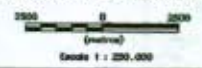


OPES



RED DE BASES GRAVIMETRICAS

PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO NO. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS



Autor:
INGEOMINAS

Fecha:
Junio de 1998 **FIGURA 15**

Levantamiento de estaciones gravimétricas. El levantamiento de las estaciones gravimétricas se realizó sobre puntos geodésicos ya ubicados y distanciados entre sí 500 a 1000 m. Las estaciones estuvieron ubicadas sobre las principales calles y avenidas de la capital de la república.

Para controlar la influencia del ruido urbano sobre las mediciones gravimétricas, se varió el tiempo de lectura entre 2 minutos, en la mayoría de los casos, hasta 5-15 minutos en los sitios más ruidosos. Los circuitos de retorno a una base fue de tres horas como máximo. En total se levantaron 320 estaciones gravimétricas distribuidas en todo el perímetro urbano de la ciudad, (Fig. 13).

Amarre a otros estudios gravimétricos. Además de la información tomada durante el presente trabajo, se tuvo en cuenta el estudio de gravimetría realizado por Pérez C. R, 1988, y la línea gravimétrica CM-10, levantada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi a lo largo de la carretera Funza-Cota. El amarre de estos estudios al presente trabajo se realizó a través de las siguientes estaciones:

Estación	Latitud	Longitud	Altura	INGEOMINAS 1995 G. OBSERVADA	R. PEREZ 1988 G. OBSERVADA	IGAC G. OBSERVADA
CD-404	4.73	74.13	2545.53	977377.772		
NP22CM10	4.766	74.158	2554.24	977375.786	977391.873	977375.23
NP24CM10	4.75	74.175	2550.68	977375.526	977391.6629	977374.97

Tabla No. 3 : Bases de amarre del presente estudio gravimétrico a la línea de gravimetría CM10 y al estudio gravimétrico realizado por Pérez, C. R. 1988.

2.1.4 Procesamiento de los datos

2.1.4.1 *Ajuste de la red de bases gravimétricas.* Las lecturas en las bases deben ser corregidas por errores residuales no compensados totalmente. Para esto se utilizó una metodología que básicamente calcula una curva de deriva para un circuito, a partir de los aportes de deriva de cada base, Haberstock, E. (1985). Una vez corregidas las lecturas por deriva (instrumental y mareas), se hallan las diferencias de lectura para cada lado del polígono. Posteriormente se halla el error de cierre de cada polígono, distribuyéndolo equitativamente en los tres lados. Finalmente se calculó el error de cierre total de la red, el cual fue de 0.0084 miligales, (Fig. 15).

2.1.4.2 *Cálculo de diferencias de gravedad entre bases:* Una vez ajustada la red de bases se calculó nuevamente la diferencia de gravedad entre bases, partiendo de la estación gravimétrica del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional (Tabla 4), cuyo valor de gravedad fue trasladado de la estación de gravedad absoluta del Instituto Geofísico de los Andes.

Estación	Latitud	Longitud	Altura	G. Teórica	G. Observada
MGLS-1967	4°38'28" N	74°05'12" W	2556.815	978067.072	977390.642

Tabla No. 4 Especificaciones de la Estación MGLS-1967, Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional.

2.1.4.3 *Cálculo de gravedad observada para las bases gravimétricas.* Tomando como base el valor de la gravedad observada en la estación MGLS-1967 (ver tabla 4), y conociendo las diferencias de gravedad entre cada una de las bases, se procedió a calcular los valores de gravedad observada para cada una de ellas, (Tabla No. 5)

2.1.4.4 Cálculo de gravedad observada para las estaciones.

- * *Cierres de Circuitos.* Los cierres de los circuitos se realizaron en la base más cercana en el momento de cierre. El error de cierre del circuito se calculó conociendo la diferencia de gravedad entre cada una de las bases y el tiempo de lectura. Este error de cierre se distribuyó proporcionalmente en el ciclo, dependiendo del tiempo de lectura; luego se calculó la diferencia de gravedad entre las estaciones y las respectivas bases, (Anexo No. 1).
- * *Gravedad Observada Go.* Partiendo del valor de la base, y conociendo la diferencia de gravedad entre las estaciones y la base, se calculó el valor de la gravedad observada para cada estación, (Anexo1).

Base	Latitud	Longitud	Altura	G. Observada
CD-853	4.57	74.09	2604.230	977287.31
CD-729	4.59	74.23	2561.050	977390.16
CD-693	4.656	74.087	2552.280	977389.00
CD-683	4.63	74.109	2554.730	977388.741
CD-639	4.65	74.16	2543.400	977387.398
CD-619	4.60	74.189	2554.080	977389.406
CD-612	4.352	74.085	2555.470	977389.93
CD-600	4.509	74.116	2706.320	977356.43
CD-574	4.49	74.089	3085.050	977287.31
CD-551	4.601	74.066	2702.640	977365.34
CD-404	4.731	74.130	2545.530	977377.77
CT-404	4.730	74.084	2706.420	977355.52
CD-354	4.738	74.035	2554.940	977382.51
CD-262	4.769	74.083	2555.510	977385.92
CD-241	4.817	74.079	2556.420	977380.85
CD-227	4.815	74.040	2554.720	977385.30
CD-171	4.774	74.044	2550.870	977384.53
CD-123	4.658	74.124	2546.290	977386.71
CD-35	4.683	74.043	2562.960	977387.98

Tabla No.5: Ubicación y Gravedad Observada para las estaciones base

2.1.4.5 Cálculo de gravedad teórica, Gt:

Con el objetivo de homogeneizar e integrar la información al proyecto Mapa gravimétrico de Colombia, (actualmente en ejecución por el INGEOMINAS e IGAC), los cálculos de gravedad teórica para el presente trabajo se realizaron con base en la Fórmula Internacional de la Gravedad de 1971, (Anexo No 2), descrita a continuación:

$$Gt = 978.033.27(1+0.005278994 \text{ Sen}^2 \varphi - 0.0000059 \text{ Sen}^2 2 \varphi)$$

Donde : φ es la latitud de cada estación

2.1.4.6 Correcciones gravimétricas. Al valor de gravedad observada es necesario aplicarle ciertas correcciones, con el fin de eliminar efectos de gravedad que no correspondan a la influencia de las masas de interés, y que por lo tanto pueden enmascarar los resultados dificultando cualquier interpretación.

* **Corrección por latitud, CL.** Se aplica para eliminar el efecto de variación de la gravedad por la latitud, teniendo en cuenta que el radio de la Tierra disminuye del ecuador a los polos, y la gravedad tiene una variación contraria . Dado que el presente estudio es de carácter local, esta corrección se realizó tomando como base de referencia la estación gravimétrica del Observatorio Astronómico de la Universidad Nacional, (Anexo 3, tabla 4). La corrección por latitud fue calculada según la siguiente formula:

$$CL = -(Gt - Gr)$$

Donde **Gt** es la gravedad teórica de cada estación y **Gr** es la gravedad teórica de la estación de referencia, en este caso el Observatorio Astronómico. La corrección es

negativa, si se encuentra en una latitud mayor que la de la estación de referencia y positiva, si se encuentra en una latitud menor.

- * *Corrección de aire libre, CAL:* se aplica teniendo en cuenta que la gravedad varía inversamente con la altura con un gradiente medio aproximado de 0.3086 mGal/m. En el presente estudio se utilizó como altitud de referencia o dátum la altura correspondiente a la estación gravimétrica del Observatorio de la Universidad Nacional, (Anexo 3). Esta corrección se calculó según la siguiente fórmula:

$$CAL = 0.3086 (h - h^{\circ})$$

Donde h es la altura en metros de la estación medida, h° es la altura de la estación de referencia (Observatorio Astronómico), **0.3086** es el gradiente medio de variación de la gravedad por metro de altura, dado en mGal/m

- * *Corrección de Bouguer, CB.* Se realiza para corregir los efectos de las masas que se encuentran entre la estación de referencia, y la estación de medida, y la cual depende de la densidad promedio de los materiales existentes entre las estaciones, asumiendo que éstos conforman una lámina homogénea de espesor igual a la diferencia de altura entre las dos estaciones. Con el objetivo de encontrar la densidad más apropiada para la aplicación de la corrección se utilizaron varias densidades, siendo 2.6 gr/cc el valor seleccionado, (Anexo 3). La corrección de Bouguer se calculó con base en la siguiente expresión:

$$C.B = -0.0419d (h-h^{\circ})$$

Donde el factor **0.0419** es la variación en miligales por metro de material con densidad d , en gr/cc.

± *Corrección topográfica, CT.* Esta corrección tiene por objetivo corregir la disminución de los valores de gravedad, causada por la atracción de elementos topográficos (depresiones o elevaciones), aledañas al punto de medición. Dependiendo del radio a la estación, existen varios niveles de corrección topográfica: cercana (hasta 53.3 m de radio), media (hasta 2615 m) y lejana (mayor de 2615 m). Para el presente proyecto se realizó la corrección hasta el sector I de la tabla de Hammer (radio = 4454 m), para lo cual se utilizó la topografía digitalizada de las planchas topográficas del IGAC a escala 1:25.000 y 1:50.000 de la Sabana de Bogotá y sus alrededores, (Anexo No 4).

2.1.4.7 Cálculo de la Anomalía de Bouguer total.

Una vez realizadas todas las correcciones anteriormente descritas, se calculó el valor de la anomalía de Bouguer total, cuyo valor es la manifestación gravimétrica directa de la distribución real de las masas en la zona de estudio. La anomalía de Bouguer Total se calculó por medio de la siguiente expresión : (Anexo No. 5).

$$\Delta G_{BT} = G_{obs} - G_t + CL + CAL - CB + CT$$

Donde **G_{obs}** es la gravedad observada, **G_t** es la gravedad teórica, **CL** es la corrección por latitud y **CAL** es la corrección de aire libre **CB** es la corrección de Bouguer y **CT** es la corrección topográfica.

2.2 MAPAS GRAVIMÉTRICOS

Para la realización y procesamiento de todos los mapas gravimétricos se utilizó el software especializado para el manejo de información geofísica, GEOSOFT, el cual permite la manipulación de la información procesada hasta generar los diferentes mapas que se presentan en el presente informe. Además, permite la complementación de los mismos con información adicional, como es el caso de información de pozos, información geológica y otra información geofísica.

2.2.1 Mapa de gravedad observada (Fig 16). Este mapa muestra en forma general como varía la gravedad con la altura en el área de estudio. De acuerdo con la Ley de Newton el campo gravimétrico se comporta en forma inversa a la topografía. Es decir, a mayor altura el valor de la gravedad será menor ya que el radio de la Tierra R es mayor y a menor altura el valor de la gravedad será mayor por estar más cerca el punto de medición al centro de la Tierra. Por esta razón los altos topográficos se comportan como mínimos gravimétricos (tonalidades azules) y viceversa (tonalidades rojas). Sin embargo, en la parte plana, ya se observan en este mapa las anomalías gravimétricas más relevantes, como es el caso al NW del área de estudio y al W y E de los cerros de Suba, en donde los tonos verdes y amarillos, respectivamente, están mostrando las partes más profundas de la cuenca.

2.2.2 Mapa de anomalía de Bouguer total (Fig.17, en bolsillo): Este mapa se obtuvo con los datos gravimétricos totalmente corregidos. Las características más importantes en este mapa, están asociadas con mínimos gravimétricos, máximos gravimétricos, y zonas de altos gradientes gravimétricos, (Tabla 6).

* *Mínimos gravimétricos.* Corresponden a las partes más profundas de la cuenca. El principal mínimo gravimétrico se encuentra al NW de la zona de estudio, y define una amplia zona limitada al N y NE por los cerros de Cota y Juaica, y los

cerros de Suba, y hacia el S y SW, por las poblaciones de Cota, Mosquera y Madrid. Esta zona es de unos 16 Km de largo en dirección W-E por 13 Km de ancho en dirección N-S. Otro mínimo gravimétrico de importancia, define una cuenca alargada entre los cerros de Suba y los cerros Orientales, con una dirección aproximada N-S.

- * *Máximos gravimétricos.* Están directamente relacionados con los altos topográficos o con zonas en donde la roca está muy cerca de la superficie o aflorando. Los principales máximos gravimétricos están relacionados con los cerros de Cota, cerros de Suba, cerros orientales y los cerros al sur de Bogotá. Se puede observar en este mapa la continuación bajo el subsuelo de algunos de estos cerros, como es el caso de los cerros de Suba, los cuales continúan bajo la superficie hacia el norte para unirse finalmente con los cerros orientales.

- * *Gradientes gravimétricos.* En general, la cuenca profunda está limitada por zonas de altos gradientes gravimétricos, que definen un dominio en donde los valores de gravedad se presentan relativamente altos, comparados con un dominio en donde la gravedad tiene los mínimos valores. En general se pueden distinguir dos direcciones de gradientes: una dirección aproximada N-S, con una componente marcada SW-NE, y uno perpendicular al anterior con dirección NW-SE.

2.2.3 *Mapa de anomalía residual, (Fig.18, en bolsillo).* Este mapa se obtiene, al sustraerle al mapa de anomalía de Bouguer total, el efecto de las estructuras regionales profundas sobre las cuales se asienta la cuenca de la Sabana de Bogotá. Este mapa se realiza con el objetivo, de resaltar los efectos gravimétricos causados por los elementos estructurales más superficiales y /o locales, los cuales son de interés para el presente trabajo. Para tal efecto se realizó un análisis de tendencias para el cálculo de la componente regional del campo gravimétrico a través de una superficie de segundo orden.

El campo gravimétrico residual se halla por la siguiente expresión:

$$G(x,y)_{\text{residual}} = G(x,y)_{\text{total}} - G(x,y)_{\text{regional}}$$

Donde : $G(x,y)_{\text{residual}}$ = Campo gravimétrico residual,

$G(x,y)_{\text{total}}$ = Campo gravimétrico total,

$G(x,y)_{\text{regional}}$ = Campo gravimétrico regional.

La superficie de segundo orden para la componente regional fue la siguiente:

$$G(x,y)_{\text{regional}} = C_0 + C_1 x + C_2 y + C_3 x^2 + C_4 x y + C_5 y^2$$

Donde: $C_0 = 1.106093E+004$,

$C_1 = -2.752366E-002$,

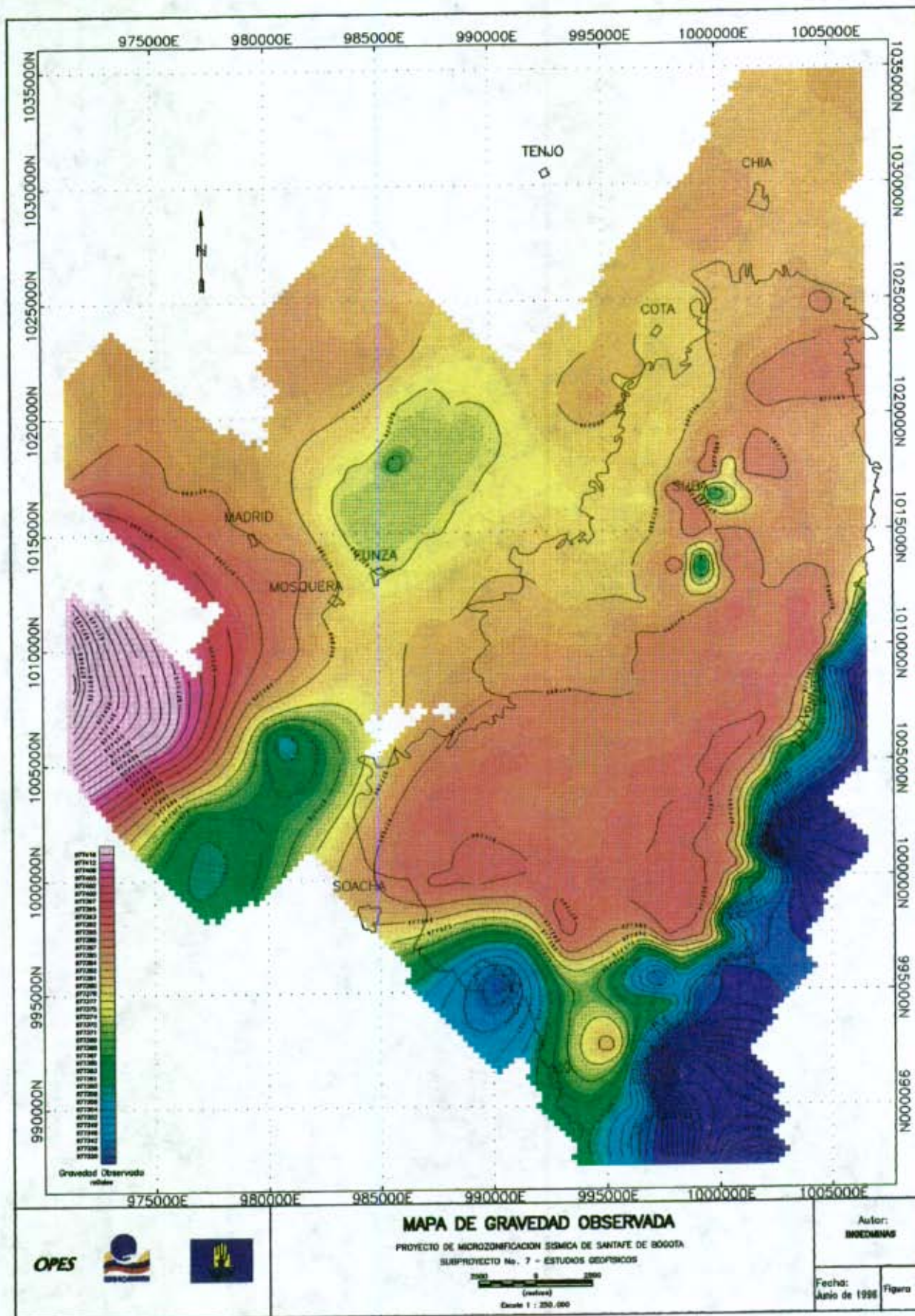
$C_2 = 4.225547E-003$,

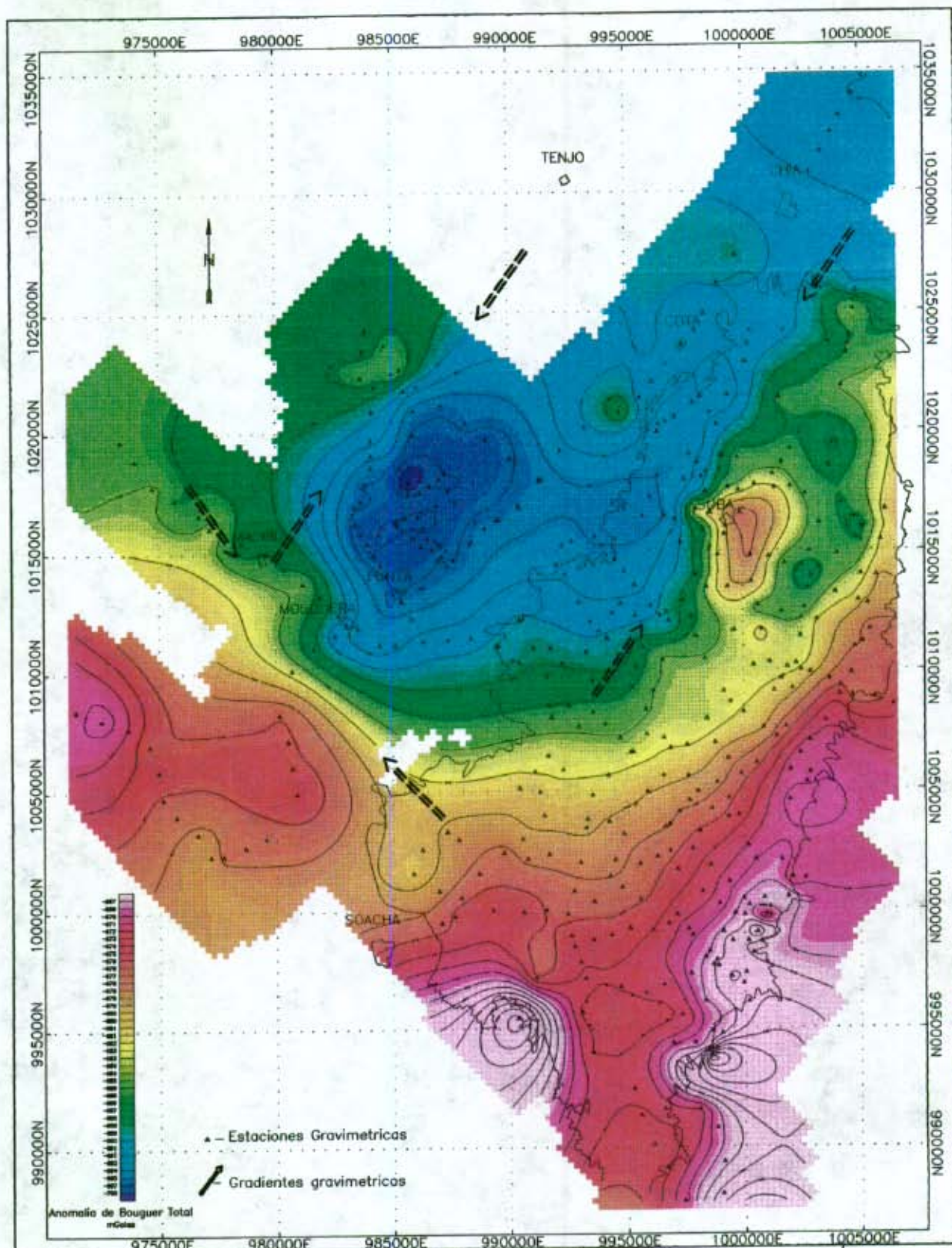
$C_3 = 1.869405E-008$,

$C_4 = -9.325518E-009$,

$C_5 = 2.195789E-009$.

