

# **MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DETALLADA DE LOS MUNICIPIOS DE BARBOSA, GIRARDOTA, COPACABANA, SABANETA, LA ESTRELLA, CALDAS Y ENVIGADO**

## **INFORME FINAL**

### **TABLA DE CONTENIDO**

	RESUMEN
	ABSTRACT
	CRÉDITOS
1.	INTRODUCCIÓN
1.1	ANTECEDENTES
1.1.1	Contractuales
1.1.2	Localización y conformación del Valle de Aburrá
1.1.3	Población
1.1.4	Problema del riesgo sísmico y su variación dentro del Valle de Aburrá
1.2	ESTUDIOS ANTERIORES
1.3	RESUMEN DE LOS CAPÍTULOS
2.	GENERALIDADES
2.1	OBJETIVO
2.2	ALCANCE
2.2.1	Fase 1. Estudios geológicos, estructurales y geomorfológicos de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, escala 1:10 000
2.2.2	Fase 2. Evaluación de la amenaza sísmica
2.2.3	Fase 3. Exploración y caracterización geotécnica
2.2.4	Fase 4. Microzonificación sísmica de las áreas urbanas de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado
2.2.5	Fase 5. Diseño e implementación de Red Acelerográfica del Valle de Aburrá

- 2.2.6 Fase 6. Evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburrá
- 2.2.7 Fase 7. Diseño, estructuración y montaje de la geoinformación en un Sistema de Información Geográfico
- 2.2.8 Fase 8. Divulgación y socialización del proyecto
- 3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)
  - 3.1 INTRODUCCIÓN
  - 3.2 CARTOGRAFÍA BASE
  - 3.3 MODELO DIGITAL DE TERRENO
    - 3.3.1 Cubrimiento espacial y cartografía base
    - 3.3.2 Integración información cartográfica
    - 3.3.3 Elaboración del modelo digital de terreno
  - 3.4 MODELO ESTRATIGRÁFICO
  - 3.5 ALMACENAMIENTO DE LA GEOINFORMACIÓN
    - 3.5.1 Estructura de directorios
    - 3.5.2 Modelo de datos para la Geodatabase
    - 3.5.3 Diccionario de datos
- 4. GEOLOGÍA, TECTÓNICA Y GEOMORFOLOGÍA
  - 4.1 GEOLOGÍA REGIONAL
    - 4.1.1 Grupo Caldas
    - 4.1.2 Complejo Cajamarca
    - 4.1.3 Gneis de Palmitas (TRgP)
    - 4.1.4 Stock de Amagá (TRgA)
    - 4.1.5 Milonita de La Iguañá (Jml)
    - 4.1.6 Complejo Ofiolítico de Romeral
    - 4.1.7 Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS)
    - 4.1.8 Complejo Ofiolítico de Aburrá
    - 4.1.9 Complejo Quebradagrande
    - 4.1.10 Intrusivos Cretáceos
    - 4.1.11 Depósitos de Vertiente
    - 4.1.12 Depósitos Aluviales
    - 4.1.13 Depósitos Antrópicos – Llenos (QII)

- 4.2 GEOLOGIA LOCAL
  - 4.2.1 Municipio de Caldas
  - 4.2.2 Municipio de La Estrella
  - 4.2.3 Municipio de Sabaneta
  - 4.2.4 Municipio de Envigado
  - 4.2.5 Municipio de Itagüí
  - 4.2.6 Municipio de Medellín
  - 4.2.7 Municipio de Bello
  - 4.2.8 Municipio de Copacabana
  - 4.2.9 Municipio de Girardota
  - 4.2.10 Municipio de Barbosa
  
- 4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL
  - 4.3.1 Sistema de fallas NS a NNW
  - 4.3.2 Sistema de fallas NE
  - 4.2.3 Sistema de fallas y lineamientos NW
  
- 4.4 GEOMORFOLOGÍA
  - 4.4.1 Generalidades
  - 4.4.2 Contexto Geomorfológico del Valle de Aburrá
  - 4.4.3 Metodología de trabajo
  - 4.4.4 Unidades de Paisaje
  - 4.4.5 Macrounidades
  - 4.4.6 Unidades Geomorfológicas
  
- 5. NEOTECTÓNICA
  - 5.1 SISTEMA DE FALLAS LA HONDA AL ORIENTE DEL VALLE DE ABURRÁ
    - 5.1.1 Sector Caravanchel – Presa La Fe, Oriente del Valle de Aburrá
    - 5.1.2 Anomalía quebrada Las Palmas
    - 5.1.3 Sector Vereda La Hondita
    - 5.1.4 Sector Guarne – 500 m al sur del cruce de la quebrada La Mosca con la Autopista Medellín - Bogotá
    - 5.1.5 Sector El Tablazo, quebrada Estoraque
    - 5.1.6 Conclusiones sobre el sector Oriente del Valle de Aburrá
  
  - 5.2 SECTOR TÚNEL DE OCCIDENTE – PORTAL OCCIDENTAL, OCCIDENTE DEL VALLE DE ABURRÁ. SITIO CASSETAS DE PEAJE
  
  - 5.3 SECTOR QUEBRADA LA CABAÑA, SAN ANTONIO DE PRADO, VERTIENTE DERECHA QUEBRADA DOÑA MARÍA

- 5.4 SECTOR EBÉJICO – SEVILLA, OCCIDENTE DEL VALLE DE ABURRÁ.  
QUEBRADA LA CLARA O QUEBRADA SECA
- 5.5 SECTOR QUEBRADA LA GARCÍA, EN INMEDIACIONES DE LA POBLACIÓN  
DE SAN FELIX, NW DEL VALLE DE ABURRÁ
- 5.6 SECTOR QUEBRADA PUCUNÁ, EN INMEDIACIONES DE SEVILLA, NW DEL  
VALLE DE ABURRÁ
- 6. AMENAZA SÍSMICA
  - 6.1 GEOLOGÍA SÍSMICA
    - 6.1.1 Generalidades
    - 6.1.2 Marco Tectónico General
    - 6.1.3 Marco Tectónico Regional
    - 6.1.4 Sistemas de fallas
  - 6.2 SISMICIDAD REGIONAL
    - 6.2.1 Sismicidad Histórica e Instrumental
    - 6.2.2 Sismicidad Instrumental
  - 6.3 SISMOFUENTES
    - 6.3.1 Zonas Sismogénicas
    - 6.3.2 Caracterización de sismofuentes
  - 6.4 ECUACIONES DE ATENUACIÓN
  - 6.5 ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA
    - 6.5.1 Aceleración Máxima del Terreno (PGA) y Aceleraciones Espectrales (Sa)
    - 6.5.2 Velocidad Máxima del Terreno (PGV)
    - 6.5.3 Desplazamiento Máximo del Terreno (PGD)
- 7. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA
  - 7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN - BASE DE DATOS DE PROPIEDADES  
GEOTÉCNICAS
  - 7.2 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

- 7.3 ENSAYOS DE CAMPO
  - 7.3.1 Ensayo de penetración estándar
  - 7.3.2 Ensayo Down-Hole
- 7.4 ENSAYOS ESTÁTICOS DE LABORATORIO
  - 7.4.1 Pruebas índice
  - 7.4.2 Ensayos de resistencia al corte
- 7.5 ENSAYOS DINÁMICOS DE LABORATORIO
  - 7.5.1 Ensayo Triaxial Cíclico
  - 7.5.2 Ensayo de Columna Resonante
  - 7.5.3 Microsísmica (Bender Element)
  - 7.5.4 Ajustes de Curvas de Degradación del Módulo de Rigidez y Amortiguamiento
  - 7.5.5 Modelo de Romo
  - 7.5.6 Fredlung y Xing
  - 7.5.7 Otálvaro
  - 7.5.8 Curvas de Degradación y Amortiguamiento
- 7.6 VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE
- 8. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
  - 8.1 ELEMENTOS TEÓRICOS
  - 8.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA
    - 8.2.1 PASO 1
    - 8.2.2 PASO 2
    - 8.2.3 PASO 3
  - 8.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
    - 8.3.1 Integración espacial de los datos, modelado con SIG y Técnicas de visualización
    - 8.3.2 Empleo de la TI dentro de la microzonificación sísmica de los municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá
    - 8.3.3 Análisis de espectros de respuesta para perfiles típicos
- 9. DISEÑO DE LA RED ACELEROGRÁFICA
  - 9.1 INTRODUCCIÓN

- 9.2 CRITERIOS DE DISEÑO
- 9.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS ACELERÓGRAFOS
  
- 9.4 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS
  
- 10. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO
- 10.1 INTRODUCCIÓN
- 10.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
- 10.3 RIESGO SÍSMICO
  - 10.3.1 Pérdida Máxima Probable (PML)
  - 10.3.2 Pérdida Promedio Anual (PPA)
  - 10.3.3 Pérdidas Físicas en Edificaciones
  - 10.3.4 Pérdidas Físicas en Líneas Vitales
  - 10.3.5 Pérdidas Humanas
- 10.4 RESULTADOS
  - 10.4.1 Introducción
  - 10.4.2 Barbosa
  - 10.4.3 Bello
  - 10.4.4 Caldas
  - 10.4.5 Copacabana
  - 10.4.6 Envigado
  - 10.4.7 Girardota
  - 10.4.8 Itagüí
  - 10.4.9 La Estrella
  - 10.4.10 Medellín
  - 10.4.11 Sabaneta
- 10.5 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS TOTALES
- 10.6 INTREPRETACIÓN DE RESULTADOS
  - 10.6.1 Pérdidas en Edificaciones
  - 10.6.2 Afectación a Personas
  - 10.6.3 Pérdidas en Tuberías
  
- 11. CONCLUSIONES
- 11.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

- 11.2 GEOLOGÍA Y GEMORFOLOGÍA
- 11.3 NEOTECTÓNICA
- 11.4 AMENAZA SÍSMICA
- 11.5 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA
- 11.6 MICROZONIFICACIÓN
- 11.7 RED ACELEROGRÁFICA
- 11.8 VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO
- 11.9 RECOMENDACIONES
- 12. BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 1. MAPAS

ANEXO 2. REGISTROS DE ENSAYOS DINÁMICOS Y ESTÁTICOS

ANEXO 3. REGISTROS DE PERFORACIONES

ANEXO 4. REGISTROS DE ENSAYOS DOWN-HOLE

ANEXO 5. FORMATOS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN PARA  
EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

ANEXO 6. GRÁFICOS DE DISTRIBUCIÓN DE LAS DIFERENTES VARIABLES  
UTILIZADAS PARA ANALIZAR LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

ANEXO 7. RESULTADOS DE LA DATACIÓN CON CARBONO 14

ANEXO 8. INFORMES DE OPERACIÓN DE LA RED ACELEROGRÁFICA DEL VALLE  
DE ABURRÁ DE LOS MESES DE ABRIL Y JUNIO

ANEXO 9. DIVULGACIÓN Y SOCIALIZACIÓN DEL PROYECTO MICROZONIFICACIÓN  
SÍSMICA DEL VALLE DEL ABURRÁ

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Parámetros del sistema de coordenadas geográficas adoptado para el estudio (AMVA, 2006)
Tabla 3.2	Parámetros del sistema de coordenadas planas adoptado para el estudio (AMVA, 2006)
Tabla 3.3	Parámetros del sistema de coordenadas planas del proyecto SIGMA
Tabla 3.4	Parámetros definidos para la GeoDatabase (AMVA, 2006)
Tabla 4.1	Perfil de Meteorización según Dearman (1991)
Tabla 4.2	Leyenda Geológica para el Valle de Aburrá
Tabla 4.3	Fotografías Aéreas Consultadas
Tabla 4.4	Perfil de meteorización PZaAM
Tabla 4.5	Perfil de meteorización PZeC
Tabla 4.6	Perfil de meteorización PZagC
Tabla 4.7	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.8	Perfil de meteorización TRgA
Tabla 4.9	Perfil de meteorización JKuM
Tabla 4.10	Perfil de meteorización Diabasas (KvQG)
Tabla 4.11	Perfil de meteorización tobas
Tabla 4.12	Perfil de meteorización PZeC
Tabla 4.13	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.14	Perfil de meteorización JuR
Tabla 4.15	Perfil de meteorización JgR



---

Tabla 4.16	Perfil de meteorización KvQG (Diabasas)
Tabla 4.17	Perfil de meteorización KvsQG (Tobas)
Tabla 4.18	Perfil de meteorización KvsQG (Chert)
Tabla 4.19	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.20	Perfil de meteorización TRmPP
Tabla 4.21	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.22	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.23	Perfil de meteorización TRmPP
Tabla 4.24	Perfil de meteorización JKgmS
Tabla 4.25	Perfil de meteorización JKuM
Tabla 4.26	Perfil de meteorización KdA
Tabla 4.27	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.28	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.29	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.30	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.31	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.32	Perfil de meteorización TReaB
Tabla 4.33	Perfil de meteorización TRmPP
Tabla 4.34	Perfil de meteorización TRgLC
Tabla 4.35	Perfil de meteorización TRgP
Tabla 4.36	Perfil de meteorización Jml
Tabla 4.37	Perfil de meteorización JuR
Tabla 4.38	Perfil de meteorización JgR

---

Tabla 4.39	Perfil de meteorización JgR
Tabla 4.40	Perfil de meteorización JKgmS
Tabla 4.41	Perfil de meteorización JKuM
Tabla 4.42	Perfil de meteorización JKuM
Tabla 4.43	Perfil de meteorización JKmbP
Tabla 4.44	Perfil de meteorización KvQG
Tabla 4.45	Perfil de meteorización KvsQG
Tabla 4.46	Perfil de meteorización KcdA
Tabla 4.47	Perfil de meteorización KcdE
Tabla 4.48	Perfil de meteorización KcdML
Tabla 4.49	Perfil de meteorización KtO
Tabla 4.50	Perfil de meteorización KdA
Tabla 4.51	Perfil de meteorización KdA
Tabla 4.52	Perfil de meteorización KgSD
Tabla 4.53	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.54	Perfil de meteorización TReaB
Tabla 4.55	Perfil de meteorización JKmbP
Tabla 4.56	Perfil de meteorización JKuM
Tabla 4.57	Perfil de meteorización KtO
Tabla 4.58	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.59	Perfil de meteorización TRgLC
Tabla 4.60	Perfil de meteorización JKgmS

Tabla 4.61	Perfil de meteorización KcdA
Tabla 4.62	Perfil de meteorización KgC
Tabla 4.63	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.64	Perfil de meteorización TRaM
Tabla 4.65	Perfil de meteorización KcdA
Tabla 4.66	Perfil de meteorización TReC
Tabla 4.67	Perfil de meteorización Cornubiana
Tabla 4.68	Perfil de meteorización KcdA
Tabla 4.69	Fallas NS a NNW
Tabla 4.70	Listado de unidades de paisaje del sistema de altiplanos escalonados
Tabla 4.71	Listado de Bloques (Macrounidades) del Valle de Aburrá Superior
Tabla 4.72	Listado de Bloques (Macrounidades) del Valle de Aburrá Medio
Tabla 4.73	Listado de Bloques (Macrounidades) del Valle de Aburrá Inferior
Tabla 4.74	Listado de unidades geomorfológicas identificadas en el Valle de Aburrá
Tabla 6.1	Cubrimiento del catálogo
Tabla 6.2	Fallas ubicadas en la zona Andina Norte
Tabla 6.3	Fallas ubicadas en la zona Andina Sur
Tabla 6.4	Fallas ubicadas en la zona Piedemonte
Tabla 6.5	Fallas ubicadas en la zona Murindó
Tabla 6.6	Tasa de actividad de las zonas sismogénicas para magnitudes Mw mayores a 4
Tabla 6.7	Clasificación de la actividad de las fallas (Cluff, 1981)

Tabla 6.8	Resultados del análisis determinista
Tabla 7.1	Agrupación de suelos por origen y procedencia
Tabla 7.2	Cantidad de ensayos estáticos recopilados por municipio
Tabla 7.3	Resumen de la exploración geotécnica realizada
Tabla 7.4	Corrección por longitud del eje
Tabla 7.5	Corrección por muestreador
Tabla 7.6	Corrección por diámetro de la perforación
Tabla 7.7	Resultados de ensayos
Tabla 7.8	Valores límite de propiedades índice por formación ensayos realizados en este estudio
Tabla 7.9	Análisis estadístico de propiedades índice de la base de datos
Tabla 7.10	Peso unitario húmedo ( $kN/m^3$ ), $\gamma_h$ por formación geológica
Tabla 7.11	Resumen de condiciones de ensayos dinámicos
Tabla 7.12	Parámetros de Curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento
Tabla 7.13	Cantidad de ensayos de campo tipo Down-Hole
Tabla 7.14	Cantidad de valores de velocidad recopilados por formación
Tabla 7.15	Cantidad de valores de $N_{spt}$ por formación
Tabla 7.16	Ecuaciones de las variables independientes por unidad litológica
Tabla 7.17	Fórmulas de $V_s$ , a partir de una regresión múltiple
Tabla 7.18	Valores máximos y mínimos medidos de $V_s$
Tabla 8.1	Parámetros de la distribución Beta para la densidad húmeda
Tabla 8.2	Parámetros de la distribución Beta para la humedad

---

Tabla 8.3	Variaciones del peso unitario húmedo dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en los municipios estudiados
Tabla 8.4	Variaciones de la velocidad de onda de corte dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en los municipios estudiados
Tabla 8.5	Características de los eventos sísmicos analizados del catálogo sísmico de Costa Rica
Tabla 9.1	Estaciones Red Acelerográfica de Medellín (RAM)
Tabla 9.2	Estaciones Red Acelerográfica del Valle de Aburrá (RAVA)
Tabla 10.1	Zonas definidas para los análisis de vulnerabilidad
Tabla 10.2	Valores por m <sup>2</sup> utilizados en el análisis
Tabla 10.3	Derivas para cada tipo estructural para el 0.10% y el 80% de daño
Tabla 10.4	Niveles de afectación
Tabla 10.5	Niveles cuantitativos y cualitativos de daño
Tabla 10.6	Tasas de afectación en edificaciones de mampostería no reforzada
Tabla 10.7	Tasas de afectación en edificaciones de mampostería reforzada
Tabla 10.8	Tasas de afectación en edificaciones de concreto reforzado con muros de mampostería adosados
Tabla 10.9	Tasas de afectación en edificaciones de concreto reforzado sin muros de mampostería adosados
Tabla 10.10	Tasas de afectación en edificaciones de muros de concreto reforzado
Tabla 10.11	Tasas de afectación en edificaciones de acero con muros de mampostería adosados
Tabla 10.12	Tasas de afectación en edificaciones de acero sin muros de mampostería adosados
Tabla 10.13	Funciones de vulnerabilidad de afectación a personas
Tabla 10.14	Valor de las edificaciones y número de habitantes para cada municipio

- Tabla 10.15 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Barbosa para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.16 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Barbosa para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.17 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Barbosa para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.18 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Barbosa en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.19 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Bello para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.20 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Bello para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.21 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Bello para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.22 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Bello en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.23 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Caldas para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.24 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Caldas para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.25 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Caldas para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.26 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Caldas en periodos de exposición de 50 y 100 años

- 
- Tabla 10.27 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Copacabana para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.28 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Copacabana para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.29 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Copacabana para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.30 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Copacabana en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.31 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Envigado para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.32 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Envigado para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.33 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Envigado para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.34 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Envigado en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.35 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Girardota para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.36 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Girardota para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.37 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Girardota para periodos de exposición de 50 y 100 años

- 
- Tabla 10.38 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Girardota en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.39 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Itagüí para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.40 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Itagüí para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.41 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Itagüí para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.42 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Itagüí en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.43 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de La Estrella para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.44 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de La Estrella para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.45 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de La Estrella para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.46 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de La Estrella en periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.47 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Medellín para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.48 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Medellín para periodos de exposición de 50 y 100 años
- Tabla 10.49 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Medellín para periodos de exposición de 50 y 100 años



---

Tabla 10.50	Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Medellín en periodos de exposición de 50 y 100 años
Tabla 10.51	Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Sabaneta para periodos de exposición de 50 y 100 años
Tabla 10.52	Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Sabaneta para periodos de exposición de 50 y 100 años
Tabla 10.53	Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Sabaneta para periodos de exposición de 50 y 100 años
Tabla 10.54	Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Sabaneta en periodos de exposición de 50 y 100 años
Tabla 10.55	Ingreso promedio mensual considerado
Tabla 10.56	Daños en estructuras en todos los municipios para períodos de retorno de 10 y 500 años
Tabla 11.1	Parámetros del sistema de coordenadas geográficas adoptado para el estudio
Tabla 11.2	Parámetros del sistema de coordenadas planas adoptado para el estudio
Tabla 11.3	Parámetros del sistema de coordenadas planas del proyecto SIGMA
Tabla 11.4	Parámetros utilizados para la creación de los Features Dataset

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1 Cubrimiento cartografía SIGMA
- Figura 3.2 Cubrimiento curvas de nivel cartografía SIGMA
- Figura 3.3 Curvas de nivel suministradas por Planeación Envigado y comparación con cartografía SIGMA
- Figura 3.4 Empalme de curvas de nivel
- Figura 3.5 Modelo Digital de Terreno del Valle de Aburrá
- Figura 3.6 Modelo sombras y mapas de pendientes y aspectos
- Figura 3.7 Localización de los perfiles estratigráficos en el municipio de Caldas
- Figura 3.8 Localización en planta de la malla y de los puntos de interés sobre el modelo de elevación
- Figura 3.9 Superposición de las unidades geológicas superficiales con el modelo de elevación y generación del perfil topográfico y estratigráfico
- Figura 3.10 Detalle de la generación de la estratigrafía a lo largo del perfil topográfico
- Figura 3.11 Vista frontal de la estratigrafía a lo largo del perfil topográfico
- Figura 3.12 Información que fue tabulada para alimentar la tabla de atributos del shapefile
- Figura 3.13 Información del perfil estratigráfico almacenada en el Shapefile
- Figura 3.14 Estructura de directorios
- Figura 3.15 Estructura de la GeoDatabase
- Figura 4.1 PL-1050-G-01 Modelo Digital del Terreno
- Figura 4.2 PL-1050-G-02 Geología
- Figura 4.3 PL-1050-G-03 Estaciones de Campo

- Figura 4.4 Perfil de los altiplanos y el Valle de Aburrá ubicado un poco al sur del casco urbano de Girardota (SSE – NNW)
- Figura 4.5 Mapa geomorfológico del Valle de Aburrá (GSM, 2002)
- Figura 4.6 Unidades de Paisaje en el Área de trabajo
- Figura 4.7 Perfil transversal del Valle de Aburrá Superior en la zona al sur del casco urbano de Caldas (E-W)
- Figura 4.8 Perfiles esquemáticos transversales al Valle de Aburrá Medio a la altura de Medellín (Valle Medio)
- Figura 4.9 Perfiles esquemáticos del Valle de Aburrá Bajo
- Figura 5.1 Perfil longitudinal de la quebrada Las Palmas
- Figura 5.2 Levantamiento detallado corte en La Honda
- Figura 5.3 Levantamiento detallado corte en El Peaje
- Figura 5.4 Imagen tomada de Google. A la derecha se aprecia Medellín y los municipios que conforman el Valle de Aburrá; a la izquierda se encuentra el río Cauca y a la derecha del río Cauca se aprecia la expresión geomorfológica, como una línea recta, que corresponde a la quebrada La Clara o La Seca
- Figura 5.5 Apique Estación 5 localizado en la cota 1486 (Estec, 1983)
- Figura 5.6 Apique Estación 6 (Estec, 1983)
- Figura 5.7 Apique 9. Excavación para tanque, sector Santa Ana (Estec, 1983)
- Figura 5.8 Localización de apiques Sector Santa Ana, Bello (Estec, 1983)
- Figura 5.9 Perfil de la quebrada Pucuná - Dirección N39W
- Figura 5.10 Perfil de la quebrada Pucuná - Dirección WE
- Figura 6.1 Marco Tectónico Regional – Vectores de movimiento de las placas
- Figura 6.2 Sismicidad y zonas sismogénicas superficiales
- Figura 6.3 Sismicidad y zonas sismogénicas profundas

- Figura 6.4 Sismicidad histórica e instrumental en la zona de Antioquia
- Figura 6.5 Tasa de excedencia de magnitudes del catálogo filtrado
- Figura 6.6 Árbol de probabilidades o árbol lógico
- Figura 6.7 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Barbosa
- Figura 6.8 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Bello
- Figura 6.9 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Caldas
- Figura 6.10 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Copacabana
- Figura 6.11 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Envigado
- Figura 6.12 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Girardota
- Figura 6.13 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Itagüí
- Figura 6.14 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de La Estrella
- Figura 6.15 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Medellín
- Figura 6.16 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Sabaneta
- Figura 6.17 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Barbosa
- Figura 6.18 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Bello
- Figura 6.19 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Caldas

- Figura 6.20 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Copacabana
- Figura 6.21 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Envigado
- Figura 6.22 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Girardota
- Figura 6.23 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Itagüí
- Figura 6.24 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de La Estrella
- Figura 6.25 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Medellín
- Figura 6.26 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Sabaneta
- Figura 6.27 Disgregación de la amenaza sísmica para PGA y para un período de retorno de 9,3 años
- Figura 6.28 Disgregación de la amenaza sísmica para PGA y para un período de retorno de 475 años
- Figura 6.29 Disgregación de la amenaza sísmica para  $T = 1$  s y para un período de retorno de 9,3 años
- Figura 6.30 Disgregación de la amenaza sísmica para  $T = 1$  s y para un período de retorno de 475 años
- Figura 6.31 Amenaza sísmica a nivel regional para PGA y para un período de retorno de 9,3 años
- Figura 6.32 Amenaza sísmica a nivel regional para PGA y para un período de retorno de 475 años
- Figura 6.33 Espectros de amenaza uniforme para un período de retorno de 9,3 años
- Figura 6.34 Espectros de amenaza uniforme para un período de retorno de 475 años
- Figura 6.35 Curvas de amenaza para la Velocidad Máxima del Terreno (PGV)

- Figura 6.36 Espectro de amenaza uniforme para el Desplazamiento Máximo del Terreno (PGV) y para un período de retorno de 9,3 años
- Figura 6.37 Espectro de amenaza uniforme para el Desplazamiento Máximo del Terreno (PGV) y para un período de retorno de 43 años
- Figura 6.38 Espectro de amenaza uniforme para el Desplazamiento Máximo del Terreno (PGV) y para un período de retorno de 475 años
- Figura 7.1 Esquema del origen de los suelos
- Figura 7.3 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de anfibolita
- Figura 7.4 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales Neis
- Figura 7.5 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de dunita
- Figura 7.6 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de esquistos
- Figura 7.7 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de granodiorita y cuarzodiorita
- Figura 7.8 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de diorita
- Figura 7.9 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de gabro
- Figura 7.10 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de Migmatitas
- Figura 7.11 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los suelos residuales de Rocas Volcánicas
- Figura 7.12 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los depósitos de deslizamiento y de vertiente
- Figura 7.13 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los flujos de lodos recientes y meteorizados

- Figura 7.14 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los flujos de escombros recientes y meteorizados
- Figura 7.15 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los depósitos aluviales gruesos
- Figura 7.16 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los depósitos aluviales finos
- Figura 7.17 Variación de propiedades índice y NSPT con la profundidad para los depósitos aluviotorrenciales
- Figura 7.18 Parámetros empleados para definir la fracción de amortiguamiento crítico,  $\beta$
- Figura 7.19 Definición gráfica de energía disipada y energía almacenada
- Figura 7.20 Curva de resonancia utilizada para calcular el amortiguamiento
- Figura 7.21 Tiempos de llegada
- Figura 7.22 Curva frecuencia versus tiempo, muestra PES08-M18
- Figura 7.23 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de anfibolita
- Figura 7.24 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de gneis
- Figura 7.25 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de dunita
- Figura 7.26 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de esquistos
- Figura 7.27 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de diorita
- Figura 7.28 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de gabro
- Figura 7.29 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los depósitos de vertiente

- Figura 7.30 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los flujos de lodos y escombros
- Figura 7.31 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los depósitos aluviales
- Figura 7.32 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los depósitos aluviotorrenciales
- Figura 7.33 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de cuarzdiorita
- Figura 7.34 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 1 y 2
- Figura 7.35 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 3,4 y12
- Figura 7.36 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 12 y 13
- Figura 7.37 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 5 y 7
- Figura 7.38 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formación 10 y 11
- Figura 7.39 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 1 a 4
- Figura 7.40 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 5, 7, 12 y 13
- Figura 7.41 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 10 y 11
- Figura 8.1 Metodología empleada para la determinación de la respuesta sísmica
- Figura 8.2 Metodología empleada para la determinación de las variaciones de espesor para cada uno de los sitios evaluados
- Figura 8.3 Funciones de densidad de distribución probabilística para la densidad húmeda, formaciones 1, 2, 3, 4, 12 y 13
- Figura 8.4 Funciones de densidad de distribución probabilística para la densidad húmeda, formaciones 5, 6, 7, 10 y 11
- Figura 8.5 Gráficas de Densidad de probabilidad para la humedad, formaciones 2, 3 y 13
- Figura 8.6 Resultado del procedimiento para la selección de los sismo de excitación



- Figura 8.7 Diagrama de flujo del procedimiento empleado para la obtención de los sismos para la excitación del modelo unidimensional
- Figura 8.8 Eventos empleados como excitación para condiciones de amenaza para 475 años
- Figura 8.9 Eventos empleados como excitación para condiciones de amenaza para 9,3 años
- Figura 8.10 Metodología para la determinación de las relaciones espectrales
- Figura 8.11 Elementos de la Tecnología de la Información, (Rengers et al., 2002)
- Figura 8.12 Elementos del Sistema Integrado de Respuesta del Área Metropolitana
- Figura 8.13 SIRAM. Solicitud para la evaluación de la respuesta sísmica en el Municipio de Caldas
- Figura 8.14 SIRAM. Presentación del perfil de suelo típico y el espectro de respuesta esperado en suelo para el sitio de interés
- Figura 8.15 Respuesta máxima y mínima obtenida para el suelo residual de roca volcánica.
- Figura 8.16 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de roca volcánica.
- Figura 8.17 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de esquisto.
- Figura 8.18 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo
- Figura 8.19 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de esquisto.
- Figura 8.20 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Neis
- Figura 8.21 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Esquisto y Suelo residual de Neis. Municipio de Caldas
- Figura 8.22 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre suelo residual de roca volcánica. Municipio de Caldas
- Figura 8.23 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y Depósito aluvial. Municipio de Caldas

- Figura 8.24 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial. Municipio de Caldas
- Figura 8.25 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre suelo residual de esquisto
- Figura 8.26 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial. Municipio La Estrella
- Figura 8.27 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo Residual de gabro. Municipio La Estrella
- Figura 8.28 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo Residual de esquisto. Municipio La Estrella
- Figura 8.29 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluviotorrencial sobre flujo. Municipio La Estrella
- Figura 8.30 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre suelo residual de peridotita. Municipio La Estrella
- Figura 8.31 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre suelo residual de gabro. Municipio La Estrella
- Figura 8.32 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre depósito aluvial. Municipio La Estrella
- Figura 8.33 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo. Municipio La Estrella
- Figura 8.34 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre Flujo. Municipio La Estrella
- Figura 8.35 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo, Depósito aluvial sobre Flujo. Municipio La Estrella
- Figura 8.36 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluviotorrencial. Depósito aluvial sobre Flujo. Municipio La Estrella
- Figura 8.37 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de roca volcánica. Municipio La Estrella
- Figura 8.38 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de Migmatita. Municipio Sabaneta

- Figura 8.39 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de Esquisto. Municipio Sabaneta
- Figura 8.40 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre depósito aluvial y suelo residual de Migmatita. Municipio Sabaneta
- Figura 8.41 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre depósito aluvial. Municipio Sabaneta
- Figura 8.42 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre Flujo y suelo residual de esquisto. Municipio Sabaneta
- Figura 8.43 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre Depósito aluvial. Municipio Sabaneta
- Figura 8.44 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial. Municipio Sabaneta
- Figura 8.45 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Migmatita. Municipio Sabaneta
- Figura 8.46 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Esquisto. Municipio Sabaneta
- Figura 8.47 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil F-PRmPP
- Figura 8.48 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil F-Qal
- Figura 8.49 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil Qat-F-PRmPP
- Figura 8.50 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de Qat-PRmPP
- Figura 8.51 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil F-PRaM
- Figura 8.52 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil residual de migmatitas PRmPP
- Figura 8.53 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo y depósito aluvial sobre residual de anfibolita PRaM
- Figura 8.54 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de depósito aluvial
- Figura 8.55 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de depósito aluviotorrencial sobre flujo y depósito aluvial

- Figura 8.56 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de Suelo residual de anfibolita
- Figura 8.57 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo sobre residual de anfibolita PRaM
- Figura 8.58 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo y depósito aluvial sobre residual de anfibolita PRaM
- Figura 8.59 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil residual de anfibolita PRaM
- Figura 8.60 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de residual de gneis (PRnLC)
- Figura 8.61 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo sobre PRaM
- Figura 8.62 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo sobre PRaM
- Figura 8.63 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil Depósito aluvial sobre flujo sobre Depósito aluvial
- Figura 8.64 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de Qat sobre flujo sobre PRaM
- Figura 8.65 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre flujo, sobre depósito aluvial sobre residual de anfibolita (PRaM)
- Figura 8.66 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y depósito aluvial sobre flujo y depósito aluvial sobre residual de anfibolita (PRaM)
- Figura 8.67 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil F-KcdA
- Figura 8.68 Respuesta máxima y mínima obtenida para el depósito aluvial Qal
- Figura 8.69 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil Qal-KcdA
- Figura 8.70 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de F-Qal-KcdA
- Figura 8.71 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil KcdA
- Figura 8.72 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil KcdA. Municipio de Barbosa

- Figura 8.73 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Flujo y suelo residual de Batolito. Municipio de Barbosa
- Figura 8.74 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Flujo y suelo residual de esquisto. Municipio de Barbosa
- Figura 8.75 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Suelo residual de esquisto. Municipio de Barbosa
- Figura 8.76 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Depósito aluvial y Suelo residual de Batolito. Municipio de Barbosa
- Figura 8.77 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Depósito aluvial. Municipio de Barbosa
- Figura 8.78 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Depósito aluvial y suelo residual de Esquisto. Municipio de Barbosa
- Figura 8.79. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Flujo y Depósito aluvial y suelo residual de Esquisto. Municipio de Barbosa
- Figura 9.1 Localización de las estaciones de la Red Acelerográfica de Medellín
- Figura 10.1 Ejemplo de inventario de construcciones urbanas
- Figura 10.2 Distribución de número de pisos para la zona 1 del municipio de Envigado
- Figura 10.3 Distribución de la tipología estructural de la zona 1 del municipio de Envigado
- Figura 10.4 Distribución del uso de las edificaciones de la zona 1 del municipio de Envigado
- Figura 10.5 Distribución del estrato de las edificaciones de la zona 1 del municipio de Envigado
- Figura 10.6 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Barbosa
- Figura 10.7 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Barbosa
- Figura 10.8 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Barbosa

- Figura 10.9 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Barbosa
- Figura 10.10 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Barbosa
- Figura 10.11 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Barbosa
- Figura 10.12 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Barbosa
- Figura 10.13 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Bello
- Figura 10.14 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Bello
- Figura 10.15 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Bello
- Figura 10.16 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Bello
- Figura 10.17 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Bello
- Figura 10.18 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Bello
- Figura 10.19 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Bello
- Figura 10.20 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Caldas
- Figura 10.21 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Caldas
- Figura 10.22 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Caldas
- Figura 10.23 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Caldas

- Figura 10.24 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Caldas
- Figura 10.25 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Caldas
- Figura 10.26 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Caldas
- Figura 10.27 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Copacabana
- Figura 10.28 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Copacabana
- Figura 10.29 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Copacabana
- Figura 10.30 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Copacabana
- Figura 10.31 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Copacabana
- Figura 10.32 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Copacabana
- Figura 10.33 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Copacabana
- Figura 10.34 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Envigado
- Figura 10.35 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Envigado
- Figura 10.36 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Envigado
- Figura 10.37 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Envigado
- Figura 10.38 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Envigado

- Figura 10.39 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Envigado
- Figura 10.40 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Envigado
- Figura 10.41 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Girardota
- Figura 10.42 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Girardota
- Figura 10.43 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Girardota
- Figura 10.44 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Girardota
- Figura 10.45 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Girardota
- Figura 10.46 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Girardota
- Figura 10.47 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Girardota
- Figura 10.48 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Itagüí
- Figura 10.49 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Itagüí
- Figura 10.50 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Itagüí
- Figura 10.51 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Itagüí
- Figura 10.52 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Itagüí
- Figura 10.53 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Itagüí



- Figura 10.54 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Itagüí
- Figura 10.55 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de La Estrella
- Figura 10.56 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de La Estrella
- Figura 10.57 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de La Estrella
- Figura 10.58 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de La Estrella
- Figura 10.59 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de La Estrella
- Figura 10.60 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de La Estrella
- Figura 10.61 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de La Estrella
- Figura 10.62 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Medellín
- Figura 10.63 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Medellín
- Figura 10.64 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Medellín
- Figura 10.65 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Medellín
- Figura 10.66 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Medellín
- Figura 10.67 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Medellín
- Figura 10.68 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Medellín

- Figura 10.69 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Sabaneta
- Figura 10.70 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Sabaneta
- Figura 10.71 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Sabaneta
- Figura 10.72 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Sabaneta
- Figura 10.73 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Sabaneta
- Figura 10.74 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Barbosa
- Figura 10.75 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Sabaneta
- Figura 10.76 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las estructuras en todos los municipios del área metropolitana
- Figura 10.77 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 1 en el día expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios
- Figura 10.78 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 1 en la noche expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios
- Figura 10.79 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 2 en el día expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios
- Figura 10.80 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 2 en la noche expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios
- Figura 10.81 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 3-4 en el día expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios
- Figura 10.82 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 3-4 en la noche expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios
- Figura 10.83 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles todos los municipios

Figura 10.84 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías rígidas todos los municipios

M_DivPolitic_AM_0101.mxd	Mapa político del Valle de Aburrá
M_Aspectos_AM_0101.mxd	Mapa de Aspectos
M_Geologia_AM_0101.mxd	Mapa Geológico
M_ModeloDigi_AM_0101.mxd	Modelo Digital del Terreno
M_MUGeomorfo_AM_0101.mxd	Macrounidades Geomorfológicas
M_Pendientes_AM_0101.mxd	Mapa de Pendientes
M_TectoColom_0101.mxd	Mapa Tectónico de Colombia
M_Geomorfo_AM_0101.mxd	Unidades Geomorfológicas
M_UniPaisaje_AM_0101.mxd	Unidades de Paisaje
M_EstacCampo_AM_0101.mxd	Estaciones de campo
M_ExplGeotec_AM_0101.mxd	Exploración geotécnica
M_AcRoca475_AM_0101.mxd	Aceleración Máxima del Terreno a Nivel de Roca Tr = 475 años
M_AcRoca93_AM_0101.mxd	Aceleración Máxima del Terreno a Nivel de Roca Tr = 9,3 años
X_AcSuperf475_Ba_1001.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Barbosa
X_AcSuperf475_Ca_1010.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Caldas
X_AcSuperf475_Co_1003.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Copacabana
X_AcSuperf475_Es_1009.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, La Estrella

X_AcSuperf475_Gi_1002.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Girardota
X_AcSuperf475_Sa_1008.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Sabaneta
V_AcSuperf475_Be_1004.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Bello
V_AcSuperf475_En_1006.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Envigado
V_AcSuperf475_It_1007.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Itagüí
L_AcSuperf475_Me_1005.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años, Medellín
X_AcSuperf93_Ba_1001.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Barbosa
X_AcSuperf93_Ca_1010.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Caldas
X_AcSuperf93_Co_1003.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Copacabana
X_AcSuperf93_Es_1009.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, La Estrella
X_AcSuperf93_Gi_1002.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Girardota
X_AcSuperf93_Sa_1008.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Sabaneta
V_AcSuperf93_Be_1004.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Bello
V_AcSuperf93_En_1006.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Envigado
V_AcSuperf93_It_1007.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años, Itagüí

L_AcSuperf93_Me_1005.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie $T_r = 9,3$ años, Medellín
X_VulnerEstr_Ba_1001.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Barbosa
X_VulnerEstr_Ca_1010.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Caldas
X_VulnerEstr_Co_1003.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Copacabana
X_VulnerEstr_Es_1009.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, La Estrella
X_VulnerEstr_Gi_1002.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Girardota
X_VulnerEstr_Sa_1008.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Sabaneta
V_VulnerEstr_Be_1004.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Bello
V_VulnerEstr_En_1006.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Envigado
V_VulnerEstr_It_1007.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Itagüí
L_VulnerEstr_Me_1005.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, Medellín
X_PPAAfect1d_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) $\times 10^6$ para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Barbosa
X_PPAAfect1d_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) $\times 10^6$ para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Caldas
X_PPAAfect1d_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) $\times 10^6$ para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Copacabana
X_PPAAfect1d_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) $\times 10^6$ para Nivel de Afectación 1 en población diurna, La Estrella

X_PPAAfect1d_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Girardota
X_PPAAfect1d_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Sabaneta
V_PPAAfect1d_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Bello
V_PPAAfect1d_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Envigado
V_PPAAfect1d_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Itagüí
L_PPAAfect1d_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, Medellín
X_PPAAfect1n_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Barbosa
X_PPAAfect1n_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Caldas
X_PPAAfect1n_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Copacabana
X_PPAAfect1n_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, La Estrella
X_PPAAfect1n_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Girardota
X_PPAAfect1n_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Sabaneta
V_PPAAfect1n_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Bello
V_PPAAfect1n_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Envigado
V_PPAAfect1n_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Itagüí

L_PPAAfect1n_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, Medellín
X_PPAAfect2d_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Barbosa
X_PPAAfect2d_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Caldas
X_PPAAfect2d_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Copacabana
X_PPAAfect2d_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, La Estrella
X_PPAAfect2d_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Girardota
X_PPAAfect2d_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Sabaneta
V_PPAAfect2d_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Bello
V_PPAAfect2d_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Envigado
V_PPAAfect2d_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Itagüí
L_PPAAfect2d_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, Medellín
X_PPAAfect2n_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Barbosa
X_PPAAfect2n_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Caldas
X_PPAAfect2n_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Copacabana
X_PPAAfect2n_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, La Estrella

X_PPAAfect2n_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Girardota
X_PPAAfect2n_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Sabaneta
V_PPAAfect2n_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Bello
V_PPAAfect2n_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Envigado
V_PPAAfect2n_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Itagüí
L_PPAAfect2n_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, Medellín
X_PPAAfect3d_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Barbosa
X_PPAAfect3d_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Caldas
X_PPAAfect3d_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Copacabana
X_PPAAfect3d_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, La Estrella
X_PPAAfect3d_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Girardota
X_PPAAfect3d_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Sabaneta
V_PPAAfect3d_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Bello
V_PPAAfect3d_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Envigado
V_PPAAfect3d_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Itagüí



L_PPAAfect3d_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, Medellín
X_PPAAfect3n_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Barbosa
X_PPAAfect3n_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Caldas
X_PPAAfect3n_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Copacabana
X_PPAAfect3n_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, La Estrella
X_PPAAfect3n_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Girardota
X_PPAAfect3n_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Sabaneta
V_PPAAfect3n_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Bello
V_PPAAfect3n_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Envigado
V_PPAAfect3n_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Itagüí
L_PPAAfect3n_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, Medellín
X_PPAAedifica_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Barbosa
X_PPAAedifica_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Caldas
X_PPAAedifica_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Copacabana
X_PPAAedifica_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, La Estrella

X_PPAAedifica_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Girardota
X_PPAAedifica_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Sabaneta
V_PPAAedifica_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Bello
V_PPAAedifica_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Envigado
V_PPAAedifica_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Itagüí
L_PPAAedifica_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, Medellín
X_DPATubFlex_Ba_1001.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Barbosa
X_DPATubFlex_Ca_1010.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Caldas
X_DPATubFlex_Co_1003.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Copacabana
X_DPATubFlex_Es_1009.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, La Estrella
X_DPATubFlex_Gi_1002.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Girardota
X_DPATubFlex_Sa_1008.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Sabaneta
V_DPATubFlex_Be_1004.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Bello
V_DPATubFlex_En_1006.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Envigado
V_DPATubFlex_It_1007.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Itagüí

L_DPATubFlex_Me_1005.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, Medellín
X_DPATubRig_Ba_1001.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Barbosa
X_DPATubRig_Ca_1010.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Caldas
X_DPATubRig_Co_1003.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Copacabana
X_DPATubRig_Es_1009.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, La Estrella
X_DPATubRig_Gi_1002.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Girardota
X_DPATubRig_Sa_1008.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Sabaneta
V_DPATubRig_Be_1004.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Bello
V_DPATubRig_En_1006.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Envigado
V_DPATubRig_It_1007.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Itagüí
L_DPATubRig_Me_1005.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías rígidas, Medellín
M_LineaVuelo_AM_0101.mxd	Mapa de líneas de vuelo
M_RedAcelero_AM_0101.mxd	Mapa red acelerográfica
X_PPATPesos_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Barbosa
X_PPATPesos_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Caldas

X_PPATPesos_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Copacabana
X_PPATPesos_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, La Estrella
X_PPATPesos_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Girardota
X_PPATPesos_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Sabaneta
V_PPATPesos_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Bello
V_PPATPesos_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Envigado
V_PPATPesos_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Itagüí
L_PPATPesos_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Medellín
X_PPAdPesos_Ba_1001.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Barbosa
X_PPAdPesos_Ca_1010.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Caldas
X_PPAdPesos_Co_1003.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Copacabana
X_PPAdPesos_Es_1009.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, La Estrella
X_PPAdPesos_Gi_1002.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Girardota
X_PPAdPesos_Sa_1008.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Sabaneta
V_PPAdPesos_Be_1004.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Bello

---

V_PPAPePesos_En_1006.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Envigado
V_PPAPePesos_It_1007.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Itagüí
L_PPAPePesos_Me_1005.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos por m <sup>2</sup> de Área Construida, Medellín

## LISTA DE FOTOS

- Foto 5.1 Sitio localizado a 1,2 km del Mall de Caravanchel por la vía que de este sitio comunica con El Retiro
- Foto 5.2 Sitio localizado a 1,2 km del Mall de Caravanchel por la vía que de este sitio comunica con El Retiro
- Foto 5.3 Corte de la vía Caravanchel – El Retiro
- Foto 5.4 Vista general del corte oriental de la vía afectado por el diaclasamiento
- Foto 5.5 Corte de la vía Caravanchel – El Retiro afectado por el diaclasamiento
- Foto 5.6 Corte de la vía Caravanchel – El Retiro afectado por el diaclasamiento
- Foto 5.7 Talud sur de la vía
- Foto 5.8 Talud sur de la vía, sector izquierdo de la Foto 5.7
- Foto 5.9 Pinchamiento o adelgazamiento del paleosuelo
- Foto 5.10 Terminación anómala del paleosuelo
- Foto 5.11 Posible desplazamiento del paleosuelo
- Foto 5.12 Paleosuelo afectado por un diaclasamiento sistemático
- Foto 5.13 Intervención antrópica en la parte superior
- Foto 5.14 Continuidad de las diaclasas luego de haber retirado el material que ha sufrido desecación
- Foto 5.15 Se observan los cantos alineados
- Foto 5.16 Plano de falla y contraste de materiales en plano de falla
- Foto 5.17 Detalle del suelo desplazado y contacto con depósito de vertiente
- Foto 5.18 Perfil del afloramiento (tomada hacia el oriente) donde la topografía no sugiere la ocurrencia de un deslizamiento

- Foto 5.19 Zona de las casetas de peaje del portal occidental del túnel. La zona presenta cultivos y está intervenida hacia el oriente del afloramiento, pero no se encuentran evidencias que sugieran que se trata de un deslizamiento
- Foto 5.20 Expresión geomorfológica de la falla San Jerónimo Segmento 3 (Cañola, 2005; Estrada et al, 2005)
- Foto 5.21 Lomo de falla con dirección NS en la vertiente izquierda de la quebrada La Cabaña. Obsérvese las personas sobre la cima del lomo en el centro de la foto como escala
- Foto 5.22 Geoforma interpretada por Estrada et al (2005) como lomos de falla. Foto tomada hacia el NE
- Foto 5.23 Cauce de la quebrada La Cabaña cuando tiene dirección WE antes de girar en sentido SN y bordear las geoformas denominadas lomos
- Foto 5.24 Cauce de la quebrada La Cabaña en su tramo SN, siguiendo la dirección de la falla San Jerónimo – Segmento 3 en el sitio donde inician los lomos de falla (vertiente izquierda de la quebrada); foto tomada desde la vertiente izquierda de la quebrada y hacia el oriente
- Foto 5.25 Foto tomada hacia aguas arriba (sentido sur)
- Foto 5.26 Foto tomada hacia aguas arriba (sentido sur)
- Foto 5.27 Foto tomada hacia aguas arriba
- Foto 5.28 Foto tomada hacia aguas arriba
- Foto 5.29 Foto tomada hacia aguas arriba
- Foto 5.30 Último cambio vertical de nivel en la quebrada
- Foto 5.31 Tomada hacia aguas arriba (sentido sur)
- Foto 5.32 Tomada desde la vertiente derecha de la quebrada La Cabaña, con dirección S75°E
- Foto 5.33 Quebrada La Clara, tomada desde la vía que de Ebéjico conduce a Sevilla, en dirección norte

- Foto 5.34 Tomada hacia el sur. Se aprecia la geomorfología que sugiere la existencia de una falla a lo largo de la quebrada Seca o quebrada La Clara. (Foto Eduardo Parra)
- Foto 5.35 Depósito aluvial conformado por arena fina suelta que suprayace un paleosuelo
- Foto 5.36 Depósito aluvial conformado por arena fina suelta que suprayace un paleosuelo
- Foto 5.37 Relieve invertido, vertiente izquierda quebrada La García
- Foto 5.38 Parte alta y media de la cuenca de la quebrada Pucuná
- Foto 5.39 Foto tomada hacia el occidente. Se aprecia el depósito basculado hacia el norte y localizado aguas abajo del sitio donde la quebrada Pucuná cambia su curso para desembocar al río Cauca. Este depósito se localiza en la vertiente derecha de la quebrada
- Foto 5.40 Se aprecia la superficie del depósito basculado hacia el norte. Foto tomada en dirección E
- Foto 5.41 Se aprecia la vertiente izquierda de la quebrada Pucuná. Foto tomada hacia el S desde el depósito basculado al norte y localizado en la vertiente derecha de la quebrada Pucuná
- Foto 5.42 Se aprecia el material que conforma la parte superior del depósito que se encuentra basculado. Por ser un material granular no es fácil identificar desplazamientos
- Foto 5.43 En esta foto se aprecia el contacto entre los depósitos superiores
- Foto 5.44 Base del depósito sobre las rocas sedimentarias
- Foto 7.1 Ensayo triaxial cíclico
- Foto 7.2 Ensayo de columna resonante
- Foto 7.3 Montaje del ensayo
- Foto 7.4 Bender element
- Foto 9.1 Acelerógrafo ETNA de la serie ALTUS



Foto 9.2 Caseta acelerográfica del Hogar de los Recuerdos en Itagüí

Foto 9.3 Acelerógrafo CUSP-3C

## LISTA DE PLANOS

S_Geologia_AM_0101.mxd	Mapa geológico del área metropolitana
S_MUGeomorfo_AM_0101.mxd	Macro unidades geomorfológicas
S_TectoColom_0101.mxd	Mapa tectónico de Colombia
S_Geomorfo_AM_0101.mxd	Unidades geomorfológicas
S_AcRoca475_AM_0101.mxd	Aceleración máxima del terreno a nivel de roca, Tr 475 años
S_AcRoca93_AM_0101.mxd	Aceleración máxima del terreno a nivel de roca, Tr 9,3 años
S_AcSuperf475_AM_0101.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 475 años
S_AcSuperf93_AM_0101.mxd	Aceleración Máxima del Terreno en Superficie Tr = 9,3 años
S_VulnerEstr_AM_0101.mxd	Distribución de Zonas Homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural
S_PPAAfect1d_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para Nivel de Afectación 1 en población diurna
S_PPAAfect1n_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para Nivel de Afectación 1 en población nocturna
S_PPAAfect2d_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para Nivel de Afectación 2 en población diurna
S_PPAAfect2n_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para Nivel de Afectación 2 en población nocturna
S_PPAAfect3d_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para Nivel de Afectación 3 en población diurna
S_PPAAfect3n_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para Nivel de Afectación 3 en población nocturna

---

S_PPAAEdifica_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) x $10^6$ para edificaciones
S_DPATubFlex_AM_0101.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x $10^6$ para tuberías flexibles
S_DPATubRig_AM_0101.mxd	Daños Promedio Anual (DPA) x $10^6$ para tuberías rígidas
S_PPATPesos_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) Total en Pesos/m <sup>2</sup> de Área Construida
S_PPAAEdPesos_AM_0101.mxd	Pérdida Promedio Anual (PPA) en Pesos/m <sup>2</sup> de Área Construida

## RESUMEN

Este informe sintetiza la culminación de una serie de trabajos que con el apoyo de diferentes entidades, incluyendo al Municipio de Medellín y al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se han venido desarrollando desde la década pasada, y que han permitido avanzar en el conocimiento de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico regional y local en los municipios que conforman el área metropolitana del Valle de Aburrá.

En este estudio, que tiene como objetivo central la zonificación sísmica del Valle en términos de la respuesta local del suelo a nivel de superficie, se hace además una revisión detallada de la amenaza sísmica local, incluyendo estudios particulares de actividad neotectónica. Adicionalmente, se hace también una valoración de la vulnerabilidad de las edificaciones y de los sistemas de líneas vitales, incluyendo redes de servicios públicos. Así mismo, el estudio hace un análisis de vulnerabilidad de la población, tanto para escenarios de noche como de día, teniendo en cuenta la movilidad de las personas según la hora del día.

Estos resultados se combinan mediante procesos de convolución probabilistas para estimar las curvas de Pérdida Máxima Probable y Pérdida Promedio Anual en cada uno de los municipios del Valle de Aburrá. Estos resultados expresan en términos de tasas de excedencia el riesgo al cual están expuestas las personas, edificaciones y líneas vitales debidos a causas sísmicas, y servirán para la planeación de acciones encaminadas a mitigar el riesgo en la región.

Finalmente, como producto igualmente destacable del estudio está la generación de mapas de geología y geomorfología de todo el Valle, con un nivel de detalle nunca antes obtenido para estos mapas a nivel local.

## ABSTRACT

This report is the final step of a series of projects carried out in the last decade with the help of several institutions, among those the City Council of Medellín and the Área Metropolitana del Valle de Aburrá. These projects have allowed enhancing the knowledge about seismic hazard, vulnerability and risk, both in regional and local scale, for all the municipalities forming the metropolitan area of the Aburrá Valley.

The main objective of this study is the seismic zonation of the Valley in terms of local soil response at surface level. In addition, a detailed review of the local seismic hazard is carried out, including special neotectonic assessment for specific sites. Furthermore, the estimation of the seismic vulnerability for buildings and lifelines is also performed. Moreover, in this study the evaluation of vulnerability for population is also done, both for night and day scenarios, considering the mobility of people along daytime.

These results are further combined through probabilistic convolution processes in order to estimate the Probable Maximum Loss and Average Annual Loss due to earthquake for each municipality in the Aburrá Valley. These results express the risk in terms of rates of exceedance for people, buildings and lifelines, and will be a fundamental tool for the planning of measures oriented to reduce the seismic risk inside the region.

Finally, another remarkable product of this study is the generation of geology and geomorphology maps for the entire Valley, with a degree of detail never obtained before for this kind of maps at local scale.

## CRÉDITOS

### ENTIDAD GESTORA DEL PROYECTO

Área Metropolitana del Valle de Aburrá  
Director Ricardo Smith Quintero  
Subdirectora Ambiental María del Pilar Restrepo Mesa

### INTERVENTORÍA DEL PROYECTO

Ingeniero Geólogo MSc Edier V. Aristizábal G.  
Ingeniero Civil MSc Ludger Suárez Burgoa  
Ingeniero Civil MSc Iván Fernando Otálvaro Calle  
Ingeniero Silvio Andrés Salazar Martínez

### ENTIDADES EJECUTORAS

Integral S.A.  
Universidad EAFIT  
Facultad de Minas – Universidad Nacional de Colombia  
Inteinsa S.A.  
Solingral S.A.

### COORDINADORES DEL PROYECTO

Ingeniero Civil PhD Juan Diego Jaramillo F.  
Ingeniero Civil MSc Manuel Roberto Villarraga H.  
Ingeniero Civil MSc Yosef Farbiarz F.  
Ingeniero Civil Andrés Felipe Vélez R.  
Ingeniero Civil PhD Luis Fernando Restrepo V.

### PARTICIPANTES

Ingeniera Civil MSc María Cecilia Sierra B.  
Ingeniera Civil MSc María Clara Giraldo S.  
Ingeniero Civil MSc Gonzalo Betancur B.  
Ingeniero Civil MSc Francisco J. Correa G.

Ingeniera Geóloga MSc Claudia Patricia Lalinde P.  
Ingeniera Geóloga MSc Alba Nury Gallego H.  
Ingeniera Geóloga MSc Catalina Sánchez C.  
Ingeniera Geóloga MSc Flor Patricia Ángel C.  
Ingeniera Geóloga MSc Marisol Cardona S.  
Ingeniera Geóloga MSc Susana Salazar J.  
Ingeniero Geólogo MSc Diego Armando Rendón G.  
Ingeniero Geólogo MSc José Humberto Caballero A.  
Ingeniero Geólogo MSc Wilmar Sánchez U.  
Ingeniero Civil Esp. Ingeniería Sismorresistente, Cesar Augusto Sierra A.  
Ingeniero Civil Esp. Suelos y Cimentaciones Juan David Herrera C.  
Geóloga Esp. en Geomática María Fernanda Cadavid C.  
Ingeniera Civil Mónica María Vásquez M.  
Ingeniera Civil Sandra Milena Arenas O.  
Ingeniera Geóloga Erika Siegert H.  
Ingeniera Geóloga Sandra Valencia R.  
Ingeniero Civil Daniel Fernando Calvo T.  
Ingeniero Civil Luis Santiago Rodríguez F.  
Ingeniero Civil Felipe Uribe S.  
Ingeniero Civil Alejandro Franco B.  
Ingeniero Civil Santiago Rivera G.  
Ingeniero de Sistemas Jorge Leandro Medina B.  
Administrador Carlos Andrés Laino C.  
Auxiliar de Ingeniería Shirley Alejandra Gutiérrez R.  
Auxiliar de Geología Carolina María Castro G.  
Auxiliar de Geología Adrián González P.  
Auxiliar de Geología Carlos Andrés Jiménez C.  
Auxiliar de Geología Jairo Andrés Minotas C.  
Auxiliar de Geología Juan Carlos Ortiz M.  
Auxiliar de Ingeniería Luis Felipe Acosta M.  
Auxiliar de Ingeniería Julián Guarín P.  
Auxiliar de Ingeniería Marta Cecilia Vásquez V.  
Auxiliar de Ingeniería Elkin Horacio Vásquez A.  
Auxiliar de Ingeniería Lissette Ruiz E.  
Auxiliar de Ingeniería Luis Fernando Castrillón  
Auxiliar de Ingeniería James Andrés Marín R.  
Dibujante de Ingeniería Alba Mery Rúa G.  
Dibujante de Ingeniería Ligia Elena Fernández A.  
Dibujante de Ingeniería Diana Cristina Ortega P.  
Dibujante de Ingeniería Alba Patricia Cano S.  
Dibujante de Ingeniería Patricia Barrios O.  
Dibujante de Ingeniería Ana María Zapata A.  
Laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos Universidad EAFIT.  
División de Perforaciones Solingral S.A.

**ESTA HOJA HA SIDO  
INTENCIONALMENTE DEJADA EN  
BLANCO**



## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

#### **1.1.1 Contractuales**

Como parte del programa de identificación, prevención y mitigación de desastres del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se planteó el estudio para la microzonificación sísmica detallada de todos los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Como resultado de la Licitación Pública No. 021 de 2006 el Área Metropolitana del Valle de Aburrá adjudicó al Consorcio Microzonificación 2006, CM2006, el estudio para la microzonificación sísmica detallada del área metropolitana del Valle de Aburrá, el cual se legalizó mediante el contrato No.249 de 2006 firmado entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el CM2006. El consorcio está conformado por las empresas Solingral S.A., Integral S.A. e Inteinsa S.A., y con la participación de la Universidad EAFIT y la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Todas estas entidades conforman a su vez el llamado Grupo de Sismología de Medellín, GSM.

Inicialmente el trabajo contemplaba los estudios para la evaluación de la amenaza sísmica local detallada de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Copacabana, Girardota, y Barbosa, los cuales no habían sido estudiados de forma detallada en estudios anteriores. También, contemplaba la evaluación de la Vulnerabilidad y el Riesgo Sísmico de todos los municipios pertenecientes al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, es decir, además de los municipios nombrados anteriormente, se incluyeron los municipios de Itagüí, Bello y Medellín. Posteriormente, mediante la Adición No. 1 del contrato inicial, se incluyó como parte integral del estudio al municipio de Envigado.

#### **1.1.2 Localización y conformación del Valle de Aburrá**

El Valle de Aburrá se extiende desde proximidades del nacimiento del río Medellín, en el extremo suroccidental, hasta la zona central del departamento de Antioquia, en una longitud aproximada de 80 km hasta el municipio de Barbosa.

El valle sigue el curso del río, que inicialmente tiene una dirección predominante nortesur, con una ligera desviación al nororiente, y a la altura del municipio de Bello presenta un cambio brusco de dirección en donde el río tiene una dirección predominante nororiente, hasta convertirse finalmente en el río Porce a la altura del municipio de Barbosa.

El Valle de Aburrá se encuentra localizado en la esquina noroccidental de Colombia, en una zona compleja desde el punto de vista tectónico, puesto que en este sector confluyen las placas Nazca, Suramérica y del Caribe; y una cuarta Placa denominada Microplaca de Panamá, de acuerdo con algunos autores como Hincapié (1998).

Debido a su localización el valle está expuesto a una amenaza sísmica intermedia, de acuerdo con las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 (AIS, 1998), asociada principalmente a los sismos superficiales provenientes de las sismofuentes del noroccidente de Colombia, localizadas en el departamento del Chocó y el Urabá, a la sismicidad proveniente de las sismofuentes profundas y superficiales del Eje Cafetero, y además, está expuesta a la sismicidad asociada a las sismofuentes del sistema Cauca-Romeral, que tiene una actividad variable, con actividad comprobada hacia el sur del Eje Cafetero, y hacia el norte, cuando se convierte en la falla Espíritu Santo. Debido a la proximidad del área a las sismofuentes del sistema Cauca-Romeral, la amenaza sísmica dentro del valle es variable, de forma que hacia el extremo suroccidental la amenaza sísmica esperada es mayor que hacia los municipios localizados al oriente, como son Girardota y Barbosa.

Como consecuencia de su proximidad a sismofuentes que han mostrado alguna actividad, el valle ha estado sometido a sismos con intensidades intermedias que han causado daños de importancia, como el sismo de Mistrató de 1979, los sismos de Murindó y Opogadó de 1992, y el sismo de Armenia de 1999. Este último sismo, que si bien no fue intenso en el área metropolitana, permitió comprobar la importancia de los efectos locales en la zona gracias a la red acelerográfica que opera en la ciudad de Medellín desde el año 1996.

En general, estos sismos fueron un llamado de atención de las consecuencias que puede tener un sismo intenso en esta zona del departamento de Antioquia, sometida a una permanente presión urbanística y de expansión poblacional.

### 1.1.3 Población

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá está compuesta por nueve municipios (Caldas, La Estrella, Sabaneta, Itagüí, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa) y el municipio de Envigado, que si bien rigurosamente no pertenece al Área Metropolitana del Valle de Aburrá como entidad administrativa regional, sí está rodeada por los municipios que los conforman y hace parte física de la región de manera natural. Estos diez municipios albergan una población cercana a tres millones trescientos mil habitantes, es decir un poco más del ocho por ciento de la población nacional, siendo los municipios de Medellín (dos millones doscientos mil habitantes), Bello (trescientos setenta mil habitantes), Itagüí (doscientos treinta mil habitantes) y Envigado (ciento ochenta mil habitantes) los que presentan una mayor concentración de población dentro del área.

En los últimos años, los municipios del valle han experimentado un crecimiento poblacional acelerado, debido entre muchos otros factores, al conflicto armado que se ha presentado en el departamento de Antioquia y en general en el país, siendo el valle el receptor de un alto porcentaje de población desplazada.

Como consecuencia de su localización en el territorio colombiano y dado el ambiente tectónicamente activo de esta zona del continente, la población está expuesta a una amenaza sísmica importante que se combina con un aumento de la vulnerabilidad de la población debido especialmente a que las tierras más aptas para la construcción prácticamente se han agotado en el valle, de forma que actualmente la nueva población se está ubicando en zonas que en general tienen menores condiciones geotécnicas y en donde se pueden presentar importantes efectos locales de naturaleza sísmica.

#### **1.1.4 Problema del riesgo sísmico y su variación dentro del Valle de Aburrá**

Especialmente en los sectores formales e industriales de los municipios más grandes (Medellín, Envigado, Itagüí y Bello), y en algunas zonas de expansión del resto de los municipios del área, la construcción cumple con los requisitos de las normas sismorresistentes vigentes en el país. No obstante, en estos municipios y los demás municipios del valle se mantiene un alto porcentaje de construcciones informales y procesos de autoconstrucción que normalmente no cumplen con los requisitos exigidos por las normas.

Como consecuencia de la existencia y aumento de construcciones que no cumplen la normativa vigente, y dado el nivel de amenaza sísmica a la cual están expuestos estos municipios, un alto porcentaje de la población del valle está expuesto a un riesgo sísmico importante, representado en la probabilidad de pérdidas de sus viviendas y sus vidas durante la ocurrencia de un evento sísmico.

Dentro del área se encuentran además obras de infraestructura expuestas a la amenaza sísmica, como por ejemplo la infraestructura vial, que actualmente se encuentra en una etapa importante de desarrollo y expansión. Igualmente expuesta a la amenaza sísmica se encuentra toda la infraestructura de servicios públicos que incluye electricidad, gas, transporte de combustible, agua potable, alcantarillado, telefonía, etc. El conjunto de estos elementos, conocido en la literatura como Líneas Vitales, está también a su vez expuesto a un nivel de riesgo sísmico cuya magnitud no ha sido, antes de la ejecución de este contrato, cuantificada de modo alguno.

## **1.2 ESTUDIOS ANTERIORES**

El presente trabajo es el resultado más avanzado de una serie de trabajos que de forma continua y con apoyo de las instituciones del gobierno como el Municipio de Medellín y el Área metropolitana del Valle de Aburrá se han venido desarrollando desde la década pasada, y que han permitido avanzar en el conocimiento de la amenaza sísmica regional y local en los municipios que conforman el valle.

Los primeros estudios para la evaluación de la amenaza sísmica en el departamento de Antioquia fueron realizados por Integral S.A. y Woodward & Clyde Consultants, por solicitud de ISA y EEPPM, y estuvieron dirigidos al diseño de los grandes proyectos hidroeléctricos tales como el desarrollo hidroeléctrico del río Cauca y los proyectos San Carlos, Guadalupe, Porce II, entre otros. Los resultados de estos estudios fueron fundamentales para definir un marco tectónico y sísmico del departamento y permitieron contar con una información básica muy valiosa y confiable, a partir de los cuales se desarrollaron los estudios para la evaluación de la amenaza sísmica de los municipios del Valle de Aburrá

Los estudios específicos más destacados para los municipios que conforman el valle son, de forma cronológica, los siguientes:

- i. “Catálogo Histórico Sísmico para Medellín”, realizado para el Municipio de Medellín (Arango y Velázquez, 1993), en el cual se hace una recopilación histórica de los sismos sentidos en la ciudad y de los daños reportados en cada uno de ellos.
- ii. “Estudio de la amenaza, zonificación geotécnica, vulnerabilidad y riesgo sísmico para Medellín” realizado en 1994 por la Universidad EAFIT para el Municipio de Medellín con financiación del PNUD. En este trabajo se realizó por primera vez una evaluación específica de la amenaza sísmica para la ciudad, se hizo una recopilación importante de las condiciones geológico-geotécnicas de los materiales presentes en la ciudad y se esbozaron los lineamientos para futuras microzonificaciones; así mismo, se realizó una evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico, que permitió concluir que un sismo con un periodo de retorno de 32 años, y una probabilidad de ocurrencia del 80% en cincuenta años, similar al ocurrido en 1979, podría generar en una ciudad con las características de la ciudad de Medellín del año 1992, unas pérdidas valoradas en 300 millones de dólares; que si bien son pequeñas comparadas con las presentadas en sismos catastróficos como los ocurridos en Japón, California o México; sí representarían una pérdida importante, en una zona en desarrollo desde el punto de vista económico, para un sismo con una alta probabilidad de ocurrencia y una intensidad relativamente baja, si se compara con las reportadas para esos sismos catastróficos. Este estudio mostró la necesidad de hacer un estudio detallado que permitiera evaluar de una forma más precisa el nivel de riesgo al cual estaría expuesta la ciudad y la región.
- iii. Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de la Ciudad de Medellín. Realizado en dos etapas, una básica en 1996 y la segunda detallada en

1999, por el Grupo de Sismología de Medellín, conformado en su momento por la Universidad EAFIT, la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, INTEGRAL S.A y el INGEOMINAS, y que se realizó para el Municipio de Medellín, a través del SIMPAD. Este estudio incluyó estudios de neotectónica en algunas fallas cercanas a Medellín, y la utilización de modelos probabilísticos con el estado del arte para la evaluación de la amenaza sísmica. Se realizaron estudios geológicos y geomorfológicos detallados que permitieron presentar planos confiables a escalas 1:10 000, se realizaron estudios geotécnicos que incluyeron perforaciones profundas, toma de muestras inalteradas y la ejecución de ensayos dinámicos especializados que permitieron empezar a identificar las particularidades en el comportamiento dinámico de estos suelos cuando son sometidos a movimientos sísmicos. Uno de los aportes fundamentales de este trabajo fue la instalación de la R.A.M. (Red Acelerográfica de Medellín) compuesta por 22 acelerógrafos, que permitieron clasificar en su momento a la ciudad de Medellín como la segunda mejor instrumentada de Latinoamérica. Los registros obtenidos con la red permitieron calibrar los resultados de los modelos utilizados en la evaluación de la respuesta para la Microzonificación y han permitido identificar los diferentes factores que afectan la respuesta del suelo como son el origen del sismo, los efectos geométricos, y las modificaciones que sufre el sismo al pasar por los estratos presentes en cada una de las estaciones instrumentadas. Como resultado de estos estudios se propuso una microzonificación de la ciudad en 14 zonas homogéneas en cuanto a su respuesta sísmica, y para cada una de estas zonas se definieron los espectros de diseños necesarios para diseñar obras nuevas o para reforzar las existentes. Si bien no se ha logrado aún que esta microzonificación sea acogida como norma de construcción, ésta ha venido siendo utilizada por las entidades del Municipio de Medellín, las Empresas Públicas de Medellín y el Metro de Medellín para el desarrollo de sus obras.

- iv. Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundación en el Valle de Aburrá, realizado entre 2001 y 2002 por el GSM para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Durante este estudio se realizaron estudios de neotectónica en algunas fallas localizadas al suroccidente del valle y se realizó una evaluación de la amenaza sísmica a lo largo y ancho de la región, de tal manera que permitió identificar la variación de la misma y la diferencia en amenaza existente entre los municipios del suroccidente (Caldas y La Estrella) comparadas con las del nororiente (Girardota y Barbosa). Se obtuvo una geología detallada (Escala 1:10 000 en las áreas urbanas y de expansión de los municipios), y se realizaron estudios geotécnicos preliminares en todos los municipios, incluyendo Envigado; y estudios geotécnicos detallados en Bello e Itagüí. De la misma forma, se realizaron microzonificaciones sísmicas preliminares en todos los municipios y detalladas en Itagüí y Bello. En esta ocasión se desarrollaron metodologías automáticas que permitieron realizar de forma analítica la definición de las zonas homogéneas; de forma que se obtuvieron zonas homogéneas mejor definidas. Por otro lado, como parte de este trabajo se identificaron y definieron los sectores que presentan una mayor amenaza ante deslizamientos e inundaciones. Así mismo, se

realizó un estudio sociológico que permitió identificar las características de las personas expuestas a los diferentes riesgos. Además, se instaló la RAVA (Red Acelerográfica del Valle de Aburrá), la cual complementó la RAM y ha permitido identificar las características de la respuesta del suelo durante sismo en los materiales presentes.

- v. Tesis realizadas en las universidades EAFIT y Nacional de Colombia – Sede Medellín. De forma simultánea se han venido desarrollando tesis de pregrado y a nivel de maestría que han permitido desarrollar aspectos puntuales del comportamiento dinámico de los suelos presentes en el sector y del conocimiento sobre las condiciones Neotectónicas de las sismofuentes cercanas al Valle de Aburrá.

Un insumo fundamental en el desarrollo del conocimiento ha sido la operación de la RAM y de la RAVA. Estas redes, durante su periodo de operación, han obtenido un amplio catálogo de registros sísmicos que han permitido detectar las principales características de los sismos que se presentan en el valle, considerando las diferentes sismofuentes y las características geométricas de los sitios y mecánicas de los suelos en cada una de las estaciones. Además, estos registros han permitido la calibración de las metodologías de análisis desarrolladas para la microzonificación correspondiente al estudio presente.

### 1.3 RESUMEN DE LOS CAPÍTULOS

El presente estudio está conformado por once capítulos, en los cuales se describe cada uno de los aspectos desarrollados como objeto de la consultoría.

En el Capítulo 1 se presenta la Introducción del proyecto, en el cual se hace un recuento de los avances en los aspectos de amenaza sísmica, vulnerabilidad y riesgo a nivel metropolitano.

En el Capítulo 2 se describen las generalidades del estudio, junto con los objetivos generales y específicos exigidos en los Términos de Referencia de la Contratación Pública. De manera detallada se definen las actividades a realizar en cada una de las diez fases en las cuales se desarrolló el proyecto.

El desarrollo de las aplicaciones y bases de datos (geodatabase) por medio de herramientas de Sistemas de Información Geográfica SIG requeridas para la ejecución del proyecto se describen en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se realiza la descripción de las formaciones geológicas presentes en el Valle de Aburrá. Inicialmente se realiza una descripción general que coincide con los planos 1:10 000 preparados en este estudio, y posteriormente se hace una descripción por municipio, destacando las formaciones que se presentan en cada uno de ellos. Por otra parte, se presenta la descripción de las unidades geomorfológicas presentes en el

Valle de Aburrá, compatibles con el plano preparado para este fin. Finalmente, se realiza una descripción de las principales estructuras tectónicas que afectan el Valle de Aburrá y sus proximidades, haciendo énfasis en los efectos que estas tienen en cuanto a las condiciones geológicas y geotécnicas de los sectores afectados por estas estructuras.

El análisis de la neotectónica regional se discute en el Capítulo 5 donde se presenta una descripción de los estudios de geotectónica realizados para evaluar la actividad de los sistemas dentro del Valle de Aburrá, o aquellos cercanos a él, que puedan tener una gran incidencia en la amenaza sísmica de las poblaciones localizadas dentro del valle. A diferencia de estudios anteriores, se hizo énfasis en estudiar algunos sistemas localizados al oriente del valle, en donde se habían reportado algunos indicios de actividad reciente. Se estudió además, un ramal de la falla San Jerónimo, muy cercana al portal occidental de Túnel de Occidente, el cual también presenta algunas evidencias de actividad.

Los resultados de estos estudios permitieron calificar la actividad de estas fallas y fueron utilizados en la evaluación de la amenaza sísmica.

La evaluación de amenaza sísmica que se presenta en el Capítulo 6 incluyó una actualización de los estudios sismológicos y de las bases de datos sísmicos disponibles. Con base en estos datos se revisaron las ecuaciones de recurrencia de magnitud y se actualizó la calificación de las sismofuentes, con base en las ecuaciones de recurrencia y los estudios de geología sísmica y neotectónica realizadas. A partir de esta información, se realizaron análisis probabilistas de la amenaza esperada a nivel de roca a todo lo largo del Valle de Aburrá, pudiéndose establecer la variación de la amenaza, no sólo en términos de la aceleración máxima del terreno, sino también de las aceleraciones espectrales, la velocidad máxima del terreno y los desplazamientos espectrales.

En el Capítulo 7 se presentan los insumos fundamentales para la evaluación de la amenaza sísmica local a nivel del suelo a partir de la amenaza sísmica a nivel de roca, definida en el Capítulo 6, y las propiedades estáticas y dinámicas de los suelos que conforman los diferentes perfiles presentes en el Valle de Aburrá. Partiendo de los estudios geológicos, se seleccionaron sitios representativos de las principales formaciones geológicas y de las secuencias más frecuentes de estas formaciones. Se realizó una exploración detallada que incluyó ensayos de campo y laboratorio y se realizaron análisis estadísticos de la variación de las propiedades en cada una de las formaciones. En este capítulo se presentan los resultados de la exploración realizada, los ensayos de laboratorio y de campo, estáticos y dinámicos, y la variación de las propiedades en las formaciones más representativas.

El Capítulo 8 corresponde a uno de los principales resultados de este estudio y corresponde propiamente a la microzonificación sísmica desarrollada. Para realizar la microzonificación se prepararon perfiles estratigráficos en una cuadrícula representativa

de las principales formaciones y secuencias estratigráficas de cada una de las áreas urbanas y de expansión de los municipios. Se realizaron análisis de la respuesta considerando la incertidumbre asociada a la variación espacial de los materiales, a la variación de las propiedades estáticas y dinámicas, y se consideraron tres sismos representativos de las sismofuentes más importantes en cuanto al aporte de la amenaza esperada en cada municipio. Los resultados de estos análisis permitieron definir el espectro de respuesta esperado en cada sitio, para diferentes niveles de amenaza (Periodos de retorno de 10 y 475 años). Posteriormente, por formaciones, los espectros fueron analizados en cuanto a su variación.

En este capítulo se presentan los resultados y el análisis de los cálculos efectuados para evaluar la respuesta local en las diferentes formaciones que conforman los municipios.

En el Capítulo 9 se presenta el diseño de la red acelerográfica. Como parte del trabajo se instalaron seis acelerógrafos adicionales que complementan las RAM y la RAVA. En este capítulo se describen los criterios empleados para la sección de los sitios de monitoreo, así como los equipos empleados.

El Capítulo 10 presenta los resultados de los estudios de vulnerabilidad física que presentan las edificaciones que componen los cascos urbanos y las zonas de desarrollo de cada uno de los municipios. Con base en los estudios de vulnerabilidad se evaluó el riesgo sísmico al cual están expuestos los municipios, incluyendo los componentes de daño en edificaciones, personas y líneas vitales, los cuales se evaluaron con base en curvas de Pérdida Máxima Probable (PML) para cada uno de ellos. En este capítulo se presentan y analizan los resultados de estos estudios.

Finalmente, el Capítulo 11 presenta las conclusiones más relevantes del estudio y hace recomendaciones sobre futuros estudios que se requiere desarrollar en el área.



## 2. GENERALIDADES

### 2.1 OBJETIVO

El objetivo del estudio es la elaboración de la Microzonificación Sísmica Detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, de tal manera que permita establecer los criterios de diseño sísmico, probabilidades de ocurrencia y cuantificación de pérdidas en caso de un sismo para cada uno de los municipios y el Valle de Aburrá en general, de acuerdo a sus condiciones de amenaza y vulnerabilidad sísmica.

### 2.2 ALCANCE

El alcance del proyecto consiste en realizar los estudios de microzonificación sísmica de las áreas urbanas de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, y la evaluación del riesgo sísmico de los 10 municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá, entendida ésta como un territorio (incluyendo a Envigado). Como base fundamental para el desarrollo del estudio se debe partir de los estudios de Instrumentación y Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín, contratado por el SIMPAD en 1999 y el estudio de Microzonificación Sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá, contratado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el año 2002.

Para el cumplimiento del objeto del contrato se realizarán las siguientes fases de acuerdo a las especificaciones técnicas y alcances respectivos descritos a continuación:

#### 2.2.1 Fase 1. Estudios geológicos, estructurales y geomorfológicos de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado, escala 1:10 000

A partir de los mapas geológicos, geomorfológicos y estructurales del Valle de Aburrá, realizados en el estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá en el año 2002, se deben ampliar y detallar a escala 1:10 000, para lo cual se debe ejecutar un levantamiento de campo detallado. Adicionalmente se debe incluir los sectores rurales o urbanos de los municipios de Medellín, Bello e Itagüí que aun se encuentran en escala 1:25 000.

- Recopilar la información cartográfica, fotografías aéreas recientes e imágenes de satélite.

- Actualizar los estudios de geología estructural y geomorfología regional del estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá (2002) con los estudios realizados a partir de dicho año.
- Análisis de sensores remotos, interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite.
- Trabajo de campo para el levantamiento geológico, geomorfológico y estructural. Para el levantamiento en detalle se debe realizar una malla de estaciones de campo sobre las planchas topográficas 1:10 000 con una estación de campo por cada 250 m<sup>2</sup> como mínimo.
- Se debe establecer previamente un código de campo y cada una de las estaciones de campo deben ser localizadas en las planchas topográficas con su código.
- Debe ser elaborado un formato para el levantamiento de la información en campo, el cual debe ser aprobado por el Área Metropolitana con el fin de que la información de campo sea homogénea para cada una de las estaciones.
- Se debe levantar y por lo tanto caracterizar en detalle el perfil de suelo para cada una de las unidades homogéneas presentes en el Valle de Aburrá, con fines de la microzonificación sísmica.
- El levantamiento de la geoinformación debe estar estrictamente ajustado a los estándares establecidos por el Área Metropolitana de acuerdo al anexo de los términos de referencia.

Como resultado final de esta fase se debe elaborar el mapa geológico, geomorfológico y estructural de todos los municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá, escala 1:10 000. La información levantada debe ser articulada con el documento y los mapas existentes del municipio de Medellín, Bello e Itagüí y presentada como un mapa continuo consistente con los límites entre todos los municipios.

### **2.2.2 Fase 2. Evaluación de la amenaza sísmica**

Se deben evaluar las condiciones de amenaza sísmica del Valle de Aburrá, donde se identifiquen y caractericen las sismofuentes activas y potencialmente activas con incidencia en los municipios del Valle de Aburrá.

- Recopilar y actualizar los estudios de neotectónica y evaluación de la amenaza sísmica local y regional.

- Identificar y caracterizar las sismofuentes activas y potencialmente activas. La caracterización de las sismofuentes identificadas en los estudios de microzonificación de 1999 y 2002 se deben actualizar de acuerdo a los estudios de neotectónica realizados y registros existentes de la red acelerográfica instalada en el municipio de Medellín y nuevos estudios que existan al respecto.
- Fotointerpretación detallada del Valle de Aburrá con el fin de identificar anomalías geomorfológicas que puedan representar actividad tectónica.
- Evaluación de la actividad neotectónica del Valle de Aburrá y su área de influencia, haciendo énfasis en el sur occidente del Valle de Aburrá y sistemas de fallas no evaluadas en los estudios anteriores.
- Trabajo de campo, el cual debe incluir trincheras, apiques y levantamiento de columnas, de aquellas áreas identificadas en la fotointerpretación.
- Evaluación de la amenaza sísmica teniendo en cuenta las sismofuentes activas y potencialmente activas por métodos probabilísticos y determinísticos. Previo a la evaluación sísmica se debe sustentar a la interventoría y aprobar por parte de esta la selección de las sismofuentes a analizar.

Como resultado final se debe identificar y caracterizar de forma cualitativa y cuantitativa las sismofuentes activas y potenciales, con la probabilidad de ocurrencia y magnitud esperada del sismo. Este análisis debe integrar la información existente de los registros de la red acelerográfica del municipio de Medellín.

### **2.2.3 Fase 3. Exploración y caracterización geotécnica**

Se debe realizar una campaña de exploración geotécnica y geofísica en los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado que permita caracterizar mecánica y dinámicamente las formaciones superficiales que componen el Valle de Aburrá.

- Recopilación y actualización de las bases de datos de perforaciones y ensayos resultantes de los estudios de microzonificación de 1999 y 2002.
- Se debe diseñar y adelantar una campaña de perforaciones que como mínimo incluya 800 m perforados en suelo, 200 m perforados en aluviones y 100 m perforados en roca, que complemente las perforaciones realizadas en la microzonificación de Medellín, Bello e Itagüí, y tal que permita establecer un modelo estratigráfico de acuerdo a los estudios geológicos y geomorfológicos.

- La anterior campaña de perforaciones debe asegurar por lo menos una perforación profunda en cada una de las áreas urbanas de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Esta perforación debe llegar hasta la roca o en su defecto a horizontes con las propiedades geomecánicas lo suficientemente competentes.
- Dichos sondeos se deben complementar con apiques y trincheras que permitan caracterizar directamente los perfiles de suelos.
- Obtención de muestras alteradas e inalteradas para ensayos de laboratorio.
- Ensayos geofísicos que permitan establecer la velocidad de propagación de las ondas de compresión y de corte a través del perfil estratigráfico.
- Caracterización de las propiedades mecánicas de los perfiles de suelo.
- Caracterización de las propiedades dinámicas de los perfiles de suelo.
- Generación de un modelo estratigráfico detallado que permita evaluar la respuesta sísmica de los suelos en el casco urbano de los seis municipios.

Como resultado final se debe elaborar un modelo geotécnico del Valle de Aburrá que caracterice cada una de las formaciones o unidades homogéneas cartografiadas como base para la microzonificación sísmica de los municipios.

#### **2.2.4 Fase 4. Microzonificación sísmica de las áreas urbanas de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado**

Como elemento esencial del presente estudio se debe elaborar la microzonificación sísmica del área urbana de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado que responda a las exigencias de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98) y sus decretos reglamentarios.

- Evaluación de la respuesta dinámica de perfiles típicos de suelo y efectos locales.
- Definición y caracterización de zonas homogéneas.
- Definición de formas espectrales, de acuerdo a las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR 98) y sus decreto reglamentarios.

- Se debe presentar un análisis de los resultados obtenidos para todo el Valle de Aburrá de los resultados, incluyendo los resultados de la microzonificación sísmica de 1999 y 2002.

Como resultado final se debe presentar la microzonificación sísmica del casco urbano de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Dicho límite urbano debe ser definido de acuerdo a los Planes de Ordenamiento Territorial de cada municipio.

### **2.2.5 Fase 5. Diseño e implementación de Red Acelerográfica del Valle de Aburrá**

Se debe diseñar e implementar una red acelerográfica, lo cual incluye la adquisición de nuevos acelerógrafos para los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.

- Diseñar la Red Acelerográfica Metropolitana, la cual incluya los acelerógrafos instalados en los municipios de Medellín, Bello e Itagüí.
- Se deben suministrar e instalar 9 acelerógrafos tipo Kinematics Etna o similares, asegurando como mínimo uno en cada casco urbanos de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.
- Las especificaciones de los acelerógrafos adquiridos deben garantizar un excelente funcionamiento con la red instalada en los municipios de Medellín, Bello e Itagüí.
- Seleccionar los sitios específicos para los acelerógrafos de acuerdo a los criterios geológicos, geotécnicos, accesibilidad y seguridad, previo acuerdo con la interventoría del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Como resultado final se debe entregar la Red Acelerográfica del Valle de Aburrá conformada por 9 acelerógrafos que incluya como mínimo uno en cada municipio, y los acelerógrafos existentes en los municipios de Medellín, Bello e Itagüí.

### **2.2.6 Fase 6. Evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburrá**

En esta fase se debe evaluar la vulnerabilidad física de cada uno de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, lo cual significa incluir los municipios de Medellín, Bello e Itagüí. Luego de evaluar dicha vulnerabilidad se debe cruzar con los estudios de microzonificación sísmica, para poder evaluar el riesgo sísmico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

- Análisis y evaluación de la vulnerabilidad física ante un evento sísmico, de las áreas urbanas de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Itagüí, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Dicho análisis debe incluir la zonificación de las áreas urbanas de acuerdo con los tipos constructivos dominantes (numero de pisos, tipo estructural, etc.). El detalle de dicha caracterización estructural ante un evento sísmico debe realizarse tomando como mínimo nivel de detalle la manzana, es decir se debe definir en cada manzana y para cada una de las variables las condiciones promedios validadas en campo. En cuanto a líneas vitales se deberá realizar un análisis general sobre la afectación para cada escenario de riesgo.
- Análisis y evaluación de diferentes metodologías para la evaluación del riesgo sísmico que permita seleccionar la metodología más acorde a las necesidades del valle. Se deben estudiar experiencias de aplicaciones nacionales e internacionales con los diferentes modelos.
- Se debe seleccionar y aplicar una metodología acorde a las condiciones físicas del Valle de Aburrá que permita evaluar el riesgo sísmico. Previa aplicación de dicha metodología, debe ser presentada y sustentada al Área Metropolitana del Valle de Aburrá para su aprobación por parte de la interventoría.
- De acuerdo a los mapas de amenaza sísmica y vulnerabilidad estructural se debe evaluar el riesgo sísmico.
- El riesgo sísmico debe darse en términos de:
  - Curvas de pérdidas máximas probables para la amenaza sísmica al que se encuentra expuesto el Valle de Aburrá, considerando todas las sismofuentes activas o potencialmente activas que pueden afectar el Valle de Aburrá.
  - Escenarios de riesgo.
- Las curvas de pérdidas deben darse en términos de pesos colombianos.
- Se deben identificar, analizar y seleccionar 4 escenarios de riesgo, tomando de acuerdo a la evaluación de la amenaza sísmica los dos sismos más críticos con escenarios día y noche. Para cada uno de los escenarios de análisis se deben evaluar las pérdidas económicas esperadas, y la población afectada de acuerdo a modelos específicos de distribución de población existentes.
- Finalmente, de acuerdo a los resultados se debe realizar un análisis profundo de los resultados del riesgo sísmico del Valle de Aburrá con las conclusiones y recomendaciones necesarias, dicho contenido debe ser concertado con la interventoría previamente.

Como resultado final se debe evaluar y cuantificar las pérdidas máximas probables de los municipios del Área Metropolitana de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de un sismo desde cualquier sismo fuente activa o potencialmente activa identificada y para 4 escenarios de riesgo críticos.

### **2.2.7 Fase 7. Diseño, estructuración y montaje de la geoinformación en un Sistema de Información Geográfico**

Se debe diseñar, estructurar y montar toda la información de campo y oficina, análisis y resultados en una geodatabase de ESRI, que sea fácilmente integrable al Sistema de Información Geográfica de la Entidad. La geodatabase debe integrar la geoinformación tal como la geología, geomorfología, geotecnia, microzonificación, vulnerabilidad y riesgo sísmico, de acuerdo a los parámetros establecidos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y definidos en los estándares para el manejo de la geoinformación de la Entidad.

- Se entenderá como geoinformación a toda aquella información distribuida geográficamente, tales como: geología, geomorfología, estructuras, exploración geotécnica, amenaza, vulnerabilidad y riesgo sísmico.
- Diseñar e implementar una geodatabase interoperable con la Geodatabase Corporativa de la entidad, es decir, que siga los estándares, adopte la cartografía básica, la nomenclatura de archivos, la forma para capturar información en campo y para presentar la geoinformación acorde a los procedimientos avalados por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Por ejemplo la geodatabase debe contener y permitir consultar, alimentar, analizar, procesar y presentar de manera estándar, los diferentes mapas temáticos (estaciones de campo, geología, geomorfología, estructuras, perforaciones, amenaza sísmica, microzonificación, red acelerográfica, vulnerabilidad, riesgo, etc.).
- Se deben incluir los metadatos y documentación que permita un manejo rápido y ágil de la geoinformación para su futuro uso y reuso por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá u otras instituciones que ella designe.
- La geodatabase debe contener toda la geoinformación existente o levantada previamente de la microzonificación sísmica de Medellín (1999), Bello e Itagüí (2002), articuladas a la geoinformación resultante de este proyecto mediante la aplicación de los estándares del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Se deben realizar los ajustes necesarios a la geoinformación de la microzonificación sísmica de Medellín, Bello e Itagüí para compatibilizarla con la nueva geoinformación levantada en este proyecto de acuerdo a los estándares establecidos por la Entidad,

tales como geología, geomorfología, amenaza sísmica, perforaciones y demás información relevante.

### **2.2.8 Fase 8. Divulgación y socialización del proyecto**

Se debe diseñar y ejecutar un plan de medios, donde se definan las herramientas comunicacionales y estrategias de divulgación que permitan una difusión masiva del proyecto a la comunidad. El manejo de la imagen corporativa se debe regir por las normas establecidas por las Entidad y todo material antes de su reproducción debe ser sometido a revisión y aprobación por parte de la interventoría

- Se debe diseñar y elaborar 2000 libros dirigidos a personal técnico, donde se presenten los resultados obtenidos en el estudio, y compile los resultados de la microzonificación sísmica de Bello e Itagüí.
- Dicho material debe realizarse de acuerdo a las especificaciones determinadas en el Manual de Publicaciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Diseñar, producir y garantizar la ubicación de una valla institucional en lona de 12 m por 4 m sobre el proyecto, concertada con la oficina de comunicaciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La cual debe permanecer durante la ejecución del proyecto, a partir del mes 2, instalada en un sitio recomendado por la Entidad.
- Talleres y presentaciones de los resultados obtenidos para cada uno de los municipios y sectores interesados en el tema.
- Al finalizar el proyecto se debe realizar una convocatoria pública y amplia a la comunidad técnica en general y a los medios de comunicación, donde se presenten los resultados del proyecto.



### 3. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo del presente estudio, en el que se involucra gran cantidad de información que representa las características del suelo dentro del Valle de Aburrá, se emplearon herramientas propias de los SIG para el manejo, procesamiento, análisis y publicación de la información geoespacial con que se contó en las diferentes actividades. Para dar un manejo coherente de dicha información, se utilizó el software ArcGIS Desktop 9.0 publicado por ESRI, el cual contiene todas las herramientas necesarias para la gestión y el manejo de información espacial.

Dentro de las actividades desarrolladas, en su mayoría mediante el uso de herramientas SIG, se encuentran la revisión e integración de las diferentes fuentes de información cartográfica y temática, la creación de un modelo digital de terreno (DTM) para el área metropolitana, la creación del modelo estratigráfico del suelo para las zonas urbanas y de expansión de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Copacabana, Girardota, Barbosa y Envigado; y la recopilación de los productos de información geoespacial en una *GeoDatabase* específica para este estudio. En los numerales siguientes se describen de forma detallada estas actividades y productos.

#### 3.2 CARTOGRAFÍA BASE

La cartografía empleada para la Microzonificación Sísmica, se compone de la base cartográfica suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, proveniente de los archivos almacenados en la *GeoDatabase Ambiental* de dicha institución y la cartografía del proyecto SIGMA.

La cartografía SIGMA consta de planchas digitales a escala 1:2000 para la zona urbana y 1:5000 para las zonas rurales de los municipios pertenecientes al Valle de Aburrá. Esta cartografía contiene temas de vías, catastro, hidrografía, toponimia y curvas de nivel, que fueron empleados para generar productos e imprimir los diferentes mapas de este estudio. El cubrimiento de esta cartografía se ilustra en la Figura 3.1.

Los límites municipales, límites urbanos y zonas de expansión de cada uno de los municipios del área metropolitana fueron tomados de la *GeoDatabase Ambiental* suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Cabe resaltar que la información cartográfica se presentaba bajo diferentes sistemas de proyecciones, luego para el correcto uso de la información se adoptaron los parámetros establecidos en los Estándares para el Manejo de Geoinformación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2006) para esta información, con lo cual se definió el sistema de

coordenadas geográficas y el sistema de coordenadas planas para el proyecto, ver Tablas 3.1 y 3.2, respectivamente.

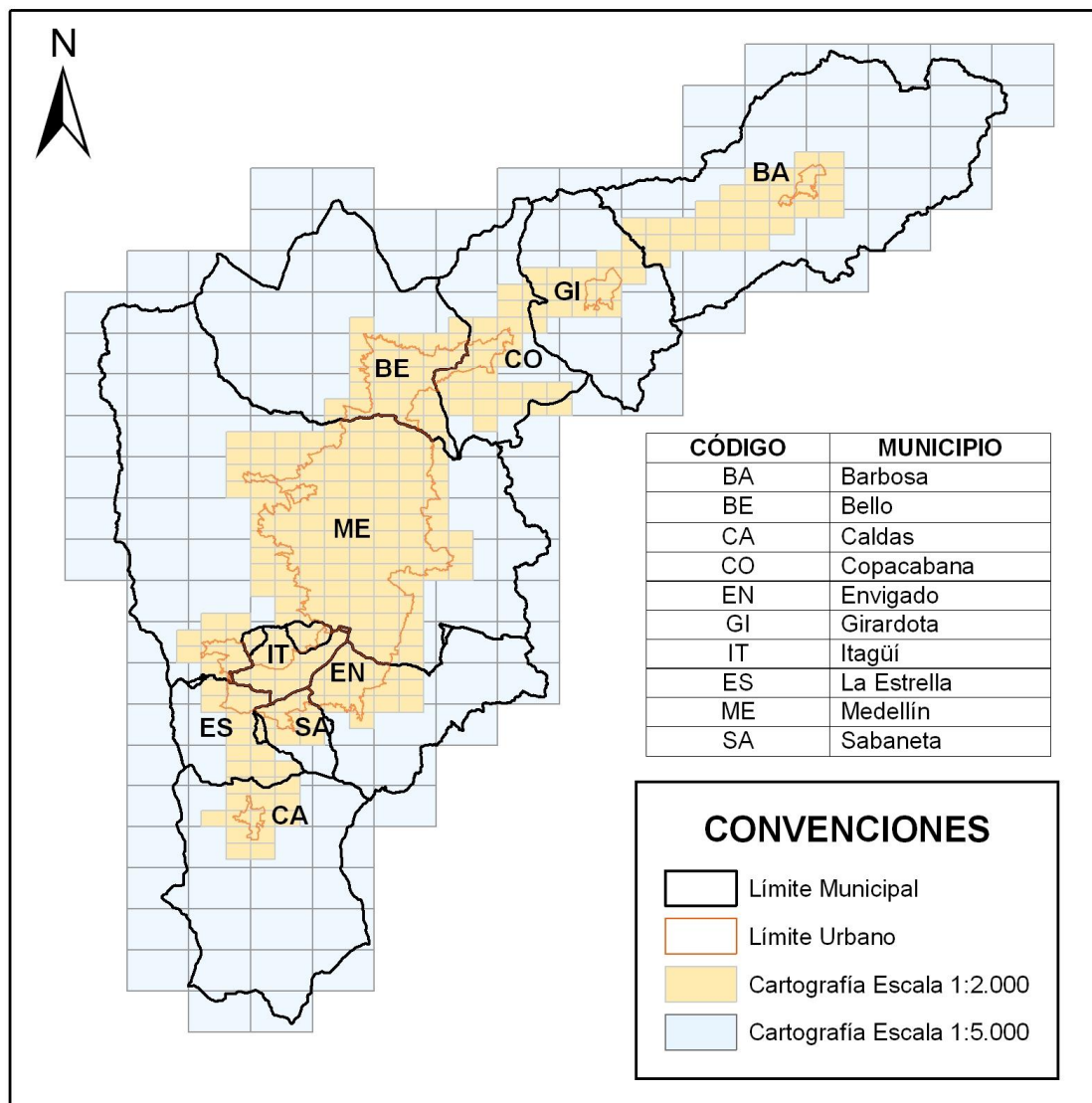


Figura 3.1 Cubrimiento cartografía SIGMA

### 3.3 MODELO DIGITAL DE TERRENO

Los modelos de elevación se han constituido en una herramienta de gran utilidad en las ciencias de la tierra, en las tareas de identificación, análisis e interpretación de diferentes características del terreno, y por esta razón, para el presente estudio, se elaboró un

modelo digital de terreno del área del Valle de Aburrá, para dar apoyo a los especialistas encargados de elaborar los temáticos de geología, geomorfología y perfiles estratigráficos de las zonas urbanas de los diferentes municipios.

**Tabla 3.1 Parámetros del sistema de coordenadas geográficas adoptado para el estudio (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)**

Parámetro	Valor
Nombre	GCS_Bogotá
Unidad angular	Grado
Meridiano principal	Greenwich
Dátum	Bogotá
Esferoide	Internacional 1924
Semieje mayor	6378388
Aplanamiento	1/297

**Tabla 3.2 Parámetros del sistema de coordenadas planas adoptado para el estudio (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)**

Parámetro	Valor
Proyección	Transversa de Mercator
Unidades	Metros
Falso Este	1000000
Falso Norte	1000000
Meridiano Central	-74.080916666666667
Latitud de Origen	4.59904722222222216
Factor de Escala	1

Para la elaboración del modelo digital de terreno fueron necesarias las etapas de definición de la zona del proyecto, integración de las diferentes fuentes de información y elaboración del modelo a partir de la información depurada. A continuación se describe cada una de las actividades realizadas.

### 3.3.1 Cubrimiento espacial y cartografía base

Para la elaboración del modelo digital de terreno se utilizó como cartografía base la cartografía del proyecto SIGMA suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con escala 1:2000 para la zona urbana, y 1:5000 para la zona rural. Dado que esta cartografía fue suministrada en planchas individuales en formatos CAD (*dgn* y *dwg*), fue necesario migrar esta información a formato *shp* de *ArcGis*.

Para el nuevo *shapefile* de curvas de nivel generado a partir de la cartografía SIGMA, fue asignado el sistema de coordenadas de dicha cartografía para luego ser proyectado al sistema de coordenadas Colombia-Bogotá, sistema adoptado para el presente estudio. En la Tabla 3.3 se presentan los parámetros utilizados de la proyección SIGMA.

Una vez que se obtuvo el tema de curvas de nivel en la proyección adecuada para el estudio, se extrajeron las curvas de nivel con cotas cada 10 m. Luego se evaluó el cubrimiento de este tema respecto a los límites de los municipios que conforman el Valle de Aburrá, evidenciándose que en la parte alta del municipio de Envigado hacía falta información cartográfica, correspondiente a las planchas 147-III-B-3X, 147-III-B-4W, 147-III-B-3Y y 147-III-B-3Z, que aunque están citadas en el índice de la cartografía SIGMA no fueron generadas por Empresas Públicas de Medellín, ni suministradas por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En la Figura 3.2 se presenta la evaluación del cubrimiento de las curvas de nivel SIGMA para la elaboración del modelo digital de terreno.

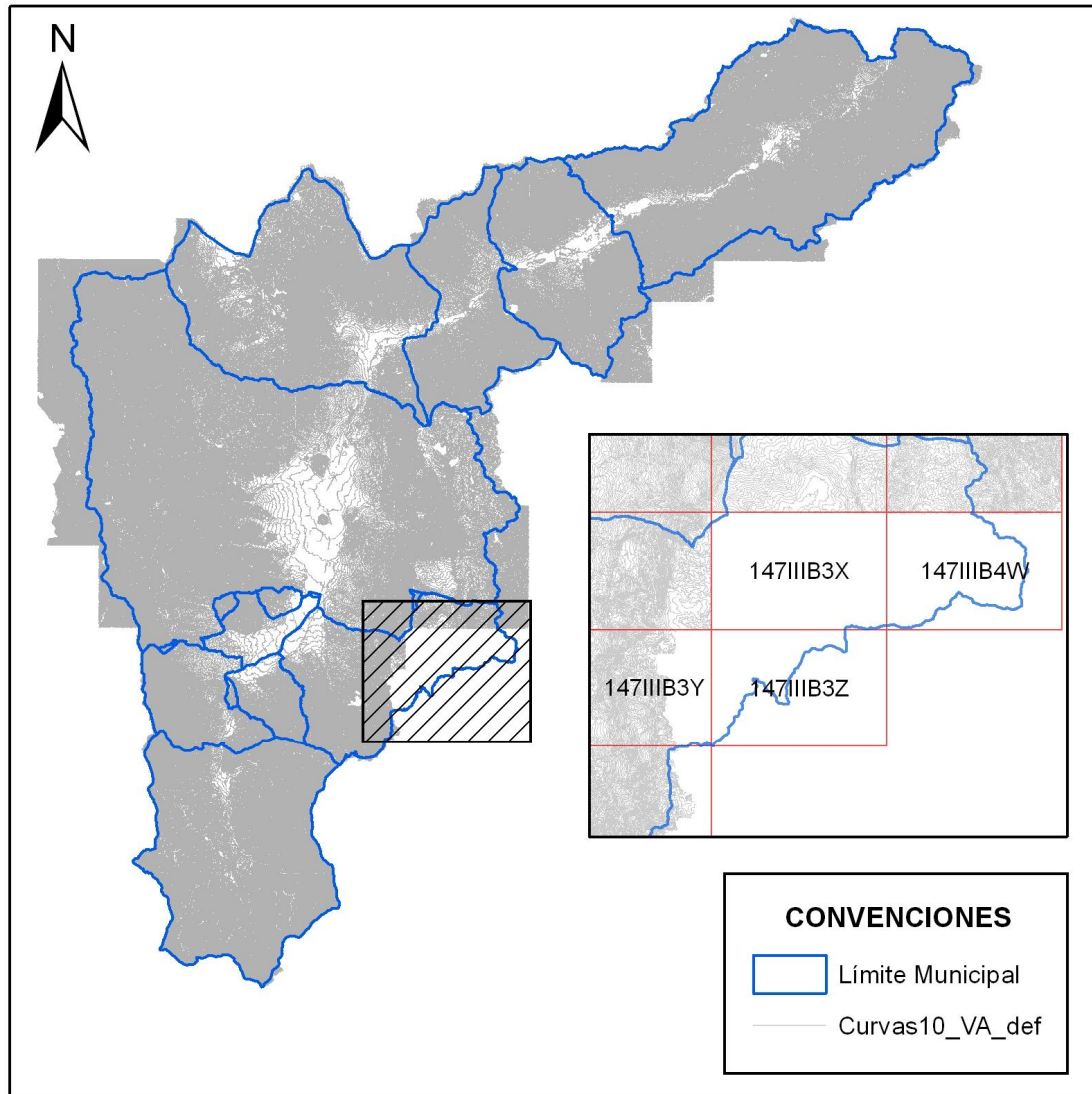
**Tabla 3.3 Parámetros del sistema de coordenadas planas del proyecto SIGMA**

Parámetro	Valor
Proyección	Azimutal Equidistante
Unidades	Metros
Falso Este	835376.440
Falso Norte	1180809.750
Meridiano Central	-75.56826444
Latitud de Origen	6.231971667
Factor de Escala	1

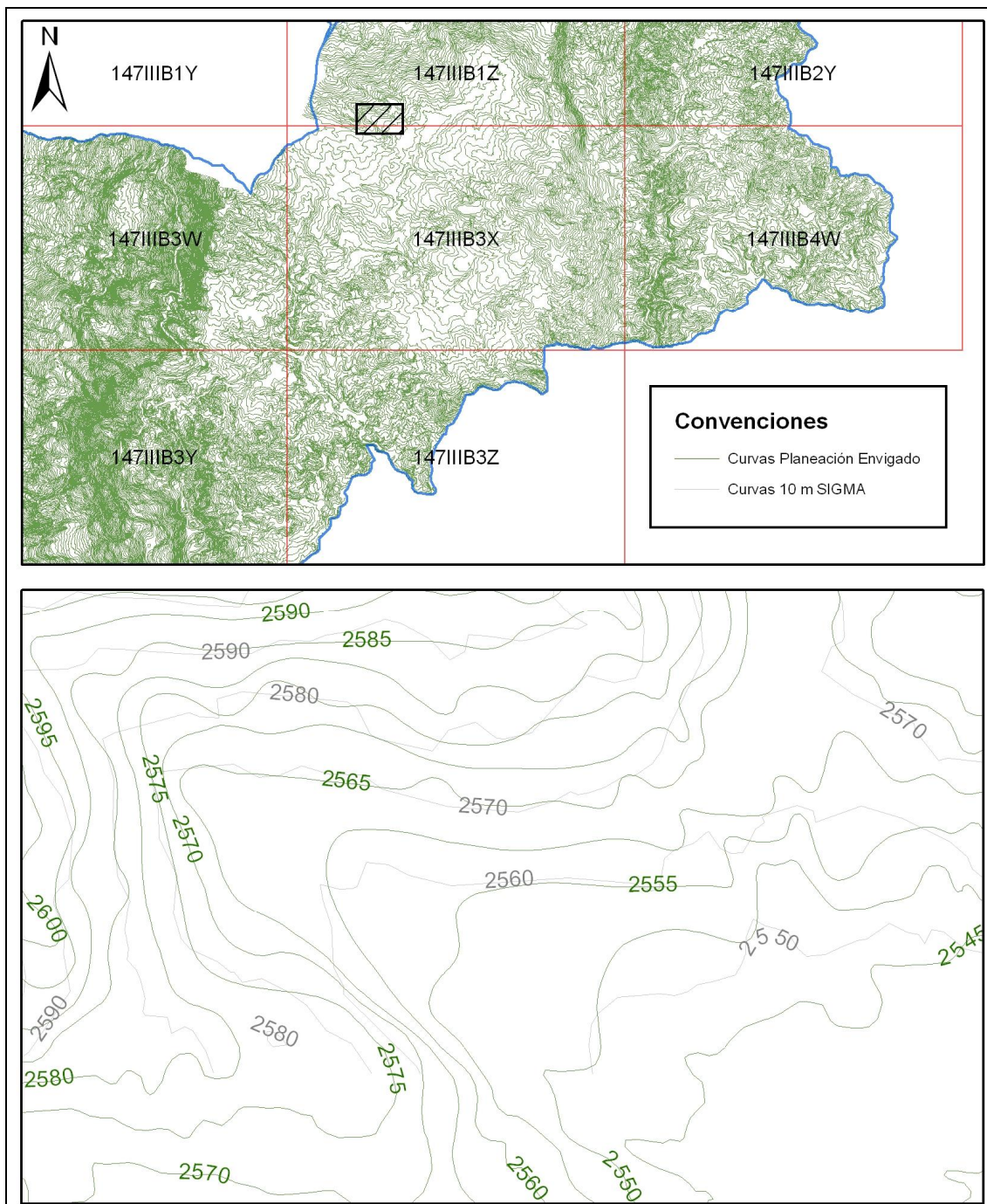
Para solucionar este problema, se acudió a la oficina de Planeación Municipal del Municipio de Envigado en busca de información cartográfica de esta zona en particular, obteniendo cartografía digital con curvas de nivel cada 5 m. La cartografía que fue suministrada para servir de complemento a la cartografía SIGMA fue evaluada, y como resultado se identificaron deficiencias en la definición del sistema de proyección y en general mostró muy poca correspondencia en cuanto a geometría y elevación (véase Figura 3.3), pero al no contar con otra fuente de información se depuró y corrigió, y se decidió proceder con ésta para ser incluida en la base cartográfica para la elaboración del modelo digital de terreno.

### 3.3.2 Integración información cartográfica

Al contar con dos fuentes de información, fue necesario llevar a cabo una correcta integración de éstas. El primer paso fue definir el sistema de coordenadas para la cartografía proveniente de Planeación - Envigado, ya que no se conocía el origen real de dicha información. La definición del sistema de coordenadas se realizó comparando las similitudes de accidentes geográficos especiales y su localización en las zonas comunes entre las dos fuentes de información en diferentes sistemas de coordenadas, obteniendo los mejores resultados cuando se aplicó el sistema de proyección SIGMA a la cartografía de Envigado, de modo que de este punto en adelante se supuso este sistema de proyección para la cartografía de este municipio.

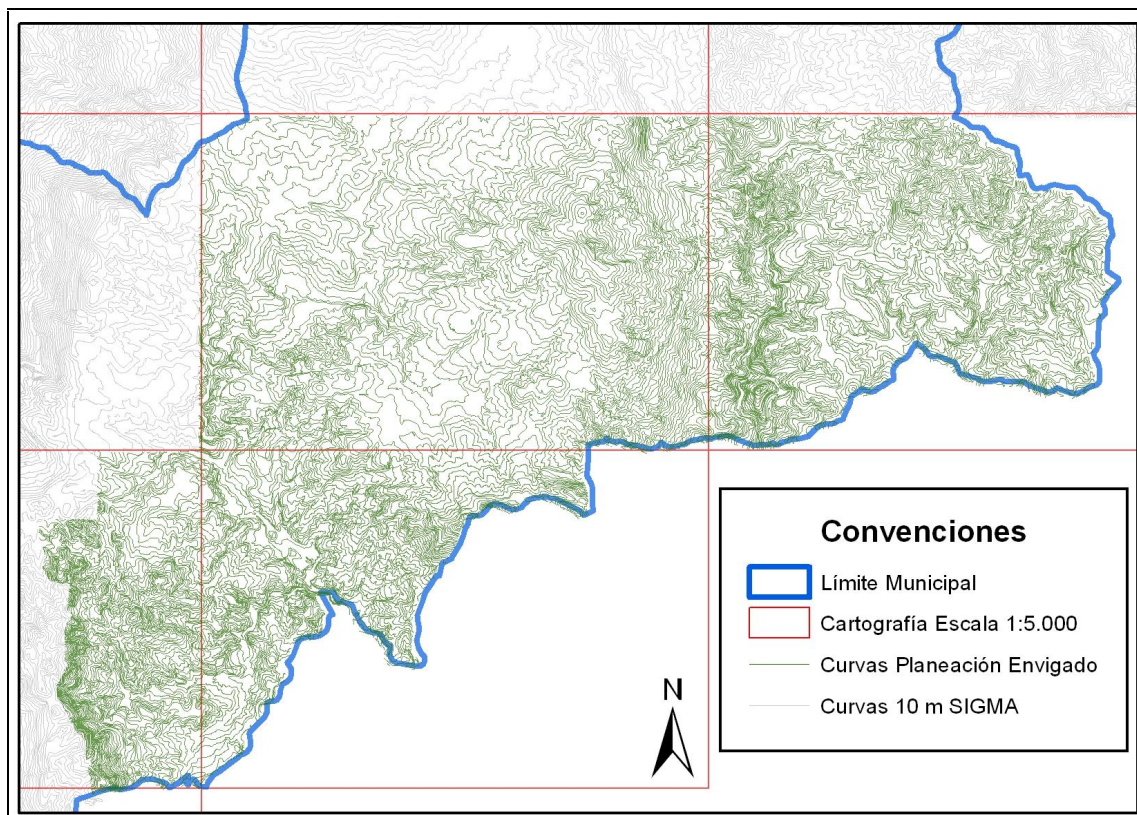


**Figura 3.2 Cubrimiento curvas de nivel cartografía SIGMA**



**Figura 3.3 Curvas de nivel suministradas por Planeación Envigado y comparación con cartografía SIGMA**

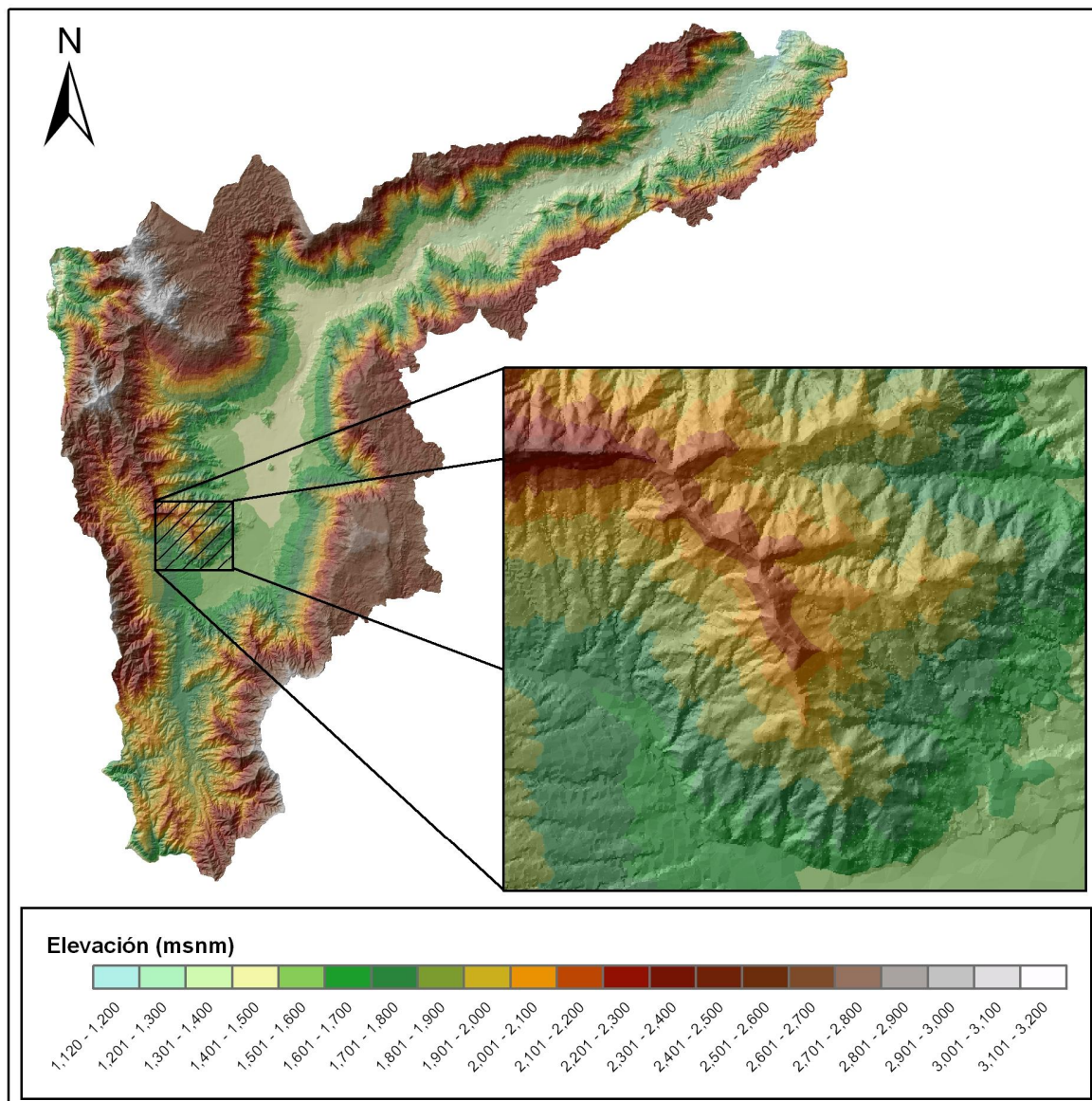
El siguiente paso fue proyectar la cartografía al sistema Colombia-Bogotá, sistema adoptado para este proyecto, y seguidamente se realizó el empalme de las curvas de nivel buscando la mayor consistencia entre las dos fuentes de información. En la Figura 3.4 se presenta el empalme de las curvas de nivel.



**Figura 3.4 Empalme de curvas de nivel**

### 3.3.3 Elaboración del modelo digital de terreno

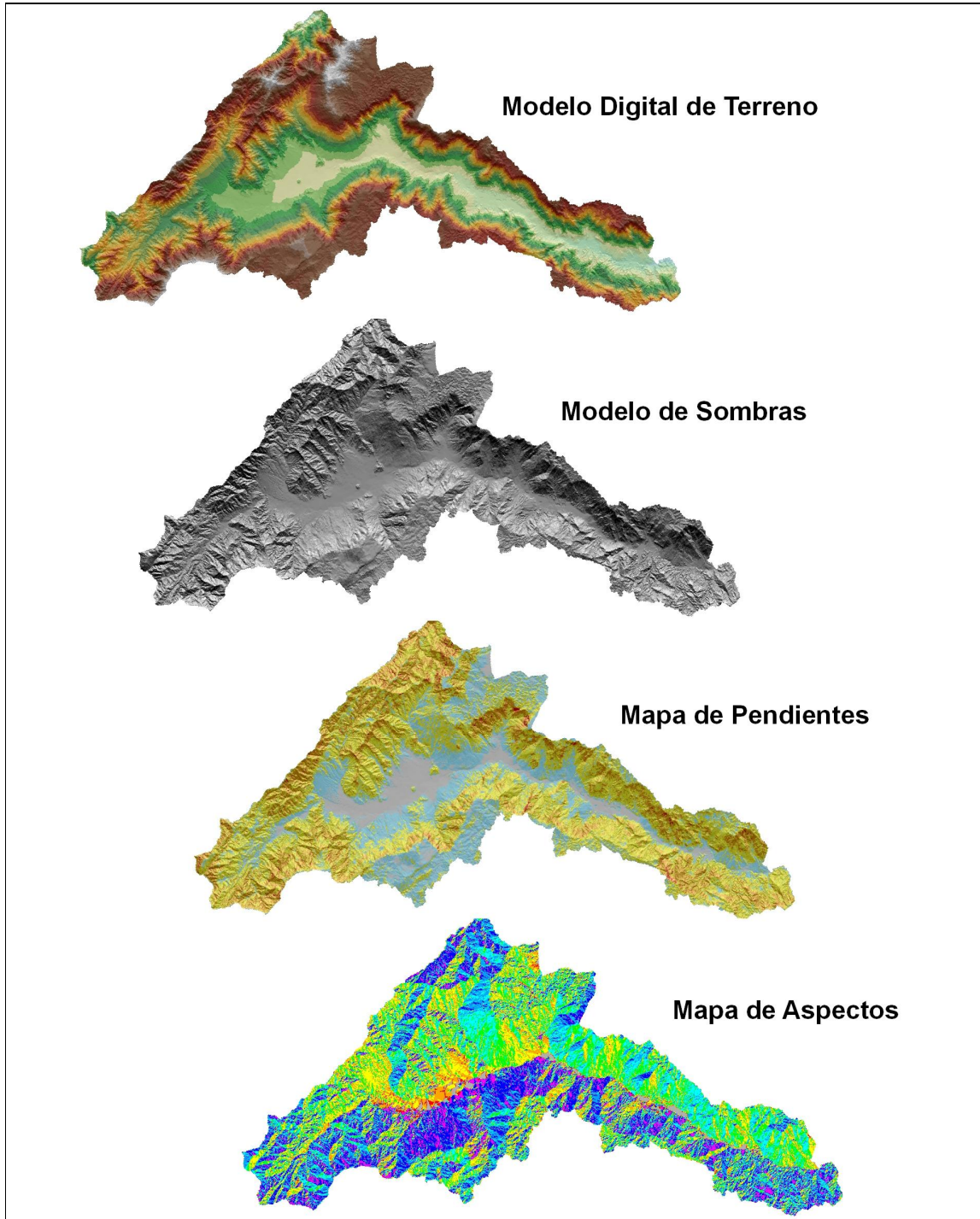
Una vez que la información cartográfica fue depurada en su totalidad, se pudo proceder a elaborar el modelo digital de terreno. Para esto se empleó el software *ArcGis Desktop* y su extensión *3D Analyst*, la cual permite obtener un modelo digital de terreno a partir de curvas de nivel. Se definió un tamaño de celda para el DEM de 10 m para ser consecuentes con la escala de trabajo del presente estudio (1:10 000). En la Figura 3.5 se presenta el modelo digital de terreno producto del presente estudio, y en más detalle se puede observar en el plano M\_ModeloDigi\_AM\_0101.mxd.



**Figura 3.5 Modelo Digital de Terreno del Valle de Aburrá**

A partir del modelo digital de terreno, se pudo obtener el modelo sombras y los mapas de pendientes y aspectos como se puede observar en la Figura 3.6, y más detalladamente en los planos: M\_Pendientes\_AM\_0101.mxd y M\_Aspectos\_AM\_0101.mxd.





**Figura 3.6** Modelo sombras y mapas de pendientes y aspectos

### 3.4 MODELO ESTRATIGRÁFICO

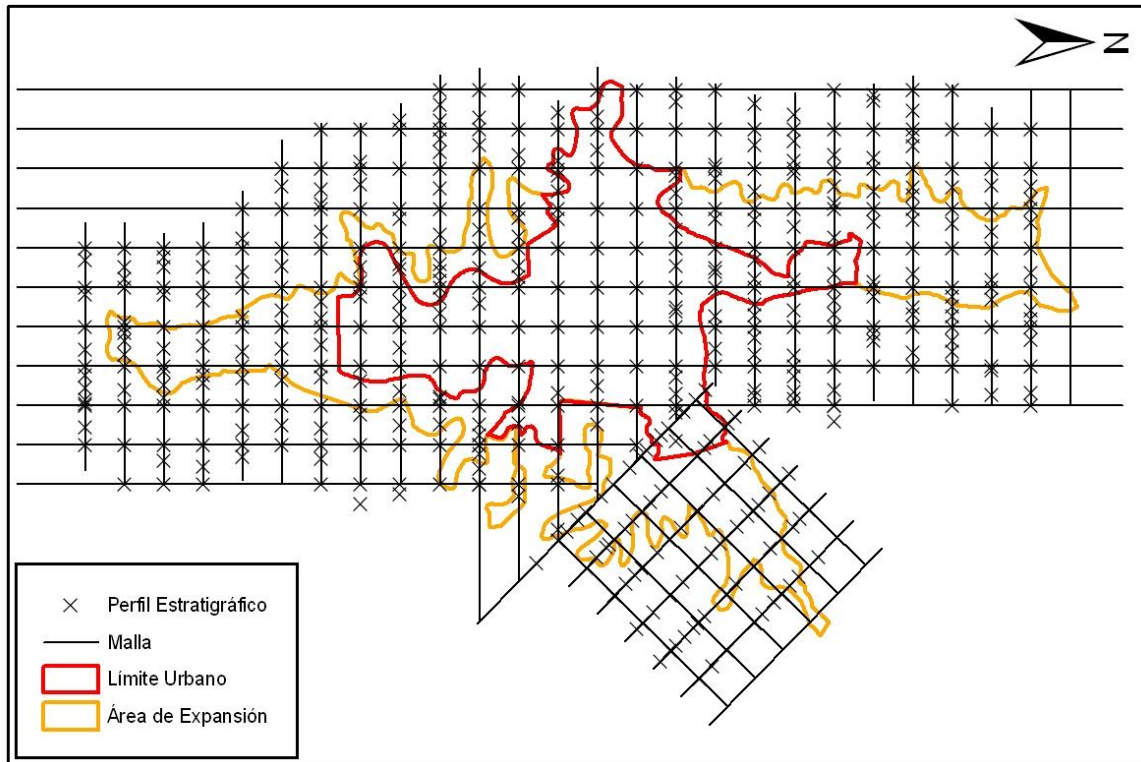
Para realizar la microzonificación sísmica detallada de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Copacabana, Girardota y Barbosa, fue necesario crear un modelo estratigráfico que permitiera obtener información detallada del tipo de suelo en cada una de las zonas urbanas y de expansión, es decir, las áreas donde se realizaría la zonificación sísmica dentro de los municipios. Los municipios de Medellín, Itagüí y Bello, no hicieron parte del modelo estratigráfico desarrollado en el presente estudio, ya que éste se había realizado en la microzonificación sísmica detallada de los años 1999 y 2002 (GSM, 1999 y 2002).

Las actividades realizadas para la creación del modelo estratigráfico se describen a continuación.

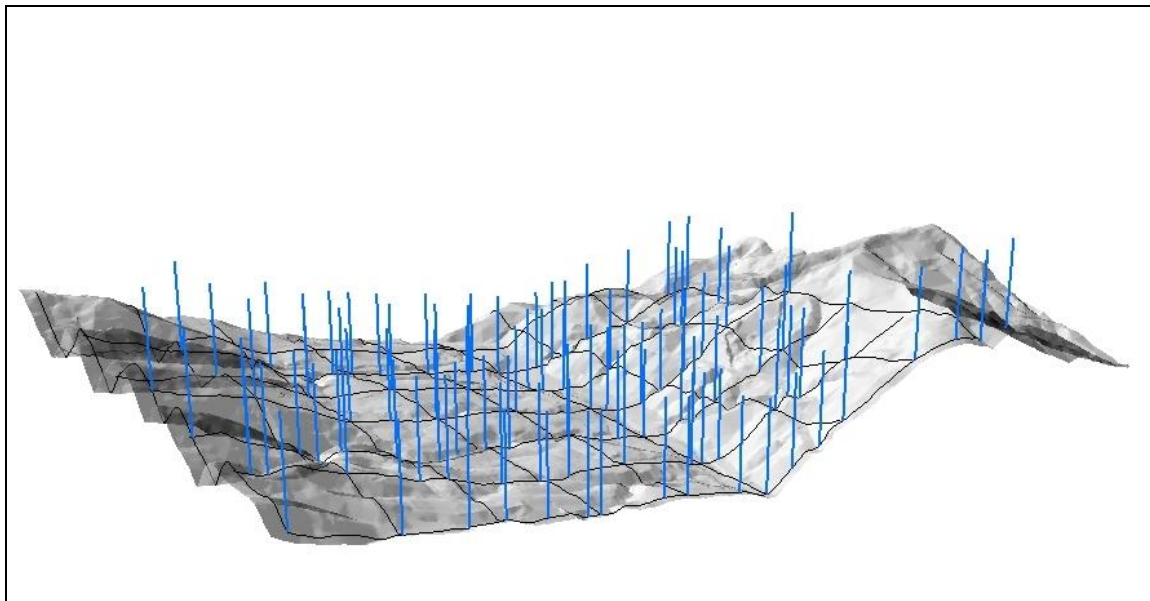
La localización de los perfiles estratigráficos se determinó de tal forma que se diera total cobertura a las áreas sujetas a la zonificación, en este caso, las zonas urbanas y de expansión de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Copacabana, Girardota y Barbosa. Para lo anterior, se localizó sobre cada una de las áreas de interés una malla de puntos separados entre sí cada 200 m, tanto en sentido sur-norte como en sentido oeste-este, formando así una cuadrícula. Además de los puntos correspondientes a los nodos de la cuadrícula, se localizaron perfiles estratigráficos en las zonas de frontera de las unidades geológicas superficiales para tener un mayor control de las condiciones de contacto entre unidades. En la Figura 3.7 se muestra como ejemplo la localización de la cuadrícula y la malla de puntos para el municipio de Caldas.

Luego de tener la cuadrícula para cada municipio, se elaboraron perfiles topográficos en un sentido de la malla, superponiendo las unidades geológicas superficiales. Luego, se generó una vista frontal de la estratigrafía a lo largo del perfil topográfico. De la Figura 3.8 a la Figura 3.12 se presentan los pasos realizados para generar los perfiles estratigráficos.

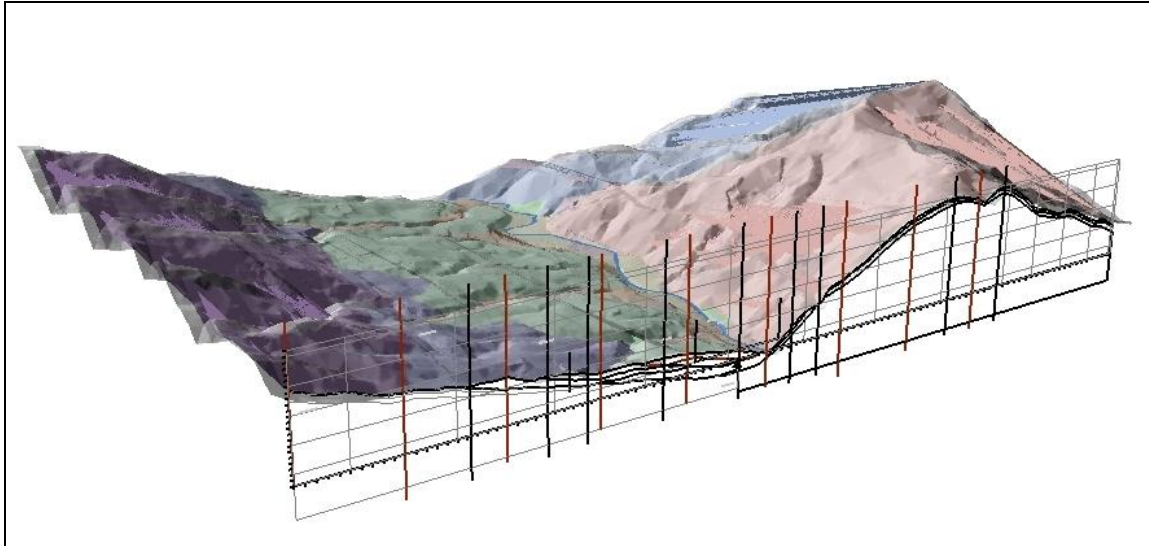
Una vez que se generaron las vistas frontales para todos los perfiles topográficos, se calcularon los espesores de los diferentes estratos y se tabularon, para luego, crear un *shapefile* que presentara la información estratigráfica y tuviera un identificador para cada perfil, tal como se muestra en la Figura 3.13.



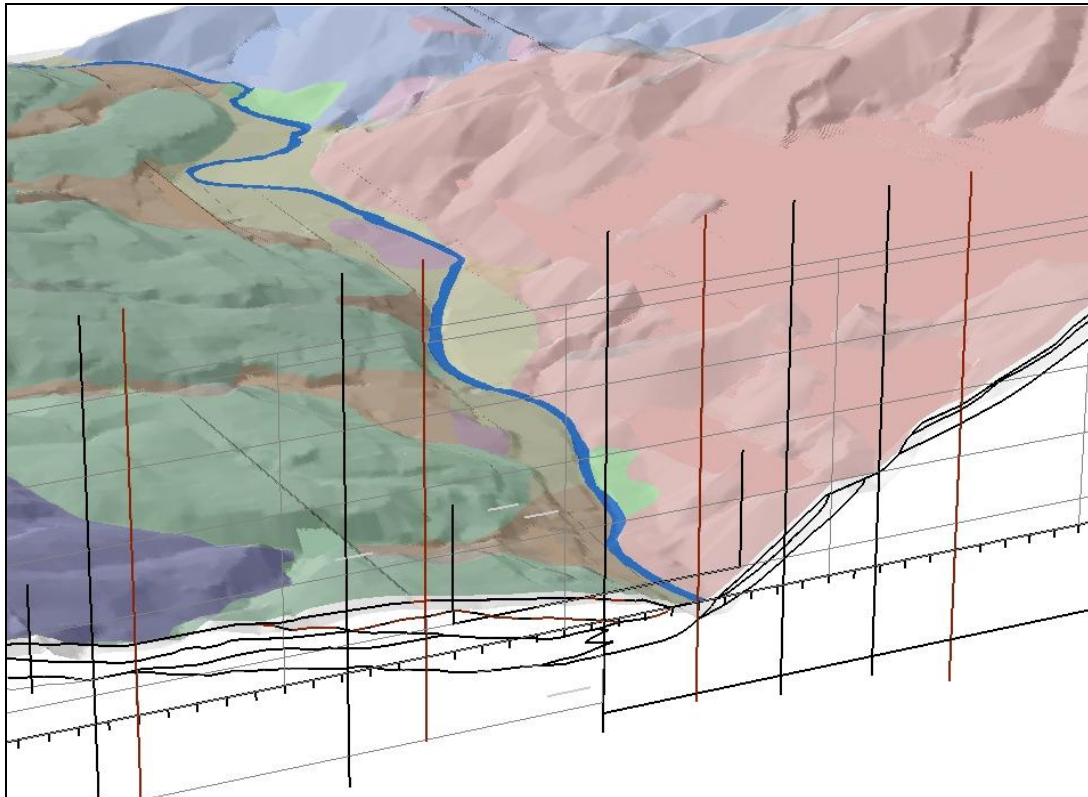
**Figura 3.7 Localización de los perfiles estratigráficos en el municipio de Caldas**



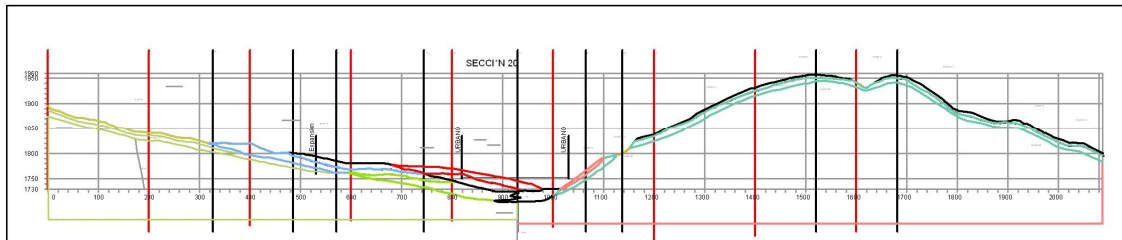
**Figura 3.8 Localización en planta de la malla y de los puntos de interés sobre el modelo de elevación**



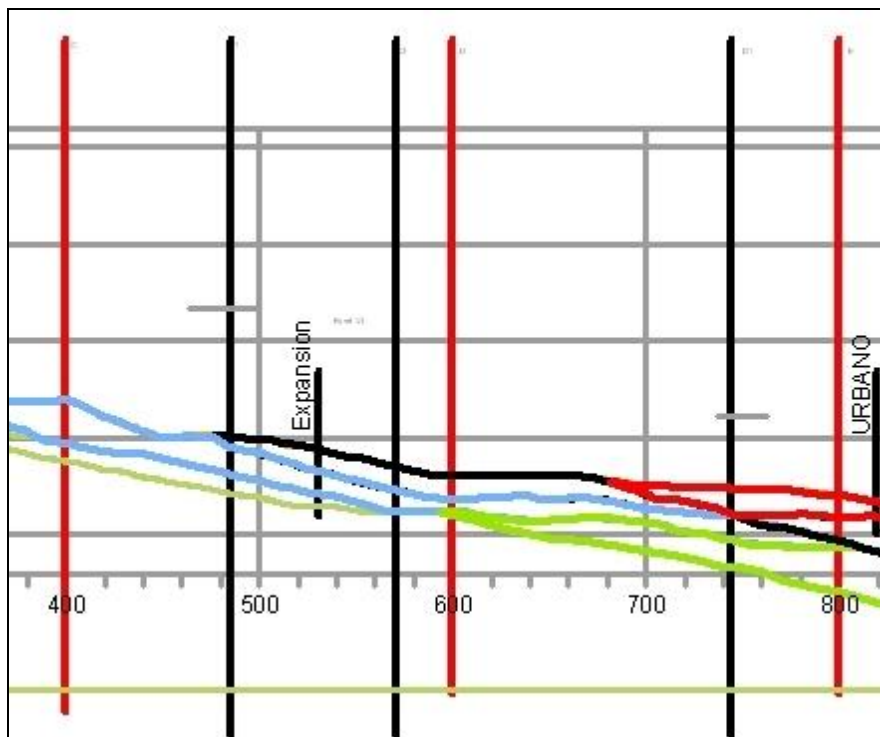
**Figura 3.9 Superposición de las unidades geológicas superficiales con el modelo de elevación y generación del perfil topográfico y estratigráfico**



**Figura 3.10 Detalle de la generación de la estratigrafía a lo largo del perfil topográfico**



**Figura 3.11** Vista frontal de la estratigrafía a lo largo del perfil topográfico



**Figura 3.12** Información que fue tabulada para alimentar la tabla de atributos del shapefile

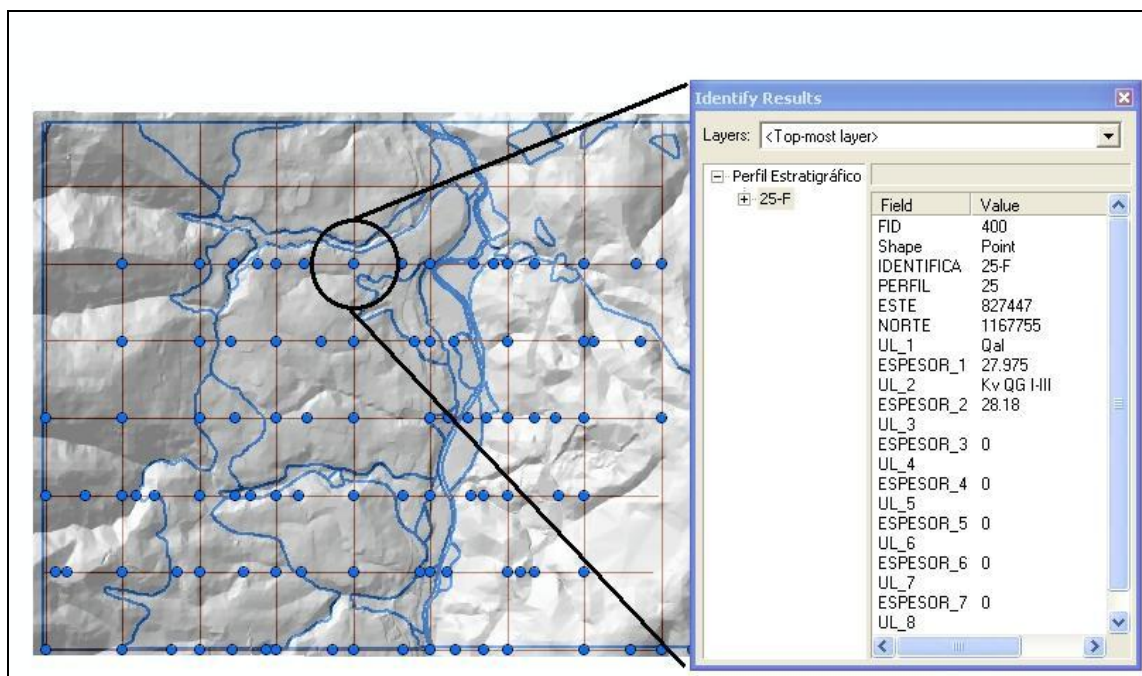


Figura 3.13 Información del perfil estratigráfico almacenada en el *Shapefile*

### 3.5 ALMACENAMIENTO DE LA GEOINFORMACIÓN

#### 3.5.1 Estructura de directorios

Se realizó siguiendo los estándares de geoinformación propuestos por el Área Metropolitana (2006). Para este proyecto se manejó la siguiente estructura de directorios indicada en la Figura 3.14.

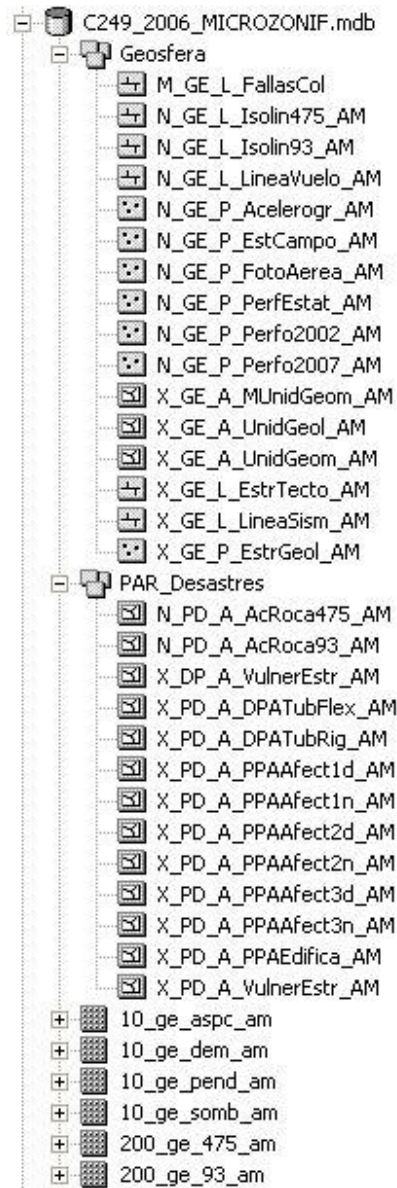
#### 3.5.2 Modelo de datos para la *Geodatabase*

Dada la cantidad de capas temáticas y archivos tipo raster, que se obtuvieron como producto del presente estudio, se creó una *GeoDatabase* para el almacenamiento de toda la información geoespacial.

La estructura de almacenamiento y los parámetros respectivos de la *GeoDatabase*, fueron tomados de los Estándares para el Manejo de Geoinformación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2006). La *GeoDatabase* generada en este trabajo solo almacenará los productos obtenidos para este estudio, *feature classes*, como los correspondientes a la cartografía base se encuentran dentro la *GeoDatabase* del Área Metropolitana. La estructura final de la *GeoDatabase* se presenta en la Figura 3.15.



Figura 3.14 Estructura de directorios



**Figura 3.15 Estructura de la *GeoDatabase***

Los parámetros adoptados para la creación de la *GeoDatabase* son los siguientes:



**Tabla 3.4 Parámetros definidos para la GeoDatabase (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2006)**

Parámetro	Valor (m)
Dominio XY	Min. X: 0 Max. X: 2147483.645 Min. Y: 0 Max. Y: 2147483.645 Precisión : 1000
Dominio Z	Min. Z: 0 Max. Z: 21474.83654 Precisión: 10000
Dominio M	Min. M: 0 Max. M: 21474.83654 Precisión: 10000

**3.5.2.1 Features Datasets.** Dentro de la estructura de la *GeoDatabase* (Figura 3.15), se presentan dos *Features Datasets*, que son descritos a continuación:

- **Geosfera:** En este *Feature Dataset* se almacenan los temas relacionados con el componente tierra, es decir, los temas que se relacionan con el suelo, el relieve, las geoformas, geología, tectónica y sismología.
- **PAR\_Desastres:** En este *Feature Dataset* se almacenan los temas relacionados con la zonificación del riesgo sísmico en las zonas urbanas de los municipios que conforman el Valle de Aburrá.

**3.5.2.2 Feature Classes.** Los elementos geoespaciales resultado de este estudio se almacenaron según sus características en los dos grupos de *Features Datasets* descritos en el numeral anterior.

A continuación se presenta el listado de los *Features Classes*, donde se indica el nombre, la descripción y la geometría para cada uno de los elementos. La codificación adoptada para dar nombre a los *Features Classes* fue tomada de los Estándares para el manejo de Geoinformación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2006). Igualmente, en el siguiente numeral se presenta el diccionario de datos donde se describe detalladamente cada uno de los elementos.

**Feature Dataset : Geosfera**

<b>NOMBRE FEATURE CLASS</b>	<b>DESCRIPCIÓN FEATURE CLASS</b>	<b>GEOMETRÍA</b>
N_GE_L_LineaVuelo_AM	Líneas de Vuelo	Línea
N_GE_L_Isolin475_AM	Isolíneas para un período de retorno de 475 años	Línea
N_GE_L_Isolin93_AM	Isolíneas para un período de retorno de 9,3 años	Línea
N_GE_P_EstCampo_AM	Estaciones de Campo	Punto
N_GE_P_FotoAerea_AM	Fotos Aéreas	Punto
N_GE_P_Acelerogr_AM	Acelerógrafos	Punto
N_GE_P_PerfEstat_AM	Perfiles Estratigráficos	Punto
N_GE_P_Perfo2002_AM	Perforaciones año 2002	Punto
N_GE_P_Perfo2007_AM	Perforaciones año 2007	Punto
X_GE_A_MUnidGeom_AM	Macrounidades Geomorfológicas	Área
X_GE_A_UnidGeol_AM	Unidades Geológicas	Área
X_GE_A_UnidGeom_AM	Unidades Geomorfológicas	Área
X_GE_L_EstrTecto_AM	Estructuras Tectónicas	Línea
X_GE_L_LineaSism_AM	Líneas Sísmicas	Línea
X_GE_P_EstrGeol_AM	Estructuras Geológicas Puntuales	Punto

**Feature Dataset : PAR\_Desastres**

<b>NOMBRE FEATURE CLASS</b>	<b>DESCRIPCIÓN FEATURE CLASS</b>	<b>GEOMETRÍA</b>
N_PD_A_AcRoca475_AM	Aceleración máxima a nivel de roca para un período de retorno de 475 años	Área
N_PD_A_AcRoca93_AM	Aceleración máxima a nivel de roca para un período de retorno de 9.3 años	Área
X_PD_A_DPATubFlex_AM	Daños promedio anual para tuberías flexibles	Área
X_PD_A_DPATubRig_AM	Daños promedio anual para tuberías rígidas	Área
X_PD_A_PPAAfect1d_AM	Pérdida promedio anual para nivel de afectación 1 en población diurna	Área

### Feature Dataset : PAR\_Desastres

NOMBRE FEATURE CLASS	DESCRIPCIÓN FEATURE CLASS	GEOMETRÍA
X_PD_A_PPAAfect1n_AM	Pérdida promedio anual para nivel de afectación 1 en población nocturna	Área
X_PD_A_PPAAfect2d_AM	Pérdida promedio anual para nivel de afectación 2 en población diurna	Área
X_PD_A_PPAAfect2n_AM	Pérdida promedio anual para nivel de afectación 2 en población nocturna	Área
X_PD_A_PPAAfect3d_AM	Pérdida promedio anual para nivel de afectación 3 en población diurna	Área
X_PD_A_PPAAfect3n_AM	Pérdida promedio anual para nivel de afectación 3 en población nocturna	Área
X_PD_A_PPAAEdifica_AM	Pérdida promedio anual para edificaciones	Área
X_PD_A_VulnerEstr_AM	Zonas homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural	Área

### Raster Dataset

NOMBRE RASTER DATASET	DESCRIPCIÓN RASTER DATASET	FORMATO
10_ge_aspc_am	Grid de aspectos	Grid
10_ge_dem_am	Modelo de Elevación Digital (DEM)	Grid
10_ge_pend_am	Grid de pendientes	Grid
10_ge_somb_am	Modelo de sombras	Grid
200_pd_r475_am	Aceleración máxima en roca para un período de retorno de 475 años	Grid
200_pd_r93_am	Aceleración máxima en roca para un período de retorno de 9,3 años	Grid

### Raster Catalog

NOMBRE RASTER CATALOG	DESCRIPCIÓN RASTER DATASET	FORMATO
10_pd_s475_am	Aceleración máxima en superficie para un período de retorno de 475 años	Grid
10_pd_s93_am	Aceleración máxima en superficie para un período de retorno de 9.3 años	Grid

### 3.5.3 Diccionario de datos

Dentro de este numeral se presenta la descripción de las características y los atributos de cada uno de los *Feature Class* y *Raster Dataset* que conforman la *GeoDatabase* de este proyecto.

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> M_GE_L_FallasCol		<i>Contiene la localización de la geología estructural regional, correspondiente a las fallas principales de Colombia, divididas por zonas sismogénicas.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
FALLA	Texto (20)	Nombre de la falla
ZONA	Texto (12)	Zona sismogénica a la que pertenece la falla
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Lenght	Double	Longitud de la falla

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> N_GE_L_Isolin475_AM		<i>Isolíneas de aceleración espectral en roca, para un periodo de retorno de 475 años</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
ISOACEL	Número flotante	Valor de la aceleración
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Lenght	Double	Longitud de la isolínea

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> N_GE_L_Isolin93_AM		<i>Isolíneas de aceleración espectral en roca, para un periodo de retorno de 9,3 años</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
ISOACEL	Número flotante	Valor de la aceleración
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Lenght	Double	Longitud de la isolínea

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> ✚ N_GE_L_LineaVuelo_AM		Contiene las líneas de vuelo de las fotografías aéreas empleadas para la fotointerpretación geológica.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
MUNICIPIO	Texto (11)	Municipio al que corresponde la línea de vuelo
FAJA	Texto (10)	Nombre de la faja
FOTO	Texto (15)	Número de la foto
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Length	Double	Longitud de la línea de vuelo

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> •• N_GE_P_EstCampo_AM		Contiene la ubicación de los puntos o localidades de afloramientos geológicos (estaciones) levantados por los geólogos en trabajo de campo.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
MUNICIPIO	Texto (11)	Municipio en el que esta ubicada la estación
UNIDAD	Texto (38)	Unidad litológica sobre la que esta la estación
ESTACION	Texto (20)	Código de la estación
X	Double	Coordenada este
Y	Double	Coordenada norte
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> •• N_GE_P_FotoAerea_AM		Contiene los puntos centrales de las fotografías aéreas utilizadas para la fotointerpretación geológica.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
MUNICIPIO	Texto (11)	Municipio en el que esta ubicada la estación
TEXTO	Texto (11)	Unidad litológica sobre la que esta la estación
X	Double	Coordenada este
Y	Double	Coordenada norte
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web

Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> ▪▪ N_GE_P_Acelerogr_AM		<i>Contiene los puntos donde se encuentran ubicados los acelerógrafos del valle de Aburrá.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
X	Double	Coordenada este
Y	Double	Coordenada norte
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
CODIGO	Texto (15)	Código del equipo
NOMBRE	Texto (40)	Nombre del sitio donde se encuentra ubicado el equipo


Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> ▪▪ N_GE_P_PerfEstat_AM		<i>Contiene la localización de los puntos donde se determinó el perfil estratigráfico. Espacialmente cubre las zonas urbanas y de expansión de los municipios objeto de este estudio.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
MUNICIPIO	Texto (11)	Municipio en el que está ubicado el perfil
IDENTIFICA	Texto (11)	Código del perfil
PERFIL	Número entero	Número del perfil
UL_n	Texto (35)	Unidad litológica
ESPESOR_n	Double	Espesor en metros (m)
X	Double	Coordenada este
Y	Double	Coordenada norte
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web


Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> ▪▪ N_GE_P_Perfo2002_AM		<i>Contiene la localización de las perforaciones realizadas durante el estudio de Microzonificación Sísmica del Valle de Aburrá en el año 2002.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
NO PERF	Texto (50)	Nombre de la perforación
ID PERF	Número entero	Identificador de la perforación
TIPO PERF	Número entero	Tipo de perforación
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web


<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b> N_GE_P_Perfo2007_AM		Contiene la localización de las 36 perforaciones realizadas para este estudio.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
NOPERF	Texto (10)	Nombre de la perforación
X	Double	Coordenada este
Y	Double	Coordenada norte
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web

<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b> X_GE_A_MUnidGeom_AM		Polígonos que describen los límites las macrounidades geomorfológicas presentes en el Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
ZONA	Texto (30)	Código de la macrounidad
DESCRIP_ZO	Texto (60)	Descripción de la macrounidad
LEYENDA	Texto (10)	Código de la macrounidad como aparece en la leyenda del mapa
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos:</b> Geosfera		<b>Escala:</b> 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b> X_GE_A_UnidGeol_AM		Polígonos que describen los límites de las unidades litológicas superficiales del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
UNIDAD	Texto (15)	Código de la unidad
DESCRIPCION	Texto (50)	Descripción de la unidad
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_GE_A_UnidGeom_AM		Contiene las unidades de paisaje, los bloques y las unidades geomorfológicas derivadas del análisis del MDT y mapas de pendientes, aspectos, geología y reconocimientos de campo.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
UNIDAD	Texto (25)	Código de la unidad
DESCRIPCION	Texto (200)	Descripción de la unidad
PAISAJE	Texto (10)	Código de la unidad de paisaje
RELIEVE	Texto (100)	Código de la unidad de relieve
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_GE_L_EstrTecto_AM		Contiene la localización de la geología estructural regional y local, levantamientos fotogeológicos de lineamientos y fallas.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
TIPO	Texto (30)	Tipo de estructura geológica
NOMBRE	Texto (50)	Nombre de la estructura geológica
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Lenght	Double	Longitud de la estructura

Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_GE_L_LineaSismi_AM		Contiene la ubicación de las líneas de refracción sísmica en diferentes materiales geológicos.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
NOMBRE	Texto (25)	Código con el que es identificado la línea sísmica
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Lenght	Double	Longitud de la línea



Conjunto de Objetos: Geosfera		Escala: No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_GE_P_EstrGeol_AM		Contiene los levantamientos de campo de las estructuras tectónicas tipo diaclasa, foliación, estratificación y cizallas.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
MUNICIPIO	Texto (11)	Municipio en el que esta ubicada la estación
UNIDAD	Texto (38)	Unidad litológica sobre la que esta la estación
ESTACION	Texto (20)	Código de la estación
X	Double	Coordenada este
Y	Double	Coordenada norte
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web

Conjunto de Objetos: PAR_Desastres		Escala: 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_VulnerEstr_AM		Contiene los polígonos de la distribución de zonas homogéneas para efectos del análisis de vulnerabilidad estructural, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
MUNICIPIO	Texto (25)	Municipio al que corresponde la zona
ZONA	Texto (10)	Código de la zona
DESCRIPCION	Texto (200)	Descripción de la zona
MANZANA	Texto (10)	Si presenta manzana piloto, seleccionada para la verificación en campo
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>

Conjunto de Objetos		Escala: 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_GE_Aspc_AM		Corresponde al grid de aspectos, que indica la dirección de las pendientes de todo el Valle de Aburra, y que sirvió como insumo para definir las unidades geomorfológicas.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de la dirección de la ladera para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b> 10_GE_Dem_AM		<i>Corresponde al Modelo de Elevación Digital (DEM) de todo el Valle de Aburra. Este fue el insumo para generar los grid de pendientes, aspectos y el modelo de sombras.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de la altura sobre el nivel del mar para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b> 10_GE_Pend_AM		<i>Corresponde al grid de pendientes de todo el Valle de Aburra, y que sirvió como insumo para clasificar las unidades geomorfológicas.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de la pendiente en grados para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b> 10_GE_Somb_AM		<i>Corresponde al modelo de sombras o iluminación hipotética del terreno, para todo el Valle de Aburrá</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de la celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: No Definida</b>
<b>Objeto Geográfico:</b> 200_PD_R475_AM		<i>Corresponde al grid de aceleración máxima del terreno a nivel de roca para un período de retorno de 475 años, para el Valle de Aburrá.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 200 , Y 200	
Value	Valor de la aceleración en roca (g) para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: No Definida</b>
<b>Objeto Geográfico:</b> 200_PD_R93_AM		<i>Corresponde al grid de aceleración máxima del terreno a nivel de roca para un período de retorno de 9,3 años, para el Valle de Aburrá.</i>
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 200 , Y 200	
Value	Valor de la aceleración en roca (g) para cada celda	


Conjunto de Objetos: PAR_Desastres		Escala: No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b>  N_PD_A_AcRoca475_AM		Contiene los polígonos de la aceleración máxima del terreno a nivel de roca para un período de retorno de 475 años, de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (15)	Rango de los valores aceleración máxima (g)
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


Conjunto de Objetos: PAR_Desastres		Escala: No Definida
<b>Objeto Geográfico:</b>  N_PD_A_AcRoca93_AM		Contiene los polígonos de la aceleración máxima del terreno a nivel de roca para un período de retorno de 9,3 años, de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (15)	Rango de los valores aceleración máxima (g)
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


Conjunto de Objetos		Escala: 1:10000
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_S475_AM		Corresponde al grid de aceleración máxima del terreno en superficie para un período de retorno de 475 años, para las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá. Indica los valores de aceleración (g).
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de la aceleración en superficie (g) para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_S93_AM		Corresponde al grid de aceleración máxima del terreno en superficie para un período de retorno de 9.3 años, para las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá. Indica los valores de aceleración (g).
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de la aceleración en superficie (g) para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Af1d_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos: PAR_Desastres</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAfect1d_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población diurna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Af1n_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos:</b> PAR_Desastres		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAfect1n_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 1 en población nocturna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Af2d_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos:</b> PAR_Desastres		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAfect2d_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población diurna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Af2n_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos: PAR_Desastres</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAfect2n_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 2 en población nocturna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Af3d_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos: PAR_Desastres</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAfect3d_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población diurna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Af3n_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	


<b>Conjunto de Objetos: PAR_Desastres</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAfect3n_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para Nivel de Afectación 3 en población nocturna, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>


<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_Edif_AM		Corresponde al grid de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de PPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	

<b>Conjunto de Objetos: PAR_Desastres</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_PPAAedifica_AM		Contiene los polígonos de Pérdida Promedio Anual (PPA) x 10 <sup>6</sup> para edificaciones, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de PPA x 10 <sup>6</sup>
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en m <sup>2</sup>

<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_TFle_AM		Corresponde al grid de los Daños Promedio Anual (DPA) x 10 <sup>6</sup> para tuberías flexibles, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de DPA x 10 <sup>6</sup> para cada celda	

<b>Conjunto de Objetos:</b> PAR_Desastres		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_DPATubFlex_AM		Contiene los polígonos de los Daños Promedio Anual (DPA) $\times 10^6$ para tuberías flexibles, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de DPA $\times 10^6$
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en $m^2$

<b>Conjunto de Objetos</b>		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  10_PD_TRig_AM		Corresponde al grid de los Daños Promedio Anual (DPA) $\times 10^6$ para tuberías rígidas, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
Tamaño de celda	X 10 , Y 10	
Value	Valor de DPA $\times 10^6$ para cada celda	

<b>Conjunto de Objetos:</b> PAR_Desastres		<b>Escala: 1:10000</b>
<b>Objeto Geográfico:</b>  X_PD_A_DPATubRig_AM		Contiene los polígonos de los Daños Promedio Anual (DPA) $\times 10^6$ para tuberías rígidas, de las zonas urbanas y de expansión de los Municipios del Valle de Aburrá.
<b>Atributos:</b>	<b>Descripción</b>	
OBJECTID	Autonumérico	Identificador
Shape	Geometría	Tipo de geometría
RANGO	Texto (20)	Rango de los valores de DPA $\times 10^6$
ID_AW	Número entero	Identificador para la aplicación web
Shape_Area	Double	Área del polígono en $m^2$



#### 4. GEOLOGÍA, TECTÓNICA Y GEOMORFOLOGÍA

En este capítulo se presentan las principales características geológicas, tectónicas y geomorfológicas que constituyen los terrenos de los municipios que conforman el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Caldas, La Estrella, Sabaneta, Copacabana, Girardota, Barbosa, Medellín, Bello e Itagüí), además del municipio de Envigado. Los resultados de los municipios Medellín, Bello e Itagüí corresponden a la actualización de estudios inicialmente presentados (GSM, 2002). Estas características se determinaron a partir de la recopilación de información geológica y cartográfica de las áreas de estudio, los recorridos de campo y los análisis de las fotografías aéreas. La base para este estudio corresponde al estudio de la Microzonificación Sísmica de los Municipios del Valle de Aburrá y Definición de Zonas de Riesgo por Movimientos en Masa e Inundación en el Valle de Aburrá, realizado por el Grupo de Sismología de Medellín (GSM, 2002).

El Valle de Aburrá se localiza hacia la parte norte de la cordillera Central de Colombia; corresponde a una depresión topográfica alargada que puede ser dividida en dos tramos, el primero de ellos se localiza hacia el sur y centro, y va desde el municipio de Caldas hasta Bello en dirección aproximada norte – sur, la cual presenta una curvatura en cercanía de Sabaneta y Envigado. El segundo tramo presenta dirección noreste y va desde el municipio de Bello hasta finalizar en Barbosa. Las condiciones paisajísticas del Valle de Aburrá están enmarcadas por un valle estrecho al sur, el cual se amplía en el municipio de Medellín alcanzando unos siete kilómetros de amplitud, y que luego se cierra nuevamente a la altura del municipio de Copacabana.

Altitudinalmente se presentan variaciones en las montañas que rodean el valle, las cuales pueden alcanzar hasta los 3 000 metros en los altos de San Miguel (nacimiento del río Aburrá), Padre Amaya y Boquerón. Además, se presentan las zonas de los altiplanos de San Vicente – Rionegro y Santa Elena al oriente, y el Llano de Ovejas al occidente (ver Figura 4.1 y plano PL-1050-G-01).

Geológicamente el área de estudio comprende el Valle de Aburrá y los altiplanos, donde afloran variadas unidades litodémicas que incluyen rocas de diferente edad, origen y composición. En relación con las edades, estas van desde rocas paleozoicas hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición se tienen rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas, gabros y basaltos; rocas volcanosedimentarias y los depósitos de origen aluvial y de vertiente, además de los llenos de origen antrópico (ver Figura 4.2 y plano PL-1050-G-02).

Según las consideraciones anteriores, el marco geológico del Valle de Aburrá es bastante complejo, considerando la presencia de varios terrenos alóctonos acrecionados y la fuerte influencia de los sistemas de fallas de Cauca y Romeral, además de sistemas

menores asociados (Hermelín y Rendón, 2007). El emplazamiento del basamento rocoso del Valle de Aburrá ha sido siempre tema de discusión por parte de los geólogos, así se mencionan los estudios realizados desde épocas pasadas hasta hoy (Boussignault, 1825; Grosse, 1926; Ospina, 1911; Scheibe, 1934 (elaborado en 1919); Botero, 1963; Case *et al.*, 1971; Jaramillo *et al.*, 1971; Echeverría, 1973; Toussaint y Restrepo, 1974 y 1984; González, 1980; Feininger y Botero, 1982; Arango y Montoya, 1982; Integral S.A., 1982, 1999 y 2002; Álvarez, 1983; Toro y Velásquez, 1984; Mejía, 1984; Álvarez y Trujillo, 1985; Maya y González, 1995; Correa y Martens, 2000; Ingeominas, 2001 y 2005; Rendón, 1999 y Rendón *et al.* 2006; Giraldo y Sánchez, 2004; Correa y Martens *et al.*, 2005; Ordoñez, *et al.*, 2005 entre otros.

En general, como unidades litológicas importantes se presentan tres unidades que se extienden desde el vecino país de Ecuador y alcanzan a llegar hasta la parte norte de la cordillera Central en Colombia donde se define como un Complejo Polimetamórfico. Este Complejo está caracterizado por gran variedad de litofacies dentro de las cuales se incluyen anfibolitas, esquistos, gneises, migmatitas y están limitadas localmente por grandes fallas de importancia regional como es el sistema Cauca – Romeral. Afloran también cuerpos plutónicos de extensión importante llegando a definir la unidad del Batolito Antioqueño y el de Ovejas, además de algunos stocks o cuerpos menores. Para el sector occidental se presentan secuencias volcanosedimentarias limitadas también por el sistema de fallas Cauca – Romeral y donde aparecen cuerpos gabroicos y duníticos. En estudios más recientes aparecen los complejos ofiolíticos que están conformados por cuerpos ultramáficos discontinuos, limitados por fallas, con una orientación preferencial norte – sur en formas lenticulares, las unidades rocosas corresponden a metabasitas, dunitas, peridotitas. Además, dada la importante actividad sísmica, antrópica, hídrica y pluviométrica se han generado importantes depósitos de vertiente y aluviales que cubren los basamentos rocosos mencionados.

Tanto las unidades rocosas como los depósitos de vertiente y aluviales presentan perfiles de meteorización, donde se desarrollan suelos residuales de variado espesor con características propias, los cuales son fundamentales para apoyar una microzonificación sísmica detallada como la que se presenta en este estudio. Para el perfil de meteorización se utilizó la clasificación de Dearman (1991), que se presenta en la Tabla 4.1.

#### 4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

Las diferentes unidades geológicas que afloran en el área de estudio se han estudiado de forma directa por medio de los reconocimientos detallados de campo (Figura 4.3 y plano PL-1050-G-03) y las exploraciones del subsuelo realizadas para este estudio, las cuales corresponden aproximadamente a 1 200 m, además de las realizadas por Solingral S.A. durante más de 46 años de funcionamiento, y a partir de discusión con

expertos, recopilación bibliográfica la cual incluye informes de INGEOMINAS, tesis de grado y trabajos de investigación, que se encuentran referenciados en la bibliografía al final de este capítulo.

**Tabla 4.1. Perfil de meteorización según Dearman (1991)**

Grado	Criterio Límite	Descripción
VI	Textura Ausente	La roca se ha decolorado y transformado completamente en suelo, en el cual se ha perdido la estructura original de la roca parental. Existe gran cambio de volumen.
V	Textura original presente y núcleos ausentes	La roca se encuentra transformada en suelo pero conserva la textura original. Se pueden encontrar bloques de rocas. Las propiedades del suelo dependen de la naturaleza de la roca parental. Puede excavar a mano.
IV	Núcleos de roca presentes	Roca decolorada, las discontinuidades pueden estar abiertas y tener decoloradas las paredes, la estructura original cerca de las discontinuidades puede estar alterada, menos del 50% del material es roca. La recuperación varía entre un 10% y 50% y el RQD varía entre el 10% y 30%.
III	Relación Suelo/Roca 50/50 Suelo presente	La roca está decolorada, las discontinuidades pueden estar abiertas y las superficies decoloradas. El porcentaje de roca varía entre 50% y 90%, la recuperación varía entre el 50% y 100%, el RQD varía entre 30% y 90%.
II	Suelo y decoloración presentes	La roca está ligeramente decolorada cerca de las discontinuidades, más del 90% es roca, se recupera casi el 100%, RQD de casi 90%.
I	Decoloración ausente	La roca no presenta decoloración, hay recuperación de casi 100%, RQD de 95%.

En la Tabla 4.2 se presenta la secuencia estratigráfica de las unidades litodémicas que afloran en el área metropolitana del Valle de Aburrá según la edad, desde la más reciente hasta la más antigua. Consecutivamente, se hace la descripción de cada unidad a nivel regional y su ocurrencia en los diferentes municipios cartografiados como una geología local (ver Figura 4.2 y PL-1050-G-02).

Es importante aclarar, que considerando el sistema cartográfico utilizado en este estudio y el sistema de información geográfico implementado, cualquier cambio relacionado con geología y geomorfología, posterior a su publicación, deberá cumplir con los mínimos requerimientos cartográficos exigidos por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá a saber:

- Utilizar la base topográfica SIGMA o alguna versión mejorada o topografía de detalle, levantamiento de estaciones de campo con los requisitos de coordenadas y con su correspondiente formato de levantamiento geológico o geomorfológico de campo que incluye descripción litológica y de unidad geomorfológica y de estructuras tectónicas.
- Aprobación con visita de campo por parte de un geólogo funcionario de Área Metropolitana del Valle de Aburrá o entidad correspondiente.
- Actualización de la geodatabase previa aprobación por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá de la validez del cambio.

**Tabla 4.2. Leyenda Geológica para el Valle de Aburrá**

Unidad Litodémica	Sigla	Nombre
<b>Depósitos Antrópicos</b>	QII	Llenos Antrópicos
<b>Depósitos Aluviales</b>	Qal	Depósitos Aluviales
	Qat	Depósitos Aluviotorrenciales
<b>Depósitos de vertiente</b>	Qd	Depósitos de Deslizamiento
	QFa	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
	QFIV	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
	QFIII	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
	NQFII	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
	NFI	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
	NFpreI	Depósitos de flujos de escombros y/o lodos
	<b>Intrusivos Cretáceos</b>	KcdA
KcdE		Stock de Las Estancias
KcdML		Stock de Media Luna
KtO		Batolito de Ovejas
KdA		Stock de Altavista
KgSD		Stock de San Diego
KgC		Gabros de Copacabana
<b>Complejo Quebradagrande</b>	KvsQG	Miembro Volcanosedimentario
	KvQG	Miembro Volcánico
<b>Complejo Ofiolítico de Aburra</b>	JKmbP	Metabasitas del Picacho
	JKuM	Dunitas de Medellín
	JKgmS	Gneis Milonítico de Sajonia
<b>Complejo Ofiolítico de Romeral</b>	JgR	Gabros de Romeral
	JuR	Peridotita de Romeral
<b>Intrusivo Jurásico</b>	Jml	Milonita de La Iguaná
<b>Intrusivo Triásico</b>	TRgA	Stock de Amagá
	TRgP	Gneis de Palmitas
<b>Complejo Cajamarca</b>	TReC	Esquistos de Cajamarca
<b>Grupo El Retiro</b>	TRaM	Anfibolitas de Medellín
	TReaB	Esquistos Anfibólicos de Baldías
	TRmPP	Migmatitas de Puente Peláez
	TRgLC	Gneis de La Ceja
<b>Grupo Caldas</b>	PZaAM	Anfibolitas del Alto de Minas

	PZeC	Esquistos de Caldas
	PZagC	Anfibolitas Granatíferas de Caldas

#### 4.1.1 Grupo Caldas

Está conformado por las unidades litológicas más antiguas aflorantes dentro del Valle de Aburrá; según Restrepo *et al.* (en prensa) las edades corresponden al Devónico (alrededor de 400 Ma) y el hecho de no tener un evento metamórfico más joven puede indicar la presencia de un terreno acrecionado después del metamorfismo Permo-Triásico (Complejo Cajamarca). El Grupo Caldas, está representado por gneises, esquistos moscovíticos y anfibolitas granatíferas limitados tanto al oriente como al occidente por fallas de carácter regional como la falla Santa Isabel.

- **Anfibolitas del Alto de Minas (PZaAM).** Unidad litodémica formalmente definida por González (2002a). De acuerdo con este autor el Gneis de La Miel debe considerarse sinónimo de las Anfibolitas del Alto de Minas. Están constituidas por un cuerpo metamórfico de estructura gnéisica que intruye las rocas metamórficas del complejo Cajamarca (Maya y González, 1995; Ingeominas, 2001) o zona Montebello, en el sentido de Echeverría (1973). La composición modal varía entre granito y cuarzomonzonita pobre en máficos, con cuarzo, plagioclasa y microclina, como minerales principales, y moscovita, biotita y granate como caracterizantes (González, 2002a). El contacto entre las Anfibolitas del Alto de Minas y el complejo Quebradagrande se caracteriza por la presencia de milonita y salvanda en el nacimiento de la quebrada Santa Barbará.
- **Esquistos de Caldas (PZeC).** Corresponden a esquistos moscovíticos, cuarzosericíticos, biotíticos y cloríticos intercaladas a cuarcitas y gneises (Maya y Escobar, 1985). Son rocas de grano fino en coloraciones plateadas, las cuales obedecen a la presencia de micas como moscovita, además de fracciones menores de grafito. Esta unidad, corresponde posiblemente a un metamorfismo de medio grado. Su localización corresponde a un cuerpo alargado desde el Alto de Minas hasta cercanías del sector de La Tablaza. En términos generales, los esquistos conforman un relieve montañoso de pendientes moderadas a fuertes.
- **Anfibolitas Granatíferas de Caldas (PZagC).** Denominada por Patiño y Noreña (1984). Afloran en la quebrada La Miel y en las cabeceras del río Aburrá. Se encuentran asociadas con esquistos cloríticos, sericíticos y con ortogneis moscovítico. Se caracteriza por un color verde oscuro, la presencia de porfidoblastos de granates y un aspecto masivo a nivel macroscópico según Restrepo y Toussaint (1984). Según Restrepo *et al.* (en prensa) la edad de estas rocas es Devónico con un evento metamórfico en el Permo-Triásico.

#### 4.1.2 Complejo Cajamarca

La mayor parte de la cordillera Central está constituida por rocas metamórficas con evidencias de haber sufrido varios eventos metamórficos que se reflejan en la génesis, en los rasgos texturales de las rocas y en las edades isotópicas de las mismas. Dentro de esta unidad se incluyen los denominados Esquistos de Cajamarca y las rocas que hacen parte del grupo El Retiro. Es de anotar, que dentro de este complejo no existen rasgos tectónicos que permitan separar estructuralmente el bajo grado de los esquistos con el alto grado de metamorfismo de las rocas del grupo El Retiro.

El complejo Cajamarca es análogo a la denominada zona Montebello del complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central, en el sentido de Restrepo y Toussaint (1984). En general está constituido por rocas de bajo grado de metamorfismo como esquistos cuarzosericíticos, esquistos verdes, filitas, cuarcitas y algunas franjas de mármoles y rocas de alto grado como gneises, migmatitas, anfibolitas. Dentro del Valle de Aburrá se presentan las siguientes unidades que se agrupan dentro de este complejo:

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Corresponden a esquistos de bajo grado, su composición principal es cuarzosericítica, clorítica y grafitica. Están relacionados con cuerpos de anfibolitas sin granates y en general conforman topografías escarpadas. Los esquistos cuarzosericíticos presentan variaciones transicionales a esquistos sericíticos y cuarcitas, pasando estas últimas a esquistos cuarzomoscovíticos y cuarzobiotíticos (Patiño y Noreña, 1984). La roca más abundante corresponde a esquistos cuarzosericíticos, que microscópicamente presentan textura foliada, indicada por orientación paralela en láminas micáceas, brillo sedoso sobre superficies de foliación y bandeo composicional de sericita y cuarzo. Estos esquistos muestran un desarrollo disímil de suelo, variando entre material de grano fino y tamaño arena, dependiendo de la cantidad de cuarzo. El perfil de meteorización puede ser variable con un limo arenoso de color pardo rojizo, sin textura en superficie; seguido por un material que conserva la textura original, grafitoso, con abundantes micas pardas y gran cantidad de bloques rocosos frescos. Esta última capa puede tener un espesor cercano a los diez metros.
- **Grupo El Retiro.** Propuesto por Ingeominas (2005) como una unidad litodémica, bajo la cual están incluidas rocas de medio y alto grado de metamorfismo, correspondientes con la denominada Zona Ayurá del Complejo Polimetamórfico de la Cordillera Central (Restrepo y Toussaint, 1984).
- **Anfibolitas de Medellín (TRaM).** Aparecen como varios cuerpos de anfibolitas, paragneises, migmatitas y esquistos grafiticos y moscovíticos en el Valle de Aburrá. Son unidades de dirección preferencial NNW, las cuales afloran desde el municipio de

La Ceja al sur, hasta el municipio de Belmira al norte (Correa y Martens, 2000). Son rocas constituidas esencialmente por hornblenda y plagioclasa, de textura por lo general isotrópica a bandeada, en ocasiones difícil de diferenciar de un gabro o una diorita, estas rocas han sufrido un metamorfismo de medio a alto grado. A nivel de afloramiento en el Valle de Aburrá, esta roca se encuentra profundamente meteorizada, con desarrollo de suelos residuales con espesores superiores a los 20 m, de carácter limoso, color amarillento a amarillo rojizo predominantemente y están cubiertos frecuentemente por los depósitos de vertiente derivados de estas mismas rocas. Es común un cambio gradual a un saprolito limoarenoso de color gris verdoso con láminas blancas, el cual presenta estructuras heredadas de la roca parental y donde se define la textura de la roca bandeada. Los afloramientos de los diferentes cuerpos de anfibolita se destacan por una morfología de cerros y pendientes fuertes a moderadas, cortas, con una zona donde la topografía es relativamente plana y las rocas presentan un avanzado estado de meteorización. La roca fresca in situ se observa en la parte alta de las vertientes montañosas escarpadas. Según comunicación verbal con Restrepo (en prensa) la sección tipo de estas anfibolitas estarían en cercanías de la quebrada Santa Elena y deberían por tanto retomar este nombre, o sea "Anfibolitas de Santa Elena".

- **Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB).** Afloran unidades de rocas metamórficas en el sector del cerro Baldías. Han sido estudiadas por Botero (1963) y Echeverría (1973). Estas rocas presentan un avanzado estado de meteorización, pero alcanzan a definirse esquistos anfibólicos, gneises y anfibolitas en paquetes intercalados con amplia variación textural cuya mineralogía implica un metamorfismo de medio a alto grado. Estas rocas aparecen instruidas por la tonalita del Batolito de Ovejas; donde se observa el cambio del saprolito de una roca tipo granitoide a una esquistosa (Correa y Martens 2000).
- **Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP).** Cuerpo de forma irregular alargado, en sentido norte sur. Microscópicamente corresponde a gneises y granofels cuarzo feldespáticos con biotita intercalados con gneis biotítico frecuentemente con sillimanita. Estas rocas presentan estructuras migmatíticas, marcadas por bandas alternas de color blanco a blanco amarillento, con tonalidades claras que corresponden al leucosoma y bandas grises oscuras a negras que corresponden al melanosoma (Ingeominas, 2005). Macroscópicamente las bandas que conforman el leucosoma corresponden a gneis y granofels de grano medio, de color blanco amarillento ligeramente moteado de negro por los minerales máficos como biotita.
- **Gneis de La Ceja (TRgLC).** Gneises y granofels bandeados, localmente plegados y con estructura migmatítica e intercalaciones de gneis miloníticos, cuarcitas y anfibolitas, y asociado especialmente a granulitas y migmatitas. Incluye localmente granulitas básicas y enderbíticas con débil bandeo composicional, textura

granoblástica poligonal y metamorfismo retrogrado de alto grado en la mayoría de las muestras.

#### 4.1.3 Gneis de Palmitas (TRgP)

Es el producto de un metamorfismo regional sobre rocas ígneas. En afloramiento se observa de color blanco, con bandas grises y alteraciones amarillo anaranjadas. La textura es fanerítica media, con variaciones texturales por efectos térmicos en donde se observa en grano fino y leve orientación. En el perfil de meteorización los suelos residuales son limo arcillosos, en ocasiones arenosos, de colores pardos claros a rojizos con motas oscuras y fragmentos de cuarzo, ocasionalmente se aprecian diques pegmatíticos que generan arenas de color blanco, estos suelos alcanzan hasta unos 20 m de espesor y tienen una consistencia firme y plasticidad media a baja.

#### 4.1.4 Stock de Amagá (TRgA)

Definido como un Intrusivo Triásico, relacionado con la actividad ígnea de la cordillera Central, la cual se inicia en el Pérmico durante la orogenia Hercínica y se extiende hasta el Triásico con la intrusión de este Stock adamelítico en el flanco occidental de esta cordillera. Grosse (1926) describió con el nombre de granito tipo Amagá a una serie de pequeños plutones situados en la vertiente occidental de la cordillera Central, el plutón principal localizado al este de la población de Amagá. Este cuerpo principal tiene 11,7 km de longitud y una amplitud máxima de tres kilómetros, en conjunto cubre un área de 45 km<sup>2</sup>, considerando cinco cuerpos menores localizados al norte del plutón principal, los cuales se consideran cogenéticos. Ingeominas (2001) describe este cuerpo como una variación entre cuarzomonzonita y granodiorita. Mineralógicamente está compuesto por cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, con inclusiones abundantes de biotita y apatito, toma un color gris pálido por alteración a sericita y arcillas, biotita negra con inclusiones de circón. La roca es predominantemente maciza, granular a porfídica, grano medio a grueso, color moteado rosado a gris claro. El contacto de este plutón con metamorfitas de muy bajo grado es intrusivo, formando una delgada aureola de contacto, en facies albita-epidota a hornblenda cornubianita. El contacto con el complejo Quebradagrande es fallado y las rocas sedimentarias de la formación Amagá reposan en discordancia sobre la roca granítica.