En este mapa se observa la delimitación de las cuencas presentes en el área de estudio, lo que en el mapa de Anomalía de Bouguer aún no se observaba. En términos generales se observan más detalles de la cuenca (tabla 6).





MAPA DE ANOMALIA DE BOUGUER TOTAL

(DENSIDAD 2.6 gr/cc)
 PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTIAFE DE BOGOTA

SUBPROYECTO No. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS

2000 0 2000
 (metros)
 Escala 1 : 250.000

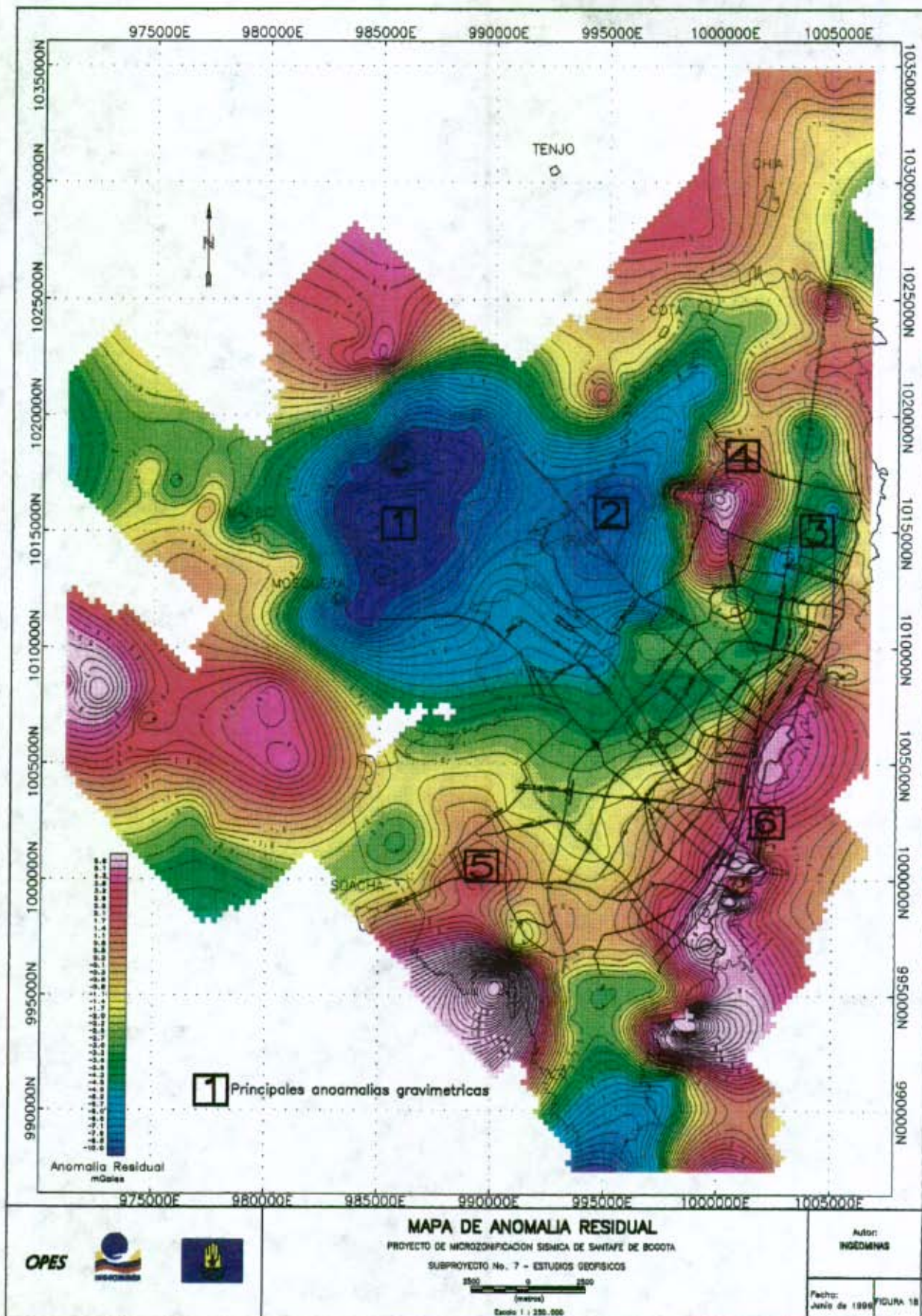
Autor:
 INGEMINAS

Fecha:
 Junio de 1996

Figure 17

OPES





2.3 INTERPRETACIÓN

En este punto se realizará sólo la interpretación cualitativa. La interpretación cuantitativa se realizará en el numeral 4. *Modelo geológico-geofísico*, ya que para tal fin se necesitó integrar los resultados de todos los estudios geofísicos.

Mapas Sombreados, (Fig. 19-20, en bolsillo). Con el fin de facilitar la interpretación cualitativa de los datos gravimétricos éstos se sometieron a la técnica de sombreado, la cual consiste en "iluminar" el mapa Anomalía Residual desde diferentes ángulos de inclinación y azimuts.

La Figura 19 muestra el mapa de Anomalía Residual iluminado con ángulo de inclinación de 30° y azimut de 270° con respecto al norte geográfico medido en el sentido del movimiento de las manecillas del reloj. La iluminación de la Figura 20 es desde un ángulo de 30° y un azimut de 20°.

La Figura 19 permitió resaltar los lineamientos en un sentido general N-S; mientras que la Figura 20 los lineamientos NW-SE.

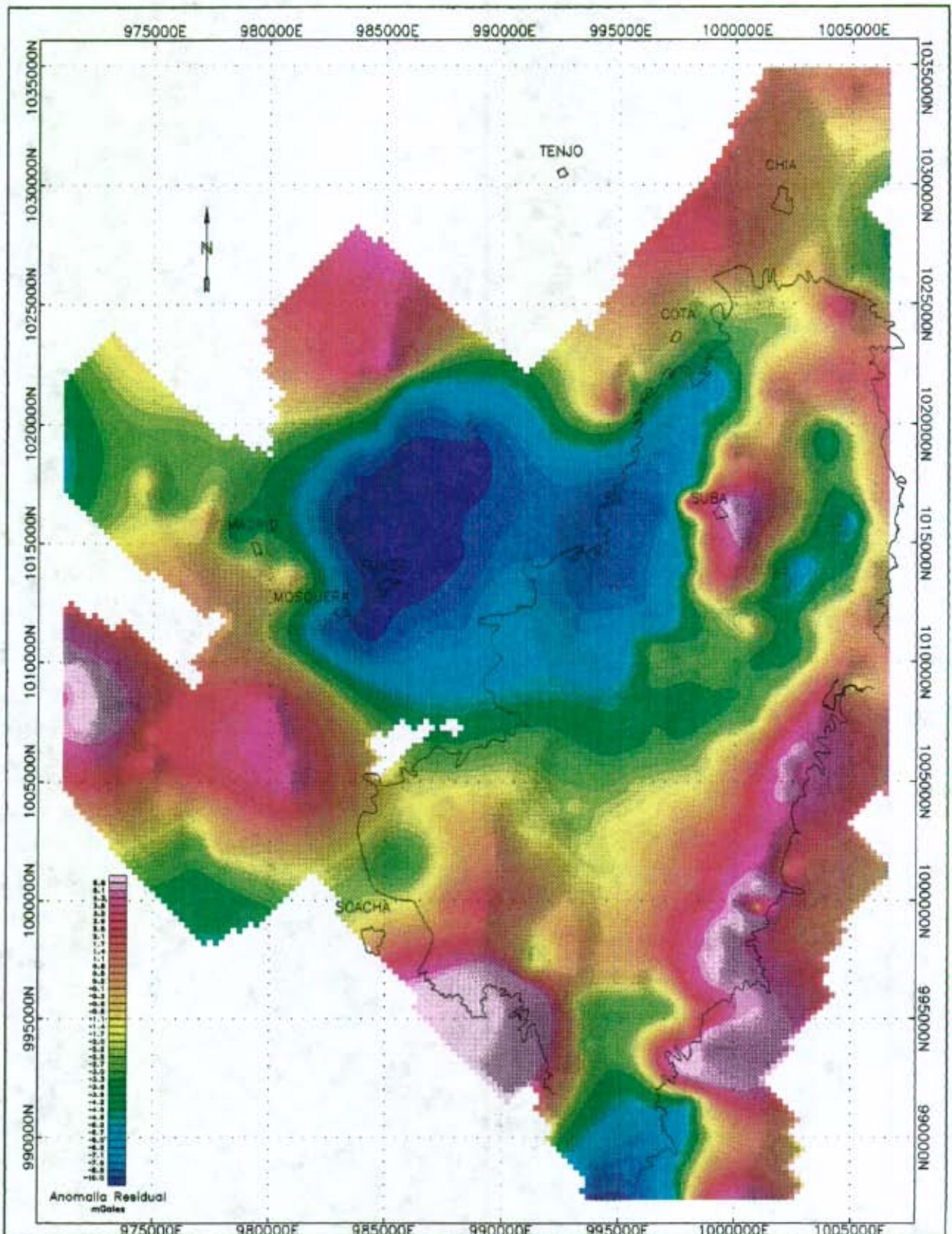
La utilización de la técnica de sombreado permite simular una visión tridimensional, en la cual se pueden observar en profundidad las variaciones de gravedad y asociarlas con las características estructurales de la cuenca, tales como desplazamientos y /o plegamientos.

De acuerdo con lo observado en estos mapas, y en términos generales la cuenca de la Sabana de Bogotá puede dividirse en dos subcuencas. La más profunda de ellas está localizada al NW del área de estudio, limitada al Oeste por los cerros de El Rosal, al Este por el Río Bogotá y el Río Fucha, hasta la intersección de este último con la Avenida de Las Américas para posteriormente continuar su límite Este con una orientación NE-SW 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

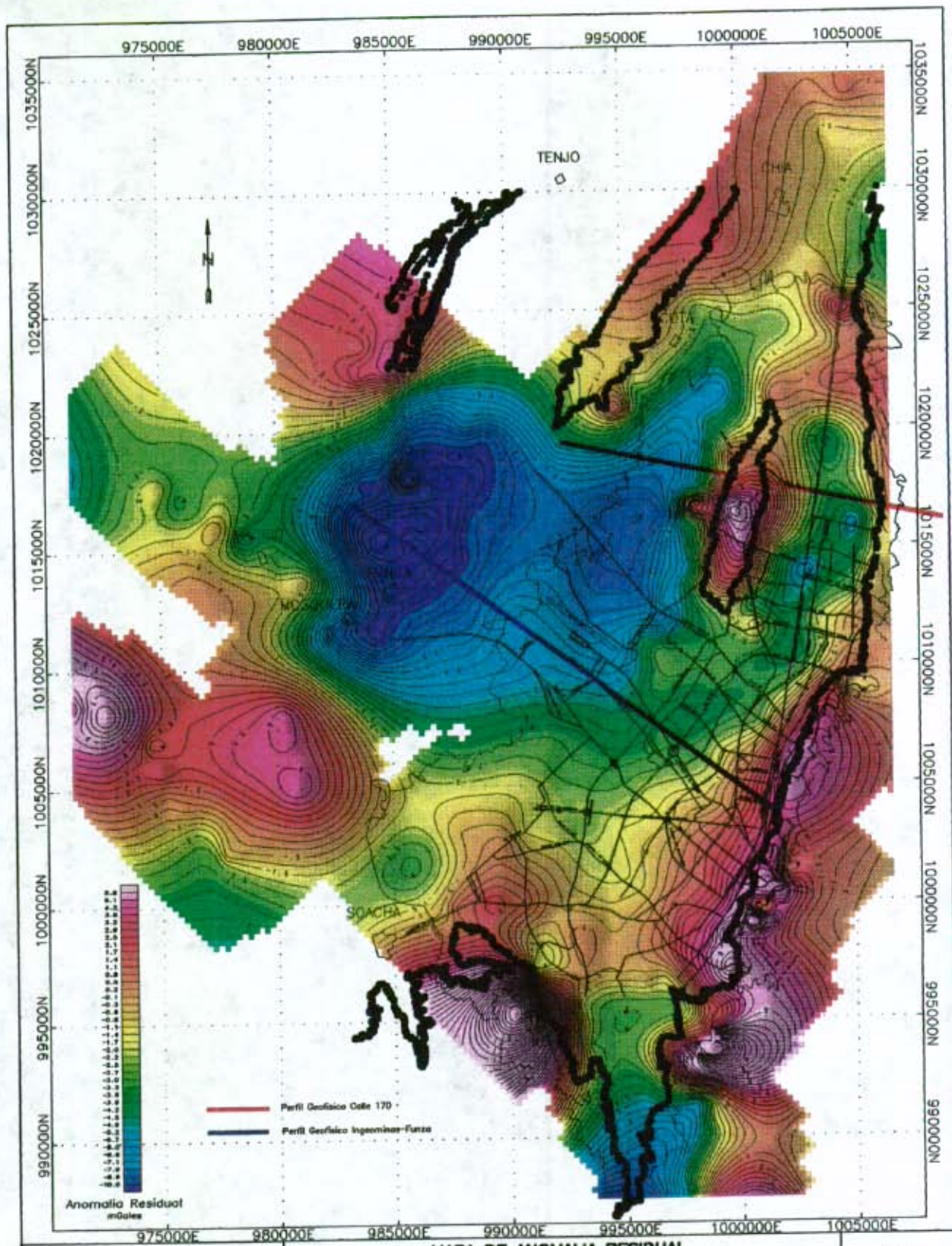
con una orientación NE-SW hacia los cerros de Bosa. Al Norte esta cuenca estaría limitada por la conjunción de los cerros de Tenjo y los cerros de Cota y al Sur por los cerros de Madrid. Esta subcuenca alcanza su mayor profundidad a 5 km al norte del municipio de Funza.

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.

Mapa de Gradiente Horizontal, (Fig. 21). Este mapa permite definir con mayor claridad las estructuras, su continuación en profundidad y los límites de las subcuencas arriba descritas. Así se observa la continuidad en profundidad de los cerros de Cota con los cerros que afloran en el sector de Bosa y que estarían dividiendo la cuenca de Santafé de Bogotá en dos subcuencas. A la altura de la intersección entre la Calle 13 con la Avenida Boyacá el gradiente horizontal es prácticamente igual a cero lo que nos indica que la profundidad de la roca en ese sector no es muy variable. De igual manera, en la parte norte de los cerros de Suba, se observa la continuidad bajo el subsuelo de esta estructura hasta unirse con los cerros Orientales.



	MAPA DE ANOMALIA RESIDUAL Mapa Sombreado ANGLULO DE ILUMINACION 30° AZIMUT DE ILUMINACION 270° PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA SUBPROYECTO NO. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS 2500 0 2500 (metros) Escala 1 : 250.000	Autor: INGEOMINAS
	Fecha: Junio de 1998	Figura 19



MAPA DE ANOMALIA RESIDUAL
Mapa Sombreado

ANGULO DE ILUMINACION 30°
AZIMUT DE ILUMINACION 270°
PROYECTO DE MICRODIFICACION SIMONA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO No. 7 - ESTUDIOS GEOPISICOS

2000 0 2000
[meters]
Escala 1 : 250.000

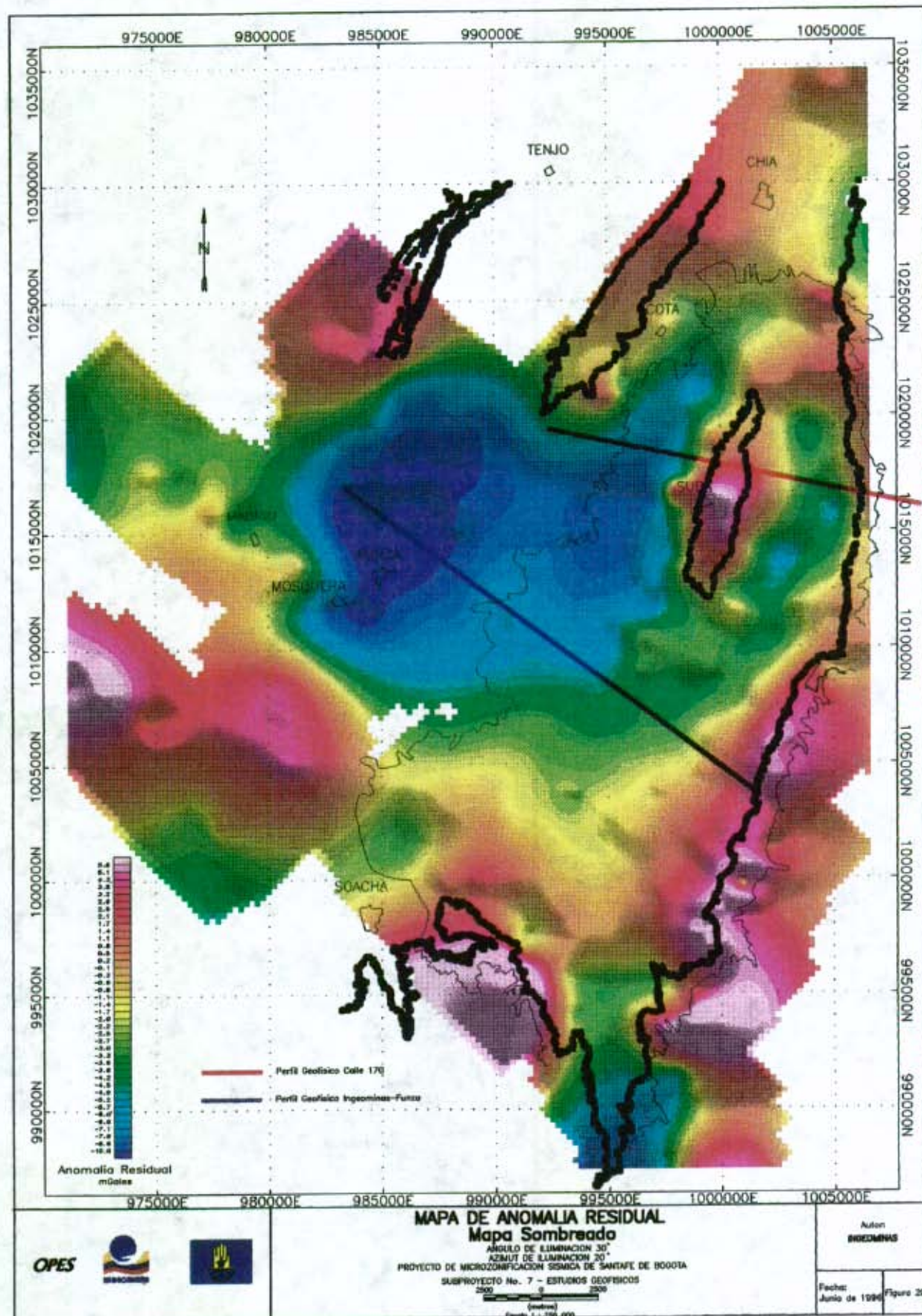
Autor:
INGEOMINAS

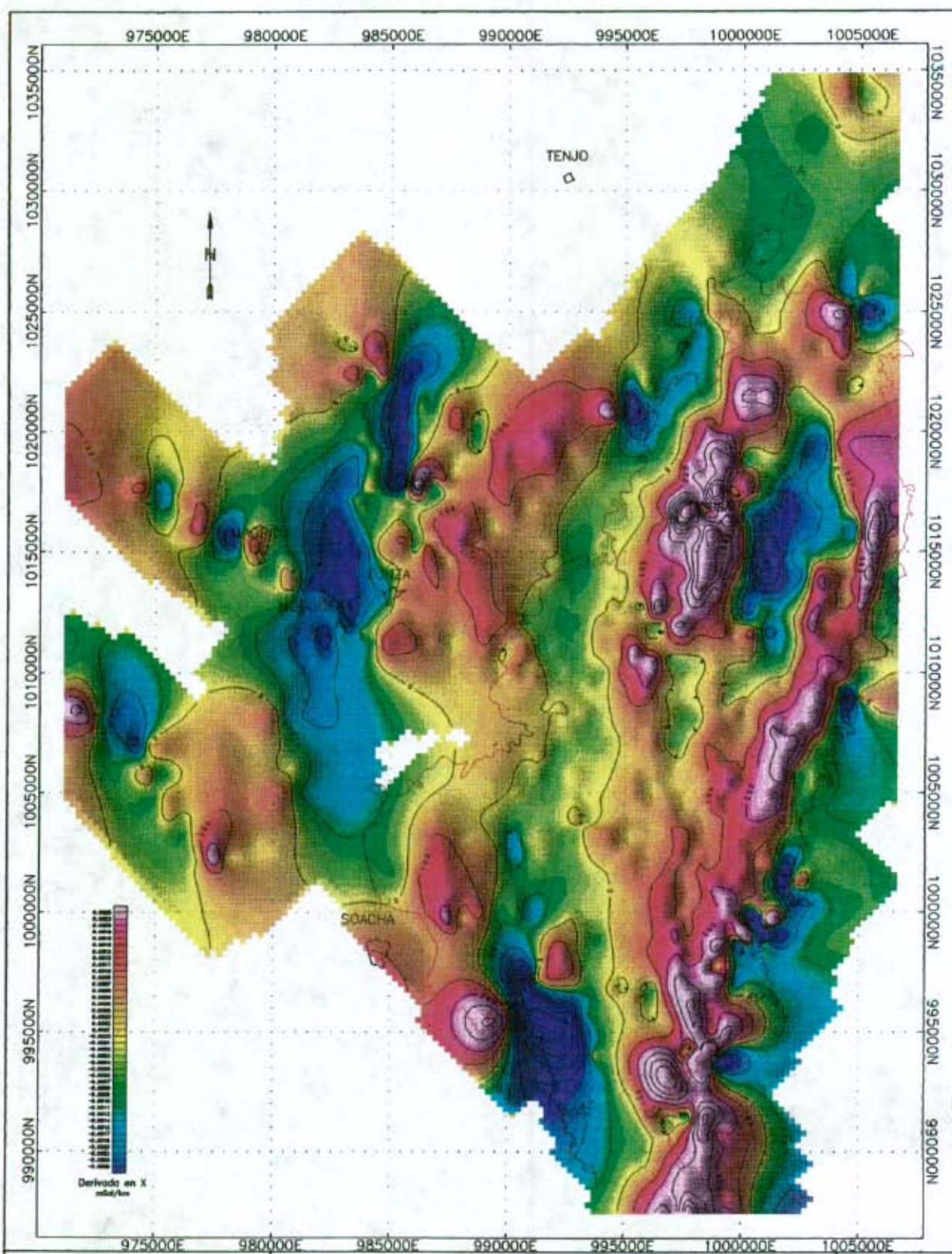
Fecha:
Julio de 1990

Figura 19

OPES







OPES



MAPA DE GRADIENTE HORIZONTAL EN X

PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTAFE DE BOGOTA
SUBPROYECTO NO. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS

2000 0 2000
(metros)
Escala 1 : 250.000

Autor:
INGOMINAS

Fecha:
Junio de 1998

Figura 21

ESTUDIOS DE REFRACCION SISMICA

Como un primer paso para el diseño y ejecución de los estudios de refracción sísmica fue necesario la realización de "test" de ruidos, ya que el área de estudio presenta condiciones de ruido ambiental bastante especiales. En particular, los microtremores, inducidos en gran parte por el transporte urbano, limitaron en forma considerable la longitud de los arreglos de geófonos utilizados y por ende la resolución y la profundidad de investigación del método.