#### 4.1.5 Milonita de La Iguaná (JmI)

Corresponde a un Intrusivo Jurásico definido por González (2002b); es un gneis feldespático con cuarzo, puede presentarse como diques y venas dentro de las anfibolitas y metagabros. Las rocas predominantes son faneríticas de grano medio de



color moteado con bandeamiento composicional marcado por concentraciones de láminas finas de biotita. Esta última no presenta foliación clara, ya que la biotita tiende a estar desordenada (Restrepo y Toussaint, 1984). La mineralogía predominante es cuarzo, plagioclasa, microclina, biotita y epidota, en proporciones variables. La composición modal varía entre granodiorita y tonalita (González, 2002b). Por meteorización desarrolla suelos residuales con espesores variables, que pueden superar los 15 m, de carácter limoso con variaciones a arenas finas de colores claros, intercalados con otros limos arenosos de color gris azulado (provenientes de la anfibolita). En ocasiones se observan bloques de roca fresca embebidos en suelos saprolíticos de carácter limo arenoso. Los terrenos desarrollados sobre esta unidad litológica son susceptibles a la erosión laminar y concentrada, evidenciada por una gran cantidad de cicatrices de surcos y cárcavas, en especial hacia los sectores donde se explotan como material para la elaboración de tuberías y adoquines.

#### 4.1.6 Complejo Ofiolítico de Romeral

Corresponde a cuerpos de rocas ultramáficas asociadas al sistema de fallas de Romeral, formando un cinturón bien definido denominado por Álvarez (1983) como Cinturón Ofiolítico de Romeral (COR). Está constituido por rocas ultramáficas asociadas a gabros y lavas básicas de afinidad ofiolítica que hacen parte del Complejo Ofiolítico del Cauca (Toussaint y Restrepo, 1974).

- **Gabros de Romeral (JgR).** El nombre de Gabros de Romeral describe los cuerpos pequeños de gabro, relacionados con el sistema tectónico de Romeral (Ingeominas, 2001). Algunos de estos cuerpos han sido reportados con nombres específicos en la literatura geológica: Gabro de Palmitas (Grosse, 1926) La Estrella y San Sebastián (Mejía, 1984). Esta unidad corresponde a gabros de grano medio a fino, foliados, con efectos dinámicos superpuestos a los protoclasticos. Particularmente los gabros forman cuerpos alargados de dirección norte – sur limitados por contactos fallados con las unidades adyacentes. Gran parte de la superficie aflorante se encuentra en estado saprolítico y alcanza hasta 40 m de profundidad, en general es un suelo limoso de color amarillo rojizo a gris claro con motas blancas y negras, y de consistencia firme, puede contener núcleos de roca de textura granítica, meteorizada de color gris amarillento, con oxidaciones y meteorización hacia las paredes de las discontinuidades.
- **Peridotita de Romeral (JuR).** Es una roca masiva de color verde oscuro casi negro, compuesta esencialmente por olivino. Esta unidad presenta una meteorización diferencial en perfiles de suelo muy evolucionados. La presencia de núcleos frescos en una matriz saprolítica de granulometría arcillosa, dificulta la diferenciación entre el perfil de meteorización y los depósitos de flujo.

#### 4.1.7 Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS)

Gneises y esquistos con intercalaciones de anfibolitas, fuertemente deformados y con estructura preferencial milonítica cortados por venas y diques de cuarzo lechoso y andesitas porfídicas. La deformación ha acentuado los efectos de metamorfismo retrogrado a partir de rocas que probablemente alcanzaron la facies anfibolita en condiciones de alto grado. Se presenta en afloramiento como un saprolito y en forma de roca alterada con estructura bandeada esquistosa y gnéisica, las bandas irregulares discontinuas de colores gris, blanco amarillento, amarillas y rojas. Macroscópicamente se reconocen minerales como cuarzo, plagioclasa, biotita cloritizada, sericita y grafito. Puede corresponder a esquistos miloníticos formados a partir de gneises y gneises miloníticos, localmente con intercalaciones de anfibolitas deformadas. La roca está intensamente cizallada, deformada, localmente plegada y fallada, y son frecuentes augen de grafito y pequeños poliedros de deformación, se presenta por lo general como un saprolito arcilloarenoso rico en micas.

#### 4.1.8 Complejo Ofiolítico de Aburrá

Esta unidad, propuesta por Correa y Martens (2000), comprende a la Dunita de Medellín y las Metabasitas del Picacho, donde se incluyen anfibolitas y metagabros, los cuales se plantea, hacen parte de la misma ofiolita.

- **Metabasitas del Picacho (JKmbP).** Estas rocas presentan una apariencia muy similar a la descrita para la anfibolita en el sector de la quebrada La Espadera al oriente del valle y gabros con orientación metamórfica en cercanías al cerro El Picacho (Restrepo 2008, en prensa). De hecho es una unidad litológica recientemente identificada en el Valle de Aburrá (Correa y Martens, 2000). Corresponde a metagabros con textura ígnea, gabros miloníticos y anfibolitas de varios tipos asociados a una secuencia de piso oceánico (ofiolita) que incluye las Dunitas de Medellín; dicha secuencia se emplazó sobre el continente y ha sufrido procesos de metamorfismo. Se trata de una unidad que ha sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro regional, sin llegar a convertirse estrictamente en una anfibolita. Son frecuentes los cantos y bloques en los depósitos de vertiente del tipo flujos de escombros y sólo afloran en forma de ventanas erosivas de extensión variable. Estas rocas son de color gris moteado de blanco, con variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y orientación de los minerales máficos. Generalmente, tanto las anfibolitas como el metagabro que lo conforman, se encuentran como suelo residual sin conservar estructura alguna de la roca original y como saprolito muy meteorizado. En pocas ocasiones se logra observar la roca en estado fresco. El suelo residual desarrollado por esta unidad de roca es de color

variable sobresaliendo el gris claro, ligeramente moteado de blanco, el amarillo y el amarillo rojizo, con una granulometría limo arcillosa.

- **Dunitas de Medellín (emplazamiento) (JKuM).** Conforman una faja en forma de cuña dispuesta NNW, ubicada al oriente del Valle de Aburrá, la cual se extiende desde el sector de Las Palmas hasta el municipio de San Pedro (Giraldo y Sánchez, 2004). Se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita; con alteraciones parciales a minerales del grupo de la serpentinita y está asociada en su origen con los metagabros mencionados. La roca presenta un color negro, verde oscuro o café cuando está meteorizada, se observa un intenso fracturamiento, que se hace más fuerte en las cercanías de las zonas de contacto. Esta litología conforma las zonas de topografía más abrupta que se observan al oriente del Valle de Aburrá (comuna nororiental), entre las que se incluyen las vertientes escarpadas. La meteorización de estas rocas genera suelos residuales que dependiendo de factores tales como el grado de fracturamiento del macizo, inclinación de la vertiente, geformas presentes y condiciones hidrológicas, presentan condiciones y características muy diversas, con espesores variables entre 10 y 40 m, como fue encontrado en una exploración en el barrio Aranjuez. Dichos suelos poseen capas con un alto contenido de hierro, evidenciado por la presencia hacia la superficie de gran cantidad de nódulos de este mineral. Hacia los horizontes más profundos del perfil se observa una mezcla de bloques residuales embebidos en una matriz de material fino, correspondiente a suelo residual, generando una apariencia de depósito de vertiente. Adicionalmente, debe mencionarse que gracias al fuerte efecto tectónico y la posibilidad de disolución de los materiales allí presentes, existen zonas pseudocársticas con drenajes subterráneos, como se presenta hacia la zona del altiplano en terrenos del corregimiento de Santa Elena.

#### 4.1.9 Complejo Quebradagrande

El Complejo Quebradagrande fue descrito y nombrado inicialmente por Botero (1963) como formación Quebradagrande, conforme a la quebrada situada al sur del municipio de La Estrella que lleva el mismo nombre. Este autor describe los metasedimentos de la sección tipo como esquistos silíceos negros, filitas grafitosas, liditas, cuarcitas de grano fino y diques de andesita y dacita. En contraste, las rocas volcánicas las incluye dentro de un grupo denominado rocas verdes, basado en la coloración verde producto de la cloritización de rocas basálticas. Este último tipo de rocas se caracteriza por texturas félsicas y porfídicas, y por tener una mineralogía compuesta por plagioclasas muy alteradas y augita como mineral máfico predominante (Botero, 1963). Debido a las variaciones litoestratigráficas del miembro sedimentario y del miembro volcánico de esta unidad, en el I Simposio de Geología Regional del Ingeominas se propone el nombre de Complejo Quebradagrande en reemplazo de Formación Quebradagrande (Álvarez, 1995,

Maya y González, 1995). Adicionalmente, el miembro volcánico y el volcanosedimentario se encuentran mezclados, impidiendo una separación definida entre las dos unidades.

- **Miembro Volcanosedimentario (KvsQG).** Este miembro consiste de un cuerpo alargado en dirección N-S, donde se observan intercalaciones de esquistos silíceos negros (compuestos de pequeños cristales de cuarzo angular, en una masa silíceo arcillosa rica en material orgánico que le da su coloración), a veces de aspecto lenticular, filitas grafitosas, liditas, algunas cuarcitas de grano fino y color oscuro, delgados conglomerados y calizas clásticas negras con escasos fósiles marinos. Los sedimentos de la formación Quebradagrande son de origen marino, neríticos, euxínicos como lo atestiguan la abundante materia orgánica, los conglomerados intraformacionales y algunas calciruditas conteniendo *Archaeolithothamnium* y espinas de equinoides.
- **Miembro Volcánico (KvQG).** Es de composición toleítica y está conformado por espilitas, diabasas y basaltos, y en menor proporción andesitas, brechas y tobas. En general son rocas máficas con coloraciones verde oscura producida por la intensa alteración de los minerales máficos que las constituyen. En cercanías a las zonas de fallas se encuentran estructuras esquistosas por efectos dinámicos y donde se dificulta la separación con la unidad de esquistos verdes.

#### 4.1.10 Intrusivos Cretáceos

Se mencionan varias intrusiones importantes en el Valle de Aburrá, las cuales corresponden a cuerpos plutónicos de edad Cretácea. Además de los cuerpos más importantes y que se detallan a seguir, se presentan también rocas afectadas por metamorfismo térmico, definidos principalmente hacia el contacto de las unidades metamórficas básicas y pelíticas con el Batolito Antioqueño. Estas rocas se encuentran en techos colgantes sobre el Batolito Antioqueño. La intrusión del cuerpo del Batolito produjo recristalización en las rocas encajantes a temperatura entre moderada y alta en condiciones de baja presión. En algunos casos, la intrusión del cuerpo batolítico en niveles corticales superiores, produjo algunas deformaciones contemporáneas con el metamorfismo térmico. Siendo así, se definen las cornubianas, las cuales pueden o no estar cartografiadas en el área de estudio. Estas unidades se localizan cerca al contacto o en techos colgantes sobre el Batolito Antioqueño, son rocas con características mineralógicas y texturales que dependen de la composición química de la roca original.

- **Batolito Antioqueño (KcdA).** Mencionado inicialmente por Boussignault (1825) y posteriormente descrito por Ospina (1911). El nombre de Batolito Antioqueño fue dado por Botero en el año de 1940 (Ingeominas, 2001). Este cuerpo que está localizado en la parte central del departamento de Antioquia, es el más grande y septentrional en la cordillera Central, aflora en un área de 7 221 Km<sup>2</sup> (Feininger y

Botero, 1982). Ingeominas (2001) describe la forma del Batolito como trapezoidal; Feininger y Botero (1982) describen el piso del batolito como una superficie planar, quebrada en algunos lugares por intrusiones de fallas regionales. El contacto con rocas metamórficas regionales es discordante y tajante, generalmente intrusivo con desarrollo de aureolas de contacto, excepto contra anfibolita donde han tenido lugar algunas mezclas (Feininger y Botero, 1982).

- **Stock de Media Luna (KcdML).** Hace parte de las rocas del Batolito Antioqueño. Se encuentra aflorando en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que de Santa Elena conduce a Medellín. Presenta, al igual que el Batolito Antioqueño, una composición cuarzdiorítica de textura fanerítica media.
- **Stock de Las Estancias (KcdE).** Corresponde a cuerpos menores de granitoides que aunque separados geográficamente del cuerpo principal del Batolito Antioqueño, presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares y una posición que hace suponer una relación genética con éste. El Stock de Las Estancias es un cuerpo localizado entre los bloques sur y central de la Dunita de Medellín, en contacto fallado con esta unidad e intrusivo en anfibolitas, presenta una forma irregular con una extensión de 3,6 km<sup>2</sup>, longitud mayor de dirección SW-NE de unos dos kilómetros y una amplitud NW-SE de 1,2 km.
- **Batolito de Ovejas (KtO).** Denominado por Botero (1963) como “Batolito Satélite de Ovejas”; es considerado un cuerpo satélite del Batolito Antioqueño a quien corresponde en todas sus características y con quien está conectado a lo largo del valle del río Aburrá. Tiene una extensión de 165 km<sup>2</sup> entre los municipios de Bello y Sopetrán. La roca predominante es la tonalita, de tipo maciza, fanerítica equigranular de grano medio a grueso, hipidiomórfica, (Ingeominas, 2001). También afloran granodioritas y cuarzdioritas y en menor proporción dioritas, microdioritas y gabros (López, 1991).
- **Stock de Altavista (KdA).** Scheibe (1919) hace alusión a las características petrográficas del cuerpo, describiendo entre el barrio Belén y el Barcino (valle de la quebrada Doña María), extensas moles de granito de grano fino intercalado con dioritas de grano pequeño a fino, o bien encerrando masas redondas o elongadas de diorita. Grosse (1926) le asigna el nombre “Diorita tipo Boquerón” considerando la parte más noroccidental del cuerpo. Botero (1963) considera que la extensión de este cuerpo alcanza como mínimo los 100 km<sup>2</sup> y por ello lo denomina Batolito de Altavista. Es un cuerpo ígneo plutónico a subvolcánico que aflora extensamente en el flanco occidental del Valle de Aburrá, desarrolla un relieve de cuchillas característico. Su composición y textura aparecen muy heterogéneas, con los siguientes tipos de rocas: dioritas hornbléndicas, cuarzdioritas y gabros, con texturas desde fanerítica gruesa hasta afanítica, en ocasiones aparecen facies porfídicas, por lo que las rocas se pueden clasificar como pórfidos andesíticos o pórfidos microdioríticos indicando que

este cuerpo se emplazó a poca profundidad. En general, las rocas que lo constituyen se presentan intensamente meteorizadas, con un desarrollo de suelos que pueden alcanzar 45 m de espesor, y cuya textura y granulometría dependen de la facies a que corresponda la roca parental. Dichos suelos en los topes de las cuchillas y en las vertientes suaves exhiben el máximo desarrollo, con una capa superficial de suelo maduro y homogéneo, de carácter limo arcilloso de color claro (amarillo y blanco con manchas rojas) de espesor en general superior a los 15 m, seguida por el saprolito limoarenoso que preserva la textura y estructura de las rocas parentales, en la parte inferior se observa una transición suelo-roca de poco espesor. La alta variabilidad textural y granulométrica que exhiben los suelos del Stock de Altavista ha permitido una explotación a pequeña y mediana escala de una amplia gama de materiales para la construcción, tales como arena, arenilla y roca triturada, además de los suelos finos (limos y arcilla) como materia prima para las ladrilleras.

- **Stock de San Diego (KgSD).** Descrito por Botero (1963) quien lo consideró como una cúpula menor del Batolito Antioqueño. Posteriormente Restrepo y Toussaint (1984), lo clasifican como stock, determinan un área de unos seis kilómetros cuadrados y le dan el nombre de Stock de San Diego. Es un cuerpo plutónico constituido por rocas ígneas básicas que varían composicionalmente desde dioritas hasta gabros. Mineralógicamente se presentan plagioclasas y hornblenda principalmente, además de algún contenido de olivino y piroxenos. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada, desarrollando suelos residuales, que pueden alcanzar hasta 45 m de espesor, como en el área del Seminario Mayor. Dichos suelos son predominantemente limoarcillosos, en tonalidades claras de amarillo y blanco con manchas pardas, variando comúnmente a arenas finas.
- **Gabros de Copacabana (KgC).** Son cuerpos menores de gabro que pueden variar texturalmente, pasando de gabros a dioritas hornbléndicas y microdioritas. El tamaño del grano varía de fino a grueso con un promedio entre uno y dos milímetros; algunos presentan una ligera foliación posiblemente protoclastica y el eje mayor del cuerpo tiene una dirección paralela al rumbo regional de los cuerpos de anfibolita a los cuales se encuentran intruyendo. La textura predominante es hipidiomórfica granular y la composición es plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno y opacos con cuarzo accesorio en algunas muestras.

#### 4.1.11 Depósitos de Vertiente

Bajo esta denominación de depósitos no litificados se incluyen los de deslizamiento y los flujos de escombros y/o lodos que por su extensión permitan ser cartografiados. Por sus espesores y grado de madurez es conveniente cartografiarlos como unidades geológicas

independientes y no como formaciones superficiales. La edad de estos depósitos es variable, no obstante las características de altura, consolidación, madurez, pendiente y grado de incisión, permiten hacer relaciones cronoestratigráficas entre ellos, y, en el caso de los flujos, agruparlos en series de eventos.

Dentro de los flujos de escombros y/o lodos, se identificaron al menos cinco series de eventos de depositación relacionados con depósitos de vertiente, los cuales corresponden, desde el más antiguo al más reciente, a NFpreI, NFI, NQFII, QFIII, QFIV y QFa. Estos depósitos presentan un arreglo escalonado o telescópico, donde los más antiguos están localizados hacia la parte media y alta de la ladera y los más jóvenes se localizan hacia la base de la vertiente (Rendón *et al.* 2006). La caracterización geomorfológica de los materiales que componen los depósitos de vertiente se basó en parámetros como rango de alturas de afloramiento, pendiente promedio de la superficie de depositación, profundidad y grado de incisión de dicha superficie y la coincidencia entre el actual patrón de drenaje y las geoformas de los depósitos (Rendón *et al.* 2006). Las relaciones cronoestratigráficas tuvieron en cuenta, adicional a los parámetros ya mencionados, marcadores estratigráficos como paleosuelos y tefras, donde se determinaron edades máximas de depositación con base en las dataciones de circones volcánicos con edades que alcanzan hasta el Plioceno Tardío (Rendón *et al.* 2006).

- **Depósitos de Deslizamiento (Qd).** Son el producto de fenómenos de inestabilidad o movimientos de masa ocurridos en los terrenos inclinados o vertientes, que fueron generados por una combinación de factores como la gravedad, el agua y la intervención humana, entre otras. Su identificación y delimitación se facilita porque generalmente están asociados a los lugares de las vertientes donde se observan condiciones de baja pendiente y topografía suave, seguidos de una zona de pendiente alta en forma de escarpe, desde donde se desprendieron los materiales que los componen.
- **Flujos de escombros y/o lodos (QFa, QFIV, QFIII, NQFII, NFI, NFpreI).** Estos depósitos están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. Son generados al producirse hacia las partes altas de las vertientes una saturación y pérdida de resistencia, lo que hace más vulnerables a fenómenos tales como las altas precipitaciones o los movimientos sísmicos. Estos eventos en caso de ocurrir, le confieren a los suelos un carácter viscoso, debido a la mezcla del agua con los suelos arcillosos y limosos, de forma que pueden descender más o menos controlados por los cauces de las corrientes, arrastrando nuevos materiales y mezclándose caóticamente hasta encontrar unas condiciones de baja pendiente que permitan su depositación. Según la granulometría de los materiales que conforman la fuente, pueden darse depósitos de flujo con predominio de bloques rocosos denominados flujos de escombros o de la fracción fina (en general arcilla o limo) en cuyo caso se llaman flujos de lodos. Sin embargo, dada la mecánica del fenómeno, que no permite una selección o clasificación del material,

pueden existir dentro del mismo depósito zonas que correspondan a flujos de escombros y otras a flujos de lodos. El estado de meteorización, su grado de incisión y altura respecto al fondo de las vaguadas permitirá definir su edad relativa y grado de estabilidad.

#### 4.1.12 Depósitos Aluviales

Corresponden a los depósitos del fondo del Valle generados por el río Aburrá y algunos de sus afluentes principales. Se reconocen por generar una morfología relativamente suave, dispuestos en franjas irregulares siguiendo la trayectoria de las corrientes, pueden ser del tipo aluviales o envolver una mayor dinámica de las corrientes y entonces se definen como aluviotorrenciales.

- **Depósitos Aluviales (Qal).** Se presentan sobre los fondos de los valles del río Aburrá y sus afluentes principales, en las llanuras de inundación, como materiales de desborde; y en terrazas aluviales de diferentes niveles. Los depósitos asociados a estas zonas aluviales se caracterizan por presentar una ligera imbricación, selección moderada y alto grado de redondez de los bloques, que los diferencia de los depósitos aluviotorrenciales. Desarrollan geoformas de superficies suaves, prácticamente planas, dispuestos en franjas irregulares que siguen las principales corrientes que drenan el río Aburrá.
- **Depósitos Aluviotorrenciales (Qat).** Bajo esta denominación se agrupan los depósitos que generan algunas corrientes durante avenidas torrenciales, en las cuales la alta energía del agua permite arrastrar materiales de granulometría heterogénea, que incluyen desde bloques rocosos de tamaño variable hasta arenas finas, limos y arcillas. Estos materiales descienden por los cauces siguiendo un comportamiento turbulento, hasta alcanzar una zona con pendientes suficientemente suaves, donde se depositan, lo cual puede ocurrir en los pequeños escalones de pendiente suave que se presentan en las laderas, o en las orillas de los cauces.

#### 4.1.13 Depósitos Antrópicos – Llenos (QII)

Derivados de la actividad urbanística y constructiva propia de una región en crecimiento, que genera una gran cantidad de escombros y materiales de rezaga, los cuales deben ser dispuestos. Estos depósitos artificiales pueden llegar a tener una extensión y espesor tan importante que incluso permiten su cartografía a la escala del presente estudio (1:10 000). La composición de estos depósitos es en extremo heterogénea, desde materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas hasta basura, materia orgánica y escombros simplemente vertidos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante. Dentro de esta unidad también se incluyen



aquellas acumulaciones artificiales necesarias para la construcción de las obras de infraestructura; donde las de mayor relevancia son los terraplenes de aproximación a los puentes viales que pueden alcanzar espesores hasta de 10 m y extensiones importantes, las cuales pueden llegar hasta acumulaciones de hasta un millón de metros cúbicos. Sus características fundamentales estriban en que los materiales que los constituyen son más homogéneos y fueron conformados según metodologías de construcción adecuadas.

## **4.2 GEOLOGIA LOCAL**

Dentro de las condiciones geológicas de cada uno de los municipios que conforman el área metropolitana del Valle de Aburrá, las unidades litológicas serán presentadas por municipio de sur a norte. Para este estudio se trabajó la metodología básica de estudios geológicos, la cual corresponde a la revisión bibliográfica que se presenta al final de este capítulo, la fotointerpretación a nivel de detalle, según el listado de las fotografías aéreas que se presentan en la siguiente tabla; y finalmente se tiene los recorridos de campo, con los cuales se corrobora toda la información recolectada; estos recorridos están consignados en los formatos de campo, los cuales se presentan como anexo y pueden verse en el la Figura 4.3 y en el Plano PL-1050-G-03.

**Tabla 4.3. Fotografías Aéreas consultadas**

Municipio	Faja	año	escala	Número de fotos	Entidad donde se consultó
Caldas	1S	1996	1:8.000	523-530	Área Metropolitana
Caldas	1N	1996	1:8.000	638-642	Área Metropolitana
Caldas	2S	1996	1:8.000	506-517	Área Metropolitana
Caldas	2N	1996	1:8.000	448-458	Área Metropolitana
Caldas	3S	1996	1:8.000	503-491	Área Metropolitana
Caldas	3N	1996	1:8.000	436-446	Área Metropolitana
Caldas	4S	1996	1:8.000	327-342	Área Metropolitana
Caldas	4N	1996	1:8.000	546-551	Área Metropolitana
Caldas	5S	1996	1:8.000	954-962	Área Metropolitana
Caldas	5N	1996	1:8.000	294-308	Área Metropolitana
Caldas	6S	1996	1:8.000	401-410	Área Metropolitana
Caldas	6N	1996	1:8.000	820-832	Área Metropolitana
Caldas	7S	1996	1:8.000	412-421	Área Metropolitana
Caldas	7N	1996	1:8.000	311-325	Área Metropolitana
Caldas	8S	1996	1:8.000	422-430	Área Metropolitana
Caldas	8N	1996	1:8.000	416-432	Área Metropolitana
Caldas	9S	1996	1:8.000	437-442	Área Metropolitana
Caldas	9	1996	1:8.000	220-228	Área Metropolitana
Caldas	9N	1996	1:8.000	231-235	Área Metropolitana
Caldas	10	1996	1:8.000	599-614	Área Metropolitana
Caldas	11	1996	1:8.000	617-632	Área Metropolitana
Estrella	1	1996	1:8.000	556-558	Área Metropolitana
Estrella	2	1996	1:8.000	383-387	Área Metropolitana
Estrella	3S	1996	1:8.000	797-800	Área Metropolitana
Estrella	3	1996	1:8.000	348-356	Área Metropolitana
Estrella	4	1996	1:8.000	373-382	Área Metropolitana
Estrella	4R	1996	1:8.000	371-372	Área Metropolitana
Estrella	5	1996	1:8.000	337-346	Área Metropolitana
Estrella	6	1996	1:8.000	323-326	Área Metropolitana
Estrella	6N	1996	1:8.000	571-579	Área Metropolitana
Sabaneta	1	2001	1:6.000	238-244	Área Metropolitana
Sabaneta	2	2001	1:6.000	258-266	Área Metropolitana

**Tabla 4.3. Fotografías Aéreas consultadas (Cont.)**

Municipio	Faja	año	escala	Número de fotos	Entidad donde se consultó
Sabaneta	3	2001	1:6.000	267-275	Área Metropolitana
Sabaneta	4	2001	1:6.000	289-298	Área Metropolitana
Sabaneta	5	2001	1:6.000	305-316	Área Metropolitana
Sabaneta	6N	2001	1:6.000	317-326	Área Metropolitana
Sabaneta	6S	2001	1:6.000	377-380	Área Metropolitana
Sabaneta	7N	2001	1:6.000	327-335	Área Metropolitana
Sabaneta	7S	2001	1:6.000	367-372	Área Metropolitana
Envigado	0U	2004	1:5.000	573-575	Municipio de Envigado
Envigado	1U	2004	1:5.000	241-253	Municipio de Envigado
Envigado	2	2004	1:5.000	945-950	Municipio de Envigado
Envigado	2U	2004	1:5.000	257-269	Municipio de Envigado
Envigado	2E	2004	1:5.000	577-581	Municipio de Envigado
Envigado	3U	2004	1:5.000	274-282	Municipio de Envigado
Envigado	3S	2004	1:5.000	832-837	Municipio de Envigado
Envigado	3US	2004	1:5.000	582-588	Municipio de Envigado
Envigado	3N	2004	1:5.000	876-880	Municipio de Envigado
Envigado	4U	2004	1:5.000	300-310	Municipio de Envigado
Envigado	4S	2004	1:5.000	826-831	Municipio de Envigado
Envigado	4US	2004	1:5.000	593-596	Municipio de Envigado
Envigado	4N	2004	1:5.000	885-890	Municipio de Envigado
Envigado	5U	2004	1:5.000	341-351	Municipio de Envigado
Envigado	5S	2004	1:5.000	815-822	Municipio de Envigado
Envigado	5US	2004	1:5.000	922-929	Municipio de Envigado
Envigado	5N	2004	1:5.000	891-897	Municipio de Envigado
Envigado	6	2004	1:5.000	790-803	Municipio de Envigado
Envigado	7	2004	1:5.000	775-785	Municipio de Envigado
Envigado	8	2004	1:5.000	765-772	Municipio de Envigado
Envigado	9	2004	1:5.000	753-760	Municipio de Envigado
Envigado	10	2004	1:5.000	921-927	Municipio de Envigado
Palmitas	3	1994	1:9.000	126-131	Solingral
Palmitas	4	1994	1:10.700	100-107	Solingral
Palmitas	5	1994	1:9.200	110-115	Solingral

Palmitas	6	1994	1:9.200	95-99	Solingral
----------	---	------	---------	-------	-----------

**Tabla 4.3. Fotografías Aéreas consultadas (Cont.)**

Municipio	Faja	año	escala	Número de fotos	Entidad donde se consultó
Palmitas	7	1994	1:10.600	88-92	Solingral
Palmitas	8	1994	1:10.200	77-82	Solingral
Palmitas	9	1994	1:10.200	36-45	Solingral
Palmitas	10	1994	1:10.250	49-57	Solingral
Bello	F9	1996	1:8.000	670-685	Municipio de Bello
Bello	F10	1996	1:8.000	653-669	Municipio de Bello
Bello	F11	1996	1:8.000	686-697	Municipio de Bello
Bello	F6N	1996	1:8.000	111-121	Municipio de Bello
Bello	F8S	1996	1:8.000	710-720	Municipio de Bello
Bello	F3N	1996	1:8.000	135-141	Municipio de Bello
Bello	F5N	1996	1:8.000	125-133	Municipio de Bello
Bello	F7N	1996	1:8.000	13-24	Municipio de Bello
Bello	F4N	1996	1:8.000	103-108	Municipio de Bello
Bello	F8N	1996	1:8.000	999-010	Municipio de Bello
Bello	F3S	1996	1:8.000	912-918	Municipio de Bello
Bello	F32S	1996	1:8.000	153-158	Municipio de Bello
Bello	1N	1996	1:8.000	898-903	Municipio de Bello
Bello	6S	1996	1:8.000	810-817	Municipio de Bello
Bello	F6	1996	1:8.000	002-004	Municipio de Bello
Bello	F3	1996	1:8.000	500-508	Municipio de Bello
Bello	F1	1996	1:8.000	519-528	Municipio de Bello
Bello	F2	1996	1:8.000	510-518	Municipio de Bello
Bello	F4	1996	1:8.000	398-407	Municipio de Bello
Bello	F5	1996	1:8.000	385-396	Municipio de Bello
Copacabana	F1	1995	1:8.000	067-070	Área Metropolitana
Copacabana	F2	1995	1:8.000	038-053	Área Metropolitana
Copacabana	F3	1995	1:8.000	019-034	Área Metropolitana
Copacabana	F4	1995	1:8.000	074-089	Área Metropolitana
Copacabana	F5	1995	1:8.000	147-156	Área Metropolitana
Girardota	F2	1995	1:8.000	168-177	Área Metropolitana
Girardota	F3	1995	1:8.000	180-194	Área Metropolitana
Girardota	F4	1995	1:8.000	197-208	Área Metropolitana

Girardota	F5	1995	1:8.000	259-278	Área Metropolitana
-----------	----	------	---------	---------	--------------------

**Tabla 4.3. Fotografías Aéreas consultadas (Cont.)**

Municipio	Faja	año	escala	Número de fotos	Entidad donde se consultó
Barbosa	F2	1996	1:7.900	510-515	Área Metropolitana
Barbosa	F4A	1996	1:8.000	477-495	Área Metropolitana
Barbosa	F5	1996	1:8.000	347-361	Área Metropolitana
Barbosa	F5A	1996	1:8.001	135-144	Área Metropolitana
Barbosa	F6	1996	1:8.000	225-254	Área Metropolitana
Barbosa	F6/7	1996	1:8.700	858-870	Área Metropolitana
Barbosa	F7A	1996	1:8.700	262-274	Área Metropolitana
Barbosa	F7AR	1996	1:7.900	303-314	Área Metropolitana
Barbosa	F8A	1996	1:8.300	7024-7046	Área Metropolitana

A continuación se hace la descripción de las unidades litológicas, sus perfiles de meteorización, los contactos y estructuras tectónicas presentes para cada uno de los municipios que hacen parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (ver Figura 4.2 y Plano PL-1050-G-02).

#### 4.2.1 Municipio de Caldas

El Municipio de Caldas, localizado al sur del valle de Aburrá, se caracteriza por un relieve colinado y montañosos modelado en unidades geológicas de origen metamórfico, ígneo, tanto volcánico como plutónico y depósitos antiguos y recientes, los cuales corresponden a depósitos aluviales y de vertiente. Basados en la recopilación bibliográfica y los reconocimientos de campo para el municipio de Caldas, se pueden mencionar como unidades metamórficas las Anfibolitas del Alto de Minas (PZaAM), Anfibolitas Granatíferas de Caldas (PZagC) y los Esquistos de Caldas (PZec) como las unidades más antiguas y que hacen parte del Grupo Caldas. Se presentan también los Esquistos de Cajamarca (TReC). Las unidades ígneas están representadas por el miembro volcánico y volcanosedimentario del Complejo Quebradagrande y el Stock de Amagá. Aparece también una pequeña parte de la Dunita de Medellín (JKuM) hacia los límites con el municipio de Envigado. Entre los depósitos se presentan depósitos de deslizamientos, flujos de escombros y/o lodos de diferente grado de madurez, y depósitos aluviales y aluviotorrenciales, además de los llenos de origen antrópico. A continuación se mencionan las condiciones particulares de cada una de las unidades litodémicas aflorantes en el municipio.

- **Anfibolitas del Alto de Minas (PZaAM).** Son rocas de textura principalmente gnéssica, aunque localmente grada a una textura esquistosa muy bien definida. En

menor proporción se encuentran cuerpos de roca con textura fanerítica que ocasionalmente muestran orientación. Pese a las variaciones texturales, estas rocas se consideran dentro de la unidad Gneis del Alto de Minas ya que no se observa ningún tipo de contacto intrusivo o fallado que justifique la separación de estos cuerpos como unidades independientes. Su cambio textural puede deberse a paquetes que fueron levemente afectados por el evento metamórfico que dio origen a los gneises. La composición es similar a la de un ortogneis, con contenidos de cuarzo, feldespato y micas. En muestra de mano se presentan grandes cantidades de cuarzo, feldespato y cantidades variables de micas; estas últimas se incrementan cuando la roca está más esquistosa definiendo la dirección de la foliación.

Estos cuerpos se observan hacia la confluencia de la quebrada La Mina en el río Aburrá, en el lecho del río Aburrá a la altura de la Unidad Básica Integral La Clara y 400 m aguas arriba del punto anterior. En forma de paquetes aflora en el cruce de la vía a la vereda La Clara y en el lecho del río Aburrá. En el lecho del río Aburrá a la altura de la unidad básica integrada La Clara y en la vía que conduce de Caldas al Alto de La Cruz; este cuerpo se encuentra en el margen oriental del río Aburrá, desde el Alto de Minas al sur, hasta la cuchilla La Miel al norte. Los afloramientos más representativos de este cuerpo se observan: en el nacimiento de la quebrada Santa Barbará, en las márgenes del río Aburrá entre las quebradas La Honda y Santa Isabel, en las vías que conducen a las veredas La Salada parte baja y La Clara y sobre el lecho de la quebrada El Cebadero y La Miel.

- **Perfil de Meteorización.** En esta unidad se han desarrollado todos los horizontes del perfil de meteorización, es decir desde el horizonte I-III (roca fresca) hasta el VI (suelo residual). En las zonas de mayor pendiente el perfil de meteorización es poco espeso, donde se desarrolla principalmente un horizonte V, con espesores entre dos y tres metros, reposando sobre un horizonte II y I, el cual se encuentra generalmente fracturado. En las vertientes de menor pendiente y en especial hacia las divisorias amplias, se observa un perfil de meteorización de mayor espesor, desarrollando horizontes tipo VI, V, IV, III y II.
- **Contactos litológicos.** El contacto con las rocas del Complejo Quebradagrande es fallado, como se observa en el nacimiento de la quebrada Santa Barbará. Esta caracterizado por la presencia de milonitas y salvanda. En el sector de El Comino, el contacto entre ambos cuerpos no es visible, pero se observa un cambio litológico en la vertiente oriental de la cuchilla entre el río Aburrá y la quebrada La Mina. Este cambio litológico se observa igualmente en la vereda La Salada parte baja, zona El Reposo y entre el sector del restaurante El Cortijo y el restaurante Los Lagos. Con los esquistos verdes también se presentan contactos fallados en la quebrada Santa Isabel; en el sector de la confluencia de esta quebrada con el río Aburrá, hay un cambio litológico, el cual está cubierto por depósitos aluviales; en esta zona aflora el gneis en la margen izquierda de la quebrada y el esquistos en la

margen derecha. En la base de la vertiente a 400 m desde la unidad básica integral La Clara, aguas arriba por el cauce del río Aburrá, se observa un cambio litológico también entre los esquistos y el gneis.

**Tabla 4.4. Perfil de meteorización PZaAM**

<b>Horizonte VI</b>	Material de granulometría areno arcillosa, de color blanco, pardo claro y amarillo claro. En las zonas donde el material es muy micáceo, desarrolla perfiles de meteorización de granulometría arcillosa con algunos fragmentos de cuarzo tamaño arena. En ocasiones, este mismo material desarrolla espesos horizontes de caolinita. Los espesores máximos observados alcanzan 1.5 m de espesor
<b>Horizonte V</b>	Predominan colores pálidos, como amarillo rojizo, y amarillo y rosado. La textura es limo arenosa hasta arenosa. Esta última se desarrolla predominantemente en material con alto contenido de cuarzo y feldespato, generando horizontes tipo grus
<b>Horizonte IV</b>	Constituido por rocas frescas altamente fracturadas con generación de grus a lo largo de las discontinuidades

El contacto con la unidad de la Anfibolita Granatífera de Caldas no pudo ser definido; no obstante se observan cambios litológicos de ortogneis a anfibolita en diferentes zonas, como en un afluente de la quebrada La Clara, ubicado cerca al cruce entre la quebrada y la vía que conduce a la vereda con el mismo nombre. También en la vía que conduce de Caldas al alto de La Cruz, a la altura del sector El Tanque y en la zona más sur en la vía que conduce a la explotación maderera que se ramifica en el sector de la unidad básica integrada La Clara.

- **Estructuras.** El gneis se observa plegado en el nacimiento de la quebrada Santa Barbará. Este plegamiento se encuentra en la roca y en su perfil de meteorización como estructura heredada. Adicionalmente es notable la presencia de venas de cuarzo de hasta 20 cm de espesor.

Dirección de bandeamiento	N25°W/65°SW
Diaclasa	N80°W/35°SW

- **Esquistos de Caldas (PZeC).** Corresponden a esquistos moscovíticos, cuarzosericíticos, biotíticos y cloríticos intercalados a cuarcitas y gneises. Esta unidad aparece en cercanías de las quebradas Tablaza y Tablacita.
  - **Perfil de Meteorización.** El perfil típico que desarrolla esta unidad, es básicamente en los horizontes I, II, IV y V. La roca dura presenta zonas de foliación claramente definidas en coloraciones grises y pardas.

- **Contactos litológicos.** Parte del cuerpo mayor de esquistos se observa a lo largo del río Aburrá, a partir de la desembocadura de la quebrada Santa Isabel. El contacto occidental de los esquistos con las Anfibolitas del Alto de Minas, es neto, se pasa de una unidad a otra, igual como sucede con las anfibolitas. El contacto entre los esquistos moscovíticos y cuarzosericíticos se presenta fallado, inferido por el lineamiento de la quebrada. El contacto entre la unidad de gneis y los esquistos es intercalado, presentando variaciones en el grado de metamorfismo.

**Tabla 4.5. Perfil de meteorización PZeC**

<b>Horizonte V</b>	Textura limosa en coloraciones de rojo a pardo, conserva la esquistosidad y se disgrega con facilidad. Alcanza espesores de hasta tres metros.
<b>Horizonte IV</b>	El color es rojo, conserva la textura foliada y las micas del tipo moscovita son abundantes. El espesor promedio es de dos metros.
<b>Horizontes I y II</b>	Consta de esquistos grafitosos y esquistos verdes cuyos planos de foliación y de diaclasamiento se encuentran levemente alterados. En el horizonte II la meteorización es mayor.

- **Anfibolitas Granatíferas de Caldas (PZagG).** Rocas pertenecientes al Grupo Caldas. Petrográficamente corresponde a una roca masiva de color verde oscuro con tonalidades grises y verdosas, inequigranular con minerales ferromagnesianos, plagioclasa y cuarzo en menor proporción. Localmente se observa una leve orientación de los anfíboles, una textura bandeada y abundancia de sulfuros, donde predomina la pirita.

Este cuerpo está ubicado en la margen oriental del río Aburrá. Sus límites están, al norte en la quebrada La Clara y al sur coincidiendo con la quebrada La Miel. Esta unidad fue observada en el sur, en la vía paralela a la cuenca de la quebrada La Clara y en la vía que de la vereda La Clara conduce a la zona de extracción de madera (pinera). También aflora al norte, en la vía que de Caldas conduce a la vereda La Corrala y en el alto de La Luz (Alto las Cruces), a la altura del sector denominado Los Tanques y hacia la quebrada La Brumera.

- **Perfil de meteorización.** La unidad de anfibolitas granatíferas desarrolla horizontes de meteorización, desde I (roca fresca) hasta VI (suelo residual). Sin embargo, los horizontes II y III no son frecuentes.
- **Contactos litológicos.** Se encuentra en contacto con las Anfibolitas del Alto de Minas y con los Esquistos de Caldas. Los contactos de esta unidad con sus vecinos han sido observados en contacto tajante y como intercalaciones de ambas litologías. Hacia el sur de esta unidad, en la vía que de la unidad básica integrada



La Clara conduce a la zona de explotación de pinos, se observan suelos residuales de color rojo y blanco intercalados los cuales presumiblemente corresponden a horizontes meteorizados cuyos protolitos son la anfibolita y el gneis respectivamente.

**Tabla 4.6. Perfil de meteorización PZagC**

<b>Horizonte VI</b>	Es característico un color amarillo pardo a rojo, la granulometría es limosa y se observaron espesores de hasta dos metros.
<b>Horizontes V y IV</b>	Predomina un color amarillo pardo. El horizonte V conserva parte de la textura original de la roca mientras que en el IV esporádicamente se encuentran fragmentos frescos. La granulometría es limosa y fácilmente disgregable.

Cerca del cruce de la quebrada La Clara y la vía de la vereda La Clara fue observado un cambio litológico neto entre la Anfibolita del Alto de Minas y las Anfibolitas Granatíferas. En la zona norte en el tramo de la carretera de la vereda La Corrala en dirección al alto de Las Cruces, se encuentra un cambio litológico entre los esquistos y la anfibolita. El contacto tajante se observa en la quebrada La Brumera a 500 m de la confluencia con el río Aburrá y en la quebrada El Zarzo a 1.2 km aguas arriba de la confluencia con el río Aburrá.

– **Estructuras**

Diaclasas	N60°E/45°SE – N50°W/40°SW N40°E/80°SE
-----------	--

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Corresponden a rocas del Complejo Cajamarca. A nivel de muestra de mano afloran en el municipio de Caldas como una roca esquistosa de color verde, gris y negro, de carácter cuarzosericítico, clorítico y grafitico; están relacionados con cuerpos de anfibolitas sin granates. Son comunes las segregaciones de cuarzo en dirección de la foliación. Los esquistos afloran en cuerpos diferentes separados entre sí.

Algunos cuerpos de esquistos afloran en el río Aburrá en las quebradas La Bruñera y El Zarzo parte baja, y en afloramientos localizados en el cruce de la variante de Caldas. Además, otros cuerpos más pequeños se localizan en ambos márgenes del río Aburrá, aproximadamente 200 m en la margen oriental arriba de la escuela La Clara.

- **Perfil de Meteorización.** El perfil típico que desarrolla esta unidad, desarrolla básicamente horizontes I, II, IV y V. Aflora como un saprolito de color pardo rojizo con abundante oxidación de las micas, son suelos arenosos y arcillosos.
- **Contactos litológicos.** El contacto entre la unidad de gneises y los esquistos es intercalado, presentando variaciones en el grado de metamorfismo. En la misma zona puede observarse la presencia de cuerpos de roca masiva, de color oscuro, situados en medio de estas dos unidades litológicas. El contacto entre los esquistos moscovíticos y cuarzosericíticos se presenta fallado, inferido por el lineamiento de la quebrada.

**Tabla 4.7. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte V</b>	Textura limosa en coloraciones de rojo a pardo, conserva la esquistosidad y se disgrega con facilidad. Alcanza espesores de hasta tres metros. Hay abundante cuarzo lechoso proveniente de la segregación.
<b>Horizonte IV</b>	El color es rojo, conserva la textura foliada y las micas son abundantes. En los núcleos de esta roca se puede observar el esquisto de color verde. El espesor promedio es de dos metros.
<b>Horizontes I y II</b>	Consta de esquistos verdes cuyos planos de foliación y de diaclasamiento se encuentran levemente alterados. En el horizonte II la meteorización es mayor.

– **Estructuras**

Familia de diaclasas predominante	N10°W/80°SW
-----------------------------------	-------------

- **Stock de Amagá (TRgA).** Corresponde a las rocas ígneas intrusivas, esta constituida por rocas equigranulares de textura fanerítica media; compuesta por cuarzo, feldespato y biotita. Localmente se observan diques de feldespato.

Se ubica en la parte sur-occidental del área de estudio. Los afloramientos más representativos se encuentran en la quebrada La Maní - El Cardal (arenas abandonadas), y en la troncal del sur-este (troncal del café) a la altura del peaje Amagá, en la vereda Salinas por Pueblo Nuevo y por el estadero Pamplinita.

- **Perfil de meteorización.** Esta unidad desarrolla los horizontes II, IV, V y VI del perfil de meteorización.
- **Contactos litológicos.** En el municipio de Caldas, el Stock de Amagá sólo se encuentra en contacto con el miembro volcánico del Complejo Quebradagrande. Localmente está intruido por diques de 50 cm de espesor, de composición ácida

hacia el sur y andesítica hacia el norte, con textura de grano fino que meteoriza formando un material limoso. Estos diques se observan en la quebrada La Cardala (Maní - El Cardal), donde el contacto del dique con el Stock tiene una discontinuidad de 10 cm de espesor con una dirección N42°E. A lo largo de esta discontinuidad ambas unidades de roca se mezclan.

**Tabla 4.8. Perfil de meteorización TRgA**

<b>Horizonte VI</b>	Es de color amarillo pardo y amarillo pálido, de granulometría arenosa con espesores hasta de dos metros. Este horizonte sólo se observa hacia las divisorias de agua en relieves de pendiente baja
<b>Horizonte V</b>	Es de color moteado (rojo pálido y blanco) de granulometría arenosa que desarrolla grus. El espesor del grus es aproximadamente de 10 m
<b>Horizonte IV</b>	Son de color pardo claro donde se observan el cuarzo, el feldespato y la biotita. Está altamente fracturado y alcanza espesores de unos tres metros
<b>Horizontes I, II y III</b>	Estos horizontes se observan en zonas de canteras abandonadas y cerca el lecho de la quebrada El Maní-Cardal

– **Estructuras**

Diaclasas	N64°E/65°SE - N64°W/77°NE N60°W/63°NE
-----------	---------------------------------------

- **Dunita de Medellín (JKuM).** Estas rocas, hacen parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá. Mineralógicamente, se trata de una roca compuesta por olivino como mineral primario, con contenidos menores de cromita y magnetita. En muestra de mano, es una roca afanítica, con diferentes presentaciones según su estado de alteración, desde negro en estado fresco hasta diferentes tonalidades de verde con variaciones a pardo y gris plomo cuando están meteorizadas o serpentinizadas.

Corresponde a un pequeño cuerpo en límites con el municipio de Envigado y Sabaneta. Conforman zonas de topografía abrupta y está limitada por fallas.

- **Perfil de Meteorización.** Esta roca por lo general se encuentra extremadamente meteorizada; con perfiles donde la textura dominante es arcillosa, es de color rojo intenso. En las zonas con altas pendientes, los suelos son erodados continuamente debido a la escasa o nula cobertura vegetal, manteniendo la roca en un estado relativamente fresco.

- **Contacto litológico.** Las dunitas aparecen en contacto fallado con los Esquistos de Cajamarca. Se presentan esquistos cloríticos actinolíticos, exhibiendo una fuerte expresión geomorfológica en el cambio de pendiente de la cima de las colinas a la parte distal de las mismas.

**Tabla 4.9. Perfil de meteorización JKuM**

<b>Horizonte VI</b>	Estrato orgánico de color café oscuro, textura limo arcillosa, óxidos de hierro hacia la base, formado costras duras de color pardo oscuro. El espesor alcanza unos 0,50 m
<b>Horizonte V</b>	Matriz arcillo limosa, rojo intenso que varía a amarillo y con moteado vino tinto, consistencia dura, baja plasticidad. Espesor de tres metros
<b>Horizonte IV</b>	Bloques de roca de tamaño decimétrico a centimétrico, angulosos, irregulares con forma de elipsoides deformados, cuyos espacios intersticiales son ocupados por una matriz de color verde manzana con textura arcillo limosa. El espesor es de unos cuatro metros

- **Complejo Quebradagrande (KvQG, KvsQG).** Comprende un miembro volcánico y un miembro volcanosedimentario, ambos afloran en el municipio de Caldas. El miembro volcánico está conformado por diabasas y el miembro volcanosedimentario por intercalaciones de lutitas negras, chert y tobas, comúnmente intercalados con las rocas verdes. Ocasionalmente se observan texturas porfídicas.

Las rocas volcanosedimentarias del Complejo Quebradagrande se presentan hacia el noroeste del municipio de Caldas, su presencia ocurre en delgadas franjas intercaladas con el miembro volcánico. Este complejo también aflora al sur, en la margen occidental de la quebrada La Mina y al norte en la margen occidental del río Aburrá. Los afloramientos más representativos de este cuerpo se observan en el Alto de Minas; en la vía antigua a Fredonia a la altura del caserío La Playa, en la cantera Sinifaná, en la quebrada La Valeria y por la margen derecha de la quebrada La Mina.

El miembro sedimentario no es representativo en esta zona; sin embargo, afloramientos pequeños pueden observarse hacia el nacimiento de la quebrada La Mina (chert intercalado con diabasa), hacia la vereda Salinas, sector El 30 (tobas) y en la quebrada La Valeria (lutitas negras intercaladas con chert).

- **Perfil de meteorización.** Dentro de las rocas que conforman el miembro volcánico, las diabasas (predominantes en esta zona) desarrollan horizontes de

meteorización espesos desde roca fresca (horizonte I) hasta suelos residuales (horizonte VI). En las tobas se observaron horizontes IV, V y VI. El perfil de meteorización en el miembro volcánico es poco espeso; en el chert se presenta por lo general un horizonte V sobre un horizonte IV y este sobre un horizonte II; en las lutitas el perfil es más delgado y se presenta por lo general un horizonte IV de un metro de espesor sobre un horizonte II de dos metros de espesor.

**Tabla 4.10. Perfil de meteorización Diabasas (KvQG)**

<b>Horizonte VI</b>	Comúnmente genera suelos residuales con granulometría fina (limo y arcilla), de color rojo oscuro en la base y amarillo pardusco hacia el techo. Puede alcanzar espesores hasta de cuatro metros
<b>Horizonte V</b>	Presenta características similares al horizonte VI, en cuanto al color rojo y la granulometría. Este horizonte se diferencia del horizonte VI puesto que conserva algo de la textura original de la roca y es característica una patina de manganeso a lo largo de las estructuras o zonas de debilidad. Alcanza espesores de unos seis metros
<b>Horizonte IV</b>	En este horizonte los bloques frescos predominan en un 30%, cuyas superficies se encuentran usualmente cubiertas por una pátina de color negro. Se encuentra altamente fracturado, favoreciendo la meteorización por las zonas de debilidad
<b>Horizonte III, II y I</b>	Estos horizontes conservan la textura y color originales de la roca. La alteración en las zonas de debilidad genera colores negros por las pátinas de manganeso

**Tabla 4.11. Perfil de meteorización Tobas**

<b>Horizonte IV</b>	Genera un suelo residual limoso de color amarillo pardusco
<b>Horizonte V</b>	Es un horizonte de material limoso de color verde pálido

- **Contactos litológicos.** El contacto con las Anfibolitas del Alto de Minas se considera fallado. En el talud de la vía Troncal del Café, a la altura del estadero El Palacio de Los Frijoles y en la vereda Salinas, sector El 30, las tobas del Complejo Quebradagrande están en contacto tajante con el grus del Stock de Amagá. En general, el contacto entre el Complejo Quebradagrande y el Stock de Amagá, se infiere de los rasgos morfológicos como silletas, cambios en la dirección de los drenajes, lomos obturados, cerros aislados y valles aluviales discontinuos.

- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, NQFIII, NFI, NFprel).** Los depósitos de vertiente del municipio de Caldas están conformados por flujos (escombros y lodos) y depósitos de deslizamiento. Los depósitos tipo flujo tienen su mejor expresión en la margen occidental del área urbana del municipio; también pueden encontrarse pequeños flujos aislados en la parte baja de algunos cerros. Los depósitos de deslizamiento constituyen cuerpos pequeños, aislados, localizados sobre las vertientes de pendiente moderada y baja.
  - **Depósitos de deslizamiento.** Se presentan en general reposando sobre las vertientes, de pendientes moderadas a bajas (15-30°), de los relieves montañosos y colinados. Son frecuentes hacia la parte baja de la vertiente, con alta presencia de rupturas de movimientos en masa tipo deslizamiento. La mayoría de ellos presentan fragmentos de roca tamaño gravas y bloques de roca embebidos en una matriz de granulometría fina. En ocasiones están cubiertos de cenizas volcánicas.
  - **Depósitos de flujos.** Estos depósitos están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. En general, consisten de depósitos muy antiguos, asociados a un relieve colinado, producto de la fuerte incisión. En algunos sectores, los depósitos más antiguos se encuentran en las cimas de las colinas, indicando una inversión de relieve. En contraste, los depósitos de pequeños flujos aislados de la parte baja de algunos cerros, conforman cuerpos recientes de clastos frescos, subangulosos a subredondeados, cuyos fragmentos alcanzan 80 cm de diámetro.

Los flujos antiguos, se caracterizan por tener clastos muy meteorizados, dificultando, en la mayoría de los casos, su diferenciación de la matriz que los alberga. El suelo residual más característico de estos depósitos es moteado entre rojo y amarillo, de textura arcillosa. La selección es mala, encontrándose fragmentos de diámetro milimétrico hasta bloques de 40 cm en promedio. La forma de los clastos es subangulosa a subredondeada, cuya composición corresponde principalmente a basaltos que suelen presentar una meteorización esferoidal, además aparecen algunos clastos esporádicos de esquistos. El espesor visible es variable, alcanzando valores de más de 10 m.

Estos depósitos desarrollan horizontes de meteorización V y VI. En el sector de la universidad de La Salle se observa sobre un flujo de escombros, un horizonte VI amarillo, de carácter arcilloso, cuyo material parental puede ser tanto el flujo de escombros, como un flujo de lodos posterior, del cual no quedan relictos.

- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** Los depósitos aluviales y aluviotorrenciales están asociados a las corrientes principales; es decir, son producto de la depositación del río Aburrá y sus principales quebradas afluentes. Se localizan en las llanuras de

inundación, como materiales de desborde y en terrazas aluviales de diferentes niveles.

- **Depósitos aluviales.** Asociados a terrazas aluviales, se caracterizan por presentar una ligera imbricación, selección moderada y alto grado de redondez de los bloques, condición que los diferencia de los depósitos aluviotorrenciales. En el río Aburrá a la altura de la unidad básica integral La Clara, se puede observar una terraza de unos tres metros de espesor. El depósito asociado a esta terraza corresponde a intercalaciones de arenas medias a gruesas de color gris claro y capas donde predominan bloques de roca que alcanzan 15 cm de diámetro, cuya composición es de gneises y esquisto.
- **Depósitos aluviotorrenciales.** Están relacionados a las quebradas Las Minas, Santa Barbará, Santa Isabel, La Clara, La Bruñera, El Zarzo, La Corrala, El Cebadero, La Miel y La Valeria. Se caracterizan por la alta presencia de bloques rocosos con diámetros de 10 cm hasta de un metro de espesor, subredondeados a redondeados, con mala selección, y una disposición caótica de los clastos en una matriz arenosa. Hacia la parte alta del río Aburrá, y en las quebradas Santa Isabel, La Honda y Santa Barbará, los bloques están compuestos de gneises y esquistos. En las quebradas El Cebadero y La Miel, los bloques son de anfíbolita, gneis y esquisto. Las geoformas asociadas a estos depósitos corresponden a terrazas escalonadas y abanicos aluviales que se desarrollan cerca a la confluencia de dichas quebradas con el río Aburrá.
- **Depósitos Antrópicos - Llenos (QII).** Se presentan principalmente en el área urbana del municipio producto de la densa construcción. En el área rural algunos depósitos antrópicos están asociados a llenos o botaderos de escombros, entre ellos el de la estación de servicio Los Lagos. También se destacan algunas explanaciones con llenos hacia los bordes de material removido, principalmente hacia la zona del container cerca al puente de la variante Caldas sobre el río Aburrá y en los parqueaderos del sector del restaurante Las Vegas.

#### 4.2.2 Municipio de La Estrella

El municipio de La Estrella, localizado al suroeste del valle de Aburrá, abarca parte de la vertiente occidental del río Aburrá y un área menor de la vertiente oriental, las cuales presentan geomorfologías diferentes. El relieve del sector occidental, está compuesto por un respaldo montañoso donde la parte alta de la vertiente es de pendientes fuertes. La vertiente está altamente disectada y los drenajes, cuya principal dirección es occidente-oriental, incisan profundamente formando escarpes. A media ladera y en la parte baja de la vertiente, en dirección al río Aburrá, son notables una serie de lomos con pendientes moderadas a suaves, modelados en depósitos de vertiente del tipo flujo y en suelo residual. En la vertiente oriental, el respaldo montañoso forma hacia la parte

inferior de la vertiente, un sistema de lomos de tope suave y redondeado, con contrapendiente, que puede desarrollar un relieve colinado. Esta anomalía se relaciona con la ampliación del valle en este punto. El área urbana del municipio se localiza sobre una superficie plana, inclinada, ligeramente disectada, correspondiente con una geoforma de abanico.

Las unidades que conforman el marco geológico del municipio de La Estrella corresponden a Esquistos de Caldas (PZeC), Esquistos de Cajamarca (TReC), Peridotita de Romeral (JuR), Gabro de Romeral (JgR) y rocas volcanosedimentarias del Complejo Quebradagrande (KvQG – KvsQG), además de las coberturas de depósitos de vertiente y aluviales.

- **Esquistos de Caldas (PZeC).** Corresponden a esquistos moscovíticos, cuarzosericíticos, biotíticos y cloríticos intercalados a cuarcitas y gneises. Esta unidad aflora hacia los límites con el municipio de Caldas en cercanías de las quebradas Tablaza y Tablacita.
  - **Perfil de Meteorización.** El perfil típico que desarrolla esta unidad, corresponde a los horizontes I, II, IV y V. La roca dura presenta zonas de foliación claramente definidas en coloraciones grises y pardas.

**Tabla 4.12. Perfil de meteorización PZeC**

<b>Horizonte V</b>	Textura limosa en coloraciones de rojo a pardo, conserva la esquistosidad y se disgrega con facilidad. Alcanza espesores de hasta tres metros.
<b>Horizonte IV</b>	El color es rojo, conserva la textura foliada típica de los esquistos y las micas del tipo moscovita son abundantes. El espesor promedio es de dos metros.
<b>Horizontes I y II</b>	Consta de esquistos grafitosos y esquistos verdes cuyos planos de foliación y de diaclasamiento se encuentran levemente alterados. En el horizonte II la meteorización es mayor.

- **Contactos litológicos.** El contacto de los esquistos moscovíticos con los Esquistos de Cajamarca se presenta fallado, inferido por el lineamiento de la quebrada. En cercanías a la variante de Caldas, los cuerpos de esquistos comienzan a presentarse con mayor frecuencia, abarcando áreas cada vez mayores. A la altura de la vereda Tablacita, los esquistos son predominantes y localmente afloran pequeños remanentes de cuerpos de gneises, lo que constituye una evidencia de ser un cuerpo intrusivo en los esquistos.
- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Forman parte del Complejo Cajamarca, corresponden con una serie de paquetes composicionalmente diferenciales. En



términos mineralógicos y color de las muestras de mano se pueden clasificar como esquistos verdes, esquistos cuarzo-micáceos e intercalaciones de esquistos negros. La presencia de micas en los esquistos verdes es casi nula, siendo notable dentro de estos paquetes, una serie de intercalaciones de esquistos de color grisáceo, donde las micas ocurren con mayor frecuencia.

Los afloramientos de esquistos se encuentran en la vertiente oriental del río Aburrá. Dentro de las ocurrencias importantes se pueden mencionar en la vereda Tablacita, sector de la finca El Tierrero y en límites con el municipio de Sabaneta; vereda San Isidro, sector de las fincas Monte Arroyo, La Libra, Caprichito, Las Nubes y Alto Bonito; y en el Ancón Sur. Hacia la margen occidental del río Aburrá, se observa un cuerpo de esquistos verdes de menor envergadura en la parte alta de la vereda La Raya, sector El Cano, camino de herradura en dirección a la finca El Arca.

- **Perfil de Meteorización.** El perfil de meteorización desarrollado abarca todos los horizontes definidos por Dearman (1991); siendo predominantes los horizontes IV, V y VI. En ocasiones diferenciar el perfil de meteorización de un depósito se dificulta, debido a la meteorización diferencial de los esquistos, la cual deja núcleos frescos en una matriz limosa. En el perfil de meteorización para los horizontes IV, V o VI sólo se pueden describir diferencias en la concentración de micas. En los horizontes I a V son comunes las bandas de cuarzo, que pueden alcanzar espesores de cinco centímetros, predominando los tamaños milimétricos.

**Tabla 4.13. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual de carácter limoso, alcanza espesores de hasta dos metros, generalmente se presenta con un color rojo y pardo, además presenta un alto contenido de micas
<b>Horizonte V</b>	Conserva la textura esquistosa. En cuanto al color y abundancia de micas, sus características son bastante similares a las descritas en el horizonte VI. Los espesores van hasta los tres metros.
<b>Horizonte IV</b>	Textura esquistosa, abundancia de micas, color rojo por los óxidos de hierro. Alcanza unos tres metros
<b>Horizonte III</b>	Limo de color amarillo verdoso. Alcanza espesores de dos metros
<b>Horizontes II y I</b>	De estos horizontes ocasionalmente observados se han diferenciado esquistos verdes, esquistos cuarzo-sericíticos y esquistos negros

- **Contactos litológicos.** Aparece en contacto fallado inferido con los Esquistos de Caldas; adicionalmente, la roca presenta leves cambios composicionales, donde el contenido de cuarzo o de micas aumenta o disminuye de acuerdo con el grado de

esquistosidad o bandeamiento. Los contactos intercalados consisten de paquetes con espesores no mayores de dos metros, compuestos de esquistos y gneises, ambos meteorizados. Estos paquetes se intercalan conformando paquetes mayores que alcanzan los 30 m, condición observada desde el municipio de Caldas, cruzando el municipio de La Estrella, hasta el municipio de Sabaneta.

- **Estructuras.** A continuación se listan algunas de las localidades donde aflora esta unidad en estado fresco y su dirección de foliación. Es importante anotar que en el municipio de La Estrella, los esquistos se encuentran esencialmente en horizontes V y VI del perfil de meteorización, dificultando la toma de estructuras.

Localización	Esquistosidad
Vía finca El Arca, sector El Cano, (margen W del río Aburrá)	Intercalaciones de esquistos verdes y negros, altamente plegados
Finca Monte-Arroyo (margen este del río Aburrá)	Esquistos verdes con foliación E-W

- **Peridotita de Romeral (JuR).** Hace parte del Complejo Ofiolítico del Cauca; este cuerpo de peridotitas se encuentra continuo y elongado, con una orientación principalmente norte-sur en la vertiente occidental del río Aburrá. Es una roca masiva de color verde oscuro casi negro, compuesta esencialmente por olivino.

Los afloramientos de mayor importancia se localizan en el sector de La Cascajera, más al sur, en la vía que conduce de La Tablaza a la vereda San Miguel; en la vía paralela a la quebrada La Culebra, vía que conduce a la pinera y a un antiguo aserradero. Por último el control más norte de esta unidad se observó en las cercanías al casco urbano del corregimiento de Pueblo Viejo cerca de la entrada a la finca La Manuela; donde la roca se encuentra en un escarpe en proceso de serpentinización, dando colores verde claros.

- **Perfil de meteorización.** La Peridotita de Romeral meteoriza desarrollando horizontes III y V; en ocasiones se observa el horizonte VI. Como observación importante, se menciona, la meteorización diferencial en perfiles de suelo muy evolucionados. La presencia de núcleos frescos en una matriz saprolítica de granulometría arcillosa, dificulta la diferenciación entre el perfil de meteorización y los depósitos de flujo. Ejemplificando esta idea, se trae a colación los depósitos de flujo del pie de vertiente, sector La Culebra en el barrio La Tablaza, los cuales involucran bloques de peridotita en una matriz de igual composición. Lo anterior se debe a que, si bien la fuente del depósito de flujo es la misma roca, la geomorfología y la orientación de los clastos indican que se trata de un depósito.

- **Contactos litológicos.** Este cuerpo de roca ultrabásica, está en contacto fallado al occidente con los Gabros de Romeral. En los sectores de la vereda San Miguel y la vía paralela a la quebrada La Culebra la relación de campo entre la peridotita y el gabro se encuentra como un cambio litológico neto. En los afloramientos cercanos al corregimiento de Pueblo Viejo, se observaron múltiples evidencias de falla en el gabro que se encuentra en contacto con la peridotita. Dentro de las cuales cabe resaltar los espejos de falla, cizalla y movimiento de diques.

**Tabla 4.14. Perfil de meteorización JuR**

<b>Horizonte VI</b>	No es muy común; sin embargo, se encuentra suprayaciendo algunos horizontes V. Se caracteriza por desarrollar una granulometría limosa en colores rojo pardusco. Los espesores son menores a un metro
---------------------	---

**Tabla 4.14. Perfil de meteorización JuR (Cont)**

<b>Horizonte V</b>	Es de textura limosa, color verde muy claro, casi blanco. Son comunes pátinas de manganeso en forma de manchas negras. Alcanza hasta cuatro metros de espesor
<b>Horizonte III</b>	Es negro verdoso, de seis metros de espesor en promedio. El principal mineral de alteración observado es la serpentina. En las zonas de cizalla, el alto fracturamiento genera una laminación en la roca

- **Gabro de Romeral (JgR).** Hace parte del Complejo Ofiolítico del Cauca, se localiza en la vertiente occidental del río Aburrá. En muestra de mano, se observa una roca equigranular, con tamaño de grano medio, y cuyos minerales constituyentes son el feldespato (alterado), hornblenda y probablemente olivino. Comúnmente se observan diques de feldespato que generan un suelo limo arcilloso de color blanco. El gabro presenta venas de feldespato abundantes en todas las direcciones.

Es importante resaltar los cambios texturales del gabro, desde pegmatítica a fanerítica fina. Estas variaciones pueden observarse en la quebrada La Bermejala a la altura de los 1925 m, donde hay un cambio de textura fanerítica gruesa a fina con orientación de los cristales de hornblenda. En la cantera Maracaná, donde el cambio es de textura fanerítica fina a pegmatítica.

Los afloramientos más representativos se encuentran de sur a norte en la vía que de La Tablaza conduce a la vereda San Miguel, a la altura del sector La Cascajera (fincas La Chinca, La Carolina y La Culebra y en el sector de la Antena Radio Tiempo). En la ladera norte de la cuenca de la quebrada La Culebra, en las cercanías de las fincas Horizontes, San José y Palo Blanco. En la vereda La Bermejala; en la vía que conduce de la finca La Bermejala a la finca La Manuela, sobre la ladera oriental de la quebrada Bermejala y en la vertiente occidental en dirección a la finca

Praga. El control más norte de este cuerpo puede observarse en la cantera Maracaná.

- **Perfil de meteorización.** El gabro desarrolla todos los horizontes del perfil de meteorización, siendo los más comunes los horizontes: III, V y VI. Los horizontes V y VI, se desarrollan en geofomas estables de baja inclinación. Un ejemplo de esto, puede observarse en la parte alta de Pueblo Viejo, cerca al colegio Soleira y cerca a la cantera abandonada Maracaná.
- **Contactos litológicos.** Entre el gabro y el miembro volcánico del Complejo Quebradagrande puede observarse el contacto, en la vía que conduce a la pinera y al antiguo aserradero, paralela a la quebrada La Culebra como una interdigitación de ambas unidades, en horizonte IV y V del perfil de meteorización. Hacia las cabeceras de la quebrada La Bermejala el contacto con el miembro volcánico (basaltos) es neto y en roca fresca, donde las dos unidades se intercalan. En la cantera Maracaná hacia el oriente el contacto es intercalado con paquetes de basalto. La literatura reporta un contacto fallado, sin embargo no se observaron fallas en campo y se sugiere una intrusión de diques de basalto en el gabro.

**Tabla 4.15. Perfil de meteorización JgR**

<b>Horizonte VI</b>	Material de granulometría arcillosa, desarrolla un color rojo pálido en la parte inferior y amarillo pardusco en la parte superior. Es de un metro de espesor promedio
<b>Horizonte V</b>	Es moteado rojo, amarillo y blanco, de granulometría limosa a limo arenosa; con anfíboles y feldespatos sin meteorizar. Conserva textura granítica, sectorialmente forma niveles arenosos o de grus. El espesor puede alcanzar hasta seis metros.
<b>Horizonte III</b>	La textura es limosa a limo arenosa, de color rojo moteado con blanco por efecto de la alteración de la hornblenda y el feldespato. Dado el grado de fracturamiento, se observan franjas de meteorización diferencial, definidas por el color y grado de meteorización. El espesor es muy variable, alcanzando unos dos metros.
<b>Horizonte II</b>	Es una roca muy fracturada que genera bloques centimétricos

El contacto entre el gabro y miembro volcanosedimentario, el cual se define claramente en la quebrada La Bermejala y en La Culebra es con la toba, desarrollando la toba un horizonte IV del perfil de meteorización y el gabro un horizonte V. En la vía al antiguo aserradero, en cercanías de quebrada La Culebra, se observa un cambio litológico de rocas sedimentarias a basalto.

- **Estructuras.** En la zona de contacto entre las rocas basálticas se desarrolla un sistema de diaclasas, caracterizado por dos familias: la primera tiene dirección N20°E/54°E y la segunda N25°E/74°W.

En la vía que conduce a la finca La Manuela, contacto entre peridotita y gabro, 100 m al SW, se observaron espejos de falla en horizonte V del perfil de meteorización. La roca altamente cizallada se considera de una zona de falla secundaria, la cual presenta estrías inversas con componente sinistral. La dirección de la falla es N15°E/62°SE. El pitch de la estría tiene dirección 55°SSE. El perfil en esta zona presenta salvanda, brecha de peridotita y agrietamiento.

Un rasgo particular se observó en la vía a la cantera Maracaná, donde se encontraron depósitos rellenando fracturas del gabro. Las fracturas de aproximadamente un metro de espesor, pueden estar relacionadas a antiguos carcavamientos del gabro, rellenos por depósitos.

Zona de cizalla (falla secundaria)	N15°E/62°SE
Pitch de estría	55°SSE
Zona de contacto entre gabro y basaltos (dos familias de diaclasas)	N20°E/54°E - N25°E/74°W

- **Complejo Quebradagrande (KvQG, KvsQG).** El Complejo Quebradagrande se divide en dos miembros: el Volcánico y el Volcanosedimentario. El primero compuesto por diabasas y basaltos; mientras que el segundo incluye tobas, lutitas y chert. Es importante aclarar que el miembro volcanosedimentario se define de forma compuesta, dado que las rocas metasedimentarias están íntimamente mezcladas con algunas rocas volcánicas. Adicionalmente, estos miembros se encuentran mezclados, impidiendo una separación definida entre las dos unidades.

- **Miembro Volcánico.** Corresponde a una roca básica de textura afanítica, que en ocasiones puede presentarse con textura porfídica. Es una roca de color gris oscuro, densa y con patina de manganeso en su contorno, se define como basaltos grises y diabasas.

Esta unidad está aflorando en la vereda El Guayabo en la quebrada La Grande cerca a la finca La Meseta, en las fincas La Trinidad y La María, y en la quebrada Las Animas. En la vereda Tierra Amarilla, aflora en la quebrada La Chocha, La Ciénaga y La Canuela (en la parte alta del relieve montañoso). En la vereda San Miguel, en las vertientes norte y sur y parte alta de las quebradas La Culebra y La Bermejala. También se pudo observar en paquetes inclinados 75°, hacia el norte, dentro del gabro, sobre la cantera Maracaná, cuyas dimensiones son de unos 80 cm de ancho por una altura de un metro.

- **Perfil de meteorización.** Las diabasas desarrollan horizontes de meteorización espesos desde roca fresca (horizonte I) hasta suelos residuales (horizonte VI).
- **Contactos litológicos.** Entre el gabro y miembro volcánico del Complejo Quebradagrande se observa una interdigitación de ambas unidades.
- **Miembro Volcanosedimentario.** Este miembro corresponde a un cuerpo elongado en dirección N-S, donde se observan intercalaciones de lutitas, tobas y chert, intercaladas con diabasas y basaltos. Las tobas constituyen una roca masiva de grano muy fino, color verde pálido, en ocasiones laminada. El chert a nivel de muestra de mano, constituye una roca masiva, negra, con segregaciones de cuarzo; genera frecuentemente laminación, ya que se encuentra intercalada con tobas y finalmente las lutitas que son rocas foliadas de color gris oscuro a negro, de tamaño de grano muy fino.

**Tabla 4.16. Perfil de meteorización KvQG (Diabasas)**

<b>Horizonte VI</b>	Comúnmente genera suelos residuales con granulometría fina (limo y arcilla) y color rojo oscuro en la base y amarillo pardusco hacia el techo. Puede alcanzar espesores hasta de cuatro metros
<b>Horizonte V</b>	Presenta características similares al horizonte VI, en cuanto al color rojo y la granulometría. Se diferencian en que conserva algo de la textura original de la roca y es característica una patina de manganeso a lo largo de las estructuras o zonas de debilidad. Alcanza espesores de seis metros.
<b>Horizonte IV</b>	En este horizonte los bloques frescos predominan en un 30 %, cuyas superficies se encuentran usualmente cubiertas por una pátina de color negro. Se encuentra altamente fracturado, favoreciendo la meteorización por las zonas de debilidad
<b>Horizonte III, II y I</b>	Estos horizontes conservan la textura y color originales de la roca. La alteración en las zonas de debilidad genera colores negros de las pátinas de manganeso

Aflora en la vía abandonada al aserradero, que se intercepta con la quebrada La Culebra cerca a su nacimiento. En esta zona la roca presenta laminación muy

definida, la cual ha sufrido metamorfismo, ya que se observan algunas estructuras tipo augen. Cerca al nacimiento de la quebrada La Culebra, la roca del lecho es afanítica de color gris, muy masiva, obedeciendo a una roca volcánica de la secuencia volcano-sedimentaria. En el cruce de la vía a la pinera y la vía abandonada al aserradero, puede observarse el horizonte V y VI que se asume es de una toba por su granulometría limosa y baja densidad.

Este cuerpo se encuentra también en la vereda Tierra Amarilla, quebrada La Ciénaga, en la vía paralela a la quebrada La Chocha que conduce al casco urbano del municipio y en la vía que conduce a la quebrada Cauquita.

- **Perfil de meteorización.** Las tobas desarrollan horizontes I, V y VI principalmente. El chert presenta meteorización diferencial y desarrolla horizontes III, V y VI. Lutitas: en la zona de estudio sólo se observó en horizonte I.
- **Contactos litológicos.** Con el miembro volcánico, hacia la quebrada La Culebra hay un cambio litológico de toba a basalto. En la quebrada La Bermejala, se observa un contacto neto entre paquetes de gabro intercalados con tobas.

**Tabla 4.17. Perfil de meteorización KvsQG (Tobas)**

<b>Horizonte V y VI</b>	De granulometría limosa, con colores pálidos en tonalidades grisáceas; los horizontes superficiales incorporan materia orgánica, dando una tonalidad pardusca. Alcanza dos metros de espesor
<b>Horizonte I</b>	La roca es como se describió anteriormente

**Tabla 4.18. Perfil de meteorización KvsQG (Chert)**

<b>Horizonte VI</b>	Material limoso, color amarillo pardusco. Espesores no mayores a un metro
<b>Horizonte V</b>	Debido a la meteorización diferencial, se conservan remanentes frescos en una matriz limosa de color rojiza. Espesores aproximados de un metro
<b>Horizonte III</b>	La meteorización diferencial genera zonas de debilidad, debido al alto fracturamiento de la roca; allí el material es de granulometría limosa en medio de una roca masiva

- **Estructuras**

Laminación	N35°E/V (El buzamiento es vertical, ya que está afectada tectónicamente)
Zonas de cizalla	S25°E/73°SW
Respaldo	N-S/64°E

Diaclasas	N85°E/45°N; N-S/73°W; N43°E/76°SE; N20°E/43°NW; EW/V; N30°E/50°NE; N75°E/50°SE; N30°E/44°SE; N-S/29°W; N45°E/67°NW N10°E/50°SE; S56°W/53°NW; S55°W/58°NW
-----------	--

- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFIII, NQFIII, NFI, NFprel).** La morfología de la zona sur del valle de Aburrá, se caracteriza a nivel general, por el estrechamiento del valle, desde la quebrada La Miel en Caldas hasta el Ancón Sur. En este trayecto se puede notar en la vertiente oriental, predominancia de afloramientos rocosos cerca al cauce del río Aburrá, a excepción de la vereda Tablacita, donde se presenta una superficie amplia de acumulación de depósitos de flujo y depósitos aluviales del río Aburrá, interdigitados. En la vertiente occidental, el estrechamiento del valle está relacionado con una serie de depósitos de flujos espesos, distribuidos hacia la parte baja de la vertiente montañosa. Estos depósitos se encuentran desde la vereda La Raya hasta el Ancón Sur y generan un quiebre de pendiente marcado, como se observa en Pueblo Viejo.

Hay sectores donde se desarrollan líneas de piedra en la parte superior del depósito, compuestas principalmente de fragmentos de horizontes plásticos y basaltos tamaño grava, recubiertos de patinas de hierro.

- **Depósitos de deslizamiento:** Dentro de los procesos activos se destacan hacia la parte alta de la vereda Tierra Amarilla, donde se encontraron cicatrices de deslizamiento que involucran áreas de hasta 15 x 20 m y que generan coronas de unos dos metros. También cabe resaltar un deslizamiento que involucra un área de 30 x 25 m, ubicado en la parte posterior de la zona del cementerio y de la urbanización contigua a este.
- **Depósitos de flujo recientes.** Los depósitos de flujo más recientes, están localizados a media ladera de la vertiente y al norte del municipio, asociados estos últimos a un abanico de gran dimensión. Los depósitos, de menor envergadura, ubicados a media vertiente, se encuentran frecuentemente asociados a zonas de cizalla. En general, los depósitos de flujo recientes desarrollan geofomas de superficies planas de inclinación baja a moderada (6-15°), poco a medianamente disectados.

Los flujos asociados a los abanicos más recientes, cerca al área urbana de La Estrella, se superponen o circundan los depósitos de flujo más antiguos, dejando colinas pequeñas aisladas como se puede apreciar en el sector del cementerio. En general, se puede notar en este tramo del valle del río Aburrá una variada temporalidad de eventos de flujos de escombros y lodos, evidenciado por la



diversidad en la madurez de los clastos y la diversidad mórfica del relieve modelado en dichos depósitos. Acorde con la génesis, se pueden agrupar en:

**Depósitos asociados al abanico de La Estrella.** Son flujos de escombros y lodos, ubicados en la parte norte del municipio. Se caracterizan por presentar bloques frescos, en su mayoría, de forma subangulosa a subredondeada, embebidos en una matriz limo arcillosa. La selección es muy mala, variando el diámetro de los clastos de metros a centímetros, compuestos por diabasas y tobas.

**Otros depósitos de flujo recientes.** En la vereda La Raya, son comunes depósitos de flujo espesos, donde el material involucrado está constituido casi exclusivamente por esquistos. Estos bloques de esquistos se encuentran parcialmente meteorizados a meteorizados y ocupan cerca del 40 % del volumen total con tamaños de hasta 15 cm embebidos en una matriz limosa de color rojo.

**Depósitos de flujo recientes asociados a zonas de cizalla.** Estos depósitos corresponden a zonas de acumulación en pequeñas cuencas o depresiones, detectadas a media ladera. En cercanías a la parte alta de la vereda Tierra Amarilla, vertiente norte de la quebrada La Ciénaga, se observan quiebres en la vertiente y algunas depresiones producto de actividad tectónica. Sobre estas zonas se encuentran una serie de depósitos que involucran materiales arcillosos y bloques muy fracturados provenientes de las zonas de cizalla.

- **Depósitos de flujos más antiguos.** Ubicados en la parte sur occidental, sector La Tablaza, están asociados a lomos cortos de divisorias amplias, localizados al pie de la vertiente montañosa. Estos depósitos corresponden a flujos de escombros y lodos, espesos, altamente incisados, con inversión de relieve. Estas características dan lugar a geoformas de lomos altos (100-150 m), adheridos a la base de la vertiente montañosa, de cimas amplias de pendientes suaves y vertientes de inclinación moderada (20°), producto de la incisión y la disección. Se encuentran algunas veces estratificados, permitiendo diferenciar diversos eventos de depositación. En general, presentan mala selección, tienen clastos subangulosos hasta redondeados y matriz arcillosa. El perfil de meteorización de estos depósitos indica que se trata de regolitos muy evolucionados, ya que desarrollan comúnmente horizontes tipo VI y V, dificultando la diferenciación de estos con el perfil de meteorización de rocas de textura fina como basaltos.

En los sectores de Pueblo Viejo por la carrera 60, y la vereda Bermejala por el trayecto del oleoducto y en el sector de San Miguel, se observa un marcado quiebre de pendiente, el cual se asocia con estas superficies de acumulación antiguas, a la base de la vertiente montañosa. Los bloques de basalto están altamente meteorizados, con meteorización concéntrica, alterado en los bordes y fresco hacia el centro. En Pueblo Viejo, se presenta una secuencia de depósitos

de flujos de escombros a la base de la colina y de flujos de lodo en la parte superior de la misma. Los depósitos de flujo de escombros, se caracterizan por un porcentaje de bloques de roca superior al 60 %, subredondeados a redondeados, altamente meteorizados, compuestos de basaltos de textura porfídica y gabro en menor cantidad; en una matriz arcillo limosa, de colores moteados de rojo, amarillo y blanco; en sectores donde los bloques están altamente meteorizados desarrollan horizontes de suelo residual del depósito, conformando un horizonte homogéneo texturalmente (arcilloso), pero diverso en las tonalidades de color.

Los depósitos de flujos de lodos, son igualmente espesos, con un contenido de bloques de roca entre el 20 y el 30 %, redondeados a subredondeados, compuestos principalmente de basalto, moderadamente meteorizados con alteración esferoidal, embebidos en una matriz arcillosa a limosa. Cuando el depósito está en alto grado de meteorización se desarrolla un horizonte arcilloso de suelo residual, amarillo parte superior y rojizo parte inferior.

- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** En este segmento del valle, en la parte baja, hay depósitos aluviales, asociados al cauce del río Aburrá y sus afluentes principales (quebradas La Raya, La Culebra, La Chocha, La Tablacita y La Grande). Los más recientes están asociados a las llanuras del río Aburrá y sus afluentes mencionados, mientras que los depósitos aluviales antiguos y los depósitos aluviotorrenciales están asociados a geofomas de terrazas y abanicos.

- **Depósitos aluviales.** En el sector de La Tablacita se presenta una terraza aluvial amplia del río Aburrá, cuyo depósito se interdigita con depósitos de flujo cerca de la variante de Caldas. En la carrera 48D con calle 100 se diferencian dos niveles importantes de terrazas aluviales. El nivel inferior es de 1,5 m de espesor, con una relación de fragmentos matriz de 40:60, de bloques frescos, de 15-20 cm de diámetro, redondeados a subredondeados, en una matriz de arena fina de color rojizo, con alta presencia de micas y cuarzo. El nivel superior es de 50 cm de espesor, de arena muy fina, bien seleccionada de color gris; estos niveles de terrazas están relacionados al río Aburrá.

En los barrios Bellos Aires y El Hoyo, la terraza del río Aburrá se observa con cuatro metros de espesor. La parte superior presenta sedimentos tamaño arena, con esporádicos clastos de anfíbolita. La parte inferior consiste de una capa con 90% de clastos redondeados a subredondeados, de anfíbolita, gneis y cuarzo, y un 10% de matriz arenosa, color pardo, con alta presencia de micas. Estas terrazas también se encuentran en La Tablaza y los depósitos aluviales asociados, presentan estratificación clara de material clasto-soportado, imbricado hacia la base y matriz-soportado hacia el techo.

- **Depósitos aluviotorrenciales.** Las quebradas afluentes del río Aburrá se caracterizan por presentar, en su llanura aluvial, depósitos de tipo aluviotorrencial en forma de franjas en el fondo del valle, tal y como se aprecia hacia la parte baja de las cuencas de las quebradas La Raya, La Culebra, La Chocha, La Tablacita y La Grande. Estos depósitos son característicos por la morfología de las cuencas, ya que estas se enmarcan dentro de un relieve montañoso, de valles en “V” estrechos. Las vertientes de estos valles son de gradientes altos que disminuyen cerca a la confluencia con el río Aburrá, lugar donde se extienden los depósitos que provienen de la parte media alta de la vertiente montañoso. De esta manera se puede notar en las quebradas, franjas estrechas de depósitos torrenciales, que se abren en forma de abanico hacia la confluencia con el río Aburrá, interdigitándose con los depósitos aluviales.

Estos depósitos se caracterizan por ser clasto-soportados, con fragmentos frescos, subangulares hasta redondeados, mal seleccionados, en matriz arenosa. Las geoformas de terrazas y abanicos asociados a los depósitos aluviotorrenciales, alcanzan alturas hasta de ocho metros, distribuidos en ambos márgenes, producto de la incisión de las corrientes.

- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** En el municipio de La Estrella se presenta una serie de llenos antrópicos distribuidos principalmente cerca al cauce del río Aburrá, los cuales consisten de antiguos botaderos de escombros, con asentamientos urbanos densos. En centros poblados como La Tablaza, y parte del área urbana del municipio, se encontraron varios llenos de material proveniente del material de construcción.

En el sector de Bellos Aires entre la autopista a Caldas y el río Aburrá, parte baja de Vinacure, se acondiciona un lleno reciente, amplio, constituido de tierra y escombros, que se ubica cerca al cauce del río. En sectores aledaños a la autopista, son comunes los llenos antrópicos compuestos de tierra movida y escombros, en gran parte con asentamiento de viviendas.

En la margen derecha del río Aburrá, en los sectores del barrio Inmaculada, sectores Sierra, Pan de Azúcar por el aserrío y el parqueadero de tractomulas, son frecuentes algunas explanaciones. En los bordes de las explanaciones se observa material de lleno antrópico.

En el barrio Los Sauces al lado del río Aburrá, sobre la terraza de este, se encuentra un lleno antrópico cartografiado. Este lleno de unos cuatro metros de espesor, es un botadero de materiales de construcción, mezclado con bloques redondeados provenientes del río Aburrá.

- **Zona de Falla.** En el municipio de La Estrella, se han observado múltiples evidencias de estructuras tectónicas de tipo falla, entre las cuales se pueden mencionar:
  - En la vía que de La Tablaza conduce a la vereda San Miguel, se observa la roca altamente fracturada y algunos diques desplazados.
  - En la vereda Tierra Amarilla, en la margen derecha de la quebrada Ciénaga, se observa una zona milonítica de color negro y verde pálido donde es notable la abundancia de salvanda. En cercanías a esta zona, se encuentran diferentes afloramientos donde se observan zonas de cizalla acompañadas por la roca altamente fracturada.
  - En el corregimiento de Pueblo Viejo, en el camino que conduce a la finca La Manuela, pueden observarse en la peridotita: una zona de cizalla, espejos de falla y desplazamiento de diques.
  - Cerca al área urbana del municipio, el afloramiento de la cantera Maracaná se caracteriza por presentar: cizalla, augen y salvanda.

#### 4.2.3 Municipio de Sabaneta

El municipio de Sabaneta, está limitado en gran parte por la cuenca hidrográfica de la quebrada La Doctora. En esta cuenca se puede hacer una división geomorfológica en dos zonas: la norte y la sur. La zona sur, hacia la parte media-alta de la cuenca, límites con el municipio de Caldas, corresponde a un respaldo montañoso, de vertientes con quiebres marcados de pendiente; acompañado de una serie de lomos largos de cimas convexas amplias, ligeramente inclinadas y separadas entre sí por valles en “V” estrechos. Hacia la parte media y baja de la cuenca (norte del municipio), la pendiente se suaviza, respecto a la parte alta de la misma, alcanzando un promedio de 20 a 30°. La disminución de la pendiente continúa en dirección al río Aburrá, conformando hacia la parte baja de la cuenca, un paisaje de superficies planas con pendientes menores a 10°. Estas superficies corresponden a abanicos, modelados en depósitos aluviotorrenciales y flujos de escombros y lodos, que en la parte distal se interdigitan con las terrazas aluviales del río Aburrá; donde se localiza gran parte del área urbana del municipio de Sabaneta.

Teniendo presente el marco geológico regional, las unidades geológicas cartografiadas en el municipio corresponden a rocas del Complejo Cajamarca, dentro de las cuales afloran los Esquistos de Cajamarca (TReC) y las Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP) que hacen parte del Grupo El Retiro y finalmente diferentes tipos de depósitos de vertiente, aluviales y llenos antrópicos.

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Estas rocas pertenecientes al Complejo Cajamarca, en el municipio de Sabaneta, cubren un área mayor al 50 % del área total del municipio. Los esquistos varían entre: esquistos verdes, esquistos cuarzo-micáceos y esquistos grafitosos. La susceptibilidad de estas rocas a la meteorización sólo permite su clasificación en roca fresca.