3.1 METODOLOGÍA

3.1.1 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 Sísmica, (Fig. 22, Tabla 7).

Se utilizó un sísmógrafo 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.

Las ondas fueron generadas por percusión con un martillo de 16 libras, apilando en promedio 25 golpes por registro.

Se utilizó la metodología de perfiles reversos; es decir, manteniendo el arreglo de geófonos inmóvil, se generan y se registran las ondas en los extremos del mismo.

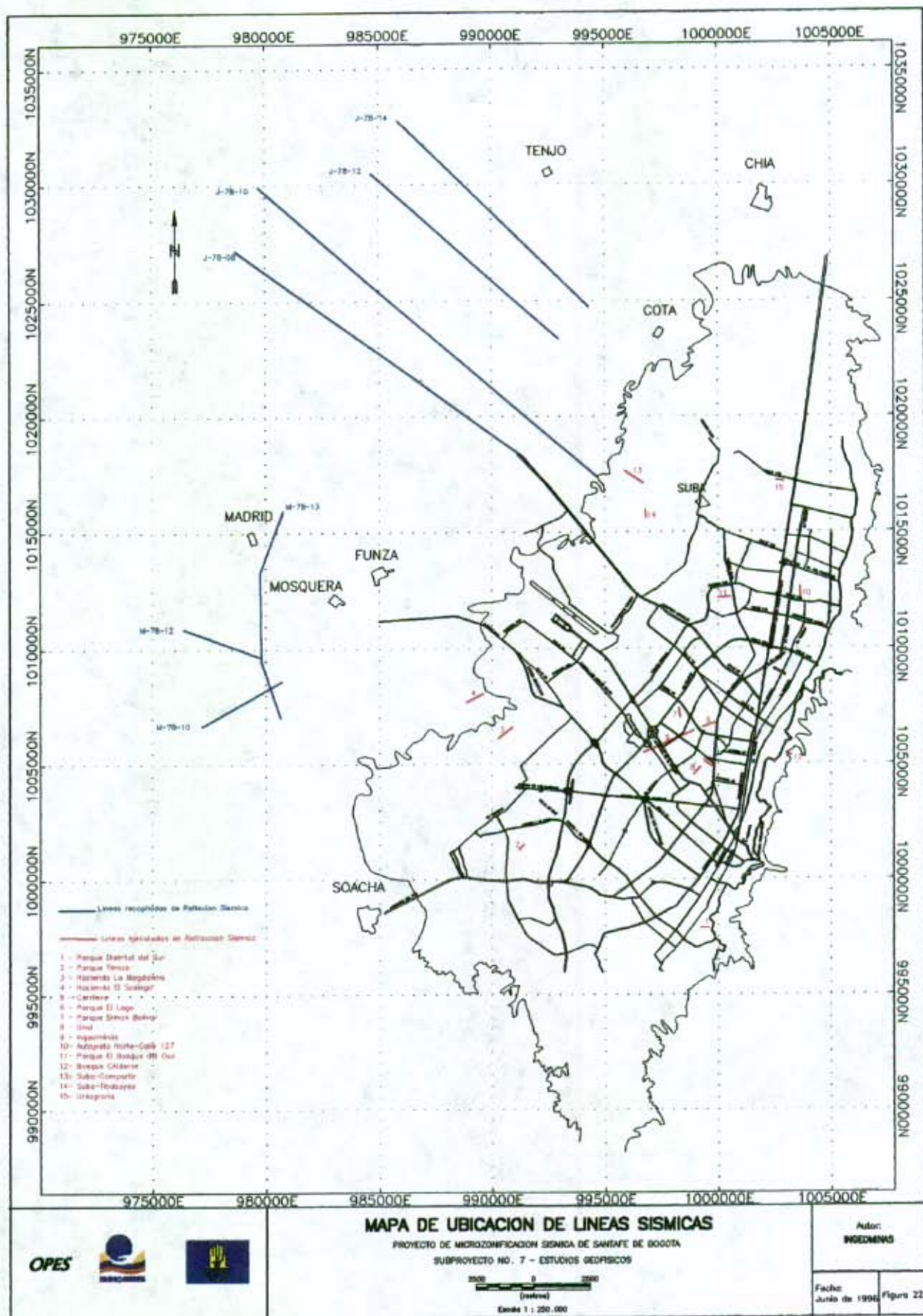
Para la generación y registro de las ondas P, la geometría de las líneas sísmicas fue de tipo Z-Z; o sea, las ondas fueron generadas con golpes verticales a la superficie terrestre y se registró la componente vertical de las mismas. Para la generación y registro de las ondas S, la geometría de las líneas 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.

Debido al gran ruido causado por los microtemores se hizo necesaria la utilización de filtros pasabandas de 25 Hz-250 Hz y 35 Hz-250 Hz.

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; o sea, si se registraban o no a una determinada distancia los primeros arribos de la onda de refracción generada.

LÍNEA SÍSMICA	TIPO DE ONDA	LONGITUD M
PARQUE DISTRITAL	P	280
DEL SUR	S	280
PARQUE TIMIZA	P	280
HACIENDA LA MAGDALENA	P	875
HACIENDA EL SOSIEGO	P	875
	S	380
CARRILERA	P	2500
UNAL	P	420
INGEOMINAS	P	230
	S	230
PARQUE SIMÓN BOLÍVAR	P	345
	S	345
PARQUE DEL LAGO	P	450
AUTOPISTA NORTE-CALLE 127	P	330
PARQUE EL BOSQUE DEL OSO	P	400
	S	130
BOSQUE CALDERÓN	P	240
	S	240
SUBA-COMPARTIR	P	750
SUBA-TIBABUYES	P	280
UNIAGRARIA	P	130
	S	130
TOTAL		10120

Tabla No. 7. Sectores de toma de datos de Refracción Sísmica.



3.1.2 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.

Para el procesamiento se realizaron los siguientes pasos (Fig.23):

1. Obtención de los tiempos de los primeros arribos de la onda de refracción por medio del programa SIPIK.
2. Creación de las curvas tiempo-distancia y asignación de las capas observadas por medio del programa SIPIN.
3. Interpretación de las curvas tiempo-distancia y obtención de los valores de las velocidades y profundidades de las diferentes capas por medio del programa SIPT2.
4. Edición de los datos por medio del programa SIPEDT y reinterpretación de los mismos con el programa SIPT2.

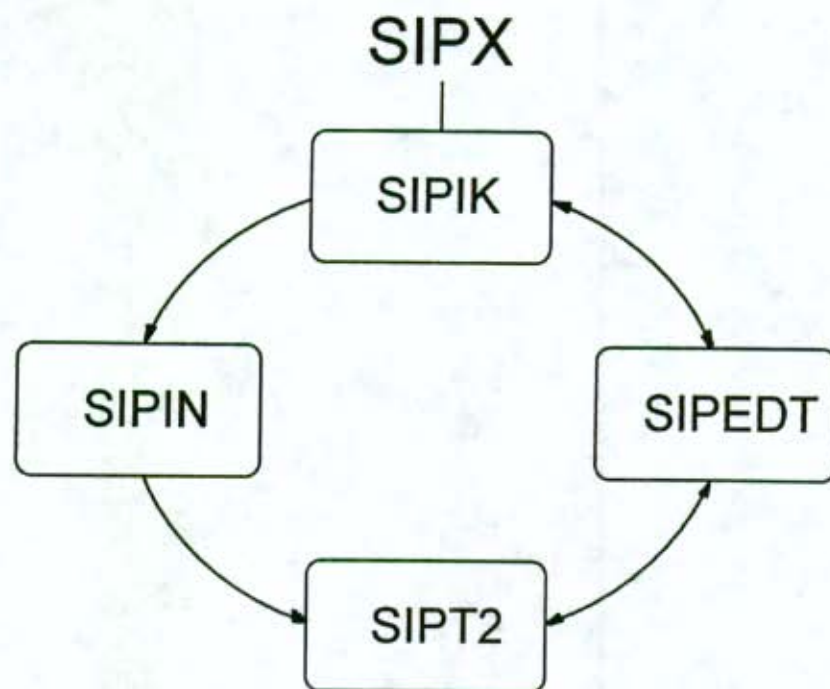


Fig. 23 Diagrama de flujo del procesamiento de los datos de Refracción Sísmica.

3.1.3 Resultados del procesamiento de los datos sísmicos.

Como resultado del procesamiento de los datos de refracción sísmica se obtuvieron valores de las profundidades de las diferentes interfases detectadas, así como sus respectivos valores de las velocidades de compresión V_p y de corte V_s .

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.

LINEA J-78-08

SECCIÓN FINAL

GEOSOURCE

J-78-08

ESTACIONES 2385-2535

ECOPETROL

LA SABANA

DATUM 2550M

CONVENCIONES



Formación Tiliatá



Formación Regadera



Formación Bogotá



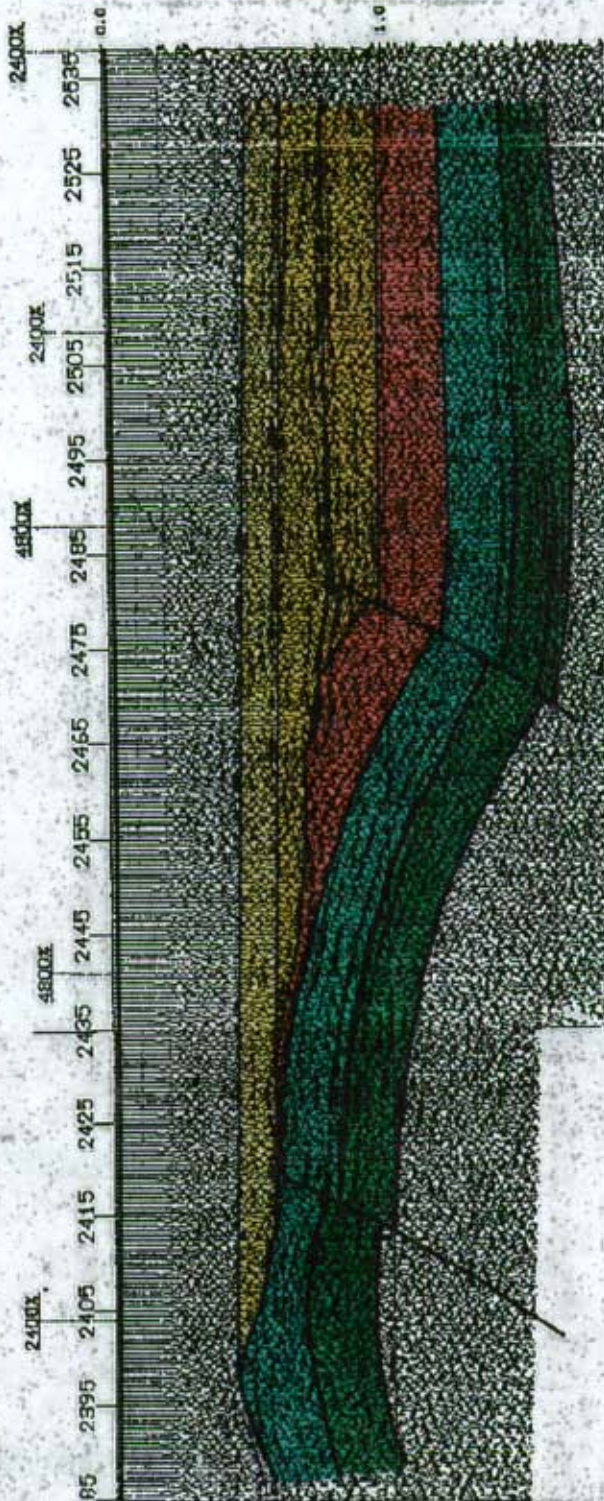
Formación Guacuas



Formación Guadalupe



Formación Chipaque



LINEA SÍSMICA J-78-08
 Proyecto de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá
 Subproyecto No. 7 - Estudios Geofísicos

FECHA:
Junio de 1996

Figura 24

3.2.2 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 pudo detectar 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 central, 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, (Fig. 25a a 25m).

En la tabla 8a y 8b se presentan respectivamente los valores de V_p , V_s y V_s/V_p medidos y V_p , V_s y V_s/V_p consultados en Liajovitskii F.M y otros, 1989.

Figura No. 25: Columnas sísmicas generalizadas

Fig.25a. Parque Distrital del Sur

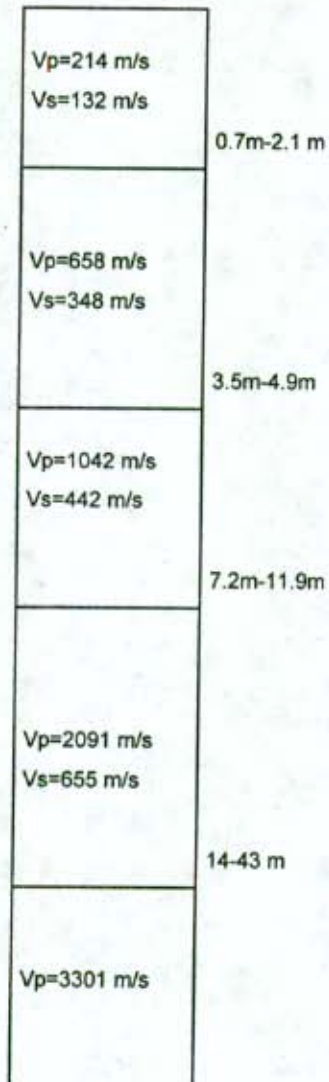


Fig.25b. Parque Timiza

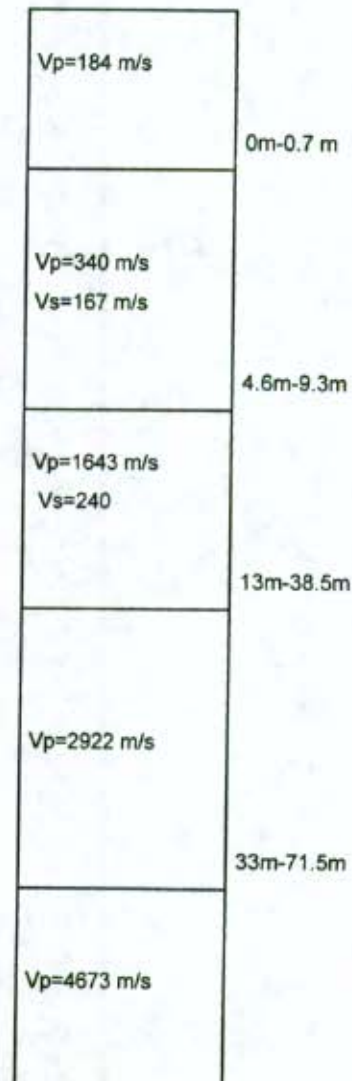


Fig.25c. Hacienda La Magdalena

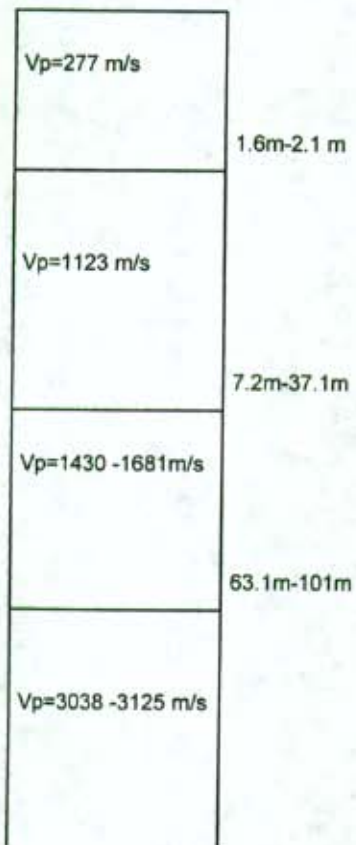


Fig.25d. Hacienda El Sosiego

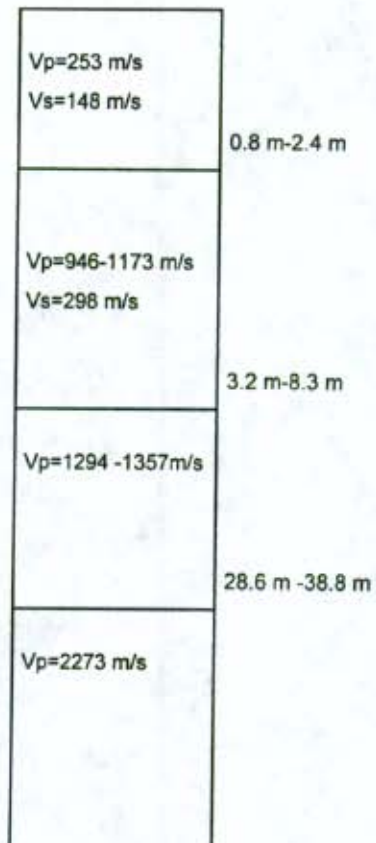


Fig.25e. Ingeominas

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	19.9m-27.2m
Vp=1755 m/s	

Fig. 25f. Universidad Nacional

Vp=369 m/s	1.9m-5.8 m
Vp=862-1040 m/s	11.8m-16.7m
Vp=1134 -1459 m/s	

Fig. 25g. Bosque Calderón

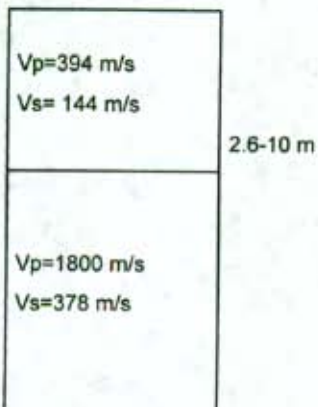


Fig. 25h. Parque Simón Bolívar

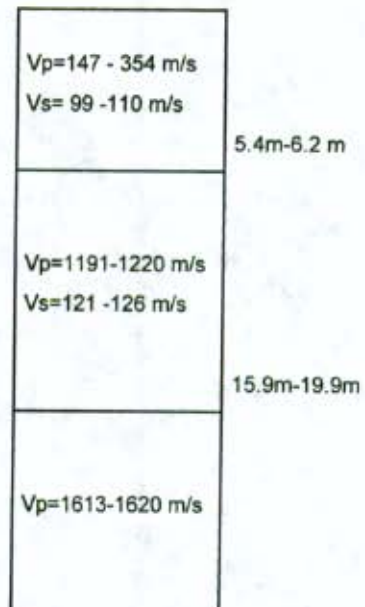


Fig.25i. Parque El Lago-Carrilera

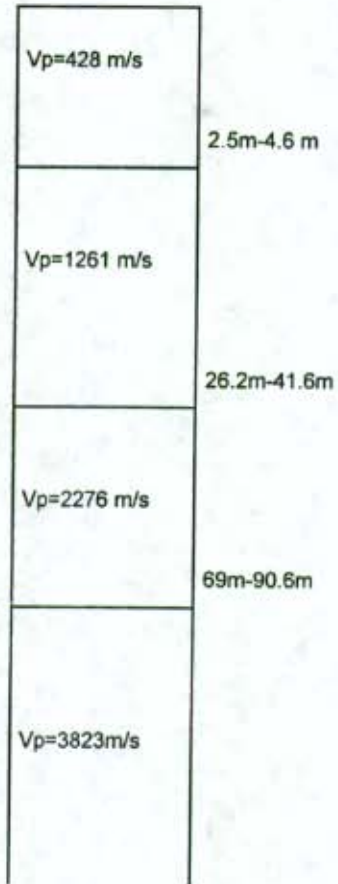


Fig.25j. Calle 127-Autopista Norte

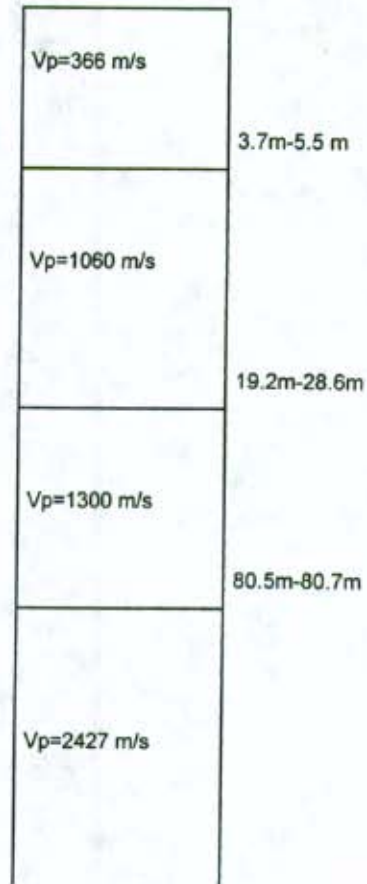


Fig. 25k. Parque Bosque del Oso (Niza Antigua).

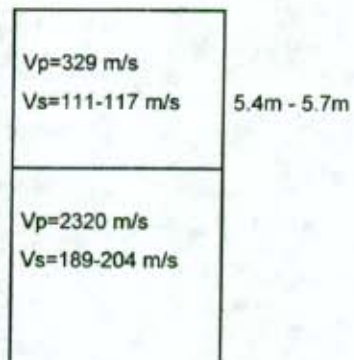


Fig.25l. Suba-Compartir

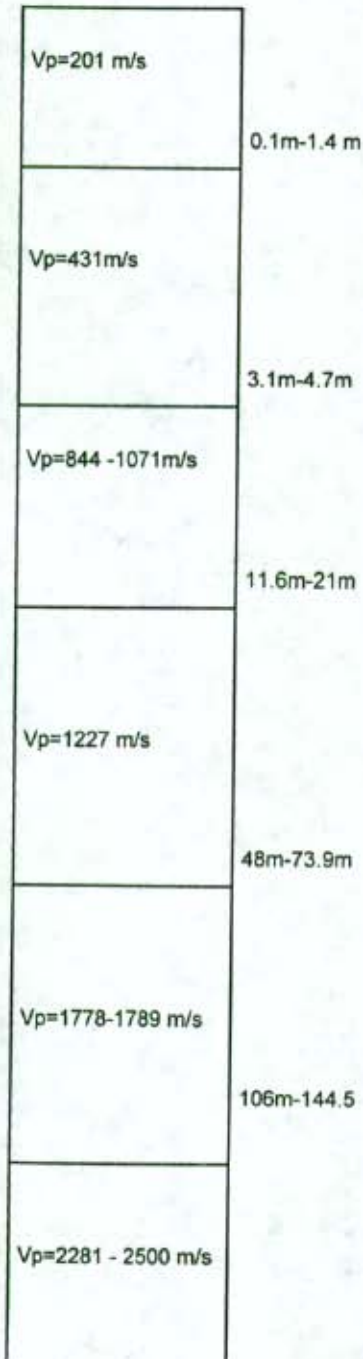


Fig.25m. Suba-Tibabuyes

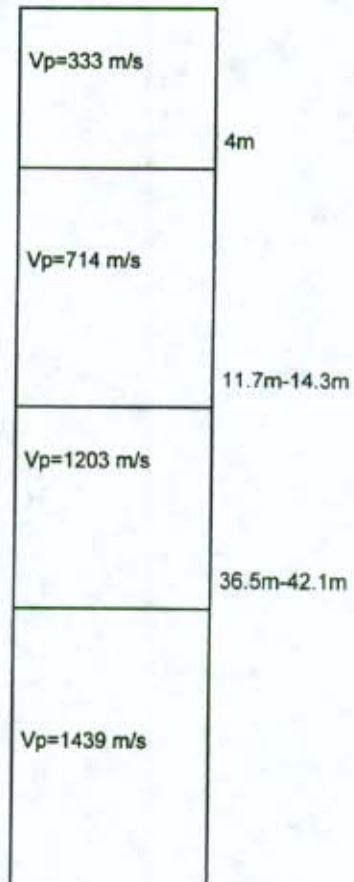


Tabla 8A. Valores de Vp, Vs, Vs/Vp medidos.

Sector	Tipo de roca	Vp, m/s	Vs, m/s	Vs/Vp
Parque Distrital del Sur	Suelo con contenido orgánico	214	132	0.62
	Arenas no saturadas	658	348	0.53
	Arcillas no saturadas	1042	442	0.42
	Arenas saturadas	2091	655	0.31
	Areniscas	3301		
Parque Timiza	Suelo con contenido orgánico	184		
	Arenas no saturadas	340	167	0.49
	Arenas saturadas	1643	240	0.15
	Arenas compactas	2922		
	Arenas, Gravas muy compactas	4673		
Hacienda La Magdalena	Suelo con contenido orgánico	277		
	Arcillas	1123		
	Arenas saturadas? Arcillas ?	1430 1681		
	Areniscas?	3038 3125		

Sector	Tipo de roca	Vp, m/s	Vs, m/s	Vs/V p
Hacienda El Sosiego	Suelo con contenido orgánico	253	148	0.58
	Arcillas	946- 1173	298	0.25- 0.32
	Arenas saturadas? Arcillas?	1294- 1357		
	Areniscas?	2273		
Unal	Suelo con contenido orgánico	369		
	Arcillas	862- 1040		
	Arcillas	1134- 1459		
Ingeominas	Suelo con contenido orgánico	133	72	0.54
	Arcillas	333 438	121	0.28 0.36
	Arcillas	879	152 186	0.17 0.21
	Arcillas	1224 1370	281	0.21 0.23
	Arenas	1755		

Sector	Tipo de roca	Vp, m/s	Vs, m/s	Vs/Vp
Parque Simón Bolívar	Suelo con contenido orgánico	147	99	0.67
	Arcillas? Limos Arcillosos?	354	110	0.31
	Arcillas	1191 1220	121 126	0.10 0.10
	Arcillas? Arenas saturadas?	1613 1620		
Parque del Lago	Arcillas? Limos Arcillosos?	428		
	Arcillas	1261		
	Arenas saturadas	2276		
	Areniscas?	3823		
Calle 127- Autopista Norte	Arcillas? Limos Arcillosos?	366		
	Arcillas	1060 1300		
	Arenas saturadas	2427		

Sector	Tipo de roca	Vp, m/s	Vs, m/s	Vs/Vp
Suba-Compartir	Suelo con contenido orgánico	201		
	Arcillas	431		
	Arcillas	844 1071		
	Arcillas	1227		
	Limos arcillosos?	1778 1789		
	Arenas saturadas?			
Suba-Tibabuyes	Arenas saturadas?	2281 2500		
	Arcillolitas?			
	Arcillas	333		
	Arcillas	714		
Bosque Calderón	Arcillas	1203		
	Arcillas	1439		
	Coluvión	394	144	0.37
Parque Bosque del Oso (Niza Antigua)	Arcillolita	1800	378	0.21
	Arcillas?	329	111- 117	0.34- 0.36
Parque Bosque del Oso (Niza Antigua)	Arenas compactas?	2320	189- 204	0.09- 0.08
	Arcillolita?			

**Tabla 8b. Métodos Geofísicos Aplicados a la Ingeniería,
Liajovitskii F.M y otros.**

Estado de la roca	Tipo de Roca	Vp, m/s	Vs, m/s	Vs/Vp
No saturadas	Suelo con contenido orgánico	100-300	50-200	0.50-0.70
	Arenas	200-700	100-400	0.50-0.70
	Limos arenosos	250-600	100-300	0.45-0.60
	Limos arcillosos	300-700	150-350	0.30-0.55
	Aluvión de arcilla margosa	400-700	200-400	0.45-0.60
	Arcillas y arcillolitas	400-1800	100-700	0.10-0.35
	Areniscas	800-4000	500-2500	0.50-0.70
	Calizas	1000-4500	500-2800	0.50-0.65
Saturadas	Arenas	1500-2000	150-300	0.07-0.20
	Limos arenosos	1450-1800	120-280	0.07-0.15
	Limos arcillosos	1500-1900	100-250	0.05-0.15
	Arcillas y arcillolitas	1800-2500	100-400	0.05-0.12
	Areniscas	1800-4500	500-2500	0.40-0.60
	Calizas	2000-5000	500-2800	0.35-0.55

Modelo Geológico-Geofísico

Para la interpretación conjunta de los estudios geofísicos realizados y la elaboración del modelo geológico-geofísico de la Cuenca de Santafé de Bogotá y alrededores, se utilizó toda la información gravimétrica, geoelectrica, sísmica, geológica, de sondeos geotécnicos y pozos , realizados, tanto en el presente estudio, como en estudios anteriores.

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 y posteriormente se calculó una regresión lineal para determinar arealmente la profundidad de la roca.

Con el objetivo de 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.

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, el primero se iluminó simultáneamente con un ángulo de inclinación de 30° y azimuts de 20° y 270° . El mapa Topográfico se iluminó con un ángulo de 30° y un azimut de 270° , (Fig.29).

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

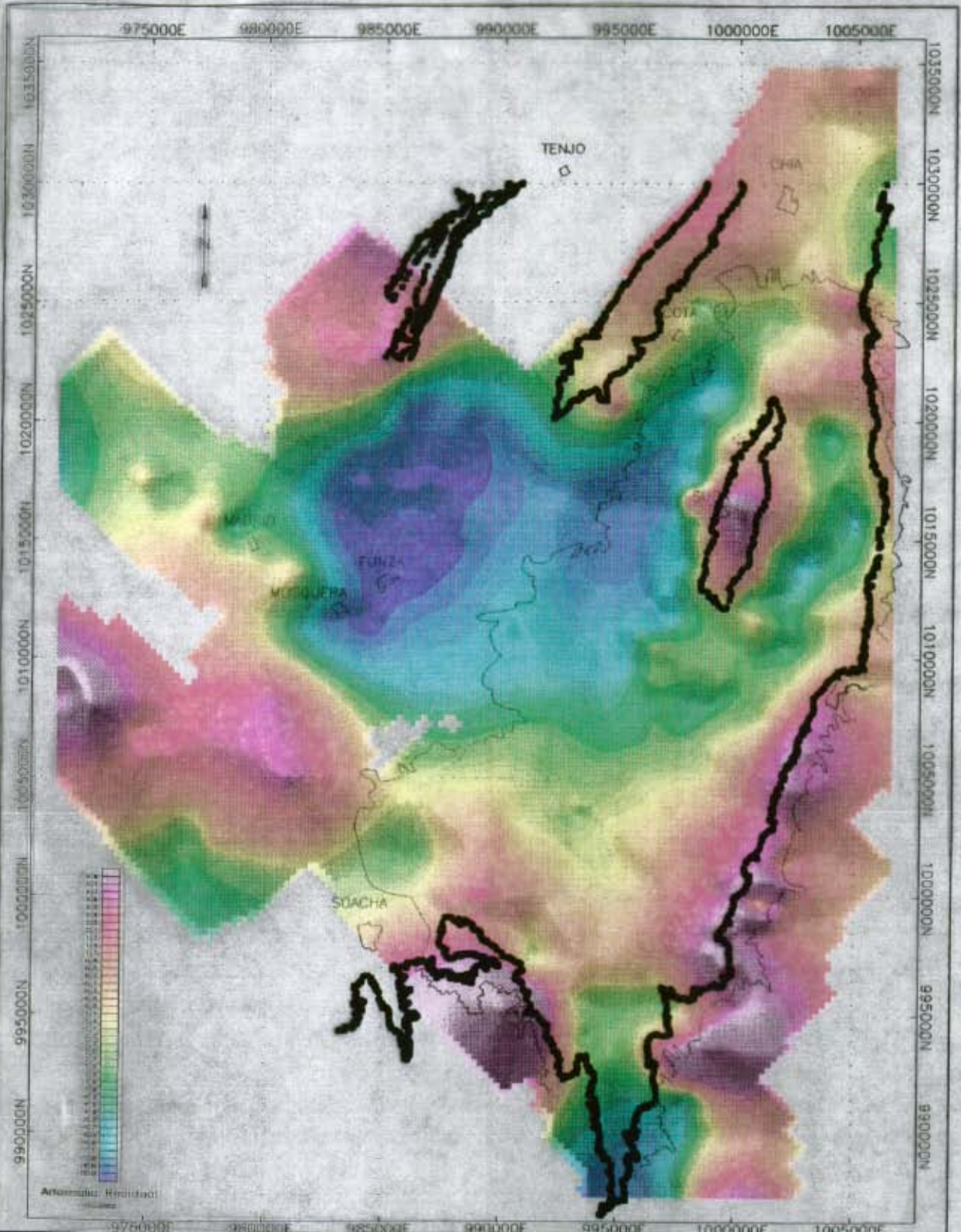
Otro lineamiento de igual orientación al anterior es el denominado Molinos-Sasaima; éste, a la altura del Club de los Lagartos, se intersecta con la falla denominada en el Mapa Geológico de Santafé de Bogotá, falla de Usaquén-Sasaima. A la falla de Molinos-Sasaima se le observa un caracter más regional que a la falla de Usaquén-Sasaima. Hacia el sur de la falla Molinos-Sasaima, a unos 3 km, se observa 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 podría ser 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. La falla de Cota puede detectarse también en la Sección Sísmica J-78-08.

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 fue poder 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 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 colocó unos 3 km más al norte que el inferido en el Mapa Geológico de Santafé de Bogotá.

Para poder delimitar, con un cierto grado de confiabilidad, los lineamientos observados en el sector NW del área del estudio, al norte de Funza, se necesita densificar la información geofísica en ese sector.



MAPA DE ANOMALIA RESIDUAL
Mapa Sombreado
 MUNICIPIO DE COMBACION 207
 ALMIRANTE BARRERA 2017 270
 PROYECTO DE INVESTIGACION GEOMAGNETICA DE SANTI DE BOBOTA
 SUBPROYECTO N.º 7 - ESTUDIOS GEOPHISICOS

Autor:
 INGENIEROS
 Fecha:
 Junio de 1999 Figma 28

4.2 MODELAMIENTO EN 2D

Con la ayuda del programa GM-SYS se generaron modelos en 2D por medio del método de aproximaciones sucesivas. Esta metodología consiste en la comparación de una curva medida y una curva calculada para un modelo hipotético planteado. Se realizan cambios en el modelo planteado, manteniendo amarrados los datos de afloramientos de roca, buzamientos, de sondeos geotécnicos y pozos, etc, hasta cuando ambas curvas alcanzan un ajuste determinado.

Los modelos obtenidos fueron los siguientes:

1. Modelo Geológico-Geofísico Calle 170,(Fig.27).
2. Modelo Geológico-Geofísico Ingeominas-Funza, (Fig.28).

* *Modelo Geológico-Geofísico Calle 170, (Fig. 27).* Este modelo tiene una orientación NW-SE, 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.

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, en donde no se llegó a roca y el sondeo geotécnico realizado en la Calle 170 con Cra 51, en donde se encontró arcillolita a los 119m

En la elaboración del modelo se emplearon los resultados de los estudios geoelectrónicos y de refracción sísmica, los cuales permitieron obtener una primera aproximación del modelo geológico-geofísico. Estos resultados fueron debidamente

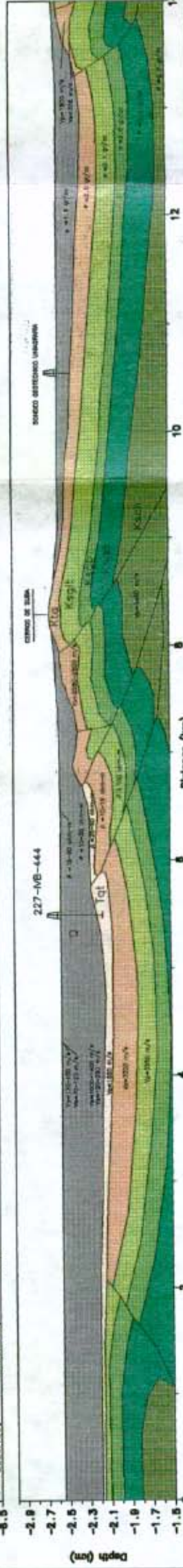
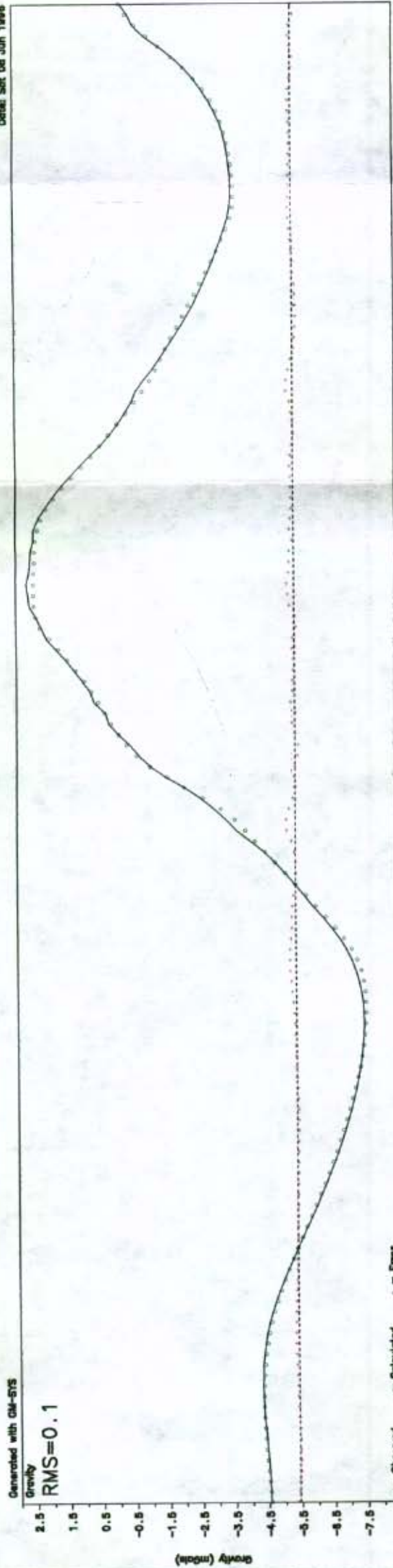
El error de ajuste de las curvas gravimétricas medida y generada por el modelo fue de $RMS = 0.08$.

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, encontrando este último la parte superior de la Formación Tilatá a 468 m, (Karin, F. H, 1990, Arévalo, G.A.R y Pinzon ,V.I.D. 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.

Time: 03:46:52 PM
Date: Sat 08 Jun 1996



MODELO GEOLOGICO-GEOFISICO CALLE 170

PROYECTO DE MICROZONIFICACION SISMICA DE SANTA FE DE BOGOTA
SUBPROYECTO No. 7 - ESTUDIOS GEOFISICOS

Escala 1 : 50.000

ALTERN
INGEOMINAS

FECHA:
JUNIO DE 1994

PROYECTO: 170

ESTADIO: 7

FIGURA: 17



4.2 MAPA DEL ESPESOR DE SEDIMENTOS.

Con el objetivo de brindar un modelo tridimensional del límite sedimento-roca se realizó una regresión lineal multivariable que nos permitiese determinar la profundidad de la roca en cualquier punto del área de estudio, conociendo la variación de gravedad en él. Se escogió como X los valores de variación 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 microtemores, 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.