Los afloramientos de mayor importancia se encuentran en la zona sur de las veredas: La Doctora, San José, Cañaveralejo y Pan de Azúcar. En la vereda La Doctora, se presentan esquistos verdes, cuarzo-sericíticos y negros; hacia la finca La Romera, parte alta de La Doctora, predominan esquistos negros y en la loma Los Henao hay un predominio de esquistos cuarzo-micáceos; los cuales se encuentran intruídos por unos cuerpos de composición cuarzo feldespática. En la vereda San José, afloramientos de importancia se encuentran en la vía que conduce a la finca Tejas Arriba, frente a las fincas Panorama y Loma del Carriqui. En la vereda Cañaveralejo un afloramiento de esquistos verdes se ubica en cercanías a la finca Montañita. En el sector Pan de Azúcar predominan esquistos cuarzo-micáceos y verdes. Por último, en el barrio Betania son característicos afloramientos de esquistos verdes.

Los esquistos presentan complejas variaciones entre esquistos verdes, cuarzo-micáceos y grafitosos. Son comunes las segregaciones de cuarzo y la textura esquistosa con láminas finas. En muestra de mano, los esquistos verdes se observan como una roca verde con foliación claramente definida. En los esquistos cuarzo-micáceos el tamaño de grano es variable en cada afloramiento. Los esquistos negros o grafitosos, son untuosos, con clara dirección de foliación, su color varía desde negro a diferentes tonalidades de gris.

Los esquistos varían composicionalmente de esquistos verdes y cuarzo-micáceos en el sector Pan de Azúcar, veredas Cañaveralejo, San José y Ancón Sur a esquistos grafitosos en la parte alta de la cuenca de la quebrada La Doctora. En la vereda San José, la ocurrencia de esquistos grafitosos es mínima, sólo en el área urbana de la vereda, se observaron algunos remanentes de esquistos negros muy plegados.

El esquisto verde en el casco urbano del municipio, se encuentra intruído por un cuerpo ígneo de textura porfídica con fenocristales de feldespato. Dado el estado de meteorización de este cuerpo, genera un saprolito de color blanco a amarillo pálido, con granulometría limosa.

- **Perfil de Meteorización.** Los esquistos han desarrollado predominantemente horizontes de meteorización desde VI hasta II de acuerdo con Dearman (1991). Comúnmente, presentan microplegamientos, asociados a zonas de la roca altamente fracturadas. El frente de meteorización avanza aprovechando las zonas de fractura y los planos de foliación, dando lugar a zonas muy meteorizadas en medio de roca fresca fracturada. Por lo anterior, en ocasiones es difícil diferenciar

el perfil de meteorización del esquisto, del perfil de meteorización de un depósito de igual composición.

- **Contactos litológicos.** El contacto entre Esquistos de Cajamarca y las migmatitas de Puente Peláez se encuentra en esta zona como paquetes intercalados de ambas unidades. Este contacto se puede observar en la vía La Romera, 200 m antes del cruce con la quebrada La Doctora y en la vereda San José. En la vereda San José se observan quiebres de pendiente que desarrollan características geomorfológicas particulares como una serie de lomos que se desprenden a media ladera de la vertiente montañosa. Estos lomos son de cimas convexas amplias, ligeramente inclinadas, separadas entre sí por valles en “V” estrechos. El quiebre de pendiente entre la vertiente montañosa y los lomos, está relacionado con el contacto entre ambas unidades, donde el respaldo montañoso corresponde a esquistos y los lomos a la unidad Migmatitas de Puente Peláez.
- **Estructuras.** Los esquistos se presentan comúnmente plegados y microplegados, lo cual dificulta diferenciar la dirección general de la foliación. Sin embargo, se manifiesta una tendencia general NW.

**Tabla 4.19. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte II y IV</b>	Se observan diferencias en la meteorización, conforme al tipo de esquisto (verde, cuarzo-micáceo y negro). En horizontes V y VI, no es posible diferenciar el tipo de esquisto
--------------------------	--

**Tabla 4.19. Perfil de meteorización TReC (Cont.)**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual de los esquistos cuarzo-micáceos y verdes la granulometría es limosa con micas de tamaño milimétrico, de color rojo pardusco. Los espesores alcanzan dos metros. En los esquistos negros, los espesores no superan los 50 cm
<b>Horizonte V</b>	Conserva la textura esquistosa. Los saprolitos en los esquistos cuarzo-micáceos y verdes son de color rojo pardo, granulometría limosa y alcanzan espesores de tres metros. Es notable la abundancia de micas. Bandas de segregación de cuarzo, pueden desarrollar al meteorizarse un aspecto de arenas sacaroidales. En los horizontes I a V, bandas de cuarzo son comunes y alcanzan espesores de cinco centímetros, predominando los tamaños milimétricos

<b>Horizonte IV</b>	<p><b>Esquisto verde.</b> Las superficies donde avanza el frente de meteorización son de color amarillo-pardo. Los bloques frescos son de color verde, foliación bien definida, con pátinas de color pardo oscuro. Ejemplo de este horizonte puede observarse en la parte alta de la vereda Cañaveralejo, en un talud de ocho metros de espesor. Las zonas que presentan un grado de meteorización más avanzado, desarrollan una granulometría limosa de color amarillo pardo a rojo.</p> <p><b>Esquisto cuarzo-sericítico.</b> Alcanzan espesores de hasta tres metros. La roca fresca presenta colores claros (blanco y amarillo) foliación bien definida, con abundancia de moscovita. Las segregaciones de cuarzo son muy comunes. Las zonas con mayor grado de meteorización, se observan de color rojo y granulometría limosa.</p> <p><b>Esquisto negro.</b> Se observan afloramientos que alcanzan hasta tres metros de espesor, con foliación muy definida y de color gris oscuro a negro. Generalmente, la roca se encuentra muy plegada y fracturada</p>
---------------------	--

La concordancia entre ambas estructuras indica que estas dos unidades han sufrido en conjunto al menos un evento metamórfico y que las diferencias litológicas son heredadas de las secuencias de un protolito sedimentario. A continuación se listan algunas de las localidades donde aflora esta unidad y su dirección de foliación y diaclasamiento:

Vereda San José	Esquistosidad, Intercalaciones con esquistos negros	S50°E/40-50°SW
Vereda San José parte alta	Esquistosidad, Esquisto alterado micáceo de color rojo	N20°E/80-90°SE
Variante a Caldas, estadero Mi Balconcito	Esquistosidad, Esquisto alterado	N45°W/70°SW
Vereda La Doctora, cerca de la quebrada La Doctora	Foliación	N5°W/20°NE - S54°E/10°NE
Cerca de la finca La Romera	Diaclasas	N75°W/45°SW - N85°W/75°NE
Vereda la Doctora, cerca a la finca La Romera	Foliación	S30°E/10°SW - N30°W/75°SW
Finca la Romera	Bandeamiento	N50°W/65°SW

Cercanías finca El Tierrero	Foliación	N60°E/15°SE
Vía a La Romera, 200 m de la quebrada la Doctora	Diaclasas Foliación	N20°W/70°NE, 2/m N60°E/65°NW, 4/m N30°W/75°SW
Sector El Roblal	Diaclasas	N15°E/60°NW - N30°E/70°SE - N15°W/15°NE
Sector San Antonio, cerca de la quebrada El Gusano	Diaclasas	N40°W/70°NE - N45°E/70°SE

- **Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP).** Hacen parte del denominado Grupo El Retiro dentro del Complejo Cajamarca. Corresponden a migmatitas caracterizadas por un bandeamiento composicional y por presentar esquistosidad, conformando un gneis esquistoso. Se compone principalmente de cuarzo, feldespato y micas. En general este cuerpo se encuentra altamente meteorizado. Tanto los esquistos como los gneises y migmatitas, presentan localmente intrusiones compuestas por cuarzo y feldespato. Este material félsico, al exponerse a los procesos de meteorización desarrolla, caolín en el caso de los feldespatos y material sacaroidal cuando la intrusión es más cuarzosa.

Afloramientos importantes se observan desde el sector El Roblal y en límites con el municipio de Envigado, hasta la vereda San José. En esta última la roca in situ, se encuentra en la quebrada paralela a la vía que conduce a la unidad básica, donde la roca fresca presenta textura gnéisica con bandas de cuarzo de unos cinco centímetros de espesor. Localmente, la roca tiene intrusiones de material feldespático muy meteorizado que desarrolla horizontes V y VI blancos que alcanzan tres metros de espesor.

En la vía que conduce a La Romera, el gneis se encuentra en bandas de material micáceo intercaladas con cuarzo. Como características importantes se pueden resaltar las estructuras tipo augen en los cuarzos y las bandas de tamaño milimétrico. En esta zona, también se observan los cuerpos félsicos intrusivos.

- **Perfil de Meteorización:** Desarrolla perfiles de meteorización con características diferentes dependiendo del grado de bandeamiento o esquistosidad. Los horizontes que predominan son IV, V y VI.
- **Contactos litológicos.** En la vereda San José, a una altura de unos 1920 m, cerca a la unidad básica de San José, se observa el cambio litológico entre los esquistos y las migmatitas. El contacto no es claro, ya que los gneises y migmatitas presentan esquistosidad, dificultando su diferenciación. Tanto los



esquistos como las migmatitas, presentan intrusiones ácidas que meteorizan formando horizontes blancos arenosos.

En la vía a la finca La Romera, 200 m de la quebrada La Doctora, el contacto se observa como intercalaciones de paquetes de esquistos y gneis milonítico. Entre los esquistos y el gneis, se presentan direcciones de foliación y bandeamiento entre 30° y 50°NW, lo que indica que, dada la similitud en la dirección de foliación, al menos un evento metamórfico afectó a ambas unidades.

**Tabla 4.20. Perfil de meteorización TRmPP**

<b>Horizonte VI</b>	Cuando la textura es gnéica desarrolla colores abigarrados rojo, amarillo pálido y blanco, de espesores de hasta dos metros y granulometría arcillo arenosa. Cuando la roca es esquistosa, los colores predominantes son rojo pardusco y grisáceo de granulometría más arcillosa
<b>Horizonte V</b>	Las características de la roca son similares a las descritas en el horizonte VI, pero conservando textura original de la roca. La textura, como se mencionó anteriormente, puede variar según el grado de esquistosidad
<b>Horizonte IV</b>	Está presente como núcleos de roca en material limo arenoso, con espesores de tres metros.

– **Estructuras**

Vereda San José	Diaclasamiento. Intercalaciones con esquistos negros	N40°W/70°NE, N45°E/70°SE, N20°E/35°SW, N15°W/15°NE, N75°E/40°SE
-----------------	--	---

Vía a la Romera, 200 m de la quebrada La Doctora		N50°W/65°SW.
–	Diaclasas	N40°W/70°NE, N45°E/70°SE, N20°E/35°SW, N15°W/15°NE, N75°E/40°SE
	Foliación de los esquistos negros	N30°W/75°SW
	Bandeamiento	N50°W/65°SW

• **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII)**

- **Depósitos de deslizamientos.** Los depósitos tipo deslizamiento están confinados a la parte alta y media alta de las vertientes montañosas, asociados a desgarres superficiales de pequeñas dimensiones, comúnmente asociados a cortes de

taludes de las vías. Se caracterizan por presentar bloques mal seleccionados en matriz arenosa color pardo amarillento y pardusco. Los colores pardos son comunes en este tipo de depósitos debido a que involucran horizontes pedogenéticos.

- **Depósitos de flujos de escombros y/o lodos.** Los depósitos tipo flujo, tienen espesores visibles hasta de dos metros y corresponden principalmente a flujos de lodos matriz-soportados con porcentajes de clastos que no superan el 20 %. En general los bloques son frescos, de selección moderada (20 – 1 cm) en matriz limo arcillosa de color amarillo. La composición de los bloques es de gneis, esquisto y cuarzo, con formas subangulosas a subredondeadas.

La transición del abanico, modelado en flujo de lodos a la terraza del río Aburrá, se caracteriza por un cambio marcado de pendiente, el cual puede constatarse a lo largo de la vía en el área urbana del municipio. En los límites con el municipio de Envigado, sobre la terraza aluvial del río Aburrá, se observa un flujo de escombros de unos cinco metros de espesor, suprayacido por el flujo de lodos descrito. Este flujo de escombros basal, se compone de clastos meteorizados, mal seleccionados, cuya composición consta de gneis, esquistos y cuarzo, embebidos en matriz limosa de color amarillo.

- **Depósitos Aluviales y Aluviotorrenciales (Qal, Qat).** Los depósitos aluviales están asociados a las llanuras de inundación y niveles de terraza del río Aburrá y de la quebrada La Doctora.

- **Depósitos aluviales.** El nivel de terraza del río tiene una altura de cinco metros por encima del cauce actual del río. En el recorrido que lleva el río Aburrá, en el municipio de Sabaneta, hay un nivel de terraza correlacionable con el observado en el municipio de La Estrella. Afloramientos representativos de este nivel se observan en la vía que comunica al municipio de La Estrella con Sabaneta, donde finaliza la avenida “Las Vegas”. Para este nivel de terraza, incisado actualmente por el cauce; se describió el depósito asociado; donde se reconocen cuatro capas principales así:

En la base, con un espesor de 0.70 m un nivel de material clasto-soportado, donde el 90 % corresponde a bloques frescos y el 10 % restante es una matriz de color rojo-pardo. Los bloques tienen formas subredondeadas y generalmente aplanadas con diámetros desde pocos centímetros hasta 80 cm.

Un segundo nivel que suprayace el nivel de la base, el espesor alcanza 1.20 m, predomina en un 90 % la matriz con un color amarillo claro, además en este nivel es posible subdividir una capa con aproximadamente 10 cm de espesor y bloques subredondeados que alcanzan 20 cm en diámetro.

El tercer nivel, cuya matriz es similar a la descrita en el segundo nivel, pero con una relación bloques/matriz 50:50. La matriz es de color amarillo claro y los bloques con formas redondeadas alcanzan diámetros de tres centímetros.

Por último el nivel más superficial, presenta un espesor de aproximadamente dos metros, el porcentaje de bloques llega al 10 % y están concentrados en la parte superior del nivel, sus diámetros llegan a 20 cm; la matriz tiene un color amarillo aún más claro que el descrito en los niveles inferiores.

- **Depósitos aluviotorrenciales.** Generados por la quebrada La Doctora, se caracterizan por presentar espesores visibles de hasta tres metros, material clasto soportado con 90 % de bloques frescos, redondeados a subredondeados, en una matriz de granulometría arenosa. Estos depósitos están asociados a terrazas aluviales.
- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** En el sector sur-oriental del municipio (intersección de la carrera 46B con la quebrada Sabaneta) se observa un lleno antrópico sobre el cual se ha construido una placa polideportiva. El material del lleno está compuesto por gravas aluviales y bloques de material de construcción, donde la matriz de éste es de granulometría areno limosa, homogénea de color amarillo pardusco.

Sobre la terraza del río Aburrá, a lo largo de la avenida Las Vegas, los depósitos aluviales se encuentran suprayacidos por un lleno antrópico que conforma una capa de 50 cm de espesor.

#### 4.2.4 Municipio de Envigado

El municipio de Envigado, se localiza al sureste del valle de Aburrá, limitado al este por un relieve de altiplano y hacia el oeste por un relieve de vertientes montañosas de filos largos y escarpes. El altiplano se ubica en el corregimiento Las Palmas y en las veredas Pantanillo y Pericos; en contraste, el relieve escarpado corresponde al respaldo montañoso del Valle de Aburrá, el cual se interdigita en la parte baja con depósitos de flujos de escombros y lodos. La zona del altiplano está conformada por un conjunto de colinas amplias y altas, modeladas en perfil de meteorización; colinas bajas, modeladas en roca (dunita) y cadenas de cerros hacia los bordes del altiplano, modelados en rocas metamórficas.

La zona oeste, que configura la vertiente oriental del valle de Aburrá, consiste de un relieve montañoso con tres rasgos morfológicos conspicuos. La parte alta corresponde a un segmento de vertiente escarpada, de la cual se desprende un segundo segmento conformado por un relieve montañoso de filos amplios, pendientes altas y valles en V

estrechos. El tercer segmento se define donde estos fillos se suavizan hacia la parte baja de la vertiente a causa del recubrimiento por depósitos de flujos de escombros y lodos, y depósitos aluviotorrenciales. Estos depósitos se amplían en forma de abanicos de ligera inclinación, que continúan hasta comunicarse con las terrazas aluviales del río Aburrá. La zona comprendida por superficies de abanicos de ligera inclinación y las superficies planas de acumulación de depósitos aluviales del río Aburrá, son las áreas de mayor asentamiento urbano.

Desde el punto de vista geológico, el municipio de Envigado está conformado por rocas metamórficas e ígneas en menor proporción; además de diversos tipos de depósitos tanto de vertiente como aluviales. Las rocas metamórficas están representadas por los Esquistos de Cajamarca (TReC), altamente grafitosos, los cuales hacen parte del Grupo Cajamarca, afloran además las rocas del Grupo El Retiro, incluidas dentro del Complejo Cajamarca, dentro de este se incluyen la Anfibolita de Medellín (TRaM), Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP) y finalmente, y fuera del Complejo Cajamarca el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS). Dentro de las rocas ígneas aflora la Dunita de Medellín (JKuM), la cual hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá. Los depósitos se clasifican como de tipo flujo, de deslizamiento y depósitos aluviales recientes.

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Corresponde al Complejo Cajamarca; consiste de esquistos grafitosos y esquistos micáceos. En el municipio de Envigado está confinada a la parte alta de la cuenca de la quebrada La Ayurá en la Reserva del Carriqui, Parcelación La Miel. En esta zona los esquistos son grafitosos y corresponden a los mismos esquistos del Alto de la Romera, Sabaneta.
  - **Perfil de Meteorización.** En esta unidad predominan los horizontes IV, V y VI del perfil de meteorización.
  - **Contactos litológicos.** Esta unidad se observó en contacto con las Migmatitas de Puente Peláez en la Reserva del Carriqui, parcelación La Miel, donde el contacto corresponde a intercalaciones de gneises y esquistos.

**Tabla 4.21. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte VI</b>	Desarrolla suelos residuales rojizos de textura limosa y alcanzan espesores de hasta 1.5 m. Si es esquisto micáceo, el suelo residual presenta micas abundantes
<b>Horizonte V</b>	Es de color principalmente rojizo, aunque puede presentar variación: gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo. Esta roca alcanza un espesor máximo de dos metros
<b>Horizonte IV</b>	Los esquistos grafitosos, son de color gris oscuro; en contraste, los esquistos micáceos son de tonalidades más claras

- **Estructuras.** En el afloramiento más representativo se localiza en el Alto Las Palmas, a pesar del alto grado de plegamiento, se tomó dirección de foliación:

Foliación	S40°W/50°E
-----------	------------

- **Anfibolita de Medellín (TRaM).** Hacen parte del Grupo El Retiro dentro del Complejo Cajamarca. Están compuestas mineralógicamente por cristales equigranulares de hornblenda y plagioclasa de tamaño medio (unos dos milímetros). En muestra de mano se aprecia una roca de color oscuro y la textura presenta variaciones, cerca al contacto con el las Migmatitas de Puente Peláez. Localmente, la anfibolita exhibe una foliación bien definida que le imprime a la roca la apariencia de gneis. Ocasionalmente se presentan intercalaciones de gneis de composición cuarzo-biotítica que tiene estructuras tipo augen.

En el municipio de Envigado afloran tres cuerpos principales de anfibolita; dos cuerpos se encuentran ubicados hacia el sector oriental y la tercera al occidente. Los dos cuerpos de anfibolita del sector oriental están separados por las unidades Dunita de Medellín y el Gneis Milonítico de Sajonia. El cuerpo más oriental se observa a lo largo de vías secundarias de la vereda Pantanillo (sectores de Los Ranchos y Altos del Tablazo) de la vereda Pericos (sector La Cruz del Porvenir) y de la vía Las Palmas-Aeropuerto hasta el límite con el municipio de Rionegro. El otro cuerpo ubicado en la zona centro-oriental del municipio aflora en la vía Las Palmas-El Retiro (glorieta Sancho Paisa), en la vía que conduce al Alto de Las Palmas.

El cuerpo de la zona occidental del municipio es un cuerpo elongado con dirección N-S, se ubica en cercanías a la confluencia de los cauces de las quebradas La Hondita, La Sebastiana y Las Brujas con la quebrada La Ayurá. Además aflora en la zona oriental, en la vía Las Palmas-Aeropuerto, rocas con espesores que superan 40 m; en la parcelación Torre Lunera y en cercanías al cultivo de flores El Capiro. En el sector occidental, en la margen derecha de la quebrada La Ayurá, sector Chingui se observan afloramientos de roca fresca con espesores de hasta seis metros.

En el cuerpo oriental, aparece intercalada con un gneis de composición anfibólica que presenta variaciones composicionales a gneis cuarzo-biotítico.

- **Perfil de Meteorización.** La unidad de anfibolita presenta perfiles de meteorización moderadamente espesos, los horizontes más comunes del perfil de meteorización de esta unidad corresponden a los horizontes VI, V, IV y II, no se observa variaciones continuas entre los diferentes horizontes de meteorización.
- **Contactos litológicos.** El límite occidental de la anfibolita centro-oriental se encuentra 500 m antes del peaje de la vía El Escobero; este contacto consta de

paquetes intercalados de anfibolita y gneis de la unidad Migmatitas de Puente Peláez. En la parte oriental este cuerpo se encuentra en contacto fallado con la Dunita de Medellín (N40°W/7°W).

**Tabla 4.22. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte VI</b>	Se caracteriza por una granulometría fina, arcillosa, arcillo limosa; que no supera los dos metros de espesor. El color de este suelo residual es amarillo
<b>Horizonte V</b>	Al igual que el horizonte VI, la granulometría es arcillosa, arcillo limosa de color amarillo con motas blancas. El espesor más significativo encontrado es de dos metros
<b>Horizonte II</b>	Rocas macizas, con fracturas y diaclasas a lo largo de las cuales se observan patinas. Se presenta variación en la granulometría, con granos de tamaño medio a fino

La segunda franja de anfibolitas (centro-oriental) está limitada al occidente por el gneis de la unidad del Gneis Milonítico de Sajonia. Este contacto no presenta una relación clara en campo, es decir, se observa un cambio litológico a lo largo del recorrido, sin encontrar el cuerpo en contacto fallado como se reporta en la literatura.

El cuerpo de Anfibolita de la zona occidental (paralelo a la quebrada La Ayurá) se observa en su gran mayoría rodeado por gneis. En la vía que conduce al parque El Salado, cerca al colegio El Salado, se observa un contacto donde el gneis reposa sobre la anfibolita. La estructura que limita estas dos litologías tiene una dirección N80°W/50°N. En la vía de la urbanización Camino de La Colina, barrio Uribe Ángel, se observa un contacto entre anfibolita y gneises, el cual presenta en el cuerpo de anfibolita microfalloamiento y brechas. Hacia la zona norte, a la altura de la quebrada La Hondita, el cuerpo de anfibolita está cubierto por depósitos y es seguido por las dunitas.

- **Estructuras.** Los afloramientos rocosos de la anfibolita se encuentran altamente fracturados, con sistemas de diaclasas bien definidos.

Diaclasas	S85°E/35°E - S60°E/42°E
Foliación	N25°E/80°W
Contacto fallado	N40°W/7°W

- **Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP).** Esta unidad hace parte del Grupo El Retiro, posee una litología predominante de gneises, compuestos por cuarzo, feldespato y biotita. La textura gnéisica revela un bandeo composicional de bandas claras y oscuras correspondientes, respectivamente, a cuarzo y/o feldespato y biotita. Lo

anterior es concordante con lo reportado por Ingeominas, 2005. Cabe resaltar la variación textural de este cuerpo a lo largo de toda la zona.

Aflora en la vía Las Palmas desde el colegio Columbus School, hasta el límite Envigado - Medellín; en la vía destapada a escuela de equitación Eqqus; hacia la truchera ubicada entre la quebrada La Miel y La Ayurá; en la vía a el Parque Ecológico El Salado; la parcelación La Miel; en la loma del Escobero, en la planta de potabilización La Ayurá y en la Loma del Chocho.

Es importante resaltar la presencia de cuerpos porfídicos, de grano fino, que intruyen esta unidad a lo largo de la vía Las Palmas. Estos diques de textura porfídica, presentan dimensiones considerables con una marcada meteorización esferoidal. Adicional a las intrusiones porfídicas, se encontraron zonas de brecha de falla.

- **Perfil de Meteorización.** Estas rocas, desarrollan todos los horizontes del perfil de meteorización.

**Tabla 4.23. Perfil de meteorización TRmPP**

<b>Horizonte VI</b>	Se desarrollan suelos residuales amarillos y rojizos, los cuales se diferencian de los suelos residuales de otras rocas por la presencia de cuarzo y micas. La granulometría va desde un grano fino de arcilla hasta arena. El espesor máximo observado para este suelo residual es de tres metros
<b>Horizonte V</b>	Se caracteriza por el bandeamiento heredado de la roca parental, cuyas bandas son de color blanco, gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo y rojo. Este suelo alcanza un espesor máximo de tres metros
<b>Horizontes IV, III, II y I</b>	La clasificación del gneis en cada uno de estos horizontes depende del grado de diaclasamiento y alteración en las zonas de fractura

- **Contactos litológicos.** El contacto de gneises con las anfibolitas se observó puntualmente en la loma El Escobero, sector La Esperanza en forma de paquetes intercalados. Hacia la vía del Parque Ecológico El Salado el gneis reposa sobre la anfibolita; la estructura de discontinuidad presenta una zona arcillosa de unos cinco centímetros de espesor y de dirección N80°W/50°NE. En el sector de La Colina, barrio Uribe Ángel se observa un cambio litológico entre gneis y anfibolita asociado a una zona de múltiples estructuras de falla tales como brecha (en la anfibolita) y pliegues y microdiscontinuidades en el gneis.

El contacto del gneis con los esquistos grafitosos en el sector de la Reserva del Carriqui, parcelación La Miel, se presenta como intercalaciones de ambas unidades, condición reportada también en el Alto de La Romera, en Sabaneta.

- **Estructuras.** El gneis en horizontes I, II y III del perfil de meteorización, se encuentra altamente diaclasado en tres direcciones, formando estructuras en forma de cubo.

Diaclasas	N85°W/75°N - N15°W/80°N - N55°E/60°N - N20°E/60°SE - N30°E/58°NW N35°W/50°NE
Bandeamiento	S80°W/55°E
Falla	N80°W/58°SW - NS/5°E

- **Gneis Milonítico de Sajonia (JKgms).** Presenta una textura gnéisica, caracterizada por un bandeamiento composicional de cuarzo, feldespato y biotita, los cuales al alterarse generan coloraciones rojizas, blancas y amarillas. Es común la presencia de estructuras tipo augen y la presencia de venas de cuarzo.

Esta unidad se encuentra en la vía que conduce a la escuela de la vereda Pericos, en un afloramiento de poca extensión. En la vía Las Palmas-Aeropuerto, los afloramientos están en horizontes IV y V del perfil de meteorización. Exposiciones de la roca fresca se encuentran en la vereda Pantanillo, sector Los Ranchos.

- **Perfil de Meteorización:** En el municipio de Envigado, el Gneis Milonítico de Sajonia se encontró en los horizontes III, IV, V y VI.
- **Contactos litológicos.** En la literatura se reporta un contacto fallado entre el Gneis Milonítico de Sajonia y la Dunita de Medellín, el cual se observó en el sector de Santa Elena y no en los afloramientos del municipio de Envigado. También se reporta el contacto con la Anfibolita de Medellín, como fallado; sin embargo, en la vereda Pericos se encontró el gneis aflorando como un cuerpo aislado, en estado fresco, rodeado por depósitos de flujo. Por lo anterior, no se pudo constatar en campo un contacto fallado entre ambas unidades.

**Tabla 4.24. Perfil de meteorización JKgms**

<b>Horizonte VI</b>	Con granulometría arenosa, de color pardo amarilloso. Puede alcanzar cuatro metros de espesor
---------------------	---



<b>Horizonte V</b>	Se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo; tiene una granulometría arenosa y presenta venas de cuarzo de aproximadamente 10 cm de diámetro. Las arenas de los augen sobresalen en la matriz más fina permitiendo diferenciar la textura. Puede alcanzar seis metros de espesor
<b>Horizonte IV</b>	Al igual que el horizonte V, este se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo, con mejor definición del bandeamiento. En este horizonte los minerales son más visibles. Puede alcanzar espesores hasta de 15 m
<b>Horizonte III</b>	Tiene las características texturales como estructuras tipo augen y un bandeamiento composicional muy definido. Comúnmente, se encuentra plegado.

- **Estructuras.** Debido a la poca representatividad de esta unidad en el área, se midieron sólo algunas direcciones de bandeamiento en la vía Las Palmas-Aeropuerto, las cuales pueden haber sido modificadas por efectos tectónicos.

Dirección de bandeamiento	E/13°S - N50°E/53°E
Diaclasas	N75°E/96°W

- **Dunita de Medellín (JKuM).** Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá; se caracteriza por ser una roca de textura afanítica, de color verde oliva a verde oscuro en estado fresco, que se aclara tomando tonalidades verdosas según su grado de meteorización. Está compuesta predominantemente por olivino, la cual muestra en algunas partes transformación variable a serpentina.

Las Dunitas de Medellín afloran en una franja de 35 km de extensión aproximadamente, en sentido NNW, que va desde el sector del Alto de las Palmas en el municipio de Envigado, sector donde presenta mayor amplitud con unos cuatro kilómetros aproximadamente, hasta el sur occidente del área urbana del municipio de San Pedro, sector donde se adelgaza a menos de un kilómetro de amplitud.

En el municipio de Envigado, el cuerpo de dunita, se observa en diferentes grados de serpentización, constituye una franja NS, separada del cuerpo de anfibolita por un contacto fallado. En la vía Palmas-Aeropuerto se observa el contacto fallado, donde la dunita se encuentra muy cizallada. En la vereda Pericos la dunita, además de presentar cizallamiento y diaclasamiento, se encuentra serpentizada.

En la vereda El Plan y La Raya, la dunita subyace los depósitos de flujo. En esta zona, la dunita está altamente meteorizada y desarrolla meteorización diferencial, permaneciendo bloques frescos en medio de suelo residual del mismo material.

- **Perfil de meteorización.** El perfil de meteorización desarrollado en la dunita en el sector del altiplano es de bajo espesor, con salientes rocosas frecuentes y alta presencia de geofomas de disolución que dan lugar a dolinas, macrodolinas, uvalas y valles kársticos.

El perfil característico en el altiplano se compone básicamente de los horizontes VI, V y el horizonte I. Perfiles representativos se encuentran en los sectores aledaños a la parte alta de la vereda Perico y hacia la parte alta de la cuenca de la quebrada Las Palmas.

**Tabla 4.25. Perfil de meteorización JKuM**

<b>Horizonte VI</b>	El suelo residual se caracteriza por una textura limosa, color pardo amarilloso. En la zona de estudio este horizonte no supera los 50 cm de espesor
<b>Horizonte V</b>	Corresponde al horizonte de alteración de la dunita de mayor predominio en el área del altiplano, con un espesor delgado (1-1,5 m), discontinuo, incrementado un poco en zonas de alto fracturamiento de la roca. La textura es limo arcillosa, con presencia de minerales laminados de serpentina de color verde sin alteración. Por lo regular suprayace directamente el horizonte I (roca fresca), lo cual se caracteriza por el contacto tajante con este horizonte, o presenta un ligero cambio de horizonte V a roca parcialmente descompuesta II y luego roca fresca
<b>Horizonte IV</b>	Es roca muy cizallada y completamente serpentizada de color verde. Este horizonte tiene espesores máximos de dos metros
<b>Horizontes III, II y I</b>	Estos horizontes se diferencian entre si por el grado de serpentización y fracturamiento que presenten. El color de la roca es negro con alteraciones verdosas, dependiendo del grado de serpentización que presenten

En los sitios de mayor espesor del manto de alteración, éste se desarrolla hacia la parte alta del perfil como un horizonte delgado de color amarillo, que conserva estructuras de la roca y minerales de alteración de la dunita sin meteorizar, lo cual hace parte del horizonte V.

En la zona de altiplano, el horizonte I (roca fresca) se localiza aflorando desde la superficie hasta menos de un metro de dicha superficie. Esta roca se encuentra

asociada a geformas de cerros o bordes del altiplano altamente afectados por la erosión. En algunos sectores, donde la roca está cerca de la superficie, puede encontrarse un horizonte de transición, sin desarrollo de horizontes saprolito o suelo residual.

- **Contactos litológicos.** Esta unidad se encuentra en contacto fallado con la Anfibolita de Medellín. El contacto con el Gneis Milonítico de Sajonia se encuentra como un cambio litológico en la vía destapada que desde Las Palmas conduce a la vereda Pericos.
- **Estructuras.** Las estructuras importantes en el cuerpo de dunita corresponden a familias de diaclasas y zonas de cizalla.

Vía al Plan	Cizalla	S35°W/55°W - S65°E/66°W
	Diaclasas	S20°W/V - N5°W/65°NE N5°W/17°SW
Vereda Pericos	Cizalla	N10°E/65°W
	Diaclasas	N50°W/45°E

- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII, NFI, NFprel).** Corresponden a depósitos de deslizamientos y flujos de escombros y lodos, los cuales se presentan en medio de la vertiente montañosa, localizados como peldaños de acumulación que suavizan la pendiente. Generalmente estos peldaños corresponden a depósitos de flujos de escombros.
  - **Depósito de deslizamiento.** Este tipo de depósitos se encuentran confinados principalmente a la zona escarpada que limita con el valle de Aburrá. Se caracterizan por bloques de roca en matriz limo arcillosa. Dado que el escarpe en esta zona está modelado en gneis, la composición de los clastos de los depósitos es también de gneis. Los bloques pueden alcanzar unos tres metros de diámetro y varían desde angulosos a subredondeados.
  - **Depósitos de flujos.** La mayor distribución de flujos se despliega hacia la parte baja de la cuenca de la quebrada La Ayurá, donde la geofoma asociada corresponde a abanicos, ligeramente inclinados (entre 3 y 6°). Estos abanicos son una superposición de flujos de escombros y lodos, con un predominio de flujos de lodos, los cuales se caracterizan por tener espesores visibles máximos de tres metros, porcentaje de bloques hasta de un 30 %, subredondeados, de composición principalmente gnéisica, en matriz de tamaño limo a arena fina color amarillo pálido a rojo pardusco. Los depósitos de flujo de escombros son característicos cerca de la base de la vertiente montañosa, de mayor espesor, y desarrollan, en la parte frontal del depósito, geformas escarpadas de hasta de 10 m. Ejemplo de lo anterior se observa hacia la parte alta del barrio Trianón; donde los depósitos

contienen entre un 60 y 70 % de bloques subangulares a subredondeados, de composición gnéisica principalmente, en matriz limo arenosa de color amarillo a rojo pardo.

- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** La potencia y extensión de estos depósitos define la mayor parte del área urbana del municipio, enmarcado por los depósitos del río Aburra y la quebrada La Ayurá.
  - **Depósitos aluviales.** Restringidos a los drenajes y quebradas del municipio. Se caracterizan por presentar clastos desde subangulosos a subredondeados, mal seleccionados, clasto-soportados en matriz arcillo arenosa de color amarillo pardusco. En algunas zonas los clastos presentan una leve imbricación. Cabe destacar los depósitos de las quebradas La Morgan, Chorrofrío, Liscarotes, Ayurá, El Atravesado, La Sebastiana, Zúñiga, Las Palmas y el río Aburrá propiamente dicho.
  - **Depósitos aluviotorrenciales.** Estos depósitos están confinados a algunas quebradas como Aguas Claras. Las características importantes de estos depósitos son bloques frescos, principalmente subangulosos, mal seleccionados en una matriz arenosa, color pardo. Las geoformas asociadas a estos depósitos están conformadas por terrazas y abanicos.
- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** Uno de los llenos más significativos es el realizado en la vía Las Palmas para la escuela de Ingeniería. En general, la obra está acompañada de tanto de llenos como de explanaciones. En la vía que conduce al colegio Euskadi, se encuentra un lleno de unos dos metros de espesor. Otros llenos se localizan al frente a la unidad residencial Claraval, vía a parroquia Purísima Concepción; cerca a finca el Llanito en la Loma del Esmeraldal.

#### 4.2.5 Municipio de Itagüí

El municipio de Itagüí, se encuentra ubicado hacia la margen izquierda del río Aburrá, teniendo como corriente principal la cuenca de la quebrada Doña María. Geológicamente, este municipio corresponde a una secuencia de depósitos de vertiente y depósitos aluviales y aluviotorrenciales que reposan sobre rocas graníticas del Stock de Altavista principalmente. Estos terrenos presentan geoformas de colinas de topos redondeados y un valle amplio de baja pendiente donde se desarrolla la mayor parte de la actividad industrial del municipio.

- **Stock de Altavista (KdA).** Aflora al sur y occidente del municipio de Itagüí. Su composición es variable, desde andesítica hasta granodiorítica. Estas rocas presentan un alto grado de meteorización, alcanzando espesores de suelo de hasta

de 45 m. Se encuentra aflorando sobre la margen izquierda de la quebrada Doña María.

- **Perfil de Meteorización.** Los sitios donde se describe el perfil de meteorización corresponden a algunas canteras de las ladrilleras; en general son suelos de carácter limo arcilloso, de colores rojizos y amarillentos, que incluyen bloques de roca parcialmente meteorizados, no son homogéneos por las variaciones composicionales del material parental, que va desde diorítico hasta granítico.
- **Contactos litológicos.** El Stock de Altavista en el municipio de Itagüí se encuentra cubierto por depósitos de vertiente y no presenta relación con otras unidades litológicas.

**Tabla 4.26. Perfil de meteorización KdA**

<b>Horizonte VI</b>	La textura está ausente, se presenta un suelo limoso de color pardo claro no plástico. El espesor es de unos dos metros
<b>Horizonte V</b>	Textura original de la roca presente. Suelo arcilloso de color pardo claro a pardo rojizo con motas negras, plástico con textura granítica, se conservan bien definidas las discontinuidades. Espesor cercano a los ocho metros
<b>Horizonte IV</b>	Suelo y núcleos de roca presentes, que definen un material limo arenoso de color blanco amarillento a rojizo, con motas oscuras, con fragmentos de roca muy meteorizada. Espesor promedio de unos diez metros

- **Depósitos de vertiente (Qd, QFa, QFIII, NQFII).** Se incluyen depósitos de deslizamientos y los flujos de escombros y lodos. Afloran en la parte alta del municipio reposando sobre el basamento del Stock de Altavista. Están constituidos por bloques heterométricos, con un grado de meteorización de moderado a alto, la matriz es arcillo limosa en coloraciones claras como pardo, gris y amarillo.
- **Depósitos aluviales (Qal, Qat).** Corresponden a los depósitos del fondo del valle generados por el río Aburrá y sus afluentes. Estos depósitos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas, gravas gruesas y fragmentos rocosos heterogéneos composicionalmente estratificados con continuidad horizontal variable, formando abanicos, terrazas y llanuras aluviales.
- **Depósitos aluviales.** Estos depósitos aluviales no alcanzan mucha amplitud. Están conformados por gravas sueltas redondeadas y bien seleccionadas de cuarzo, diorita, gneis, anfíbolita, esquisto, basaltos, dunitas, pórfidos andesíticos y cuarzodioritas, entre otros.

- **Depósitos aluviotorrenciales.** Corresponde al depósito formados por la quebrada Doña María, tiene forma alargada y de abanicos, ocupando la parte media de la vertiente (los cauces encañonados de las cuencas) y en las partes bajas las zonas de baja pendiente. Se caracterizan por una depositación sin estratificación o selección en los materiales transportados con formas desde subredondeadas a redondeadas, tamaños desde métricos, contenidos en una matriz areno gravosa, de color gris, consistencia dura, no plástica, cementación débil a moderada y por lo general húmeda en las partes bajas y seca en las partes altas.
- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** Corresponden a acumulaciones generadas por el hombre dentro de su proceso urbanístico y constructivo. Están constituidos por escombros y materiales de rezaga de las ladrilleras; los cuales deben ser dispuestos en otros lugares, desarrollándose acumulaciones artificiales que pueden llegar a tener una extensión y espesor tan importante que permite su cartografía a la escala del presente estudio.

#### 4.2.6 Municipio de Medellín

El municipio de Medellín se localiza en la parte más amplia del valle de Aburrá, el cual constituye un valle con avanzado grado de encajamiento, dentro del macizo levantado de la cordillera Central. Este valle es producto de la actividad combinada entre la tectónica y los procesos de erosión, asociados al valle aluvial del río Aburrá.

Geomorfológicamente, y acorde con lo propuesto por Rendón (1999), el valle puede dividirse en dos sectores; el sector inferior corresponde a un cañón en forma de "V" de dirección N50°W, El sector superior, corresponde a una depresión rómbica de unos 45 km de largo en sentido N-S, 22 km de ancho y 1.2 a 1.5 km de profundidad, respecto a los remanentes de las superficies de erosión adyacentes (Rendón *et al.*, 2006).

En este contexto geomorfológico, en los respaldos del valle, se localiza una secuencia de depósitos de vertiente, caracterizada por una serie de eventos depositacionales. Específicamente, se trata de depósitos de flujos de escombros y lodos de los cuales se identificaron al menos cinco series de eventos de depositación, y corresponden, desde el más antiguo al más reciente desde NFpre-I, NFI, NQFII, QFIII y QFIV.

Por otro lado, las unidades geológicas que conforman el respaldo y el basamento del valle están constituidas por rocas metamórficas representadas por el Complejo Cajamarca con los Esquistos de Cajamarca (TReC) y el Grupo El Retiro, con las Anfibolitas de Medellín (TRaM), los Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReAB), el Gneis de La Ceja (TRgLC) y las Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP). Además, aflora el Gneis de Palmitas (TRgP), la Milonita de La Iguaná (JmI) y el Gneis Milonítico de Sajonia (JKmgS). Dentro de las rocas ígneas, aflora la Peridotita de Romeral (KuR) y el Gabro

de Romeral (KgR) y las rocas del Complejo Ofiolítico de Aburra con las Dunitas de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKmbP). Dentro de las rocas volcanosedimentarias está el Complejo Quebradagrande con su miembro volcánico y volcanosedimentario (KvQG, KvsQG). Y finalmente, dentro del basamento rocoso del municipio de Medellín aparecen intrusivos cretáceos como el Batolito Antioqueño (KcdA), el Stock de Las Estancias (KcdE), el Stock de Medialuna (KcdML), el Stock de Altavista (KdA), el Batolito de Ovejas (KtO) y el Gabro de San Diego (KgSD).

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Bajo este nombre se agrupan esquistos cuarzo-sericíticos, cloríticos y grafitosos o negros del Complejo Cajamarca. La roca más abundante corresponde a esquistos cuarzo-sericíticos, con textura foliada, orientación paralela en láminas micáceas, brillo sedoso sobre superficies de foliación y bandeo composicional de sericita y cuarzo. Los esquistos cuarzo-sericíticos muestran un desarrollo irregular de suelo de grano fino en ocasiones arenoso, dependiendo de la cantidad de cuarzo, denotándose un color verde azulado con bandas blancas y negras. Los esquistos son competentes, algunas veces untuosos, presentan una esquistosidad muy fina dando apariencia de filita. En la proximidad con los contactos intrusivos, los esquistos presentan una textura masiva. Son comunes los lentes de cuarzo por segregación y son notables múltiples efectos metamórficos sobreimpuestos.

Esta unidad aflora en el corregimiento de Santa Elena, en el sector de la torre de incendios de las EEPP de Medellín, Parque Ecológico Piedras Blancas. En esta zona los esquistos son micáceos y se presentan intercalados con la anfibolita, además de presentar plegamiento y diaclasas.

En el sector occidental, corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los esquistos se encuentran intercalados con paquetes de otras unidades. El cuerpo de mayor dimensión cubre un área desde la zona del Cerro del Padre Amaya – Boquerón hasta el corregimiento de Palmitas. Este cuerpo se dispone en dirección N-NW y cruza parte de las veredas La Frisola, Las Playas, La Volcana – Guayabal y el casco urbano del corregimiento de Palmitas. Otros cuerpos de menor extensión se localizan en las veredas La Aldea y Potrera – Miserenga, entre las quebradas La Volcana y La Miserenga, y en la vereda Urquítá cerca al estadero Aguacatillo. Esta unidad litológica también presenta fuertes efectos tectónicos, de hecho las zonas de cizalla asociadas a las fallas de Romeral, San Jerónimo, muestran esquistos negros fuertemente plegados.

- **Perfil de Meteorización.** En la zona de estudio, en forma general se observó esta unidad principalmente en horizonte V del perfil de meteorización.

**Tabla 4.27. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte V</b>	Es de color rojizo, aunque puede presentar variaciones a gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo. Este horizonte alcanza un espesor máximo de tres metros
--------------------	--

Para el corregimiento de Palmitas, los horizontes que presentan mayor espesor, corresponden a los horizontes I y II. Los horizontes III, IV, V y VI tienen espesores menores que no superan los dos metros. A continuación se listan las principales características del perfil de meteorización observado en esquistos negros.

**Tabla 4.28. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte VI</b>	Material de textura limosa, en tonalidades rojizas, con espesores menores a un metro
<b>Horizonte V</b>	Se observa en zonas de quiebres de pendiente, presentan textura limosa y color pardo rojizo. Los espesores son menores a un metro
<b>Horizonte IV</b>	Alcanzan espesores de hasta tres metros y es frecuente encontrar los esquistos de color gris verdoso, altamente fracturados y ligeramente plegados.
<b>Horizonte III</b>	La textura es limosa con algunos bloques más competentes, generalmente presentan color pardo amarilloso; este horizonte no supera los dos metros de espesor
<b>Horizonte II y I</b>	Se trata de una roca muy competente de color gris oscuro, ocasionalmente muy fracturada, con presencia de patinas a lo largo de los planos de foliación. Espesores muy variables, desde uno a diez metros, asociados a pendientes muy fuertes (45°)

- **Contactos litológicos.** En términos generales, se observa el contacto con las Anfibolitas de Medellín, en forma de intercalaciones de anfibolita y esquistos.

El cuerpo principal en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, se presenta en contacto intrusivo con la diorita del Stock de Altavista. El contacto se observa en varios puntos, entre los cuales se destaca la vía antigua a Santa Fe de Antioquia, desde el Cerro Padre Amaya hasta el corregimiento de Palmitas, y se caracteriza por presentar una aureola de contacto donde los esquistos exhiben un aspecto masivo, debido a efectos de recristalización.

En la vereda Potrera - Miserenga, cercanías a la finca Rancho La María, sobre la vía a Ebéjico, el cuerpo de esquistos negros y verdes se encuentra en contacto fallado con el Gabro de Romeral, ambos dispuestos en paquetes intercalados y altamente fracturados.



El contacto entre los esquistos y el Gneis de Palmitas es de carácter intrusivo. En la vía antigua Medellín – Santa Fe de Antioquia cerca a la intersección con la vía que conduce al municipio de Ebejico (sector el Golfo) se observa la transición entre rocas con texturas predominantemente esquistosas – cornubianas y gneis. Los esquistos presentan efectos térmicos y diferentes eventos metamórficos sobrepuestos. Otros afloramientos de importancia donde se puede observar el contacto entre esquistos y gneises están ubicados en la vereda La Aldea, en la margen derecha de la quebrada La Causala y en la vereda Potrera – Miserenga donde se observan intercalaciones de estas dos litologías.

#### – Estructuras

Esquistosidad	N30°-55 °W/50°-70°SW y N45°-60°E/60°-80°SE
Foliación	N42°E/V - S78°E/45°SW - S75°W/35°SW N30°E/68°NW - N30°E/60°SE - NS/50°W - N10°W/V - S40°E/50°E - N10°E/45°W - N70°E/45°SE - N55°E/50°SE
Diaclasa	EW/V - N5°W/35°EN - N30°E/50°NW - S35°E/40°SW - EW/35°S

- **Anfibolitas de Medellín (TRaM).** Definidas por Jaramillo (1971), como Anfibolitas de Medellín, están incluidas dentro del Grupo El Retiro y hacen parte del Complejo Cajamarca. Mineralógicamente están compuestas de cristales equigranulares de hornblenda y plagioclasa de tamaño medio (dos milímetros). En muestra de mano, se aprecia una roca de color oscuro que presenta variaciones texturales cerca al contacto con los Esquistos de Cajamarca y el Gneis Milonítico de Sajonia. Debido a las variaciones texturales, la anfibolita puede confundirse con el gneis anteriormente mencionado, excepto en las zonas donde el gneis tiene una composición cuarzo-biotítica muy clara y estructuras tipo augen. El cuerpo de esta unidad aparece intercalada con el Gneis Milonítico de Sajonia, que en ocasiones presenta una composición anfibólica, predominando las variaciones composicionales a gneis cuarzo-micáceo.

En el sector occidental del valle de Aburrá, las anfibolitas corresponde a una roca de grano medio, cuyos cristales son equigranulares y de formas euédrales a subédrales. Está compuesta esencialmente por hornblenda y feldespato. El color de la roca es negro y blanco. Son comunes las venas de cuarzo que alcanzan hasta cinco centímetros de espesor.

En el corregimiento de Santa Elena y conforma un cuerpo alargado en dirección norte-sur. Los afloramientos de mayor importancia pueden observarse en la veredas Pericos, límite con el municipio de Envigado; El Placer, vía principal, cerca la unidad

básica; Barro Blanco, cerca a la unidad básica; en la entrada a la finca Paysandú, vereda el Llano; sector El Tambo, camino del Zango y vía a La Ojona; parque ecológico Piedras Blancas; vereda Media Luna, cerca al hotel La Montaña Mágica, finca Los Cerezos; vereda El Rosario, en los sectores del Instituto Parra París y en la vereda Las Palmas, sector de La Campanita, hacia la margen izquierda de la quebrada La Meseta en inmediaciones de las urbanizaciones Chacaltaya y Santa Catalina. También se encuentran afloramientos de Anfibolita en la vía San Cristóbal – Boquerón a la altura de la vereda Yolombo.

Estas rocas también corresponden a secuencias de rocas cristalinas constituidas, hacia la parte del barrio El Poblado, por gneis micáceo (en inmediaciones de la Avenida Las Palmas con las Transversales Inferior y Superior) y como anfibolitas-metagabros hacia el sector sur oriental de la vertiente. El gneis micáceo aflora en general como techos colgados sobre el Stock de San Diego. Compuestos principalmente por plagioclasa, cuarzo y moscovita, presentan una coloración clara y una textura claramente bandeada. La característica fundamental de esta unidad es el alto grado de meteorización que exhibe, desarrollando suelos arenosos heterogéneos, con bolas de rocas residuales distribuidas erráticamente y con una alta susceptibilidad a los procesos erosivos. Buenos afloramientos de estos materiales se encuentran sobre la Avenida Las Palmas al frente del restaurante Asia, en inmediaciones de la discoteca La Isla y en el cruce de esta vía con la quebrada Yerbabuena, cerca de la parcelación Mirador del Poblado. Las anfibolitas están compuestas casi en su totalidad por hornblenda y plagioclasa con un poco de cuarzo y esfena, de coloración verde oscura a negra con bandas blancas. Estas rocas pueden variar texturalmente entre isotrópicas con apariencia gabrónica hasta muy bandeadas, clasificables como gneis anfibólico. Estas rocas presentan un patrón de afloramiento irregular, constituyendo los lomos localizados en la parte media de la vertiente, en inmediaciones del seminario Monticello, Quintas de San Luis, urbanización La Palmera, Santa Catalina del Tesoro, y El Cortijo; más al sur en inmediaciones del colegio Parra París y Altos de San Lucas. Algunos afloramientos más continuos de estas rocas aparecen hacia las cabeceras de las quebradas Chacaltaya y La Meseta, por encima de la Avenida Las Palmas cerca de la parcelación Cedro Verde. Hacia la parte alta de la vertiente (parcelación Cedro Verde), los suelos residuales son mucho menos espesos y corresponden desde superficie a saprolitos limo arenosos de color gris verdosos que transicionalmente se tornan en roca parcialmente meteorizada. Esta superficie rocosa constituye un rasgo desfavorable para la estabilidad en cortes de gran altura.

- **Perfil de meteorización.** Estas rocas se observan en estado fresco, desarrollando perfiles de meteorización de variada profundidad, en los cuales prevalecen arcillas caolínicas y arenas ferromagnesianas concentradas en los niveles superiores, y como cantos y bloques de roca en diferentes tipos de depósitos a lo largo del área de estudio. Se compone de un nivel de suelo (VI) de color crema a gris claro, un

nivel saprolítico de color gris verdoso a pardo amarillento o pardo rojizo debido a la alteración del anfíbol y algunas bandas de color blanco debido a la alteración de la plagioclasa. El perfil típico de las anfíbolitas, según las observaciones de campo se presenta a seguir:

Otro perfil de meteorización en el corregimiento de Santa Elena, corresponde a un desarrollo de los horizontes V y VI del perfil de meteorización. Los horizontes I, II, III y IV, aunque escasos, también están presentes.

En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, las anfíbolitas se observaron en dos afloramientos, en uno de ellos como suelo residual y en el otro como roca fresca.

**Tabla 4.29. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual de 40 cm de espesor, color gris claro a blanco, consistencia baja, no plástico, débilmente cementado
<b>Horizonte V</b>	Roca extremadamente meteorizada con un espesor promedio de 1.50 m, color blanco moteado de negro, deleznable, consistencia firme, no plástico, débilmente cementado
<b>Horizonte IV</b>	Roca altamente meteorizada, color gris moteada de blanco, deleznable, consistencia firme, no plástico, débilmente cementado, al que no se le pudo determinar el espesor

**Tabla 4.30. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte VI</b>	Se caracteriza por una granulometría fina de arcilla limosa; que no supera los dos metros de espesor. El color de este suelo residual es amarillo que, en ocasiones presenta un leve moteo blanco
<b>Horizonte V</b>	Al igual que el horizonte VI, la granulometría es, arcillo limosa y el espesor más significativo encontrado en la zona es de 3.5 m. El color consiste de motas blancas en fondo amarillo
<b>Horizonte IV</b>	Se observó con el gneis, en paquetes intercalados; por lo que el perfil de meteorización presenta características similares en ambas rocas como bandas de colores rojizos, amarillos y blancos. En este horizonte es muy común encontrar segregaciones de cuarzo lechoso
<b>Horizontes I, II y III</b>	La roca se caracteriza por el color gris oscuro, debido a la alta cantidad de hornblendas presentes. El tamaño promedio de las hornblendas es grano medio

**Tabla 4.31. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte VI</b>	Presenta granulometría arcillosa y el color es variable entre pardo rojizo y amarillo pálido que le proporcionan al suelo un aspecto moteado. En zona de pendientes moderadas a bajas, el suelo residual no supera los dos metros de espesor
<b>Horizonte I</b>	El color de la roca es gris oscuro y blanco; se observa la orientación de los minerales. Ocurre en afloramientos de hasta siete metros de espesor

- **Contactos litológicos.** Esta unidad de roca se encuentra en contacto fallado con la Dunita de Medellín en la autopista Medellín - Bogotá a la altura del cruce de la quebrada Rodas y más hacia el sur del valle en el sector de El Poblado donde presentan un fuerte grado de fracturamiento y deformación en el contacto con las Dunitas de Medellín, lo que les confiere unas propiedades adversas en cuanto a su permeabilidad secundaria y la presencia de lisos sub-horizontales.

En el corregimiento de Santa Elena, el contacto con la Dunita de Medellín puede observarse como un cambio de pendiente a lo largo del altiplano. Este cambio de pendiente está acompañado de una serie de depósitos que se encuentran recubriendo el contacto. El contacto de la anfibolita con el Gneis Milonítico de Sajonia, se observa como intercalaciones de ambas unidades. Así mismo, el contacto con los esquistos consiste de paquetes de estos últimos dentro del cuerpo de anfibolita, tal y como se observa en la torre de incendios de las EEP de Medellín.

El contacto de las anfibolitas con la diorita del Stock de Altavista, que afloran en inmediaciones del Alto de Boquerón, es intrusivo.

- **Estructuras.** Como estructuras presentes en estas rocas se observan foliación y diaclasamiento. Las diaclasas se presentan rellenas con óxidos de hierro, con una separación entre discontinuidades de aproximadamente 10 cm, que en muchos casos favorecen la descomposición de la roca debido a la circulación del agua que acelera el proceso de alteración de los minerales.

Foliación	NS/subvertical - N40°E/50°E - N10°E/36°E - N10°W/50°E - N60°E/90° - N20°W/35°E - N45°E/10°E - NS/75°W - N3°W/35°
Diaclasas	N60°W/30°E - N30°W/30°E - N30°E/50°W - N60°W/20°E - EW/75°S
Falla	N80°W/45°S

- **Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB).** Afloran unidades de rocas metamórficas del tipo esquistos, anfibolitas y gneises en el sector del cerro Baldías. Afloramientos de esta unidad se observan en: la vía que conduce desde la vereda La Meneses a la vereda La Suiza y en la serranía Baldías vía a las antenas.
  - **Perfil de Meteorización:** Se presentan en avanzado estado de meteorización, pero alcanzan a definirse esquistos anfibólicos, gneises y anfibolitas en paquetes intercalados con amplia variación textural cuya mineralogía implica un metamorfismo de medio a alto grado.
  - **Contacto Litológico:** Estas rocas aparecen instruidas por el Batolito de Ovejas; donde se observa el cambio del saprolito de una roca tipo granitoide a una esquistosa.

**Tabla 4.32. Perfil de meteorización TReaB**

<b>Horizonte V</b>	Suelo de color principalmente rojizo, aunque puede presentar variación en el color de gris oscuro y en diversas tonalidades de amarillo, debido al bandeamiento. Esta roca alcanza un espesor máximo de 2.5 m
<b>Horizontes II</b>	Roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por el bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso. Es frecuente encontrar en las micas evidencias de efectos dinámicos tales como las bandas tipo “kink”. Esta roca alcanza un espesor máximo observado de 12 m
<b>Horizonte I</b>	Son esquistos micáceos; en algunas zonas la textura varía de esquistosa a gnésica, presentando en este último caso un bandeamiento composicional de bandas de cuarzo y biotita intercaladas

- **Migmatitas de Puente Peláez (TRmPP).** Esta unidad hace parte del Grupo El Retiro, posee una litología predominante de gneises, compuestos por cuarzo, feldespato y biotita. La textura gnésica revela un bandeo composicional de bandas claras y oscuras correspondientes, respectivamente, a cuarzo y/o feldespato y biotita.

Aflora en la vía Las Palmas en límites con el municipio de Envigado, donde aparecen cuerpos porfídicos, de grano fino, que intruyen esta unidad. Estos diques de textura porfídica, presentan dimensiones considerables con una marcada meteorización esferoidal.

- **Perfil de Meteorización.** Estas rocas, desarrollan todos los horizontes del perfil de meteorización.

- **Contactos litológicos.** El contacto de gneises con las anfibolitas y las dunitas se define como fallado, asociado a una zona de múltiples estructuras de falla tales como brecha (en la anfibolita) y pliegues y microdiscontinuidades en el gneis. Puede también parecer como intercalaciones con esquistos.
- **Gneis de La Ceja (TRgLC).** Hacen parte del Grupo El Retiro; se trata de una roca gnéisica compuesta esencialmente por cuarzo, feldespato y biotita. Este cuerpo corresponde a una parte de la franja delgada, que aflora en la vertiente noroccidental del río Aburrá, con dirección N30°W.

El gneis exhibe importantes variaciones en las características texturales debido a los efectos dinámicos, hecho que explica la íntima asociación entre éstos y algunos paquetes de esquistos.

**Tabla 4.33. Perfil de meteorización TRmPP**

<b>Horizonte VI</b>	Se desarrollan suelos residuales amarillos y rojizos, los cuales se diferencian de los suelos residuales de otras rocas por la presencia de cuarzo y micas. La granulometría va desde un grano fino de arcilla hasta arena. El espesor máximo observado para este suelo residual es de tres metros
<b>Horizonte V</b>	Se caracteriza por el bandeamiento heredado de la roca parental, cuyas bandas son de color blanco, gris oscuro y diversas tonalidades de amarillo y rojo. Este suelo alcanza un espesor máximo de tres metros
<b>Horizontes IV, III, II y I</b>	La clasificación del gneis en cada uno de estos horizontes depende del grado de diaclasamiento y alteración en las zonas de fractura

- **Perfil de Meteorización.** Este gneis, se encuentra en afloramientos rocosos y es poco frecuente el desarrollo de saprolitos y suelos residuales.

**Tabla 4.34. Perfil de meteorización TRgLC**

<b>Horizonte V</b>	Corresponde a un saprolito de color amarillo claro, su textura es arenosa con algo de arcilla. El espesor máximo observado para este suelo residual es de dos metros
--------------------	--

<b>Horizontes II y I</b>	Roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por el bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso. Es frecuente encontrar en las micas evidencias de efectos dinámicos tales como las bandas tipo “kink”. Esta roca alcanza un espesor máximo observado de 12 m
--------------------------	--

- **Estructuras.** El gneis en horizontes I, II y III del perfil de meteorización, se encuentra diaclasado en dos direcciones preferenciales.

Bandeamiento	N10°W/22°W
Diaclasas	N60°E/45°E - N35°E/65°W
Zona de Falla	E-W/80°E

- **Gneis de Palmitas (TRgP).** Se presenta como un cuerpo elongado en dirección N–S. Es una roca de textura grueso granular de minerales que alcanzan entre dos y cuatro milímetros, con aspecto bandeado. Está compuesta esencialmente por hornblenda, plagioclasa, biotita y cuarzo. Las bandas se encuentran composicionalmente definidas de biotita y cuarzo y por lo tanto el color de la roca consta de la intercalación de tonalidades negro y blanco. Están altamente meteorizados, sus superficies de fractura son onduladas, rellenas con material triturado, continuas y separadas entre uno y tres metros.

A nivel de muestra de mano, presenta continuidad marcada por el bandeamiento composicional de minerales micáceos, cuarzo y feldespato. En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, aflora en la vereda La Frisola, sector Peñas Blancas, en las veredas La Aldea, La Potrera – Miserenga y Urquítá.

- **Perfil de meteorización.** Para el Gneis de Palmitas se ha observado en los horizontes II a VI del perfil de meteorización, obteniendo los mayores espesores en los saprolitos y suelos residuales. En muchos casos el perfil de meteorización no es continuo y se observan cambios desde un horizonte II a un saprolito y suelo residual.

**Tabla 4.35. Perfil de meteorización TRgP**

<b>Horizonte VI</b>	Material de textura limo arenosa de color pardo amarilloso y pardo naranja. Sus espesores no superan los dos metros en zonas de pendientes moderadas a bajas
---------------------	--

<b>Horizonte V</b>	Saprolito que conserva la textura original de la roca, disgrega como arena gruesa y presenta coloraciones amarillo pálido, pardas, blancas y negras. Ocasionalmente se aprecia una relación transicional entre los horizontes IV y V (transición suelo – roca). Este suelo alcanza hasta unos ocho metros de espesor
<b>Horizonte IV</b>	Poco común y cuando se desarrolla, su espesor no supera los seis metros, presenta un color amarillo pálido, pardo y rojizo. Conserva la textura original de la roca con sus minerales característicos.
<b>Horizonte III y II</b>	Ocurre en afloramientos de hasta 10 m, asociados a zonas de pendientes moderadas (superior a 25°). La textura de la roca es gnéisica a bandeada cuyos colores varían entre blanco, negro y amarillo pardo. Es notable la presencia de diques de cuarzo que alcanzan 10 cm de espesor y el alto grado de fracturamiento de la roca

- **Contactos litológicos.** En la vía al túnel, se encuentra el contacto fallado entre el Gabro de Romeral y el Gneis de Palmitas. En la antigua vía Medellín – Santa Fe de Antioquia en inmediaciones de la vereda Urquitá se aprecia el contacto intrusivo entre esta unidad y los esquistos. En la aureola de contacto se observa recristalización y comubianas cubriendo longitudes mayores a 10 m. Se infiere que al menos un evento metamórfico afectó a ambas unidades. La diorita se aprecia como un cuerpo intrusivo en forma de diques y venas dentro del gneis en el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, además de la ocurrencia de xenolitos de gneis incluidos en el cuerpo diorítico.
- **Estructuras**

Foliación	N40°E/60°E - EW/20°N - N10°E/30°E
Diaclasas	N30°E/60°E - N8°E/90° - N35°E/75°E - N30°W/40°EN - S70°E/70°SW - N15°W/77°SW - N33°W/35°E N55°E/35°SW - N65°W/V - N19°E/84°W - N60°E/43°W
Bandeamiento	N15°E/55°NW S80°W/60°NW
Falla	N12°E/66°E

- **Milonita de La Iguaná (Jml).** Corresponde a un gneis feldespático con cuarzo, puede presentarse como diques y venas dentro de las metabasitas. Por meteorización desarrolla suelos residuales con espesores variables, que pueden superar los 15 m. Los terrenos desarrollados sobre esta unidad litológica son susceptibles a la erosión laminar y concentrada, evidenciada por una gran cantidad de cicatrices de surcos y



cárcavas, en especial hacia los sectores donde se explotan como material para la elaboración de tuberías y adoquines.

Aflora principalmente en el corregimiento de San Cristóbal, a lo largo de la quebrada la Iguaná, parte alta del barrio Calasanz, Barrizal y en sector de Indural.

- **Perfil de Meteorización.** Corresponde inicialmente a un suelo de carácter limoso con variaciones a arenas finas de colores claros, intercalados con otros limos arenosos de color gris azulado (provenientes de la anfibolita). En ocasiones se observan bloques de roca fresca embebidos en matriz saprolítica de carácter limo arenoso.
- **Contactos litológicos.** Según Rendón (1999) el contacto con las anfibolitas de la margen izquierda del río Aburrá, denominadas metabasitas, es intrusivo al igual que con las rocas del Stock de Altavista.

**Tabla 4.36. Perfil de meteorización Jml**

<b>Horizonte III</b>	Es de carácter limoso con fracciones más arenosas de constitución cuarzosa principalmente, las coloraciones van desde blancas pasando por amarillentas y rosadas. Los espesores van hasta los 12 metros
<b>Horizonte II-I</b>	Es de textura limo arenosa, color amarillo rojizo y blanco, se define claramente la textura de la roca

- **Peridotitas de Romeral (JuR).** Hace parte del Complejo Ofiolítico de Romeral. Incluye serpentinitas y dunitas serpentinizadas que se observan al sur del valle de Aburrá, fuertemente fracturadas, en contacto fallado con las unidades adyacentes, generando silletas alineadas en el paisaje. La morfología es de cimas redondeadas y pendientes fuertes. Es una roca afanítica, de color gris muy oscuro a verde claro satinado, decolorada parcialmente en las fracturas. En este municipio aflora en la vía que conduce a Ebéjico.
- **Perfil de Meteorización.** El desarrollo de suelo es incipiente y se observan los horizontes II, III y VI. El horizonte VI, es de textura ausente, suelo limo arcilloso, de color negro y rojizo en ocasiones de aspecto terroso, con un espesor de 1.5 m. Los horizontes II y III están constituidos por la roca de color gris muy oscuro a negro verdoso que cuando está altamente meteorizada da el color verde claro satinado, propio de la serpentina.

**Tabla 4.37. Perfil de meteorización JuR**

<b>Horizonte VI</b>	No es muy común; sin embargo, se encuentra suprayaciendo algunos horizontes V. Se caracteriza por desarrollar una granulometría limosa en colores rojo pardusco. Los espesores son menores a un metro
<b>Horizonte V</b>	Es de textura limosa, color verde muy claro, casi blanco. Son comunes pátinas de manganeso en forma de manchas negras. Alcanza hasta cuatro metros de espesor

- **Contactos litológicos.** En la vía que conduce a Ebéjico no fue posible determinar el tipo de contacto con el Gabro de Romeral. De acuerdo con lo observado en otros municipios y lo reportado en la literatura, el contacto con unidad Gabros de Romeral es fallado.
- **Gabros de Romeral (JgR).** Esta unidad hace parte del Complejo Ofiolítico de Romeral. Es una roca compuesta por anfíboles, plagioclasa y cuarzo y minerales accesorios. Es de textura fanerítica que varía de muy fina a media, el color de la roca varía en tonos de grises. Ocasionalmente los minerales se encuentran ligeramente orientados, imprimiendo una apariencia foliada, debido a efectos dinámicos. Es importante anotar que en esta zona el gabro puede presentar una composición tanto gabrónica como diorítica. Gran parte de la superficie aflorante se encuentra en estado saprolítico y alcanza hasta 40 m de profundidad. Esta unidad no presenta las características típicas del gabro, debido a su variación composicional y textural.

Aflora en el extremo suroccidental del valle, forman un cuerpo alargado de dirección norte - sur limitado por contactos fallados con las unidades adyacentes. Los afloramientos más importantes de este cuerpo se encuentran en la vía a Ebejico, desde el sector Los Micos hasta la quebrada La Sucia, en la vereda Potrera – Miserenga, cerca a la vía Aburrá – Cauca y en la vereda La Suiza, sector Peñas Blancas.

- **Perfil de Meteorización.** El perfil generalizado se presenta a continuación

**Tabla 4.38. Perfil de meteorización JgR**

<b>Horizonte VI</b>	Textura ausente, material limo arenoso, de color naranja, de consistencia firme y baja plasticidad. El espesor es de unos dos metros
<b>Horizonte V</b>	Textura original presente y núcleos ausentes. Suelo limo arenoso, con textura granítica, de color amarillo con motas blancas y acumulaciones de óxidos, firme y no plástico. Espesor de seis metros

<b>Horizonte IV</b>	Suelo y núcleos de roca presentes; material limo arenoso, de color pardo amarillento, con motas oscuras, con fragmentos de roca muy meteorizada. El espesor es de 12 m
<b>Horizonte III</b>	Roca alterada. Roca de textura granítica, meteorizada de colores gris amarillento, con oxidaciones y meteorización hacia las paredes de las discontinuidades. Espesor de tres metros
<b>Horizonte II</b>	Roca con suelo y decoloración presentes. Gabro con textura fanerítica que puede variar de grano grueso a muy fino. Cuando es de grano grueso, se identifican cristales de hornblenda y feldespato de color gris. Espesor de ocho metros

Para el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los perfiles desarrollados son espesos hacia la parte baja de la vertiente y de menor espesor en la parte alta de la misma, donde la pendiente se incrementa. Las características generales de este perfil son:

**Tabla 4.39. Perfil de meteorización JgR**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual de textura limosa y color moteado rojo – gris. Con espesores de hasta 1.5 m
<b>Horizonte V</b>	De textura limosa y color moteado de blanco, amarillo y gris. Conserva la estructura orientada de los minerales y algunos fragmentos de cuarzo. Ocasionalmente se aprecia un contacto neto entre los horizontes V y VI. Alcanza hasta unos cuatro metros de espesor

**Tabla 4.39. Perfil de meteorización JgR (Cont.)**

<b>Horizonte IV</b>	La roca se encuentra altamente fracturada y presenta un color gris claro. En el sector Peñas Blancas de la vereda La Suiza, la alteración de los feldespatos genera un recubrimiento general de la roca que da una apariencia blancuzca. Los espesores varían entre dos y tres metros
<b>Horizonte I</b>	Asociados a zonas de pendientes fuertes (40°), donde los demás horizontes están ausentes. Se observa una roca muy competente, muy diaclasada, que puede desarrollar espesores de hasta 25 m

- **Contactos litológicos.** Este cuerpo se encuentra en contacto fallado con los esquistos, dispuestos en paquetes intercalados y altamente fracturados. En la vía a Ebejico por la unidad básica Eri León Arango Paucar, cerca de la quebrada La Potrera existe un contraste litológico entre los gabros y la Peridotita de Romeral.
- **Estructuras.** Se presentan fallamientos y un intenso diaclasamiento; hay presencia de salvanda de unos 20 cm de espesor y una zona de milonitización de cinco metros.

Diaclasas	N65°E/45°NW - N20°W/50°NE
-----------	---------------------------

- **Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS).** Corresponde a gneises y esquistos con intercalaciones de anfibolitas, fuertemente deformados. La textura gnéisica se caracteriza por un bandeamiento composicional de cuarzo, feldespato y biotita, los cuales al alterarse generan coloraciones rojizas, blancas y amarillas. Es común la presencia de estructuras tipo augen y la presencia de venas de cuarzo. La textura varía de gnéisica a esquistosa.

Estas rocas se observaron en el corregimiento de Santa Elena, en la vereda Barro Blanco, cerca a la parroquia Virgen del Carmen; vía a la vereda El Plan y sobre la vía principal Medellín-Santa Elena, cerca a Los Arrayanes, El Refugio; finca Paisandú; en la vereda El Llano; vía a Rionegro (sector El Cartucho).

- **Perfil de Meteorización.** En el corregimiento de Santa Elena, el Gneis Milonítico de Sajonia se encontró en los horizontes IV, V y VI; predominando el horizonte V.
- **Contactos litológicos.** En la literatura se reporta un contacto fallado entre el Gneis Milonítico de Sajonia y la Dunita de Medellín, el cual se observó en el sector de Santa Elena. También se reporta el contacto del gneis con la Anfibolita de Medellín, como fallado. Sin embargo, en la vía principal de Santa Elena, cerca a El Refugio, se observaron intercalaciones entre las dos unidades.

**Tabla 4.40. Perfil de meteorización JKgmS**

<b>Horizonte VI</b>	Material de granulometría arenosa, de color pardo amarilloso. Puede alcanzar dos metros de espesor
<b>Horizonte V</b>	Se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo, tiene una granulometría arenosa y presenta venas de cuarzo. Las arenas de los augen sobresalen en la matriz más fina permitiendo diferenciar la textura. Puede alcanzar cinco metros de espesor

<b>Horizonte IV</b>	Al igual que el horizonte V, el horizonte IV se caracteriza por bandeamiento bien definido de colores rojizos, amarillo, gris y pardo. En este horizonte los minerales son más visibles. No es muy común, pero donde está presente alcanza espesores de un metro
---------------------	--

- **Estructuras.** Las direcciones del bandeamiento, se encuentran modificadas por efectos tectónicos, donde los plegamientos son estructuras comunes. Adicionalmente, el grado de meteorización de esta roca no permite tomar direcciones de bandeamiento.
- **Dunita de Medellín (JKuM).** Estas rocas, parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, atraviesan el valle del río Aburrá formando las laderas occidental y oriental. Mineralógicamente, se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino como mineral primario, con contenidos menores de cromita y magnetita. El olivino presenta alteraciones parciales a tremolita y ésta última a minerales del grupo de la serpentina, como talco y clorita. En muestra de mano, es una roca afanítica, con diferentes presentaciones según su estado de alteración, desde negro en estado fresco hasta diferentes tonalidades de verde con variaciones a café y gris plomo cuando están meteorizadas o serpentinizadas.

En general, corresponde a una franja de 35 km de extensión aproximadamente, en sentido NNW, que va desde el sector de Las Palmas, límites entre los municipios de Envigado y Medellín, donde presenta mayor amplitud (cuatro kilómetros aproximadamente), hasta el sur occidente del área urbana del municipio de San Pedro de Los Milagros, sector donde se adelgaza (menos de un kilómetro de amplitud). Conforman las zonas de topografía más abrupta que se observan al oriente del valle.

Particularmente para en el corregimiento de Santa Elena, la Dunita de Medellín conforma un cuerpo elongado en dirección N-S, el cual se encuentra en diferentes grados de serpentización. Los afloramientos representativos de esta unidad se encuentran en el parque ecológico Piedras Blancas, laguna de Guarne; en la vereda El Plan y en cercanías de Paysandú (finca de la Universidad Nacional de Colombia).

En el sector de El Poblado, las dunitas conforman las zonas de topografía abrupta, incluyendo las vertientes empinadas del flanco suroriental de la vía a Las Palmas, correspondientes a las cuencas de las quebradas La Presidenta, La Chocona, La Sanín, El Chocho, La Escopetería, Vicenza y Huasipungo. Afloramientos rocosos se presentan sobre esta vía, desde La Colegiatura hasta las inmediaciones del Colegio The New School. Sin embargo, teniendo en cuenta su composición máfica esta roca es susceptible a los procesos de alteración superficial, desarrollando comúnmente suelos residuales. Ejemplos de estos materiales pueden observarse en el sector de la

vertiente localizada por debajo de la vía Las Palmas. También aflora en la zona del Seminario Monticello, Rovelca, Nairobi, Aguas Vivas, etc.

- **Perfil de Meteorización.** Esta roca por lo general se encuentra extremadamente meteorizada. En las zonas con pendientes moderadas a bajas, desarrolla profundos perfiles de meteorización, cuya característica principal es su textura arcillosa, color rojo intenso, consistencia dura, y la presencia de óxidos de hierro con hábitos botroidales y oolíticos (costras lateríticas). En las zonas con altas pendientes, los suelos son erodados continuamente debido a la escasa o nula cobertura vegetal, manteniendo la roca en un estado relativamente fresco.

El perfil de meteorización de la Dunita en el sector del altiplano es de bajo espesor, con salientes rocosas frecuentes y alta presencia de geofomas de disolución que dan lugar a dolinas, macrodolinas, uvalas y valles kársticos. El perfil en el altiplano se compone básicamente de dos zonas, el horizonte V y el horizonte I. Perfiles representativos se encuentran en los sectores aledaños a la parte alta de la vereda Perico, límite con el municipio de Envigado y en el parque ecológico Piedras Blancas hacia la laguna de Guarne.

**Tabla 4.41. Perfil de meteorización JKuM**

<b>Horizonte VI</b>	Estrato orgánico de color pardo oscuro, textura limo arcillosa, contiene cantos decimétricos de cuarzo, óxidos de hierro hacia la base, formado costras duras de color pardo oscuro. El espesor alcanza unos 0,50 m
<b>Horizonte V</b>	Matriz con textura arcillo limosa, color rojo intenso que varía a amarillo ocre, y moteados de color vino tinto, consistencia alta, de baja plasticidad. Está moderadamente cementado, contiene bloques de roca altamente alterados, que exhiben foliación cataclástica. Espesor de unos tres metros
<b>Horizonte IV</b>	Esta capa en afloramiento tiene características de un flujo de escombros, sin embargo en realidad corresponde a una brecha tectónica donde predomina la porción gruesa en un 80%, los bloques de roca son de tamaño decimétrico a centimétrico, angulosos, irregulares con forma de elipsoides deformados, cuyos espacios intersticiales son ocupados por una matriz de color verde manzana con textura arcillo limosa. El espesor es de unos cuatro metros

**Tabla 4.42. Perfil de meteorización JKuM**

<b>Horizonte VI</b>	El suelo residual se caracteriza por el color pardo amarilloso de textura limosa. En la zona de estudio este horizonte no supera los 50 cm de espesor
---------------------	---

<b>Horizonte V (saprolito)</b>	Corresponde al horizonte de alteración de la dunita de mayor predominio en el área del altiplano, con un espesor delgado entre uno y dos metros aproximadamente, discontinuo, incrementado un poco en zonas de alto fracturamiento de la roca. La textura es limo arcillosa, con presencia de minerales laminados de serpentina de color verde sin alteración. Por lo regular suprayace directamente el horizonte I (roca fresca), lo cual se caracteriza por el contacto tajante con este horizonte, o presenta un ligero cambio de horizonte V a roca parcialmente descompuesta II y luego roca fresca
<b>Horizonte IV</b>	Roca muy cizallada y completamente serpentizada de color verde. Este horizonte tiene espesores máximos de dos metros
<b>Horizontes III, II y I</b>	Estos horizontes se diferencian entre si por el grado de serpentización y fracturamiento. El color de la roca es negro con alteraciones verdosas, dependiendo del grado de serpentización que presenten
<b>Horizonte I (roca fresca)</b>	Aflora desde la superficie hasta menos de un metro de dicha superficie. Esta roca se encuentra asociada a geoformas de cerros o bordes del altiplano altamente afectados por la erosión. En algunos sectores, donde la roca está cerca de la superficie, puede encontrarse un horizonte de transición II, sin desarrollo de horizontes, saprolito o suelo residual

- **Contacto litológico.** Las Dunitas reposan en contacto fallado sobre las Anfibolitas de Medellín y son consideradas como la base de una secuencia ofiolítica. La presencia actual de esta secuencia, obedece a procesos tectónicos probablemente de cabalgamiento mediante una obducción de edad cretácea temprana (Restrepo y Toussaint, 1974). Lo anterior, genera una zona de esquistos cloríticos actinolíticos, replegados en el contacto con las Anfibolitas de Medellín, además de mostrar una fuerte expresión geomorfológica en el cambio de pendiente de la cima de las colinas a la parte distal de las mismas. La relación anterior es debido al emplazamiento de la dunita sobre la anfibolita.

La dunita está en contacto fallado de bajo ángulo con la Anfibolita de Medellín en la quebrada Rodas (autopista Medellín - Bogotá), donde forma una franja de esquistos cloríticos con un alto replegamiento de unos seis a diez metros de

espesor. Este contacto también se observa en el corregimiento de Santa Elena, parque ecológico Piedras Blancas, donde la dirección de la falla es N80°W/45°S. La relación con los cuerpos ígneos intrusivos adyacentes no se logró observar en campo.

Con el Gneis Milonítico de Sajonia, se supone un contacto fallado, por la relación de intercalación del gneis con la anfibolita. En la vereda El Plan, límites con el municipio de Envigado, la dunita subyace los depósitos de flujos. En esta zona, la dunita está altamente meteorizada y desarrolla meteorización diferencial, permaneciendo bloques frescos en medio de suelo residual del mismo material.

En el municipio de Medellín, el cuerpo de dunitas presenta muy pobres condiciones geotécnicas hacia las partes altas de la comuna nororiental, generadas por el alto grado de meteorización, además de la forma particular de meteorizar en bloques rocosos de abundante matriz que es fácilmente lavada por las aguas de escorrentías, esto ha generado importantes problemas geotécnicos en estas laderas

- **Estructuras.** Exhiben un intenso fracturamiento haciéndose más fuerte cerca a la zona de contacto con la anfibolita. Localmente llega a formar una brecha tectónica, con foliación definida por una orientación mineralógica donde se reconocen algunas venillas de posibles carbonatos.

Falla en el contacto de dunita con anfibolita	N80°W/45°S
---	------------

- **Metabasitas del Picacho (JKmbP).** Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá y son rocas que han sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro térmico, definiendo así la asociación de anfibolitas y metagabros. Estas rocas, en estado fresco, son de color gris moteada de blanco, presenta claras variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y oscuras con orientación de los minerales máficos, hasta masiva. Mineralógicamente presenta una composición bastante homogénea de hornblenda en un 65 % y plagioclasa en un 35 %. Afloran en el cerro El Picacho de Medellín, a lo largo de la ladera occidental del valle del río Aburrá y en los alrededores de “Canteras de Colombia”. También se encuentran como cantos y bloques en depósitos de vertiente y algunos depósitos aluviotorrenciales. Es común encontrarla en forma de ventanas erosivas en inmediaciones de la vía de acceso a la vereda Pedregal Alto, en el cruce sobre la quebrada La Bermejala, corregimiento de San Cristóbal. Allí se presenta un saprolito limo arcilloso de color variable entre gris claro, ligeramente moteado de blanco, amarillo y amarillo rojizo, consistente y de textura bandeada. El espesor de estos materiales se desconoce, pero supera los siete metros.



- **Perfil de meteorización.** Se observa como saprolito altamente meteorizado (horizontes IV y V); en muy pocas ocasiones se logra observar la roca en estado fresco.

**Tabla 4.43. Perfil de meteorización JKmbP**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual, con aproximadamente un metro de espesor
<b>Horizonte V</b>	Suelo altamente meteorizado, con aproximadamente tres metros de espesor; color gris claro a blanco, textura limosa, consistencia muy suave, baja plasticidad, cementación débil.
<b>Horizonte IV</b>	Suelo altamente meteorizado, con un espesor de dos metros, color gris claro con variaciones a ocre claro, exhibe una consistencia suave, baja plasticidad y una cementación moderada, se observa la textura de la roca
<b>Horizonte III</b>	Roca moderadamente meteorizada, de color crema, brillo opaco, composición de plagioclasa, hornblenda, cuarzo segregado. Textura limosa, consistencia firme, baja plasticidad, cementación moderada

- **Contacto Litológico.** Las metabasitas se encuentra en contacto intrusivo, en la parte alta de la ladera occidental, con el Batolito de Ovejas y hacia el sector occidental con el Stock de Altavista y en contacto fallado con la Dunita de Medellín, donde presenta una estrecha relación, ya que a lo largo de la zona donde se encontró aflorando, es común encontrar algunas exposiciones superficiales de dunita foliada.

- **Estructuras**

Bandeamiento y diaclasamiento	N80°E/40°W - N80°E/55°W - N65°E/60°W
-------------------------------	---

- **Complejo Quebradagrande (KvQG, KvsQG)**

- **Miembro Volcánico.** Litológicamente corresponden a espilitas basaltos, andesitas y tobas de lapilli; por efectos de fallamiento se encuentran diaclasadas y muy fracturadas y en ocasiones con texturas esquistosas. Esta unidad aflora extensamente en la vertiente occidental del río Aburrá en las partes medias a altas de las laderas y es cortada por numerosas vías que parten de las cabeceras municipales de Caldas y La Estrella hacia el occidente. En Medellín aflora en el corregimiento de San Antonio de Prado, sector de Potreritos, hacia los sectores de pendientes empinadas a escarpadas, donde presenta una fuerte meteorización.

**Perfil de meteorización.** Los suelos originados son limo arcillosos de color rojizo a pardo amarillento, ocasionalmente con motas claras y acumulaciones de óxidos.

**Tabla 4.44. Perfil de meteorización KvQG**

<b>Horizonte VI</b>	Textura ausente, en suelo limo arcilloso, de color rojo con concentraciones de óxidos de colores negros. El espesor es de cinco metros
<b>Horizonte V</b>	Textura original presente y núcleos ausentes. Suelo limo arcilloso, con algo de arena de color rojo a naranja rojizo. Existen concentraciones de óxidos de manganeso en los planos de las diaclasas. Plasticidad media a baja, consistencia media a alta. Espesor de ocho metros
<b>Horizonte IV</b>	Suelo y núcleos de roca presentes, tienen un carácter limo arcilloso de color naranja rojizo, observándose fragmentos de roca meteorizados de colores negros a rojos y en las paredes de las diaclasas hay pátinas y concentraciones de óxidos de manganeso. El espesor es de 15 m
<b>Horizonte III</b>	Roca alterada, con oxidación superficial; se parten en forma de paralelepípedos de dimensiones variables. Espesor de unos 20 m

- **Miembro Volcanosedimentario.** Son esquistos silíceos negros (compuestos de pequeños cristales de cuarzo angular), en una masa silíceo arcillosa rica en material orgánico que le da su coloración, filitas grafitosas, liditas, algunas cuarcitas de grano fino y color oscuro, delgados conglomerados y calizas clásicas negras con escasos fósiles marinos. Algunas veces los esquistos silíceos tienen aspecto lenticular, localmente con abundante contenido de manganeso. Este miembro aflora en el corregimiento de San Antonio de Prado y el corregimiento de Palmitas.

**Tabla 4.45. Perfil de meteorización KvsQG**

<b>Horizonte IV</b>	Genera un suelo residual limoso de color amarillo pardusco
<b>Horizonte V</b>	Es un horizonte de material limoso de color verde pálido

- **Batolito Antioqueño (KcdA).** Definido como un cuerpo macizo intrusivo de 7221 km<sup>2</sup> de extensión, localizado en la parte central del departamento de Antioquia. La roca fresca se caracteriza por presentar textura granítica, equigranular e hipidiomórfica, de color blanco moteado de negro. Composicionalmente predominan tonalitas con variaciones locales marcadas por la disminución de cuarzo hacia granitos y dioritas.
- **Perfil de Meteorización.** Desarrolla suelos residuales donde se define claramente la textura de la roca, tanto desde el primer horizonte, VI, hasta el último, I.

**Tabla 4.46. Perfil de meteorización KcdA**

<b>Horizonte VI</b>	Corresponde a un limo arenoso de color rojo, amarillo rojizo o amarillo; de consistencia firme, baja plasticidad. Se diferencia fácilmente por el contenido de micas y color intenso. Se observa sobre las colinas residuales en la parte baja del valle. Espesor variable entre uno y cinco metros
<b>Horizonte V</b>	Roca extremadamente meteorizada conservando la estructura original. Las características del material suelto corresponden al horizonte VI. Los bloques, en un porcentaje aproximadamente de 10 a 20% y de dimensiones métricas, se caracterizan por presentar meteorización esferoidal, o anillos de cebolla. Espesor aproximado de cinco metros.
<b>Horizonte IV</b>	Suelo altamente meteorizada, color amarillo rojizo, textura arenosa limosa, de consistencia firme, baja plasticidad, cementación moderada. Se alcanzan a distinguir en los bloques de roca sistemas de diaclasas rellenas por oxidaciones de minerales ferromagnesianos. El espesor promedio es de diez metros
<b>Horizonte III</b>	Roca moderadamente meteorizada con menos del 50% del material formando suelo. Los bloques se encuentran frescos a ligeramente meteorizados en formas redondeadas como remanentes de la meteorización esferoidal. El material suelto es de color amarillo con características semejantes al horizonte IV. En campo los horizontes II, III y IV en superficie, presentan apariencia de depósitos de vertientes tipo flujos, diferenciados al examinar detalladamente la matriz identificando estructuras heredadas de la roca parental. Espesor promedio de ocho metros
<b>Horizonte II</b>	Roca ligeramente meteorizada de color blanco moteado de negro y rojo, masiva de textura granítica. Se caracteriza por las alteraciones de los minerales ferromagnesianos generando pequeñas aureolas de color rojizo y cobre. Las diaclasas se encuentran rellenas por oxidaciones de hierro y arcillas tipo caolín por alteración del feldespato
<b>Horizonte I</b>	Roca fresca sin signos de meteorización. Aflorando en los cauces de las quebradas de la vertiente occidental y en escarpes formados en la parte alta de las vertientes

- **Contactos litológicos.** Las relaciones con los cuerpos adyacentes es intrusiva, con efectos térmicos sobre las rocas metamórficas, gneis y anfibolitas generando migmatitas de intrusión producto de la asimilación diferenciada.
- **Estructuras.** Se observan diaclasas y localmente orientación de minerales debido a protoclasia, originada por la deformación causada durante la intrusión sobre el magma parcialmente cristalizado, lo que produce en la roca cierta orientación con apariencia de una textura gnéssica, donde se deben utilizar criterios de campo que permitan diferenciar estos materiales.
- **Stock de Las Estancias (KcdE).** Corresponde a cuerpos menores de granitoides que aunque separados geográficamente del cuerpo principal del Batolito Antioqueño, presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares y una posición que hace suponer una relación genética con éste.

Este cuerpo aflora hacia la comuna nororiental, margen derecha de la quebrada La Castro, parte baja del Cerro Pan de Azúcar.

– **Perfil de Meteorización**

**Tabla 4.47. Perfil de meteorización KcdE**

<b>Horizonte VI</b>	Corresponde a un limo arenoso de color rojo, amarillo rojizo o amarillo. Espesor variable máximo de dos metros
<b>Horizonte V</b>	Roca que conserva la estructura original. Puede desarrollar grus. Espesor aproximado de cinco metros.
<b>Horizonte IV</b>	Roca altamente meteorizada con más del 50% del material desarrollando suelo residual. El espesor promedio es de diez metros
<b>Horizontes I, II y III</b>	Roca granítica que varía según el grado de fracturamiento que presente

- **Contactos litológicos.** El Stock de Las Estancias, es un cuerpo localizado entre los bloques sur y central de la Dunita de Medellín, en contacto fallado con esta unidad e intrusivo en anfibolitas, presenta una forma irregular con una extensión de 3,6 km<sup>2</sup>, longitud mayor de dirección SW-NE de unos dos kilómetros y una amplitud NW-SE de 1,2 km. Aflora en la comuna nororiental por el sector del barrio san Antonio, sector de la quebrada La Castro.
- **Stock de Medialuna (KcdML).** Hacen parte de rocas derivadas del Batolito Antioqueño, son similares en composición, grado de meteorización entre otras. Se encuentra aflorando en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que de Santa

Elena conduce a Medellín. Presenta una composición cuarzdiorítica de textura fanerítica media.

- **Perfil de Meteorización.** En la zona de estudio se observó esta unidad solamente en horizonte V del perfil de meteorización.

**Tabla 4.48. Perfil de meteorización KcdML**

<b>Horizonte V</b>	Es un suelo de color moteado blanco con tonalidades rojizas y amarillosas. El espesor visible es de unos siete metros
--------------------	---

- **Contactos litológicos.** El contacto, con la Anfibolita de Medellín, se encuentra sepultado por un depósito de deslizamiento y por lo tanto se observa es un cambio geomorfológico.
- **Batolito de Ovejas (KtO).** Litológicamente muestra variados tipos de roca, predominando las tonalitas y en menor proporción granodioritas, cuarzdioritas y en algunos casos dioritas y gabros con diques pegmatíticos (López, 1991). En muestra de mano, la roca es de color blanco, moteada de negro o gris oscuro, con apariencia masiva y textura granítica de grano medio a finogranular.

Esta roca constituye el basamento de la planicie denominada Llano de Ovejas. En algunos afloramientos se observan gabarros o autolitos con forma de elipsoides alargados, y generalmente de composición básica, cuyo origen está asociado a las primeras etapas de cristalización del magma. Se encuentra aflorando en una pequeña parte en límites con el municipio de Bello.

- **Perfil de Meteorización.** El suelo que se genera es bastante profundo, de color blanco. Generalmente afloran los horizontes V y VI. El horizonte V aun conserva rasgos de la roca parental, sin embargo se pueden describir como material de color amarillo claro, areno limoso, consistencia firme, no plástico, húmedo y cementación moderada.
- **Contactos litológicos.** Se encuentra intruyendo las metamórficas de la cordillera Central como las anfibolitas, los esquistos anfibólicos y el gneis.

**Tabla 4.49. Perfil de meteorización KtO**

<b>Horizonte V</b>	Roca extremadamente meteorizada conservando la estructura original. Los bloques, en un porcentaje aproximadamente de 10 a 20% y de dimensiones métricas, se caracterizan por presentar meteorización esferoidal. Espesor aproximado de cinco metros.
--------------------	--

<b>Horizonte IV</b>	Suelo altamente meteorizada, color amarillo rojizo, textura arenosa limosa, de consistencia firme, baja plasticidad y cementación moderada. El espesor promedio es de diez metros
---------------------	---

- **Stock de Altavista (KdA).** Aflora al occidente del río Aburrá en los corregimientos de San Cristóbal, San Sebastián de Palmitas y Altavista, al norte en límites con el municipio de Itagüí. Su composición es variable, con predominio de roca básica, va desde andesita hasta granodiorita, compuesta por hornblenda, plagioclasa y cuarzo. Muestra coloraciones variadas desde gris claro a gris oscuro, con tonalidades verdosas, varía texturalmente entre afanítica y finogranular. Se encuentra intensamente meteorizada, alcanzando espesores de meteorización hasta de 45 m, en algunos sitios se explota para la industria de la cerámica roja.

Es común encontrar esta roca en afloramientos dispersos en el sector occidental del municipio. Algunos de los afloramientos más representativos se localizan hacia el sector del Boquerón, hacia la margen derecha de la quebrada La Sucia, en las veredas La Sucia, La Frisola, Volcana – Guayabal y el casco urbano de Palmitas; en San Cristóbal y hacia las ladrilleras del corregimiento de Altavista en las quebradas Ana Díaz, La Picacha y La Guayabala.

- **Perfil de Meteorización.** En el corregimiento de Altavista, en algunas canteras de las ladrilleras; desarrolla un suelo limo arcilloso, de colores rojizos y amarillentos, que incluyen bloques de roca parcialmente meteorizados. En general, el perfil de meteorización no desarrolla horizontes homogéneos, debido a las variaciones composicionales del cuerpo, que va desde diorítico hasta granítico.

Cuando corresponde a una roca de tipo microdiorita, el perfil de meteorización es variable. En sectores de pendientes moderadas (25 a 30°) cuando se presenta asociada con los esquistos, se desarrollan perfiles espesos que por lo regular presenta en contacto un horizonte V de la diorita con un horizonte tipo IV de los esquistos.

- **Contactos litológicos.** Las evidencias de campo exhiben relaciones de carácter intrusivo con las demás unidades y se observan como grandes estructuras de tipo lacolitos o estructuras de menor tamaño como diques. En la vía Aburrá – Cauca se encontraron xenolitos de hasta un metro de espesor de gneis en el cuerpo diorítico. En los contactos generalmente se encuentran aureolas que configuran rocas masivas a fino granulares, usualmente de colores oscuros.

**Tabla 4.50. Perfil de meteorización KdA**

<b>Horizonte VI</b>	Textura ausente. Suelo limoso de color pardo claro no plástico. Espesor de dos metros
---------------------	---

<b>Horizonte V</b>	Textura original presente y núcleos ausentes, material arcilloso de color pardo claro a pardo rojizo con motas negras, plástico con textura granítica, se conservan bien definidas las discontinuidades. Alcanza un espesor de ocho metros
<b>Horizonte IV</b>	Suelo y núcleos de roca presentes. Suelo limo arenoso de color blanco amarillento a rojizo, con motas oscuras, con fragmentos de roca muy meteorizada. El espesor es de unos cinco metros

**Tabla 4.51. Perfil de meteorización KdA**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual de textura limosa y color rojizo a pardo rojizo. Los espesores van hasta un metro
<b>Horizonte V</b>	Saprolito con textura limosa y color homogéneo amarillo pardusco. En algunos sectores se observa una coloración moteada entre gris claro y amarillo pardo. Alcanza hasta cinco metros de espesor y en zonas donde las pendientes son suaves alcanza hasta 10 m
<b>Horizonte I</b>	Presenta espesores de hasta 10 m, principalmente hacia la parte alta de la vertiente montañosa de la denominada cuchilla Baldías y el sector del cerro Padre Amaya

– **Estructuras**

Diaclasa	N35°W/76°E - N23°W/84°W - N45°E/69°W - N58°W/56°W - S50°E/25°E - N40°W/55°SW - N67°W/45°N - N60°W/60°E - N18°E/V - N80°W/50°N - N80°W/60°E - N20°W/75°E - N5°W/V - N85°W/60°NE - N20°E/35°NW - S75°W/75°NW - N25°W/60°NE - N70°W/25°SW
Zona de Falla (Contacto diorita - gneis)	N75°E/45°NW

- **Stock de San Diego (KgSD).** Corresponde a la unidad de cuerpos intrusivos cretáceos. Son rocas ígneas plutónicas básicas que varían composicionalmente, desde dioritas hasta gabros olivínicos. Presentan texturas desde fanerítica fina hasta pegmatítica. Mineralógicamente se observa feldespato cálcico y hornblenda, además de algún contenido ocasional de olivino. Como rasgo dominante esta unidad geológica exhibe un avanzado proceso de meteorización, favorecido por las condiciones climáticas y topográficas en las que se encuentra enmarcada.

Es un cuerpo plutónico que aflora de manera escasa en el corregimiento de Santa Elena en el sector de El Mirador del Poblado y con desarrollo de suelos residuales,

que pueden alcanzar hasta 45 m de espesor, en el área del Seminario Mayor. También aflora en el extremo noroccidental desprendiéndose desde la parte alta de las antenas de Telecom, constituyendo las vertientes de inclinación al sur. Incluyendo los sectores de El Mirador del Poblado, barrio La Asomadera, Altos del Poblado, Los Pisquines, el hotel Intercontinental, barrio Castropol y barrio El Guamal.

- **Perfil de Meteorización.** Presenta un desarrollo importante del perfil de meteorización, alcanzando hasta 45 m de espesor. El suelo residual del perfil, primeros cinco metros aproximadamente, corresponde a limos de tonalidades claras (amarillo y blanco con manchas pardas), variando a profundidad a espesos horizontes saprolíticos (principalmente horizonte V con espesores superiores a 25 m) de carácter limo arenoso y colores abigarrados. El horizonte V se encuentra suprayaciendo los horizontes I y II del perfil de meteorización.

**Tabla 4.52. Perfil de meteorización KgSD**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo limoso de color amarillo parduzco pardo claro no plástico. Espesor de hasta cinco metros
<b>Horizonte V</b>	Textura original presente y núcleos ausentes. Material limo-arenoso de color abigarrado: blanco, rojo, amarillo con motas oscuras. Textura granítica. Los espesores pueden superar los 30 m
<b>Horizontes I y II</b>	Roca fresca de textura granítica.

- **Contacto Litológico.** Esta unidad se encuentra intruyendo a la unidad de Migmatitas de Puente Peláez, a la altura del restaurante Asia, en el sector de discoteca La Isla y en el sector de Loreto aflora en forma de techos colgados de forma irregular, los cuales se encuentran distribuidos caóticamente. El contacto con la Dunita de Medellín puede observarse en el sector de la colegiatura, vía Las Palmas, y al norte de Monticello.

El patrón de afloramientos de este plutón es bastante irregular debido a la relación intrusiva que exhibe con las unidades adyacentes. Es así, como en varios tramos de la carretera a Las Palmas se observan paquetes de rocas metamórficas del tipo gneis anfibólico como techos colgados, con contactos irregulares e interdigitados. Estos techos conforman zonas de topografía algo más empinada, como las ubicadas en el sector la discoteca La Isla y en el cruce de la quebrada Yerbabuena con Las Palmas. Como ya se había descrito este stock presenta una relación intrusiva con las Dunitas de Medellín. Es importante aclarar que la zona de falla subhorizontal que existe entre dunitas y anfibolitas o gneis anfibólico es asimilada por el cuerpo gabrónico o metagabro, implicando para éste una edad más reciente con respecto a la obducción de las dunitas.



- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII, NFI, NFprel).** Existe una gran variedad de depósitos de vertiente que cubren las laderas del municipio de Medellín, cuyos materiales dependen principalmente de las unidades geológicas que afloran en la parte alta de las vertientes.

- **Depósitos de deslizamiento.** Dentro de los depósitos de deslizamiento, en el corregimiento de Santa Elena se localiza en el km 10+700 de la vía a Santa Elena un depósito de dimensiones considerables, caracterizado por tener muy mala selección, bloques con diámetro que no superan 50 cm, matriz arcillosa y relación granos matriz 40:50.

En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, los depósitos que predominan corresponden a depósitos de vertiente, relacionados geomorfológicamente a pequeños peldaños en medio de la vertiente montañosa. Están constituidos por material fino del perfil de meteorización, mezclado con bloques de roca de forma angular a subangular. En estos sectores de acumulación es común encontrar varios niveles de depósitos de deslizamientos, tal como se puede apreciar en el corte sobre la antigua vía a Santa Fe de Antioquia, cerca a la quebrada La Cascada. En esta zona se observa un depósito de unos dos metros de espesor con un 30% de bloques, ligeramente meteorizados, embebidos en una matriz limo arenosa de color amarillo pardo. Esta capa suprayace otra capa de 1,5 m de espesor de un flujo de lodos con un 10 % de bloques, ligeramente meteorizados, compuestos de diorita en una matriz limo arenosa color amarillo pardusco.

En el corte sobre la vía de la Conexión Vial Aburrá - Cauca, son frecuentes los depósitos de deslizamiento, localizados hacia la parte baja de la vertiente montañosa. Estos depósitos presentan espesores que alcanzan hasta 10 m; compuestos principalmente de bloques de roca entre un 60 y un 90 %, angulares a subangulares, de diámetros variables entre cinco centímetros y un metro.

- **Depósitos de flujo.** Aparecen dispersos sobre grandes extensiones en el Valle de Aburrá, reposando concordantemente sobre el basamento ígneo - metamórfico y sobre depósitos más antiguos o intercalados con ellos. Constituidos por bloques heterométricos, con un grado de meteorización de moderado a alto. Con matriz arcillo limosa o limo arcillosa, en colores claros como pardo, gris y amarillo. Su génesis se encuentra asociada a la desestabilización de la vertiente afectadas por el fracturamiento múltiple sobre estas rocas, además de eventos sísmicos y alta pluviosidad, factores que ayudaron a movilizar los niveles saprolíticos de las rocas hacia la parte inferior de las vertientes.

Particularmente, en el corregimiento de Santa Elena, los depósitos de flujos de escombros y lodos son escasos, encontrándose en la vereda El Plan el flujo más representativo de este tipo de depósitos. Corresponde a bloques mal seleccionados, de diámetro máximo de un metro, conformados por anfibolita,

subangulosos a subredondeados en una matriz de granulometría variable entre arena, arcilla y limo, en coloraciones pardo amarillento.

- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** Corresponden a los depósitos del fondo del valle generados por el río Aburrá y algunos de sus afluentes. Se distribuyen en una franja irregular que sigue el río, aumentando su extensión hacia el flanco occidental del valle, alcanzando longitudes de hasta siete kilómetros. Los más pequeños se limitan a los cauces y pequeñas riveras de las quebradas de menor jerarquía.

- **Depósitos aluviales.** Estos depósitos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas, gravas gruesas y fragmentos rocosos heterogéneos composicionalmente estratificados con continuidad horizontal variable, formando abanicos, terrazas y llanuras aluviales. Los paquetes de gravas contienen fragmentos redondeados y subesféricos de cuarzo, diorita, gneis, anfibolita, esquisto, basaltos, dunitas, pórfidos andesíticos y cuarzodioritas, entre otros.

En el sector de El Poblado los terrenos aluviales involucran la zona industrial, Monterrey, barrio Patio Bonito, El Remanso, el INEM, el Politécnico, universidad EAFIT, Bosques de La Aguacatala y Villa Jardín. Dichos terrenos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas y gravas gruesas en paquetes de disposición y continuidad horizontal variable; aunque en general la gradación de dichos materiales es normal, pasando superficialmente de los más finos (limos arcillosos y limos arenosos) a los paquetes de granulometría gruesa.

- **Depósitos aluviotorrenciales.** Corresponden a los depósitos formados en los valles de las quebradas con forma alargada y de abanicos, ocupando partes medias de las vertientes y en las partes bajas las zonas de baja pendiente. Estas unidades son el producto de eventos erosivos ocurridos en épocas y periodos de alta pluviosidad que han generado avenidas torrenciales de diferente magnitud, depositando materiales con una gran diversidad en litología, tamaño, forma y espesores. Se caracterizan por una depositación sin estratificación o selección en los materiales transportados. La forma varía desde clastos subredondeados a redondeados, tamaños desde métricos, embebidos en una matriz areno gravosa, de color gris, consistencia dura, no plástica. Por lo general las partes bajas están más húmedas y secas en las partes altas. Debido a su alta permeabilidad, exhiben un grado de meteorización moderado, actualmente son disectados por las corrientes actuales.

En el corregimiento de San Sebastián de Palmitas, las características geomorfológicas permiten inferir una dinámica aluvial fuerte, donde los depósitos aluviotorrenciales se encuentran asociados a las redes de drenaje de orden mayor.

Es decir, estos depósitos son comunes hacia la parte baja de las cuencas de las quebradas, debido a las características morfológicas de valles en “V” estrechos y encajados, y de gradiente alto. Se caracterizan por presentar un alto contenido de bloques de roca, más del 90%, subredondeados, de variada composición, en matriz arenosa. Los depósitos están asociados a material de deslizamientos grandes o procesos erosivos por carcavamiento, los cuales se concentran por las redes de drenaje.

Depósitos de este tipo se presentan también en el corregimiento de San Cristóbal en la quebrada La Peña, tanto en su sector intermedio como en inmediaciones de su desembocadura a quebrada La Iguaná.

- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** El desarrollo de la actividad urbanística y constructiva, propia de ciudades en crecimiento, genera gran cantidad de escombros y materiales de rezaga; los cuales deben ser dispuestos en otros lugares, desarrollándose acumulaciones artificiales que pueden llegar a tener una extensión y espesor. En el municipio de Medellín, principalmente hacia las zonas urbanas, es común observar llenos antrópicos (algunos no cartografiados), sobre los cuales comúnmente se han construido viviendas y parques deportivos, entre otros. La composición de estos depósitos es en extremo heterogénea, desde materiales homogéneos conformados con algunas normas técnicas hasta basura, materia orgánica y escombros simplemente dispuestos, con propiedades geotécnicas pobres para cortes y capacidad portante.

Otro tipo de llenos antrópicos que abarcan áreas mayores corresponden a los “Botaderos” que se generaron por ejemplo como producto de la apertura de la vía Aburrá - Cauca. Algunos de ellos pueden observarse en el sector sur de la vereda La Aldea, donde hay un lleno que abarca un área de más de 100 m<sup>2</sup>. Estos llenos, está compuesto por bloques angulosos a subangulosos de roca fresca y diámetros muy variables que alcanzan hasta los dos metros. La relación aparente de bloques / matriz es 50/50, la matriz es arenosa con una fracción alta de finos. También pueden ser denominados como escombreras.

#### 4.2.7 Municipio de Bello

La geomorfología en esta zona la compone un relieve de altiplano, corregimiento de San Félix, limitado por un escarpe regional que constituye una de los respaldos del Valle de Aburrá. Al pie del escarpe, se localizan una serie de colinas, las cuales, al igual que el altiplano y el escarpe, están modeladas en las rocas del Batolito de Ovejas. Consecutivamente, en dirección al valle, hay un despliegue de depósitos de flujo que se interdigitan con depósitos aluviales y aluviotorrenciales de quebradas como El Hato.

Dentro de esta cartografía del relieve, en el municipio de Bello, se presentan formas de altiplano, que es el que presenta una subdivisión compuesta por geofomas tales como: lomos regionales representados por la cuchilla Las Baldías al occidente y las veredas Cerezales y Quitasol al oriente; colinas en la zona central donde se encuentran los corregimientos de San Félix y las veredas Cuartas, La Meneses, La Unión; una superficie plana de acumulación de sedimentos en la vereda Llano de Ovejas y por último un segmento de vertiente de carácter escarpado, hacia la parte alta de la vertiente occidental del valle de Aburrá.

Las unidades litológicas encontradas en esta parte del municipio de Bello corresponden a las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, dentro del cual se incluye el Grupo El Retiro con las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y los Esquistos Anfibólicos de Baldías (TRaB). Aflora también rocas ígneas como el Complejo Ofiolítico de Aburra con la unidad de la Dunita de Medellín (JKuM) y las Metabasitas del Picacho (JKmbP) y los intrusivos cretáceos con el Batolito de Ovejas. Y finalmente, parecen los depósitos recientes entre los que se presentan flujos de escombros y lodos además de depósitos aluviales y llenos antrópico.

- **Anfibolita de Medellín (TRaM).** Hace parte del Grupo El Retiro, es una roca de grano medio a fino y de formas euhedrales. Está compuesta por hornblenda y feldespato, donde las hornblendas son más abundantes con relación al feldespato y se observan orientadas frecuentemente. El color de la roca es gris oscuro pero puede variar a gris - blanco. Presenta alteraciones superficiales que le imprimen una tonalidad verdosa (epidota) y son comunes las huellas de disolución.

Es un cuerpo de forma alargada orientado en sentido SE-NW. Aflora en la vereda La Meneses, sobre la vía principal San Félix - San Pedro y en la vía hacia la serranía Las Baldías. En la vereda La Meneses a la altura de la hacienda Cerezales y sobre la carretera que conduce a Trucheras del Río.

- **Perfil de Meteorización.** En la zona de estudio no se encontró desarrollo de suelo residual, ni horizonte de meteorización IV.
- **Contactos litológicos.** Esta unidad se encuentra limitada hacia el este por el cuerpo de Dunita de Medellín. La bibliografía reporta un contacto fallado, pero dicha relación no fue observada en campo.

El contacto con el Batolito de Ovejas presenta una relación intrusiva, sin embargo no fue posible observarla directamente en campo. La relación más cercana entre ambas unidades se describió en la vereda La Meneses a la altura de Trucheras del Río, donde se exhiben ambas unidades limitadas por la quebrada principal.

**Tabla 4.53. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte V</b>	Saprolito de textura arcillosa, de color variable entre pardo rojizo y amarillo pálido que le proporcionan al suelo un aspecto moteado cuyo espesor no supera los dos metros en zonas de pendientes moderadas a bajas
<b>Horizontes III, II y I</b>	Roca de color gris oscuro y blanco. Se observa la orientación de los minerales. Cuando ocurre en afloramientos que alcanzan hasta los 10 m de espesor se encuentran asociados a relieves montañosos de vertientes largas y de inclinación media. Es más frecuente encontrar estos horizontes en afloramientos de un metro asociada a relieves colinados bajos

En inmediaciones de las antenas del Periódico El Colombiano y de la Finca La Luna (vereda Las Huertas), ubicadas en la serranía Baldías, se encontraron pequeños paquetes de anfibolita dentro de los esquistos. Las evidencias de campo muestran un contacto posiblemente fallado, pero también podría tratarse de pequeños lentes alargados de anfibolita dentro de los esquistos.

- **Esquistos Anfibólicos de Baldías (TReaB).** Hacen parte del Grupo El Retiro; se trata de una roca esquistosa con bandas composicionales gnéicas y anfibólicas. Las características texturales exhiben un bandeo composicional marcado, con bandas claras de cuarzo y feldespatos y bandas oscuras correspondientes a los ferromagnesianos (biotita). Este cuerpo corresponde a una franja delgada, que aflora en la vertiente noroccidental del río Aburrá, con dirección N30°W. Alcanza unos 34 km de longitud y su amplitud varía desde 9.1 km al sur hasta tres kilómetros al norte. Aflora principalmente en la serranía Las Baldías y en la vereda La Empalizada.

Se presentan variaciones a gneises, esquistos y anfibolitas, se exhiben importantes variaciones en las características texturales debido a los efectos dinámicos, hecho que explica la íntima asociación entre éstos y algunos paquetes de esquistos observados en la vía que conduce a la serranía Las Baldías, los cuales presentan homogeneidad en la composición. Afloramientos de esta unidad se observan en: la vía que conduce desde la vereda La Meneses a la vereda La Suiza y en la serranía Las Baldías vía a las antenas.

- **Perfil de Meteorización.** Estas rocas, se encuentra en afloramientos rocosos y es poco frecuente el desarrollo de saprolitos y suelos residuales. Se encontraron los horizontes I y V del perfil de meteorización.
- **Contactos litológicos.** El contacto de esta unidad con la anfibolita, consiste de intercalaciones, tal y como puede observarse en la serranía Las Baldías. El

contacto con el Batolito de Ovejas es intrusivo, se muestran intercalaciones, como en la vereda La Empalizada, cerca a las marraneras.

**Tabla 4.54. Perfil de meteorización TReaB**

<b>Horizonte V</b>	Suelo de color principalmente rojizo, aunque puede presentar variación en el color de gris oscuro y en diversas tonalidades de amarillo, debido al bandeamiento. Esta roca alcanza un espesor máximo de 2.5 m
<b>Horizontes II</b>	Roca de color blanco y gris oscuro, caracterizada por el bandeamiento composicional y tamaño de grano grueso. Esta roca alcanza un espesor de 12 m
<b>Horizonte I</b>	Son esquistos micáceos; en algunas zonas la textura varía de esquistosa a gnéisica, presentando en este último caso un bandeamiento composicional de bandas de cuarzo y biotita intercaladas

- **Estructuras.** En la serranía Las Baldías, en el horizonte I, se midió la dirección de esquistosidad. El gneis en horizontes I, II y III del perfil de meteorización, se encuentra diaclasado en dos direcciones preferenciales.

Bandeamiento	N10°W/22°W
Diaclasas	N60°E/45°E - N35°E/65°W
Zona de Falla	E-W/80°E
Esquistosidad	S20°W/36°E

- **Metabasitas del Picacho (JKmbP).** Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá y son rocas que han sufrido dos eventos metamórficos, uno dinámico y otro térmico, definiendo así la asociación de anfibolitas y metagabros. Estas rocas, en estado fresco, son de color gris moteada de blanco, presenta claras variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y oscuras con orientación de los minerales máficos, hasta masiva.

Afloran en el cerro El Picacho de Medellín y se extienden hasta el municipio de Bello. Aparecen sobre las laderas como cantos y bloques en depósitos de vertiente y algunos depósitos aluviotorrenciales y en forma de ventanas erosivas.

- **Perfil de meteorización.** Se observa como saprolito altamente meteorizado (horizontes IV y V); en muy pocas ocasiones se logra observar la roca en estado fresco.
- **Contacto Litológico.** Las metabasitas se encuentra en contacto intrusivo, en la parte alta de la ladera occidental, con el Batolito de Ovejas y contacto fallado con la Dunita de Medellín, donde presenta una estrecha relación, ya que a lo largo de

la zona donde se encontró aflorando, es común encontrar algunas exposiciones superficiales de dunita foliada.

**Tabla 4.55. Perfil de meteorización JKmbP**

<b>Horizonte VI</b>	Suelo residual, con aproximadamente un metro de espesor
<b>Horizonte V</b>	Suelo altamente meteorizado, con aproximadamente tres metros de espesor; color gris claro a blanco, textura limosa, consistencia muy baja, de baja plasticidad, cementación débil.
<b>Horizonte IV</b>	Suelo altamente meteorizado, con un espesor de dos metros, color gris claro con variaciones a ocre claro, exhibe una consistencia baja, baja plasticidad y una cementación moderada, se observa la textura de la roca

**Tabla 4.55. Perfil de meteorización JKmbP (Cont.)**

<b>Horizonte III</b>	Roca moderadamente meteorizada, de color crema, brillo opaco, composición de plagioclasa, hornblenda, cuarzo segregado. Textura limosa, consistencia firme, baja plasticidad, cementación moderada
----------------------	--

- **Dunita de Medellín (JKuM).** Hace parte del Complejo Ofiolítico de Aburrá, se caracteriza por ser una roca de textura afanítica, de color verde oliva a verde oscuro en estado fresco, que se aclara tomando tonalidades verdosas según su grado de meteorización. Está compuesta predominantemente por olivino, la cual muestra en algunas partes transformación variable a serpentina principalmente. La dunita conforma un cuerpo de forma tabular en dirección SE-NW, que se encuentra localizado hacia la parte nororiental del municipio. Esta roca se presenta con diferentes grados de serpentinización.

Los afloramientos representativos de esta unidad se encuentran localizados de sur a norte en la vereda La Meneses en cercanías a las fincas El Onasis, Los Lagos, El Mecateadero La Fondita y la escuela Darío Londoño Cardona, en la vereda Cuartas a la altura de la finca La Pintera, en la vereda Cerezales cerca al sector La Manga de Juan Sierra y en la vereda Quitasol, cerca a la finca Buenavista.

- **Perfil de meteorización.** El perfil de meteorización desarrollado en la dunita en este sector lo constituyen afloramientos rocosos de los horizontes I, II y III, que desarrollan suelos residuales de poco espesor.
- **Contactos litológicos.** Esta unidad se encuentra limitada hacia el oeste por el cuerpo de Anfibolita y de acuerdo con la literatura, como se dijo anteriormente,

consiste de un contacto fallado, relación no observada en campo en el municipio de Bello. El contacto de este cuerpo con los esquistos se supone fallada, pero tampoco fue observada en campo.

**Tabla 4.56. Perfil de meteorización JKuM**

<b>Horizonte VI</b>	El suelo residual asociados a zonas de pendientes moderadas a suaves y se caracteriza por el color pardo rojizo en una textura limosa; son frecuentes los nódulos de hierro. Este horizonte es variable entre 0.3 hasta 1.5 m
<b>Horizonte IV</b>	Aparece como núcleos de roca fresca inmersos en una matriz limosa del horizonte VI. Se presentan en espesores que no superan un metro, asociados a las partes altas del relieve colinado que se desprende del cerro Quitasol

**Tabla 4.56. Perfil de meteorización JKuM (Cont.)**

<b>Horizontes III, II y I</b>	Se diferencian entre si por el grado de serpentización y fracturamiento que presenten. El color de la roca es negro con alteraciones verdosas, dependiendo del grado de serpentización. Los espesores no superan 1.5 m de espesor, asociados a la geoforma de cerros (parte alta y media)
-------------------------------	---

– **Estructuras**

Dirección cizalla:	N25°W/70°
Espejo de falla	N-S

- **Batolito de Ovejas (KtO).** Hace parte de los cuerpos intrusivos cretáceos. En el municipio de Bello, corresponde a la unidad litológica más sobresaliente del altiplano y corresponde a una tonalita. El tamaño de grano varía de medio a grueso, la textura es equigranular, compuesta principalmente por cuarzo, plagioclasa, hornblenda y biotita. Se encuentra principalmente en horizonte V (saprolito) del perfil de meteorización.

Afloramientos importantes de esta unidad pueden observarse en: la vía que desde San Pedro conduce al cerro Quitasol, cerca a la finca Santa María de la Cumbre, en la vereda Cerezales cerca a la unidad básica; en la vereda La Empalizada; en la vía principal que desde San Pedro comunica con el corregimiento de Ovejas; en el corregimiento de San Félix; en la vereda Cuartas.



- **Perfil de Meteorización.** Algunas características geomorfológicas estables, como es un relieve de altiplano, favorecen el desarrollo de un perfil de meteorización espeso y de horizonte tipo V (saprolito). En la parte alta de la vertiente occidental del Valle de Aburrá, perteneciente al municipio de Bello, en las pendientes altas (superiores a 45°) el perfil de meteorización es menos espeso, con presencia de horizontes tipo I y II. En contraste, en zonas de menor pendiente, predomina el horizonte V (saprolito arenoso tipo grus).

**Tabla 4.57. Perfil de meteorización KtO**

<b>Horizonte VI</b>	Granulometría de limo a arena fina, de tonalidades amarillosas en la parte superior a tonalidades rojizas en la parte inferior. Las zonas de mayor espesor se encuentran hacia la cima de las colinas, aunque no supera los 1,5 m
<b>Horizonte V</b>	Saprolito arenoso, color moteado entre amarillo, blanco y rojizo con alto contenido de cuarzo y micas. Ocupa un espesor superior a los 10 metros en relieves colinados. Hacia la base de estas colinas cerca del cauce de los drenajes, el horizonte V es muy arenoso color blanco y negro, desarrollando un grus

**Tabla 4.57. Perfil de meteorización KtO (Cont.)**

<b>Horizonte IV</b>	Roca moderadamente alterada, color blanco y negro, se observa hacia la parte baja de la vertiente de las colinas, con espesores que alcanzan cuatro metros
<b>Horizonte I</b>	Roca fresca, se presenta únicamente en zonas escarpadas de la parte alta de la vertiente occidental del valle de Aburrá. Afloramientos de más de 10 metros de espesor

- **Contactos.** El contacto con los esquistos es intrusivo y puede observarse a lo largo de la vereda La Empalizada, cerca a las marraneras. Este contacto se encuentra como intercalaciones de ambas unidades. El contacto Anfibolita – Batolito de Ovejas presenta una relación intrusiva, sin embargo, no fue posible observarla directamente en campo.
- **Estructuras.** Debido a que esta roca se encuentra, en su mayoría, desarrollando el horizonte V del perfil de meteorización, no queda registro de las estructuras.
- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII).** En general, el altiplano constituye un relieve estable, ambiente no muy favorable para el desarrollo de depósitos de vertiente. No obstante, es común encontrar pequeños depósitos de deslizamientos a lo largo de las concavidades del relieve colinado o algunos depósitos de flujos.

- **Depósitos de deslizamiento.** En contraste, el relieve escarpado de la serranía Las Baldías, y del escarpe correspondiente a la vertiente occidental del Valle de Aburrá, favorecen los depósitos de vertiente, tales como los depósitos tipo deslizamiento. Ejemplo de estos depósitos pueden observarse en la vía a la marranera, vereda La Empalizada. Estos depósitos se caracteriza por material mal seleccionado en tamaño y forma, con una distribución caótica dentro de una matriz arenosa.
- **Depósitos de flujo.** Aparecen localizados hacia la parte baja, en límites con el río Aburrá. Están conformados por bloques rocosos que van desde sanos hasta intensamente meteorizados; con una matriz arcillo limosa o limo arcillosa, en colores claros como pardo, gris y amarillo. Su génesis se encuentra asociada a la desestabilización de la vertiente afectadas por el fracturamiento múltiple sobre estas rocas, además de eventos sísmicos y alta pluviosidad, factores que ayudaron a movilizar los niveles saprolíticos de las rocas hacia la parte inferior de las vertientes. En estos flujos se asientan varias de las unidades residenciales del sector de Niquia.
- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** Corresponden a los depósitos del fondo del valle generados por el río Aburrá y algunos de sus afluentes. Se presentan en pequeños afloramientos cercanos al río Aburrá principalmente.
  - **Depósitos aluviales.** Estos depósitos están constituidos por diversos materiales, que incluyen arcillas, limos, arenas, gravas gruesas y fragmentos rocosos heterogéneos composicionalmente estratificados con continuidad horizontal variable, formando abanicos, terrazas y llanuras aluviales. Los paquetes de gravas contienen fragmentos redondeados y subesféricos de cuarzo, diorita, gneis, anfíbolita, esquistos, basaltos, dunitas, y cuarzodioritas, entre otros.
  - **Depósitos aluviotorrenciales.** Corresponden a los depósitos formados en los valles de las quebradas como La García, La Señorita, La Loca, entre otras, tienen una forma alargada y de abanicos, ocupando partes medias de las vertientes y en las partes bajas las zonas de baja pendiente. Estas unidades son el producto de eventos erosivos ocurridos en épocas y periodos de alta pluviosidad que han generado avenidas torrenciales de diferente magnitud, depositando materiales con una gran diversidad en litología, tamaño, forma y espesores. Se caracterizan por una depositación sin estratificación o selección en los materiales transportados. La forma varía desde clastos subredondeados a redondeados, tamaños desde métricos, embebidos en una matriz arenosa gravosa, de color gris, consistencia dura, no plástica. Por lo general las partes bajas están más húmedas y secas en las partes altas. Debido a su alta permeabilidad, exhiben un grado de meteorización moderado, actualmente son disectados por las corrientes actuales.

- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** Se observan llenos antrópicos en cercanías al río Aburrá. Estos depósitos están compuestos generalmente por gravas aluviales y bloques de material de construcción, con una matriz de granulometría areno limosa.

#### 4.2.8 Municipio de Copacabana

Hace parte de la zona norte del Valle de Aburrá, se caracteriza por ser un valle más estrecho que el de la zona central. Este estrechamiento es evidente en los límites con el municipio de Bello, el cual se encuentra marcado por importantes cambios geomorfológicos.

Particularmente, el municipio de Copacabana presenta un relieve montañoso, de vertientes largas y escalonadas, que descienden topográficamente generando una serie de quiebres y superficies aptas para la acumulación de depósitos. Desde la parte media de la vertiente hasta la base, es común observar depósitos asociados a geformas de abanicos y lomos escalonados de cimas ligeramente inclinadas. Algunas estribaciones inferiores de las vertientes rocosas, presentan pendientes pronunciadas, como el Ancón Norte y el Alto de la Cruz. Las partes altas de las vertientes montañosas son escarpadas con cimas redondeadas que limitan con zonas de colinas que conforman altiplanos (Guarne y San Pedro).

Las unidades geológicas que se definen para el municipio de Copacabana corresponden las rocas metamórficas del Complejo Cajamarca con el Grupo El Retiro, representado por las Anfibolitas de Medellín (TRaM) y el Gneis de La Ceja (TRgLC). Dentro de las rocas metamórficas, también afloran el Gneis Milonítico de Sajonia (JKgmS). Dentro de las rocas ígneas afloran rocas del Batolito Antioqueño (KcdA) y los denominados Gabros de Copacabana (KgC). Finalmente, afloran los depósitos de vertiente y los materiales aluviales y aluviotorrenciales asociados a las corrientes que drenan los terrenos.

- **Anfibolitas de Medellín (TRaM).** Corresponden al Complejo Cajamarca dentro del Grupo El Retiro, ocupan más del 50 % del área total del municipio. En muestra de mano, los minerales de la anfibolita son: feldespato y hornblenda, con leves variaciones composicionales detectadas por la relación de minerales claros (feldespato) y minerales oscuros (hornblenda). En la zona predominan anfibolitas de colores oscuros, donde el mineral constituyente en mayor proporción es el anfíbol que, en muestra de mano, presenta un brillo vítreo.

Este cuerpo se encuentra aflorando en ambos márgenes del río Aburrá. En la margen norte, desde la vereda Guasimalito y La Veta al occidente, hasta el límite con el municipio de Girardota, localizada en la parte alta de la vertiente montañosas escarpada. La anfibolita se observa con pocas variaciones composicionales, excepto

por un afloramiento de roca de composición gabrónica, cuyos límites con la anfibolita no fue posible definir con claridad.

En la margen sur, la anfibolita es la unidad que ocupa mayor área; se observan afloramientos desde el corregimiento de Machado, en el límite con el municipio de Bello, hasta las veredas Quebrada Arriba, Sabaneta, El Salado, Alvarado y Ancón, en el límite con el municipio de Girardota.

- **Perfil de Meteorización.** La unidad anfibolita desarrolla los seis horizontes del perfil de meteorización propuestos por Dearman (1991). Sin embargo, son predominantes los horizontes V y VI.

**Tabla 4.58. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte VI</b>	La granulometría varía desde limo, limo arcilloso hasta arcilla con diferentes tonalidades de amarillo rojizo y amarillo pardusco. Alcanza espesores hasta de cuatro metros
<b>Horizonte V</b>	Es un saprolito de granulometría arcillo limosa. El color característico es gris con motas blancas; donde se conserva la textura original de la roca por efecto de la meteorización del feldespato. Se observaron espesores que alcanzan tres metros

**Tabla 4.58. Perfil de meteorización TRaM (Cont.)**

<b>Horizonte IV</b>	Roca masiva, con foliación definida por anfíboles y feldespato. El feldespato está altamente alterado formando caolín e imprimiéndole a la roca una coloración blanca, conservando el núcleo de la misma fresco. Sobre las superficies de las diaclasas se han generado patinas de colores rojizos y negro. El máximo espesor observado es de 1,5 m
<b>Horizonte III</b>	En este horizonte la roca fresca predomina sobre la roca alterada. Son notables las patinas espesas de color negro y amarillo rojizo que se generan cerca a las discontinuidades de la roca. Este horizonte alcanza unos tres metros en espesor
<b>Horizontes II y I</b>	Se localizan generalmente en la parte alta de las vertientes montañosas. En estos horizontes la roca está en estado fresco, son masivas, de color oscuro. Sobre las superficies de los sistemas de diaclasas hay un leve cambio a un color rojizo o negro

- **Contactos litológicos.** La anfibolita se encuentra en contacto con el Batolito Antioqueño, los Gabros de Copacabana y el Gneis de La Ceja. La relación con el gabro es de carácter intrusivo, cuyas evidencias se han detectado en la vía que conduce, desde Niquia al respiradero de la hidroeléctrica (vereda La Veta). Con el Gneis de La Ceja se presentan un cambio transicional en el contacto, el cual puede observarse en tres puntos específicos: en la margen izquierda, vereda La Veta, la anfibolita cambia a un gneis anfibólico, donde unos metros más adelante el gneis se encuentra con bandas de anfíbol, cuarzo y feldespato, con presencia de augen de cuarzo. En la margen derecha del río Aburrá, en la vía que desde el área urbana comunica con la vereda Cabuyal, los paquetes de gneis se intercalan con la anfibolita. A la altura de la autopista Medellín – Bogotá, en el sector del Alto de Las Peñas se puede observar igualmente el contacto transicional entre estos dos cuerpos. En la vía que conduce de Santo Domingo a Guarne este contacto se observó como intercalaciones con anfibolita a la altura del estadero Piedras Blancas. Es probable que la relación entre estos dos cuerpos, sea producto de las discontinuidades propias del protolito sedimentario.

El contacto de los gneises con el Batolito Antioqueño, se encuentra en la autopista Medellín - Bogotá, en el estadero La Panocha, donde se observan en ambas unidades evidencias de metamorfismo térmico, demostrando el carácter intrusivo del Batolito. Es notable también, la presencia de paquetes de gneis con espesores no mayores a cinco metros, a lo largo de diferentes caminos que comunican la zona urbana del municipio con la autopista Medellín – Bogotá, por ejemplo, vereda El Convento y el sector Cuenca Verde.

- **Estructuras**

Vereda Guasimalito	Diaclasas	N65°W/30°SW - N80°W/55°NE - N50°E/V
Sector El Pinar	Cizallas y Diaclasas	NS/70°E - N70°W/70°EN - N45°E/45°NW - N80°E/38°NW - NS/75°E
Vía al respiradero de la hidroeléctrica Niquia	Diaclasa	N80°W/V
Sector La Pitaya	Diaclasas	N45°W/80°SW - N30°E/30°SE - N70°E/75°SE
Sector Alto de La Virgen	Diaclasa	EW/54°S
Vía Santo Domingo Guarne, cerca de la escuela	Diaclasa	NS/W
Vereda Ancón	Diaclasas	S15°E/85°EN - N55°E/30°NW - S5°E/60°SW - S85°E/55°NE

- **Gneis de La Ceja (PRnLC).** Referenciado en la literatura en este sector como el Gneis de Las Peñas; hacen parte del Grupo El Retiro. En muestra de mano se observa el cuarzo, feldespato y biotita con variaciones a cuarzo, feldespato y anfíbol en cercanías al contacto con la anfibolita. Texturalmente presenta una buena foliación, en roca fresca, y un bandeamiento composicional de lentes de cuarzo y biotita. Localmente se observan algunos pliegues y micropliegues. Las diferencias texturales se detectaron en los taludes de la autopista Medellín – Bogotá y corresponden a una diferenciación entre bandas claras (cuarzo y feldespato) y bandas oscuras (biotíticas u hornbléndicas) que alcanzan espesores centimétricos, donde se observan una serie de pliegues muy pronunciados y zonas altamente cizalladas con venas. En la vereda el Guayabo, se observan muestras de gneis en estado fresco de color “rojizo pálido”, con textura gnésica clara y bandas bien definidas donde la biotita y el cuarzo son los minerales predominantes. Cuando el gneis ocurre como paquetes intercalados con la anfibolita, en las zonas de contacto, es común observar como la textura del gneis presenta una gradación a gneis anfibólico.

En el municipio de Copacabana, estas rocas, corresponden en gran parte con la geoforma de la cuchilla de Las Peñas. Afloramientos representativos de esta unidad se encuentran hacia la margen derecha del río Aburrá, en la vía que conduce desde la vereda Cabuyal a la autopista Medellín - Bogotá; en la quebrada El Atajo; en la vía que desde el barrio Santo Domingo conduce al municipio de Guarne. Otros afloramientos de menor envergadura se observaron en la vereda El Convento, margen derecha del río y en la vereda La Veta, margen izquierda del río. Ambos afloramientos se encuentran como paquetes intercalados de gneis y anfibolita que, dadas sus características petrográficas en muestra de mano, se consideran correlacionables con la unidad mayor Gneis de La Ceja.

- **Perfil de Meteorización.** El perfil de meteorización desarrollado por el Gneis de La Ceja, comprende principalmente los horizontes VI, V, II y I. Los horizontes intermedios III y IV, están pobremente desarrollados, limitados a zonas recientemente expuestas a los procesos de meteorización, en los taludes de corte de las vías.
- **Contactos litológicos.** El Gneis de La Ceja se encuentran en contacto con el Batolito Antioqueño y las Anfibolitas de Medellín. El contacto intrusivo con el Batolito se observa en la autopista Medellín – Bogotá, a la altura del estadero La Panocha. Algunas evidencias del carácter intrusivo son los abundantes xenolitos de rocas metamórficas en la roca granítica, venas y venillas de roca granítica en el gneis, y efectos térmicos en ambas rocas.

Con las Anfibolitas de Medellín, los contactos son complejos. En general se observan como paquetes intercalados de ambas unidades, donde se evidencian

cambios texturales y composicionales como es la gradación de la anfibolita de textura foliada y composición anfibólica a una textura gnésica, donde la composición es feldespato, cuarzo y anfíboles. Lo anterior, es seguido por leves cambios composicionales, donde gradualmente aparece biotita y la roca permanece con la textura gnésica. Finalmente, el cuerpo de gneis predomina y los paquetes de textura anfibólica son menos frecuentes hasta desaparecer por completo.

**Tabla 4.59. Perfil de meteorización TRgLC**

<b>Horizonte VI</b>	Desarrolla un suelo homogéneo, limo arenoso, con tonalidades rojas pálidas y es fácilmente disgregable. Alcanza espesores de dos metros
<b>Horizonte V</b>	Su color es rojo a pardo pálido, con granulometría de arena media a fina. Es común observar delgadas bandas y lentes de cuarzo. En este horizonte, el suelo conserva la textura original de la roca, pero es fácilmente disgregable. El espesor máximo observado alcanza 1.5 m
<b>Horizontes III y IV</b>	Corresponde a rocas masivas, donde la biotita se encuentra alterada y presenta un color rojizo a pardo rojizo y brillo vítreo. Los feldespatos se observan parcialmente alterados generando delgadas bandas de caolín, el cuarzo por su parte constituye bandas bien definidas. El espesor desarrollado por este horizonte no supera los cinco metros
<b>Horizonte II y I</b>	Es una roca bandeada, localmente plegada. El bandeamiento composicional en estado fresco, consiste de bandas negras (biotita) y bandas blancas (cuarzo feldespáticos). Es una roca muy competente

En el caso de los cuerpos de gneis, que se observan en las veredas El Convento y La Veta, los cambios texturales y composicionales, descritos anteriormente, se observan como gradaciones de anfibolita a gneis y viceversa. Debido a que en estas veredas la anfibolita predomina, respecto a los paquetes de gneis y anfibolitas con textura gnésica, se incluyen dentro de las Anfibolitas de Medellín.

– **Estructuras**

Vereda Cabuyal	Diaclasas	N40°W/70°N N48°W/V - N30°E/V
Después del túnel, autopista Medellín – Bogotá. Vereda Peñolcito	Diaclasa	N5°E/60°SE

Sector Yarumita      Diaclasas      N80°E/40°SE

- **Gneis Milonítico de Sajonia (JKgms).** Estas rocas presentan una textura gnéica, caracterizada por un bandeamiento composicional de cuarzo, feldespato y biotita, los cuales al alterarse generan coloraciones rojizas, blancas y amarillas. Es común la presencia de estructuras tipo augen y la presencia de venas de cuarzo.
  - **Perfil de Meteorización:** La meteorización de esta unidad incluye los horizontes III, IV, V y VI.
  - **Contactos litológicos.** En la literatura se reporta un contacto fallado con la Dunita de Medellín.

**Tabla 4.60. Perfil de meteorización JKgms**

<b>Horizonte VI</b>	Con granulometría arenosa, de color pardo amarilloso. Puede alcanzar cuatro metros de espesor
<b>Horizonte V</b>	Se caracteriza por bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo; tiene una granulometría arenosa y presenta venas de cuarzo. Las arenas de los augen sobresalen en la matriz más fina permitiendo diferenciar la textura. Puede alcanzar seis metros de espesor
<b>Horizonte IV</b>	Al igual que el horizonte V, presenta bandeamiento de colores rojizos, amarillo, gris y pardo. Puede alcanzar espesores hasta de 15 m
<b>Horizonte III</b>	Tiene las características texturales como estructuras tipo augen y un bandeamiento composicional muy definido. Comúnmente, se encuentra plegado.

- **4.2.8.4 Batolito Antioqueño (KcdA).** Hacen parte de los cuerpos intrusivos cretáceos. Su composición mineralógica corresponde a plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo. La textura es fanerítica equigranular, con cristales de anfíboles tabulares, subhedrales, plagioclasas y cuarzos anhedrales y biotitas subhexagonales. El tamaño de grano es principalmente de medio a grueso.

Aflora en el sector oriental del municipio de Copacabana, los afloramientos de mayor importancia se observan en la autopista Medellín – Bogotá, a la altura de las veredas Quebrada Arriba y Montanuela y en la vía que conduce del barrio Santo Domingo al municipio de Guarne.

- **Perfil de Meteorización.** En el municipio de Copacabana los cuerpos que afloran del Batolito Antioqueño se clasifican en los horizontes I, II y III del perfil de meteorización, los horizontes I y II corresponden con rocas de textura granítica, con leves decoloraciones cerca de las zonas fracturadas o diaclasadas. Mientras que



en el horizonte III, se presentan núcleos de roca no alterados y una meteorización avanzada en los planos de diaclasamiento. Los niveles IV, V y VI, los más superficiales son los menos potentes y afloran ocasionalmente en algunos sectores de la Autopista Medellín - Bogotá y en la vía al Hatillo.

- **Contactos litológicos.** El contacto con el Gneis de La Ceja es de carácter intrusivo, y se observa sobre la autopista Medellín – Bogotá a la altura del estadero La Panocha.

**Tabla 4.61. Perfil de meteorización KcdA**

<b>Horizontes III</b>	En este horizonte el Batolito está bastante fracturado, donde las diaclasas y las discontinuidades aceleran el proceso de meteorización de la roca. Es así como se desarrolla la meteorización esferoidal, generando bloques redondeados y frescos de roca, embebidos en material saprolítico. El diámetro de los bloques frescos es bastante variable pues este se encuentra controlado por la distancia entre diaclasas o discontinuidades
<b>Horizontes II y I</b>	Corresponde a los afloramientos de roca fresca, la cual no ha sido afectada o presenta un leve diaclasamiento. Algunos afloramientos con estas características se observan en la autopista Medellín - Bogotá

- **Estructuras**

Vereda Zarzal – La Luz	Dirección cizalla – Espejo de Falla	N85°E
	Diaclasas	S55°W/50°NW - N50°W/45°SW

- **Gabros de Copacabana (KgC).** Hacen parte de los cuerpos intrusivos cretáceos. Están compuestos por hornblenda y feldespato, donde la longitud mayor de los cristales de hornblenda puede alcanzar tamaños de unos ocho centímetros. La relación hornblenda/feldespato es variable, concentrándose la hornblenda de tal manera que en ocasiones constituye casi el 100 % de la roca.

Aflora en ambas márgenes del río Aburrá. En la izquierda, aflora en la vereda La Veta, en los taludes de una antigua vía que conduce a la zona de un respiradero de la hidroeléctrica Niquia - La Tasajera. Además, en esta margen del río, en los depósitos del pie de la vertiente, se encuentran bloques con tamaños métricos de gabro. En la margen derecha, algunos afloramientos se pueden observar en la vereda Alvarado, vía al Ancón Norte.

- **Perfil de Meteorización.** En los afloramientos donde fue observado este cuerpo se describen los horizontes I, II y V. En términos generales esta unidad se ha observado en estado fresco.
- **Contactos litológicos.** En la vereda La Veta el cuerpo se observa en roca fresca y es posible detectar el carácter intrusivo de este en la anfibolita. El gabro se encuentra rellenando fracturas o en forma de diques en el cuerpo de anfibolita.

**Tabla 4.62. Perfil de meteorización KgC**

<b>Horizonte V</b>	En este horizonte es notable la textura del gabro, con una granulometría limo arcillosa, las coloraciones son blancas y sobresalen las formas tabulares negras de la hornblenda. Puede alcanzar espesores de dos metros
<b>Horizontes I y II</b>	Estos horizontes, se encuentran en la parte alta de las vertientes montañosas y como bloques que conforman las quebradas de la vereda La Veta. En estos horizontes la roca está fresca, masiva, de color moteado blanco y negro, predominando el color negro de la hornblenda

- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII).** Afloran depósitos de grandes dimensiones asociados a geoformas de abanicos, están relacionadas a diferentes eventos de depósitos de flujo, tanto de lodos, como de escombros y caída de roca.
  - **Depósitos de flujos.** Se localizan sobre las vertientes montañosas, presentando una continuidad desde la parte alta hasta la base de la vertiente. Ejemplo de estos flujos con formas de abanicos se localizan en ambas márgenes del río Aburrá, en las veredas La Veta y El Noral, sector La Pitaya, margen izquierda del río, y en la vereda Ancón y en la zona urbana del municipio hacia la margen derecha del río Aburrá.

En la margen izquierda del río, depósitos de flujo cubren toda la ladera occidental del municipio. Acorde a la geomorfología de estos depósitos, se relacionan a un único abanico, continuo, cuya parte proximal se ubica en el segmento alto de la vereda La Veta y su parte distal está limitada por terrazas aluviales del río Aburrá. Las características de este depósito se observan en las veredas El Zarzal, El Curazao, El Zarzal La Luz, El Noral, sector La Pitaya y Las Margaritas.

El municipio de Copacabana, está localizado sobre un gran flujo que en la parte distal corresponde a un flujo de lodos de un metro de espesor visible. Los bloques de este depósito (observado en los barrios El Tablazo y Canoas) varían entre 20-40 %, todos meteorizados, compuestos por esquistos y anfibolita. Los clastos son

angulosos - subangulosos y no superan los 20 cm de diámetro, los cuales se encuentran embebidos en una matriz amarilla de carácter arcillo limosa.

- **Depósitos de flujos antiguos.** Afloran en la vereda El Noral, el afloramiento más representativo se localiza sobre la Autopista Norte, a la altura de la división hacia la vereda El Noral. En un segundo afloramiento, cerca de la quebrada La Pitaya, se observan horizontes meteorizados (horizontes V y VI, según Dearman, 1991) de un depósito de flujo. Este depósito está conformado por bloques heterogéneos, los cuales se observan como bloques “fantasmas” con diámetros desde pocos centímetros hasta unos dos metros. Los bloques de diámetros menores aún conservan la textura de rocas metamórficas (se observan foliados) y están embebidos en una matriz de granulometría limosa de color amarillo muy pálido. En el caso de los bloques de tamaños métricos se observa la ocurrencia de diferentes venas que se cruzan entre sí y presentan diferencias en sus colores entre blanco y amarillo pálido. Los bloques meteorizados de mayor tamaño, han generado un saprolito limo arcilloso y conservan una textura granítica. Como dato importante, se resalta la presencia de planos y estructuras tipo augen, correlacionable con una zona de falla.
- **Depósitos de flujos recientes.** Están constituidos por flujos de escombros y lodos. Los bloques en estos depósitos corresponden a rocas frescas cuya composición es predominantemente anfibolita y gabro cuyos cristales de hornblenda alcanzan tamaños de hasta cinco centímetros de longitud. El porcentaje de bloques es variable desde 10 hasta 70 %; son de formas angulares y subangulares con diámetros desde pocos centímetros hasta tamaños métricos.
- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** Los depósitos aluviales y aluviotorrenciales son producto de la depositación del río Aburrá y de sus quebradas afluentes La Chuscala, Las Catas, Piedras Blancas, El Convento en la margen derecha del río y las quebradas La Tolda, La Veta, El Cocorolló, La Pitaya y Los Aguacates en la margen izquierda.
  - **Depósitos aluviales.** Presentan una buena selección y se encuentran confinados a las llanuras de inundación del río Aburrá y sus quebradas afluentes. Los clastos son predominantemente subredondeados y la tendencia es a ser clasto-soportados.
  - **Depósitos aluviotorrenciales.** Varían en la cantidad de clastos entre un 90-50 %, dependiendo de la capacidad de transporte de cada quebrada. En general los bloques presentan mala selección, con diámetros que varían desde centímetros hasta más de dos metros. La forma de los clastos es subangulosa - subredondeada y la composición predominante es anfibolita. La matriz es de textura limosa, de color pardo.

- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** En el barrio Machado, sobre la terraza del río Aburrá se encuentra un lleno de más de un metro de espesor. Otros llenos de la zona urbana se localizan en los barrios Villanueva, El Recreo, la vereda Alvarado, entre otros.

#### 4.2.9 Municipio de Girardota

El municipio de Girardota, ubicado al norte del valle de Aburrá, presenta un relieve montañoso, de vertientes largas, escarpadas en las partes altas y con cimas agudas, las cuales limitan con zonas de colinas que conforman los altiplanos de Don Matías al norte y de Rionegro al sur. Desde la zona media-alta, donde hay un marcado quiebre de pendiente, hasta el pie de la vertiente, la pendiente se suaviza a causa de la formación de abanicos asociados a depósitos de flujo. Hacia la base de las vertientes se observa como los depósitos, continuos a lo largo del abanico, en ocasiones se interdigital con las terrazas aluviales del río Aburrá.

Desde el occidente del municipio hacia su zona central, el cauce del río Aburrá corre en sentido oeste-este. En cercanías al costado nor-occidental de la zona urbana, el cauce del río cambia su curso y corre en sentido sur-norte, a lo largo de una distancia aproximada de un kilómetro. A partir de este punto, el río cambia nuevamente su curso en sentido nor-este hasta llegar al límite con el municipio de Barbosa. En el municipio de Girardota, el río ha generado niveles de terrazas amplias y de espesor considerable, las cuales se presentan parcialmente disectadas por las quebradas afluentes del río.

La roca fresca se observa principalmente en la parte alta de las vertientes montañosas y en algunas colinas que sobresalen en los niveles más bajos de las vertientes. En la parte alta de las vertientes sur y norte, la litología corresponde al Batolito Antioqueño (hacia el este) y las anfibolitas (hacia el oeste). En las zonas media a baja de estas vertientes son comunes los depósitos de flujo que frecuentemente se encuentran cortados o cubiertos por depósitos aluviotorrenciales. Los depósitos aluviales de mayor importancia son los asociados al río Aburrá, ubicados hacia la base de las vertientes. En este contexto, las unidades geológicas que afloran en el municipio corresponden a rocas metamórficas del Complejo Cajamarca, representadas por los Esquistos de Cajamarca (TReC) y el grupo El Retiro con las Anfibolitas de Medellín (TRaM). Aflora además, haciendo parte de los intrusivos cretáceos las rocas del Batolito Antioqueño (KcdA) y los depósitos recientes, tanto de vertiente como aluviales.

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** En el sector el Totumo, en muestra de mano esta unidad corresponde a esquistos micáceos donde el principal mineral constituyente es la mica tipo moscovita que alcanza tamaños de tres a cuatro centímetros. Además aparecen cuerpos de gneis cuarzo-sericíticos, con abundantes micas, donde la

textura está definida por lentes de cuarzo. En menor proporción se observan, frente a la finca Villa Isabel, paquetes delgados de esquistos negros. En este sitio, los esquistos negros están fracturados, altamente plegados, son intruidos por diques de cuarzo y se encuentran intercalados con esquistos micáceos y gneis.

En la vereda María Paulina Vélez, vía a San Pedro, una compleja intercalación de rocas con textura esquistosa y gnéisica están afectadas por zonas de fallas frágil y dúctil. La roca predominante corresponde al gneis, el cual está constituido por cuarzo, y pocas cantidades de micas. Adicionalmente, se observa una roca con textura granítica, equigranular, constituida por hornblenda y feldespato. La presencia de estructuras tipo augen es común y en general las rocas con textura esquistosa siguen la dirección de la cizalla. En estas rocas son comunes algunas intrusiones y diques de cuarzo.

Al este del municipio de Girardota, las anfibolitas se encuentran intercaladas con paquetes de esquistos y gneises, tanto en la vertiente norte como en la vertiente sur. No obstante en la escala de trabajo 1:10.000, sólo el cuerpo de anfibolita es cartografiable. En sitios puntuales como en la vertiente norte, entre las fincas Villa Isabel y Campo Verde, vereda El Totumo, predominan sobre el cuerpo de anfibolita, intercalaciones de esquistos micáceos y en menor proporción gneis cuarzo micáceo. En la vertiente sur, en la vereda San Esteban a la altura del estadero Tres Esquinas, se encuentra un paquete de gneis, intruido por diques básicos. En esta zona es notable también la presencia de delgados lentes de anfibolita. En la parte alta de la vía que de la vereda Portachuelo conduce al municipio de San Pedro, se observa una serie de paquetes de rocas con texturas gnéisica y esquistosa, además de rocas cuya composición y textura corresponden a un gabro.

- **Perfil de Meteorización.** Los esquistos micáceos de la vereda El Totumo desarrollan horizontes de meteorización V y IV.

**Tabla 4.63. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte V</b>	Corresponde a un saprolito con intercalaciones de color gris, amarillo y blanco. Posiblemente debido a intercalaciones del esquistos con anfibolita. Conserva la textura esquistosa y son abundantes las micas. En general desarrolla espesores hasta de un metro
--------------------	---

<b>Horizonte IV</b>	Esta roca conserva la textura esquistosa y son abundantes las micas (moscovita) que alteradas toman un color rojizo. El color se presenta con intercalaciones rojas y amarillas. Este horizonte puede alcanzar 3,5 m de espesor. Las intercalaciones de gneis y esquistos observadas en la vereda María Paulina Vélez, presentan variaciones en el color entre rojo y amarillo rojizo. Son rocas altamente fracturadas con presencia de milonita y se han clasificado como horizonte IV del perfil de meteorización
---------------------	---

– **Estructuras**

Vereda El Totumo	Esquistos con intercalaciones de anfibolita, dirección de foliación	N35°E/65°NW
Estadero Tres Esquinas, vereda San Esteban	Gneis con intrusiones básicas. Foliación	N42°E/V
Vereda El Totumo, a 20 m de la entrada a la finca Villa Isabel	Intercalaciones de esquistos gneis Esquistosidad Foliación	N55°E/75°NW N60°E/80°NW
Vereda María Paulina Vélez, a 50 m de la estación	Zona de cizalla	S35°W/72°NW
Vereda María Paulina Vélez	Zona de cizalla con milonita	N22°W/72°NE

- **Anfibolitas de Medellín (TRaM).** Corresponde a las rocas del Grupo El Retiro. Los minerales presentes en la anfibolita son: feldespato y hornblenda, con variaciones composicionales detectadas por la relación de minerales claros (feldespato) y minerales oscuros (hornblenda). Las rocas predominantes son anfibolitas, donde el mineral constituyente en mayor proporción es el anfíbol. Estas rocas presentan un color oscuro, los anfíboles alcanzan tamaños milimétricos generando en muestra de mano un brillo vítreo. Rocas con estas características, en estado fresco, se encuentran usualmente en las partes más altas de las vertientes o en bloques que han sido involucrados en depósitos de flujo de la parte media a baja de la vertiente. En las anfibolitas, en proceso de meteorización, la relación feldespato/anfíbol muestra claramente las variaciones composicionales de este cuerpo, donde la cantidad de feldespato presente se ha estimado en 50%.

En el municipio de Girardota, los cuerpos de anfibolita se localizan en ambos márgenes del río. En la margen izquierda, límite con el municipio de Copacabana (al este), veredas Juan Cojo, Manga Arriba y El Totumo, el cuerpo de anfibolitas se presenta como la unidad predominante. En la margen derecha, también hacia el límite con el municipio de Copacabana y en las partes altas de la vertiente,

predominan los cuerpos de anfibolita. Los afloramientos de mayor importancia se encuentran en: vereda El Totumo, en la vía que conduce a la finca Acacias; vereda Manga Arriba, cerca a la unidad básica; vereda San Esteban, entre el estadero Tres esquinas y la escuela rural San Esteban; vereda La Holanda Parte Alta y en la vía que conduce a los municipios de San Pedro y Don Matías, vereda María Paulina Vélez.

- **Perfil de Meteorización.** La unidad anfibolita ha generado los seis horizontes de meteorización propuestos por Dearman (1991). Estos horizontes pocas veces son continuos entre sí, por ejemplo, es común observar sobre un horizonte III o IV el desarrollo de un horizonte VI.

**Tabla 4.64. Perfil de meteorización TRaM**

<b>Horizonte VI</b>	La granulometría en este horizonte varía desde limo hasta suelos arcillosos, con diferentes tonalidades de colores amarillo rojizo y amarillo pardusco. En algunos sectores son comunes las bandas de caolín, debido a la meteorización del feldespato. La consistencia es moderada y alcanza espesores hasta de cuatro metros
<b>Horizonte V</b>	La granulometría consiste de arena fina y variaciones a limo. El color característico es gris con motas blancas; donde la meteorización de los feldespatos en el saprolito permite evidenciar la textura original de la roca. Los espesores de este horizonte alcanzan tres metros
<b>Horizonte IV</b>	Consiste de una roca masiva, con foliación definida por anfíboles y feldespato. El feldespato está altamente meteorizado formando caolín e imprimiéndole a la roca una apariencia o coloración blanca, conservando el núcleo de la roca fresco y de color gris. Sobre las superficies de las diaclasas se han generado patinas con colores rojizos y negro. El máximo espesor observado es de 1,5 m y en conjunto con el horizonte III puede alcanzar cinco metros
<b>Horizonte III</b>	La roca fresca predomina sobre la roca alterada, siendo notables los cambios de color en cercanía a las discontinuidades de la roca, donde se generan patinas espesas de color negro y amarillo rojizo. En algunos afloramientos este horizonte puede alcanzar 2,5 m de espesor

**Tabla 4.64. Perfil de meteorización TRaM (Cont.)**

<b>Horizontes I y II</b>	Los horizontes I y II, se encuentran en general en la parte alta de las vertientes. En estos horizontes la roca está en estado fresco, es masiva, de color oscuro casi negro. Sobre las superficies delimitadas por los sistemas de diaclasas hay un leve cambio a un color rojizo o negro
--------------------------	--

- **Contactos litológicos.** El contacto de esta unidad con el Batolito Antioqueño se observa al norte en la vereda Juan Cojo, a la altura de la finca El Naranjal, donde una serie de cuerpos graníticos intruyen el cuerpo de anfibolita. La anfibolita y la roca granítica en esta zona se encuentran en horizontes de meteorización V y VI. En la vertiente sur, desde el oeste, limite con el municipio de Barbosa y en dirección este hasta la vereda San Esteban, se observan las rocas graníticas del Batolito Antioqueño. A partir de la vereda San Esteban hacia el límite con el municipio de Copacabana, se observa la anfibolita como unidad predominante. El contacto en esta zona se encuentra como un cambio litológico observado en la vía principal de la vereda San Esteban, entre el estadero Tres Esquinas y la escuela rural San Esteban. Adicional a los cuerpos de anfibolita, se han detectado una serie de diques gabroicos, grueso granulares, donde no se ha establecido su relación con el Batolito Antioqueño. Es decir, no es claro si estas intrusiones básicas corresponden a una fase temprana de cristalización del Batolito o son cuerpos independientes a este.

– **Estructuras**

Vereda Manga Arriba	Diaclasas en anfibolita con una densidad de 20 d/m	N19°W/42°SW
Parcelación el Limonar, Finca Fin del Afán	Diaclasas en anfibolita	N20°E/65°SE
Vereda la Holanda, parte baja	Diaclasas en anfibolita con una densidad de 15 d/m	S70°W/65°SE
Vereda la Holanda, parte alta, vía a San Pedro	Diaclasas en anfibolita	N60°E/10°SE
Vía a San Pedro, Vereda María Paulina Vélez	Diaclasas en anfibolita con una densidad de 10 d/m	N30°E/75°SE
Vereda El Totumo	Dirección de foliación de la anfibolita	S55°W/70°SE
Vereda San Esteban	Diaclasa en anfibolita	N40°E/65°NW

- **Batolito Antioqueño (KcdA).** Corresponde a intrusivos cretáceos, estas rocas en muestra de mano deja ver una mineralogía de cuarzo, biotita, plagioclasa y anfíboles. La composición de esta unidad es bastante homogénea, y dentro del municipio se han detectado pocas variaciones texturales. En términos generales, la textura de las



rocas es fanerítica y equigranular, con tamaño de grano principalmente medio a grueso.

También se pueden observar variaciones en la composición de la unidad debido a la presencia de autolitos, xenolitos y diques de cuarzo. Los autolitos son rocas finogranulares, de color negro a verde muy oscuro. Los cuales se observaron en diversos afloramientos de la margen izquierda del río. En la vereda Loma de Los Ochoa, se observan una serie de xenolitos de forma alargada, los cuales presentan una textura porfídica. En los horizontes I, II y III, la roca relativamente fresca permite detectar diques de cuarzo de diferentes espesores, los cuales son comunes.

Si bien el Batolito Antioqueño, se encuentra usualmente cubierto por depósitos hacia la parte baja de la vertiente, es la unidad que cubre mayor área en el municipio. Su composición es bastante homogénea, donde las diferencias importantes se deben a: cambios en el tamaño de los granos, contenido de autolitos y leves orientaciones de los minerales.

Los afloramientos importantes de la vertiente sur del río, se ubican en: la vereda Potrerito, cerca de la unidad básica, donde las biotitas presentan cierta orientación; la vía que conduce de la autopista norte a la vereda El Chiquero, roca fresca; la vereda La Calle, donde se observa la unidad en diferentes horizontes de meteorización; la vereda La Matica parte baja y el sector Los Gallego, donde se observó como suelos residuales y saprolitos (horizontes V y VI); la Loma de Los Ochoa, donde se puede observar en algunos taludes de la vía, de espesor considerable, los diferentes horizontes de meteorización, predominando las rocas frescas (horizontes I y II) en la parte alta de la vertiente y los saprolitos o suelos residuales en la parte baja de la misma; en la vereda La Matica Parte Alta, se observan múltiples autolitos en forma alargada, los cuales pueden ocupar más del 40 % de la roca; por último, en las veredas San Esteban y La Mata, las biotitas presentan una leve orientación.

En la vertiente norte, los afloramientos importantes se encuentran en la vereda El Barro, donde se observa la roca fresca sobre el cauce de la quebrada El Salado y en la vereda Manga Arriba y Juan Cojo, en las cuales predominan los saprolitos y suelos residuales.

- **Perfil de Meteorización.** El perfil de meteorización tiene variaciones en las características de los horizontes, algunas de ellas influenciadas por la presencia de autolitos, diques y cambios texturales y composicionales del Batolito Antioqueño. Las dimensiones de esta unidad permiten desarrollar perfiles de meteorización diversos y profundos, donde predominan los horizontes I, II, V y VI. Entre los horizontes intermedios III y IV, la meteorización esferoidal no permite hacer una clara diferenciación entre ambos. Lo anterior, debido a la dificultad para establecer el porcentaje aproximado de roca fresca, respecto a la meteorizada.

**Tabla 4.65. Perfil de meteorización KcdA**

<b>Horizonte VI</b>	En esta región del valle, los suelos residuales del Batolito Antioqueño presentan dos colores característicos: rojo y amarillo. En ocasiones, ambos colores se entremezclan en un solo horizonte, dando un aspecto abigarrado, característica típica en suelos residuales de rocas graníticas. En suelos más evolucionados, estos colores se encuentran diferenciados en dos horizontes VI, donde el suelo residual de color amarillo suprayace el suelo residual de color rojo. La granulometría del horizonte VI varía entre arcillo arenoso y limo arenoso, con presencia frecuente de granos de cuarzo y micas tamaño grava. Estos suelos residuales pueden alcanzar espesores de hasta 2.5 m
<b>Horizonte V</b>	Consiste de un saprolito, deleznable que conserva la textura granítica de la roca. Las variaciones en el color del saprolito, tienen relación con la composición mineralógica. Es decir, en rocas más ácidas, cuando la presencia de feldespato y cuarzo es mayor, el horizonte V desarrolla grus, de color blanco a pardo claro y de granulometría arenosa. Cuando hay mayor presencia de hornblendas y biotitas, el horizonte V es moteado, de colores: rojizos, blanco y parduscos, por efecto de la oxidación de las biotitas y hornblendas; en este caso la granulometría es limosa, con ocurrencia esporádica de granos de cuarzo tamaño arena
<b>Horizontes IV y III</b>	El Batolito Antioqueño está bastante fracturado y es común la presencia de diques aplíticos. Tanto las diaclasas como las discontinuidades generadas por los diques crean superficies que aceleran el proceso de meteorización de la roca. Es así como entre los horizontes IV y III se observan bloques frescos de roca, embebidos en material saprolítico. El diámetro de los bloques frescos es bastante variable pues este se encuentra controlado por la distancia entre diaclasas o discontinuidades. El alto grado de fracturamiento en rocas graníticas, favorece la meteorización esferoidal, muy común en los afloramientos de las veredas La Aguada, la Meseta y Encenillos

<b>Horizontes II y I</b>	Corresponde a los afloramientos donde la roca fresca no ha sido afectada o presenta un leve diaclasamiento. Algunos afloramientos con estas características se observan en la vía a la vereda El Chiquero, en La Mata donde el espesor máximo observable es de cuatro metros
--------------------------	--

- **Contactos litológicos.** El Batolito Antioqueño se encuentra en contacto, en su límite este, con las anfibolitas, el contacto se ha interpretado como una intrusión del Batolito Antioqueño en la anfibolita. En la vertiente norte del municipio, vereda Juan Cojo, cercanías a la finca El Naranjal se observó un contacto tajante entre saprolitos de anfibolita y cuarzodiorita. En esta vereda, el contacto se encuentra como paquetes intercalados de ambas unidades. En la vertiente sur, este contacto no es tan claro, ya que se observa sólo como un cambio litológico neto. En la vereda San Esteban, entre la escuela rural San Esteban y el estadero Tres Esquinas se observa un paquete de anfibolitas, cuyo contacto con el Batolito Antioqueño está cubierto.

– **Estructuras**

Vereda Juan Cojo - Finca El Naranjal	Contacto aparente anfibolita y cuarzodiorita	NS/60°W
Sector El Chiquero	Diaclasa	N19°W/42°SW
Vereda Loma de los Ochoa	Dirección de dique cuarzoso	N65°E/25°SE
Vereda El Paraíso	Dirección de dique cuarzoso	S40°W/70°NW
Vereda La Mata	Sistemas de diaclasas	N60°E/35°SE - N70°W/65°NE - N28°E/V

- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII).** El municipio de Girardota se caracteriza por la presencia de depósitos de flujo, tanto de lodos como de escombros, de grandes dimensiones. La geoforma asociada a estos depósitos son abanicos cuya parte proximal se ubica en la zona media-alta de las vertientes y su parte distal en el pie de la vertiente, donde se interdigita con depósitos aluviales del río Aburrá. El casco urbano del municipio tiene parte de sus terrenos sobre flujos tipo III.
- **Depósitos de deslizamiento.** Los desgarres superficiales y los deslizamientos son muy comunes en los taludes de las vías y en las vertientes de las quebradas. Son comunes en el Batolito Antioqueño, especialmente cuando predomina el horizonte V, grus, del perfil de meteorización. En esta zona, este tipo de depósitos no es muy frecuente y por lo tanto constituyen depósitos de pequeñas dimensiones, confinados a algunas vertientes de alta pendiente.

- **Depósitos de flujos.** Se relacionan a abanicos ubicados en las veredas San Andrés y La Calle; en este sector se observan diferentes eventos de depositación, los cuales presentan una matriz con granulometría arenosa de color amarillo pálido a pardo. El porcentaje de bloques es variable. La geoforma de lomos alargados, de la vertiente norte y la vertiente sur de la cuenca, está modelada en diferentes tipos de material. En la vertiente norte, los lomos están modelados en depósitos más maduros y en la vertiente sur están modelados tanto en depósitos maduros como en perfil de meteorización de Batolito y de Anfibolita.
- **Depósitos antiguos.** Constituyen las capas basales de los perfiles, presentan en promedio 40 % de bloques en estado fresco, compuestos por cuarzdiorita y esquisto. El diámetro mayor de los bloques alcanza un metro, pero predominan diámetros entre 60 y 80 cm. Los depósitos más recientes, ubicados hacia el techo del perfil, suelen involucrar materia orgánica. Estos últimos se caracterizan por presentar un porcentaje de bloques menor 10 %, frescos, con formas subredondeadas a subangulosas, diámetros hasta de 15 cm, embebidos en una matriz arenosa, de color pardo. Este tipo de flujo se presenta en las siguientes localidades:

Vereda La Matica, sector Los Gallego: los flujos son esencialmente de lodos, presentan variaciones considerables en el porcentaje, tamaño de bloques y en el color y granulometría de la matriz. Se han observado espesores de hasta dos metros. El porcentaje de los bloques varía entre cinco y 40 %, presentan formas angulosas a subangulosas y diámetros de uno a 40 cm (el grado de selección es muy variable en cada uno de los afloramientos). La matriz es limo arenosa a areno limosa con una amplia variedad de colores rojo amarilloso, rojo, pardo y pardo grisáceo.

Parcelación El Limonar, veredas Portachuelo y La Holanda; se observan dos grandes depósitos, un flujo de lodos a la base y un flujo de escombros hacia superficie. Tanto el flujo de lodos como el flujo de escombros, presentan variaciones en el porcentaje y el diámetro de bloques. La composición del flujo de escombros es predominantemente anfibolita, con formas angulosas a subangulosas y diámetros hasta de 80 cm; la matriz es limosa ocasionalmente con fracción de grava de color amarillo a pardo.

- **Depósitos recientes.** Sobre la autopista norte, desde el límite con el municipio de Copacabana y en cercanías al corregimiento del Hatillo, se encuentran una serie de cortes del talud, realizados en la parte baja de algunos lomos alargados. Los taludes realizados sobre estos lomos, que descienden desde la parte media-baja de la vertiente en dirección al río, permiten observar depósitos de flujo homogéneos, los cuales alcanzan hasta unos cinco metros de espesor visible, compuestos por bloques en diferentes estados de meteorización, 10 % en estado fresco, 10 % meteorizados, con formas subredondeadas, compuestos por

cuarzodiorita, esquistos y cuarzo y con diámetros que alcanzan hasta 15 cm, embebidos en una matriz limosa de color rojo.

En cuanto a las geoformas desarrolladas en la vertiente sur, se observan características muy similares a las descritas en la vertiente norte. En este sector, los depósitos de flujo están también relacionados a geoformas de abanico, cuyas dimensiones son mayores a las dimensiones de los abanicos de la vertiente norte. Algunos de los que mayor continuidad presentan están localizados en:

Veredas El Totumo, Manga Arriba y Juan Cojo: corresponde a la geoforma de un abanico, conformado por diferentes eventos de depósitos de flujo. Estos depósitos se caracterizan por: la presencia de bloques de anfibolita, con variedad de diámetros desde uno hasta 1,5 m, generalmente frescos, con formas subredondeadas a subangulosas y envueltos en una matriz de color amarillo-pardo, cuya granulometría es limosa con algunos fragmentos de arena y grava.

Vereda El Barro: Los bloques involucrados en estos depósitos son de anfibolita y cuarzodiorita, presentan formas subangulosas y el porcentaje de bloques es relativamente bajo, consiguiendo alcanzar valores de 40 %; la matriz es limosa de color variable entre amarillo-pardo y pardo.

- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** Los depósitos aluviales de mayor importancia son aquellos relacionados a las terrazas del río Aburrá

- **Depósitos aluviales.** Estos depósitos se caracterizan por desarrollar espesores de 1,5 cm, clastos presentes en un 30 %, frescos, de formas subredondeada a redondeada. En los bloques se identifican bloques de anfibolita, cuarzodiorita, rocas verdes, embebidos en una matriz de arena media con color pardo pálido. La margen del río, donde se ubica el área urbana del municipio, se encuentra circundada por un respaldo montañoso de forma semicircular, con el eje mayor en dirección sur. Este paisaje montañoso, en dirección al municipio, muestra un quiebre de pendiente a media ladera, donde se presentan colinas bajas y alargadas en dirección perpendicular al río. En la parte basal de las colinas, hay zonas con superficies muy suaves constituidas por depósitos de flujo que limitan con las terrazas aluviales del río Aburrá.

- **Depósitos aluviotorrenciales.** Estos depósitos están asociados a los cauces de las quebradas afluentes del río Aburrá, normalmente, ubicados en la parte media a baja de las vertientes montañosas. Algunos de estos depósitos se ubican en:

Vereda Mercedes Ábrego, cerca de la tienda “Don Roberto”, de espesores visibles de dos metros. Los bloques están presentes en un 60 % donde 40 % son frescos y 20 % meteorizados, tienen formas subangulosas a subredondeadas con

diámetros de uno a 20 cm; embebidos en una matriz arenosa de color pardo de consistencia débil.

Vereda El Totumo, frente a la finca La Pradera; tiene un espesor visible de 2,5 m con un 85 % de bloques en estado fresco, compuestos de anfibolita, de formas subangulosas a subredondeadas y de diámetro entre uno y 1,5 m. La matriz es limo arenosa de color rojo-pardo.

Vereda El Barro, asociado a la quebrada El Tigre; donde el máximo espesor visible observado es de dos metros, con 80 % de bloques en estado fresco, subredondeados a subangulosos, compuestos de anfibolita y cuarzodiorita, cuyo diámetro puede alcanzar dos metros. La matriz es limosa de color pardo.

- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** En la base de las vertientes, en ambos lados del río Aburrá, se han realizado múltiples procesos antrópicos, especialmente explanaciones. En las terrazas aluviales de la margen derecha del río, se observan varias explanaciones diseñadas para la construcción de industrias, o producto de la explotación de arenas y gravas. En la margen izquierda, tanto las explanaciones como los llenos antrópicos son el resultado de la apertura de la doble calzada de la autopista norte. Otras explanaciones más locales pueden observarse en zonas aledañas a fincas de recreo o en las vías secundarias.

#### 4.2.10 Municipio de Barbosa

El municipio de Barbosa, ubicado al norte del Valle de Aburrá, está conformado por: un respaldo montañoso de vertientes largas y empinadas, un relieve colinado hacia el pie de las vertientes montañosas y un valle aluvial amplio. El relieve montañoso está modelado en perfil de meteorización de esquistos y del Batolito Antioqueño. En contraste, el relieve colinado está modelado tanto en depósitos de flujo y aluviotorrenciales, como en suelos del Batolito Antioqueño.

En este marco geomorfológico y sobre un gran abanico modelado en un flujo de lodo, se ubica la zona urbana del municipio de Barbosa. Este abanico se encuentra circundado por el perfil de meteorización de la cuarzodiorita del Batolito Antioqueño y es incidado por quebradas que atraviesan el casco urbano en dirección SE-NW.

Según las consideraciones anteriores, para el municipio de Barbosa las unidades geológicas aflorantes corresponden a los Esquistos de Cajamarca (TReC), rocas de contacto denominadas cornubianas que no fueron cartografiadas y el Batolito Antioqueño (KcdA). Afloran también, los depósitos anteriormente mencionados.

- **Esquistos de Cajamarca (TReC).** Hacen parte del Complejo Cajamarca, son esquistos grafitosos, exceptuando los de la vereda La Chorrera, los cuales presentan un bandeamiento composicional. Estos últimos constituyen gneis con textura esquistosa, presentan un bandeamiento composicional claro, con estructuras tipo augen, las cuales son cortadas por la esquistosidad tan marcada. Una característica común a todos los esquistos aflorantes es la formación de láminas muy finas.

La unidad de esquistos se encuentra en el municipio de Barbosa, como una franja alargada que atraviesa la cuenca en dirección N-W. Específicamente, estos esquistos se observan en la vereda La Chorrera; en la vía que conduce a Alejandría; en los límites con San Vicente y Concepción, en las veredas Quintero y Cestillal, Alto de Cestillal.

- **Perfil de Meteorización.** En esta zona los esquistos desarrollan principalmente los horizontes IV, V y VI, de acuerdo a Dearman (1991).

**Tabla 4.66. Perfil de meteorización TReC**

<b>Horizonte VI</b>	Material de granulometría limosa, generalmente se presenta en colores rojizos y cuando los esquistos son muy grafitosos el color es gris plateado oscuro. Una característica distintiva, es la presencia de segregaciones de cuarzo, formando estructuras continuas, sugiriendo la dirección de la foliación. Este horizonte alcanza espesores de hasta dos metros
<b>Horizonte V</b>	Este horizonte presenta características similares a las del horizonte VI, pero conservando parte de la textura original de la roca. Puede alcanzar espesores hasta de tres metros
<b>Horizonte IV</b>	Los esquistos grafitosos, en este horizonte del perfil de meteorización son de color gris oscuro. En los planos de foliación tiene pátinas de color pardo rojizas. La alteración en los esquistos, puede formar una apariencia abigarrada de colores rojo pardusco, gris oscuro, rojo y negro

- **Contactos litológicos.** El contacto entre los esquistos y el Batolito es fallado, como puede observarse en el Alto de Cestillal, además se observan efectos de la intrusión previa al evento tectónico que los dispuso en contacto fallado.
- **Estructuras.** La foliación de los esquistos en las diferentes zonas tiene una tendencia NW. Esta dirección es concordante con la dirección de la falla Don Matías, que separa el cuerpo de esquistos del Batolito Antioqueño, y con la milonita de la zona de cizalla.

Vía a la Chorrera	Foliación gneis esquistoso	N30°W/45°NE
Vía a Alejandría	Foliación esquistos negro	N24°W/73NE

Alto Cestillal, después de finca El Campanario.	Foliación esquisto negro	N40°W/45°NE
Vereda Cestillal	Foliación esquisto negro	N45°W/50°NE
Camino de herradura a escuela Quintero	Foliación esquisto negro	N45°W/65°SW
Vía al Alto de Matasano	Foliación esquisto negro	N75°W/82°NE
Vereda La Isaza	Foliación esquisto	N50°W/73°NE

- **Cornubiana.** Es una roca de tamaño de grano arena fina a limo, muy resistente al golpe, de fractura concoidea y que genera salientes agudas propias de una roca silícea. Superficialmente, presenta una textura escamosa. En esta roca, que ha sufrido metamorfismo térmico, puede observarse una pérdida de la estructura bandeada, relictos de un protolito sedimentario, por una textura masiva rica en sílice. A nivel de perfil, la roca *in situ* presenta una meteorización física, generando bloques de espesor que varía desde 50 cm a dimensiones métricas embebidos en material de arena cuarzosa. En estado fresco, consiste de una roca muy compacta que parte por planos muy bien definidos. En estado alterado, es característico la presencia de un bandeamiento (posiblemente una estructura reliquia sedimentaria). A medida que aumenta el grado de meteorización de esta roca, se hace más evidente el bandeamiento, permitiendo resaltar las bandas de material más competente.

Esta unidad se encuentra formando un cuerpo pequeño que se ubica en la parte nor-este del municipio. Los afloramientos de esta roca se observan en la vereda Los Arrayanes, donde las canteras antiguas y abandonadas permiten ver la roca aflorando en taludes con espesores de hasta 15 m.

En las veredas Monte Redondo y Yarumito, los bloques de cornubiana y Batolito Antioqueño, conforman el principal componente de los depósitos. Los bloques de cornubiana son de gran tamaño, angulosos y se encuentran en diferentes grados de meteorización.

En la vía que conduce a Don Matías, cerca del Alto de Matasano, a una altura 1 852 msnm., se encuentra la cornubiana de color gris oscuro y de textura masiva.

- **Perfil de Meteorización.** Esta roca se encuentra en la zona desarrollando los horizontes I, II, III y IV. Cuando el bandeamiento es muy marcado, la meteorización procede más intensamente en las bandas menos competentes, generando una especie de estratificación diferencial.

**Tabla 4.67. Perfil de meteorización Cornubiana**



<b>Horizonte IV</b>	Es una roca muy masiva con partición siguiendo una tendencia laminar. Es de color gris de varias tonalidades cuando está fresca y blanco en las zonas más meteorizadas alcanza 12 m de espesor
<b>Horizontes III II y I</b>	Cuando la roca es muy masiva (el bandeamiento relicto no se observa), ésta es de color gris oscuro. En las rocas que conservan bandeamiento, es de color gris claro con bandas vino tinto de la biotita térmica

- **Contactos litológicos.** La misma definición de cornubiana, está indicando un contacto intrusivo, el cual genera en esta unidad litológica una recristalización y endurecimiento de la roca.

– **Estructuras**

Vereda Arrayanes	Diaclasas	N50°W/55°SW - N30°W/33°NE - N40°E/75°NW
------------------	-----------	--

- **Batolito Antioqueño (KcdA).** Las rocas del Batolito corresponden a rocas de tipo granítico clasificadas entre granodiorita a cuarzodiorita, los minerales constituyentes incluyen plagioclasa, anfíbol, biotita y cuarzo. La textura es fanérfica equigranular, con cristales de anfíboles tabulares, subhedrales, plagioclasas y cuarzos anhedrales y biotitas subhexagonales. El tamaño de grano es principalmente de medio a grueso.

Es la unidad de mayor extensión areal en el municipio de Barbosa y presenta variaciones composicionales importantes a lo largo de los diversos afloramientos. Dentro de los afloramientos de importancia en este sector se pueden mencionar aquellos que presentan características distintivas como: orientación de minerales, presencia de autolitos y cambios texturales y composicionales.

Dentro de las zonas donde se observa clara orientación de minerales, se destacan: la vereda El Guayabo, desde la quebrada Popalito hasta antes del club social Telecom; la vereda Calda, cerca del nacimiento de la quebrada Aguas Frías y en el camino que conduce de la unidad básica La Calda a la finca El Pedrero; y en la vereda Monte Redondo. Si bien en este último sitio la roca no se observa *in situ*, todos los depósitos presentan rocas del Batolito Antioqueño con minerales claramente orientados.

La presencia de autolitos, en el Batolito Antioqueño, es muy común en esta zona del Valle de Aburrá; son en general de composición básica, de textura finogranular. Afloramientos con estas características sobresalen en las veredas La Calda, Monte Redondo, La Aguada (cerca a finca Mirador de Dios), cerca a la desembocadura de la quebrada Aguas Frías en el río Aburrá.

Es importante resaltar zonas de cizalla, donde se desarrollan milonitas con orientación de las biotitas. Afloramientos importantes de estas zonas se encuentran en el contacto entre el Batolito y los esquistos sobre la vía que conduce a Alejandría y Concepción y en el cruce de vías de la vereda Graciano con la vía Medellín - Don Matías.

Los cambios texturales se manifiestan en cambios del tamaño de grano de los minerales. Ejemplo de esto puede observarse en la vía principal, cerca a la finca La Coralia, donde los fragmentos de cuarzo alcanzan tres milímetros de diámetro. Los cambios composicionales se manifiestan tanto en la roca fresca, como en los colores tan variados del perfil de meteorización del Batolito Antioqueño. En las zonas donde la composición es primordialmente cuarzo-feldespática, se genera un grus blanco, arenoso. Este grus puede observarse en la vereda La Cuesta (en la vía que conduce a Santo Domingo y en la quebrada Aguas Frías); en el casco urbano de municipio, barrios Guayabal y La Bomba; a lo largo de la vía a Alejandría y en la vereda Arrayanes. En contraste, cuando la composición presenta cantidades importantes de minerales ferromagnesianos, el perfil de meteorización desarrolla un abigarramiento de colores rojizos, amarillos, pardos, blancos y negros.