Una regresión lineal multivariable de Y sobre X₁ y X₂ es de la siguiente forma:

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2$$

Para el presente caso la función anterior es mejor expresarla de la siguiente forma:

$$Y - \bar{Y} = a_1 (X_1 - \bar{X}_1) + a_2 (X_2 - \bar{X}_2)$$

donde :

$$a_1 = \frac{R_{X_1,Y} - R_{X_2,Y} R_{X_1,X_2}}{1 - R_{X_1,X_2}^2} \times \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_1}}$$

$$a_2 = \frac{R_{X_2,Y} - R_{X_1,Y} R_{X_1,X_2}}{1 - R_{X_1,X_2}^2} \times \frac{\sigma_Y}{\sigma_{X_2}}$$

Donde : $R_{X_1,Y}, R_{X_2,Y}, R_{X_1,X_2}$ = coeficientes de correlación entre X_1 y Y ;
 X_2 y Y y entre X_1 y X_2 , respectivamente.

$\sigma_Y, \sigma_{X_1}, \sigma_{X_2}$ = desviación media cuadrática de Y, X_1 y X_2 .

Haciendo $Y = H$, (H = profundidad a la roca); $X_1 = \Delta g$, (Δg = anomalía residual) y $X_2 = T$, (T = microtremores), obtendremos una función de regresión lineal del siguiente tipo :

$$H = - 51.17 - 36.96 \Delta g + 276.13 T$$

para los siguientes coeficientes 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, (Fig. 29). Al comparar los valores de profundidad obtenidos en el mapa con los puntos de control observamos que la diferencia no supera los 5 m

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).

Conclusiones y recomendaciones

5.1 CONCLUSIONES

La interpretación integrada de los métodos geofísicos: Gravimetría, Sísmica (refracción y reflexión), y Geoeléctrica, aplicados en el estudio de la cuenca de la Sabana de Bogotá, con énfasis en el perímetro urbano de Santafé de Bogotá, permitió obtener una caracterización detallada del área de estudio. En general se pudo obtener la siguiente información:

- * El modelo geológico-geofísico del perímetro urbano de Santafé de Bogotá y sus alrededores, está conformado por dos subcuencas principales: la Cuenca Occidental, ubicada hacia el NW del área de estudio; la Cuenca Oriental ubicada dentro del perímetro urbano, y ramificada en la parte norte por los Cerros de Suba, dando lugar a otras dos cuencas secundarias, una en la parte occidental de los Cerros de Suba y otra entre estos últimos y los Cerros Orientales.

- * Las subcuencas anteriormente descritas están definidas por estructuras de dirección aproximada NE-SW, y las cuales se han interpretado como la continuación en profundidad de los cerros aflorantes. Concretamente, la cuenca principal es dividida en dos subcuencas por una estructura que al parecer corresponde a la continuación hacia el sur y en profundidad de los cerros de Cota, los cuales se unirían en la parte sur con los cerros aledaños a Bosa y

Soacha. De igual manera se comporta la estructura de los cerros de Suba, los cuales continúan bajo la superficie para unirse con los cerros Orientales en la parte norte de la ciudad, controlando la cuenca secundaria entre los cerros de Suba y cerros Orientales.

- * Los mayores espesores de sedimentos calculados en el presente modelo se encuentran en la cuenca occidental, en donde sobrepasan los 780 m. Para la cuenca oriental se calcularon espesores de 540 m en la parte occidental de los cerros de Suba y 240 entre los cerros de Suba y los cerros orientales.
- * El patrón tectónico general del área de estudio se encuentra controlado por dos direcciones de lineamientos: uno de dirección aproximada NE-SW y otro perpendicular a éste con dirección NW-SE. En este contexto se definieron en el modelo, fallamientos de tipo inverso, como son las fallas de Bogotá y Cota con dirección NE-SW, y fallamientos de tipo normal con dirección NW-SE, como son las fallas de Usaquén-Sasaima y la falla de San Cristóbal. También se detectaron fallamientos de rumbo como son las fallas de El Boquerón del Carbón, al norte de los cerros de Suba, y entre estos últimos y los cerros Orientales.
- * Los métodos geofísicos aplicados permitieron establecer, no sólo la geometría de la cuenca de la Sabana de Bogotá, sino también determinaron información tectónica nueva como son las fallas de Molinos-Sasaima y San Cristóbal, ésta última corroborada en superficie por una campaña especial de campo.

5.2 RECOMENDACIONES

Para un conocimiento más detallado de la Cuenca de la Sabana de Bogotá, región de gran importancia socio-económica y primer centro industrial de Colombia, se hace necesario delimitar dicha cuenca, extendiendo los estudios geofísicos hacia los flancos de la misma como son : al NW entre los cerros de Tenjo y de Cota, al Occidente y Sur hacia los cerros de de El Rosal, Madrid, Bosa y Soacha y al Oriente en los Cerros Orientales.

Con el fin de obtener información acerca de la posible actividad tectónica cuaternaria se plantea la realización de estudios de reflexión sísmica somera de alta resolución, de estratigrafía sísmica y de estudios de GPR (Ground Penetrating Radar) para poder detectar discontinuidades entre los depósitos cuaternarios.

Agradecimientos

Queremos dar nuestro especial agradecimiento a todas las personas que de una u otra forma colaboraron para que el presente trabajo se pudiera llevar a buen término. En especial queremos mencionar la valiosa gestión, como jefe de proyecto, de la Ingeniera Diana Rubiano, a la Ingeniera Carolina Pérez, por su dedicación y valioso aporte en la elaboración del modelo digital topográfico, a la Ingeniera Sandra Marcela Garzón, por su continuo interés en la correlación de los resultados de los sondeos geotécnicos con los estudios geofísicos y a todo el personal de la Subdirección de Geofísica por sus críticas constructivas y valiosas sugerencias.

BIBLIOGRAFIA

- AREVALO, 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
- HABERSTOCK, E. 1985. Curso Básico de Gravimetría. INGEOMINAS. Cartagena.
- HEMENS, F. K. 1990. Neogene-Quaternary geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia. The Quaternary of Colombia. Vol. 17. Berlín - Stuttgart.
- LIAJOVITSKII, F.M. y otros, 1989. Métodos Geofísicos Aplicados a la Ingeniería. Moscú.
- PEREZ, C. 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. Bogotá.
- SCINTREX LTDA. 1989. C.G.B- Operator's Gravimeter Manual. Ontario (Canadá).

ANEXO 1: Lectura, cierres y gravedad Observada

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
30395	MGLS-196	7474.588	9.689	0.000			
	CD-619	7473.330	10.531	0.000		0.000	977389.406
	CD-623	7472.752	10.868	-0.578		-0.576	977388.830
	CD-626	7471.490	11.273	-1.840		-1.835	977387.571
	CD-650	7473.566	12.166	0.236		0.248	977389.654
	CD-772	7475.453	13.309	2.123		2.142	977391.548
	CD-775	7473.920	13.757	0.590		0.613	977390.019
	CD-777	7473.573	14.189	0.243		0.269	977389.675
	CD-780	7473.074	15.097	-0.256		-0.224	977389.182
	CD-612	7473.819	15.486	0.489		0.524	977389.930
	MGLS-196	7474.612	16.430	1.281		1.323	
310395	MGLS-196	7474.887	9.368				
	CD-619	7473.589	10.287	0.000		0.000	977389.406
	CD-628	7471.732	10.951	-1.858		-1.877	977387.529
	CD-632	7473.375	11.613	-0.215		-0.253	977389.153
	CD-634	7473.850	11.873	0.260		0.215	977389.621
	CD-619	7473.660	12.752	0.071		0.000	977389.406
30495	MGLS-196	7476.160	10.526	0.000		0.000	977390.642
	CD-600	7441.935	11.311	-34.226		-34.237	977356.405
	MGLS-196	7476.185	12.211	0.024		0.000	977390.642
	CD-600	7442.001	13.121		0.000	0.000	977356.430
	CD-582	7419.858	14.336		-22.143	-22.143	977334.287
	CD-580	7451.318	14.941		9.317	9.317	977365.747
	CD-577	7465.993	15.420		23.992	23.992	977380.422
	CD-600	7441.949	16.003		-0.052	-0.052	977356.378
		MGLS-196	7476.181	16.729			
190495	CD-619	7470.492	11.927	0.000		0.000	977389.406
	CD-88	7471.105	12.468	0.613		0.614	977390.020
	CD-85	7470.300	12.974	-0.192		-0.190	977389.216
	CD-82	7468.493	13.538	-1.999		-1.996	977387.410
	CD-637	7469.672	14.095	-0.820		-0.817	977388.589
	CD-643	7469.456	14.776	-1.036		-1.031	977388.375
	CD-641	7468.208	15.260	-2.284		-2.279	977387.127
	CD-639	7468.464	15.626	-2.028		-2.022	977387.384
240495	MGLS-196	7474.157	9.089				
	CD-574	7370.833	10.048	0.000		0.000	977287.310
	CD-593	7407.837	10.320	37.004		37.007	977324.317
	CD-597	7420.906	10.689	50.073		50.081	977337.391
	CD-600	7439.934	11.079	69.100		69.114	977356.424
	CD-600	7439.934	11.079		0.000	0.000	977356.430
	CD-607	7454.903	11.508		14.969	14.987	977371.417
	CD-608	7455.579	11.922		15.645	15.680	977372.110
	CD-609	7473.482	12.422		33.548	33.605	977390.035
	CD-610	7473.816	12.701		33.882	33.950	977390.380
	CD-611	7473.719	13.070		33.785	33.868	977390.298
	CD-612	7473.330	13.369		33.396	33.492	977389.922
	CD-612	7473.410	14.422	0.000		0.000	977389.930
	CD-137	7471.977	14.613	-1.433		-1.442	977388.488
	CD-134	7470.948	15.068	-2.462		-2.493	977387.437

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-131	7470.085	15.658	-3.325		-3.385	977386.545
	MGLS-196	7474.216	16.366	0.806		0.712	977390.642
250495	MGLS-196	7474.449	9.149				
	FAH	7470.352	9.708	0.000		0.000	977386.707
	CD-123	7470.138	10.083	-0.214		-0.253	977386.454
	CD-126	7470.287	10.682	-0.065		-0.165	977386.542
	CD-128	7470.821	11.362	0.469		0.298	977387.005
	CD-612	7473.811	12.020	3.459		3.220	977389.927
	CD-612	7473.811	12.020	0.000		0.000	977389.930
	CD-616	7444.101	13.594	-29.711		-29.670	977360.260
	CD-617	7420.259	14.023	-53.553		-53.501	977336.429
	CD-612	7473.748	14.475	-0.063		0.000	977389.930
	CD-612	7473.748	14.475		0.000	0.000	977389.930
	CD-737	7473.057	15.221		-0.691	-0.740	977389.190
	CD-734	7472.430	15.575		-1.318	-1.389	977388.541
	CD-732	7473.015	15.981		-0.733	-0.830	977389.100
	MGLS-196	7474.617	16.894		0.869	0.712	977390.642
260495	MGLS-196	7474.841	11.888				
	FAH	7470.785	13.009	0.000		0.000	977386.707
	CD-121	7469.558	13.813	-1.228		-1.269	977385.438
	CD-112	7469.531	14.728	-1.254		-1.341	977385.366
	CD-108	7470.637	15.399	-0.148		-0.269	977386.438
	CT-404	7439.765	16.363	-31.020		-31.190	977355.517
	MGLS-196	7474.924	17.030	4.139			
270495	MGLS-196	7475.444	9.642				
	FAH	7471.369	10.416	0.000		0.000	977386.707
	CD-466	7469.676	11.182	-1.693		-1.710	977384.997
	CD-459	7467.263	11.701	-4.106		-4.134	977382.573
	CD-476	7466.853	12.349	-4.515		-4.558	977382.149
	CD-479	7466.496	13.220	-4.872		-4.934	977381.773
	CD-482	7467.034	13.827	-4.335		-4.410	977382.297
	CD-485	7466.401	14.385	-4.967		-5.055	977381.652
	CD-490	7466.337	15.322	-5.032		-5.140	977381.567
	7-NW1	7468.941	16.138	-2.428		-2.554	977384.153
	CD-639	7472.184	16.700	0.815		0.677	977387.384
280495	MGLS-196	7475.574	9.093	0.000		0.000	977390.642
	CD-723	7476.270	9.873	0.696		0.690	977391.332
	CD-724	7476.237	10.264	0.663		0.654	977391.296
	CD-726	7475.916	10.872	0.342		0.329	977390.971
	CD-727	7475.377	11.109	-0.197		-0.212	977390.430
	CD-729	7475.113	11.842	-0.461		-0.482	977390.160
	CD-729	7475.113	11.842		0.000	0.000	977390.160
	CD-141	7474.201	12.632		-0.912	-0.939	977389.221
	CD-143	7473.206	13.388		-1.907	-1.960	977388.200
	CD-5	7472.702	13.936		-2.411	-2.483	977387.677
	CD-153	7472.687	14.786		-2.426	-2.526	977387.634
	CD-156	7472.777	15.009		-2.336	-2.444	977387.716
	CD-18	7471.294	15.659		-3.819	-3.949	977386.211
280495	MGLS-196	7475.751	16.415		0.638	0.482	977390.642

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
20595	MGLS-196	7477.096	9.850	0.000		0.000	977390.642
	CD-455	7471.621	10.500	-5.475		-5.464	977385.178
	CD-452	7471.954	10.917	-5.142		-5.124	977385.518
	CD-434	7469.571	11.533	-7.525		-7.498	977383.144
	CD-430	7467.493	12.083	-9.603		-9.566	977381.076
	CD-429	7466.891	12.533	-10.205		-10.161	977380.481
	CD-427	7466.000	13.917	-11.096		-11.030	977379.612
	CD-425	7465.469	13.567	-11.627		-11.566	977379.076
	CD-422	7465.789	14.417	-11.307		-11.233	977379.409
	CD-421	7465.181	14.883	-11.915		-11.833	977378.809
	CD-419	7464.383	15.417	-12.712		-12.622	977378.020
	CD-418	7463.752	15.750	-13.344		-13.248	977377.394
	CD-402	7463.089	16.283	-14.007		-13.902	977376.740
	CD-404	7464.111	16.633	-12.985		-12.875	977377.767
	30595	MGLS-196	7477.683	9.317			
CD-612		7476.929	11.617	0.000		0.000	977389.930
CD-2		7475.207	12.200	-1.722		-1.717	977388.213
CD-6		7474.740	12.450	-2.189		-2.182	977387.748
CD-7		7474.783	13.383	-2.146		-2.131	977387.799
CD-9		7474.151	13.783	-2.778		-2.759	977387.171
CD-11		7474.989	14.283	-1.940		-1.918	977388.012
CD-13		7474.395	14.950	-2.535		-2.506	977387.424
CD-16		7472.943	15.667	-3.987		-3.952	977385.978
MGLS-196	7477.599	16.583	0.670		0.712	977390.642	
40595	MGLS-196	7478.423	13.033				
	CD-693	7476.843	13.356	0.000		0.000	977389.000
	CD-18	7473.130	13.577	-3.713		-3.699	977385.301
	CD-20	7475.038	14.357	-1.805		-1.740	977387.260
	CD-24	7474.289	15.195	-2.555		-2.436	977386.564
	CD-26	7474.160	15.783	-2.684		-2.527	977386.473
	CD-28	7473.698	16.215	-3.145		-2.960	977386.040
	MGLS-196	7478.267	16.724	1.424		1.642	977390.642
50595	MGLS-196	7478.561	8.672	0.000		0.000	977390.642
	CD-403	7465.811	9.394	-12.750		-12.656	977377.986
	CD-404	7465.570	9.571	-12.991		-12.875	977377.767
	CD-404	7465.570	9.571		0.000	0.000	977377.772
	CD-406	7465.766	9.902		0.196	0.198	977377.970
	CD-408	7466.237	10.392		0.667	0.673	977378.445
	CD-437	7467.620	10.976		2.050	2.061	977379.833
	CD-410	7467.074	11.738		1.504	1.521	977379.293
	CD-413	7471.703	12.359		6.133	6.154	977383.926
	CD-440	7469.649	13.664		4.079	4.111	977381.883
	CD-447	7470.706	14.030		5.136	5.171	977382.943
	CD-444	7475.444	14.354		9.874	9.911	977387.683
	CD-221	7448.994	14.801		-16.576	-16.535	977361.237
	CD-365	7475.322	15.266		9.752	9.796	977387.568
	CT-404	7443.286	15.656		-22.284	-22.237	977355.535
80595	MGLS-196	7479.169	8.977				
	CT-404	7444.014	9.613	0.000		0.000	977355.520

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-275	7468.908	10.158	24.894		24.888	977380.408
	CD-257	7465.149	10.469	21.135		21.126	977376.646
	CD-394	7466.969	11.053	22.955		22.940	977378.460
	CD-392	7466.508	11.969	22.494		22.469	977377.989
	cd-269	7469.426	13.291	25.412		25.372	977380.892
	CD-254	7466.813	13.761	22.799		22.754	977378.274
	CD-361	7474.914	14.471	30.900		30.847	977386.367
	G-3	7450.291	15.038	6.277		6.218	977361.738
	CD-362	7476.223	15.410	32.209		32.145	977387.665
	CT-404	7444.085	16.066	0.071		0.000	977355.520
90595	CT-404	7443.951	9.320				
	CD-262	7474.085	9.699	0.000		0.000	977385.928
	CD-253	7467.687	10.135	-6.398		-6.435	977379.493
	CD-252	7466.006	11.302	-8.079		-8.216	977377.712
	CD-250	7468.397	11.900	-5.688		-5.875	977380.053
	CD-384	7466.589	12.486	-7.496		-7.733	977378.195
	CD-247	7466.576	12.585	-7.509		-7.755	977378.173
	CD-244	7469.484	13.240	-4.601		-4.903	977381.025
	CD-241	7469.443	14.814	-4.642		-5.079	977380.849
	CD-241	7469.443	14.814		0.000	0.000	977380.849
	CD-242	7469.487	15.323		0.044	0.053	977380.902
	CD-237	7469.815	15.661		0.372	0.386	977381.235
	CD-233	7472.709	15.966		3.266	3.285	977384.134
	CD-241	7469.411	16.667		-0.032	0.000	977380.849
110595	INMA	7473.955	9.853	0.000		0.000	977384.527
	CD-227	7474.014	9.958	0.060		0.059	977384.586
	CD-229	7475.576	10.748	1.621		1.616	977386.143
	CD-231	7470.432	11.518	-3.522		-3.533	977380.994
	CD-226	7474.880	12.692	0.925		0.907	977385.434
	CD-225	7474.353	13.076	0.399		0.378	977384.905
	CD-223	7477.457	13.700	3.502		3.478	977388.005
	CD-171	7474.357	14.589	0.403		0.373	977384.900
	INMA	7473.988	15.144	0.033		0.000	977384.527
	INMA	7473.988	15.144	0.000		0.000	977384.527
	CD-171	7473.769	15.479	-0.219		-0.237	977384.290
	CD-315	7475.551	16.046	1.563		1.515	977386.042
	CD-317	7475.442	16.397	1.454		1.387	977385.914
	CD-312	7474.985	16.804	0.997		0.909	977385.436
	MGLS-196	7480.219	17.333	6.231		6.115	977390.642
120595	MGLS-196	7481.017	9.299				
	CD-551	7455.645	9.854	0.000		0.000	977365.340
	CD-521	7458.341	12.356	2.696		2.680	977368.020
	CD-754	7472.333	12.721	16.689		16.670	977382.010
	CD-756	7461.161	13.250	5.516		5.494	977370.834
	CD-757	7454.566	14.582	-1.079		-1.110	977364.230
	CD-831	7479.706	14.842	24.061		24.028	977389.368
	CD-835	7481.481	15.041	25.836		25.802	977391.142
	CD-834	7480.280	15.467	24.635		24.598	977389.938
	CD-838	7481.864	15.783	26.219		26.180	977391.520
	CD-840	7480.856	16.132	25.212		25.170	977390.510