Dentro de las características importantes de este cuerpo, cabe resaltar la formación de organales por efecto de la meteorización esferoidal. Este tipo de meteorización genera núcleos esféricos de roca fresca, embebidos en una matriz saprolítica. Lo anterior constituye una dificultad en el reconocimiento de perfiles de meteorización y depósitos, cuyo material parental sea exclusivamente del Batolito Antioqueño.

Al interior de esta unidad se encuentran unos pequeños cuerpos intrusivos, no cartografiados, de textura porfídica, los cuales pueden observarse en la vereda La Tolda y en el límite de ésta vereda con la vereda La Gómez.

- **Perfil de Meteorización.** El perfil de meteorización tiene variaciones en las características de los horizontes, conforme a la presencia de autolitos y a los cambios texturales y composicionales del Batolito Antioqueño. Los mayores espesores del perfil de meteorización, ocurren en sitios de pendientes bajas a moderadas tales como: divisorias amplias de baja inclinación, quiebres de pendiente de la vertiente montañosa y en los relieves colinados de los segmentos de altiplanos. En estos últimos los espesores entre suelo residual y saprolito son de 40 a 50 m.

**Tabla 4.68. Perfil de meteorización KcdA**

<b>Horizonte VI</b>	Desarrolla dos tipos de horizontes: uno amarillo y uno rojizo, ambos de textura limo arcillosa a arcillosa. En ocasiones, estos dos horizontes pueden estar juntos, donde se ha observado que el horizonte amarillo suprayace el horizonte rojizo
<b>Horizonte V</b>	Tiene características dependiendo principalmente de la composición mineralógica; es decir, cuando hay alta presencia de feldespato y cuarzo, el horizonte V desarrolla un grus, blanco a pardo claro, de granulometría arenosa. Cuando hay mayor presencia de hornblendas y biotitas, el horizonte V es moteado, de colores: rojizos, blanco y parduscos, por efecto de la oxidación de las biotitas y hornblendas. La granulometría es preferentemente limosa, conservando algunos granos de cuarzo tamaño arena. Existe otra variedad de horizonte V, similar a la anteriormente descrita, excepto por el color rojizo homogéneo
<b>Horizonte IV</b>	Corresponde a una zona donde hay presencia de núcleos de roca fresca "bolas de roca" embebidos en material saprolítico tipo grus

**Tabla 4.68. Perfil de meteorización KcdA (Cont)**

<b>Horizonte III</b>	Zona donde predominan los núcleos de roca no alterados y una meteorización avanzada en planos de diaclasa.
<b>Horizontes II y I</b>	Roca fresca

- **Contactos litológicos.** El contacto con los esquistos es fallado y puede observarse a lo largo de la vía que conduce a Alejandría; en los límites con San Vicente y Concepción, vereda Quintero; en la vereda Cestillal, Alto Cestillal y en la vía al Alto de Matasano. En la vía que conduce a Alejandría, se observa en el contacto una milonita, donde la mineralogía es similar a la del Batolito por recristalización de los minerales. La milonita tiene las biotitas orientadas, es de tamaño de grano medio y presenta estructuras de deformación. La mineralogía consiste de cuarzo, feldespato, hornblenda, plagioclasa y biotita en los planos de foliación.

- **Estructuras**

Vereda Popalito	Sistema de diaclasas	N70°E/45°SE - EW/28°S
Vía a Alejandría	Foliación (contacto: esquistos batolito)	N40°W/V
Vía a Alejandría	Sistema de diaclasas	N45°W/20SW

Vía a la vereda La Chapa	Sistema de diaclasas	N72°W/V (4d/metro); N20°E/43°NW (4d/m); N72°E/50°NW (1d/m); N15°E/73°SE (4d/m)
Vereda Yarumito (vía del ferrocarril)	Sistema de diaclasas	N60°W/68°NE - EW/40°N
Vereda la Tolda (finca La Esmeralda)	Sistema de diaclasas	N33°W/80°SW
Quebrada Monteloro, sector el Hoyo	Sistema de diaclasas	N30°E/67°SE

- **Depósitos de Vertiente (Qd, QFa, QFIV, QFIII, NQFII).** En el municipio de Barbosa, afloran depósitos de deslizamiento que están relacionados a movimientos en masa, muy comunes en horizonte V del perfil de meteorización del Batolito Antioqueño, de acuerdo con Dearman (1991). Predominan los depósitos tipo flujo; los cuales se localizan a lo largo de toda el área del municipio y se encuentran desde la parte media-alta de las vertientes montañosas hasta el nivel base, conformado por el río Aburrá. Estos depósitos son de grandes dimensiones y están asociados a geformas de abanicos, con alta disección hacia el segmento distal de los mismos, generando parte del relieve colinado. La superposición de depósitos de flujo sobre un paleorrelieve modelado en perfil de meteorización y la posterior disección de ambos, determina una misma geforma de colinas que no discrimina el tipo de material parental.
  - **Depósitos de deslizamiento.** Los desgarres superficiales y los deslizamientos son muy comunes en los taludes de las vías, en las vertientes de las quebradas y ocasionalmente a media ladera. Algunos de estos desgarres pueden observarse en la vía a Concepción y Alejandría, en el Batolito Antioqueño, especialmente cuando predomina el horizonte V, grus, del perfil de meteorización. En la vereda Yarumito, en la margen derecha de la quebrada El Guayabo, se observan desgarres y deslizamientos activos.
  - **Depósitos de flujo.** En general, estos depósitos tienen características muy variadas dependiendo de la zona donde se encuentren: En el casco urbano del municipio, por ejemplo, el flujo es desde clasto-soportado (con clastos completamente meteorizados) a matriz-soportado. El alto grado de madurez de los depósitos impide identificar, en algunas zonas, si se trata de un horizonte VI, de un depósito, o si es un flujo de lodos compuesto preferentemente por material arcilloso.

El valle del río Aburrá en esta zona, presenta una densa cobertura de depósitos al norte, desde la quebrada Aguas Frías y La Calda, hasta la quebrada Cinco Riales. En este sector el valle es muy amplio, con una extensa cobertura de flujos de escombros y lodos en la base de la vertiente montañosa occidental, la cual

desplaza el cauce del río Aburrá contra los relieves colinados y lomos bajos de la vertiente montañosa oriental del valle. Estos flujos de la vertiente occidental han sepultado o circundado, relieves de colinas saprolíticas bajas.

La zona urbana del municipio de Barbosa se ubica en un abanico de grandes dimensiones modelado en flujos de lodos. Este abanico se encuentra circundado por el perfil de meteorización de la cuarzodiorita del Batolito Antioqueño y es incisado por quebradas como La López, El Niño y La Manera. Estos drenajes, de dirección SE-NW, generan una serie de depósitos aluviotorrenciales, asociados a pequeños abanicos, que se superponen a los flujos de lodos ya mencionados.

Los abanicos de mayor tamaño se encuentran hacia la parte baja de las quebradas La Calda, El Guayabo, La Chicagua y Cinco Riales, distribuidos en una extensa zona de acumulación de depósitos de flujos de escombros y lodos. Ejemplo de esto puede observarse hacia el sector de Popalito donde los flujos de lodo tienen 10 – 15 % de bloques de roca, principalmente de cuarzodiorita, en una matriz de textura arenosa, con alta presencia de granos de cuarzo; y depósitos de flujo de escombros con una relación de bloques matriz de 50:50, compuestos en su mayoría por bloques de cuarzodiorita y diorita.

- **Flujos del sector Yarumito.** Se encuentra ubicado en la parcelación el Yarumito, limitado geográficamente por la quebrada El Guayabo y la quebrada Guayabo (Cestillal) - Guayabo (Carmonita). Está compuesto por bloques entre 20-40 % (con diferentes grados de madurez), embebidos en matriz limosa de color rojo a pardo. Los clastos están compuestos por rocas del Batolito Antioqueño y cornubianas cuyo protolito se presume metamórfico. Sobre estos depósitos se modelan una serie de lomos largos que se desprenden de la vertiente montañosa, hasta llegar al cauce del río Aburrá, donde terminan. Estos flujos se superponen a paleo relieves, modelados en saprolito, llenando las paleo concavidades. En ocasiones, las colinas modeladas en el perfil de meteorización sobresalen por encima de los flujos, tal y como ocurre en el sector más nor-oriental de la vereda El Noral. La superposición de depósitos de flujo sobre paleorrelieve, modelado en perfil de meteorización y el grado de incisión, desarrollan colinas modeladas tanto en depósitos como en perfil de meteorización.
- **Depósito de flujo en las cercanías a Papelsa, vertiente sur del río Aburrá.** Limitado en la vertiente oriental por la quebrada Dosquebradas y en la vertiente occidental por la quebrada Vallecitos. En esta zona la inclinación de la vertiente es suave, correspondiente con un flujo de lodos de matriz pardo rojiza, limosa, que alcanza espesores de hasta cinco metros.
- **Depósitos de flujo en la vereda La Chapa, sobre la vía que conduce de Barbosa a Concepción.** En la vereda La Chapa, gran parte de la infraestructura

se ha construido sobre un depósito de flujo de grandes dimensiones. Presenta una matriz de granulometría limosa, de color pardo oscuro por efecto de la incorporación de materia orgánica; los clastos no superan los 10 cm de diámetro, pueden estar presentes hasta en un 50 %, están frescos, son desde subangulosos a subredondeados y están compuestos por roca del Batolito Antioqueño. La geoforma asociada a este depósito constituye un abanico de pendiente suave, sobre la cual reposan bolas de roca del Batolito Antioqueño, las cuales son residuales de la meteorización esferoidal. Pueden alcanzar diámetros hasta de tres metros y provienen de las partes altas de la vertiente montañosa.

- **Depósitos en el sector de la vereda Popalito.** Son flujos de lodo con un porcentaje de bloques entre 15-40 %, usualmente en estado fresco, con clastos de formas angulares a subangulares, embebidos en matriz arenosa de color pardo a rojo. La composición de los clastos es principalmente cuarzodiorita.
- **Depósitos Aluviales (Qal, Qat).** Están asociados a terrazas y abanicos aluviales del río Aburrá y sus quebradas afluentes.
  - **Depósitos aluviales.** En la parte más norte de la zona de estudio, también se observaron colinas modeladas en depósitos aluviales de antiguos afluentes del río Aburrá. Si bien, actualmente están asociados a un relieve colinado, producto de la incisión, probablemente su geoforma inicial pudo corresponder a abanicos de origen aluviotorrencial. Estos depósitos se caracterizan por ser moderadamente seleccionados, con clastos subangulosos a subredondeados, compuestos por cuarzo, cuarzodiorita y esquisto embebidos dentro de una matriz areno limosa, de color amarillo pálido.
  - **Depósitos aluviotorrenciales.** Se caracterizan por ser clasto-soportados, con clastos de formas desde redondeadas hasta subangulosas, de composición cuarzodiorítica principalmente con presencia de esquistos, y de clastos de diámetro desde uno hasta dos metros. La matriz de estos depósitos es parda y de granulometría arenosa. Ejemplo de este tipo de depósito se observa en la vía principal cerca de los charcos “Búcaros” y entre Popalito y La Tambora. En ocasiones, pueden observarse pequeños cerros aislados, modelados en estos depósitos, como es el caso de la quebrada La López en el sector del barrio Buenos Aires, vía al barrio San Rafael. En esta zona se observa el depósito suprayaciendo el perfil de meteorización de la cuarzodiorita. Igualmente, los depósitos aluviotorrenciales de la quebrada La Manera en el barrio Guayabal, se superponen al flujo de lodos.
- **Depósitos antrópicos - Llenos (QII).** En el sector “El Hueco”, existe un lleno antrópico suprayaciendo el flujo de lodos del área urbana del municipio. Este lleno tiene entre 10-30 cm de espesor y conforma todo el barrio “El Hueco”.

#### 4.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Colombia es un país de alta actividad sísmica generada por un complejo marco geodinámico de convergencia de las placas: Nazca, Caribe y Sur América, y dos micro placas: Panamá y el Bloque Andino. En este marco tectónico se sitúa el Valle de Aburrá, localizado sobre la Micro Placa del Bloque Andino en el extremo norte de la cordillera Central. Acorde con el contexto estructural, el Valle de Aburrá está clasificado como un área de amenaza sísmica intermedia, afectado durante su historia por sismos de intensidad baja o media, tales como el sismo del 23 de noviembre de 1979 y los sismos del 17 y 18 de octubre de 1992, provenientes fundamentalmente de las sismofuentes de Murindó, el Viejo Caldas, el Nido de Bucaramanga y el sistema de Fallas Romeral, el cual cruza el suroccidente del Valle. Aunque es importante aclarar que dentro de los sismos que han afectado el valle de Aburrá, provenientes del sistema de Fallas de Romeral, estos han ocurrido en el sector conocido como el eje cafetero.

El ambiente tectónico complejo, producto de la convergencia de placas, genera una estructura cortical con un complejo sistema de fallas regionales. Estas estructuras, en el departamento de Antioquia, están enmarcadas dentro de dos grandes sistemas de fallas aproximadamente paralelas entre sí, donde el primer sistema lo conforman la zona de fallas Palestina y el segundo sistema corresponde a Cauca-Romeral (Ingeominas, 2001). En el valle de Aburrá, conforme a la geología de la plancha 147, Medellín Oriental (Ingeominas, 2005) tres direcciones de cizallamiento predominan en esta zona: N-S, N45°E y N45°W. Lo anterior es concordante con la dirección del sistema de fallas Romeral, reportado por varios autores, donde la dirección predominante es N-S.

Al sur del valle de Aburrá se han reportado un gran número de fallas regionales y lineamientos con dos direcciones predominantes: NS a NNW al oeste del río Aburrá y una tendencia NW al este del mismo (Grosse, 1926; Case et al., 1971, González, 1980; Toussaint y Restrepo, 1984). Se destacan trazas de las fallas San Jerónimo, Minas y Santa Isabel. Al norte del valle existe otro sistema de fallas regionales con dirección NW donde sobresalen las fallas Don Matías y Rodas. El sistema de fallas con dirección NE donde las principales trazas son La Chapa y Santa Elena.

Además de los sistemas de Fallas claramente definidos, se presentan rasgos tectónicos definidos por geofomas como lomos deflectados, quebradas o corrientes asimétricas y cambios bruscos de pendientes, también aparecen a nivel de afloramiento zonas de cizalla, salvanda y un intenso fracturamiento de las rocas, pero donde no se alcanza a definir una zona de falla propiamente dicha. En este capítulo se trabajara en los sistemas principales de fallas de direcciones NS a NNW, NE y NW y su ocurrencia dentro de las unidades litodémicas que afectan.

#### 4.3.1 SISTEMA DE FALLAS NS A NNW

De acuerdo con Ingeominas (2005), el tren regional de dirección NS a NNW está conformado por estructuras de falla que influyen tanto la dirección de las fajas de rocas metamórficas y las direcciones de foliación, como la disposición de la faja de rocas ultra básicas representadas por la Dunita de Medellín. Las fallas que presentan esta dirección corresponden a:

**Tabla 4.69. Fallas NS a NNW**

Fallas	Descripción
<b>San Jerónimo</b>	Penetra al valle de Aburrá en inmediaciones del Alto de Minas, con dirección NS hasta los alrededores del municipio de Caldas, donde adopta una dirección NNW, prolongándose hacia las vertientes del río Cauca al NW del cerro del Padre Amaya. Presenta zonas de cizalla al oeste de Caldas, y La Tablaza, San Antonio de Prado y en la vía a Heliconia. En su zona de influencia, los contactos de las rocas son en general fallados y con buzamientos que varían entre 60°SW y 80°NE con tendencia vertical.
<b>Santa Isabel</b>	De dirección NS marca el contacto entre los Esquistos de Cajamarca y las Anfibolitas Granatíferas de Caldas. Se evidencian rocas fracturadas, cizalladas y plegamientos en los esquistos

**Tabla 4.69. Fallas NS a NNW (Cont)**

<b>Ancón</b>	Se referencia con una dirección N50°W en el sector de la quebrada La Romera hasta el Ancón Sur (Maya y Escobar 1985). Se observan zonas brechosas en los lechos de algunas corrientes de agua y cambios de pendientes y silletas
--------------	--



<b>La Reventona</b>	<p>Pertenciente al sistema de fallas de San Jerónimo, aparece en la cuenca de la quebrada La Reventona, de dirección NS, según fotointerpretación y revisión en campo se encontraron algunas evidencias de fallamiento como presencia de estrías, desarrollo de salvanda en una longitud de dos metros y el aumento en la densidad del diaclasamiento, desde seis diaclasas por metro a una distancia de 300 m del cauce de la quebrada, hasta 18 diaclasas por metro a cinco metros del cauce de la quebrada.</p> <p>Hacia el norte, se continúa y se marca por el cambio de pendiente de la dunita serpentizada en el sector de la cantera de La Tablaza. Hacia el norte de Pueblo Viejo, se encuentra cubierta por los depósitos de vertiente de La Estrella, Itagüí y San Antonio de Prado.</p>
<b>Tierra Amarilla</b>	<p>Reportada por Martínez et al., 1991, se localiza en la parte alta de la vereda Quebradagrande, en el municipio de La Estrella. Se reconocen expresiones como silletas y drenajes alineados con una dirección aproximada N60°W; además, se observa salvanda y la roca está altamente fracturada, lo que no permiten definir claramente familias de diaclasas.</p>
<b>La Cachona</b>	<p>La parte alta de la quebrada La Ayurá corre en sentido SN y cambia a un sentido N50°W a la altura de la desembocadura de la quebrada La Cachona. Esta dirección corresponde a un lineamiento reportado por Toro y Velásquez, 1984.</p>
<b>Don Matías</b>	<p>Documentada por Botero, 1963 y nombrada por Arango y Montoya, 1982. En la zona de estudio presenta una dirección N45°W. Su expresión morfológica en el valle es muy notoria, observándose silletas laterales en ambas márgenes del río Aburrá y estrías de falla en saprolitos de cuarzdiorita. Pone en contacto las rocas de la unidad de rocas metamórficas de la cordillera Central con el Batolito Antioqueño (Sierra y Zapata, 1989).</p>
<b>El Guadual</b>	<p>Corresponde a una falla de intrusión (Sierra y Zapata, 1989), de dirección N60°-70°W/60°NE, bordea el contacto entre el Batolito Antioqueño y el cuerpo metamórfico que aflora al suroeste de Barbosa. Aflora en la carretera que conduce al Alto de Matasanos y sobre la autopista Medellín - Barbosa, con una amplia franja de unos 80 m de milonitas en el Batolito Antioqueño y deformación frágil en las filitas.</p>

**Tabla 4.69. Fallas NS a NNW (Cont.)**

<b>El Salto</b>	Documentada por Integral, 1982, con dirección N7°W y buzamientos superiores a 65° tanto al este como al oeste. Se extiende desde la cuchilla El Contador hasta la vereda Peñolcito de Copacabana. Presenta una fuerte expresión morfológica, formando escarpes con pendientes muy pronunciadas (cuchillas Ancón Norte y Contador) y valles profundos desarrollados en los lineamientos de las quebradas (Álvarez y Trujillo, 1985).
<b>La Ese</b>	Con una dirección subparalela a la falla El Guadual, pone en contacto rocas metamórficas con el Batolito Antioqueño. De dirección aproximada N50°W, se halla cubierta en la parte baja del valle por depósitos recientes y continúa hacia el flanco oriental del Valle de Aburrá.
<b>Rodas</b>	De dirección general NS/45°NS/45°E, pone en contacto las Dunitas de Medellín con las Anfibolitas. Con buzamiento 45°NE y se ha determinado de carácter normal. No presenta evidencias de desplazamientos horizontales y con desplazamiento vertical desconocido.
<b>Calles</b>	Reportada por Ingeominas, 1983 según POT del municipio de Bello, aparece como una estructura mayor controlando el cauce de la quebrada La Chiquita del municipio de Bello, tiene un tendencia NNW.
<b>La Loca</b>	Observada en el cauce de la quebrada del mismo nombre entre los municipios de Bello y Medellín, presenta dirección N70°W/80°W afecta los gabros formado una superficie de ruptura continua por unos dos kilómetros de longitud.
<b>Chagualones</b>	Esta falla hasta ahora no ha sido reportada en la literatura ni en los trabajos consultados, controla la parte media - alta del cauce de dicha quebrada, su dirección dominante es N20°W/70°E, y afecta en una ancho seis metros la cuarzodiorita del Batolito de Ovejas, los gabros y las dunitas. No se pudo determinar el tipo de movimiento ni la magnitud del mismo, se observa en una longitud de unos 400 m, aunque por rasgos morfológicos parece seguir por todo el cauce de la quebrada hasta su nacimiento; presenta una deformación dúctil sobre los gabros, formando milonización y favoreciendo la intrusión de diques, que son cortados y desplazados por reactivaciones de la falla.

**Tabla 4.69. Fallas NS a NNW (Cont.)**

<b>La Acuarela</b>	De acuerdo con Ingeominas (2005), con este nombre se denomina una falla de rumbo de dirección N-S a NNW que se une a las trazas de falla del Sistema Belmira. Localmente esta falla se bifurca en dos trazas que limitan al Gneis Milonítico de Sajonia y lo ponen en contacto al occidente con la Dunita de Medellín y las Anfibolitas de Medellín, y al oriente con las Anfibolitas de Medellín. Esta falla, se diferencia de la falla de cabalgamiento de Rodas y por cuestiones de sinonimia con la Falla Otú – Pericos se considera más adecuado darle una denominación diferente.
<b>Romeral</b>	Denominada por Grosse (1926), hace parte del sistema de fallas Cauca-Romeral, el cual se extiende hasta el Ecuador. En el sector norte, el aspecto de esta falla es de rumbo; en el centro es una falla de compresión o inversa y al sur es de cabalgamiento.

En el estudio de microzonificación, las unidades afectadas por este sistema corresponden a Dunita de Medellín, Migmatitas de Puente Peláez, Gneis de La Ceja, Gneis de Sajonia, Anfibolitas de Medellín, Anfibolitas del Alto de Minas, Anfibolitas Granatíferas de Caldas, Esquistos de Cajamarca y esquistos de Caldas y el Complejo Quebradagrande. A continuación se presentan las unidades donde se encontraron rasgos estructurales importantes.

- **Esquistos (Incluye los esquistos de Caldas y Esquistos de Cajamarca).** Ambas unidades tiene una tendencia N-S en los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta y en los corregimientos de Palmitas y Santa Elena. En el municipio de Barbosa, esta unidad tiene una tendencia N-NW, separado por fallas, que limitan el contacto de esta unidad con el Batolito Antioqueño. En esta zona, en la vía a Alejandría, la cuarzodiorita se encuentra cizallada con dirección N24°W/73NE. Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación se presentan a seguir:

Finca Monte-Arroyo (margen E del río), La Estrella	Foliación	E-W
Vereda San José, Sabaneta	Foliación	S50°E/40-50°SW
Vereda San José parte alta, Sabaneta	Foliación	N20°E/80-90°SE
Variante a Caldas, estadero Mi Balconcito, Sabaneta	Foliación	N45°W/70°SW
Vereda La Doctora, cerca de la quebrada Sabaneta	Foliación	N5°W/20°NE - S54°E/10°NE

Cerca de la finca La Romera, Sabaneta	Diaclasas	N75°W/45°SW N85°W/75°NE	-
Vereda la Doctora, cerca a la finca la Romera, Sabaneta	Foliación	S30°E/10°SW N30°W/75°SW	-
Cercanías finca El Tierrero, Sabaneta	Foliación	N60°E/15°SE	
Vía a La Romera, 200 m de la quebrada la Doctora, Sabaneta	Diaclasas Foliación	N20°W/70°NE, 2/m N60°E/65°NW, 4/m N30°W/75°SW	
Sector El Roblal, Sabaneta.	Diaclasas	N15°E/60°NW N30°E/70°SE N15°W/15°NE	- - -
Sector San Antonio, cerca de la quebrada El Gusano, Sabaneta.	Diaclasas	N40°W/70°NE N45°E/70°SE	-
Sector de Santa Elena, municipio de Medellín.	Esquistosidad	N30°-55 °W/50°-70°SW y N45°-60°E/60°-80°SE	
	Foliación	N42°E/V - S78°E/45°SW - S75°W/35°SW N30°E/68°NW N30°E/60°SE - NS/50°W - N10°W/V - S40°E/50°E - N10°E/45°W N70°E/45°SE N55°E/50°SE	- - - - - -
	Diaclasas	EW/V - N5°W/35°EN N30°E/50°NW S35°E/40°SW - EW/35°S	- - -
Vereda El Totumo, Girardota.	Foliación	N35°E/65°NW	
Estadero Tres Esquinas, vereda San Esteban, Girardota.	Foliación	N42°E/V	
Vereda El Totumo, a 20 m de la entrada a la finca Villa Isabel, Girardota.	Foliación	N55°E/75°NW N60°E/80°NW	
Vereda María Paulina Vélez, a 50 m de la estación, Girardota.	Zona de cizalla	S35°W/72°NW	
Vereda María Paulina Vélez, Girardota.	Zona de cizalla con milonita	N22°W/72°NE	
Vía a la Chorrera, Barbosa.	Foliación	N30°W/45°NE	
Alto Cestillal, después de finca El Campanario, Barbosa.	Foliación	N40°W/45°NE	
Vereda Cestillal, Barbosa.	Foliación	N45°W/50°NE	

Camino de herradura a escuela Quintero, Barbosa.	Foliación	N45°W/65°SW
Vía al Alto de Matasano, Barbosa.	Foliación	N75°W/82°NE
Vereda La Isaza, Barbosa.	Foliación	N50°W/73°NE

- **Anfibolitas de Medellín.** Constituye un cuerpo de forma irregular, de dirección N-S (Ingeominas, 2005). El Sistema de Fallas de La Acuarela es el contacto de esta unidad con la Dunita de Medellín y los lineamientos presentes en esta unidad, tienen una tendencia N-S a N-NW. El contacto fallado con la Dunita de Medellín tiene dirección N40°W/7°W en la vía Las Palmas-Aeropuerto. En la vía que conduce al parque El Salado, cerca al colegio El Salado el contacto de la unidad Migmatitas de Puente Peláez con la Anfibolita tiene una dirección N80°W/50°N. Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación se presentan a seguir.

En el corregimiento de Santa Elena, foliación y diaclasamiento en diversos afloramientos.	Foliación	NS/subvertical - N40°E/50°E - N10°E/36°E - N10°W/50°E - N60°E/90° - N20°W/35°E - N45°E/10°E - NS/75°W - N3°W/35°
	Diaclasas	N60°W/30°E - N30°W/30°E - N30°E/50°W - N60°W/20°E - EW/75°S
Vereda Guasimalito, Copacabana.	Diaclasas	N65°W/30°SW - N80°W/55°NE - N50°E/V
Sector El Pinar, Copacabana.	Cizallas y Diaclasas	NS/70°E - N70°W/70°EN - N45°E/45°NW - N80°E/38°NW - NS/75°E
Vía al respiradero de la hidroeléctrica Niquia, Copacabana.	Diaclasa	N80°W/V
Sector La Pitaya, Copacabana.	Diaclasas	N45°W/80°SW - N30°E/30°SE - N70°E/75°SE
Sector Alto de La Virgen, Copacabana.	Diaclasas	EW/54°S
Vía Santo Domingo Guarne, cerca de la escuela, Copacabana.	Diaclasas	NS/W
Vereda Ancón, Copacabana.	Diaclasas	S15°E/85°EN - N55°E/30°NW - S5°E/60°SW
Vereda Manga Arriba, Girardota.	Diaclasas	N19°W/42°SW

Parcelación el Limonar, finca Fin del Afán, Girardota.	Diaclasas	N20°E/65°SE
Vereda La Holanda, parte baja, Girardota.	Diaclasas	S70°W/65°SE
Vereda La Holanda, parte alta, vía a San Pedro, Girardota.	Diaclasas	N60°E/10°SE
Vía a San Pedro, Vereda María Paulina Vélez, Girardota.	Diaclasas	N30°E/75°SE
Vereda El Totumo, Girardota.	Foliación	S55°W/70°SE
Vereda San Esteban, Girardota.	Diaclasas	N40°E/65°NW

- **Migmatitas de Puente Peláez.** Esta unidad presenta en general una tendencia N-S, con lineamientos y fallas de igual tendencia. Cabe resaltar la similitud de la dirección de foliación del gneis de esta unidad y los esquistos, con los lineamientos y el fallamiento asociado a la falla La Cachona, en el municipio de Envigado. La foliación de los esquistos es N30°W/75°SW y el bandeamiento del gneis es N50°W/65°SW. Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación están referenciados a seguir:

Vereda San José, Sabaneta.	Diaclasamiento. Intercalaciones con esquistos negros	N40°W/70°NE, N45°E/70°SE, N20°E/35°SW, N15°W/15°NE, N75°E/40°SE
Vía Las Palmas, Envigado.	Diaclasas	N85°W/75°N - N15°W/80°N - N55°E/60°N - N20°E/60°SE - N30°E/58°NW - N35°W/50°NE
	Bandeamiento	S80°W/55°E
	Falla	N80°W/58°SW - NS/5°E

- **Gneis de La Ceja.** El cuerpo principal tiene dirección predominante norte-sur. Algunas fajas delgadas afloran en la vertiente noroccidental del río Aburrá, con dirección N30°W (Ingeominas, 2005). Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación se muestran a continuación:

Vereda Cabuyal, Copacabana	Diaclasas	N40°W/70°EN - N48°W/V - N30°E/V
Después del túnel, autopista Medellín - Bogotá. Vereda Peñolcito, Copacabana.	Diaclasa	N5°E/60°SE

Sector Copacabana.	Yarumito,	Diaclasas	N80°E/40°SE
-----------------------	-----------	-----------	-------------

- **Gneis Milonítico de Sajonia.** Unidad de gneises y esquistos con intercalaciones de anfibolitas, fuertemente deformados y milonitizados, la cual forma una franja delgada, con dirección norte-sur en el extremo sur y N15°W en el extremo norte (Ingeominas, 2005). El Sistema de fallas de La Acuarela es el contacto de esta unidad con la Dunita de Medellín y los lineamientos en las intercalaciones con la anfibolita, tienen una tendencia N-S a N-NW. Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación están a continuación.

Vía Las Palmas - Aeropuerto, Envigado	Diaclasas	N75°E/96°W
--	-----------	------------

- **Dunita de Medellín.** Este cuerpo es elongado en dirección N-S y está en contacto fallado con los cuerpos adyacentes, con fallas de igual dirección. Por ejemplo, el borde occidental del cuerpo de Dunita en la vía Las Palmas-Aeropuerto, aparentemente es fallado, de dirección N-S a N5°W, sin observar afloramientos que permitan definir los efectos dinámicos, aunque al entrar a la unidad metamórfica, ésta corresponde a un gneis milonítico profundamente meteorizado (Ingeominas, 2005).

Vía al Plan, Envigado	Cizalla	S35°W/55°W S65°E/66°W
	Diaclasas	S20°W/V - N5°W/65°NE - N5°W/17°SW
Vereda Pericos, Envigado	Cizalla	N10°E/65°W
	Diaclasas	N50°W/45°E
Santa Elena	Falla en el contacto dunita- anfibolita	N80°W/45°S

- **Complejo Quebradagrande.** Esta unidad limitada por el Sistema de Fallas de Romeral, con su traza principal la falla San Jerónimo. Tiene una tendencia N a NNW con prolongación geográfica hacia el sur, sobre el flanco occidental de la cordillera Central y presenta una complejidad tectono-estratigráfica con contactos fallados con las unidades adyacentes. Las venas y lentes de cuarzo lechoso son paralelos a planos de cizalladura, cuando están relacionados con zonas de falla (Ingeominas, 2001). Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación se presentan a seguir.

Municipio de La Estrella	Laminación	N35°E/V (El buzamiento es vertical, ya que está afectada tectónicamente)
-----------------------------	------------	---

	Zonas de cizalla	S25°E/73°SW
	Respaldo	N-S/64°E
	Diaclasas	N85°/E45°N; N-S/73°W; N43°E/76°SE; N20°E/43°NW; EW/V; N30°E/50°NE; N75°E/50°SE; N30°E/44°SE; N-S/29°W; N45°E/67°NW N10°E/50°SE; S56°W/53°NW; S55°W/58°NW

#### 4.3.2 SISTEMA DE FALLAS NE

Las fallas de dirección NE en la Plancha 147, Medellín Oriental se pueden agrupar en dos clases o sistemas: fallas formadas en un dominio de deformación dúctil y fallas formadas en dominio de fracturamiento frágil. Las primeras conforman un sistema que se caracteriza por desarrollar zonas amplias constituidas por milonitas o lo que se denomina como neises augen miloníticos y corresponden a zonas con deformación dúctil, expuestas en superficie por procesos de exhumación, pero que se formaron en niveles de corteza más profunda, generalmente entre cinco y diez kilómetros. El segundo grupo corresponde a fallas de dominio frágil formadas como respuesta a las fallas de rumbo y cabalgamiento de dirección NS a NNW, formadas cerca a la superficie, entre cero y cinco kilómetros (Ingeominas, 2005). Dentro de las fallas con tendencia NE se destacan en este trabajo las fallas La Chapa y Santa Elena.

<b>La Chapa</b>	Presenta una tendencia NE con una extensión aproximadamente de 1.5 Km a lo largo de la loma Los Quinteros, loma El Guamal y la quebrada Ovejas. Posee una dirección N70°E/40°NW paralela a la dirección del valle y con una expresión geomorfológica de facetas triangulares y un cambio brusco en la pendiente de las laderas (Sierra y Zapata, 1989).
<b>Santa Elena</b>	Documentada por Sierra y Zapata, 1989, como lineamiento Buenos Aires y asociado a la falla Santa Elena. Evidenciado por cambios notables de pendiente y facetas triangulares, hacia la parte baja del cerro El Gallo sobre el cauce de la quebrada El Viento, presenta una zona de unos seis metros de material cizallado y dirección EW a N80°NS/45°E y buzamiento subvertical

- **Sistema de Fallas de Deformación Dúctil de dirección NE.** Las fallas de dominio dúctil con dirección NE sólo afectan las rocas metamórficas del Grupo El Retiro y las trazas o zonas de deformación dúctil mueren en el contacto con el Batolito Antioqueño (Ingeominas, 2005).



- **Sistema de Fallas de fracturamiento frágil de dirección NE.** De acuerdo con Ingeominas (2005) este sistema está constituido por lineamientos y fallas cortas que afectan las fajas de rocas metamórficas tanto al oriente como al occidente de la falla La Acuarela. Su origen se asocia al desplazamiento de rumbo de la fallas La Acuarela y La Honda, formando un sistema de fracturas distensionales. En el bloque de anfibolitas y gneis comprendido entre las fallas La Acuarela y La Honda se presentan lineamientos y fallas que afectan el interior del bloque en dirección N40 a 60°E. Al occidente de la falla La Acuarela, en el sector del cerro Pan de Azúcar se presentan dos trazas de falla o lineamientos paralelas sobre el bloque central de la Dunita de Medellín, que ponen en contacto fallado el Stock de Las Estancias y las Anfibolitas de Medellín con la Dunita (Ingeominas, 2005). Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación.
- **Anfibolitas de Medellín.** En el corregimiento de Santa Elena, se tomaron estructuras con dirección de foliación: N10°E/36°E - N60°E/90°; N45°E/10°E.
- **Migmatitas de Puente Peláez.** En la vía Palmas, Envigado, hay sistemas de diaclasas en dirección: N55°E/60°N - N20°E/60°SE -N30°E/58°NW y una foliación de S80°W/55°E. En el municipio de Sabaneta, vereda San José, las estructuras son: N45°E/70°SE, N20°E/35°SW, N75°E/40°SE.
- **Gneis de Sajonia.** Donde se tomó un sistema de diaclasas en la vía Las Palmas-Aeropuerto, Envigado de dirección N75°E/96°W.

#### 4.3.3 SISTEMA DE FALLAS Y LINEAMIENTOS NW

En la zona de estudio, el sistema de dirección NW afecta principalmente el Batolito Antioqueño. Corresponde a lineamientos, fallas y fajas delgadas de rocas metamórficas incluidas dentro del Batolito como remanentes con tendencia general N25° a 60°W (Ingeominas, 2005). Las fallas El Guadual, La Ese y Don Matías que limitan el Batolito Antioqueño de los esquistos, en el municipio de Barbosa, tienen una tendencia NW con dirección N40°W/V. Otros datos de estructuras relacionadas con los sistemas de diaclasas, tomados durante el estudio de microzonificación

- **Batolito Antioqueño**

Vereda Popalito, Barbosa.	Diaclasas	N70°E/45°SE - EW/28°S
Vía a Alejandría	Diaclasas	N45°W/20SW
Vía a la vereda La Chapa	Diaclasas	N72°W/V, N20°E/43°NW; N72°E/50°NW; N15°E/73°SE

Vereda Yarumito (vía del ferrocarril)	Diaclasas	N60°W/68°NE - EW/40°N
Vereda la Tolda (finca La Esmeralda)	Diaclasas	N33°W/80°SW
Quebrada Monteloro, sector El Hoyo	Diaclasas	N30°E/67°SE
Vereda Juan Cojo - finca El Naranjal, Girardota	Contacto aparente anfibolita y cuarzodiorita	NS/60°W
Sector El Chiquero, Girardota.	Diaclasa	N19°W/42°SW
Vereda Loma de Los Ochoa, Girardota.	Dirección de dique cuarzoso	N65°E/25°SE
Vereda El Paraíso, Girardota	Dirección de dique cuarzoso	S40°W/70°NW
Vereda La Mata, Girardota	Sistemas de diaclasas	N60°E/35°SE - N70°W/65°NE - N28°E/V
Municipio de Copacabana	Dirección cizalla - espejo de falla Diaclasas	N85°E S55°W/50°NW; 50°W/45°SW

- **Esquistos de Cajamarca.** En los municipios de Barbosa y Girardota, la unidad de esquistos se encuentra como un paquete de dirección N-W, en medio del Batolito Antioqueño y limitado de este por fallas de igual dirección.

Vereda El Totumo, Girardota	Esquistos con intercalaciones de anfibolita, dirección de foliación	N35°E/65°NW
Estadero Tres Esquinas, vereda San Esteban, Girardota	Gneis con intrusiones básicas. Foliación	N42°E/V
Vereda El Totumo, a 20 m de la entrada a la finca Villa Isabel, Girardota	Intercalaciones de esquisto gneis Esquistosidad Foliación	N55°E/75°NW N60°E/80°NW
Vereda María Paulina Vélez, a 50 m de la estación, Girardota	Zona de cizalla	S35°W/72°NW
Vereda María Paulina Vélez, Girardota	Zona de cizalla con milonita	N22°W/72°NE
Vía a la Chorrera, Barbosa	Foliación gneis esquistoso	N30°W/45°NE
Vía a Alejandría, Barbosa	Foliación esquisto negro	N24°W/73°NE

Alto Cestillal, después de finca El Campanario, Barbosa	Foliación esquisto negro	N40°W/45°NE
Vereda Cestillal, Barbosa	Foliación esquisto negro	N45°W/50°NE
Camino de herradura a escuela Quintero, Barbosa	Foliación esquisto negro	N45°W/65°SW
Vía al Alto de Matasano, Barbosa	Foliación esquisto negro	N75°W/82°NE
Vereda La Isaza, Barbosa.	Foliación esquisto	N50°W/73°NE

#### 4.4 GEOMORFOLOGÍA

En esta Sección se presenta el mapa geomorfológico del Valle de Aburrá a escala 1:10 000 como parte de este estudio y se analizan los criterios tenidos en cuenta para la jerarquización y clasificación de unidades geomorfológicas. Se discute de manera general el contexto geomorfológico regional del Valle de Aburrá tomando como información base la cartografía geomorfológica a escala 1:100.000 adelantada por CORANTIOQUIA en el territorio de su jurisdicción durante el año 2003. Además, se estudió la metodología de cartografía geomorfológica desarrollada por el CIAF (1971) para la cartografía de suelos, pero se prefirió la utilizada en el mencionado estudio de CORANTIOQUIA en razón de su mayor simplicidad. En párrafos posteriores se describirán los aspectos generales de ésta última.

##### 4.4.1 Generalidades

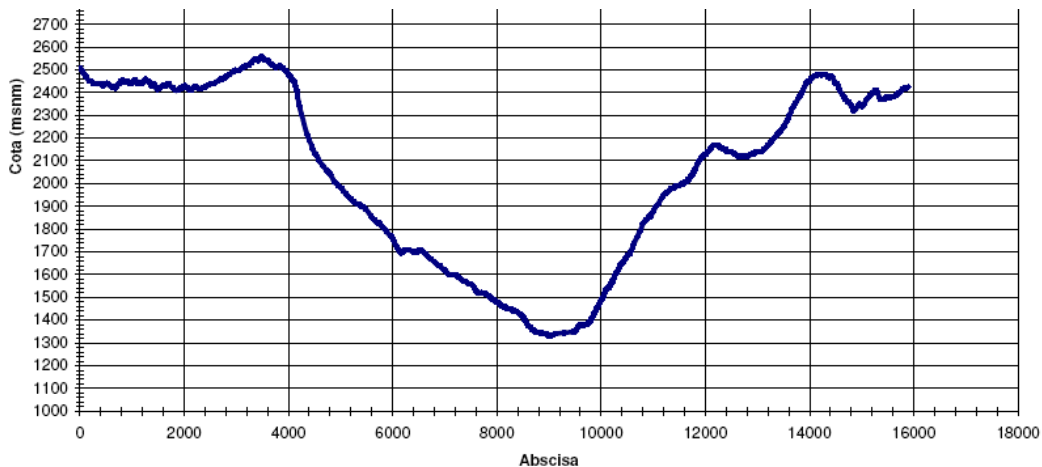
El valle de Aburrá ocupa un valle intramontano profundo y relativamente estrecho que corta un sistema de superficies de erosión o altiplanos de edad Terciario Medio, ubicados a alturas sobre el nivel del mar que oscilan entre 2 200 y 3 200 m, los cuales conforman el rasgo morfológico más sobresaliente del norte de la Cordillera Central colombiana. La Figura 4.4 muestra un perfil general del valle en su parte central, el cual ilustra bien el marco geomorfológico regional del estudio.

Como puede observarse el valle tiene, en este sector, un ancho máximo desde el borde de los altiplanos que lo flanquean, de 10 km y una profundidad de 1 000 a 1 200 m según el altiplano que se utilice para la medición.

El conjunto de altiplanos y el valle del río Medellín o Aburrá conforman la característica geomorfológica más sobresaliente de la parte norte de la cordillera central colombiana. De acuerdo con Arias (1995) el valle de Aburrá es entonces un relieve de segundo orden, posterior a los altiplanos a los cuales corta. La historia geomorfológica más

antigua de este sector de la cordillera la conforman el conjunto de altiplanos formados en sucesivos pulsos del levantamiento orogénico durante el Terciario.

El valle sería, al igual que los otros cañones y grandes valles existentes en esta zona del departamento de Antioquia, relieves de segundo orden, toda vez que estos cortan los altiplanos. Este planteamiento ha orientado la cartografía, pero como se discutirá más adelante, es necesario revisar dicho concepto pues durante este trabajo se hallaron datos que permiten pensar que el Valle de Aburrá ha tenido una historia larga y compleja que permiten formular la hipótesis de que los valles y cañones se formaron en distintos momentos de la historia evolutiva de la cordillera pudiendo ser algunos (o al menos parte de algunos), contemporáneos con la formación de los altiplanos intermedios, razón por la cual sería posible encontrar, al interior de estos valles geoformas que se generaron al mismo tiempo que los altiplanos más recientes.



**Figura 4.4 Perfil de los altiplanos y el Valle de Aburrá ubicado un poco al sur del casco urbano de Girardota (SSE – NNW)**

Mucho se ha discutido sobre el origen del Valle sin que se haya llegado a acuerdos; estudios recientes y la cartografía que acompaña este informe tiene como uno de sus objetivos aportar información de tipo geomorfológico que, junto con los nuevos datos geológicos y geocronológicos, aporten al debate, sin pretender entrar en detalles sobre el origen.

En el informe de geomorfología elaborado por GSM (2002) como parte de los estudios de la primera fase de microzonificación sísmica, se hizo un recuento breve de los estudios adelantados hasta la fecha sobre la geomorfología del Valle. Con posterioridad se realizaron estudios detallados sobre partes de éste, entre los cuales se destacan Rendón (2003), Aristizábal (2004) y Rendón *et al* (2006).

La cartografía del año 2 002 se adelantó a escala 1:25 000, para lo cual se dividió el río en cinco segmentos y se diferenciaron cuatro grandes conjuntos de unidades dentro de los cuales se separaron 12 unidades geomorfológicas principales.

Por la escala de trabajo, el mapa de 2 002 sólo pretendió separar al nivel de unidades geomorfológicas, sin hacer referencia clara a su génesis y edad. En el presente mapa, que como se ha dicho es a escala 1:10 000, se intenta una primera diferenciación de formas buscando explicaciones genéticas.

Los cuatro grandes conjuntos separados en GSM (2002) son:

- Escarpe principal
- Sistemas de filos y colinas desarrollados en materiales saprolíticos
- Superficies suaves en depósitos de vertiente
- Superficies desarrolladas en depósitos aluviales

Para esta clasificación no se consideraron los altiplanos y se asumió a todo el valle como una sola gran unidad. Las unidades geomorfológicas cartografiadas en toda la extensión se listan más abajo ya que sirven de referencia para las unidades que se seleccionaron para el presente mapa; algunas no aparecen en la nueva cartografía (Cuchillas), a otras se les modificó el nombre (se usó el término lomos en vez de filos) y se adoptaron nuevos términos como altiplanos y escarpes secundarios (se amplió la zona de trabajo). Las unidades de GSM (2002) son las siguientes:

- Escarpe principal
- Filos altos
- Filos medios
- Filos bajos
- Cuchillas
- Colinas medias
- Colinas bajas
- Peldaños
- Cerros aislados y picachos
- Vertientes suaves en depósitos
- Superficies aluviales
- Terrazas aluviales

En la Figura 4.5 se presenta el mapa geomorfológico elaborado en la primera fase y al que se ha hecho referencia en párrafos anteriores.

#### **4.4.2 Contexto Geomorfológico del Valle de Aburrá**

Los estudios geomorfológicos en Colombia han sido emprendidos por diferentes entidades, con distintos propósitos y en escalas muy variadas; un recuento de estos trabajos escapa a los alcances de este informe. No obstante lo anterior, se considera conveniente enmarcar regionalmente el trabajo que se presenta con el fin de comprender mejor el nivel de detalle de la cartografía alcanzado en este informe. A nivel nacional se toman como referencia los trabajos de Flórez *et al* (1996).

En estos trabajos, presentados a escalas regionales (1:1 500 000 y 1:3 000 000) dividen el territorio en lo que el autor denomina grupos de sistemas morfogénicos, las cuales se relacionan con las grandes unidades o regiones morfoestructurales reconocidas en el país. A continuación se listan, con el objeto de ilustrar el concepto, las grandes unidades cartografiadas en Flórez (2003).

- Alta montaña; dentro de la cual reconoce los subsistema: Glaciar, periglacial, glaciar heredado y montaña alto – andino inestable.
- Montaña media, con los siguientes subsistemas: Conos fluvioglaciares, altiplanos y sus bordes, divisorias cordilleranas medias, vertientes medias, lagos y embalses con bordes en sedimentación y red de drenaje.
- Montaña baja con: Escarpe de retroceso con pendiente cóncava, precordillera de Mandé y serranías bajas de la Guajira.
- Depresiones tectónicas con: modelados en sedimentos epicontinentales, piedemontes, y llanuras aluviales.
- Litorales con: Acantilados, acantilados heredados, terrazas fluvioamarinas, depósitos recientes del litoral pacífico, deltas, mosaico de geoformas del litoral Caribe y litoral con dunas.
- Dominio amazónico con Geoformas residuales del escudo, plataformas y sistemas fluviales.
- Dominio orinoqués con: Geoformas residuales del escudo, altillanuras, modelados aluviales de la altillanura, llanos orientales y modelado aluvial de los llanos orientales.
- Sistemas insulares con: isla de San Andrés, islas de providencia y Santa Catalina, islas del Rosario, islas de Barú y Tierra Bomba, islas de Gorgona y Gorgonilla e islote de Malpelo.

De acuerdo con el sistema cartográfico propuesto por Flórez (2003), el Valle de Aburrá y sus alrededores, que constituyen el objeto de este estudio, queda incluido en el sistema morfogénico de montaña media, subsistema superficies de aplanamiento residuales sin cobertura volcánica.

A escala más detallada, CORANTIOQUIA (2002) adelantó la cartografía a escala 1:100 000 de toda su jurisdicción que comprende la parte centro norte del departamento de Antioquia. En este trabajo, se distinguen siete unidades de relieve, que se listan a continuación:

- Superficies de erosión
- Escarpes regionales
- Cañones
- Frentes erosivos
- Planicie de depositación Mesa
- Planicie de origen volcánico de Combia
- Grandes superficies aluviales

De acuerdo con este esquema de cartografía el Valle de Aburrá corresponde a un “cañón” entallado entre el sistema de altiplanos o superficies de erosión. La jurisdicción administrativa del Valle de Aburrá queda comprendida, de acuerdo con el estudio mencionado, en tres de las grandes unidades de relieve a saber: Superficies de erosión o altiplanos, escarpes regionales y cañones. La zona del corregimiento de San Sebastián de Palmitas, del municipio de Medellín, hace parte de la vertiente oriental del gran cañón del río Cauca (frentes erosivos).

#### **4.4.3 Metodología de trabajo**

Desde un punto de vista metodológico se parte de pensar que la geomorfología interna del Valle de Aburrá debe expresar, en alguna forma, su historia evolutiva, compatible con el paisaje regional y las acumulaciones de depósitos y sedimentos. Los estudios anteriores y el mapa geológico a escala 1:10 000 que hace parte de este estudio de microzonificación, suministran la información requerida para estas interpretaciones.

De otro lado, existe importante información geocronológica que permitirá afinar los conceptos geomorfológicos que se exponen en esta cartografía. La interpretación en conjunto de la información ahora disponible escapa a los alcances de este informe, pero se requiere de manera urgente adelantar trabajos interpretativos e investigativos que aporten nuevas hipótesis a la antigua discusión académica sobre el origen y evolución del Valle de Aburrá.

Las edades radiométricas obtenidas para depósitos de vertiente y acumulaciones de cenizas volcánicas localizadas en distintos sitios al interior del Valle, permiten pensar que el proceso de apertura de éste ocurrió de manera simultánea con el proceso de levantamiento de la cordillera. Si aceptamos edades del Terciario Medio para las superficies de erosión, el Valle habría comenzado formarse en el Mioceno – Plioceno.

Edades obtenidas dentro del Valle permiten pensar que éste tenía una forma muy similar a la actual en el Plioceno cuando se depositaron muchos de los materiales fechados (Rendón *et al*, 2006).

Es muy probable que el proceso de erosión o tectónica-erosión que le dieron origen se hayan desarrollado de manera simultánea al levantamiento cordillerano de fines del Terciario y que continúa en el Cuaternario.

La hipótesis de partida para la cartografía geomorfológica que se presenta, fue que en los flancos del Valle debe estar reflejado el proceso de levantamiento; de igual manera debe quedar evidencia morfológica de la actividad tectónica que ha acompañado el proceso de levantamiento.



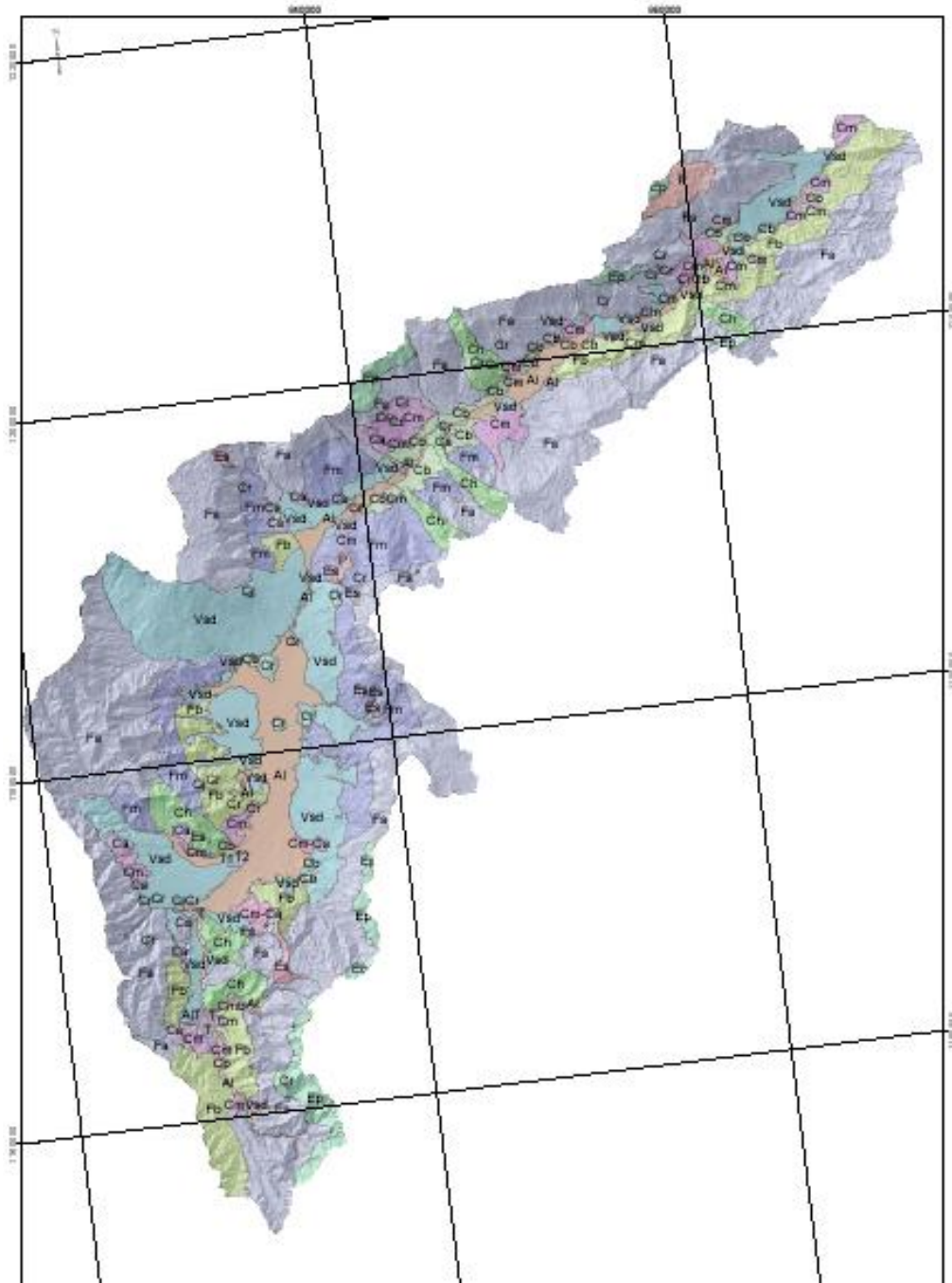


Figura 4.5 Mapa Geomorfológico del Valle de Aburrá (GSM, 2002)

Más difícil de mostrar pero que es igualmente posible, es la presencia de rasgos morfológicos resultantes de la variabilidad climática que ha experimentado la tierra durante el Cuaternario; aunque poco se sabe de los paleoclimas para el caso específico del Valle de Aburrá es claro que las grandes crisis o tiempos morfogenéticos del Cuaternario, cuando el Valle ya tenía una forma muy similar a la actual, han sido los grandes cambios climáticos conocidos en las cordilleras colombianas.

Un aspecto relevante para el estudio geomorfológico es el hecho conocido, desde tiempos de los primeros investigadores, que el Valle en su conjunto presenta peculiaridades en su forma general, lo que ha llevado a algunos investigadores a pensar que la forma actual es el resultado de una evolución compleja en la que se entremezclan procesos tectónicos y capturas entre diferentes cuencas (Rendón, 2003). Es temprano aún para discernir este tipo de hipótesis.

Con el propósito de buscar indicios geomorfológicos de este complejo pasado se diseñó el mapa que acompaña este informe en el cual se hacen tres grandes conjuntos de divisiones.

En la jurisdicción administrativa del Área Metropolitana del Valle de Aburrá se reconocen varias unidades de relieve, que se mencionan a continuación:

Altiplanos o superficies de erosión en zona rural de los municipios de bello, Medellín, Envigado, Girardota, Copacabana y Barbosa.

Cañones. Es la unidad de relieve principal, comprendida por el valle de Aburrá en su totalidad. Al occidente, en jurisdicción de Medellín se encuentra un pequeño segmento perteneciente a la parte alta del gran cañón del Cauca (frente erosivo); al sur en el municipio de Caldas se alcanza a cartografiar un sector más relacionada con la cuenca del río Amagá que con el de Aburrá. Para los efectos de la cartografía, en el área de interés se diferenciaron las tres unidades de relieve siguientes:

- Altiplanos
- Cañones (Valle de Aburrá)
- Cañón del Río Cauca

El valle de Aburrá se dividió en tres grandes segmentos atendiendo a su forma general, ancho, simetría, rasgos tectónicos y particularidades de las geoformas. El conjunto del Valle se dividió en Valle Superior, Valle Medio y Valle Inferior; las características de cada uno de estos serán explicadas más adelante. Esta división se hace atendiendo al conjunto del Valle y por eso no necesariamente coincide con la división en cinco segmentos que se propuso en el mapa geomorfológico escala 1:25 000 del año 2002, ya que ésta atendía más a la forma en fondo del Valle. En la Figura 4.3 se presenta un esquema general de la división en segmentos.

Las unidades de relieve se dividieron en unidades de Paisaje, con excepción del cañón del Cauca pues como se dijo antes, en el mapa sólo aparece un pequeño segmento de éste, difícil de poner en el contexto de la gran unidad que es este cañón.

La unidad de relieve de los altiplanos o superficies de erosión se dividió en cinco unidades de paisaje conformadas por los distintos altiplanos reconocidos y los escarpes erosivos de importancia regional que los separa entre sí. En este mapa no se diferencia el nivel de macrounidades dentro de estas unidades de paisaje dado que en el mapa sólo aparecen segmentos pequeños que hacen difícil comprender el contexto geomorfológico en que se encuentran.

La unidad de relieve altiplanos se separó con base en el trabajo de Page y James (1981) en las siguientes unidades de paisaje:

- Superficie de erosión Pre S I. Que es la más alta y erosionada, representada en el área del trabajo por la serranía de Las Baldías y Cerro del Padre Amaya al occidente y algunas de las alturas mayores en los municipios de Caldas y Envigado al sur oriente.
- Superficie de erosión S I. Correspondiente a las alturas de las zonas de San Felix al occidente del municipio de Bello y el corregimiento de Santa Elena al oriente de Medellín.
- Superficie de erosión S II. Conocida en la literatura como de Rionegro (Page y James 1981).
- Escarpes erosivo regional uno ER 1 que marca el limite entre Pre S I y S I
- Escarpe erosivo regional ER 2 que limita las superficies SI y SII.

De la unidad de relieve cañones, conformada como se dijo por el Valle de Aburrá y el segmento de Palmitas del cañón del Cauca, se dividió únicamente el valle de Aburrá. El sector de Palmitas se cartografió como una sola unidad de paisaje por la falta de contexto geomorfológico.

El valle de Aburrá se dividió en: superior, medio e inferior atendiendo a consideraciones de forma, ancho, orientación y contexto geomorfológico (Figura 4.6). Sirvieron igualmente como criterio los rasgos tectónicos principales aunque la división geomorfológica no se ajusta bien a los criterios geológicos conocidos.

El siguiente paso en la metodología fue dividir las unidades de paisaje en macrounidades geomorfológicas; esto sólo se pudo hacer en las unidades distinguidas al

interior del Valle de Aburrá ya que como se ha dicho antes, no se tiene el suficiente contexto geomorfológico para segmentar los altiplanos y escarpes erosivos regionales ni el cañón del río Cauca.

En cada uno de los valles se reconocieron macrounidades geomorfológicas denominadas en este informe como Bloques, los cuales muestran condiciones morfológicas aproximadamente homogéneas y que se distinguen, en forma clara, de los adyacentes. Se cartografiaron 27 de éstos en todo el Valle que serán descritos más adelante. Los bloques se denominan con un nombre geográfico que permita su ubicación en el mapa y una convención alfabética que hace referencia a su ubicación en uno de los valles.

Los bloques o macrounidades por su parte, fueron subdivididos en unidades geomorfológicas, dentro de las Unidades de Paisaje en el área de trabajo cuales se agrupan conjuntos de geofomas específicas, típicas de la dinámica de montaña.

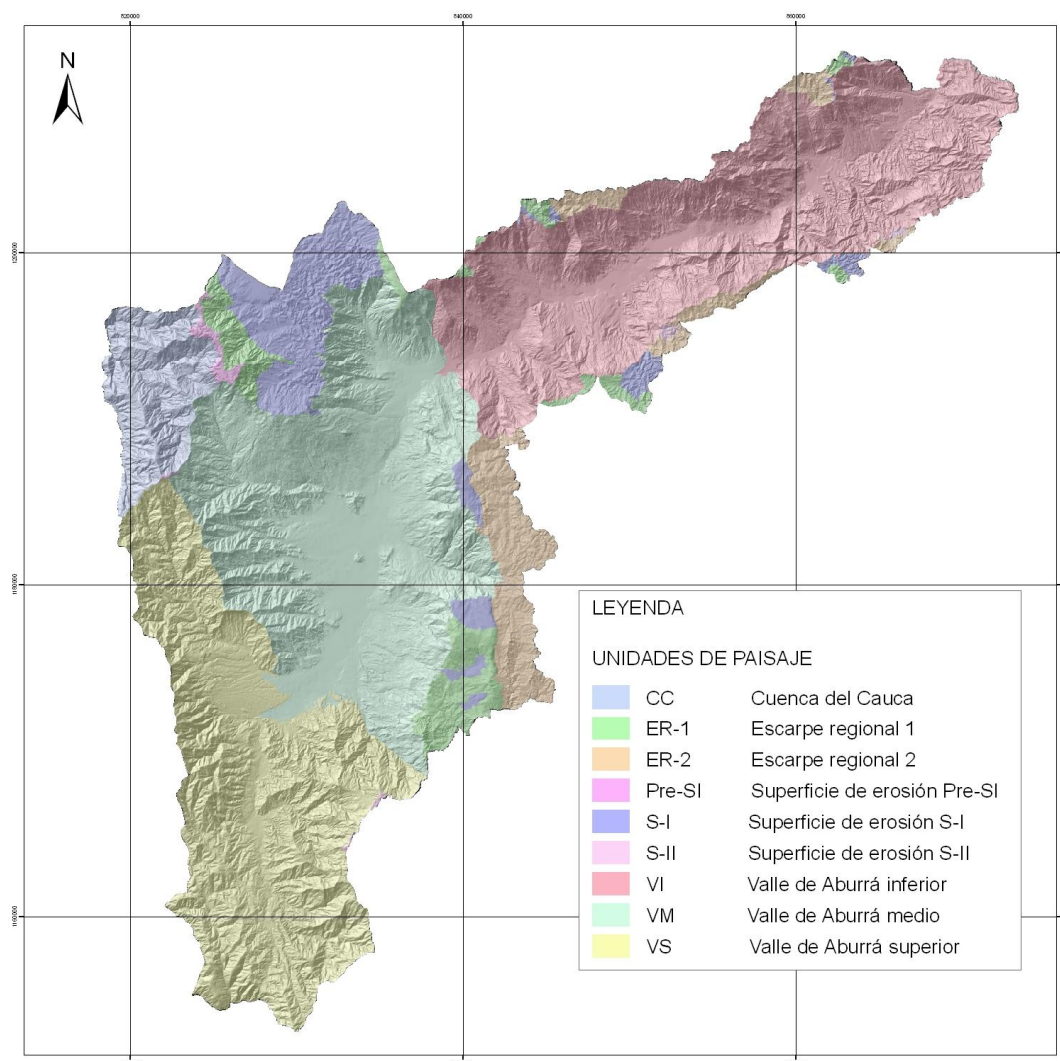
Desde un punto de vista taxonómico las unidades geomorfológicas se agrupan de manera diferente dependiendo de la escala de cartografía y tienen criterios de homogeneidad cartográfica diferentes.

A manera de ejemplo y con el fin de ilustrar el concepto dentro del cual se elabora la cartografía del Valle de Aburrá y las zonas aledañas que conforman la jurisdicción objeto de este informe, se presenta, de manera esquemática la jerarquización de unidades que se han utilizado.

- **Unidades fisiográficas.** Son las unidades mayores cartografiables a escalas regionales; su condición de homogeneidad la constituyen las condiciones de unidad geológico - estructural. La unidad fisiográfica dentro de la cual se encuentra el Valle, es la cordillera Central conformada por rocas ígneo – metamórficas principalmente del Paleozoico y el Mesozoico.
- **Unidades de relieve.** Su condición de homogeneidad la constituyen la unidad geomorfológica y geológica. El norte de la cordillera Central, por ejemplo, está conformada por rocas ígneo – metamórficas donde se preservan muy bien extensos remanentes de superficies de erosión o altiplanos cortados por profundos cañones.
- **Unidades de paisaje.** Su unidad la constituyen las condiciones geomorfológicas particulares, generadas por un conjunto específico de procesos y en un periodo de tiempo definido. los altiplanos o superficies de erosión del centro de Antioquia constituyen unidades de paisaje particular, claramente diferenciables. Los cañones que cortan estos conjuntos de altiplanos son igualmente unidades de paisajes características.

- **Macrounidades geomorfológicas.** Son conjuntos donde se pueden detallar unidades geomorfológicas o conjuntos de geoformas vinculados genéticamente. Los bloques que conforman el Valle de Aburrá son unidades de este rango.
- **Unidades geomorfológicas.** Son conjuntos de geoformas del mismo tipo, originadas por el mismo proceso y durante el mismo tiempo; una planicie aluvial, un sistema de lomos o un conjunto de colinas tipo lomerío son unidades en este rango.

Por último, a escalas de mayor detalle podrían cartografiarse geoformas o facetas que son ya rasgos geomorfológicos individuales o partes constitutivas de estas geoformas. Una terraza aluvial, un abanico aluvial o un cerro aislado son geoformas típicas para el criterio adoptado aquí.



#### Figura 4.6 Unidades de Paisaje en el área de trabajo

Como puede verse en la discusión anterior, el nivel de detalle que puede adoptarse para el mapa de la jurisdicción administrativa del área metropolitana del Valle de Aburrá, es el de unidades geomorfológicas contextualizadas dentro de macrounidades. A continuación y manera de resumen, se presenta el esquema taxonómico adoptado en este trabajo.

- **Unidad fisiográfica:** Cordillera Central
- **Unidades de relieve:** Norte de la Cordillera Central. Altiplanos y cañones (Valle de Aburrá y cañón del río Cauca).
- **Unidades de paisaje:** Tres niveles de altiplanos, escarpes erosivos regionales entre dichos altiplanos y tres segmentos de valle (valles de Aburrá superior, medio e inferior). En el cañón del Cauca no se distinguieron unidades de paisaje por la falta de contexto geomorfológico.
- **Macrounidades geomorfológicas:** al interior de los segmentos de Valle se cartografiaron Bloques. No se diferenciaron macrounidades en las unidades de paisaje de altiplanos y escarpes ni en el cañón del río Cauca por la escasa extensión dentro de la jurisdicción administrativa del Área Metropolitana.
- **Unidades geomorfológicas:** Se proponen varias unidades, denominadas: lomerío, lomos, superficies suaves en depósitos moderadamente incisadas, peldaños, picachos, superficies con baja incisión, entre otras.

#### 4.4.4 Unidades de Paisaje

Las unidades de paisaje encontradas en la jurisdicción del proyecto son cinco asociadas al sistema de altiplanos, tres en el Valle de Aburrá y una hacia la cuenca del Cauca.

Es importante recalcar que los distintos componentes del complejo escalonado de altiplanos, es decir, cada una de los diferentes nivel de superficie de erosión y los escarpes regionales de los separan serán una unidad de paisaje. Estudios más amplios podrán obligar a revisar la taxonomía de éstos ya que aquí sólo se presenta una división en el contexto de estudios referidos al Valle de Aburrá.

#### Tabla 4.70 Listado de unidades de paisaje del sistema de altiplanos escalonados

AP-Pre S-I	Altiplano superficie de erosión Pre-S-I
AP-ER-1	Altiplano escarpe regional 1
AP-S-I	Altiplano superficie de erosión S- I
AP-ER-2	Altiplano escarpe regional 2
AP-S-II	Altiplano superficie de erosión S-II

- **Superficie de erosión Pre S-I (Pre S-I).** Esta unidad de paisaje, como ya se mencionó, corresponde a los remanentes de la superficie de erosión más antigua y con menor grado de preservación en el norte de la cordillera Central. Es importante aclarar que el único parámetro usado en la zona de estudio para su identificación y cartografía fue la altura sobre el nivel de mar, la cual en general varía entre los 2 800 y 3 100 msnm. El amplio rango se explica a partir del avanzado grado de disección que presenta, incluyendo probablemente otras superficies o stages (Page y James, 1981). Teniendo en cuenta lo anterior se identificaron cuatro polígonos independientes. El de mayor extensión y donde es aún identificable un relieve relativo bajo, con pendientes muy suaves (superficie de baja incisión) se ubica en la serranía de Baldías, donde se define un corredor irregular de tendencia NNW con amplitudes inferiores a los dos kilómetros; flanqueado en su parte occidental por el escarpe erosivo asociado al frente erosivo del río Cauca, definiéndose un marcado ángulo, útil para el establecimiento de la cronología relativa de los procesos morfogénicos regionales. Hacia el flanco oriental el límite corresponde al escarpe regional 1 (ER-1), que sería la evidencia del levantamiento cordillerano entre las superficies pre S-I y S-I.

Hacia el SW de Las Baldías, en el sector occidental del Valle de Aburrá, y en coincidencia con la divisoria de aguas entre este valle y el del Cauca se presenta el Cerro del Padre Amaya, un referente geográfico regional, con alturas de hasta 3 100 msnm. Allí los topes corresponden a franjas de terreno amplias y redondeadas, que no parecen coincidir en su geomorfología con la zona de confluencia de dos activos frentes erosivos (el río Cauca y del río Aburrá).

Finalmente, se identificaron otros dos remanentes de esta antigua superficie de erosión, ambas en inmediaciones de las cabeceras de las quebradas La Miel (de Caldas) y La Ayurá (Envigado), en coincidencia con la divisoria de aguas entre el Valle de Aburrá y las cuencas del Oriente Antioqueño, jurisdicción de municipio de El Retiro. De nuevo, y adicionalmente a presentar alturas alrededor de los 3 000 msnm, estos polígonos se observan como pequeñas superficies suaves y poco incisadas.

- **Escarpe Regional 1 (ER-1).** Desde el punto de vista regional esta unidad de paisaje corresponde a los vestigios del antiguo frente erosivo generado cuando la más antigua superficie de erosión (Pre S-I) fue levantada respecto al nivel base que controló su formación. Esta unidad está entonces caracterizada por vertientes erosivas, con desarrollo de escarpes semicirculares y lomos altos cerca de las

cabeceras, además de lomos bajos y lomeríos cuando la erosión tiene un alto grado de avance.

Esta unidad de paisaje se identificó en varios lugares dentro de la zona de trabajo. Especial interés reviste la zona entre la Serranía de Las Baldías y el corregimiento de Ovejas dada la buena exposición de las geoformas típicas de esta unidad de paisaje y su suave remate, hacia la base, en la superficie de erosión S-I, situación que apoya el modelo descrito. Otros lugares de interés corresponden a la parte sur de la vereda El Plan de Medellín y la vereda Pericos de Envigado. Allí, a pesar de la topografía suave predominante, las geoformas erosivas, la orientación y su distribución altitudinal muestran que su génesis está relacionada con un frente erosivo actualmente decapitado por el Valle de Aburrá.

Otras zonas con características similares en cuanto a su relación geométrica con los altiplanos y posición altitudinal se identificaron hacia los remates superiores del Valle de Aburrá inferior, arriba de Girardota. En estos casos el frente erosivo regional 1 es concordante en su avance con la dirección de los flancos del valle.

- **Superficie de erosión (S-I).** Esta unidad de paisaje corresponde al segundo altiplano reportado por Page y James (1981), con excelente expresión en inmediaciones de la vereda Ovejas del municipio de Bello. Como ya se mencionó la cartografía de esta superficie de erosión se definió a partir de la altura sobre el nivel del mar, variando entre los 2 500 y 2 600 msnm. Sin embargo, se debe mencionar que gran parte de los remanentes asociados a este altiplano están localizados en medio de varios sistemas de fallas. Por ello su correlación definitiva depende de los resultados de estudios tectónicos de las estructuras regionales (Rendón, 2003).

Este altiplano S-I tiene también buenas expresiones al oriente de Medellín y Envigado, específicamente en las veredas El Plan, Santa Elena y Pantanillo. Allí se observan zonas muy suaves, prácticamente horizontales, cartografiadas como superficies de baja incisión; con alturas cercanas a los 2 500 msnm. Así mismo, se identificaron otros remanentes de S-I en las estribaciones superiores del Valle de Aburrá inferior (arriba de Copacabana y Girardota), los cuales en general se observan como sistemas de lomos de tendencia dendrítica y colinas bajas, denominadas lomeríos.

- **Escarpe Regional 2 (ER-2).** Al igual que el escarpe regional anterior, la génesis de este escarpe 2 está relacionada con un pulso de levantamiento cordillerano. Inicialmente la estabilidad isostática y/o tectónica permitió el desarrollo de una extensa superficie de bajo relieve relativo, denominada en este trabajo como S-I, el levantamiento posterior genera el gradiente suficiente para desarrollar un frente erosivo que remonta destruyendo los vestigios de S-I y formando simultáneamente un nuevo nivel de superficie de erosión (S-II) a una altura de unos 1 200 msnm. Este escarpe regional en la zona de estudio se observa de manera discontinua. Hacia la parte alta



de los flancos del valle inferior (jurisdicción de Copacabana, Girardota y Barbosa) se observan algunas vertientes suaves a moderadas, esculpidas como sistemas de lomos bajos, las cuales presentan un marcado ángulo con dichos flancos, indicando la superposición de eventos geomorfológicos.

Así mismo, existen otras grandes extensiones de este escarpe regional en la zona de Santa Elena y al oriente de la vereda El Plan. En este sector a pesar del bajo relieve relativo se observa el desarrollo de un sistema dendrítico de lomos bajos, conectados en algunos tramos con la cuenca del río Aburrá (A través de la quebrada Santa Elena) y en otros con la cuenca del Ríonegro, mostrando ya un avanzado estado de incisión de la antigua superficie de erosión S-I, razón por la cual se cartografió como parte del escarpe regional 2.

- **Superficie de erosión (S II).** Es la mejor conservada de todas y su mejor expresión se encuentra en la zona de Guarne, Marinilla y Rionegro al oriente del departamento y por fuera de la zona de interés de este estudio. Sin embargo, al parecer existen algunos remanentes de esta superficie en la parte alta de Girardota y Barbosa. La altura típica de ésta es cercana a los 2 200 msnm. Este valor fue utilizado como el principal parámetro cartográfico, por ello trabajos futuros de mayor detalle, que permitan conocer la actividad tectónica de las estructuras cercanas, podrán variar la cartografía acá planteada.

Los remanentes de este nivel de superficie de erosión al interior del la zona de trabajo son de poca extensión y están caracterizados por presentar sistemas de lomos, superficies de baja incisión y lomeríos bajos; especialmente cuando se localizan cerca a las vertientes superiores de la cuenca del río Aburrá.

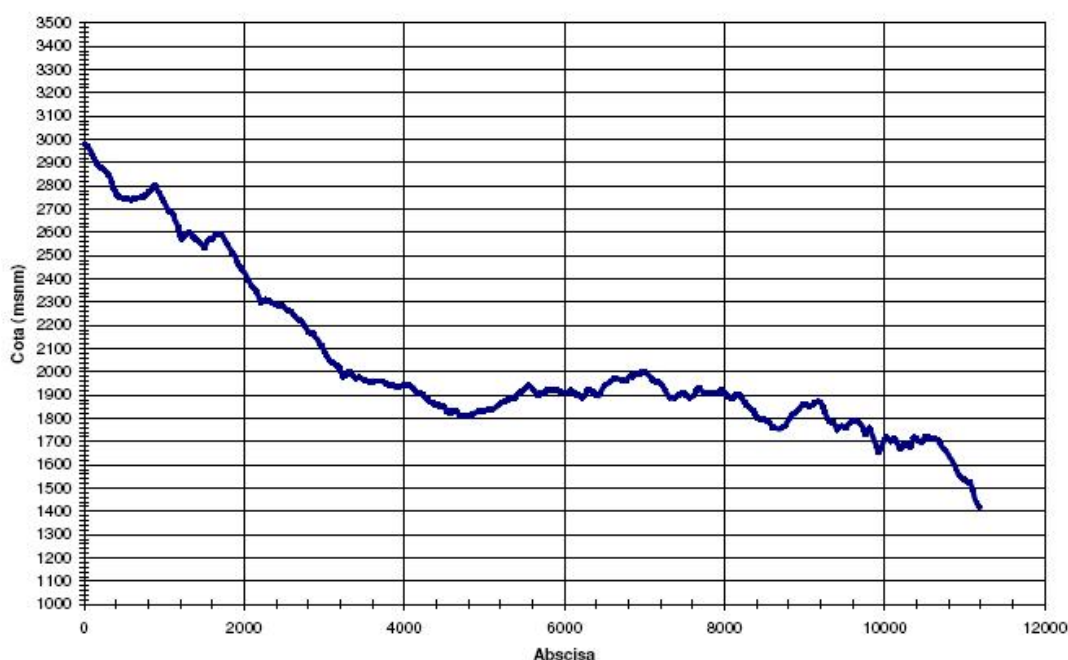
Como se dijo más arriba, el valle del río Medellín se dividió en tres grandes segmentos con base en las características generales del conjunto; a continuación se describe cada uno de los valles, cartografiados como unidades de paisaje.

- **Valle de Aburrá Superior (VS).** Desde los nacimientos del río Medellín o Aburrá en el alto de San Miguel hasta una línea imaginaria compuesta por la divisoria izquierda de la cuenca de la quebrada Doña María, incluyendo el cerro de Padre Amaya; hasta la cabecera de la quebrada Ayurá en Envigado, usando el curso de agua como divisoria.

Este valle es estrecho con una forma de “V” asimétrica característica, entre el nacimiento y el Ancón Sur en La Estrella (Figura 4.7). A partir de este último sitio el valle comienza a ensancharse en los municipios de la Estrella, Itagüí, Sabaneta y Envigado. El fondo de este segmento de Valle presenta dos pequeños ensanchamientos que coinciden en su localización con los cascos urbanos de Caldas y el corregimiento de La Tablaza de La Estrella.

La ladera occidental tiene una marcada influencia morfoestructural por parte de un sistema de fallas que se extiende desde el Alto de Minas hasta la zona del Alto del Padre Amaya y cuya traza principal se conoce como Falla de San Jerónimo. Al oriente ha sido cartografiada una falla de menor expresión morfológica que ha sido denominada falla Santa Isabel.

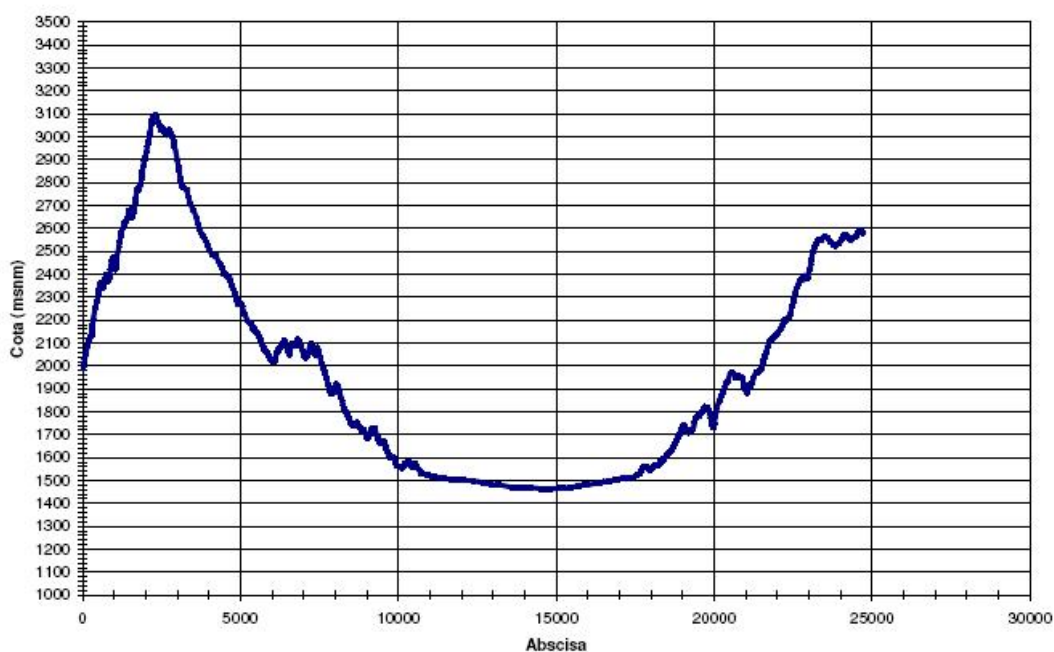
Geomorfológicamente el Valle de Aburrá Superior es asimétrico, al oriente limita con los Pre S-I y S-I, y al occidente con un remanente de Pre S-I (Padre Amaya) y la cuchilla de Romeral que lo divide del cañón del Cauca.

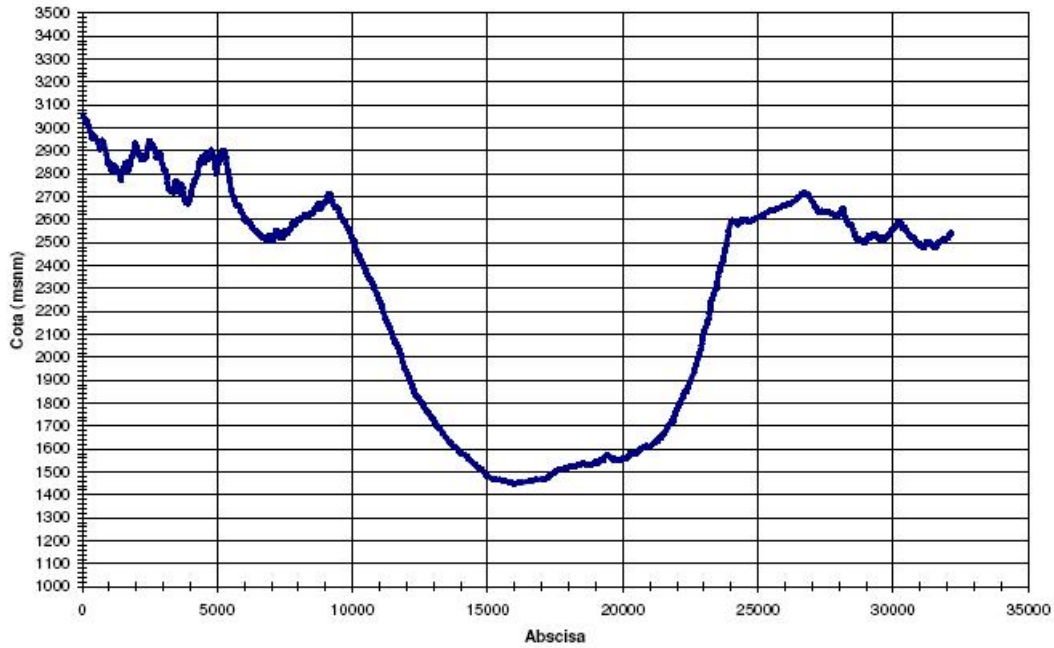


**Figura 4.7 Perfil transversal del Valle de Aburrá Superior en la zona al sur del casco urbano de Caldas (E-W)**

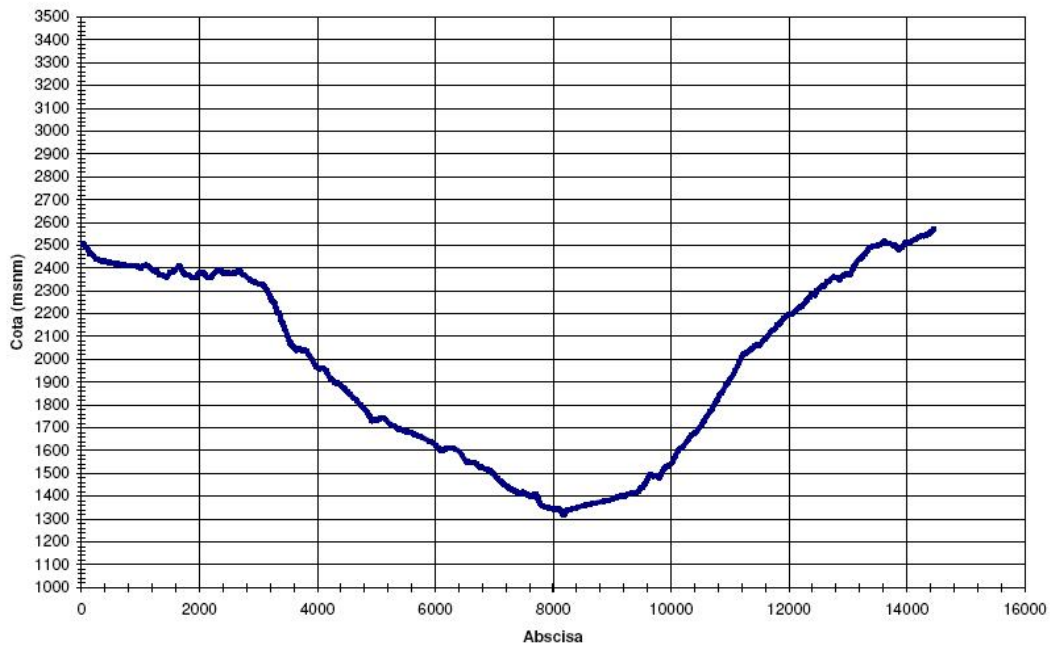
- **Valle de Aburrá Medio (VM).** Se extiende aproximadamente desde los municipios de Itagüí y Envigado hasta los límites entre Bello y Copacabana. Es el valle más ancho, con un fondo amplio y plano, flanqueado por superficies suaves en distintos depósitos de vertiente, sistemas de colinas y lomos que terminan en la parte más alta en escarpes lineales que marcan el límite del valle y los altiplanos. La Figura 4.8 muestra las dimensiones del valle Medio, la forma del fondo y las relaciones con los altiplanos de Serranía de Las Baldías, San Félix y Santa Elena.
- **Valle de Aburrá Inferior (VI).** Se extiende desde los límites entre Bello y Copacabana hasta el municipio de Barbosa, es marcadamente más estrecho,

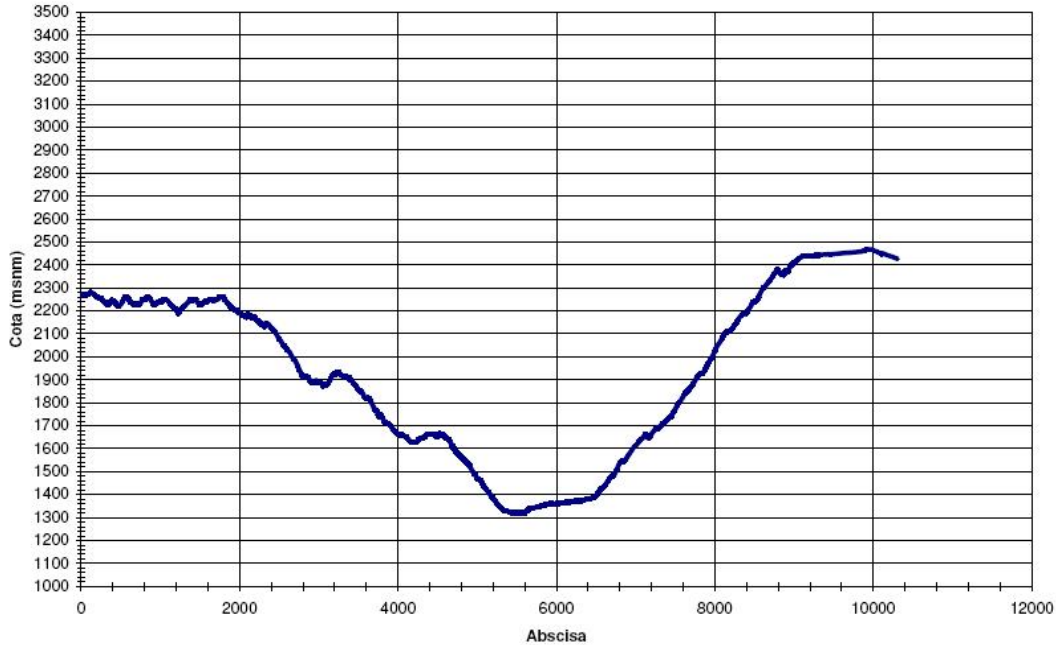
simétrico y de flancos muy paralelos indicado por su patrón de drenaje. Tiene abundantes depósitos de vertiente, especialmente en inmediaciones de los cascos urbanos mencionados, y una llanura aluvial de amplitud moderada. Sus límites son los altiplanos S-I bien conservados y S-II más deteriorado. Existen rasgos morfotectónicos muy claros en ambas vertientes principalmente al oriente de Girardota. La Figura 4.9 muestra varios cortes de este segmento, incluyendo los altiplanos y el valle en forma de cañón.





**Figura 4.8 Perfiles esquemáticos transversales al Valle de Aburrá Medio a la altura de Medellín (Valle Medio)**





**Figura 4.9 Perfiles esquemáticos del Valle de Aburrá Bajo**

- **Cuenca del Cauca (CC).** Esta unidad de paisaje, como ya se mencionó, corresponde a una pequeña porción de la vertiente oriental del cañón del Cauca (Unidad de Relieve). Por su escasa extensión respecto a la vertiente mencionada no es factible contextualizarla geomorfológicamente.

En esta zona predominan las laderas empinadas e incluso escarpadas, asociadas a al frente erosivo del Cauca contra la cordillera Central, el cual avanza a través de las cabeceras de las quebradas La Chuscal, La Potrera y La Frisola. Hacia la parte baja, donde se localiza la antigua vereda La Aldea la morfología presenta un fuerte control estructural, con presencia de picachos, peldaños y otros rasgos morfotectónicos; asociados todos ellos al sistema Romeral.

#### 4.4.5 Macrounidades

Como se dijo antes, las macrounidades geomorfológicas agrupan diferentes unidades geomorfológicas o conjuntos de geofomas relacionadas genéticamente.