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-842	7479.390	16.441	23.745		23.702	977389.042
	MGLS-196	7480.993	16.953	25.349		25.302	977390.642
150595	MGLS-196	7482.216	8.841				
	CD-574	7378.869	10.075	0.000		0.000	977287.310
	CD-571	7381.022	10.315	2.153		2.156	977289.466
	CD-568	7378.744	10.619	-0.125		-0.118	977287.192
	CD-565	7365.608	10.886	-13.261		-13.251	977274.059
	CD-497	7426.267	11.279	47.398		47.413	977334.723
	CD-492	7439.079	11.499	60.210		60.228	977347.538
	2011	7427.701	12.345	48.832		48.860	977336.170
	CD-558	7420.997	13.313	42.128		42.168	977329.478
	CD-557	7435.215	14.565	56.346		56.402	977343.712
	CD-556	7432.002	14.849	53.133		53.192	977340.502
	CD-555	7463.353	15.443	84.484		84.551	977371.861
	CD-551	7456.834	15.675	77.965		78.035	977365.345
	MGLS-196	7482.169	16.020	103.300			
160595	MGLS-196	7482.590	8.732				
	CD-683	7480.654	9.193	0.000		0.000	977388.741
	CD-702	7482.575	9.523	1.921		1.924	977390.665
	CD-699	7482.199	9.895	1.545		1.551	977390.292
	CD-696	7481.499	10.258	0.845		0.854	977389.595
	CD-846	7477.253	11.182	-3.401		-3.383	977385.358
	CD-866	7478.360	11.578	-2.294		-2.272	977386.469
	CD-864	7479.944	12.101	-0.710		-0.683	977388.058
	CD-859	7480.815	13.154	0.160		0.197	977388.938
	CD-849	7474.264	13.813	-6.390		-6.347	977382.394
	CD-853	7479.449	14.010	-1.206		-1.161	977387.580
	CD-853	7479.449	14.015		0.000	0.000	977387.580
	CD-854	7482.178	14.470		2.729	2.713	977390.293
	CD-855	7481.998	14.993		2.550	2.515	977390.095
	MGLS-196	7482.563	15.483		3.115	3.062	977390.642
170595	MGLS-196	7482.667	8.848	0.000		0.000	977390.642
	CD-713	7482.293	9.601	-0.374		-0.389	977390.253
	CD-715	7482.262	9.997	-0.406		-0.427	977390.215
	CD-718	7482.073	10.673	-0.594		-0.629	977390.013
	CD-705	7481.459	10.975	-1.209		-1.249	977389.393
	CD-683	7480.819	11.416	-1.848		-1.897	977388.745
	CD-683	7480.819	11.416		0.000	0.000	977388.741
	CD-685	7481.471	11.701		0.652	0.637	977389.378
	CD-687	7481.012	11.951		0.193	0.165	977388.906
	CD-690	7480.878	13.192		0.059	-0.033	977388.708
	CD-695	7479.188	13.739		-1.631	-1.751	977386.990
	CD-693	7481.194	14.093		0.375	0.237	977388.978
	CD-693	7481.194	14.093	0.000		0.000	977389.000
	CD-205	7482.697	14.673	1.503		1.511	977390.511
	CD-207	7482.272	15.052	1.078		1.092	977390.092
	MGLS-196	7482.818	15.338	1.624		1.642	977390.642
180595	MGLS-197	7483.053	10.141	0.000		0.000	977390.642
	CD-663	7478.780	10.606	-4.273		-4.262	977386.380

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-661	7479.881	11.113	-3.171		-3.148	977387.494
	CD-658	7479.647	11.507	-3.405		-3.373	977387.269
	CD-656	7481.550	12.082	-1.502		-1.456	977389.186
	CD-535	7480.894	12.552	-2.158		-2.101	977388.541
	CD-533	7479.602	12.799	-3.450		-3.387	977387.255
	CD-531	7476.919	13.011	-6.134		-6.065	977384.577
	CD-528	7477.428	13.295	-5.625		-5.550	977385.092
	CD-35	7480.313	13.465	-2.739		-2.660	977387.982
190595	MGLS-196	7483.459	9.108	0.000		0.000	977390.642
	CD-300	7480.719	9.820	-2.740		-2.699	977387.943
	CD-299	7479.916	10.010	-3.544		-3.491	977387.151
	CD-30	7479.632	10.386	-3.827		-3.752	977386.890
	CD-31	7480.148	10.791	-3.311		-3.213	977387.429
	CD-34	7481.502	11.479	-1.957		-1.819	977388.823
	CD-35	7480.644	11.726	-2.815		-2.662	977387.980
	CD-35	7480.644	11.726		0.000	0.000	977387.980
	CD-294	7481.709	12.940		1.065	1.000	977388.980
	CD-104	7477.503	13.389		-3.141	-3.230	977384.750
	CT-404	7448.295	13.953		-32.349	-32.468	977355.512
	CT-404	7448.295	13.953	0.000		0.000	977355.520
	CD-290	7481.401	14.249	33.106		33.097	977388.617
	CD-288	7478.531	14.611	30.236		30.216	977385.736
	CD-286	7479.808	15.000	31.513		31.480	977387.000
	CD-284	7477.382	15.104	29.087		29.051	977384.571
	CD-184	7476.191	15.558	27.896		27.845	977383.365
	CD-101	7478.131	15.886	29.836		29.775	977385.295
	CT-404	7448.370	16.324	0.075		0.000	977355.520
220595	MGLS-196	7484.365	9.968	0.000		0.000	977390.642
	CD-674	7481.828	10.290	-2.538		-2.544	977388.098
	CD-682	7356.172	11.622	-128.194		-128.228	977262.414
	CD-1640	7411.342	13.033	-73.023		-73.087	977317.555
	CD-551	7459.161	14.692	-25.204		-25.302	977365.340
		0.000	0.000				
240595	MGLS-196	7485.302	9.926				
	CD-551	7459.964	10.485	0.000		0.000	977365.340
	CD-550	7473.002	10.751	13.038		13.046	977378.386
	CD-548	7472.408	11.036	12.444		12.461	977377.801
	CD-397	7463.820	11.250	3.856		3.880	977369.220
	CD-399	7464.194	11.516	4.230		4.262	977369.602
	CD-537	7484.690	11.817	24.726		24.768	977390.108
	CD-36	7439.376	12.520	-20.588		-20.525	977344.815
	CD-546	7425.293	12.727	-34.671		-34.601	977330.739
	CD-544	7413.043	12.979	-46.921		-46.843	977318.497
	CD-35	7482.512	13.406	22.548		22.639	977387.979
250595	MGLS-196	7485.534	10.604	0.000		0.000	977390.642
	NP-71-CD	7485.484	11.084	-0.049		-0.039	977390.603
	CD-70	7486.182	11.334	0.648		0.664	977391.306
	CD-653	7484.727	12.170	-0.807		-0.772	977389.870
	CD-194	7481.946	12.450	-3.588		-3.547	977387.095
	CD-191	7480.456	13.076	-5.078		-5.023	977385.619

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-35	7482.790	14.277	-2.743		-2.662	977387.980
	CD-35	7482.790	14.277		0.000	0.000	977387.980
	CD-189	7481.188	15.108		-1.602	-1.678	977386.302
	CD-180	7479.490	15.877		-3.300	-3.446	977384.534
	CD-187	7479.381	16.515		-3.409	-3.613	977384.367
	MGLS-196	7485.693	16.928		2.903	2.662	977390.642
260595	MGLS-196	7486.046	9.284				
	CD-35	7483.287	10.103	0.000		0.000	977387.980
	CD-526	7482.284	10.412	-1.003		-1.009	977386.971
	CD-340	7480.947	10.748	-2.340		-2.352	977385.628
	CD-90	7480.013	11.178	-3.274		-3.295	977384.685
	CD-336	7479.141	11.462	-4.146		-4.172	977383.808
	CD-332	7478.784	11.742	-4.503		-4.534	977383.446
	CD-329	7478.220	11.953	-5.067		-5.102	977382.878
	CD-325	7476.475	12.191	-6.812		-6.852	977381.128
	CD-353	7477.211	12.537	-6.076		-6.123	977381.857
	CD-354	7477.861	12.858	-5.425		-5.478	977382.502
	CD-354	7477.861	12.858		0.000	0.000	977382.510
	NP-42-CD	7479.855	13.107		1.994	2.013	977384.523
	CD-276	7480.398	13.471		2.537	2.582	977385.092
	CD-35	7483.250	14.055		5.389	5.478	977387.988
10695	INMA	7481.951	10.886	0.000		0.000	977384.527
	CD-309	7483.286	11.468	1.335		1.315	977385.842
	INMA	7481.984	11.853	0.033		0.000	977384.527
	INMA	7481.984	11.853		0.000	0.000	977384.527
	CD-173	7479.430	12.233		-2.554	-2.573	977381.954
	CD-175	7480.790	12.738		-1.194	-1.239	977383.288
	CD-311	7482.603	13.279		0.619	0.546	977385.073
	CD-312	7483.055	13.678		1.071	0.978	977385.505
	CD-317	7483.059	13.765		1.075	0.978	977385.505
	CD-354	7480.029	14.581		-1.955	-2.094	977382.433
	NP6CE1	7481.318	15.192		-0.666	-0.836	977383.691
	MGLS-196	7488.318	16.144		6.334	6.115	977390.642
20695	MGLS-196	7488.130	9.656	0.000		0.000	977390.642
	CD-500	7479.664	10.396	-8.466		-8.478	977382.164
	CD-321	7481.354	10.856	-6.776		-6.795	977383.847
	CD-378	7481.736	11.554	-6.394		-6.423	977384.219
	CD-278	7483.428	12.035	-4.702		-4.739	977385.903
	CD-97	7485.283	12.435	-2.847		-2.891	977387.751
	CD-68	7485.723	13.683	-2.406		-2.469	977388.173
	CD-374	7482.264	14.439	-5.866		-5.941	977384.701
	CS-404	7453.046	14.854	-35.083		-35.164	977355.478
	MGLS-196	7488.243	16.919	0.113		0.000	977390.642
130995	MGLS-196	7472.041	9.418				
	CT-404	7436.845	10.050	0.000		0.000	977355.520
	CD-360	7463.848	10.385	27.002		26.989	977382.509
	NP-4-CD	7467.495	10.534	30.650		30.631	977386.151
	NP-3-CD	7468.218	11.163	31.372		31.328	977386.848
	NP-1-CD	7454.571	11.552	17.726		17.666	977373.186
	2048	7467.674	12.919	30.829		30.713	977386.233

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-264	7464.060	13.304	27.214		27.084	977382.604
	CD-266	7462.300	13.659	25.455		25.310	977380.830
	CD-267	7462.384	14.203	25.538		25.372	977380.892
	MGLS-196	7472.173	15.159	35.328		35.123	977390.643
180995	MGLS-196	7474.594	9.292	0.000		0.000	977390.642
	CD-249	7462.417	10.291	-12.177		-12.167	977378.475
	CD-380	7462.974	10.600	-11.620		-11.606	977379.036
	CD-382	7462.080	10.836	-12.514		-12.498	977378.144
	CD-386	7463.597	11.061	-10.997		-10.978	977379.664
	CD-387	7462.391	11.304	-12.204		-12.182	977378.460
	CD-385	7462.727	11.557	-11.868		-11.843	977378.799
	CD-262	7469.852	11.869	-4.742		-4.714	977385.928
	CD-262	7469.852	11.869		0.000	0.000	977385.928
	CD-358	7466.360	12.829		-3.492	1.993	977387.921
	CD-271	7464.235	13.155		-5.617	2.670	977388.598
	MGLS-196	7474.566	14.139		4.714	4.714	977390.642
200995	MGLS-196	7475.729	7.971	0.000		0.000	977390.642
	CD-261	7467.850	8.794	-7.879		-7.850	977382.792
	CD-158A	7462.155	9.120	-13.575		-13.535	977377.107
	NP-9-CD	7462.049	10.348	-13.681		-13.598	977377.044
	NP-6-CD	7468.315	11.066	-7.414		-7.306	977383.336
	CD-438	7466.391	11.504	-9.338		-9.215	977381.427
	CD-404	7462.700	12.393	-13.029		-12.875	977377.767
	CD-404	7462.700	12.393		0.000	0.000	977377.772
	CD-405	7462.903	12.782		0.203	0.206	977377.978
	NP-14-CD	7464.672	13.156		1.972	1.978	977379.750
	NP-15-CD	7464.197	13.894		1.497	1.509	977379.281
	NP-16-CD	7464.633	14.113		1.933	1.947	977379.719
	NP-17-CD	7465.088	14.381		2.388	2.404	977380.176
	CD-432	7467.626	14.909		4.926	4.947	977382.719
	MGLS-196	7475.549	15.556		12.849	12.875	977390.647
220995	MGLS-196	7476.627	9.967	0.000		0.000	977390.642
	CD-38	7466.797	10.569	-9.831		-9.799	977380.843
	CD-41	7467.541	11.089	-9.087		-9.028	977381.614
	CD-43	7468.914	11.483	-7.714		-7.635	977383.007
	CD-45	7470.434	11.888	-6.193		-6.093	977384.549
	CD-48	7471.748	12.287	-4.879		-4.759	977385.883
	CD-49	7471.852	12.797	-4.776		-4.628	977386.014
	CD-52	7473.358	13.062	-3.269		-3.108	977387.534
	CD-54	7474.587	13.702	-2.040		-1.845	977388.797
	CD-56	7475.001	14.530	-1.626		-1.389	977389.253
	CD-58	7475.570	14.793	-1.057		-0.806	977389.836
	NP-48-CD	7474.864	15.187	-1.764		-1.492	977389.150
	MGLS-196	7476.323	15.813	-0.305		0.000	977390.642
250995	MGLS-196	7476.423	9.774	0.000		0.000	977390.642
	CD-477	7467.295	10.592	-9.127		-9.146	977381.496
	CD-474	7468.649	10.645	-7.773		-7.793	977382.849
	CD-471	7470.105	11.362	-6.317		-6.354	977384.288
	CD-470	7470.852	11.693	-5.571		-5.615	977385.027

FECHA	ESTACION	LECTURA	HHhh	DIFCOR	CIERRE	CIERRE	OBSERVAD
	CD-467	7471.466	12.329	-4.957		-5.016	977385.626
	NP-30-CD	7471.081	12.509	-5.342		-5.405	977385.237
	NP-29-CD	7471.653	12.703	-4.769		-4.837	977385.805
	CD-640	7473.447	13.211	-2.975		-3.055	977387.587
	CD-639	7473.269	13.666	-3.154		-3.244	977387.398
	CD-639	7473.269			0.000	0.000	977387.400
	A7-NW1	7472.047	14.357		-1.222	-1.306	977386.094
	MGLS-196	7476.602	15.271		3.333	3.244	977390.644
270995	MGLS-196	7478.757	9.806	0.000		0.000	977390.642
	CD-768	7478.800	10.819	0.042		0.014	977390.656
	CD-770	7478.983	11.204	0.226		0.187	977390.829
	CD-79	7474.922	11.671	-3.835		-3.888	977386.754
	CD-75	7475.160	11.991	-3.597		-3.659	977386.983
	CD-73	7475.180	12.497	-3.578		-3.654	977386.988
	CD-70	7475.937	12.855	-2.820		-2.906	977387.736
	CD-709	7476.932	13.869	-1.825		-1.940	977388.702
	CD-707	7477.148	14.258	-1.609		-1.735	977388.907
	CD-65	7478.279	14.603	-0.478		-0.613	977390.029
	MGLS-196	7478.914	15.358	0.156		0.000	977390.642
280995	MGLS-196	7479.217	9.625	0.000		0.000	977390.642
	CD-784	7456.896	10.595	-22.321		-22.339	977368.303
	NP-75-CD	7451.321	11.067	-27.895		-27.922	977362.720
	NP-76-CD	7437.543	11.347	-41.673		-41.705	977348.937
	NP-79-CD	7427.032	11.792	-52.185		-52.224	977338.418
	CD-848	7453.838	12.162	-25.379		-25.425	977365.217
	NP-63-CD	7464.569	12.523	-14.647		-14.701	977375.941
	CD-853	7476.212	12.750	-3.005		-3.062	977387.580
	CD-853	7476.212	12.750		0.000	0.000	977387.580
	NP-61-CD	7463.876	13.552		-12.336	-12.361	977375.219
	NP-60-CD	7462.083	13.768		-14.129	-14.160	977373.420
	A7-E1	7452.370	14.164		-23.842	-23.885	977363.695
	NP-58-CD	7452.673	14.579		-23.539	-23.595	977363.985
	MGLS-196	7479.345	15.044		3.133	3.062	977390.642
290995	MGLS-196	7479.536	9.274	0.000		0.000	977390.642
	CD-105	7474.553	10.270	-4.983		-5.047	977385.595
	NP-2-CD	7476.564	10.810	-2.972		-3.070	977387.572
	CD-313	7474.947	11.315	-4.590		-4.720	977385.922
	MGLS-196	7479.719	12.146	0.183		0.000	977390.642

ANEXO 2: Longitud, Latitud, Altura y Gravedad teórica

Estudios geofísicos
Gravimetría

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
MGLS-1967	999361.00	1004651.54	4.64	2554.06	977390.64	978067.07
CD-2	993585.66	1000368.13	4.60	2558.37	977388.21	978066.51
SG-3	999857.01	1016588.14	4.75	2706.00	977361.74	978068.66
CD-5	994279.19	1001425.86	4.61	2556.25	977387.68	978066.65
CD-6	994494.26	1002111.28	4.62	2555.57	977387.75	978066.74
CD-7	994838.17	1003173.68	4.63	2555.18	977387.80	978066.88
CD-9	995352.56	1004419.08	4.64	2553.35	977387.17	978067.04
CD-11	995858.94	1004944.08	4.64	2549.47	977388.01	978067.11
CD-13	996563.88	1005600.72	4.65	2550.17	977387.42	978067.20
CD-16	997547.52	1006880.31	4.66	2551.01	977385.98	978067.37
CD-18	998417.14	1007999.54	4.67	2551.01	977385.30	978067.51
CD-20	999139.48	1009121.03	4.68	2547.87	977387.26	978067.66
CD-24	1000429.79	1010183.29	4.69	2549.98	977386.57	978067.80
CD-26	1001138.35	1010317.57	4.69	2549.71	977386.47	978067.82
CD-28	1001902.21	1010115.15	4.69	2552.25	977386.04	978067.79
CD-30	1002494.89	1009974.76	4.69	2552.83	977386.89	978067.77
CD-31	1002884.71	1009897.95	4.69	2553.34	977387.43	978067.76
CD-34	1003711.05	1009593.64	4.69	2557.89	977388.82	978067.73
CD-35	1004187.77	1009333.82	4.68	2562.96	977387.98	978067.69
CD-36	1004685.49	1008928.66	4.68	2765.23	977344.82	978067.64
CD-38	993285.24	1010780.30	4.70	2546.93	977380.84	978067.88
CD-41	994496.73	1009996.54	4.69	2547.91	977381.61	978067.78
CD-43	995173.04	1009390.69	4.68	2549.06	977383.01	978067.70
CD-45	995816.44	1008394.51	4.67	2550.56	977384.55	978067.57
CD-48	996590.64	1007187.00	4.66	2551.37	977385.88	978067.41
CD-49	996865.15	1006760.02	4.66	2551.89	977386.01	978067.35
CD-52	997621.36	1005576.23	4.65	2552.36	977387.53	978067.19
CD-54	998016.11	1004938.93	4.64	2551.30	977388.80	978067.11
CD-56	998617.94	1004212.81	4.64	2555.93	977389.25	978067.01
CD-58	999322.64	1003877.86	4.63	2559.90	977389.84	978066.97
CD-65	998099.57	1003288.60	4.63	2558.08	977390.03	978066.89
CD-68	996629.08	1003470.31	4.63	2555.09	977388.17	978066.91
CD-73	994227.14	1003687.53	4.63	2553.90	977386.99	978066.94
CD-75	993311.70	1003788.63	4.63	2553.41	977386.98	978066.96
CD-79	991455.90	1003958.68	4.63	2552.38	977386.75	978066.98
CD-82	990549.38	1002971.03	4.63	2551.99	977387.41	978066.85
CD-85	989742.01	1002409.34	4.62	2552.74	977389.22	978066.78
CD-88	988679.49	1001547.22	4.61	2548.06	977390.02	978066.67
CD-90	1005426.57	1011679.73	4.70	2571.05	977384.69	978068.00
CD-97	1003167.12	1012099.82	4.71	2550.88	977387.75	978068.06
CD-101	1001662.93	1012408.89	4.71	2548.53	977385.30	978068.10
CD-104	1000622.27	1012702.07	4.71	2553.65	977384.75	978068.14
CD-108	999576.91	1011677.76	4.70	2551.19	977386.44	978068.00
CD-112	998348.13	1010467.79	4.69	2551.10	977385.37	978067.84
CD-121	995835.55	1007339.64	4.67	2549.39	977385.44	978067.43
CD-123	995168.09	1006573.89	4.66	2546.29	977386.45	978067.32
FAH	995268.09	1006593.80	4.68	2546.30	977386.71	978067.62
CD-126	994216.34	1005608.29	4.65	2548.09	977386.54	978067.20

Estudios geofísicos
Gravimetría

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
CD-128	993538.52	1004785.58	4.64	2548.76	977387.01	978067.09
CD-131	993263.77	1003432.90	4.63	2553.30	977386.55	978066.91
CD-134	993008.71	1001997.46	4.62	2555.20	977387.44	978066.72
CD-137	992724.04	1000807.80	4.61	2554.83	977388.49	978066.57
CD-141	995536.96	1000465.22	4.60	2556.43	977389.22	978066.52
CD-143	994768.05	1000955.21	4.61	2556.69	977388.20	978066.59
CD-153	991665.97	1002328.45	4.62	2554.27	977387.63	978066.77
CD-156	990760.30	1002153.74	4.62	2555.08	977387.72	978066.74
CD-173	1003819.27	1019440.73	4.77	2555.30	977381.95	978069.04
CD-175	1003669.79	1018532.22	4.77	2555.08	977383.29	978068.92
CD-180	1003276.02	1016115.62	4.74	2556.58	977384.53	978068.59
CD-184	1002878.24	1013924.46	4.77	2554.99	977383.37	978069.04
CD-187	1002641.26	1012595.68	4.71	2552.46	977384.37	978068.12
CD-189	1002456.07	1011408.10	4.70	2550.63	977386.30	978067.97
CD-191	1002267.70	1010255.94	4.69	2553.22	977385.62	978067.81
CD-194	1002096.09	1009223.23	4.68	2553.67	977387.10	978067.68
CD-205	999884.08	1005643.65	4.65	2553.92	977390.51	978067.20
CD-207	999749.78	1003946.94	4.63	2561.23	977390.09	978066.98
CD-221	999342.04	1013493.08	4.72	2681.55	977361.24	978068.24
CD-223	1004220.77	1021846.06	4.80	2548.61	977388.01	978069.37
CD-225	1004452.18	1023224.92	4.81	2554.89	977384.91	978069.56
CD-226-A	1004509.38	1023582.91	4.81	2552.71	977385.43	978069.61
CD-227	1004566.61	1023937.55	4.82	2554.72	977384.59	978069.65
CD-229	1004741.39	1025023.42	4.83	2557.43	977386.14	978069.80
CD-231	1004867.55	1025816.59	4.83	2553.75	977380.99	978069.91
CD-233	1003713.24	1023669.70	4.81	2551.32	977384.13	978069.62
CD-237	1001744.36	1024164.86	4.82	2556.45	977381.24	978069.68
CD-241	1000327.07	1024159.87	4.82	2556.42	977380.85	978069.68
CD-242	1000209.67	1023640.58	4.81	2554.77	977380.90	978069.61
CD-244	1000108.35	1022881.74	4.81	2554.44	977381.03	978069.51
CD-247	999338.20	1021463.45	4.79	2555.00	977378.17	978069.32
CD-249	998581.01	1020753.85	4.79	2554.87	977378.48	978069.22
CD-250	998870.70	1020262.21	4.78	2555.24	977380.05	978069.15
CD-252	997675.95	1019041.89	4.77	2553.09	977377.71	978068.99
CD-253	998047.16	1018671.64	4.77	2553.10	977379.49	978068.94
CD-254	997480.56	1017973.82	4.76	2550.82	977378.27	978068.84
CD-257	996625.10	1016472.44	4.75	2551.10	977376.65	978068.64
CD-158A	997075.84	1016302.18	4.75	2552.45	977377.11	978068.62
CD-261	998259.98	1015860.22	4.74	2554.62	977382.79	978068.56
CD-262	999749.92	1018856.26	4.77	2555.51	977385.93	978068.96
CD-264	999063.81	1018945.38	4.77	2555.10	977382.60	978068.98
CD-266	998410.64	1018299.55	4.76	2553.28	977380.83	978068.89
CD-267	998219.53	1018080.14	4.76	2549.54	977380.89	978068.86
CD-269	998380.05	1017482.65	4.76	2553.54	977380.89	978068.78
CD-271	997982.76	1016724.95	4.75	2554.34	977388.60	978068.68
CD-275	997290.02	1015356.11	4.74	2551.49	977380.41	978068.49
CD-276	1004944.87	1012900.87	4.72	2561.44	977385.09	978068.17
CD-278	1003965.88	1013234.50	4.72	2554.18	977385.90	978068.21

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
CD-284	1001795.84	1014455.63	4.73	2554.43	977384.57	978068.37
CD-286	1001100.29	1014734.19	4.73	2557.87	977387.00	978068.41
CD-288	1000297.49	1014796.05	4.73	2585.70	977385.74	978068.42
CD-290	1000319.66	1013707.51	4.72	2558.58	977388.62	978068.27
CD-294	1000765.97	1011690.88	4.70	2546.17	977388.98	978068.00
CD-299	1001635.03	1009646.06	4.69	2550.27	977387.15	978067.73
CD-300	1001325.17	1009136.98	4.68	2547.03	977387.94	978067.66
CD-309	1001561.78	1021365.29	4.79	2556.12	977385.84	978069.30
CD-311	1002032.06	1019179.68	4.77	2557.50	977385.07	978069.01
CD-312	1001655.52	1018656.28	4.77	2557.77	977385.51	978068.94
CD-313	1001289.55	1018176.62	4.76	2559.39	977385.92	978068.87
CD-315	1002031.70	1017642.39	4.76	2558.74	977386.04	978068.80
CD-317	1002679.46	1017325.78	4.76	2556.48	977385.51	978068.76
CD-321	1004206.68	1016971.86	4.75	2554.84	977383.85	978068.71
CD-325	1006094.84	1016677.59	4.75	2584.86	977381.13	978068.67
CD-329	1005901.68	1015420.58	4.74	2578.17	977382.88	978068.50
CD-332	1005696.81	1013962.80	4.73	2572.43	977383.45	978068.31
CD-336	1005345.90	1012771.73	4.71	2575.26	977383.81	978068.15
CD-340	1005135.36	1011153.98	4.70	2569.68	977385.63	978067.93
CD-353	1005057.00	1015946.49	4.74	2557.18	977381.86	978068.57
CD-354	1005051.09	1015405.16	4.74	2555.98	977382.51	978068.50
CD-358	998602.66	1016564.59	4.75	2555.90	977387.92	978068.64
CD-361	999252.01	1016011.05	4.74	2568.74	977386.37	978068.58
CD-362	999190.13	1015674.82	4.74	2563.56	977387.67	978068.52
CD-365	998910.97	1014821.31	4.73	2555.59	977387.57	978068.42
CD-374	1002849.69	1014953.10	4.73	2554.97	977384.70	978068.44
CD-378	1004057.69	1014826.20	4.73	2554.40	977384.22	978068.42
CD-380	998171.69	1021429.68	4.79	2550.42	977379.04	978069.31
CD-382	997848.92	1021166.47	4.79	2554.29	977378.14	978069.28
CD-384	997068.58	1020591.28	4.79	2553.15	977378.20	978069.20
CD-385	996689.10	1020398.85	4.78	2551.57	977378.80	978069.17
CD-386	996390.11	1020256.76	4.78	2548.72	977379.66	978069.15
CD-387	996331.58	1019972.78	4.78	2551.76	977378.46	978069.11
CD-392	996318.33	1018118.33	4.76	2547.43	977377.99	978068.86
CD-394	995987.71	1017247.47	4.76	2542.10	977378.46	978068.75
CD-397	1002716.31	1005309.80	4.65	2674.37	977369.22	978067.16
CD-399	1002870.62	1005715.86	4.65	2673.26	977369.60	978067.21
CD-402	993650.77	1015620.31	4.74	2548.38	977376.74	978068.53
CD-403	993956.95	1015257.17	4.74	2543.83	977377.99	978068.48
CD-404	994480.20	1014650.12	4.73	2545.53	977377.77	978068.40
CD-405	994893.63	1014175.42	4.73	2546.77	977377.98	978068.34
CD-406	995342.38	1013605.67	4.72	2548.15	977377.97	978068.26
CD-408	996008.43	1012719.74	4.71	2550.47	977378.45	978068.14
CD-410	996799.84	1012087.20	4.71	2552.29	977379.29	978068.06
CD-413	997928.81	1011406.09	4.70	2552.79	977383.93	978067.96
CD-418	992667.86	1015441.53	4.74	2549.44	977377.39	978068.50
CD-419	992246.93	1015254.31	4.74	2548.61	977378.02	978068.48
CD-421	991999.77	1014469.20	4.73	2544.99	977378.81	978068.37

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G.TEORICA
CD-422	992368.76	1014048.91	4.73	2544.18	977379.41	978068.32
CD-425	992955.56	1012880.76	4.72	2546.46	977379.08	978068.16
CD-427	993451.68	1012045.79	4.71	2546.18	977379.61	978068.05
CD-429	994166.99	1011355.60	4.70	2547.98	977380.48	978067.96
CD-430	994984.51	1010746.69	4.70	2549.32	977381.08	978067.88
CD-432	995392.66	1010151.91	4.69	2548.72	977382.72	978067.80
CD-434	995694.44	1010991.04	4.70	2549.30	977383.14	978067.91
CD-437	996412.91	1012301.10	4.71	2551.61	977379.83	978068.08
CD-438	996709.77	1012463.15	4.71	2551.09	977381.43	978068.11
CD-440	997386.03	1012912.46	4.72	2551.17	977381.88	978068.17
CD-444	998432.33	1013472.48	4.72	2546.36	977387.68	978068.24
CD-447	997735.56	1012233.14	4.71	2551.85	977382.94	978068.08
CD-452	996534.29	1010423.30	4.69	2551.58	977385.52	978067.84
CD-455	996126.57	1009166.30	4.68	2550.44	977385.18	978067.67
CD-459	993524.34	1009598.46	4.69	2546.42	977382.57	978067.73
CD-466	993581.80	1008256.37	4.67	2543.33	977385.00	978067.55
CD-467	992969.55	1007662.57	4.67	2543.53	977385.63	978067.47
CD-470	991791.32	1008079.76	4.67	2543.47	977385.03	978067.52
CD-471	991642.20	1008587.14	4.68	2542.93	977384.29	978067.59
CD-474	991582.66	1009801.62	4.69	2545.37	977382.85	978067.75
CD-476	992245.38	1010298.13	4.69	2545.16	977382.15	978067.82
CD-477	991760.46	1010930.17	4.70	2546.16	977381.50	978067.90
CD-479	991037.48	1010950.58	4.70	2546.67	977381.77	978067.90
CD-482	990428.25	1010366.22	4.69	2544.87	977382.30	978067.83
CD-485	989524.11	1011062.46	4.70	2547.02	977381.65	978067.92
CD-490	990438.58	1012158.68	4.71	2543.90	977381.57	978068.06
CD-492	998600.95	994888.67	4.55	2793.17	977347.54	978065.80
CD-497	999023.70	994811.26	4.55	2859.57	977334.72	978065.79
CD-521	996921.57	994377.83	4.55	2673.79	977368.02	978065.74
CD-526	1004651.25	1009856.66	4.68	2568.22	977386.97	978067.64
CD-528	1004147.60	1008974.76	4.68	2580.14	977385.09	978067.64
CD-531	1003515.33	1007882.76	4.67	2589.68	977384.58	978067.50
CD-533	1002863.82	1007052.01	4.66	2585.94	977387.26	978067.39
CD-535	1002437.42	1006500.71	4.66	2584.07	977388.54	978067.32
CD-537	1002002.76	1005820.21	4.65	2578.94	977390.11	978067.23
CD-544	1006421.04	1008547.97	4.68	2918.62	977318.50	978067.59
CD-546	1005634.41	1008828.30	4.68	2843.31	977330.74	978067.62
CD-548	1001978.90	1004568.87	4.64	2638.31	977377.80	978067.06
CD-551	1001623.51	1002075.47	4.62	2702.64	977365.35	978066.73
CD-555	1001112.17	1000119.19	4.60	2673.79	977371.86	978066.48
CD-556	1000750.28	998658.05	4.59	2821.48	977340.50	978066.29
CD-557	1000385.47	998196.25	4.58	2808.06	977343.71	978066.23
CD-558	1000181.07	996115.51	4.56	2886.48	977329.48	978065.96
CD-568	998801.93	990799.54	4.52	3079.14	977287.19	978065.28
CD-571	999079.06	989390.63	4.50	3073.13	977289.47	978065.10
CD-574	999044.64	988035.23	4.49	3085.05	977287.31	978064.92
CD-577	995250.65	992448.95	4.53	2598.56	977380.42	978065.49
CD-580	995553.22	991351.59	4.52	2667.20	977365.75	978065.35

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G.TEORICA
CD-582	996555.81	991603.08	4.52	2816.61	977334.29	978065.38
CD-585	998055.33	991579.78	4.52	3106.74	977274.06	978065.38
CD-593	997392.51	987733.04	4.49	2884.75	977324.32	978064.88
CD-597	996654.45	989159.15	4.50	2803.72	977337.39	978065.07
CD-600	996087.22	990109.56	4.51	2706.32	977356.43	978065.19
CD-607	993486.32	994011.91	4.54	2640.19	977371.42	978065.69
CD-608	993055.16	995694.95	4.56	2642.35	977372.11	978065.91
CD-609	993191.44	997123.33	4.57	2559.79	977390.04	978066.09
CD-610	992998.57	997812.68	4.58	2557.86	977390.38	978066.18
CD-611	992726.81	998478.65	4.59	2556.55	977390.30	978066.26
CD-612	992594.65	998934.08	4.59	2555.47	977389.93	978066.33
CD-616	991094.36	997180.86	4.57	2689.42	977360.26	978066.10
CD-617	990324.25	995454.75	4.56	2906.67	977336.43	978065.87
CD-619	987930.63	1000558.10	4.60	2554.08	977389.41	978066.54
CD-623	986970.13	1000828.66	4.61	2546.41	977388.83	978066.57
CD-626	985863.03	1001583.95	4.61	2542.17	977387.57	978066.67
CD-628	986260.89	1002559.71	4.62	2545.41	977387.53	978066.80
CD-632	987327.13	1003284.74	4.63	2543.76	977389.15	978066.89
CD-634	987813.35	1002964.07	4.63	2544.85	977389.62	978066.85
CD-637	990428.10	1005100.90	4.65	2541.28	977388.59	978067.13
CD-639	991084.82	1005763.50	4.65	2543.40	977387.40	978067.22
CD-640	991654.76	1006440.14	4.66	2541.31	977387.59	978067.31
CD-641	992282.64	1005858.65	4.65	2542.79	977387.13	978067.23
CD-643	991282.94	1004944.85	4.64	2542.35	977388.38	978067.11
CD-650	987076.47	999491.88	4.59	2549.11	977389.65	978066.40
CD-653	1001839.76	1007627.50	4.67	2556.20	977389.87	978067.46
CD-656	1001425.01	1007214.62	4.66	2557.42	977389.19	978067.41
CD-658	1000855.79	1007613.69	4.67	2553.58	977387.27	978067.46
CD-661	999982.06	1008264.25	4.67	2547.53	977387.49	978067.55
CD-663	999435.67	1008695.03	4.68	2549.11	977386.38	978067.60
CD-674	1000506.49	1002095.57	4.62	2588.90	977388.10	978066.74
CD-682	1002658.47	1001305.38	4.61	3168.59	977262.41	978066.63
CD-683	996817.86	1003571.64	4.63	2554.73	977388.74	978066.93
CD-685	997208.47	1004089.95	4.64	2552.42	977389.38	978067.00
CD-687	997668.45	1004553.43	4.64	2552.10	977388.91	978067.06
CD-690	998842.34	1005295.60	4.65	2552.70	977388.71	978067.16
CD-693	999310.42	1006307.67	4.66	2552.28	977388.98	978067.29
CD-695	998768.77	1006969.30	4.66	2552.84	977386.99	978067.38
CD-696	999348.17	1001175.04	4.61	2580.89	977389.60	978066.62
CD-699	998558.07	1001860.63	4.62	2567.03	977390.29	978066.71
CD-702	997792.09	1002553.94	4.62	2557.92	977390.67	978066.80
CD-705	996843.80	1002461.51	4.62	2557.38	977389.39	978066.79
CD-707	996288.45	1002225.16	4.62	2557.40	977388.91	978066.75
CD-709	995534.42	1001925.80	4.62	2556.14	977388.70	978066.72
CD-713	998929.63	1000260.68	4.60	2575.52	977390.25	978066.50
CD-715	998212.88	1000770.32	4.61	2567.53	977390.22	978066.56
CD-718	997147.45	1001695.87	4.61	2560.14	977390.01	978066.68
CD-723	997772.72	998958.59	4.59	2572.23	977391.33	978066.33

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
CD-724	997604.27	999199.30	4.59	2571.56	977391.30	978066.36
CD-726	997118.65	999814.09	4.60	2563.97	977390.97	978066.44
CD-727	996742.58	999463.13	4.59	2564.18	977390.43	978066.39
CD-729	996083.20	999170.48	4.59	2561.05	977390.16	978066.36
CD-732	995106.49	999260.05	4.59	2561.58	977389.10	978066.37
CD-734	994318.00	998961.80	4.59	2562.38	977388.54	978066.33
CD-737	993529.36	998754.67	4.59	2561.89	977389.19	978066.30
CD-754	994688.31	996779.61	4.57	2599.59	977382.01	978066.05
CD-756	995765.62	996501.19	4.57	2656.03	977370.83	978066.01
CD-757	996537.91	996850.90	4.57	2688.23	977364.23	978066.05
CD-768	987655.93	999779.86	4.60	2551.94	977390.66	978066.44
CD-772	989282.11	1000027.17	4.60	2554.46	977391.55	978066.47
CD-775	990587.61	999939.19	4.60	2559.14	977390.02	978066.46
CD-777	991553.28	1000024.04	4.60	2554.05	977389.68	978066.47
CD-780	992446.19	999863.21	4.60	2555.12	977389.18	978066.45
CD-784	998297.61	996141.58	4.56	2691.71	977368.30	978065.96
CD-831	997706.74	997311.56	4.57	2585.86	977389.37	978066.11
CD-834	998306.68	998010.33	4.58	2587.14	977389.94	978066.20
CD-835	998487.26	998253.24	4.58	2581.40	977391.14	978066.24
CD-838	999084.01	999090.49	4.59	2581.52	977391.52	978066.35
CD-840	999591.79	999867.21	4.60	2585.87	977390.51	978066.45
CD-842	999968.47	1000468.47	4.60	2594.51	977389.04	978066.52
CD-846	1000849.67	1000498.39	4.60	2609.81	977385.36	978066.53
CD-848	999937.24	996878.87	4.57	2715.23	977365.22	978066.06
CD-849	999414.53	997186.35	4.57	2631.12	977382.39	978066.10
CD-853	998876.02	997645.92	4.58	2604.23	977387.58	978066.15
CD-854	998664.46	997685.61	4.58	2597.48	977390.29	978066.16
CD-855	998806.36	997898.11	4.58	2592.62	977390.10	978066.19
CD-859	999482.27	998693.41	4.59	2597.17	977388.94	978066.29
CD-864	1000001.79	999795.42	4.60	2600.52	977388.06	978066.44
CD-866	1000206.18	1000208.05	4.60	2606.40	977386.47	978066.49
CD-1640	1002105.58	1001348.55	4.61	2911.58	977317.56	978066.64
CD-2011	997303.39	995567.44	4.56	2811.89	977336.17	978065.89
11CM10	999694.90	1027345.70	4.85	2560.00	977382.64	978070.18
12CM10	998899.90	1026147.70	4.83	2561.53	977380.90	978069.92
13CM10	998345.30	1024894.40	4.82	2559.17	977378.56	978069.67
14CM10	997957.00	1024194.10	4.82	2560.01	977379.50	978069.67
15CM10	997402.30	1023604.30	4.82	2560.77	977379.85	978069.67
16CM10	996699.70	1022811.80	4.80	2559.00	977379.62	978069.42
17CM10	996108.00	1022074.60	4.80	2555.53	977380.75	978069.42
18CM10	995608.70	1021392.70	4.80	2558.02	977379.49	978069.42
19CM10	994702.70	1020803.00	4.78	2562.94	977383.10	978069.17
1CM10	1005148.40	1034699.60	4.92	2555.57	977382.71	978071.20
20CM10	993242.00	1020158.00	4.78	2556.83	977380.06	978069.17
21CM10	992206.40	1019199.70	4.77	2554.37	977378.23	978068.92
22CM10	991355.70	1017946.60	4.77	2554.24	977375.79	978068.92
23CM10	990449.60	1016840.80	4.75	2548.06	977376.63	978068.67
24CM10	989543.50	1016306.50	4.75	2550.68	977375.53	978068.67