En el mapa que se presenta junto con esta memoria se separaron 27 macrounidades o bloques en el valle; 14 en el valle Superior, 9 en el valle de Medio y 3 en el inferior.

En las otras Unidades de paisaje, como en la cuenca del Cauca, no se diferenciaron bloques o macrounidades dada la poca extensión que estas tienen en la región cartografiada.

El bloque BCRA se encuentra igualmente por fuera del Valle y hace parte de las cabeceras del río Amagá, el cual drena hacia el río Cauca; sin embargo por su firma geomorfológica similar al Valle de Aburrá se dejó incluida en éste.

En párrafos anteriores se hizo referencia a la nomenclatura adoptada para los diferentes bloques y que facilite la lectura del mapa. En cada bloque se trató de agrupar condiciones morfológicas homogéneas que le dieran un aspecto o “firma geomorfológica” claramente diferenciables; esta separación es el resultado de un análisis subjetivo, en el cual se trató de encontrar lo común al interior del bloque y que a su vez los distinguiera de los bloques próximos.

La “firma” de cada bloque puede estar relacionada con condiciones geológicas, ubicación altitudinal en el conjunto del Valle, formas erosivas dominantes, rasgos de carácter morfotectónico, predominio de uno o varios tipos de unidades geomorfológicas o incluso orientación predominante de alguno de los rasgos que la definen. A continuación se detallan estos bloques por cada uno de los valles definidos antes.

En el Valle Superior se distinguieron 14 bloques. En la Tabla 4.71 se presenta el listado general de Bloques o Macrounidades de este segmento.

**Tabla 4.71 Listado de Bloques (Macrounidades) del Valle de Aburrá Superior**

VS-BAM	Valle superior bloque Alto de Minas
VS-BCRA	Valle superior bloque cabeceras Río Amagá
VS-BDM	Valle superior bloque Doña María
VS-BESP	Valle superior bloque La Estrella-San Antonio de Prado
VS-BK	Valle superior bloque Kachotis
VS-BLC	Valle superior bloque La Corrala
VS-BLCU	Valle superior bloque La Culebra
VS-BMR	Valle superior bloque Monteredondo
VS-BO	Valle superior bloque Oriental
VS-BQLC	Valle superior bloque quebrada La Candela
VS-BR	Valle superior bloque Romeral
VS-BTPV	Valle superior bloque Tablaza-Pueblo Viejo
VS-BVA	Valle superior bloque Valeria Alta
VS-FV	Valle superior fondo de valle

- **Bloque Cabeceras del río Amagá (VS-BCRA).** Como se mencionó, esta macrounidad se localiza por fuera de la cuenca del río Aburrá, aunque no presenta los

rasgos típicos de fuerte incisión de la cuenca del Cauca; por el contrario mantiene una particular similitud morfométrica con la serie de macrounidades orientales del Valle Superior.

Se localiza en el extremo sur occidental del Valle de Aburrá, con una tendencia N-S, limitada tanto al occidente como al oriente por los cauces de varias quebradas afluentes del río Amagá. Define una especie de lomo regional con un efecto morfológico de la Falla Romeral. Tiene, hacia el occidente, una vertiente empinada a escarpada mientras al oriente es moderada a empinada con desarrollo sobre ambos flancos de pequeñas vaguadas secundarias de tendencia E-W poco entalladas en general.

Esta macrounidad se distribuye entre los 1 500 y 2 100 msnm aproximadamente y tiene como particularidad la presencia de zonas suaves, poco incisadas hacia el tope, con alturas entre los 2 000 y 2 100 msnm que cambian abruptamente hacia los flancos del lomo. Adicionalmente se identificaron colinas altas en suelos residuales asociadas a la traza de la falla mencionada. Esta macrounidad coincide cartográficamente con el Stock de Amagá, que define una homogeneidad litológica.

- **Bloque Kachotis (VS-BK).** Se localiza la oriente de la anterior e involucra la divisoria de aguas entre los Valles del Cauca y de Aburrá, situación que se puede evidenciar en el estadero Kachotis, sobre la vía Medellín – Suroeste antioqueño, de donde toma el nombre que se propone.

Está limitado al occidente por cauces afluentes del río Amagá y al oriente por otros que fluyen al río Aburrá por su margen derecha; estos últimos siguen la traza de falla de San Jerónimo.

Las alturas de la macrounidad están comprendidas entre los 1 500 y 2 250 msnm; del lado de la cuenca de río Amagá descienden hasta los 1 500 m, mientras que hacia el río Aburrá desciende sólo hasta los 1 850 m. Como característica fundamental de esta macrounidad resalta la presencia de lomos regionales sistemáticos de tendencia N45°E, en coincidencia con la orientación de varios lineamientos tectónicos conjugados a las trazas de las fallas Romeral y San Jerónimo.

Hacia la divisoria de aguas entre las cuencas los lomos tienen topes estrechos y suaves donde incluso se observan pequeñas colinas. Hacia la parte inferior se hacen agudos y empinados. La vertiente hacia el río Amagá presenta vaguadas profundas y bien definidas con laderas empinadas a escarpadas, evidencia del agresivo avance del frente erosivo del río Cauca. Por el contrario, hacia la cuenca del río Aburrá, la topografía es ondulada con vaguadas irregulares y menos incisadas, presentando incluso zonas de colinas bajas en suelos residuales cerca al límite oriental de la macrounidad.

La unidad se caracteriza igualmente por rasgos morfológicos con una clara influencia tectónica tales como pequeñas cuencas cerradas anómalas rellenas con depósitos de vertiente. Desde el punto de vista litológico la composición es homogénea, correspondiente a rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande con fuertes efectos tectónicos.

- **Bloque Alto de Minas (VS-BAM).** Esta Macrounidad corresponde al extremo sur del área de trabajo, limitado al oriente por el cauce de la quebrada Santa Isabel, al norte por el cauce del río Aburrá, al sur por la divisoria de la cuenca de este río y al oriente por el cauce de la quebrada La Salada, afluente del río Aburrá por su margen derecha. Se extiende entre las cotas 1 800 y 2 700 msnm, en inmediaciones del Alto de Minas.

Como característica particular se tiene la presencia de lomos regionales rectilíneos de tendencia N-S, paralelos y en gran medida controlados por las fallas y lineamientos del Sistema Romeral, especialmente la falla San Jerónimo, en medio de las cuales se han desarrollado valles en “V” con flancos moderados a empinados, de fondo estrecho y de tope agudo pero de pendiente longitudinal baja.

Ejemplos de estos valles son los asociados a las quebradas La Salada, La Mina y el tramo del río Aburrá aguas arriba de la quebrada La Clara. Hacia el extremo norte de esta macrounidad, sobre el lomo que separa las desembocaduras de las quebradas La Mina y La Salada, se observa una zona amplia, de topografía suave, con espesas capas de cenizas volcánicas y poca incisión y con una altura promedio de 1 920 msnm.

Al sur de esta macrounidad, hacia la divisoria de aguas de las cuencas de las quebradas Santa Isabel y La Mina, se identificó una zona de topografía suave y poco incisada; este lugar, con una altura aproximada de 2 500 msnm, tiene condiciones topográficas y de cobertura de cenizas volcánicas similares a las descritas en los remanentes de las superficies de erosión, al oriente del Valle de Aburrá.

Rasgos morfotectónicos como facetas triangulares con excelente grado de conservación y pequeñas cuencas cerradas fueron también identificados dentro de esta macrounidad, asociados claramente con las fallas del Sistema de Romeral y estructuras conjugadas de tendencia N40°W. El resto de área corresponde a lomos secundarios desarrollados en sentido E-W, incisando los flancos del sistema de lomos principales N-S.

- **Bloque Monteredondo (VS-BMR).** Esta macrounidad se localiza al suroeste de la cabecera municipal de Caldas, involucrando nuevamente la divisoria de aguas entre el Valle de Aburrá y el río Cauca. Está limitada al oeste por cauces de las cabeceras



del río Amagá (quebrada Tablacitas), al este por el río Aburrá (aguas abajo de La Clara), al norte por el cauce de la quebrada La Valeria, al sureste por el rasgo morfológico asociado a la falla San Jerónimo y a suroeste por la quebrada La Salina (cuenca del Cauca). Se distribuye entre las cotas 1 750 y 2 150 msnm y se caracteriza por una red de drenaje de trazado dendrítico, de incisión moderada, con desarrollo de lomos irregulares y bajos con topes estrechos pero de muy baja inclinación longitudinal.

Sobre este bloque se encuentra la vía Amagá – Angelópolis cuyo trazado la cruza en sentido W-E, llegando a la parte alta (divisoria de aguas), sector de Monteredondo, donde se observa una topografía suave, ondulada e incluso colinada, con una espesa cobertura de cenizas volcánicas y a la que sobreimpone una generación más reciente de vaguadas que drenan hacia ambas cuencas.

La altura máxima alcanzada en este tramo es de 2 100 msnm sin cambios considerables en sentido N-S. Hacia el occidente se definen las vaguadas estrechas del frente erosivo del Cauca, con vertientes moderadas a empinadas, de fondos lineales y estrechos. Hacia el oriente, las vaguadas del frente erosivo del río Aburrá, son menos profundas, con laderas moderadas y cauces más sinuosos y entallados, llegando incluso a definir hacia la vertiente suroccidental del municipio de Caldas una zona de colinas medias a altas en suelos residuales del Complejo Quebradagrande.

Hacia el sur del casco urbano de este municipio, en inmediaciones de la quebrada La Lejía, por la vía Medellín – Amagá, se observan superficies suaves desarrolladas sobre antiguos depósitos de vertiente con un grado bajo de incisión. Finalmente, en los límites con el bloque Kachotis (sector de Primavera) se observa una serie de anomalías geomorfológicas con un claro origen tectónico, alineadas según la traza principal de la falla San Jerónimo; se observan escarpes, facetas triangulares y cuencas cerradas (Rendón, 2003).

- **Bloque Valeria Alta (VS-BVA).** Este bloque corresponde a la parte alta de la cuenca de la quebrada La Valeria, localizada hacia el límite occidental del área cartografiada. En este sector se observa un desarrollo N-S, mientras que el cauce principal tiene una tendencia W-E. Esta macrounidad está limitada al sur por el cauce de principal de la quebrada La Valeria, al este por el tope del lomo divisorio derecho de la quebrada La Reventona, al norte por la divisoria de aguas de la cuenca de La Valeria (con La Culebra) y al occidente también por la divisoria de aguas de la cuenca del río Aburrá.

Se extiende entre los 2 600 y 1 850 msnm, contrastando su altura máxima con todos las macrounidades localizadas más al sur. Su principal característica es la presencia de lomos regionales de tendencia N-S, con un sistema de drenaje subparalelo, fuertemente incisado y con desarrollo de vertientes empinadas a escarpadas que rematan en las típicas formas semicirculares que marcan el frente de avance de un agresivo escarpe erosivo del río Aburrá. La Macrounidad se desarrolla en su totalidad

sobre las rocas del Complejo Quebradagrande; se observan igualmente algunos rasgos morfotectónicos (escarpes y facetas triangulares) asociados al cauce alto de la quebrada La Reventota y espacialmente relacionados con una de las trazas de la falla San Jerónimo.

- **Bloque La Culebra (VS-BLCU).** Este bloque corresponde a una franja de terreno de tendencia N-S, ubicada en la parte media de la vertiente derecha del río Aburrá entre Caldas y la quebrada La Bermejala. Se distribuye entre los 1 700 y 2 450 msnm aproximadamente.

Limitada al sur por el cauce de la quebrada La Valeria, al norte por el lomo divisorio derecho de la quebrada La Bermejala, al oeste por las divisorias de aguas de las pequeñas cuencas del sector y la zona apical de los depósitos de vertiente localizados más abajo sobre la vertiente. Su característica principal es el desarrollo de lomos cortos de tendencia W-E, de tope agudo y escalonado, con vaguadas de flancos empinados y fondo estrecho que rematan hacia las cabeceras en escarpes semicirculares, los cuales en conjunto establecen una tendencia N-S con una altura homogénea de 2 400 msnm.

En el sistema de vaguadas se incluyen entre otras las siguientes corrientes: la parte baja de La Culebra, San Miguel y La Raya; al igual que las macrounidades anteriores presenta rasgos morfológicos dominados por la tectónica; la litología es compleja, conformada por gabros, dunitas y rocas volcánicas de afinidad oceánica. Se identificaron rasgos asociados a la tectónica como facetas triangulares y escarpes de falla con una tendencia predominante SSE-NNW.

- **Bloque Tablaza – Pueblo Viejo (VS-BTPV).** Corresponde también a una franja de terreno N-S, ubicada sobre la parte inferior de la ladera derecha del río Aburrá entre el sector de la Universidad La Salle al sur y Pueblo Viejo al norte. Esta macrounidad se desarrolla entre los 1 800 y 1 650 msnm terminando en el fondo del valle, en inmediaciones de la estrecha llanura aluvial del río. En general todo este polígono está constituido por depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros con diverso grado madurez. A partir de parámetros como la inclinación de las vertientes y el grado de incisión de las antiguas superficies de depositación se pudieron identificar varias unidades geomorfológicas.

Hacia la base de la ladera y especialmente en el sur, se identificaron superficies suaves de depositación con un grado moderado de incisión, donde aun se observan formas de abanico, cuyos ápices coinciden con las vaguadas del actual sistema de drenaje. Más arriba sobre la ladera, pero de manera localizada, se presentan depósitos colgados con desarrollo de vertientes empinadas y cuyas superficies de depositación originales se presentan poco conservadas, dado el alto grado de incisión.

En inmediaciones de La Tablaza parte alta y hasta Pueblo Viejo al norte se observan zonas suaves a onduladas que constituyen descansos geomorfológicos en la vertiente. Allí es frecuente encontrar colinas asimétricas desarrolladas en espesos suelos derivados de la meteorización de antiguos depósitos de vertiente cuya geofoma original desapareció completamente.

- **Bloque Romeral (VS-BR).** Esta macrounidad corresponde a una franja alargada en sentido SSE-NNW, iniciando al sur en la parte alta de la cuenca de la quebrada La Culebra, extendiéndose al oeste hasta la Cuchilla del Romeral que coincide con la divisoria de aguas con la cuenca del Cauca; al oriente sus límites son complejos aunque en general corresponde a la parte alta de antiguos y recientes depósitos de vertiente y con el cauce de la quebrada Doña María en su tramo norte. Al norte el límite de nuevo es la divisoria de aguas con la cuenca del Cauca, abajo del cerro del Padre Amaya.

Esta macrounidad involucra alturas entre los 2 950 y 1 900 msnm aproximadamente y coincide en su distribución con las principales trazas del Sistema Romeral, específicamente con la falla San Jerónimo; se observa una amplia variación litológica que incluye franjas estructuralmente controladas de gabros, dioritas, dunitas, rocas volcánicas y volcano-sedimentarias de afinidad oceánica.

Como característica geomorfológica principal se tiene el desarrollo de lomos regionales de tendencia general W-E, de tope estrecho, agudo y frecuentemente escalonado; los flancos son laderas empinadas a escarpadas, largas y rectas.

Un rasgo dominante corresponde a la deflexión sistemática de algunos de estos lomos en sentido lateral izquierdo, al cruzar las trazas de las fallas mencionadas (Ortiz, 2002). Se identificaron anomalías geomorfológicas como pequeñas cuencas (con depósitos de vertiente asociados), escarpes, facetas triangulares e incluso lomos decapitados, todos ellos de origen tectónico.

En la parte oriental de esta macrounidad, es decir en su porción más baja, se observaron dos sistemas de colinas de altura media y laderas moderadas, desarrolladas en suelos residuales. Estos sistemas se ubican al suroeste del municipio de La Estrella y al occidente de San Antonio de Prado. Los sistemas corresponden a prolongaciones de los lomos que descienden desde la Cuchilla Romeral, aunque la altura relativa es menor y se observan con frecuencia contrapendientes que definen las colinas descritas.

- **Bloque Quebrada La Candela (VS-BQLC).** Es una macrounidad de poca extensión localizada en la parte media de la ladera derecha de la quebrada Doña María, inmediatamente por debajo de la macrounidad anteriormente descrita.

Está limitada al sur por el cauce de la quebrada La Despensa, al norte por el cauce de la quebrada Larga y al este por la quebrada Doña María. Se desarrolla en su totalidad sobre antiguos depósitos de vertiente, con un alto grado de meteorización los cuales, aún en afloramiento, son difíciles de diferenciar de los suelos in situ de rocas verdes.

El fuerte grado de incisión ha conformado profundos y estrechos cañones en las quebradas mencionadas, que se prolongan hacia la vertiente superior hasta alcanzar la Cuchilla del Romeral. En la parte media de estas cuencas, entre las cotas 2 000 y 2 100 msnm, se observan zonas de topografía suave a ondulada de extensión y alturas variables ubicadas inmediatamente al este de la traza de la falla San Jerónimo y que se asociarían a antiguas zonas de depositación, donde es factible también identificar rasgos de afectación tectónica, tales como la deflexión sistemática de los cauces de las quebradas mencionadas.

- **Bloque La Estrella – San Antonio de Prado (VS-BESP).** Ubicada en las partes media y baja de la vertiente occidental del Valle de Aburrá, entre los cascos urbanos del municipio de La Estrella al sur y del corregimiento de San Antonio de Prado al norte. Es una zona con topografía contrastante respecto a sus alrededores más montañosos, caracterizada por laderas largas, homogéneas y levemente cóncavas que descienden desde el bloque o macrounidad Romeral (cota 2 200 msnm aproximadamente), hasta el fondo del valle (cota 1 600 msnm). Las pendientes predominantes son suaves a localmente empinadas (especialmente hacia las vaguadas del sector).

Desde el punto de vista geológico esta unidad corresponde casi en su totalidad a depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros con eventuales ventanas erosivas (zonas de mayor inclinación) de rocas meteorizadas pertenecientes al Complejo Quebradagrande.

Teniendo en cuenta parámetros como la inclinación de las superficies originales de depositación, su correlación con el actual sistema de drenaje y el grado de incisión de las corrientes del sector se identificaron varias unidades geomorfológicas.

Al sur, en inmediaciones del casco urbano de La Estrella, se observan extensas superficies con forma de abanico poco incisadas, en medio de las cuales aparecen aisladamente colinas bajas cuya composición corresponde también a depósitos de vertiente más antiguos (como en el caso del cementerio municipal de La Estrella), las cuales fueron cartografiadas como colinas en depósitos de vertiente.

Más al norte los depósitos tienen un grado moderado de incisión, con formación de vaguadas bien definidas y profundas. Finalmente, en el extremo norte de esta macrounidad, en inmediaciones de la quebrada La Despensa (límites con la

macrounidad quebrada La Candela), se presenta un alto grado de encañonamiento, definido como una superficie suave en depósitos altamente incisada, producto del avance del frente erosivo del río Aburrá a través de la quebrada Doña María.

- **Bloque Doña María (VS-BDM).** Es una franja de terreno alargada en sentido SSE-NNW y que corresponde con la ladera izquierda de la quebrada Doña María, desde sus cabeceras, en inmediaciones del Cerro de Padre Amaya, hasta el casco urbano del municipio de Itagüí. Se desarrolla en gran parte sobre rocas del Stock de Altavista y en su sector norte sobre esquistos; las alturas varían entre los 3 050 y 1 600 msnm. Esta unidad es el resultado del avance del frente erosivo del río Aburrá a través de la quebrada Doña María, desarrollando principalmente lomos de diversa altura, en general de topes estrechos y redondeados con vaguadas profundas y bien definidas cuya orientación es concordante con la dirección del drenaje principal de la cuenca.

Se destaca que varios de los lomos mencionados muestran un escalonamiento en sus topes, con inclinaciones empinadas en inmediaciones del Padre Amaya y descansos de pendiente en los 2 750 y 2 450 msnm, por debajo de los cuales disminuye la pendiente longitudinal de los mismos hasta llegar al fondo del valle.

Al norte del barrio Pilsen, en la otra margen de la quebrada, se observa un área de topografía suave, producto de la depositación de materiales de vertiente en la base de la ladera, los cuales presentan un moderado grado de incisión. Adyacente a estos depósitos se identifican lomos bajos con algunas contrapendientes en sus topes, que generan un pequeño sistema colinado.

En esta unidad se cartografió un pequeño sistema aislado de forma colinada y unos depósitos de vertiente colgados, con la típica topografía suave algo incisada.

- **Bloque Oriental (VS-BO).** Esta macrounidad es la de mayor extensión en el Valle Superior y corresponde al relieve montañoso característico de la vertiente derecha del río Aburrá desde su nacimiento. Se extiende al sur desde las cabeceras del valle, incluyendo la quebrada Santa Isabel y avanza hacia el norte hasta el casco urbano de Sabaneta y el cauce de la quebrada La Ayurá, por donde asciende hasta llegar al borde oriental de la zona de trabajo. El límite occidental, como ya se mencionó, corresponde al cauce de río Aburrá, con algunas excepciones en los sectores de La Tablaza y La Corrala que serán descritos más adelante. Este bloque presenta diferencias de alturas desde los 3 050 a los 1 650 msnm y está constituido predominantemente por lomos de diversa jerarquía. Los de carácter regional tienen una orientación en extremo variable (dendrítico) con predominio E-W al sur y N-S hacia las cuencas de La Doctora y La Ayurá. Algunos de ellos alcanzan prácticamente el cauce del río, donde rematan de manera abrupta, denominados en estudios anteriores como Cuchillas (GSM, 2002). Los topes en general son estrechos y agudos, con pendientes longitudinales suaves a moderadas.

Desde el punto de vista geológico esta macrounidad está conformada por rocas metamórficas del tipo esquistos, ortogneises, paragneises y anfibolitas. Llama la atención el control tectónico sobre las unidades litológicas ejercido por algunas fallas y lineamientos de tendencia N-S que divergen del sistema Cauca–Romeral al ingresar al Valle de Aburrá. Estas estructuras tienen algunos rasgos morfológicos asociados.

El análisis de perfiles topográficos realizados sistemáticamente siguiendo el tope de estos lomos permitió identificar zonas de menor pendiente, denominados hombros, cuya génesis estaría relacionada con el proceso de levantamiento de la cordillera Central. Según esta metodología se identificaron al menos cuatro niveles consistentes de hombros dentro de la macrounidad; las alturas son: 2 600-2 700; 2 250-2 350; 2 000-2 150 y 1 950-2 000. El análisis detallado de estos datos y sus implicaciones en la edad y evolución del Valle de Aburrá deberá ser materia de futuros trabajos de investigación.

En la divisoria de aguas de las quebradas La Ayurá, La Doctora y La Miel se observa una serie de rasgos geomorfológicos particulares. Hacia el límite oriental del área de trabajo, se observan zonas de topografía suave cartografiadas como superficies con baja incisión muy cerca de remanentes de la superficie de erosión Pre S-I y cuya relación genética se desconoce. Más abajo, sobre esta misma divisoria de aguas, se observa un picacho que corresponde a un cerro aislado ubicado a media ladera, con pendiente y contra pendiente muy pronunciadas.

En las partes inferiores de las laderas, donde se ubican los municipios de Sabaneta, Envigado y el sur de Caldas (margen derecha del río), se presentan acumulaciones de materiales de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Estas superficies suaves fueron separadas cartográficamente según el grado de incisión como se muestra en la plancha que acompaña este informe.

- **Bloque La Corrala (VS-BLC).** Esta pequeña macrounidad corresponde a una región con características morfológicas contrastantes en medio del gran Bloque Oriental descrito anteriormente. Se localiza a occidente del casco urbano de Caldas, sobre margen derecha del río Aburrá, en la parte baja de la cuenca de la quebrada La Miel, en la vereda La Corrala. Está caracterizada por un relieve relativamente bajo, que se desprende de los lomos altos de la vertiente superior, con un desarrollo de colinas altas sobre espesos suelos derivados de la meteorización de esquistos y gneises.

En el barrio Andalucía de Caldas y en inmediaciones de la Institución Educativa Ciro Mendía se identificaron superficies suaves de depositación de antiguos flujos (fuertemente meteorizados) con un alto grado de incisión, llegando incluso a formar colinas amplias en dichos materiales.

En el Valle Superior se distinguieron 12 bloques. En la Tabla 4.72 se presenta el listado general de Bloques o Macrounidades de este segmento.

**Tabla 4.72 Listado de Bloques (Macrounidades) del Valle de Aburrá Medio**

VM-BBO	Valle medio bloque Bello Occidental
VM-BCNA	Valle medio bloque Comuna Nororiental Alta
VM-BCNB	Valle medio bloque Comuna Nororiental Baja
VM-BES	Valle medio bloque El Salvador
VM-BIS	Valle medio bloque Iguaná superior
VM-BISC	Valle medio bloque Itagui-San Cristobal
VM-BPE	Valle medio bloque Poblado-Envigado
VM-BQ	Valle medio bloque Quitasol
VM-BQR	Valle medio bloque Quebrada Rodas
VM-BRP	Valle medio bloque Robledo-Pedregal
VM-BSE	Valle medio bloque Santa Elena
VM-FV	Valle medio fondo de valle

- **Bloque Itagüí – San Cristóbal (VM-BISC).** Corresponde al área localizada al occidente de la ciudad de Medellín, involucrando la totalidad de las cuencas de las quebradas Guayabala, La Picacha, Altavista, Ana Díaz, La Hueso y La Pelahueso; además, de un tramo de la margen derecha de la quebrada La Iguaná. Esta macrounidad que se extiende desde los 2 700 hasta los 1 500 msnm, se desarrolla sobre las rocas del Stock de Altavista, el gneis de La Iguaná y Metabasitas y los depósitos de vertiente generados al interior de la misma. Estos últimos se extienden hacia el fondo del valle donde conforman las típicas geformas de abanico. La presencia de lomos regionales de tendencia W-E es la característica fundamental de esta macrounidad. Dichos lomos separan las cuencas de las quebradas mencionadas conformando valles en “V” de fondo estrecho con vertientes largas, rectas a cóncavas y de inclinación moderada a localmente empinadas. Hacia las cabeceras las laderas rematan en escarpes semicirculares, evidencia del proceso remontante del frente erosivo del río Aburrá.

El tope de los lomos es en general estrecho y redondeado, con pendientes longitudinales suaves moderadas. A partir de una análisis de perfiles topográficos sistemáticos sobre la línea de estos lomos, similar al realizado en el Bloque Oriental del Valle Superior, se identificaron al menos tres niveles de hombros recurrentes dentro de este polígono, con los siguientes niveles: 2 200; 2 000 y 1 850-1 900 msnm. Así mismo, se observó un marcado descenso topográfico hacia la parte frontal de los lomos regionales, por debajo de los 1 600 msnm.

A partir del punto mencionado se presentan en general relieves relativos menores y se conforman sistema de colinas medias a altas con base circular y laderas

empinadas, dentro de las que se incluye el cerro El Volador, conectado con la cuchilla Blanquizal a través del cerro de Los Burgos (canteras de Granizal s.a., en parte destruida por la acción minera).

Un rasgo interesante es la coincidencia del inicio de todos estos sistemas de colinas con el trazo de la falla Iguaná – Boquerón, de tendencia SSE-NNW, un poco más al norte cruza la cuchilla Blanquizal hasta llegar a la quebrada La Iguaná; en la parte alta de esta cuchilla, en inmediaciones de la falla, se observa un particular sistema de colinas en suelos residuales, alargadas y altas, en el sector conocido como La Loma (corregimiento de San Cristóbal).

Como se mencionó anteriormente, en la parte inferior de esta macrounidad se observan gran cantidad de depósitos de vertiente de tipo flujo de lodos y/o escombros cuya relación geométrica con las cuencas de las quebradas del sector indican su lugar de origen al interior del polígono. A su vez estos depósitos exhiben un amplio rango de condiciones geológicas (composición y grado de meteorización), de incisión y altura respecto al fondo del valle. Las cuales permitieron identificar varias unidades geomorfológicas, denominadas como: superficies suaves en depósitos con alto, moderado y bajo grado de incisión. Situación que muy posiblemente indique cambios relativos de altura entre las vertientes generadoras de los flujos y el nivel del río Aburrá (Rendón *et al*, 2006)

- **Bloque Iguaná Superior (VM-BIS).** Esta macrounidad tiene forma de rombo alargado en dirección N-S; se ubica en el extremo centro occidental del Valle de Aburrá; está limitado al sureste por el cauce de la quebrada San Francisca, al noreste por el de la quebrada La Iguaná (en sus tramos medio y alto) y al occidente se extiende hasta la divisoria de aguas entre el Valle de Aburrá y el río Cauca, involucrando el lado sur del Boquerón, y el cerro del Padre Amaya.

Las alturas varían entre los 3 050 (Padre Amaya) y 1 800 msnm en la confluencia entre las quebradas San Francisca y La Iguaná. Define una ladera con desarrollo de lomos bajos y vaguadas poco profundas y amplias (bajo grado de incisión) y con una orientación persistente al este. La inclinación es en general moderada, aunque en la parte alta se torna empinada definiendo un escarpe lineal de tendencia SSE-NNW, similar al tren estructural regional, implicando posiblemente una estrecha relación genética entre éstos.

Por debajo del escarpe lineal los lomos tienen una tendencia W-E y es frecuente hallar sobre sus topes zonas amplias de topografía muy suave desarrolladas en suelos residuales del Stock de Altavista, denominadas en este trabajo superficies con baja incisión; los lomos no presentan una clara correlación altitudinal.



En la parte más baja de esta vertiente y paralelo al cauce de La Iguaá, se identifican varias facetas triangulares asociadas a la falla Tenche, a partir de la cual se han cartografiado depósitos de vertiente y aluviales con un bajo grado de incisión. En la quebrada San Francisca y en la divisoria de aguas de La Tenche se identifican depósitos de vertiente y aluviales masa latos que los anteriores.

- **Bloque Robledo – Pedregal (VM-BRP).** Este bloque representa uno de los rasgos de mayor contraste morfológico dentro de la zona de estudio. Corresponde a la vertiente noroccidental de la ciudad de Medellín, limitada al sur y al occidente por el cauce de la quebrada La Iguaá, al oriente por el río Aburrá y al norte por la quebrada La Loca hasta sus cabeceras y continuando por la divisoria de aguas hasta la serranía de Las Baldías.

Las alturas de la unidad oscilan entre los 2 800 y los 1 550 msnm; el terreno lo conforman casi en su totalidad, depósitos de vertiente, con esporádicas ventanas erosivas de rocas metamórficas meteorizadas (gneis, metagabros y anfibolitas). Define una ladera homogénea, con vertientes largas, continuas, rectas a levemente cóncavas, prácticamente sin cambios marcados en la continuidad o pendiente desde la divisoria de aguas hasta el fondo del valle. Estas laderas tienen un aspecto claramente correlacionable con grandes eventos de depositación de materiales de vertiente. Sin embargo, la distribución de estos materiales hasta la parte más alta de la vertiente complejiza el análisis, puesto que no es factible identificar una zona fuente que permita generar estos enormes volúmenes de material.

El análisis detallado de las pendientes y el grado de incisión de las corrientes del polígono permitió cartografiar varias unidades geomorfológicas. Hacia el extremo superior occidental se presentan vertientes de inclinación empinada y escarpada en rocas metamórficas, donde se han desarrollado profundas y estrechas vaguadas, con lomos de topes agudos, tal como puede observarse en el lado norte del Boquerón. Estos lomos inician en el remanente de superficie de erosión de la Serranía de Las Baldías. Por otro lado, una gran proporción de esta macrounidad, específicamente la correspondiente a la cuenca de drenaje de la quebrada La Iguaá, muestra vertientes de inclinación modera con quebradas entalladas profundamente en los depósitos de vertiente.

De manera contrastante, hacia el sector oriental del polígono, en la parte baja de ladera, cerca del río Aburrá, las vertientes en general tienen una inclinación suave y muestran claras formas de abanico. Allí las corrientes están menos entalladas; definiéndose superficies suaves en depósitos moderadamente incisadas. En medio de esta unidad geomorfológica, en inmediaciones del Tricentenario, el parque Juanes de la Paz y Toscana, se identifican áreas de topografía suave orientadas en sentido SSW-NNE y desarrolladas sobre suelos residuales de metagabro. Por su paralelismo con estructuras regionales se interpretan como Peldaños, con correlación altitudinal

con otras zonas suaves localizadas en la vertiente oriental del valle (barrio Brasilia - Aranjuez).

Finalmente, en la parte media alta de la vertiente se identificó un cerro aislado, llamado El Picacho, correspondiente a un referente paisajístico dentro del Valle de Aburrá. Denominación que fue tomada en este informe para nombrar rasgos geomorfológicos similares en el resto del área de estudio.

- **Bloque Bello Occidental (VM-BBO).** Este sector corresponde a la vertiente occidental del municipio de Bello, incluyendo el casco urbano en la cota 1 500 y ascendiendo hasta el remanente de la superficie de erosión de Ovejas a los 2 550 msnm aproximadamente.

Esta macrounidad está limitada al sur por el cauce de la quebrada La Loca, al norte por el cauce de la quebrada La García, al oriente por un pequeño escarpe en los depósitos de vertiente provenientes de la ladera (p.e. Cootrafa), antes de llegar al fondo del valle y al occidente se extiende hasta el ángulo marcado entre la vertiente y el altiplano mencionado. Los terrenos involucrados se desarrollan sobre los suelos derivados de las rocas ígneas plutónicas del Batolito de Ovejas, Metabasitas del Picacho y rocas ultrabásicas así como sobre depósitos de vertiente con diverso grado de madurez geomorfológica.

Sobresalen laderas homogéneas de fuerte inclinación hacia la parte alta, definiendo un escarpe lineal con una orientación N-S, concordante con la tendencia de las estructuras geológicas (fallas) cartografiadas; las cuales a su vez tienen asociados algunos escarpes con buena expresión geomorfológica.

Al norte de esta franja de terreno, en las cabeceras de la quebrada La García, las vertientes continúan siendo escarpadas pero tienen forma semicircular producto del avance del frente erosivo del río Aburrá. Por debajo de estas vertientes escarpadas y como producto del mismo frente erosivo, se han desarrollado lomos de carácter regional con orientación general W-E y algunos N-S (en el lado norte del polígono); los lomos tienen flancos empinados y rectos, con topes agudos e irregulares. Se observan facetados y se piensa que su origen puede estar relacionado con las fallas del sector o con diaclasamiento. Hacia la base de la vertiente los topes de los lomos mencionados se amplían, tornándose planos y aparecen una serie de sistemas de colinas bajas a medias en suelos residuales, de base irregular y una clara relación genética con los lomos. Finalmente, hacia el fondo del valle se identificaron varios flujos de lodo y/o escombros con diverso grado de incisión y meteorización. Sobre ellos se ubica en gran parte la cabecera municipal del municipio de Bello.

- **Bloque Quitasol (VM-BQ).** Esta macrounidad se ubica en el extremo norte del denominado Valle Medio, sobre la orilla izquierda del río Aburrá, en el lugar donde

este cambia de dirección, tornándose N45°E. Esta ladera corresponde al sector conocido como Quitasol en el municipio de Bello, involucrando terrenos entre los 2 800 y los 1 400 msnm, con un característico trazado convexo en la parte alta y cóncavo en la base, donde se identifican geoformas asociadas a depósitos de vertiente (abanicos) moderadamente incisados.

Está limitado al oeste por el cauce de la quebrada La García, al sur por la planicie aluvial asociada al río Aburrá, al este por la quebrada Seminarista y al norte por el marcado ángulo con el tope suave del “cerro” Quitasol. En esta macrounidad las pendientes son moderadas a escarpadas hacia la parte alta, definiendo la continuación de los escarpes semicirculares en las cabeceras de las quebradas, descritos en la macrounidad anterior. Más abajo los lomos son la geoforma predominante, con una tendencia N-S pero de incisión moderada, topes redondeados y amplios. Adicionalmente, se identificó una zona en la parte alta con pendientes suaves, cuya génesis no es clara y que en este trabajo se cartografió como un peldaño, pero que podría corresponder a una antigua zona de deslizamiento.

- **Bloque Quebrada Rodas (VM-BQR).** Esta macrounidad también corresponde al extremo norte del Valle Medio, pero esta vez sobre la margen derecha del río Aburrá, definiendo un polígono alargado en dirección N-S, concordante con las trazas asociadas al Sistema de Fallas de Rodas.

Está limitado al norte por la planicie aluvial del río Aburrá, al oeste por el cauce de la quebrada Rodas, al oriente por el filo que corresponde a la divisoria de aguas de esta corriente y al sur por el cambio morfológico con el altiplano de Santa Elena (sector de Piedras Blancas).

Se desarrolla en general sobre suelos derivados de rocas metamórficas de tipo anfibolita y sobre algunos depósitos de vertiente, ocupando terrenos entre las cotas 2 500 y 1 400 msnm. Esta macrounidad coincide con la vertiente derecha de la cuenca de la quebrada Rodas, donde se presenta un sistema de lomos regionales bien definidos, con flancos empinados a moderados e irregulares, de topes estrechos y redondeados.

En este polígono se localiza el relleno sanitario de Curva de Rodas, ubicado sobre el cauce de la quebrada. Este depósito antrópico se identifica como una superficie amplia, suave y regular que contrasta con respecto a las vertientes aledañas. Así mismo, aguas arriba de esta geoforma antrópica, se identificó un tramo rectilíneo de la quebrada, además de unos pequeños escarpes alineados que en conjunto fueron cartografiados como rasgos morfotectónicos. Finalmente, hacia la parte inferior de la ladera se presentan zonas de topografía suave que divergen desde el fondo de las vaguadas entre los lomos descritos. Estas superficies están desarrolladas sobre depósitos de vertiente donde las quebradas se han incisado moderadamente.

- **Bloque Comuna Nororiental Alta (VM-BCNA).** Esta macrounidad corresponde a una franja de terreno alargada en sentido N-S, desarrollada sobre rocas ultrabásicas (Dunitas de Medellín) y muy localmente sobre depósitos de vertiente. Su característica principal es el claro control estructural.

Está limitada al noreste por el cauce de la quebrada Rodas, que coincide con la traza de la falla de igual nombre; al sureste por el altiplano de Santa Elena; al sur por el filo que sirve de divisoria de aguas con la quebrada Chorro Hondo y al este por varias fallas (entre ellas la falla Manrique) de tendencia N-S, las cuales a su vez tienen asociado un marcado cambio morfológico. Esta franja de terreno involucra alturas desde los 2 600 msnm en inmediaciones de Santa Elena hasta los 1 750 msnm por debajo de los barrios San Blas y Santo Domingo Savio.

Dentro de este polígono predominan las pendientes moderadas, con algunos sectores escarpados hacia la parte alta y sobre la vertiente derecha de la quebrada La Sucia (límite Bello – Medellín), además de algunos sectores de pendientes suaves que a su vez conforman una franja en el centro de la macrounidad, definiendo de esta manera un escalonamiento de la vertiente.

El avance remontante del frente erosivo del río Aburrá, a través de las corrientes del sector, ha generado un sistema de lomos, que en la parte norte tienen una tendencia N-W a N-S (paralelos a la falla Rodas) y en el sector sur E-W. Dichos lomos en general tienen flancos empinados, rectos y de tope agudo; además, las corrientes que los separan transcurren por profundos y estrechos cañones con tendencias similares.

En medio de esta unidad geomorfológica, con una distribución irregular, se identifican áreas de topografía suave, orientadas en sentido N-S y desarrolladas sobre suelos residuales de dunitas. Por su paralelismo con estructuras regionales se interpretan como Peldaños, cuya correlación altitudinal con otras zonas suaves localizadas en esta misma vertiente y en las adyacentes debe ser motivo de investigaciones posteriores, de tal manera que se refine su modelo genético. En el sector de Santo Domingo Savio se presenta en medio de la vertiente un cerro de carácter regional, el cual tiene una base oval de tendencia N-S y laderas empinadas, el cual fue cartografiado como Picacho. Finalmente, hacia la parte baja de polígono y en estrecha relación espacial con las fallas N-S se identificaron una serie de facetas triangulares, definidas en este trabajo como rasgos morfotectónicos.

- **Bloque Comuna Nororiental Baja (VM-BCNB).** En estrecha relación con la macrounidad anterior se presenta otra franja de terreno de tendencia también N-S, localizada en la misma vertiente nororiental del Valle Medio pero más abajo, ocupando terrenos entre los 1 750 y 1 450 msnm. Esta macrounidad está limitada al este por una serie de fallas y lineamientos de tendencia N-S, que coincide con un

marcado incremento de la pendiente; al sur por la zona suave de los depósitos aluviotorrenciales asociados a la quebrada Santa Elena, al oeste y norte por el río Aburrá y/o sus depósitos aluviales asociados. Dentro de esta macrounidad se identifican dos sectores. Al norte se observan pendientes regulares y continuas de inclinación suave a moderada con vergencia hacia al fondo del valle; constituidas principalmente por espesos suelos residuales de rocas ultrabásicas cizalladas y localmente por depósitos de vertiente; en medio de las cuales las corrientes han labrado sus cauces, generando una red poco densa de vaguadas moderadamente incisadas de flancos cortos, irregulares y de pendientes moderadas. Este tipo de morfología se extiende al sur siguiendo el borde oriental de la macrounidad. Al sur del polígono se presentan pendientes suaves que descienden hasta confundirse con el fondo del valle y cuya configuración morfológica indica una génesis depositacional, asociada a los depósitos de flujo de lodos y/o escombros. Dentro de estos materiales es factible identificar sectores con diverso grado de incisión. Por otro lado, dentro del polígono también se identificaron una serie de zonas de pendiente suave a diferentes alturas, que por su localización (cercana a las trazas de las fallas o lineamientos) u orientación se cartografiaron como peldaños. Dentro de estos llama la atención el sector de Aranjuez – Brasilia.

- **Bloque Santa Elena (VM-BSE).** Como su nombre lo indica esta macrounidad coincide con la parte alta de la cuenca de la quebrada Santa Elena, aunque vale la pena aclarar que las cabeceras de esta corriente están por fuera del Valle de Aburrá.

Este polígono tiene la forma semicircular característica de un frente erosivo, realizada por el contraste morfológico respecto a los remanentes de la superficie de erosión localizados al oriente y que están claramente cortados por este rasgo regional. Dentro de esta macrounidad se observa el predominio de laderas empinadas y escarpadas hacia la parte superior (cota 2 650 msnm aproximadamente), definiendo un sistema de escarpes semicirculares asociados a las cabeceras de las quebradas del sector. Por debajo de estas vertientes y como resultados también de la erosión, se identificaron varios tipos de lomos.

Sobre la vertiente sur (margen derecha de la quebrada Santa Elena), los lomos tienen orientación S-N a SSE-NNW, con topos redondeados, flancos convexos y vaguadas intermedias, estrechas y moderadamente entalladas. Por el contrario los lomos de la vertiente norte exhiben topos agudos, flancos rectos, empinados y con vaguadas profundamente encañonadas (p.e. quebradas La Castro y Chorro Hondo); además, presentan orientación diversa con claros efectos tectónicos en las parte inferior, sector de Las Estancias y La Sierra, siguiendo los lineamientos cartografiados.

Un rasgo característico de esta macrounidad es la presencia de “descansos” topográficos o zonas de pendiente suave en medio de las laderas, definidos en este trabajo como peldaños. Especial atención merece el ubicado sobre la vertiente

derecha de la cuenca, con una altura de aproximadamente 1 900 msnm (centro de meditación Las Mercedes), el cual por el fuerte control estructural en todos sus bordes, la morfología reinante y los espesores de suelos parece un bloque descendido desde los altiplanos circundantes. Esta hipótesis deberá ser objeto de investigaciones académicas más detalladas.

Finalmente, en la parte centro occidental del polígono, especialmente sobre la parte baja de la ladera izquierda (sector de Quinta Linda y Caunces de Oriente) se observan zonas de topografía ondulada e inclinaciones suaves, que corresponden a depósitos de vertiente con diverso grado de incisión.

- **Bloque El Salvador (VM-BES).** Corresponde a la margen izquierda de la cuenca baja de la quebrada Santa Elena, sobre el extremo occidental y el flanco norte del lomo regional que involucra los terrenos del Seminario Mayor de Medellín. Este polígono ocupa terrenos desde los 2 100 y los 1 500 msnm, con vertientes suaves a moderadas, cóncavas e irregulares; las cuales están constituidas por suelos residuales del Gabro de San Diego y depósitos de vertiente. Hacia la parte alta de la margen norte de la cuenca de la Santa Elena y toda la vertiente occidental (hacia el río Medellín) se presentan lomos irregulares, poco incisados y de baja altura, con topes redondeados y amplios. Más abajo, cerca de la quebrada Santa Elena, se presenta una ladera regular poco incisada desarrollada en suelos residuales.

En el extremo noroccidental de este polígono se presenta un cerro bajo, de vertientes moderadas, tope suave y amplio que resalta en el oriente de Medellín, denominado cerro El Salvador; el cual fue cartografiado como un picacho. En sus flancos, especialmente hacia la quebrada Santa Elena, se identifican una serie de laderas muy suaves, cuya configuración revela su origen depositacional (flujos de lodos y/o escombros) además de superficies en suelos residuales poco incisados (p.e. barrio Las Palmas).

- **Bloque El Poblado – Envigado (VM-BPE).** Esta macrounidad se localiza sobre la vertiente oriental del Valle Medio de Aburrá y sobre ellas se asienta el sector de El Poblado y gran parte del casco urbano de Envigado. Está limitada al sur por el cauce de la quebrada La Ayurá, el cual a su vez es el límite con el Valle Superior, al este por el marcado cambio morfológico con la zona del oriente antioqueño y sus típicos remanentes de superficies de erosión; al oeste por un pequeño escarpe erosivo asociado al frente de los depósitos de vertiente generados en su interior y al norte la divisoria de aguas con la cuenca de la quebrada Santa Elena.

Este polígono está caracterizado por laderas irregulares de forma cóncava, que descienden desde los 2 650 hasta los 1 550 msnm. Hacia la parte alta de la ladera se concentran pendientes empinadas a escarpadas, cuya distribución define una franja de tendencia N-S, denominada en este trabajo como escarpe lineal superior, paralelo

al tren estructural regional. Sobre la parte norte de este escarpe se han esculpido varios escarpes semicirculares por el avance del frente erosivo de quebradas como La Presidenta y La Escopetería. Debajo de esta franja se establece un sistema de lomos de tendencia E-W, de tope redondeado y amplio, flancos convexos y desarrollados casi en su totalidad sobre suelos residuales y los más antiguos depósitos de vertiente. Estos lomos descienden hasta diferentes niveles dentro la vertiente, en general hasta la parte media, aunque en el sector de la quebrada La Ayurá alcanzan el propio cauce de esta corriente y se define un mayor grado de incisión o altura de los lomos.

La parte media y baja de la vertiente está constituida por una serie de depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros, los cuales han sido objeto de estudios estratigráficos y dataciones (Rendón, 2003 y Rendón *et al.*, 2006) que permitieron diferenciar varias series de eventos con firmas geomorfológicas también diferentes. En este trabajo se identifican los diferentes eventos como superficies suaves de depositación con alto, medio y bajo grado de incisión. Llama la atención que los depósitos más antiguos, localizados en la parte media de la ladera, especialmente hacia el sector de Envigado se observan colinados y flanqueados por depósitos más recientes. Así mismo, en este mismo sector, se presentan colinas en suelos residuales, dichas colinas son alargadas E-W y parecen conectarse con los lomos más arriba. Finalmente, en la parte más baja se presentan superficies muy suaves (barrio Manila, Avenida de El Poblado y casco urbano de Envigado) a unos 30 m de altura respecto a la llanura aluvial del río Medellín. Estos depósitos terminan en un escarpe erosivo, producto de la antigua dinámica meándrica del río mencionado.

En el Valle Superior se distinguieron cuatro bloques. En la Tabla 4.73 se presenta el listado general de Bloques o Macrounidades de este segmento.

**Tabla 4.73 Listado de Bloques (Macrounidades) del Valle de Aburrá Inferior**

VI-BCG	Valle inferior bloque Copacabana-Girardota
VI-BHB	Valle inferior bloque Hatillo-Barbosa
VI-BM	Valle inferior bloque Matasanos
VI-FV	Valle inferior Fondo de Valle

- **Bloque Copacabana - Girardota (VI-BCG).** Este bloque es el primero de la unidad de paisaje denominada Valle de Aburrá Inferior, la cual está caracterizada por ser un valle simétrico, con una marcada y persistente tendencia N45°E; de fondo plano, amplitud irregular y laderas convexas.

La macrounidad inicial involucra terrenos de los municipios de Bello, Copacabana y Girardota, y se extiende sobre ambos márgenes del valle, confirmando la simetría de los procesos y por ende de las unidades geomorfológicas allí presentes.

El límite suroeste de dicha macrounidad desciende por la ladera derecha del río Aburrá siguiendo la divisoria de aguas derecha de la quebrada Rodas, cruza el fondo del valle y asciende por la ladera izquierda del valle a través del cauce de la quebrada Seminarista. Tanto al noroeste como al sureste esta macrounidad asciende hasta las zonas de topografía suave (remanentes de antiguas superficies de erosión) que flanquean el valle. En este punto es importante mencionar que la ladera derecha alcanza una altura máxima de 2 500 msnm donde se observa un buen grado de conservación del altiplano. Por el contrario, la vertiente izquierda alcanza los 2 750 msnm y el grado de conservación del altiplano es menor. Por último, el borde noreste del polígono corresponde a relevantes divisoras de aguas.

La principal característica de este polígono es la presencia de extensas superficies suaves en depósitos de vertiente con diversas alturas y grados de disección; todas ellas ubicadas en las partes inferiores de las vertientes, donde tienen asiento las poblaciones de Copacabana y Girardota.

Hacia la parte alta de ambos márgenes del valle se identifican zonas de topografía empinada a escarpada cuyo patrón de distribución está asociado con las cabeceras de las corrientes de mayor jerarquía, estableciéndose de esta manera una serie de escarpes semicirculares generados por la erosión fluvial remontante en contra de los altiplanos circundantes. Más abajo se identifican una serie de lomos de carácter regional profundamente entallados y con dirección concordante con la red de los principales drenajes de la ladera (SE-NW); dentro de estos lomos se destacan dos de gran relevancia geomorfológica. Uno es conocido como la cuchilla de Las Peñas, al este del casco urbano de Copacabana, el cual tiene un tope muy estrecho y agudo. El otro corresponde al Ancón Norte, que tiene un tope muy amplio y su terminación constituye un control litológico del cauce del río Aburrá. Sobre los flancos de este sistema de grandes lomos se ha definido una segunda generación de lomos (secundarios) con vertientes moderadas a empinadas, topes redondeados y estrechos.

Por otro lado, entre los lomos de primer orden, se identifican las típicas formas depositacionales ya mencionadas, cuya disposición en el paisaje y distribución correlaciona con el actual sistema de drenaje, sugiriendo una edad no muy antigua, en contraposición a los observados en el Valle Medio (El Poblado, Envigado, Pueblo Viejo, etc.). Dentro en estas series de flujos de lodos y/o escombros, a partir del grado de incisión de las superficies de depositación originales, se separaron varias unidades geomorfológicas. Por ejemplo, al suroeste del municipio de Girardota se observa un abanico alto, con profundos cauces lineales, que remata en algunas colinas de orientación contrastante con la ladera, esculpidas en depósitos de vertiente maduros. Ya sobre el casco urbano propiamente dicho se identifica un abanico no tan disectado que remata suavemente en el fondo aluvial del valle (excepto en inmediaciones de la vía de acceso al municipio). Este mismo esquema se repite en Copacabana y en el sector de la fábrica Haceb (margen izquierda del río Aburrá). En



medio de estos depósitos maduros es frecuente hallar colinas en suelos residuales, especialmente arriba de Copacabana.

- **Bloque Hatillo – Barbosa (VI-BHB).** Este polígono corresponde a la macrounidad de mayor extensión en el Valle de Aburrá y al igual que la anterior se extiende regionalmente según una tendencia N45°E; involucrando, en su sector SW, ambos márgenes del río y en su extremo NE sólo la vertiente derecha. Está limitado hacia el SW por importantes divisorias de aguas que descienden desde los altiplanos circundantes hasta el fondo del valle; al este y oeste por el brusco cambio topográfico con el sistema escalonado de altiplanos mencionado, que en esta parte del macizo central antioqueño presenta complejas relaciones de altura y posibles afectaciones tectónicas. Hacia el N y NE esta macrounidad está limitada por el cauce de la quebrada Reventón (que desciende por la margen izquierda), por el último tramo del río Aburrá en la zona de estudio y por el cauce de la quebrada Agua Fría, que drena la vertiente derecha del valle. Los terrenos involucrados en este polígono se extienden entre los 2 600 y los 1 300 msnm.

Una característica importante de la macrounidad es la fuerte irregularidad del fondo del valle, iniciando bastante amplio en jurisdicción del municipio de Girardota y disminuyendo marcadamente hacia el norte, donde se amplía nuevamente en inmediaciones del casco urbano de Barbosa, para desaparecer casi por completo aguas abajo. Por otro lado en este polígono se destaca la común ocurrencia de rasgos de origen morfotectónico que se evidencian con claridad por su fuerte carácter lineal y su discordancia con la tendencia general de la vertiente, formando incluso picachos de base alargada según la orientación de las estructuras dominantes. Estos rasgos morfotectónicos predominan sobre la vertiente derecha del río, con tendencias ente los N45°E y los N60°E, los cuales llegan incluso a definir cuencas importantes de similar tendencia, que constituyen anomalías en el patrón de drenaje del valle.

Hacia la base de las vertientes es común la ocurrencia de sistemas de colinas en suelos residuales, en general debajo de los 1 500 msnm. Estas colinas se observan como antiguos lomos fuertemente incisados conectados a las laderas del valle. Especial interés revisten los sistemas de colinas localizados en inmediaciones del casco urbano de Barbosa y otras más aguas abajo. Ellos se extienden hasta el río, constituyendo en algunos tramos del río pequeños ancones rocosos y definiendo una serie de ambientes de depositación discontinuos e irregulares, que incluso hacen aparecer aisladas las colinas descritas.

Finalmente, otra característica preponderante de esta macrounidad, y que la distingue de la anterior, es la menor preponderancia de los depósitos de vertiente; los cuales se presentan de forma aislada definiendo superficies moderadas a poco incisadas hacia el tercio inferior de las laderas. Entre las más extensas están los abanicos

escalonados del sector de El Hatillo (margen izquierda de río) al inicio del ascenso a Matasanos y del casco urbano de Barbosa (en ambas márgenes del río).

- **Bloque Matasanos (VI-BM).** Este es el último bloque identificado en el Valle Inferior. Corresponde a la vertiente izquierda del río Aburrá en su último tramo, entre el cauce de la quebrada Reventón y el borde norte del área de estudio. Así mismo esta macrounidad está limitada en su parte alta por los remanentes de superficies de erosión escalonadas y en su base por el cauce del río Aburrá; extendiéndose entre las cotas 2 500 y 1 250 msnm.

La característica fundamental en esta macrounidad es la ocurrencia, en la parte inferior de esta ladera, de extensos depósitos de vertiente del tipo flujo de lodos y/o escombros con típicas geoformas de abanico. Estos abanicos tienen una clara relación genética con el actual sistema de drenaje, denotando su edad relativamente reciente, lo que es corroborado por el bajo grado de disección de las superficies de depositación originales. Al igual que en la anterior, en esta macrounidad se observa un sistema de colinas en suelos residuales de Batolito Antioqueño, localizadas hacia la parte inferior; algunas de las cuales se observan aisladas, en medio de los depósitos de vertiente ya descritos.

Otro rasgo interesante en esta macrounidad es la presencia de rasgos morfotectónicos, especialmente un lomo de carácter regional en inmediaciones de la parte baja de la quebrada Santa Rosa, cuya orientación N60°E contrasta con la inclinación de las vertientes del sector y es coincidente con el tren estructural regional. Estos lineamientos y fallas cruzan cerca a los ápices de los flujos de lodos y/o escombros, donde se presentan algunas anomalías geomorfológicas que deberían ser estudiadas con detalle en trabajos académicos posteriores.

Hacia la parte alta de este bloque se observan condiciones morfométricas contrastantes. En el lado norte se identifican zonas de topografía empinada a escarpada cuyo patrón de distribución está asociado con las cabeceras de las corrientes de mayor jerarquía que drenan hacia el valle, estableciéndose de esta manera una serie de escarpes semicirculares generados por la erosión fluvial remontante en contra de los altiplanos. En oposición, en el sector occidental del polígono se presentan vertientes de inclinación suave a muy suave, onduladas, que contrastan con las laderas del valle. Por sus características morfométricas parecerían corresponder a remanentes de antiguas superficies de erosión; sin embargo, su inclusión en esta unidad de paisaje no es clara dada la posición altitudinal y la orientación de las pendientes.

#### 4.4.6 Unidades Geomorfológicas

Se consideran como Unidades Geomorfológicas a los conjuntos relacionados de formas que tienen homogeneidad de proceso genético y edad. Un conjunto de Unidades Geomorfológicas relacionadas entre sí le dan la “firma” al Bloque o Macrounidad tal como se mencionó. En un Bloque puede haber predominio de una unidad o de un conjunto de éstas o puede haber sólo un tipo o una amplia gama. Es así como en la mayor parte de los Bloques se encuentran Unidades de Lomos por tratarse de un relieve desarrollado en condiciones de fuerte pendiente y levantamiento tectónico importante, pero sin embargo, una unidad particular de lomos puede tener un significado genético o cronológico diferente a otro por su ubicación altitudinal, sus relaciones con las unidades vecinas, su forma general, las pendientes dominantes, la inclinación u orientación del eje del lomo entre muchas otras características que puede tener.

Para el caso del Valle de Aburrá y las zonas vecinas, objeto de este informe, se produjo un listado de las unidades más comunes en zonas montañosas, pero es posible que algunas de ellas no hayan sido incluidas cartográficamente y puedan hacerlo en estudios posteriores. En la Tabla 4.74 se proponen una lista de las unidades identificadas en toda el área cartografiada. Además, a continuación se describe de manera general cada una de estas unidades geomorfológicas.

**Tabla 4.74 Listado de unidades geomorfológicas identificadas en el Valle de Aburrá**

SIMBOLO	NOMBRE
CA	Colinas aisladas
CDV	Colinas en depósito de vertiente
CSR	Colinas en suelo residual
DSI	Depósitos sin incisión
ELS	Escarpe lineal superior
ESCS	Escarpes semicirculares superiores
GA	Geoforma antrópica
L	Lomos
LA	Lomos altos
LB	Lomos bajos
LLA	Llanura aluvial
LR	Lomerío
P	Picacho
PÑ	Peldaño
RMT	Rasgos morfotectónicos
SBI	Superficies con baja incisión
SSDPI	Superficies suaves en depósitos poco incisados
SSDMI	Superficies suaves en depósitos moderadamente incisados
SSDAI	Superficies suaves en depósitos altamente incisados
VSRPI	Vertientes en suelos residuales poco incisadas
VSRMI	Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas
TA	Terrazas aluviales

**CA - Colinas Aisladas.** Es una elevación menor del terreno que se destaca aisladamente en el área estudiada, presenta topes redondeados y sus pendientes varían en rangos de media a alta. Esta unidad corresponde al cerro Nutibara, localizado en el municipio de Medellín y dos pequeños cerros al norte en el municipio de Barbosa.

**CDV - Colinas en depósito de vertiente.** Estas geoformas son pequeñas elevaciones que se localizan generalmente a media ladera en las partes medias de las vertientes. Pueden corresponder a flujos de lodos y/o escombros, de espesores variables y con alto grado de madurez. Se localizan en los municipios de La Estrella, Envigado, Medellín y Girardota.

**CSR - Colinas en suelo residual.** Esta unidad se localiza generalmente cerca de los lomos o en la terminación de los mismos. Presentan formas redondeadas con topes planos a ligeramente convexos. Las pendientes son moderadas y tienen un moderado grado de incisión. Aparecen en todos los municipios estudiados y corresponden a suelos residuales de anfibolita, metagabros, gneis, dunitas, rocas volcanosedimentarias, esquistos, rocas graníticas.

**DSI - Depósitos sin Incisión.** Corresponde a depósitos aluviales más bien recientes, los cuales presentan geoformas planas y con bajo grado de incisión. Esta unidad se localiza hacia el Altiplano de Ovejas en el municipio de Bello.

**ELS - Escarpe Lineal Superior.** Son terrenos de fuertes inclinaciones, con pendientes casi perpendiculares continuas, las cuales pueden ser la evidencia de lineamientos estructurales (falla o fractura). Las geoformas son de vertientes largas, rectas e irregulares con una fuerte incisión, generando cañones profundos. Se localizan entre los municipios de Envigado y Medellín, sector de El Poblado y en el municipio de Medellín en el sector de Ovejas.

**ESCS - Escarpes Semicirculares Superiores.** Son geoformas ubicadas entre zonas escarpadas en superficies rocosas hacia los límites de los altiplanos, presentan además fuertes pendientes. Aparecen en los municipios de Envigado, Medellín, Copacabana, Girardota y Barbosa.

**GA - Geoforma Antrópica.** Están definidas por ser unas unidades recientes y en su totalidad han sido creadas por el hombre a modo de llenos antrópicos. Estas geoformas se localizan como rellenos sanitarios, tal es el caso del localizado en la conocida Curva de Rodas, localmente también aparecen geoformas antrópicas en los municipios de Medellín, Bello, Copacabana y Girardota.

**L – Lomos.** Son fillos alargados y estrechos con orientación hacia el eje fluvial principal. Son las unidades dominantes y de mayor cobertura dentro del área de estudio, aparecen en todos los municipios.

**LA - Lomos Altos.** Son geoformas alargadas con dirección preferencial hacia la red fluvial principal. Se localiza en la parte alta del municipio de Envigado.

**LB - Lomos Bajos.** Son lomos alargados de mediana longitud, sin tendencia de orientación preferencial con un grado de disección medio a bajo por parte de las corrientes presentes. Se localizan principalmente hacia las zonas de los altiplanos de oriente en los municipios de Envigado, Medellín, Copacabana, Girardota y Barbosa, y Bello, Girardota y Barbosa al occidente.

**LLA - Llanura Aluvial.** Esta unidad involucra el cauce y las riveras del río Aburrá y algunas de sus quebradas o tributarios principales. Es una forma continua, de pendientes suaves y topografía plana; contiene materiales producto de la sedimentación aportada por estas corrientes e incluye además algunos niveles de terrazas bajas. Esta unidad se localiza en los municipios de Caldas en la quebrada La Miel, La Estrella, Sabaneta, Itagüí en la quebrada La María, Envigado en la quebrada La Ayurá, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.

**LR – Lomerío.** Es una zona de montañas o lomos que ya han sido disectados por acción del intemperismo y la erosión. Se ubican en los municipios del norte del área estudiada desde Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.

**P – Picacho.** Son cerros o prominencias que se destacan en el paisaje, ubicados a diferentes alturas y con formas diferentes, sus pendientes son de moderadas a fuertes y localmente escarpadas. Se deben mencionar los cerros El Volador, Nutibara, Pan de Azúcar y El Picacho. También aparecen cuerpos menores hacia las partes altas y medias de las vertientes en los municipios de Sabaneta, Medellín, Girardota y Barbosa.

**PÑ – Peldaño.** Son geoformas relativamente continuas, con una pendiente suave a moderada. Se presentan en los municipios de Envigado, Medellín, Bello y Girardota.

**RMT - Rasgos Morfotectónicos.** Son pequeños cuerpos que coinciden con zonas de rasgos tectónicos como lineamientos, fallas y contactos geológicos. Se localizan en el municipio de Caldas, La Estrella y Medellín siguiendo los rasgos morfotectónicos de la falla San Jerónimo y sus estructuras asociadas. Hacia el municipio de Medellín en límites con Bello se presentan pequeñas unidades asociadas con los rasgos tectónicos de la falla Rodas y finalmente hacia el municipio de Barbosa se presentan pequeños cuerpos siguiendo un tren regional.

**SBI - Superficies con Baja Incisión.** Esta unidad corresponde a lomos alargados que se localizan cerca de zonas escarpadas. Se localizan hacia los municipios de Caldas, Envigado y Medellín.

**SSDPI - Superficies Suaves en Depósitos Poco Incisados.** Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión baja a muy baja. Esta unidad se parece a partir de los municipios de La Estrella y Sabaneta al sur, y llega hasta el municipio de Barbosa al norte.

**SSDMI - Superficies Suaves en Depósitos Moderadamente Incisados.** Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión moderado. Esta unidad se localiza en los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Medellín, Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa.

**SSDAI - Superficies Suaves en Depósitos Altamente Incisados.** Son geoformas continuas de inclinación suave a moderada y modeladas sobre depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros. Presentan un grado de incisión alto. Esta unidad se localiza en los municipios de Caldas, La Estrella, Envigado y Medellín.

**SMDMI - Superficies Moderadas en Depósitos Moderadamente Incisados.**

Corresponde a una geoforma continua de inclinación moderada y modelada sobre los depósitos de vertiente del tipo flujos de lodos y/o escombros que se localizan hacia la parte media de la vertiente en la margen izquierda de la quebrada La Iguaná. Presentan un grado de incisión medio. Esta unidad se localiza en el municipio de Medellín.

**TA - Terrazas Aluviales.** Son las zonas abandonadas por la migración del río Aburrá y sus corrientes principales; se presentan a modo de depósitos laterales alejados del cauce actual y en diferentes alturas, aunque son de topes planos. Esta unidad se localiza en los municipios de Caldas, La Estrella, Itagüí y Envigado.

**VSRPI - Vertientes en Suelos Residuales Poco Incisadas.** Son pequeñas vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos, presentan un bajo grado de incisión. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan. Afloran el municipio de Medellín y en Barbosa.

**VSRMI - Vertientes en suelos residuales moderadamente incisadas.** Son vertientes que pueden presentar filos de formas estrechas y con topes agudos a ligeramente convexos. Están enmarcados por superficies de depósitos y estos están constituidos por suelos residuales de diferente composición dependiendo del sitio donde se localizan. Afloran el municipio de Medellín en el corregimiento de San Antonio de Prado y están conformados por rocas volcanosedimentarias, en la comuna nororiental están enmarcadas en rocas duníticas y metagabros y en el municipio de Copacabana se localizan sobre rocas del tipo anfibolitas.

**ESTA HOJA HA SIDO  
INTENCIONALMENTE DEJADA EN  
BLANCO**



## 5. NEOTECTÓNICA

Como parte de los estudios se realizaron investigaciones enfocadas a identificar evidencias o indicios de actividad neotectónica de las fallas que se encuentran en los alrededores y al interior del Valle de Aburrá; para esto se recopiló la información de trabajos realizados en la región y se realizaron perfiles topográficos, perfiles longitudinales de algunos drenajes, interpretación de fotografías aéreas y salidas de campo.

A continuación se presenta un resumen de los indicios de actividad neotectónica encontrados y la información relacionada con estos sitios.

### 5.1 SISTEMA DE FALLAS LA HONDA AL ORIENTE DEL VALLE DE ABURRÁ

#### 5.1.1 Sector Caravanchel – Presa La Fe, Oriente del Valle de Aburrá

Este sitio fue reportado por Lalinde (2004) donde describe un corte localizado a 1,2 km del Mall de Caravanchel por la vía que conduce de este sitio a El Retiro. En el corte, de dirección N20°E, reporta estructuras N5°E/70°E, N10°E/65°E, N20°E/55°E y las describe como estructuras abiertas con apertura máxima de 0,003 m con sus superficies recubiertas de óxidos. Igualmente reporta estructuras N85°E/Vertical, que se presentan seis en un metro lo que indica una separación entre las fracturas inferior a los 0,20 m. Las estructuras N85°E a EW/Vertical las reporta como las que presentan una evidencia más clara de actividad neotectónica por su continuidad en todo el talud, llegando hasta la superficie del terreno. Respecto a las estructuras de dirección NS a N20°E menciona que no es posible definir si afectan el suelo actual por ser paralelas a la dirección del corte, pero reporta que afectan la secuencia arcillosa a menos de un metro de la superficie del terreno. Las fotos 5.1 y 5.2 corresponden al corte levantado por Lalinde (2004), en donde se aprecia el corte de la vía afectado por estructuras N85°E/Vertical y el detalle de las estructuras.

En salida de campo realizada el 19 de diciembre de 2006 se encontró que el corte descrito por Lalinde (2004) se encuentra cubierto hasta su parte media por un muro de gaviones que busca estabilizar el corte. Se revisó el corte oriental en este mismo sitio y se encontraron diaclasas continuas desde el piso hasta el techo, afectando el horizonte de cenizas volcánicas y la superficie del terreno, en un corte de unos 5 m de altura y con dirección NS. Se identificaron diaclasas NS/80°W y N80°W/85°S de esta última estructura se presentan tres diaclasas en un metro (Foto 5.3).

Continuando hacia El Retiro, unos 400 m, por la misma vía se encontró otro sitio con características similares. Sobre el talud izquierdo (oriental) se encuentra diaclasamiento que afecta el corte hasta la superficie del terreno, y cuya disposición estructural es N40°E/vertical, N10°W/70°E y N70°E/Vertical. La estructura N70°E/vertical presentan cinco diaclasas en un metro. Las diaclasas son abiertas y la vegetación las aprovecha y por ellas se introducen sus raíces. Las raicillas de la vegetación salen perpendiculares al plano de la diaclasa por lo que se interpreta que la apertura de estas estructuras no se debe a procesos de bioturbación. La apertura de algunas diaclasas es de 0,05 m (0,5 cm) (Fotos 5.5 y 5.6).



**Fotos 5.1 y 5.2 Sitio localizado a 1,2 km del Mall de Caravanchel por la vía que de este sitio comunica con El Retiro**



**Foto 5.3 Corte de la vía Caravanchel – El Retiro**



**Foto 5.4 Vista general del corte oriental de la vía afectado por el diaclasamiento**



**Fotos 5.5 y 5.6 Corte de la vía Caravanchel – El Retiro afectado por el diaclasamiento**

Ingeominas (2007) reporta en este sitio, lo que propone se denomine, las Sedimentitas de la Fe. Las describen como un cuerpo de forma tabular con área aproximada de 3 km<sup>2</sup> que aflora entre la represa de La Fe y el municipio de El Retiro, sobre la carretera que parte del sitio Caravanchel a El Retiro, conformada por rocas sedimentarias ligeramente consolidadas pero con algo de litificación. Están compuestas por lodolitas grises finamente laminadas en capas subhorizontales planas paralelas con partición laminar, areniscas abigarradas medias y gruesas a ligeramente conglomeráticas, mal seleccionadas, con gránulos y guijos angulares a subredondeados de cuarzo, plagioclasa y líticos de metamorfitas, en capas planas paralelas a onduladas, y hacia la base con intercalaciones de capas muy gruesas, de más de 1,50 m de espesor, de turbas de color pardo oscuro con capas finas de carbón negro brillante laminado (lignito). Las grauvacas son de tamaño arena gruesa a ligeramente conglomerática, granosoportadas a matriz soportadas, con empaquetamiento puntual a flotante en una matriz lodosa, se presentan en capas gruesas a muy gruesas onduladas no paralelas, ligeramente plegadas y con buzamiento subhorizontal entre 3° y 6° SE y rumbo N20°W. Relacionadas a las Sedimentitas de La Fe, se encontraron restos fósiles de hojas.

Ingeominas (2007) relaciona el origen de estos sedimentos a un lago de agua dulce poco profundo, con periodos alternos de erosión y aporte detrítico con erosión fluvial en un área tectónicamente activa donde se acumularon sedimentos detríticos producto de la erosión de las montañas adyacentes y periodos tranquilos y de estabilidad con deposición de sedimentos finos, desarrollo de zonas de pantano y acumulación de materia orgánica con formación de turberas que dieron origen a las capas de lignito que se encuentran cubiertas por depósitos detríticos fluviales.

A las Sedimentitas de la Fe Ingeominas (2007) le asigna una posible edad Plioceno-Pleistoceno (5,3 Ma – 0,01 Ma) debido a su ubicación por debajo de los niveles de terrazas del río Negro y su bajo grado de litificación. Según Page (1986) los depósitos de terrazas que han sido cortadas por debajo de la superficie de erosión de Ríonegro, en el área del río Negro, son paleomagnéticamente inversas, lo que indica que pueden ser tan viejas como 790 000 años y como edad máxima tener 1 600 000 años. Toro (2007) estima para estos depósitos lacustres una edad de 2.1 Ma con base en investigaciones realizadas en la región, donde se han identificado una serie de depósitos lacustres, pequeños, que se encuentran a nivel regional y que posiblemente estén asociados al levantamiento de la Cordillera Central. Integral (1982) reporta un depósito lacustre en la región de Llano de Ovejas, occidente del Valle de Aburrá, con edades datadas por C<sub>14</sub> entre 18 000 y 35 000 años. Teniendo en cuenta lo anterior sólo se puede decir que estos sedimentos se formaron en los últimos 2,1 Ma.

Ingeominas (2007) presenta como probable el origen tectónico para la depresión donde se depositaron las Sedimentitas de La Fe, debido a la combinación de los sistemas estructurales NS (Falla La Acuarela) y N45°E (Falla Don Diego – Falla Normandía) y la consideran de posible edad Pliocena (5,3 Ma – 1,8 Ma), indicando una reactivación de ambos sistemas ligeramente anterior al Plioceno para formar la cuenca. Luego de la

deposición de la secuencia, ésta fue sometida a un plegamiento suave (evento compresional suave).

El diaclasamiento tiene como explicación actividad tectónica dada la regularidad y sistematización que presenta. Este diaclasamiento afecta las cenizas volcánicas que recubren la zona, siendo muy claro en la secuencia lacustre cuya edad no se conoce pero se estima puede corresponder a 2,1 Ma (Toro, 2007). No se tienen cortes con toda la secuencia de cenizas volcánicas completa ya que encima de estos depósitos lacustres se debería encontrar la línea de piedra y la secuencia de cenizas volcánicas del Cuaternario. En uno de los cortes se identificó un horizonte de ceniza volcánica afectada por diaclasamiento, que en visita de campo fue identificada como correspondiente a un nivel de cenizas anfibólico, cuya edad se estima entre 300 000 y 25 000 años. Integral (1982) reporta cuatro dataciones radiométricas de las cenizas volcánicas con edades entre 10 000 años, en las capas superiores y 38 000 años en las inferiores y cerca de Las Palmas, en una secuencia de cinco horizontes volcánicos intercalados con material aluvial, al sureste de Medellín, reportan para el segundo horizontes de cenizas una edad de  $12\ 745 \pm 560$  años y para el cuarto horizontes con  $20\ 065 \pm 840$  años.

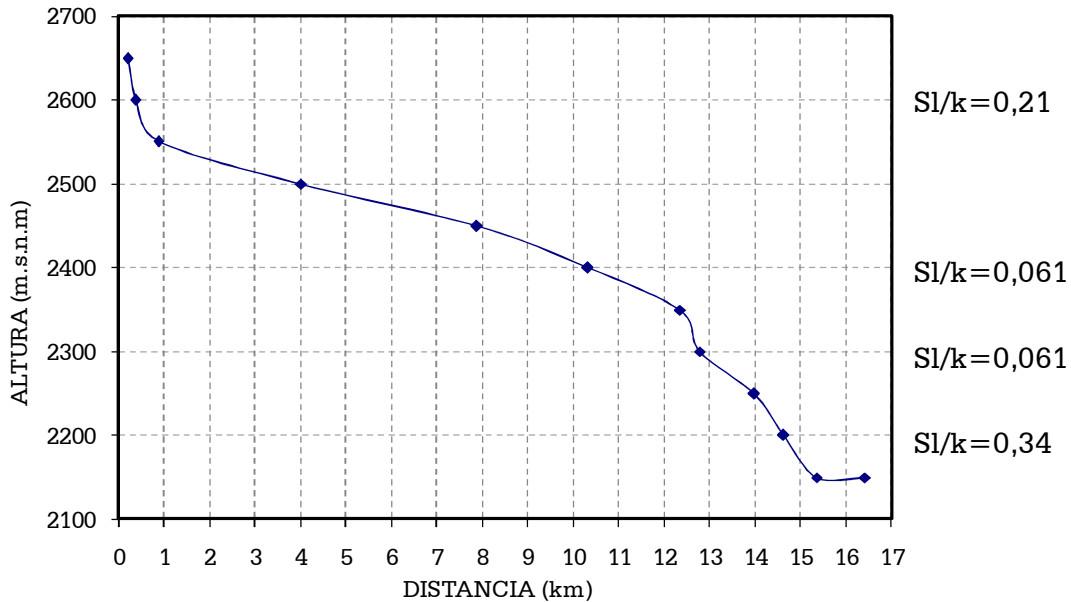
No es posible, con las evidencias de campo identificar la falla o fallas responsables de este diaclasamiento y no necesariamente coincide la dirección de la falla con la dirección del diaclasamiento ya que depende del tipo de movimiento dado. Igualmente no se identificó en campo desplazamiento que sugiera la magnitud del movimiento de la falla o fallas involucradas. Sin embargo, teniendo en cuenta el marco tectónico de la zona y el planteamiento que hace Ingeominas (2007) sobre el origen tectónico de la cuenca donde se localizan las Sedimentitas de la Fe, se tiende a asignar como posibles fallas causantes de este diaclasamiento a La Acuarela, Don Diego, Normandía o La Honda.

La incertidumbre es muy grande con relación al grado de actividad de esta falla y hay muchas hipótesis que aún deben ser probadas en cuanto a la actividad de estas fallas.

Es importante mencionar que en la cola del embalse la Fe hay fuentes de agua salada, en la actualidad hay por lo menos una y varios de los que existían fueron cubiertos por el embalse y estudiados en su momento en lo referente a calidad de las aguas y efectos corrosivos. La presencia de fuentes de agua salada podría estar relacionada con fallas activas y es un aspecto que se debe estudiar con detalle.

### **5.1.2 Anomalía quebrada Las Palmas**

Complementando las anomalías tectónicas que se presentan en el área de Caravanchel El Retiro se tiene la anomalía que presenta el perfil longitudinal de la quebrada Las Palmas.



**Figura 5.1 Perfil longitudinal de la quebrada Las Palmas**

Donde SI es el índice de gradiente del drenaje para un intervalo de cotas determinado y k es el índice de gradiente para todo el drenaje, desde el nacimiento hasta la desembocadura. La relación SI/k debe ser aproximadamente igual a la unidad (Burbank y Anderson, 2001).

Los valores en la relación SI/k cercanos a uno (1) indican que la porción del río se acerca a la forma ideal. Valores muy pequeños (por ejemplo  $SI/k < 0,3$ ) o muy grandes (por ejemplo  $SI/k > 2$ ) indican gradientes muy diferentes a los esperados en el perfil longitudinal ideal que pueden estar relacionados con perturbaciones tectónicas.

Como se puede observar el perfil longitudinal de la quebrada Las Palmas es anómalo y presenta unos valores de SI/k anómalos siendo o muy inferiores a la unidad o muy superiores.

El drenaje es muy sensible a los cambios que se dan en su gradiente y por lo tanto es un indicador útil de procesos tectónicos. Las características del drenaje pueden reflejar la deformación asociada con pliegues y fallas que no es evidente en el terreno.

Las características de los canales de los ríos dependen de muchos factores que incluyen: (i) litología del lecho del río, (ii) carga de sedimentos, (iii) clima, (iv) entrada de tributarios, (v) topografía local y (vi) actividad humana, entre otros. Cuando los cambios

en las características de los canales no se pueden explicar a partir de los factores mencionados, se tiene evidencia de tectónica activa (Burbank y Anderson, 2001).

La deformación tectónica depende del tipo de drenaje y de las características del movimiento tectónico. En general, anomalías en el perfil longitudinal del río, cambios en su dirección, cambios en sinuosidad o la forma del lecho, y procesos de gradación o degradación, pueden sugerir la presencia de fallas ocultas (Burbank y Anderson, 2001).

### 5.1.3 Sector Vereda La Hondita

En la cuenca de la quebrada La Honda, en el sitio cerca de donde cambia su dirección SN para tomar WE y desembocar en la quebrada La Mosca; por la vía que transcurre por la parte alta de la divisoria de aguas de la vertiente derecha de la quebrada La Honda, se identificó un paleosuelo afectado por diaclasamiento (Foto 5.7). Para acceder a este sitio se toma, desde la autopista Medellín – Bogotá, la variante al aeropuerto, y por el estadero San José, a unos 600 m del cruce de la variante con la autopista, se toma la vía destapada que conduce a la vereda La Hondita. Las coordenadas de este sitio son  $N6^{\circ}16'0,9''$ ;  $W75^{\circ}26'30,0''$  con una altura estimada 2216 m. En la Foto 5.8 se aprecia el sector donde se realizó la limpieza del talud para verificar la afectación neotectónica. El instrumento de medida tiene 1,50 m y se aprecia cómo el paleosuelo se encuentra afectado por el diaclasamiento y muchas de estas diaclasas parecen llegar hasta la superficie. Se presentan cinco diaclasas en un metro y la apertura de las diaclasas varía entre 2 y 3 cm.



**Foto 5.7 Talud sur de la vía**

En la Foto 5.9 se aprecia un pinchamiento o adelgazamiento del paleosuelo y un material anómalo sobre el paleosuelo que no se identificó en ningún otro sitio del corte. El material de color amarillo se localiza entre dos diaclasas muy continuas. La distancia entre el techo del paleosuelo adelgazado y el techo del paleosuelo hacia la derecha u occidente del corte es de 15 cm. En la foto se aprecia la apertura de algunas de las diaclasas.





**Foto 5.8 Talud sur de la vía, sector izquierdo de la Foto 5.7**



**Foto 5.9 Pinchamiento o adelgazamiento del paleosuelo**

En la Foto 5.10 se observa la terminación anómala del paleosuelo y que no se presenta una superficie que permita pensar en un lleno o una excavación o intervención de tipo antrópico. El material localizado a la derecha de la foto sugiere un depósito con algunos

bloques de tamaño centimétrico. Este sector se presenta en el extremo izquierdo de la Foto 5.7.



**Foto 5.10. Terminación anómala del paleosuelo**

Se aprecia cómo el paleosuelo tiene una anomalía. En el espacio entre los dos paleosuelos (Foto 5.7) el material corresponde a un depósito en el cual se encuentran cantos de tamaño centimétrico; en este sitio se recogieron dos tiestos que se deben analizar para definir a que corresponde y tratar de explicar la anomalía del paleosuelo y descartar un lleno. En campo no se observó ninguna evidencia que sugiera que este material corresponda a un lleno de tipo antrópico.

Con base en la medida (15 cm) tomada en el sitio (Foto 5.9), se estimó el posible desplazamiento del paleosuelo, suponiendo que correspondan al mismo paleosuelo (Foto 5.11), obteniendo un valor de 0,75 m (setenta y cinco centímetros). Este desplazamiento podría corresponder a un graven pero la topografía actual no concuerda con esta explicación, por lo tanto se propone que sea un desplazamiento de 75 cm con el bloque oriental levantado y que correspondería a una estructura de dirección aproximada NS, ya que el corte del talud tiene dirección N70°E.



**Foto 5.11 Posible desplazamiento del paleosuelo**

Basados en estas suposiciones se tendría un indicio correspondiente a la falla La Honda. Para estimar la magnitud de un sismo a partir de un desplazamiento medido en campo, se trabajó con la ecuación desarrollada por Wells y Coppersmith (1994).

Teniendo un desplazamiento de 0,75 m se generaría un sismo potencial de magnitud Mw 6,6. La datación realizada en este sitio, la cual se presenta en el Anexo, indica una edad para el depósito de 1 160 años.

Esta sería una explicación preliminar que requiere mayor trabajo de campo y realizar un levantamiento detallado y con técnicas paleosísmicas de este corte al igual que complementarlo con el estudio de la falla La Honda en toda la región del oriente del Valle de Aburrá. Mientras se realizan estudios detallados se propone tomar como sismo probable un sismo de magnitud Mw 6,6 y una longitud de falla de unos 25 km. La Figura 5.2 muestra el levantamiento detallado del corte, de acuerdo con la siguiente descripción:

- 1:** Depósito areno limoso de color pardo, presenta contacto gradacional hacia el techo. Presenta óxidos de hierro de color rojizo.
- 2:** Paleosuelo, color café con menor contenido de materia orgánica que P1, poco compacto, arenoso y presenta contacto gradacional con 1 y con el paleosuelo P1.
- P1:** Paleosuelo de color negro oscuro y gran contenido de materia orgánica, es compacto y presenta diaclasas.
- 3:** Paleosuelo similar a 2 pero de carácter limoso, color café claro, con contenido de materia orgánica. Sus contactos son gradacionales. Presenta un horizonte arenoso de color crema, con espesor máximo de 0,10 m, no compacto, que lo separa de P1 en el cuadrante II-3.

- 4: Depósito de color amarillo, similar a 1, limo arenoso, presenta diaclasas en su extremo sur. Sus contactos son gradacionales.
- 5: Paleosuelo de color café claro (más claro que los otros paleosuelos identificados en el corte), presenta olor a tierra, no está compactado y es arenoso, se presenta suelto.
- 6: Depósito color ocre a pardo amarillento, limo arcilloso y compacto.
- 7: Depósito de color naranja, arenoso, presenta bloques de tamaño milimétrico (tamaño máximo 0,01 m) y su contacto es neto.
- 8: Paleosuelo muy suelto con muchas raíces, es arena fina a muy fina, color café muy claro. Presenta algunos bloques milimétricos.
- 9: Similar a 7 pero con bloques más grandes de tamaño centimétrico (menores de 0,05 m). En este depósito se identificó un pedazo de baldosa.
- 10: Depósito suelto de color café claro, arenoso, presenta bloques centimétricos (0,08 m x 0,12 m) y presenta pedazos de ladrillo y de cemento. Hacia el techo se encuentran bolsas plásticas.

**Lleno:** Presenta algunos bloques redondeados y bolsas plásticas.

**P2:** Paleosuelo, suelto, arenosos, color negro, con muchas raíces.

#### **5.1.4 Sector Guarne – 500 m al sur del cruce de la quebrada La Mosca con la Autopista Medellín - Bogotá**

Por la autopista Medellín – Bogotá, a unos dos kilómetros de la cabecera municipal de Guarne, hacia el sur (Bogotá). En el talud occidental de la vía, en inmediaciones del sitio denominado “Fresas Salvajes” y a unos 500 al sur del cruce de la quebrada La Mosca con la Autopista se encuentra un paleosuelo afectado por diaclasamiento. Algunas diaclasas presentan aperturas de dos centímetros y se presentan seis diaclasas en un metro.

Este sitio es el reportado por el GSM (2002) donde reporta desplazamientos verticales en los paleosuelos de tres centímetros. En el reconocimiento realizado no se identificó el desplazamiento reportado. Las coordenadas de este sitio son N6°16'0,9"; W75°26'30,0".

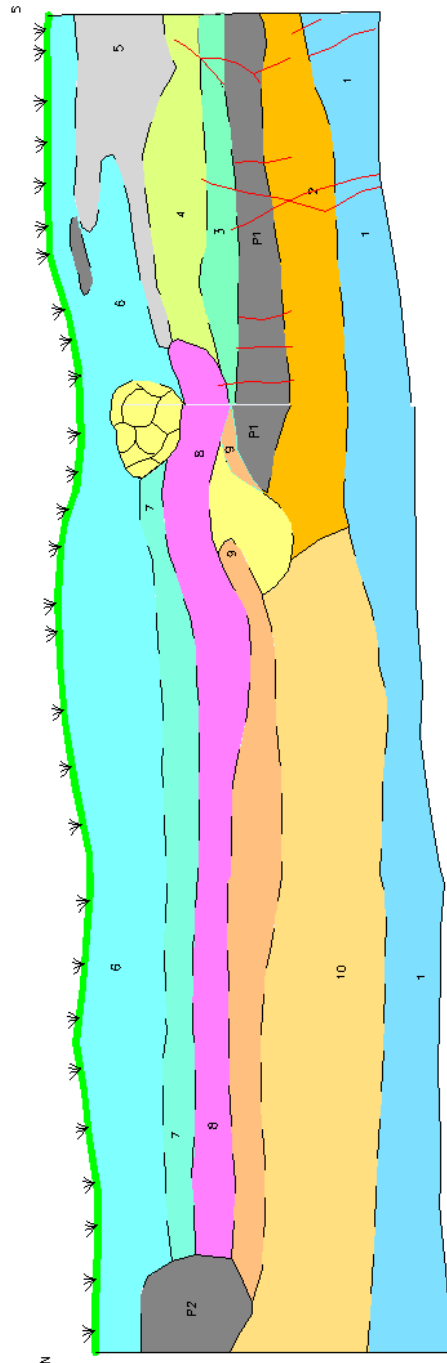


Figura 5.2 Levantamiento detallado corte en La Honda

En la Foto 5.12 se aprecia el paleosuelo afectado por un diaclasamiento sistemático. Las diaclasas tienen disposición estructural N65°W/Vertical. Algunas presentan apertura de 2cm.



**Foto 5.12 Paleosuelo afectado por un diaclasamiento sistemático**

El paleosuelo aflora a lo largo de unos 100 m y en toda su longitud presenta el diaclasamiento. En la superficie del terreno hay intervención antrópica y esto dificulta identificar si el diaclasamiento afecta hasta la superficie del terreno (Foto 5.13).

En la Foto 5.14 se observa a la izquierda el corte después de realizada la limpieza del talud, donde se aprecia claramente la continuidad de las diaclasas luego de haber retirado el material que ha sufrido desecación. Hacia la parte baja de la foto y a unos 15 cm del techo del paleosuelo, se observa un tiesto que se está analizando para identificar el tipo de material que es, posible origen y edad.



**Foto 5.13 Intervención antrópica en la parte superior**

#### **5.1.5 Sector El Tablazo, quebrada Estoraque**

En este sitio fue caracterizada la falla Sajonia por el GSM (2002) reportando por lo menos un último movimiento, para esta falla, de 0,10 m que estimaron ocurrió en los últimos 10 000 años, dando una tasa de desplazamiento de 0,01 mmm por año indicando un grado de actividad de bajo a muy bajo. Se estima un sismo máximo de magnitud Mw 6,0; y un grado de actividad de bajo a muy bajo.



**Foto 5.14 Continuidad de las diaclasas luego de haber retirado el material que ha sufrido desecación**

#### **5.1.6 Conclusiones sobre el sector Oriente del Valle de Aburrá**

Se tienen cuatro sitios con indicios de actividad neotectónica sin que sea muy clara la interpretación de cuál es la estructura que está generando estos indicios. Al hacer recorridos por la vía Santa Helena desde el sector de Sajonia hasta la vereda Pericos se observó en los cortes de la vía afloramientos similares a los descritos en los sitios mencionados, encontrándose los paleosuelos afectados por diaclasamiento hasta el suelo actual.