Estudios geofísicos
Gravimetria

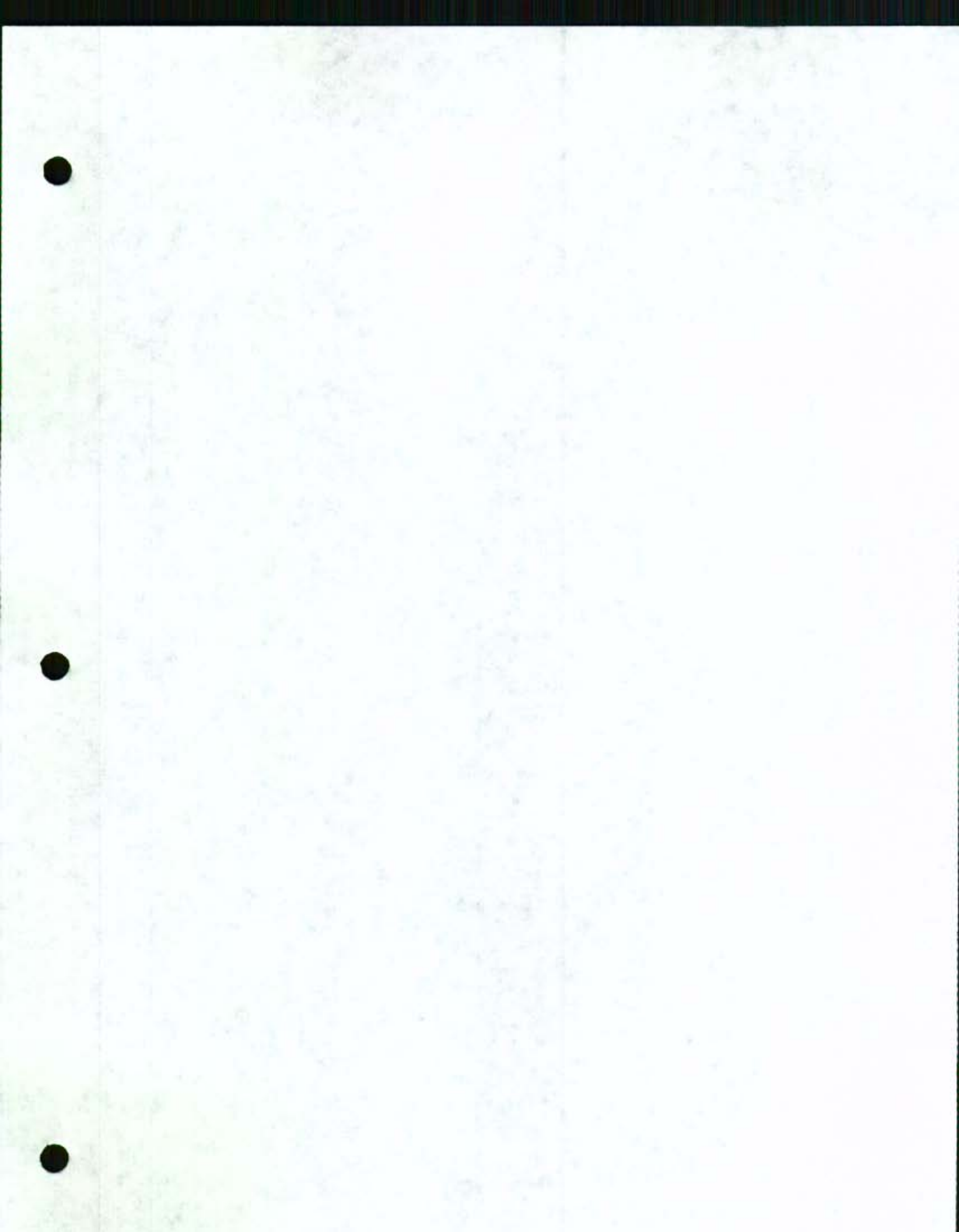
ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
25CM10	988304.40	1015311.40	4.73	2550.81	977375.42	978068.43
2CM10	1004741.80	1033999.20	4.90	2555.67	977382.59	978070.94
32CM10	982534.40	1011534.20	4.70	2542.68	977379.69	978067.93
33CM10	981609.60	1010981.50	4.70	2542.70	977383.63	978067.93
34CM10	980684.80	1010060.20	4.68	2542.01	977387.76	978067.69
36CM10	980129.60	1008217.30	4.67	2588.16	977384.27	978067.44
37CM10	980499.10	1007111.40	4.67	2638.62	977373.76	978067.44
38CM10	980683.80	1006005.50	4.65	2721.06	977355.82	978067.20
39CM10	980868.50	1004899.60	4.65	2702.48	977360.45	978067.20
3CM10	1004187.20	1033096.10	4.90	2555.83	977381.40	978070.94
41CM10	979573.40	1003056.90	4.63	2675.48	977365.45	978066.96
42CM10	978648.60	1002688.50	4.62	2674.16	977365.21	978066.72
43CM10	977723.80	1002320.20	4.62	2680.80	977363.48	978066.72
44CM10	977169.00	1002320.30	4.62	2683.83	977360.48	978066.72
45CM10	976614.40	1003242.00	4.63	2638.01	977370.36	978066.96
46CM10	975690.00	1003979.50	4.63	2556.44	977386.99	978066.96
47CM10	975135.40	1004716.90	4.65	2485.09	977400.64	978067.20
48CM10	974950.80	1005822.80	4.65	2411.37	977419.00	978067.20
49CM10	974581.30	1006928.80	4.67	2342.06	977431.84	978067.44
4CM10	1003817.50	1032395.70	4.90	2554.64	977381.12	978070.94
50CM10	973656.90	1007666.30	4.67	2306.28	977441.59	978067.44
51CM10	972547.40	1008035.30	4.67	2224.18	977457.70	978067.44
52CM10	971438.00	1008404.30	4.68	2120.48	977477.42	978067.69
53CM10	970513.20	1008036.00	4.67	2038.05	977496.54	978067.44
54CM10	969403.70	1008220.80	4.67	1962.71	977510.62	978067.44
55CM10	968664.10	1008589.70	4.68	1955.85	977514.30	978067.69
56CM10	967739.60	1008774.40	4.68	1913.80	977523.88	978067.69
57CM10	967184.90	1009143.20	4.68	1821.90	977543.02	978067.69
58CM10	965890.20	1008590.80	4.68	1683.42	977567.03	978067.69
5CM10	1003392.40	1031603.20	4.88	2553.88	977381.51	978070.68
60CM10	965150.50	1008591.20	4.68	1604.52	977588.64	978067.69
61CM10	964595.50	1008222.80	4.67	1544.05	977601.89	978067.44
62CM10	964040.60	1007854.40	4.67	1463.76	977618.19	978067.44
63CM10	963300.60	1007301.90	4.67	1382.26	977634.35	978067.44
64CM10	963485.20	1006564.50	4.67	1294.99	977653.54	978067.44
65CM10	962745.10	1005827.70	4.65	1214.97	977670.11	978067.20
66CM10	961820.50	1006012.40	4.65	1228.68	977669.87	978067.20
67CM10	961080.80	1006012.80	4.65	1253.79	977667.84	978067.20
68CM10	960340.90	1005828.80	4.65	1321.69	977652.87	978067.20
6CM10	1002893.30	1030755.40	4.88	2555.15	977381.93	978070.68
70CM10	958860.90	1004908.10	4.65	1377.00	977641.95	978067.20
A1	990150.00	1010450.00	4.69	2544.00	977381.51	978067.84
A2	989450.00	1011040.00	4.70	2545.18	977380.41	978067.92
A6	985100.00	1011120.00	4.70	2544.00	977378.41	978067.93
A7	984450.00	1011130.00	4.70	2543.00	977377.41	978067.94
A5	986310.00	1011260.00	4.70	2544.00	977379.41	978067.95
B20	986320.00	1011260.00	4.70	2543.00	977380.01	978067.95
A4	987370.00	1011310.00	4.70	2544.00	977380.01	978067.96

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
A3	988370.00	1011390.00	4.70	2544.00	977379.81	978067.97
A8	983520.00	1011790.00	4.71	2543.00	977377.91	978068.02
A9	983000.00	1012000.00	4.71	2544.00	977380.01	978068.05
B19	985820.00	1012230.00	4.71	2545.00	977377.61	978068.08
A10	982680.00	1012390.00	4.71	2545.00	977381.71	978068.10
E6	985390.00	1012950.00	4.72	2546.13	977375.81	978068.18
B18	985390.00	1012970.00	4.72	2546.00	977375.71	978068.18
A11	981870.00	1013140.00	4.72	2548.40	977383.71	978068.20
B17	985020.00	1013270.00	4.72	2547.00	977374.81	978068.22
E5	986280.00	1013500.00	4.72	2547.51	977375.31	978068.25
A12	981150.00	1013700.00	4.72	2549.00	977386.51	978068.28
B16	984730.00	1014040.00	4.73	2552.00	977373.91	978068.32
A13	980350.00	1014350.00	4.73	2548.00	977384.71	978068.37
E4	987330.00	1014410.00	4.73	2543.87	977376.11	978068.38
B15	984470.00	1014450.00	4.73	2552.00	977373.41	978068.38
C1	986920.00	1014650.00	4.73	2547.00	977374.61	978068.41
G1	987630.00	1014680.00	4.73	2547.00	977375.11	978068.41
C0	987110.00	1014800.00	4.73	2547.00	977375.51	978068.43
B14	984200.00	1014880.00	4.73	2550.00	977373.01	978068.44
A14	979600.00	1014980.00	4.74	2550.00	977384.81	978068.45
G2	987310.00	1015030.00	4.74	2548.00	977374.51	978068.46
C2	986710.00	1015090.00	4.74	2550.00	977373.71	978068.47
C31	986250.00	1015230.00	4.74	2547.00	977373.51	978068.48
G3	987040.00	1015310.00	4.74	2549.00	977373.81	978068.50
B13	983950.00	1015330.00	4.74	2549.00	977373.21	978068.50
E3	988410.00	1015430.00	4.74	2550.81	977375.41	978068.51
A15	978530.00	1015440.00	4.74	2541.00	977384.81	978068.51
G4	986850.00	1015480.00	4.74	2549.00	977373.61	978068.52
C3	986510.00	1015550.00	4.74	2549.00	977373.51	978068.53
C32	985940.00	1015610.00	4.74	2550.00	977373.91	978068.54
B12	983670.00	1015760.00	4.74	2552.00	977373.11	978068.56
F1	988970.00	1015970.00	4.74	2553.00	977375.61	978068.58
C4	986310.00	1016000.00	4.74	2548.00	977372.91	978068.59
A16	977180.00	1016040.00	4.74	2551.00	977387.71	978068.59
C53	985200.00	1016110.00	4.75	2549.00	977372.91	978068.60
B11	983420.00	1016200.00	4.75	2553.00	977373.61	978068.62
F2	988560.00	1016250.00	4.75	2552.00	977375.01	978068.62
E2	989520.00	1016340.00	4.75	2550.68	977375.61	978068.63
C51	985560.00	1016420.00	4.75	2551.00	977372.81	978068.65
C5	986110.00	1016450.00	4.75	2551.00	977372.41	978068.65
A17	976710.00	1016580.00	4.75	2552.00	977385.31	978068.67
C52	985090.00	1016260.00	4.75	2551.00	977372.71	978068.67
B10	983380.00	1016850.00	4.75	2554.00	977374.01	978068.70
C6	986890.00	1016920.00	4.75	2552.00	977372.81	978068.71
E1	990390.00	1016930.00	4.75	2548.06	977376.61	978068.71
F4	987690.00	1017070.00	4.75	2554.00	977372.91	978068.73
B9	983630.00	1017130.00	4.75	2554.00	977375.11	978068.74
A18	975690.00	1017190.00	4.76	2554.00	977384.51	978068.75

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
C7	985690.00	1017380.00	4.76	2554.00	977373.31	978068.77
C61	986200.00	1017430.00	4.76	2553.00	977373.71	978068.78
C64	987390.00	1017550.00	4.76	2550.00	977373.51	978068.80
C62	986610.00	1017720.00	4.75	2553.00	977373.51	978068.74
A19	974720.00	1017740.00	4.76	2555.02	977386.91	978068.82
B8	983800.00	1017800.00	4.76	2551.00	977374.61	978068.83
C8	985680.00	1017870.00	4.76	2555.00	977366.41	978068.84
B.GLORIETA	991275.00	1017990.00	4.76	2554.24	977375.79	978068.86
C63	987010.00	1018020.00	4.76	2549.00	977372.71	978068.86
C65	987230.00	1018305.00	4.77	2551.00	977373.51	978068.90
B7	984100.00	1018520.00	4.77	2553.00	977375.91	978068.93
A20	973980.00	1018850.00	4.77	2557.00	977385.31	978068.97
D7	990070.00	1018880.00	4.77	2554.31	977374.61	978068.98
B6	984110.00	1019030.00	4.77	2554.00	977376.91	978069.00
A21	973370.00	1019650.00	4.78	2562.00	977384.51	978069.08
B5	984080.00	1019660.00	4.78	2557.00	977379.21	978069.08
D6	989030.00	1019670.00	4.78	2556.19	977373.11	978069.09
C10	985910.00	1019870.00	4.78	2558.00	977373.61	978069.11
D5	988150.00	1020340.00	4.78	2559.39	977375.01	978069.18
B4	984140.00	1020850.00	4.79	2560.00	977380.51	978069.25
C11	985940.00	1020880.00	4.79	2558.00	977375.51	978069.25
D4	987110.00	1021120.00	4.79	2561.78	977374.41	978069.28
C12	985520.00	1021720.00	4.80	2561.00	977379.81	978069.36
B3	984240.00	1021890.00	4.80	2567.00	977381.91	978069.39
D3	986060.00	1021900.00	4.80	2563.81	977378.11	978069.39
B2	983660.00	1022290.00	4.80	2568.00	977383.81	978069.44
C13	985010.00	1022450.00	4.80	2580.00	977382.41	978069.46
D2	985350.00	1022610.00	4.80	2570.03	977383.81	978069.49
B1	983730.00	1023390.00	4.81	2567.00	977382.01	978069.59
D1	984670.00	1023630.00	4.81	2574.00	977382.41	978069.62
D0	983870.00	1024230.00	4.82	2576.00	977380.91	978069.71
P.PDRA	983860.00	1024280.00	4.82	2576.00	977380.91	978069.67
NP1	1000500.00	1017750.00	4.76	2628.79	977373.19	978068.82
NP2	1001350.00	1017600.00	4.76	2559.54	977387.57	978068.80
NP3	999800.00	1017500.00	4.76	2555.64	977386.85	978068.78
NP4	999350.00	1017650.00	4.76	2557.05	977386.15	978068.80
NP6	997940.00	1014000.00	4.73	2544.78	977383.34	978068.31
NP9	995700.00	1016450.00	4.75	2546.14	977377.04	978068.64
NP14	995350.00	1012300.00	4.71	2547.12	977379.75	978068.09
NP15	994750.00	1012820.00	4.72	2545.79	977379.28	978068.15
NP16	994380.00	1012420.00	4.71	2544.73	977379.72	978068.10
NP17	993800.00	1011660.00	4.70	2546.24	977380.18	978068.00
NP29	994710.00	1007190.00	4.66	2544.13	977385.81	978067.41
NP30	994080.00	1007760.00	4.67	2543.95	977385.24	978067.48
NP42	1005040.00	1014000.00	4.73	2556.82	977384.52	978068.31
NP48	1000170.00	1002650.00	4.62	2578.54	977389.15	978066.81
NP58	1001890.00	1000540.00	4.60	2702.90	977363.99	978066.53
NP60	1000550.00	999050.00	4.59	2702.17	977373.42	978066.34

Estudios geofísicos
Gravimetría

ESTACION	ESTE	NORTE	LATITUD	ALTURA	G.OBSERVADA	G TEORICA
NP61	1000150.00	998700.00	4.59	2662.98	977375.22	978066.29
NP63	1000050.00	997350.00	4.58	2661.72	977375.94	978066.12
NP71	1000550.00	1006100.00	4.65	2553.04	977390.60	978067.26
NP75	997850.00	994400.00	4.55	2710.56	977362.72	978065.74
NP76	998450.00	994150.00	4.55	2782.23	977348.94	978065.71
NP79	998550.00	993860.00	4.54	2916.86	977338.42	978065.67
NP6CE1	1004800.00	1010960.00	4.70	2580.29	977383.69	978067.91
NP7NW1	992510.00	1008560.00	4.68	2544.99	977384.15	978067.59
NPA7E1	1000950.00	999790.00	4.60	2685.12	977363.70	978066.44



ANEXO 3: Corrección por latitud y altura (aire libre Bouguer)

ESTACION	C. LATITUD	C. ALTURA	G B SIMPLE					CORRECCIÓN DE ALTURA				
			d=1.0 gr/cc	d=2.67 gr/cc	d=2 gr/cc	d=2.1 gr/cc	d=2.2 gr/cc	d=2.3 gr/cc	d=2.4 gr/cc	d=2.5 gr/cc	d=2.6 gr/cc	d=2.7 gr/cc
NPA7E1	0.64	25.78	-676.32	29.46	28.91	28.36	27.82	27.27	26.72	26.17	25.62	25.07

ANEXO 4: Corrección topográfica

ESTACION	CORRECCION TOPOGRAFICA										
Densidad	d=1.0 gr/cc	d=2.0 gr/cc	d=2.1 gr/cc	d=2.2 gr/cc	d=2.3 gr/cc	d=2.4 gr/cc	d=2.5 gr/cc	d=2.6 gr/cc	d=2.67 gr/cc	d=2.7 gr/cc	d=2.8 gr/cc
NPA7E1	0.69	1.37	1.41	1.51	1.58	1.64	1.71	1.78	1.83	1.85	1.92

ANEXO 5: Anomalía de Bouguer Total

ESTACION	ANOMALIA DE BOUGUER TOTAL									
	Densidad	D=2.0 gr/cc	d=2.1 gr/cc	d=2.2 gr/cc	d=2.3 gr/cc	d=2.4 gr/cc	d=2.5 gr/cc	d=2.6 gr/cc	d=2.7 gr/cc	d=2.8 gr/cc
D4	-695.33	-695.36	-695.39	-695.42	-695.45	-695.49	-695.52	-695.54	-695.55	-695.58
C12	-690.20	-690.22	-690.25	-690.27	-690.30	-690.32	-690.35	-690.36	-690.37	-690.40
B3	-686.65	-686.70	-686.74	-686.78	-686.83	-686.87	-686.91	-686.94	-686.96	-687.00
D3	-691.30	-691.34	-691.37	-691.41	-691.45	-691.48	-691.52	-691.54	-691.55	-691.59
B2	-684.52	-684.56	-684.60	-684.64	-684.68	-684.72	-684.76	-684.79	-684.80	-684.84
C13	-683.51	-683.51	-683.72	-683.82	-683.92	-684.03	-684.13	-684.20	-684.23	-684.34
D2	-684.32	-684.38	-684.44	-684.50	-684.55	-684.61	-684.67	-684.71	-684.73	-684.79
B1	-686.77	-686.80	-686.83	-686.87	-686.90	-686.93	-686.97	-686.99	-687.00	-687.03
D1	-685.00	-685.07	-685.14	-685.21	-685.28	-685.35	-685.42	-685.46	-685.48	-685.55
D0	-686.04	-686.10	-686.17	-686.24	-686.31	-686.38	-686.45	-686.50	-686.52	-686.59
P.PDRA	-685.95	-686.02	-686.09	-686.16	-686.23	-686.29	-686.36	-686.41	-686.43	-686.50
NP1	-680.32	-680.62	-680.92	-681.22	-681.52	-681.82	-682.12	-682.33	-682.42	-682.73
NP2	-681.54	-681.55	-681.56	-681.58	-681.59	-681.61	-681.62	-681.63	-681.63	-681.65
NP3	-683.05	-683.04	-683.03	-683.03	-683.02	-683.02	-683.01	-683.01	-683.01	-683.00
NP4	-683.49	-683.49	-683.50	-683.50	-683.50	-683.50	-683.50	-683.50	-683.50	-683.50
NP6	-688.26	-688.22	-688.18	-688.13	-688.09	-688.05	-688.01	-687.98	-687.97	-687.93
NP9	-694.94	-694.91	-694.88	-694.84	-694.81	-694.78	-694.74	-694.72	-694.71	-694.68
NP14	-690.91	-690.88	-690.85	-690.82	-690.79	-690.76	-690.73	-690.71	-690.70	-690.67
NP15	-691.81	-691.78	-691.74	-691.71	-691.67	-691.64	-691.61	-691.58	-691.57	-691.54
NP16	-691.51	-691.47	-691.43	-691.39	-691.35	-691.31	-691.27	-691.25	-691.23	-691.19
NP17	-690.51	-690.48	-690.44	-690.41	-690.38	-690.34	-690.31	-690.29	-690.28	-690.25
NP29	-684.17	-684.13	-684.08	-684.04	-684.00	-683.96	-683.92	-683.89	-683.88	-683.83
NP30	-684.93	-684.89	-684.84	-684.80	-684.76	-684.72	-684.67	-684.64	-684.63	-684.59
NP42	-683.39	-683.35	-683.32	-683.28	-683.24	-683.20	-683.16	-683.13	-683.12	-683.08
NP48	-671.29	-671.36	-671.43	-671.50	-671.57	-671.65	-671.72	-671.77	-671.79	-671.86
NP58	-664.12	-664.52	-664.92	-665.32	-665.72	-666.13	-666.53	-666.81	-666.93	-667.33
NP60	-656.78	-657.29	-657.81	-658.32	-658.84	-659.35	-659.87	-660.23	-660.38	-660.90
NP61	-663.96	-664.32	-664.68	-665.05	-665.41	-665.77	-666.14	-666.39	-666.50	-666.86
NP63	-662.59	-662.92	-663.25	-663.58	-663.91	-664.24	-664.57	-664.80	-664.90	-665.23
NP71	-676.76	-676.74	-676.72	-676.70	-676.67	-676.65	-676.63	-676.62	-676.61	-676.59
NP75	-664.96	-665.54	-666.12	-666.70	-667.28	-667.86	-668.43	-668.84	-669.01	-669.59
NP76	-662.46	-663.34	-664.21	-665.08	-665.96	-666.83	-667.70	-668.32	-668.58	-669.45
NP79	-642.26	-643.68	-645.10	-646.51	-647.93	-649.35	-650.77	-651.76	-652.19	-653.61
NP6CE1	-677.84	-677.88	-677.92	-677.97	-678.01	-678.06	-678.10	-678.13	-678.14	-678.19
NP7NW1	-685.99	-685.95	-685.91	-685.88	-685.84	-685.80	-685.76	-685.74	-685.72	-685.69
NPA7E1	-671.27	-671.75	-672.23	-672.71	-673.20	-673.68	-674.16	-674.49	-674.64	-675.12

ANEXO 6: Mapas de Anomalía Total de Bouguer, Anomalía Residual y de Espesor de sedimentos a Escala 1:50.000