Si se considera que la falla Acuarela (definida por Ingeominas) cruza el Valle de Aburrá, en inmediaciones de Bello, y que se tienen evidencias de afectación tectónica en Bello en el barrio Santa Ana (Estec, 1983) que afecta las cenizas volcánicas y que lo localizan en los últimos 10 000 años, y que se encontraron evidencias de afectación tectónica en Llano de Ovejas con diaclasas que afectan un paleosuelo y el suelo actual. Se propone suponer que se tiene un fallamiento ocurrido recientemente, en los últimos 10 000 años. Con estas consideraciones el grado de actividad se propone que sea de bajo a moderado para la que se denominó falla Sajonia.



Los indicios que se reportan abarcan una amplia región lo que lleva a pensar que la magnitud del sismo es importante y el último movimiento reciente por estar afectando paleosuelos y la superficie del terreno. Se requieren estudios detallados para caracterizar las diferentes fallas reportadas en la zona. La cartografía de INGEOMINAS sugiere que es más importante la falla Acuarela que la falla Honda, igualmente la anomalía del perfil longitudinal a lo largo de la quebrada Las Palmas sugiere que en este sector hay anomalías recientes.

Se propone asignar un sismo probable de magnitud Mw 6,6 a la falla Acuarela y a la falla Honda y un grado de actividad de bajo a moderado.

## **5.2 SECTOR TÚNEL DE OCCIDENTE – PORTAL OCCIDENTAL, OCCIDENTE DEL VALLE DE ABURRÁ. SITIO CASSETAS DE PEAJE**

Este sitio se localiza en inmediaciones del portal occidental del túnel de occidente por la vía que comunica a Medellín con Santa Fe de Antioquia, en el talud sur de la vía en donde se localizan las casetas del peaje.

En este sitio se aprecia lo que se está interpretando como una superficie de falla. Se observa el contacto neto entre materiales diferentes y en la parte alta se observa como el suelo está afectado por esta estructura. La falla tiene una disposición estructural N15°W/75°W y coincide con una de las trazas de la falla San Jerónimo. El desplazamiento acumulado estimado es de 1,50 m tomando como referencia el techo del depósito que se encuentra en ambos lados de la falla. Este depósito está conformado por bloques angulares en matriz arcillosa (80% bloques, 20% matriz), los cuales hacia la traza de la falla se alinean siguiendo el plano de falla (Foto 5.15). La medida del último desplazamiento se tomó a partir de la base del suelo localizado al occidente del plano de falla (a la izquierda de las Fotos 5.16 y 5.17) con respecto a la superficie del terreno y siguiendo la dirección del plano de falla, dando un valor de 1,0 m. Se considera que este desplazamiento ocurrió en un sólo evento ya que de darse en diferentes eventos se debería haber generado un escarpe pequeño y por efecto de la erosión y la gravedad, el material del escarpe habría caído sobre el suelo y habría quedado registrado como un pequeño horizonte dentro del suelo, hecho que no se observa en el afloramiento. El hecho de que el suelo no aparezca del otro lado del plano de falla plantea que el desplazamiento puede ser mayor del medido.

Para estimar la magnitud de un sismo a partir de un desplazamiento medido en campo, se trabajó con la ecuación desarrollada por Wells y Coppersmith (1994). Si tomamos el desplazamiento de 1 m, se tiene un evento sísmico de magnitud Mw 6,7.

Para estimar el segmento de falla y su longitud de ruptura se trabajó igualmente con la ecuación desarrollada por Wells y Coppersmith, donde para un sismo de magnitud Mw 6,7 la longitud del segmento es de 25 km.

Teniendo en cuenta el trabajo de Estrada *et al* (2004) esta evidencia corresponde al segmento de falla denominado por dichos autores como Falla San Jerónimo – Segmento 5 y que va desde la quebrada Cangrejo al norte. La evidencia descrita corresponde al extremo sur de este segmento de falla.

Teniendo en cuenta la longitud de falla, este segmento de la falla San Jerónimo coincide con lo que WCC (1979) denominó falla Sopetrán, estos autores la describen como una estructura de 29 km de longitud, con disposición estructural NS-N10°W/70°E-30°W y con evidencias de desplazamiento en el Cuaternario Tardío entre la quebrada Mirandita y La Sopetrana (en inmediaciones de Sopetrán), pero le asignan el grado de actividad a partir de otras evidencias encontradas 3 km al NE de San Jerónimo; posteriormente el GSM (2002) le asigna una longitud de falla de 18 km. Teniendo en cuenta lo anterior se propone dejar una longitud de ruptura de 25 km y un sismo potencial de magnitud Mw 6,7.



**Foto 5.15 Se observan los cantos alineados**



**Foto 5.16 Plano de falla y contraste de materiales en plano de falla**



**Foto 5.17 Detalle del suelo desplazado y contacto con depósito de vertiente**



**Foto 5.18** Perfil del afloramiento (tomada hacia el oriente) donde la topografía no sugiere la ocurrencia de un deslizamiento



**Foto 5.19** Zona de las casetas de peaje del portal occidental del túnel. La zona presenta cultivos y está intervenida hacia el oriente del afloramiento, pero no se encuentran evidencias que sugieran que se trata de un deslizamiento

Respecto al grado de actividad, la falla Sopetrán se estimó, por WCC (1979) con grado de actividad de bajo a moderado a partir de unos remanentes de flujos de escombros, localizados 3 km al NE de San Jerónimo, que terminan contra la falla y cuya edad se estimó en 400 000 años. La evidencia reportada en este trabajo, se considera como un evento muy reciente, y la datación realizada sobre el depósito, que se presenta en el Anexo, sugiere una edad de 1 890 años de antigüedad.

Teniendo en cuenta lo anterior es importante realizar estudios que permitan disminuir la incertidumbre en la caracterización de esta falla y se sugiere retomar los sitios reportados por WCC (1979) en las quebradas Mirandita y La Sopetrana.

### 5.3 SECTOR QUEBRADA LA CABAÑA, SAN ANTONIO DE PRADO, VERTIENTE DERECHA QUEBRADA DOÑA MARÍA

Este sitio fue estudiado en detalle por Estrada *et al* (2005) en donde se caracterizó cada uno de los segmentos de falla identificados. En este estudio se retomó la denominada falla San Jerónimo – Segmento 3, localizado entre la quebrada Larga y la quebrada Los Vallados. El objetivo de retomar este segmento de falla es que es el segmento que presenta una expresión geomorfológica más clara que sugiere que ha tenido una actividad reciente, e igualmente por ser el segmento que presenta lo que se ha interpretado hasta el momento como Lomos de Falla (Foto 5.20, 5.21 y 5.22).



Foto 5.20 Expresión geomorfológica de la falla San Jerónimo Segmento 3 (*i.e.* Estrada *et al*, 2005)

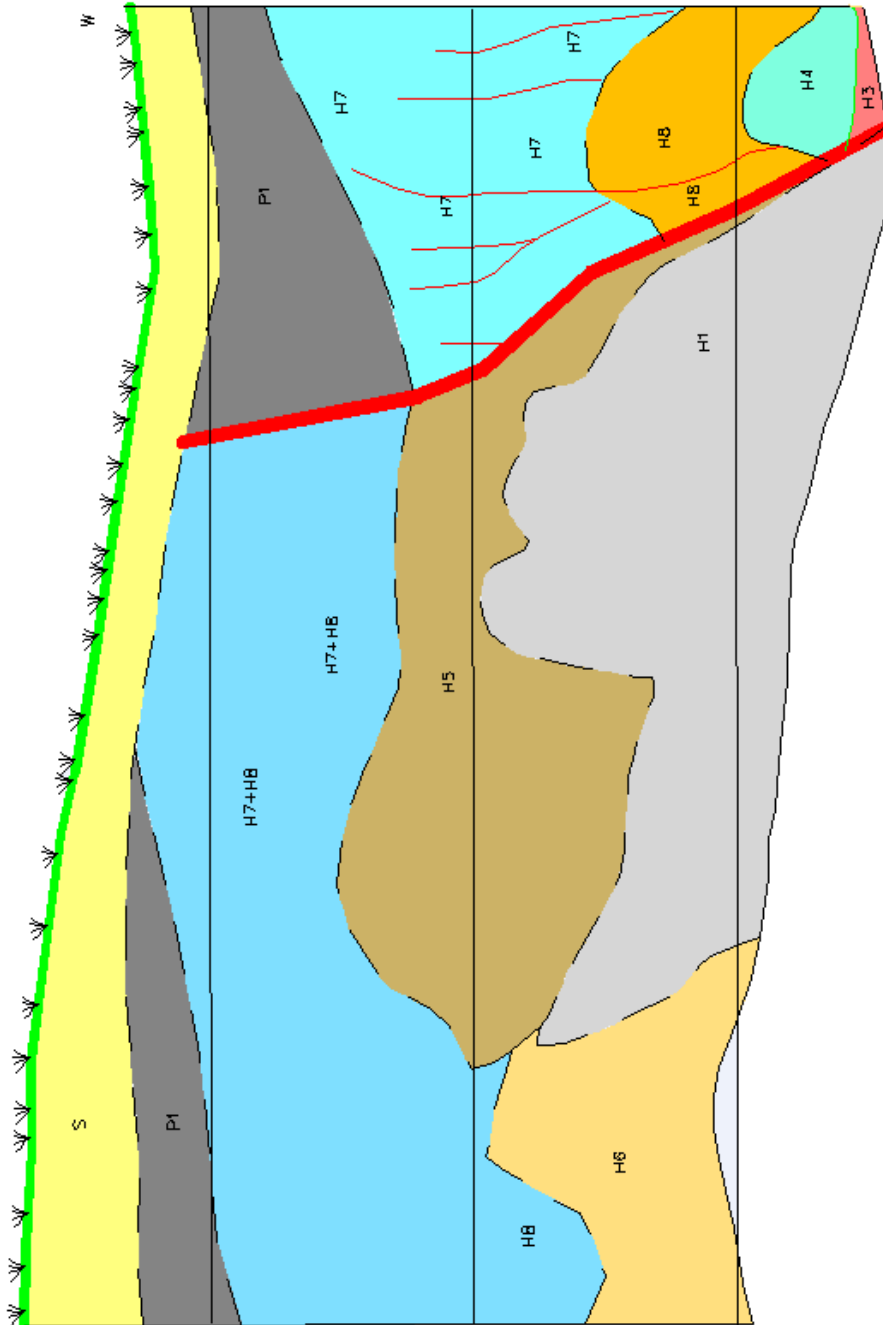


Figura 5.3 Levantamiento detallado corte en El Peaje



**Foto 5.21 Lomo de falla con dirección NS en la vertiente izquierda de la quebrada La Cabaña. Obsérvese las personas sobre la cima del lomo en el centro de la foto como escala**



**Foto 5.22 Geofoma interpretada por Estrada *et al* (2005) como lomos de falla. Foto tomada hacia el NE**

Esta geofoma es descrita como posibles lomos de falla asociados con la actividad tectónica reciente de la falla San Jerónimo – Segmento 3; los lomos de falla son descritos como dos colinas alargadas en sentido NS separadas por una vaguada. Las

dimensiones de Sur a Norte son 31 m de largo por 6 m de ancho (Foto 5.21) y 15 m de largo por 5 m de ancho (Foto 5.22).

Ordoñez *et al* (2005) menciona que la presencia de ventanas de exposición, de cuerpos ultramáficos y/o plutónicos, dispuestos a modo de *bent-folds* o estructuras *overstep* asociadas a desplazamientos buzantedeslizantes, de corta longitud, pueden desarrollar morfologías similares. Queda la pregunta de si no es una geoforma generada por actividad reciente cómo se ha preservado en el tiempo de tal forma que en la actualidad sugiera la posibilidad de lomos de falla. Este interrogante no se ha resuelto y en este estudio no se ha encontrado nueva evidencia que aporte información a la solución de la pregunta planteada.

En la búsqueda para resolver estos interrogantes se realizó un recorrido por el cauce de la quebrada La Cabaña en el sector donde se localizan los denominados lomos de falla. En las Foto 5.23 y 5.24 se puede apreciar las características del cauce de la quebrada La Cabaña en inmediaciones de las geoformas descritas.



**Foto 5.23** Cauce de la quebrada La Cabaña cuando tiene dirección WE antes de girar en sentido SN y bordear las geoformas denominadas lomos





**Foto 5.24** Cauce de la quebrada La Cabaña en su tramo SN, siguiendo la dirección de la falla San Jerónimo – Segmento 3 en el sitio donde inician los lomos de falla (vertiente izquierda de la quebrada); foto tomada desde la vertiente izquierda de la quebrada y hacia el oriente

Se realizó un recorrido desde unos 100 m aguas arriba del cruce de este drenaje con la vía de acceso a la región en sentido aguas arriba hasta donde inician las geoformas que nos ocupan. En este recorrido se encontraron cuatro anomalías importantes en el cauce de la quebrada que por facilidad para el lector se describirán desde el sitio de la Foto 5.24 (inicio de las geoformas) hacia aguas abajo, así:

- Un poco aguas abajo del sitio que se observa en la Foto 5.24 se encuentra un salto vertical en el nivel del cauce de la quebrada (Foto 5.25). El cauce de la quebrada presenta un descenso vertical de 0,30 m. Tal como se aprecia en la foto el material corresponde a un aluvial y no se observó roca aflorando en el cauce. En las vertientes de la cuenca no hay indicios de este cambio de nivel.
- Continuando el recorrido hacia aguas abajo se encuentra otro salto vertical en el cauce de la quebrada, en material aluvial (Foto 5.26) el cual se midió en 0,60m. Tal como se aprecia en la foto el material corresponde a un aluvial y no se observó roca aflorando en el cauce. Esta anomalía se estima que se localiza inmediatamente al norte de lo que se ha denominado lomos de falla, en un sector donde se tienen otras geoformas que podrían corresponder a otros dos lomos de falla, aunque su expresión geomorfológica no es tan clara.



**Foto 5.25 Foto tomada hacia aguas arriba (sentido sur)**

- Continuando el recorrido aparece el tercer cambio de nivel, con un desplazamiento vertical de 0,40m (Foto 5.27). Tal como se aprecia en la foto el material afectado es un aluvial, no se aprecia afloramiento rocoso en el cauce de la quebrada.

En las Fotos 5.28 y 5.29 se aprecia el cauce de la quebrada aguas debajo de la Foto 5.27. En ellas se puede apreciar el tipo de aluvial y la amplitud del cauce. En general las paredes del cauce son empinadas y moldeadas en roca.

- Continuando hacia aguas abajo se encuentra el último cambio vertical de nivel en la quebrada (Foto 5.30) el cual presenta un desnivel vertical de 1,25 m. Tal como se aprecia en la foto el material afectado es material aluvial, aunque ya en este sitio se encuentran bloques de roca.

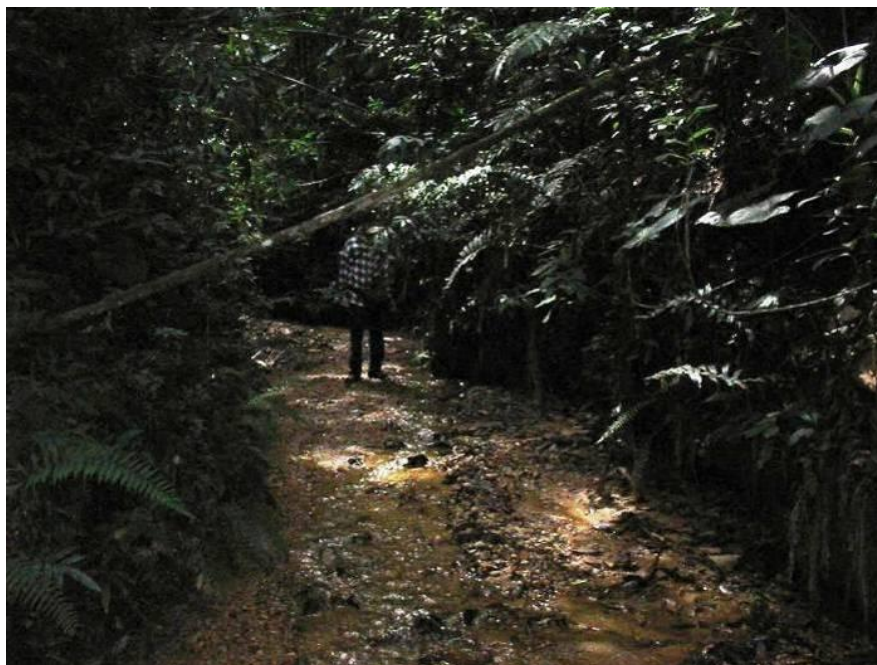
Ya cerca del cruce de la quebrada con la vía de acceso a la región se presenta un cambio en las características del cauce, pasando a ser un cauce rocoso y de mayor gradiente (Foto 5.31).



**Foto 5.26 Foto tomada hacia aguas arriba (sentido sur)**



**Foto 5.27 Foto tomada hacia aguas arriba**



**Foto 5.28 Foto tomada hacia aguas arriba**



**Foto 5.29 Foto tomada hacia aguas arriba**



**Foto 5.30 Último cambio vertical de nivel en la quebrada**

En la vertiente derecha de la quebrada La Cabaña se presenta una silleta que sugiere la presencia de una falla en dirección  $S70^{\circ}E$  a  $WE$  que va desde la falla San Jerónimo – Segmento 3 hasta la silleta que se encuentra en la cuchilla El Barcino y que sería la longitud mínima de la estructura propuesta. Inicialmente se pensó que los peldaños identificados en el lecho de la quebrada La Cabaña con dirección  $EW$  eran una evidencia de actividad de esta estructura denominada falla Cuchilla El Barcino, pero en salida de campo realizada el 19 de febrero de 2007 se apreciaron cambios importantes en el cauce de la quebrada lo cual indica que estas anomalías tienen un componente fluvial importante. Las anomalías identificadas se interpretan como obstrucciones por troncos de árboles que generaron la acumulación de material aluvial de un evento de gran magnitud y energía, ya que colmató las obstrucciones y distribuyó el material a lo largo de 1 km, dejando en el cauce algunos peldaños. No se descarta que el cauce presente escalonamiento generado por la estructura propuesta; sin embargo, no es posible localizar el último movimiento de esta falla en el tiempo, con la información que se tiene disponible en el momento. En la Foto 5.32 se aprecia la geomorfología asociada a lo que se está denominando Falla Cuchilla El Barcino.



**Foto 5.31 Tomada hacia aguas arriba (sentido sur)**

En cuanto a su grado de actividad no se tiene información que permita estimarlo pero por su expresión geomorfológica y comparándola con la falla San Jerónimo – Segmento 3 se le asigna un grado de actividad de bajo a moderado.

Para poder aclarar las dudas e inquietudes que se plantean en relación a la falla San Jerónimo Segmento 3, se propone realizar estudios geofísicos que permitan identificar la superficie del macizo rocoso e interpretar si las geoformas denominadas lomos están modeladas en roca o en material no consolidado. De acuerdo con los resultados que se obtengan se sugiere realizar levantamientos geodésicos detallados en la zona, a nivel centimétrico, concentrándose en el tramo donde se localizan las geoformas identificadas como lomos, y en el depósito que separa este ramal de la quebrada con el ramal más occidental de la misma corriente. Después de tener bases geodésicas, establecer puntos de control para realizar medidas anuales durante varios años que permitan identificar cambios milimétricos en el terreno para identificar el tipo de deformación que se está presentando y su nivel de actividad. Igualmente se recomienda instalar una red sísmica local que pueda detectar sismos de pequeña magnitud no percibidos por las personas ni por los equipos lejanos y que ayuden a interpretar lo que está sucediendo en este sitio.



**Foto 5.32 Tomada desde la vertiente derecha de la quebrada La Cabaña, con dirección S75°E**

Para fines de la estimación de la amenaza sísmica para el Valle de Aburrá se propone retomar la información planteada por Estrada *et al*, quedando definido un segmento de falla de 5,9 km y un sismo probable de magnitud Mw 6. En cuanto a la actividad se propone para esta estructura considerar un grado de actividad moderado.

Es importante realizar estudios detallados de la falla San Jerónimo, tanto del segmento 3 como de segmentos aledaños, especialmente para verificar la longitud de los segmentos propuestos por Estrada *et al* (2005). Esto es muy importante pues a partir de los segmentos propuestos es que se está estimando la magnitud del sismo. Por el momento se considera que lo propuesto por Estrada *et al* es lo más confiable respecto a los datos de la falla San Jerónimo.

#### **5.4 SECTOR EBÉJICO – SEVILLA, OCCIDENTE DEL VALLE DE ABURRÁ. QUEBRADA LA CLARA O QUEBRADA SECA**

La quebrada La Clara presenta una expresión geomorfológico que sugiere la presencia de una falla. Esta expresión es visible en las imágenes de satélite (Figura 5.4) y en campo (Fotos 5.33 y 5.34).



**Figura 5.4 Imagen tomada de Google. A la derecha se aprecia Medellín y los municipios que conforman el Valle de Aburrá; a la izquierda se encuentra el río Cauca y a la derecha del río Cauca se aprecia la expresión geomorfológica, como una línea recta, que corresponde a la quebrada La Clara o La Seca**



**Foto 5.33 Quebrada La Clara, tomada desde la vía que de Ebéjico conduce a Sevilla, en dirección norte**





**Foto 5.34 Tomada hacia el sur. Se aprecia la geomorfología que sugiere la existencia de una falla a lo largo de la quebrada Seca o quebrada La Clara. (Foto Eduardo Parra)**

La expresión geomorfológica de este rasgo sugiere la presencia de una falla, y la claridad y visibilidad que presenta hace pensar en que puede ser un segmento con actividad reciente. Con base en la cartografía 1:100 000 se estima para este segmento una longitud de 24 km que puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,7.

En la cartografía disponible no hay ninguna falla trazada por esta zona pero se considera que puede ser un segmento de la falla Cascajoso descrita en el proyecto Cañafisto por WCC (1979); sin embargo, para evitar confusiones y mientras se estudia de manera detallada, se propone que se denomine como falla Quebrada Seca. En la imagen de satélite se puede observar que la expresión geomorfológica es superior a la de la falla Heliconia, localizada unos 5 km al occidente. WCC describen la falla Heliconia como la falla más prominente del Sistema de Fallas Romeral en la región de Cañafisto y mencionan que sus expresión geomorfológica prominente sugiere actividad en el Cuaternario Tardío; teniendo en cuenta lo anterior, se considera válida la caracterización preliminar que se hace para la denominada falla Quebrada Seca, recalcando que es importante hacer estudios detallados para confirmar o no lo propuesto en este trabajo. Igualmente queda la inquietud de si esta falla pertenece al Sistema Cauca o al Sistema Romeral, pero por el momento se considerará como parte del Sistema de fallas Romeral.

## 5.5 SECTOR QUEBRADA LA GARCÍA, EN INMEDIACIONES DE LA POBLACIÓN DE SAN FELIX, NW DEL VALLE DE ABURRÁ

Estec (1983) reporta depósitos del Cuaternario fallados, en el sector del barrio Santa Ana en el municipio de Bello, oriente de la quebrada Santa Ana. Estos autores reportan un control tectónico del cauce de las quebradas El Hato y La Guzmán, definidos por alineamientos rectos de los cauces en sentido EW y NE.

En el apique Estación 5 (ver Figura 5.5) reportan fallamiento de flujos de lodo con presencia de numerosas fallas, muchas de ellas alabeadas, con evidencias de movimientos tales como espejos de falla, orientación de minerales y zonas de cizalladura paralela a los planos de deslizamiento. Indican que no se apreció magnitud de desplazamiento ni orientación de éste. Describen la pared del apique con aspecto de brecha de falla con abundantes slickenslides en la matriz arcillosa y orientación en los minerales. Las direcciones y buzamientos reportados en la cara norte del apique excavado a N75°E, son: N35°E/70°NW, N56°E/24°NW, N5°E/34°NW, N65°E/85°SW, N59°E/39°NW, N84°E/42°NW, N65°E/32°NW, N10°W/44°SW, N10°W/62°SW, N25°W/10°NW, N17°E/57°NW, N15°E/66°NW. Dado que se tiene un horizonte superior con contenido importante de ceniza volcánica que no está desplazado y que no se encontraron rasgos en el microrelieve que sugiera una ruptura superficial reciente, proponen una edad mínima para el último movimiento de 10 000 años.

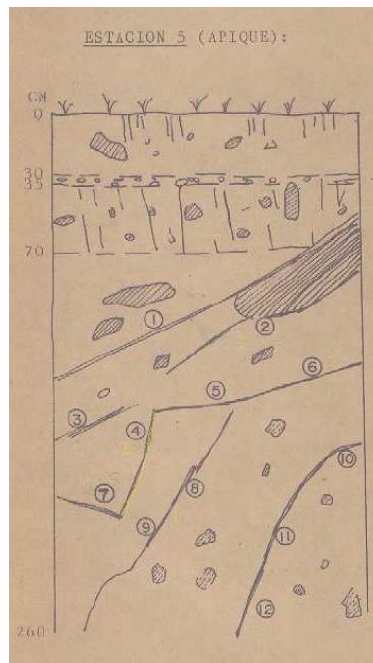


Figura 5.5 Apique Estación 5 localizado en la cota 1486 (Estec, 1983)

En el sitio y sus alrededores Estec no reporta evidencias de movimientos en masa antiguos y/o recientes pero sí zonas pantanosas y acequias, por lo que la consideran como una zona estable.

Hacia el cauce de la quebrada Santa Ana describen deslizamientos antiguos no acordes con el pequeño caudal del drenaje ni con el tamaño reducido de la cuenca; para esto sugieren un régimen diferente para este drenaje en épocas pasadas. Esto es importante revisarlo pues los movimientos en masa podrían estar relacionados con los indicios de neotectónica reportados al oriente de la quebrada Santa Ana.

En el apique Estación 6 (Figura 5.6), localizado en la misma vertiente que el apique Estación 5 se reportan igualmente anomalías de tipo tectónico. Reportan slickslides abundantes, predominando la disposición estructural N30°E/50°W.

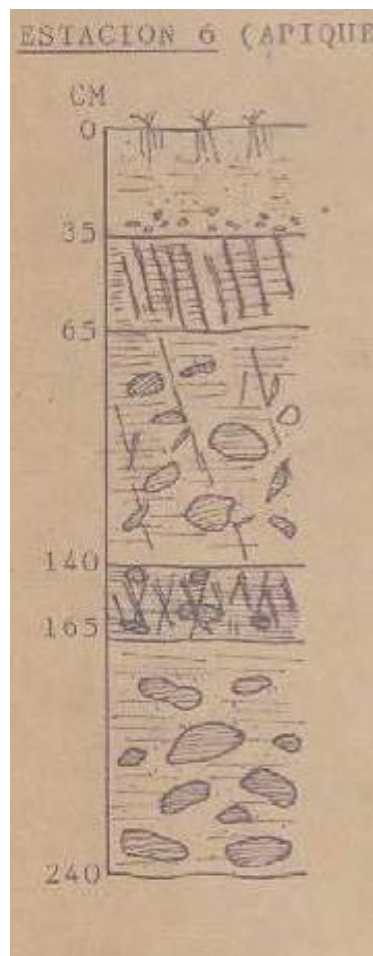


Figura 5.6 Apique estación 6 (Estec, 1983)

En la excavación antigua para un tanque, descrita como Apique 9, (Figura 5.7) reportan una posible zona de falla (identificado como 4 en Figura 5.7) entre un flujo de lodo (identificado como 2 en Figura 5.7) y un material aparentemente in situ y muy meteorizado (identificado como 3 en Figura 5.7).

El material in situ presenta diques con tendencias  $N80^{\circ}E/40^{\circ}NW$ ,  $N70^{\circ}E/60^{\circ}NW$ ,  $N30^{\circ}E$ /Subvertical. En la Figura 5.8 se aprecia la localización de los apiques mencionados.



Figura 5.7 Apique 9. Excavación para tanque, sector Santa Ana (Estec, 1983)

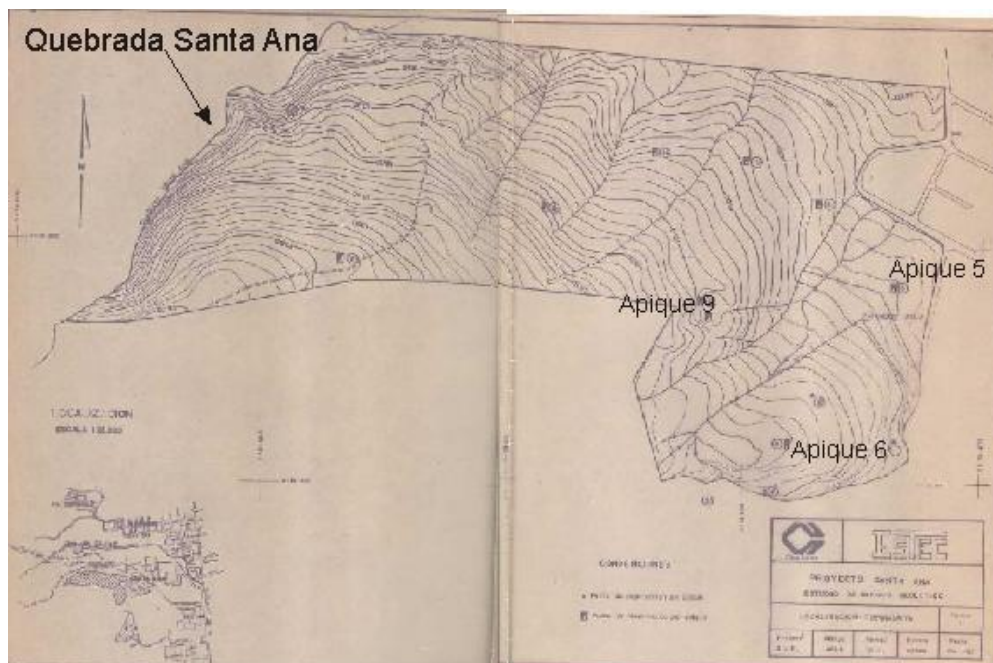


Figura 5.8 Localización de apiques Sector Santa Ana, Bello (Estec, 1983)

Dado que en la actualidad la zona de Bello presenta una alta intervención antrópica, se tomó la decisión de recorrer los alrededores, básicamente en la región de San Félix, Llano de Ovejas, donde Integral (1982) reporta depósitos de origen lacustre con edades entre 18 000 y 35 000 años ( $C_{14}$ ) y sugiere que fueron levantados tectónicamente por la ligera inclinación de los estratos hacia el occidente. Integral asigna estas evidencias a lo que denomina falla de Ovejas (de la cual no se encontró el mapa con su localización ni reportes posteriores donde se localice) y sugiere una tasa de desplazamiento alta para esta estructura aunque aclaran que los rasgos geomorfológicos observables a lo largo de su traza no lo indican pero le da mayor peso a la inclinación de los horizontes.

En los recorridos realizados en este proyecto se identificó, un depósito aluvial conformado por arena fina, suelta que suprayace un paleosuelo de color café oscuro a negro (45 cm de espesor), el cual a su vez suprayace un material arcilloso de color gris. Esta secuencia se encontró afectada por diaclasamiento registrado hasta el nivel del paleosuelo ya que las características de la arena suelta impiden que se forme la diaclasa (Fotos 5.35 y 5.36).

Se encontró relieve invertido (Foto 5.37). En este sitio se aprecia el aluvial de la quebrada La García en su vertiente izquierda; el aluvial se encuentra sobre el suelo residual del Batolito de Ovejas, en la parte alta de una colina y en un nivel superior al de la vertiente derecha de la quebrada y de los terrenos localizados tanto aguas arriba como aguas abajo.



**Foto 5.35 Depósito aluvial conformado por arena fina suelta que suprayace un paleosuelo**



**Foto 5.36 Depósito aluvial conformado por arena fina suelta que suprayace un paleosuelo**



**Foto 5.37 Relieve invertido, vertiente izquierda quebrada La García**

En este sector no se tiene claridad a cual estructura corresponden estos indicios y podrían ser efecto de la actividad del Sistema de Falla de La Honda descrito anteriormente. Por lo tanto se deja constancia de estos indicios pero se requiere mayor investigación para identificar a que estructura tectónica corresponden y a cuál evento están asociadas.

## 5.6 SECTOR QUEBRADA PUCUNÁ, EN INMEDIACIONES DE SEVILLA, NW DEL VALLE DE ABURRÁ

Este sector se encuentra localizado en la vertiente derecha del río Cauca, al occidente de la población de Sevilla.

Se identificó una anomalía en los depósitos localizados en la cuenca de la quebrada Pucuná, afluente del río Cauca por su vertiente derecha. En la Foto 5.39 se aprecia el depósito asociado a la quebrada Pucuná en la parte alta y media de su cuenca, antes de que gire su cauce para tomar rumbo EW y desembocar al río Cauca. El giro que hace esta corriente se considera anómalo teniendo en cuenta que la región está controlada por las fallas de los sistemas Cauca y Romeral, de dirección SN, lo que genera que las corrientes de la región drenen generalmente en sentido SN. Un poco aguas abajo del sitio donde la quebrada gira para tomar el sentido EW, se encuentra el trazo de la falla Cauca E, definida por WCC (1979). Es llamativo que el curso de la quebrada no esté controlado por la dirección de la falla Cauca E y que al contrario su trayecto sea perpendicular a la falla.

Unos pocos metros (entre 300 y 400 m) aguas abajo del sitio donde la quebrada toma el curso EW, se encuentra un depósito similar al de la Foto 5.38, pero localizado en la margen derecha de la quebrada y el cual se presenta como un depósito descabezado y basculado hacia el norte (Foto 5.39).



Foto 5.38 Parte alta y media de la cuenca de la quebrada Pucuná



**Foto 5.39** Foto tomada hacia el occidente. Se aprecia el depósito basculado hacia el norte y localizado aguas abajo del sitio donde la quebrada Pucuná cambia su curso para desembocar al río Cauca. Este depósito se localiza en la vertiente derecha de la quebrada

En la Foto 5.40 se puede observar detalles de la superficie del depósito que permiten apreciar su basculamiento hacia el norte.



**Foto 5.40** Se aprecia la superficie del depósito basculado hacia el norte. Foto tomada en dirección E



Para ilustrar el que el depósito que nos ocupa se encuentra descabezado se puede observar la Foto 5.41 en la cual se aprecia que no existe continuidad de la geomorfología de depósito hacia el sur.



**Foto 5.41 Se aprecia la vertiente izquierda de la quebrada Pucuná. Foto tomada hacia el S desde el depósito basculado al norte y localizado en la vertiente derecha de la quebrada Pucuná.**

En la Foto 5.42 se aprecia el material que conforma este terreno, donde se confirma que es un depósito granular de gran espesor (aproximadamente 40m).

Se identificaron por lo menos tres eventos de depositación diferentes. En la Foto 5.43 se aprecia el contacto entre los dos eventos superiores y en la Foto 5.44 se aprecia el evento más antiguo localizado hacia la base del depósito, sobre rocas sedimentarias. El depósito más antiguo se encuentra cementado y presenta algunas fracturas.



**Foto 5.42** Se aprecia el material que conforma la parte superior del depósito que se encuentra basculado. Por ser un material granular no es fácil identificar desplazamientos



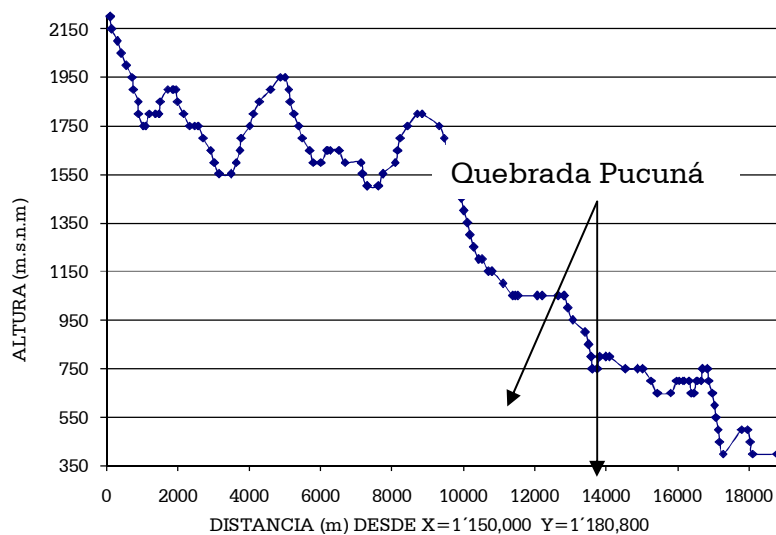
**Foto 5.43** En esta foto se aprecia el contacto entre los depósitos superiores



**Foto 5.44 Base del depósito sobre las rocas sedimentarias**

No existe claridad si esta anomalía está asociada a la falla Cauca E o existe otra estructura no identificada en la región. Se elaboraron perfiles topográficos y longitudinales a lo largo de la quebrada para aportar información y entender lo que sucede en esta zona.

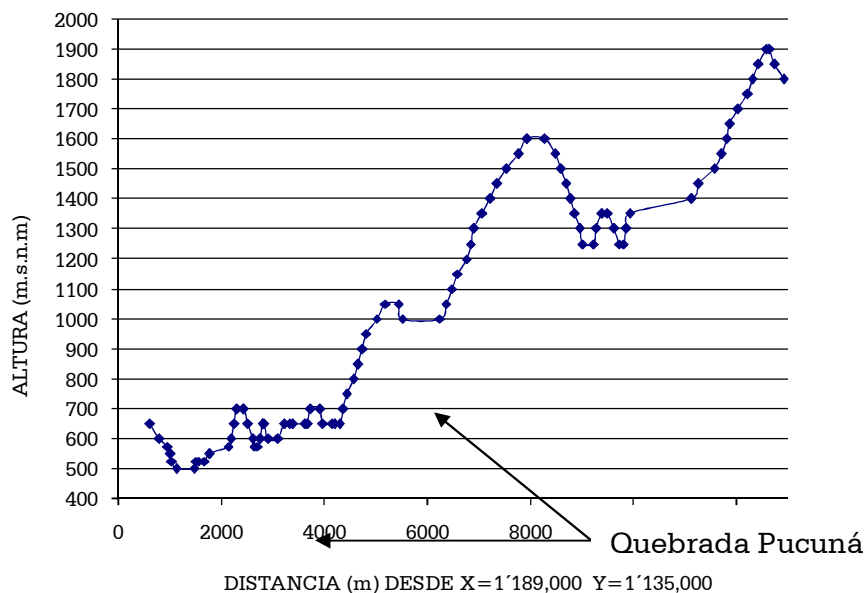
En el perfil topográfico, sector quebrada Pucuná, con dirección N39°W, se aprecia que esta corriente tiene un cambio importante de nivel de su cauce entre las cotas 1100 y 750; esta misma situación se evidencia en el perfil con dirección WE, en los cuales se aprecia un cambio en el nivel de la quebrada de unos 400 m en un trayecto de 1,5 km en sentido WE.



**Figura 5.9 Perfil de la quebrada Pucuná - Dirección N39W**

El perfil longitudinal de esta corriente presenta igualmente anomalías entre las cotas 650 y 1000.

Lo anterior confirma la sospecha de tener una anomalía tectónica en este sitio, la cual falta interpretar, aunque sea de manera preliminar.



**Figura 5.10 Perfil de la quebrada Pucuná - Dirección WE**

## 6. AMENAZA SÍSMICA

En este capítulo se presenta la revaluación de la amenaza sísmica para todo el Valle de Aburrá, atendiendo el Literal c del Numeral A.2.9.3 de las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 (AIS, 1998).

### 6.1 GEOLOGÍA SÍSMICA

#### 6.1.1 Generalidades

Los estudios de geología sísmica permiten definir la presencia de fallas activas o potencialmente activas en la zona cercana al Valle de Aburrá. La actividad de una falla se clasifica con base en el desplazamiento reciente ocurrido en ella. La geología sísmica estudia la expresión superficial, el tipo de la falla, el desplazamiento causado por un evento sísmico, la tasa de desplazamiento y la longitud de ruptura de la falla en un evento.

#### 6.1.2 Marco Tectónico General

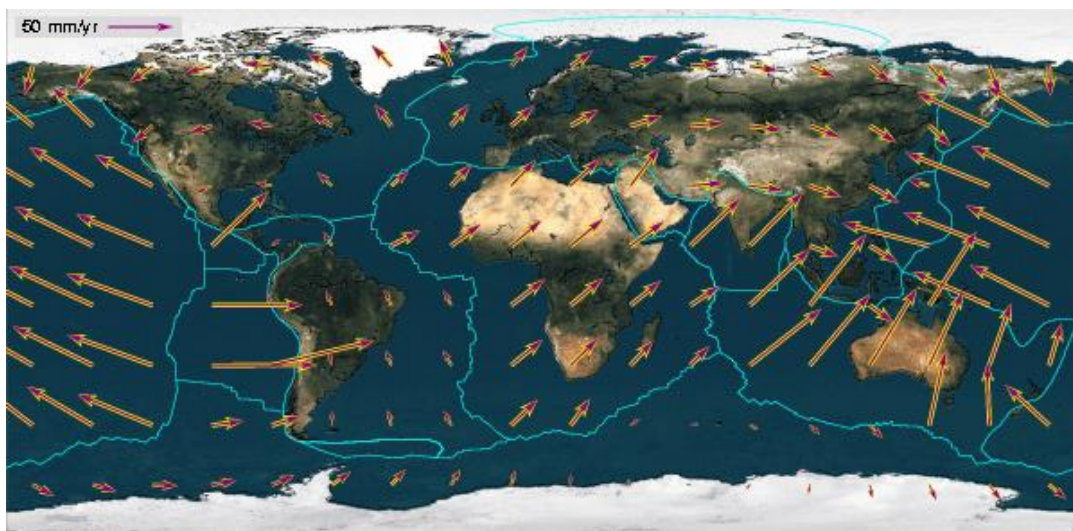
El Valle de Aburrá se encuentra ubicado en la parte septentrional del Bloque Andino que se localiza en la esquina noroccidental de Suramérica en un ambiente tectónico complejo, que es producto de la convergencia de cuatro placas tectónicas: Suramérica, Nazca, Caribe y la llamada microplaca Panamá. Al extremo noroccidental de la placa Suramérica en Colombia se le ha denominado Bloque Andino y corresponde al bloque formado por la acreción del Escudo de Guyana, Cratón Amazónico, con el terreno Andaquí, Macizo de Garzón y la serranía de La Macarena, el cual posteriormente fue acrecentado por los terrenos Chibcha, Tahamí, Calima y Cuna.

En general, los límites entre estas placas están definidos, exceptuando los de la placa Caribe con el Bloque Andino que son hoy día objeto de discusión y estudio. Se conoce que la placa Nazca se desplaza de oeste a este con una velocidad de 60 mm/año, mientras que Suramérica lo hace de este a suroeste a una velocidad relativa de 10 mm/año a 20 mm/año. Por su parte, la placa Caribe se desplaza en general de oeste a noreste con una componente norte importante, siendo estas direcciones variables en sus bordes, mientras que la microplaca Panamá se mueve de forma paralela a la Caribe, pero un poco más rápido que ésta. Tales movimientos relativos convergen sobre el Bloque Andino, el cual actúa como amortiguador y liberador de estos esfuerzos, ya sean de distensión, compresión o cortantes. Estos esfuerzos también se liberan en los bordes

de las placas en las zonas de convergencia, de forma que entre las placas Nazca y Suramérica se generan esfuerzos de compresión dando origen a la configuración de los Andes colombianos. En la Figura 6.1 se muestra de manera gráfica los vectores de movimiento de las placas tectónicas. Aunque la configuración actual de los Andes colombianos se definió prácticamente durante el Mioceno, los bordes de las placas todavía acumulan y liberan dichos esfuerzos a lo largo de grandes fallas como los sistemas de dirección norte-sur y noreste-sureste, que han sido verificados por estudios de microsismicidad para el Cauca Medio por Woodward & Clyde Consultants (WCC, 1979; 1980) y diferentes investigaciones geológicas del Cuaternario.

Las diferentes velocidades y direcciones relativas con que se mueven las placas y los trozos de litosfera producen varios efectos, entre los cuales se destacan la generación de sismos intraplaca y sismos interplaca; la respuesta a estos esfuerzos generalmente son fracturas, que en la corteza se conocen como fallas geológicas. En el Bloque Andino se han generado grandes fracturas, algunas de ellas de varios centenares de kilómetros de longitud que liberan sismos superficiales. Algunas de estas fallas se localizan cerca al Valle de Aburrá y tienen actividad sísmica variada; las más sobresalientes hacen parte de los sistemas Espíritu Santo, Romeral, Cauca, Palestina y el grupo que incluye las fallas Murrí, Murindó y Mutatá, estas últimas en la cordillera Occidental.

En Colombia las fuentes sismogénicas asociadas directamente con la subducción son otra fuente importante de sismicidad superficial hacia el Océano Pacífico y de sismos profundos hacia el centro del país. Entre estas fuentes se destacan las del Viejo Caldas, Bucaramanga y la subducción local bajo el Valle de Aburrá, las cuales corresponden a la llamada zona de Benioff-Wadati, y las fuentes Darién y Tumaco que corresponden al contrato entre las placas, conocido en la literatura como el megathrust.



## Figura 6.1 Marco Tectónico Regional – Vectores de movimiento de las placas

Las diferentes sismofuentes del país han producido terremotos de importancia, tanto por el número de víctimas como por las pérdidas materiales asociadas con los daños. Para citar casos recientes: el sismo de 1979 en Tumaco que causó daños en la ciudad de Medellín, el sismo de Murindó (17 y 18 octubre 1992) originado en el grupo de fallas Murindó, el evento del 9 de febrero de 1995 que ocasionó daños severos de varias edificaciones en la ciudad de Pereira y tuvo su origen en la sismofuente del Viejo Caldas, los sismos superficiales ocurridos el 6 y 8 de marzo de 1998 asociados a la falla Salinas que se sintieron con notable fuerza en un sector de la ciudad de Medellín; por último, el sismo del 25 de enero de 1999 que afectó al Eje Cafetero y causó extensivos daños a las ciudades de Armenia, La Tebaida, Montenegro, Pijao y Calarcá, y causó graves daños en las ciudades de Quimbaya, Pereira, Dosquebradas y otras poblaciones. De estos eventos el más cercano al Valle de Aburrá corresponde a los sismos de Murindó y Opagadó de octubre de 1992.

### 6.1.3 Marco Tectónico Regional

Los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella, Envigado, Medellín, Copacabana, Girardota, y Barbosa se localizan al interior de lo que se conoce como Valle de Aburrá y forman parte, a excepción de Envigado, de la entidad Área Metropolitana del Valle de Aburrá, junto con Bello e Itagüí.

La actividad tectónica del territorio donde se localiza el Valle de Aburrá ha sido objeto de estudio desde la década de los 70, cuando se desarrollaron una serie de proyectos hidroeléctricos que requerían de este análisis. Estos estudios se han realizado en proyectos específicos, con niveles de profundización diferentes y de manera intermitente en el tiempo; lo anterior ha ocasionado que la información disponible sobre las fallas activas de la región y las sismofuentes identificadas presente actualmente vacíos importantes que en un proyecto de alcance regional no se alcanzan a atender y resolver.

Es importante recordar que desde el punto de vista geológico el trazo de las fallas se realiza continuo por grandes tramos del territorio donde se identifique. Para el análisis neotectónico los rasgos geomorfológicos son muy importantes; la cartografía de la falla se limita a los sectores del territorio donde se observa la expresión de la falla de manera continua. Por lo tanto, la cartografía resultante es diferente y permite realizar análisis con menor incertidumbre sobre las características y comportamientos neotectónicos de la falla, o sea que este método de cartografía aporta información que facilita la interpretación sobre la posibilidad de que el segmento de falla objeto de estudio genere un terremoto, la estimación de la magnitud posible del terremoto, la longitud de ruptura y el grado de actividad de la falla.

El nivel de conocimiento sobre los sismos históricos tiene una incertidumbre muy alta. La falta de estudios paleosísmicos para identificar eventos sísmicos no incluidos en el registro histórico ni en el instrumental, genera una ausencia de información que eleva el nivel de incertidumbre en la caracterización de las fallas que se han identificado como activas en la región objeto de estudio. Esta incertidumbre se podría reducir mediante la ejecución de estudios sistemáticos sobre movimientos en masa que permitan estimar la relación de estos movimientos con eventos sísmicos o eventos hidrometeorológicos, o estudios sobre niveles de meteorización, procesos erosivos y la expresión geomorfológica de las fallas, que permitan la interpretación respecto al grado de actividad de las fallas. Estos últimos estudios no hacen parte del alcance de estos trabajos y por tanto se incluye la incertidumbre en la evaluación de la amenaza sísmica.

Los efectos locales o de sitio tienen una fuerte dependencia de las propiedades de la sismofuente (Panza, 2006). En Colombia el conocimiento de las sismofuentes está basado en datos instrumentales y geofísicos que abarcan una ventana de tiempo menor de 100 años. Cuando se realizan estudios de amenaza sísmica se investigan las sismofuentes cercanas o localizadas dentro del área de estudio y de las otras sismofuentes se recopila la información de estudios anteriores. Los estudios detallados realizados en el Valle de Aburrá y/o sus alrededores han permitido encontrar indicios asociados a la actividad de las fallas que aportan información en la caracterización de estas, pero dado que la información es muy puntual y a veces sólo se tiene un indicio por falla, el nivel de incertidumbre se mantiene alto y se dificulta la interpretación de las evidencias. Por tanto, se recomienda que la interpretación presentada con base en los indicios encontrados sea reevaluada en el tiempo a medida que se avance en el conocimiento sobre la actividad tectónica de este territorio.

#### **6.1.4 Sistemas de fallas**

A continuación se presenta una descripción de los principales sistemas de fallas que pueden representar una amenaza importante a los municipios que conforman el Valle de Aburrá. Estos sistemas de fallas se dividieron en los siguientes grupos:

- **Fallas en los alrededores del Valle de Aburrá**

Las fallas en los alrededores del Valle de Aburrá, que son las sismofuentes más cercanas a los centros poblados cuyo análisis nos ocupa. De estas fallas se recopiló información existente y se complementó con datos obtenidos en las salidas de campo y en los trabajos de fotointerpretación. Es en esta parte del informe donde se presentan nuevos indicios relacionados con la actividad de las fallas y la interpretación dada, dejando constancia de las dificultades encontradas y las incertidumbres o inquietudes no resueltas completamente.



- **Sistema de Falla Romeral.** Se localiza entre 27 y 40 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a menos de 1 km de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. A este sistema de fallas se le han asignado los sismos de Popayán (Page, 1986) y Armenia (Ingeominas, 1996).

**Falla Quebrada Seca:** Esta falla se presenta en el mapa geológico de Toro y Rendón (2006). Estos autores no reportan ninguna información para esta estructura. En este trabajo se le asigna el nombre de Falla Quebrada Seca, tomada de la corriente que controla esta estructura, al sur de Santa Fé de Antioquia. Su expresión geomorfológica es muy clara, tal como se aprecia en las imágenes de satélite y en el terreno. En este trabajo y a partir de la cartografía 1:100 000 se le asignó una longitud de 24 km. A partir de esta longitud de falla se estimó un sismo probable de magnitud Mw 6,7.

En la imagen de satélite se puede observar que la expresión geomorfológica es superior a la de la Falla Heliconia, localizada unos 5 km al occidente. WCC (1979) describen la Falla Heliconia como la falla más prominente del Sistema de Fallas Romeral en la región de Cañafisto y mencionan que su expresión geomorfológica prominente sugiere actividad en el Cuaternario Tardío. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera válido caracterizar la Falla Quebrada Seca como una falla activa, aunque no pueda estimarse su grado de actividad por falta de información. Se considera que esta falla forma parte del Sistema de Fallas Romeral, aunque también podría pertenecer al Sistema de Fallas Cauca. Esta falla se localiza a unos 25 km al occidente de Bello.

**Falla Heliconia:** Es una falla NS-N30°W/60°E. El Grupo de Sismología de Medellín (GSM, 2002) la describe como una falla que desplaza 5 m un flujo de lodo cuya edad se estima en 10 000 años, por lo tanto estiman su grado de actividad como moderado. Se estima un sismo máximo de magnitud Mw 7,2, aunque con un nivel de incertidumbre alto ya que el desplazamiento de 5 m puede corresponder al desplazamiento acumulado de varios eventos. Esta falla se localiza a unos 20 km al occidente de Bello.

**Falla Piedecuesta:** Definida por WCC (1979) y localizada al noreste de Angelópolis. Rendón (2003) la identifica como la falla Silvia – Pijao - Piedecuesta. Estrada *et al* (2005), la describen como tres segmentos diferentes que se interceptan y un cuarto segmento que presentan como parte de la Falla Romeral, así:

- **Falla Piedecuesta – Segmento1:** Desde el sur de Angelópolis hasta la Vereda La Clara (al sur del municipio de Angelópolis) a unos 19 km al suroccidente de la ciudad de Medellín, con una longitud superior a los 4 km. Su rumbo varía de

N5°W a N15°W, no se tienen datos suficientes para definir el tipo de estructura, presenta un fuerte control del drenaje, hay depósitos afectados, cambios de pendiente, bermas y silletas. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 5,8.

- **Falla Piedecuesta – Segmento 2:** Tramo noreste de la Quebrada Bramadora a unos 17 km al suroccidente de la ciudad de Medellín, con una longitud de 2,5 km. Esta falla presenta un rumbo N30°E, no se tienen datos suficientes para definir el tipo de estructura, presenta un fuerte control de la Quebrada Bramadora y depósitos afectados. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 5,5.
- **Falla Piedecuesta – Segmento 3:** Al este de Angelópolis hasta la quebrada Las Ánimas, a unos 16 km de la ciudad de Medellín, con una longitud de 4 km. Este segmento presenta un rumbo N40°W, no se tienen datos suficientes para definir el tipo de estructura, presenta un fuerte control del drenaje, depósitos afectados y quiebres de pendiente. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 5,8.
- **Falla Piedecuesta - Segmento 4:** Desde la quebrada Las Ánimas hasta la Quebradalarga al noroccidente de San Antonio de Prado, a unos 12 km al suroccidente de la ciudad de Medellín, con una longitud de 10,5 km. Esta falla presenta un rumbo que varía de NS a N5°E, es una falla de rumbo lateral izquierdo con fuerte control del drenaje, marcadas silletas y cambios de pendiente. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,3.

Para estos segmentos de falla se propone asignar el grado de actividad estimado para el Sistema de Fallas Romeral, o sea un grado de actividad de bajo a moderado.

**Falla Caldas – San Jerónimo:** Tiene tendencia N20°W/vertical, constituye la falla más oriental del sistema de Falla de Romeral y la más cercana a los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. La expresión más notoria de esta falla es un prominente quiebre recto en la pendiente en la parte oeste del Valle de Aburrá. Page (1986) la describe como una falla que afecta varios abanicos y flujos de escombros desplazándolos y truncándolos, algunos de los cuales presentan basculamiento; por paleomagnetismo se calculó la edad de estos depósitos en un millón de años. El GSM (2002) la describe como una falla inversa con componente izquierdo, aunque en el estudio que este mismo grupo realizó en la ciudad de Medellín en 1999 describen la falla San Jerónimo como una falla de rumbo sin que hayan identificado evidencias de actividad cuaternaria en los sitios estudiados y le asignan un grado de actividad de bajo a moderado.

Estrada *et al* (2005) estudiaron la falla San Jerónimo entre la población de Caldas y el Alto de Boquerón proponiendo una segmentación para esta falla con base en criterios estructurales, geomorfológicos y geológicos. Algunos de los criterios de segmentación considerados fueron: expresión geomorfológica diferenciable, cambios significativos de rumbo, cambios de buzamiento, cruce con otras fallas y bifurcación. La estimación del sismo potencial para cada uno de los segmentos se realizó a partir de la longitud del segmento de falla y utilizando las ecuaciones de Wells y Coopersmith (1994). Los segmentos identificados son:

- **Falla Caldas – La Tablaza:** Localizada al occidente del municipio de Caldas y a unos 12 km al sur de la ciudad de Medellín, con una longitud superior a los 7 km. Esta falla presenta un rumbo que varía de N5°W a N10°E con buzamiento de alto grado hacia el este, es una falla de rumbo lateral izquierdo con fuertes cambios de pendiente, bermas, silletas, lomos anómalos, drenajes deflectados y corta algunos depósitos. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,1.
- **Falla San Jerónimo- Segmento 1:** Se extiende desde el occidente de Caldas hasta el sur de La Estrella (a 10 km al SW de la ciudad de Medellín). Presenta rumbo NS, siendo una falla de rumbo lateral izquierdo cuya expresión geomorfológica se caracteriza por quiebres de pendiente, silletas y control del drenaje. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,3.
- **Falla San Jerónimo – Segmento 2:** Desde la Quebrada Grande, al suroccidente de La Estrella, hasta la vereda La Montañita en cercanías a la Quebradalarga en inmediaciones de San Antonio de Prado (a 12 km al SW de la ciudad de Medellín), con una longitud de 5,2 km. Su rumbo es variable entre N15°W y N45°W, es una falla de rumbo lateral izquierdo que presenta drenajes rectilíneos con un fuerte control tectónico, cambios de pendiente muy marcados y silletas notorias. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,3.
- **Falla San Jerónimo – Segmento 3:** Desde la Quebradalarga, al noroccidente de San Antonio de Prado, hasta la quebrada Los Vallados en la Vereda Yarumalito, al noroccidente de San Antonio de Prado (a unos 10 km al occidente de la ciudad de Medellín), con una longitud de 5,9 km. Su rumbo es variable entre N10°W y N25°W, es una falla de rumbo lateral izquierdo que presenta una expresión geomorfológica muy notable, con fuerte control de drenaje (captura), valles rectilíneos y angostos, lomos de falla, lomos de obturación, silletas, facetas triangulares, cambios de pendiente y deslizamientos activos. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,6. Por

su expresión geomorfológica, se estima para este segmento de falla un grado de actividad moderado.

- **Falla San Jerónimo – Segmento 4:** Desde la quebrada Sucia hasta la quebrada Cangrejo (a unos 10 km al occidente de la ciudad de Medellín) con una longitud de 9,5 km. Su rumbo es variable de N5°W a N10°W, es una falla de rumbo con un fuerte control del drenaje expresado por drenajes rectilíneos y angostos, quiebres de pendiente y silletas. Se estimó que este segmento puede generar un sismo potencial de magnitud Mw 6,9.
- **Falla San Jerónimo – Segmento 5 (Falla Sopetrán):** Se extiende desde la quebrada Cangrejo hacia el norte (a unos 16 km al occidente de Medellín). Estrada *et al* (2005) la describe como una falla que se bifurca presentando rumbo N10°E y N15°W, con un fuerte control del drenaje, presenta bermas y fuertes quiebres de pendiente. En los trabajos de campo realizados se identificó un sitio que corresponde al talud sur de las casetas de peaje del portal occidental del túnel de la vía que comunica Medellín con Santa Fé de Antioquia. En este sitio se identificó una superficie de falla con una disposición estructural N15°W/75°W, a lo largo de la cual se identifican dos movimientos de la falla. Un análisis detallado de este sitio se presenta en el Capítulo 5 de Neotectónica.

El movimiento más antiguo identificado corresponde a un desplazamiento de 0,36 m a partir del cual se estimó una magnitud del sismo de Mw 6,4. El último movimiento identificado corresponde a un desplazamiento de 0,90 m lo que equivale a un evento con una magnitud de Mw 6,7.

En conclusión, a partir de la interpretación del levantamiento detallado en el sitio del Peaje, esta falla ha presentado por lo menos dos sismos en los últimos 10 000 años. El evento más antiguo corresponde a un sismo de magnitud Mw 6,4, al que se le asigna una edad entre 10 000 y 5 000 años y el evento más reciente identificado es un sismo de magnitud Mw 6,7 que ocurrió en los últimos 2 500 años, lo cual está acorde con la datación realizada y discutida en el Capítulo 5.

Este segmento de la falla San Jerónimo coincide con lo que WCC (1979) denominó falla Sopetrán, estos autores la describen como una estructura de 29 km de longitud, con disposición estructural NS-N10°W/70°E-30°W y con evidencias de desplazamiento en el Cuaternario Tardío entre la quebrada Mirandita y La Sopetrana (en inmediaciones de Sopetrán), pero le asignan el grado de actividad a partir de otras evidencias encontradas 3 km al NE de San Jerónimo. Posteriormente el GSM (2002) le asigna una longitud de falla de 18 km. Teniendo en cuenta lo anterior se propone dejar una longitud de ruptura de 25 km.

**Fallas del Llano de Ovejas:** Integral (1982) las reportas como originadas en el valle del río Medellín, desde donde toman una dirección  $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ , por una longitud de 16 km, hasta desaparecer en el valle del río Cauca. Estiman que los movimientos han sido predominantemente a lo largo del rumbo.

Reportan algunos rasgos anómalos en los flujos de lodo de la carretera Medellín San Pedro posiblemente relacionados con desplazamientos recientes. Sin embargo, debido a su débil expresión geomorfológica y principalmente a la carencia de vestigios de actividad reciente en los depósitos aluviales, consideran que la actividad Cuaternaria de las Fallas de Ovejas ha sido muy baja o que no han sufrido reactivaciones tectónicas al menos durante el Cuaternario Tardío.

Los depósitos del Llano de Ovejas muy probablemente son de origen lacustre, con edades datadas por  $C_{14}$  entre 18 000 y 35 000 años, posteriormente levantados tectónicamente, tal como lo sugiere la ligera inclinación de los estratos hacia el oeste; esta inclinación sugiere una tasa de desplazamiento alta para la falla de Ovejas no indicada por los rasgos geomorfológicos observables a lo largo de su traza. Esto indicaría una actividad tectónica en los últimos 18 000 años.

En las salidas de campo realizadas en este proyecto se identificó un depósito aluvial conformado por arena fina, suelta, que suprayace un paleosuelo de color café oscuro a negro (45 cm de espesor), el cual a su vez suprayace un material arcilloso de color gris. Esta secuencia se encontró afectada por diaclasamiento registrado hasta el nivel del paleosuelo ya que las características de la arena suelta no permiten que se forme y preserve la diaclasa. Igualmente se encontró un relieve invertido donde se aprecia el aluvial de la quebrada La García en su vertiente izquierda, sobre el suelo residual del Batolito de Ovejas, localizado en la parte alta de una colina y en un nivel superior al de la vertiente derecha de la quebrada y de los terrenos localizados tanto aguas arriba como aguas abajo. Estas evidencias sugieren que el grado de actividad de esta falla sea reconsiderado y por correlación con otras fallas se le asigne un grado de actividad de bajo a moderado, similar al de las fallas del Sistema Romeral que se encuentran en las inmediaciones del sector.

**Falla Santa Isabel (Caldas):** Es una falla con dirección NS que marca el contacto entre esquistos cuarzo-sericíticos y el neis de La Miel. Rendón (2003) la describe como una falla que se separa del sistema principal de fallas Romeral con un rumbo NS a  $N10^{\circ}W$ , afectando el flanco oriental de la parte alta del Valle de Aburrá. Al realizar el perfil longitudinal del río Medellín, a partir de cartografía 1:10 000, se aprecia un escalón en el perfil del río que coincide con la falla Santa Isabel. En este sitio la relación del índice de gradiente del tramo del río con el índice de gradiente del río entre las cotas 2350 y 1625 es de 1,76 lo que lo presenta como

un nickpoint o punto anómalo en el perfil del río, ya que este valor debería ser cercano a la unidad. Esta falla pone en contacto el Ortoneis del Alto de Minas con los Esquistos. El cambio que se presenta en el perfil del río no se interpreta como diferencia en la dureza de los tipos de roca ya que hacia aguas abajo se vuelve a presentar el cambio litológico en el cauce del río (cota aproximada 1925) y el perfil longitudinal no lo refleja. El río Medellín recibe un afluente por su vertiente izquierda y en este sector presenta depósitos aluviales cartografiados a escala 1:25 000, lo que lo convierte en un sitio de interés para estudiar si se presenta una anomalía por carga de sedimentos, por comportamiento hidráulico, o por tectónica. En este sitio no se hicieron estudios detallados ya que se involucran factores sedimentológicos e hidráulicos poco conocidos y requiere mayores recursos tanto económicos como de tiempo para llegar al conocimiento necesario que permita interpretar la anomalía que presenta el perfil longitudinal del río.

**Falla Aurrá:** Es una falla N10°W/vertical. Page (1986) la describe como una falla que desplaza 19 m un abanico de flujo de escombros cuya edad la estiman en 100 000 años. Se estima una tasa de desplazamiento de 0.2 mm/año considerándose su actividad de baja a moderada. El GSM (2002) le asigna 25 km de longitud y la describe como una falla inversa sinistral. Con base en la longitud asignada a esta falla, se estima un sismo potencial de magnitud Mw 6,7.

**Falla Cascajos (o Cascajosa):** El GSM (2002) la describe como una falla inversa N10°W/60°E. Page (1986) la reporta con una longitud de 17 km y la describe con unos rasgos geomorfológicos débiles que incluyen abanicos aluviales cortados abruptamente, boquerones y cambios agudos de pendiente entre la base de la montaña y el valle. Para estimar el grado de actividad se basaron en que el flujo de escombros de San Isidro (edad estimada 10 000 años) y el lleno de escombros de Las Ánimas (edad estimada entre 10 000 y 20 000 años) no se encuentran afectados, pero hace la aclaración que desplazamientos menores de 2 m en estos flujos de escombros no son detectables en razón del espesor de los llenos. Por su expresión geomorfológica la describe como una falla activa y le estima el grado de actividad como bajo. A partir de la longitud reportada por Page (1986) se estima un sismo potencial de magnitud Mw 6,5.

**Falla La Cajetilla:** Se localiza aproximadamente a 25 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota, y Barbosa y a 20 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (1999) la describe como una falla N10°W-NS/ vertical, con 23 km de longitud y buena expresión geomorfológica, con quiebres de pendientes, filos alineados y silletas; la roca se presenta cizallada y fracturada, con presencia de arcillas y brechas. En los sitios donde este grupo evaluó para identificar su actividad neotectónica no se encontraron evidencias y le asignan un grado de actividad de bajo a moderado.

Con base en la longitud de la falla se estima un sismo potencial de magnitud Mw 6,7.

**Falla La Chillona:** Se localiza cerca de 25 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota, y Barbosa, y a 20 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (1999) la define como una falla N10°E con buzamiento desde 60°W hasta 65°E, en los sitios donde se evaluó su actividad neotectónica no se encontraron evidencias por lo que le asignan un grado de actividad de bajo a moderado. En la cuchilla localizada entre esta falla y la falla La Sucia se encuentran evidencias interpretadas como una deformación gravitacional, la cual no necesariamente es indicio de actividad neotectónica.

**Falla La Sucia:** Se localiza a más de 25 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota, y Barbosa, y a 20 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (1999) la describe como una falla NS/65°E con una buena expresión geomorfológica. En las exploraciones realizadas no encontraron evidencias de actividad neotectónica por lo que estiman su grado de actividad de bajo a moderado. En la cuchilla localizada entre esta falla y la falla La Chillona se encuentran evidencias interpretadas como una deformación gravitacional, la cual no necesariamente es indicio de actividad neotectónica.

- **Sistema de Falla Cauca.** Se localiza aproximadamente a 45 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y 20 km al occidente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Este sistema de falla está conformado por varios trazos de falla entre los que se destacan:

**Falla Anzá:** Page (1986) la define como una falla normal NS-N15°W/vertical, reporta rocas verdes afectadas por la falla, en contacto con flujos de escombros cuaternarios cizallados, por lo que se considera que es una falla activa y se le asigna un grado de actividad bajo.

**Falla Cauca Oeste:** Es una falla con buzamiento de 40° que varía tanto al oriente como al occidente. Se le reporta actividad neotectónica en los sectores de las quebradas Noque y Niverengo al occidente de la población de Santafe de Antioquia (Mesa y Lalinde, 2000), confirmando lo descrito previamente por WCC (1979, 1980) y Page (1986). Estudios más recientes le asignan a esta falla movimiento a lo largo de los ramales denominados Caimán I y Caimán II (Morales y Mesa, 2003) y estiman una tasa de movimiento de 0,33 a 0,46 mm/año. Hasta el momento no se han realizado estudios que permitan estimar el sismo máximo y el período de recurrencia, por lo que se retoman los propuestos por WCC (1979) que la clasifica como una falla con grado de actividad bajo, que puede generar un

sismo de magnitud máxima 7,0 con período de recurrencia de 30 000 a 40 000 años y desplazamiento máximo en un sólo evento de un metro.

**Falla La Batea:** Page (1986) la describe como un ramal de la falla Cauca Oeste, con disposición estructural  $N65^{\circ}-75^{\circ}W/80^{\circ}$  a vertical; son varias fallas tanto normales como inversas, las cuales afectan un depósito de flujo de escombros cuya edad se estimó en 300 000 años. Le asigna un grado de actividad bajo.

**Falla Santa Fé:** Page (1986) la describe como una falla inversa que es un ramal de la falla Cauca Oeste, con disposición estructural  $NS/80^{\circ}E$ , describe una anomalía en los abanicos que se encuentran en la población de Santa Fé de Antioquia y cuya edad se estima en 300 000 años, con lo que interpreta un levantamiento de 10 a 20 m del bloque oriental de la falla, una tasa de desplazamiento de 0,05 mm/año y un grado de actividad bajo. Se estima un sismo máximo de magnitud Mw 7,4 (tomando el desplazamiento de 10 m; aunque el nivel de incertidumbre es muy alto).

- **Fallas al interior del Vallé de Aburrá**

- **Falla Iguaná – Boquerón:** Aunque en otros trabajos esta falla se presenta como parte del Sistema de Fallas Romeral, se presenta de manera independiente por localizarse al interior del Valle de Aburrá. Se localiza aproximadamente a 25 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a 12 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (1999) la describe como una falla con dirección general  $N15^{\circ}W$ , que controla parte del cauce de la quebrada La Iguaná al occidente de la ciudad de Medellín. En los sitios que este grupo evaluó para identificar su actividad neotectónica no se encontraron evidencias, por lo que estiman su grado de actividad de bajo a muy bajo. Ortiz (2002) reporta un pequeño sinclinal cuya estructura involucra depósitos de talud y horizontes de cenizas volcánicas, datadas por trazas de fisión en 0,15 Ma, y que interpreta como producto de desplazamiento reciente a lo largo de uno de los ramales principales de la falla Iguaná – Boquerón; este autor le asigna un desplazamiento vertical de 1,7 m con el bloque oriental descendido. Teniendo en cuenta este desplazamiento y suponiendo que tuvo lugar en un solo movimiento, se estima un sismo probable de magnitud Mw 6,9. A partir de esta magnitud de sismo se puede estimar una longitud de falla entre 35 y 40km; sin embargo, esta longitud de ruptura no ha sido comprobada en campo. Si se toma el desplazamiento de 1,7 m y la edad de 150 000 años se tiene una tasa de desplazamiento de 0,01 mm/año lo cual permite asignarle un grado de actividad de bajo a muy bajo.

Rendón (2003) reporta que la parte más profunda de lo que denomina la Cuenca Medellín, está localizada en el lado occidental del eje del valle actual y define una depresión estrecha con tendencia NW, con una profundidad máxima de 240 m,



siguiendo la dirección de la falla Iguaná – Boquerón. Reporta además, un sentido lateral izquierdo de desplazamiento para la falla, aunque menciona que no son datos concluyentes y que la ausencia de información relacionada con el buzamiento de esta falla dificulta el clasificarla como falla inversa o como falla normal.

Considerando lo reportado por Rendón (2003) se estimó una longitud de falla, desde un poco después del Alto de Boquerón (hacia el río Cauca) hasta el río Medellín, de 20 km. Teniendo en cuenta esta longitud de falla, se estima un sismo probable de magnitud Mw 6,6.

- **Falla San Francisco:** Falla EW identificada por Integral en el proyecto de Conexión vial Aburrá Occidente y localizada en la vertiente occidental del Valle de Aburrá. No se conoce la relación con la falla Iguaná – Boquerón ni se tiene claridad si esta estructura está relacionada con la falla Santa Elena, igualmente de sentido EW y localizada en la vertiente oriental del Valle de Aburrá. Es importante estudiarla para entender la falla Iguaná – Boquerón.
- **Falla Santa Elena:** Propuesta por Ingeominas (2007) es una falla normal que desplaza verticalmente el plano de cabalgamiento de la Dunita en aproximadamente 270 m. Su buzamiento se encuentra entre 55° y 75°N. De esta estructura no se conoce su grado de actividad ni hay estudios que permitan definir si es una falla activa, se presume que es baja.
- **Falla Quebrada La Larga:** Es una estructura que se encuentra en la cartografía del GSM (2002) y en el trabajo de Estrada *et al* (2005). En este trabajo se le asigna este nombre por controlar parte del cauce de la quebrada La Larga. No se tiene información de esta estructura. Estrada *et al* (2005) localizan esta estructura entre las fallas San Jerónimo – Segmento 2 y San Jerónimo – Segmento 3. No se tiene claridad sobre su continuidad hacia el oriente.
- **Falla Cuchilla El Barcino:** Es una estructura de dirección EW a N75°W que se propone en este trabajo basados en la expresión geomorfológica que presenta hacia la Cuchilla El Barcino, tal como puede apreciarse en los perfiles topográficos. De esta estructura no se tiene información previa. En la vertiente derecha de la quebrada La Cabaña se presenta una silleta que sugiere la continuidad de esta estructura hasta la falla San Jerónimo – Segmento 3, sin que tenga continuidad hacia el occidente. En el lecho de la quebrada La Cabaña se encuentran algunos peldaños de dirección EW pero se interpretan como obstrucciones por troncos de árboles que generaron la acumulación de material aluvial de un evento de gran magnitud y energía, ocurrido en abril y mayo de 2005, que colmató las cañadas y distribuyó el material a lo largo de aproximadamente 1 km, dejando en el cauce algunos peldaños.

Dada la falta de conocimiento de esta estructura se propone considerar dos longitudes de falla diferentes, así:

Una longitud de 4,6 km que sería desde la vertiente derecha de la Quebrada La Cabaña hasta la cima de la Cuchilla El Barcino y a partir de esta longitud estimar un sismo potencial de magnitud Mw 5,6.

Un segmento de falla de 10,5 km que sería desde la vertiente derecha de la quebrada La Cabaña hasta un poco antes del río Medellín y a partir de esta longitud estimar un sismo potencial de magnitud Mw 6,1.

En cuanto a su grado de actividad no se tiene información que permita estimarlo pero por su expresión geomorfológica y comparándola con la Falla San Jerónimo – Segmento 3 se le asigna un grado de actividad de bajo a moderado.

- **Fallas al oriente del Valle de Aburrá**

- **Sistema de Fallas Norte Sur.** Se localiza aproximadamente a 3 km al oriente de Copacabana y a 15 km al nororiente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Rendón (2003) reporta un sistema de fallas norte sur cuya mayor continuidad se aprecia desde la población de El Retiro hacia el norte. Este sistema de fallas coincide con los reportados por Integral (2000) y por el GSM (2002). Ingeominas (2007) incluye estas fallas como parte del Sistema de Fallas Romeral y las define como las estructuras más orientales de este sistema de fallas.

Ingeominas (2007) reconoce algunas fallas de importancia regional, como las de La Acuarela, La Honda y Rodas, además de numerosas estructuras menores de falla que no mencionan por su extensión limitada.

- **Falla Rodas:** Ingeominas (2007) considera esta falla como el límite tectónico de la Dunita de Medellín sobre rocas metamórficas del Complejo El Retiro. Es una falla de cabalgamiento de ángulo bajo a subhorizontal. Se localiza aproximadamente a 15 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y aproximadamente a 12 km al nororiente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (1999) la reporta como una falla inversa NS/45°NE a la cual no le encontraron evidencias de actividad reciente por lo que su actividad la consideran de baja a nula.

- **Falla La Acuarela:** Ingeominas (2007) propone este nombre a la falla de rumbo de N-S a N NW, que ha sido denominada por otros autores como falla Pericos y falla Rodas (Rendón, 1999; GSM, 1999), con el fin de diferenciarla de la falla de cabalgamiento de Rodas y de la falla Otú – Pericos.

Ingeominas (2007) la propone con una longitud de 35 km y su continuidad hacia el norte con las trazas de falla del Sistema Belmira. Esta falla presenta una bifurcación y se presenta como dos trazas bien diferenciadas, desde la quebrada Las Palmas (Sector Paulandia) hasta la Curva de Rodas sobre la vía Medellín-Bogotá. Estos autores la describen como una falla en cola de caballo con dos trazas que localmente alcanzan una separación mayor a 1,1 km. Geomorfológicamente, la describen como una falla que presenta un fuerte cambio de pendiente, y alineamiento de drenajes (quebrada Rodas y quebrada Seca; quebrada Santa Elena y quebrada Espíritu Santo), forma además una depresión a lo largo de su traza y entre las dos trazas de la falla se forman colinas alargadas en sentido NS en los sectores de las veredas Pericos y Santa Elena. La traza occidental de la falla presenta rumbo NS y N15°W con buzamientos de 58°W a verticales, mientras que la traza oriental presenta valores entre N10°E y N10°W, y buzamientos entre 56° y vertical generalmente hacia el oriente. Le asignan un movimiento lateral izquierdo.

En el Capítulo 5 se presenta el análisis sobre las características de actividad de esta falla.

- **Sistema de Fallas La Honda - Falla Sajonia:** Rendón (2003) describe este sistema como una serie de lineamientos importantes identificados unos 10 km al oriente de la falla Acuarela, de los cuales forma parte la falla Sajonia definida por Integral (2000). Ingeominas (2007) la describe como una falla que se extiende desde la vereda El Salado al norte hasta la vereda Tablazo al sur, con una extensión de 15 km y como rasgo morfológico principal alinea la quebrada La Honda y forma a lo largo de ésta un valle de 5 km con dirección norte-sur; hacia el sur del valle de La Honda continua una depresión hasta la vereda Yarumal, al oriente de la traza se presentan colinas elongadas en dirección de la falla (cuchilla Alto de Las Cruces).

La falla Sajonia fue caracterizada por el GSM (2002). Es una estructura con orientación N10°W-NS/50°E a vertical. Son varias trazas asociadas conformando una franja de hasta 150 m de ancho. Afecta anfibolitas y depósitos de ceniza de edad Terciaria hasta reciente. Se efectuó el levantamiento detallado de dos taludes, estableciéndose por lo menos un último movimiento de 0,10 m que se estima ocurrió en los últimos 10 000 años, dando una tasa de desplazamiento de 0,01 mm por año indicando un grado de actividad de bajo a muy bajo. Se estima un sismo máximo de magnitud Mw 6,0.

En el Capítulo 5 se presenta el análisis sobre las características de actividad de esta falla.

- **Falla Don Diego:** Definida por Ingeominas (2007). Es una falla de dirección general N45° a 60°E y buzamiento entre 30° y 70° al SE y la describen como una falla de deformación dúctil y controla la dirección del río Negro desde el sur de la cabecera municipal de El Retiro hasta el aeropuerto José María Córdova. La longitud de la falla reportada es superior a los 10 km. A partir de secciones delgadas orientadas obtuvieron un sentido de desplazamiento de tipo normal y un sentido de desplazamiento lateral izquierdo.

Ingeominas (2007) propone que esta falla posiblemente intervino en la formación de la cuenca de tracción donde se depositaron los sedimentos de lo que denominan Sedimentitas de La Fe y por lo tanto es una falla activa con períodos de reactivación a finales del Mioceno (5,3 Ma), principios del Plioceno y posterior al Plioceno (posterior a 5,3 Ma).

- **Falla Normandía:** Definida por Ingeominas (2007). Es una falla de deformación dúctil que aflora en el sector de la hacienda Normandía, entre las veredas Carrizal y Pescaditos del municipio de El Retiro. Presenta dirección general N45°E y buzamiento entre 55° y 75° SE. Tiene una extensión aproximada de 4 km. Ingeominas (2007) propone que esta falla posiblemente intervino en la formación de la cuenca de tracción donde se depositaron los sedimentos de lo que denominan Sedimentitas de La Fe y por lo tanto es una falla activa con períodos de reactivación a finales del Mioceno (5,3 Ma), principios del Plioceno y posterior al Plioceno (posterior a 5,3 Ma). Debido a esta condición se presume un grado de actividad bajo a muy bajo.
- **Falla La Cuenca:** Ingeominas (2007) retoma el nombre propuesto por Giraldo y Sánchez (2004) para la falla que pone en contacto el Gabro de San Diego con las Anfíbolitas de Medellín, le asignan una longitud aproximada de un kilómetro con dirección y buzamiento N45°E/81°NW.
- **Falla La Estufa:** Ingeominas (2007) le asigna este nombre a una falla que aflora en el sector de La Estufa en la hacienda Normandía, presenta una dirección N20°E y su longitud mínima es de 4 km. Como rasgos morfológicos esta falla alinea algunos drenajes menores, forma silletas laterales y depresiones rectas a lo largo de la traza. Algunos datos en fallas paralelas a la traza principal presentan dirección N10-20°E y buzamiento entre 55° y 60° al SE, correspondiendo a fallas de movimiento inverso que probablemente indican que la traza principal corresponde a una falla inversa. No se tiene información que permita estimar el grado de actividad de esta estructura.

- **Falla Miraflores.** Se localiza aproximadamente a 30 km al oriente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a más de 50 km al oriente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Integral (1998) la define como una falla descrita y estudiada en el proyecto hidroeléctrico Porce II con una longitud del orden de 84 km, cuyos principales rasgos geomorfológicos son valles y filos alineados, algunos controles de drenaje, quiebres de pendiente y desplazamiento de las superficies de erosión de edades entre el Oligoceno y el Mioceno; su grado de actividad lo estiman de bajo a nulo ya que las unidades del Cuaternario que la cubren no están afectadas por la falla.

- **Fallas al norte del Valle de Aburrá**

- **Sistema de Fallas Belmira.** Se localiza aproximadamente a 5 km al occidente del municipio de Copacabana y a 20 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Rendón (1999) la describe como un sistema de fallas con una expresión topográfica prominente que presenta una dirección N35°-45°W y NS con desplazamiento lateral izquierdo, destacándose las fallas El Rano, Belmira Este y Belmira Oeste. El GSM (2002) reporta un flujo de lodo antiguo con evidencias de desplazamiento lateral izquierdo y le asignan un grado de actividad bajo a nulo.

Integral (1982) reporta la falla Belmira Oeste con una expresión fuerte caracterizada por valles alineados, silletas muy notorias y depósitos del Cuaternario perturbados posiblemente por tectonismo. Reporta un sitio cerca de San José de la Montaña donde la falla está cubierta por depósitos cuaternarios aparentemente desplazados en sentido lateral izquierdo y con el bloque occidental hundido. Basados en la longitud de falla cartografiada, del segmento con evidencia geomorfológica más prominente y su similitud con la zona de falla de Romeral, consideran que la falla Belmira Oeste puede generar un sismo máximo de magnitud Mw 7,0. Dada su expresión geomorfológica más fuerte se estima un grado de actividad bajo.

Integral (1982) reporta la falla Santa Inés como la falla principal del sistema en el extremo norte, a lo largo de la cual se presentan una serie de flujos de lodo con edades diferentes. Los depósitos más recientes no muestran evidencias de perturbación tectónica pero los más antiguos pueden estar afectados por la falla, aunque es difícil determinar la magnitud de los desplazamientos debido principalmente a la caótica estructura interna de los flujos. Sobre la vertiente occidental del cerro Piedra Verde, al suroeste de San José de la Montaña, reportan un flujo de lodo antiguo con evidencias de desplazamientos tectónicos en sentido lateral izquierdo. En general, describen la falla Santa Inés como una falla inversa

con desplazamiento lateral izquierdo y con débiles evidencias de actividad cuaternaria.

- **Falla Don Matías.** Se localiza aproximadamente a 15 km al oriente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a 45 km al nororiente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (2002), la describe como una falla N30°-50°W/75°E a vertical que marca el contacto entre un lente de anfibolita alargado en dirección noroeste y el Batolito Antioqueño. Estiman que es una falla de rumbo con movimiento lateral izquierdo a la cual no han podido establecer actividad cuaternaria por lo que le asignan un grado de actividad de muy bajo a nulo.

Integral (1982) reporta que cerca al sitio de presa de Río Grande la falla está cubierta por un flujo de escombros en forma de abanico muy disectado en su parte inferior, donde se presentan algunos rasgos que sugieren actividad tectónica pero mencionan que pueden ser debidos a procesos erosivos.

- **Falla Belmira Sur (o Río Chico norte).** El GSM (2002) la describe como una falla que se extiende hacia el suroeste desde la población de Belmira, con una longitud de unos 30 km, que parece ser una falla inversa con componente sinistral, y buzamiento 30°-40°W. Los rasgos geomorfológicos no son muy fuertes, aunque se presenta un claro control del drenaje, algunos quiebres suaves de pendiente, silletas incipientes, vertientes escalonadas y colinas alineadas. Las evidencias de actividad cuaternaria son prácticamente inexistentes, por lo que el grado de actividad es catalogado como de muy bajo a nulo.
- **Falla Río Chico.** Se localiza aproximadamente a 15 km al norte de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y aproximadamente a 45 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (2002) la describe como una falla de rumbo N80°W- N80°E/vertical con el bloque norte levantado. No se ha identificado que afecte los depósitos cuaternarios que recubren su traza por lo que le asignan un grado de actividad de bajo a nulo. Integral (1982) le asigna una longitud de 20 km.

- **Fallas distantes del Valle de Aburrá**

Las fallas distantes del Valle de Aburrá, que son las sismofuentes lejanas y de las que básicamente se realizó sólo una recopilación de información.

- **Sistema de Falla Espíritu Santo.** Se localiza a más 70 km al norte de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y aproximadamente a 95 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Presenta dirección N45°E y buzamiento desde 65°E hasta 80°E tanto al oriente como al occidente, predominando los cercanos a la vertical. Es una de las fallas del

Cenozoico más prominentes en el extremo norte de la cordillera Central; se extiende desde la falla Sabanalarga, cerca de la población de Liborina, hasta el área del Bajo Cauca donde desaparece bajo los sedimentos jóvenes de los ríos Nechí y Cauca. Integral y Sedic (1998) reporta que los mecanismos focales de la sismicidad local presentan un comportamiento normal y dextral confirmando lo encontrado en los estudios neotectónicos realizados por ellos. Se estima un sismo máximo de magnitud Mw 6,0 a 6,5 y un período de retorno de dos a cinco mil años (París *et al.*, 2000).

- **Falla Nerí:** Es una falla N40°E/70°NE , forma parte del sistema de Falla Espíritu Santo, identificada en los estudios para el proyecto hidroeléctrico de Nechí (Integral y Sedic, 1998). Mediante la excavación de trincheras exploratorias y apiques se verificó la actividad de esta falla desde el Cuaternario Tardío (100 000 años) hasta al menos hace 500 años. El último movimiento es de tipo normal, con desplazamiento de 0,40 m y levantamiento del bloque este. Esta falla presenta un escarpe de 3 m de altura cuya edad se estima en 10 000 años. La actividad de esta falla se considera representativa de la actividad de la traza principal de la falla Espíritu Santo dado que los escarpes de ambas fallas tienen una geomorfología similar. La tasa total de desplazamiento reciente estimada para la falla es de 0,4 mm/año, asignándole una tasa de desplazamiento de 0,2 a 0,3 mm/año en los últimos tres o cuatro millones de años; su actividad es moderada. La longitud de ruptura se estima de 30 a 50 km (Mesa y Lalinde, 2001). Se estima un sismo máximo de magnitud Mw 6,4.

- **Sistema de Falla Romeral.** A este sistema de fallas se le han asignado los sismos de Popayán (Page, 1986) y Armenia (Ingeominas, 1999).

**Falla Córdoba:** Descrita por Page (1986) como una falla N5°W/vertical, con una longitud de 17 km que posiblemente desplaza unos metros un flujo de escombros y estima su actividad probablemente de baja a moderada. Considerando la longitud de la falla, se estima un sismo probable de magnitud Mw 6,4.

**Falla Sabanalarga:** Se localiza aproximadamente a 60 km al norte de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y aproximadamente a 80 km al norte de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Page (1986), la describe como una falla inversa con alto buzamiento al oriente, con evidencias de desplazamiento menores de 0,3 mm/año, que indican un grado de actividad de bajo a moderado. Es una falla que presenta rasgos morfotectónicos notorios. Page (1986) hace la aclaración de que desplazamientos menores de 3 m en sentido vertical no son observables dadas las características de los depósitos afectados por la falla.

**Falla El Carmen:** Integral (1982) la describe como una falla que se desprende de la falla Sopetrán, con movimiento vertical presentando el bloque oeste levantado.

Estima el grado de actividad como bajo a moderado, comentando la dificultad de establecerlo dado la escasez de depósitos cuaternarios sobre la traza de la falla. Le asigna una longitud de 25 km. Para esta longitud de falla se estima un sismo probable de magnitud Mw 6,7.

**Falla Pintada Norte:** Se localiza aproximadamente a 80 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y aproximadamente a 50 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. El GSM (2002) le da este nombre a lo que Page (1986) denomina falla Arma. Page la define como una estructura N40°W, de 40 km de longitud, transversal a las fallas Romeral y Cauca, y que posiblemente corresponde a una falla de tensión que se desarrolló durante el Mioceno Tardío (10 Ma) cuando se depositó la Formación Combia de origen volcánico. El GSM (2002) la describe como una estructura que alinea los ríos Arma y Cauca, y que presenta escarpes erosionados, contraescarpes y depresiones alargadas. A esta falla le estiman el grado de actividad como muy bajo ya que no presenta evidencias de actividad neotectónica, pero sí algunos indicios geomorfológicos en general débiles. Teniendo en cuenta la longitud de la falla, se puede estimar un sismo probable de magnitud Mw 7,0.

**Falla Pintada Sur:** El GSM (2002) la define como un rasgo lineal N50°W con expresión geomorfológica buena, con escarpes, alineamiento de drenajes, escalonamiento de pendientes, contraescarpes y alineamiento de colinas. La describen como una falla que afecta cenizas volcánicas del Pleistoceno – Holoceno por lo que se considera una falla activa sin que se le asigne grado de actividad. IGAC (1997) la define como un rasgo lineal que se detecta en las fotografías aéreas por la ladera sur del valle del río Cauca y se proyecta hacia el NW hasta converger con el trazo de la falla Pintada Norte; le asignan una longitud de 35 km. Teniendo en cuenta la longitud de la falla, se puede estimar un sismo probable de magnitud Mw 6,9.

Según IGAC (1997) el valle del río Cauca en el sector de La Pintada es una depresión sísmica alargada en sentido SE – NW limitada por las fallas Pintada Sur y Pintada Norte, originada por mecanismos de distensión a partir de un patrón de esfuerzos de desplazamiento de rumbo de los Sistemas de Falla Cauca – Romeral.

La falla Pintada Sur presenta indicios de actividad neotectónica y se estima en general un grado bajo de actividad.

**Falla Montenegro:** Se localiza a unos 205 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 170 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Guzmán *et al.* (1998) dividen esta estructura en tres segmentos: uno NNE-NE/55°W que describen como falla inversa con longitud de 23 km y le asignan un sismo máximo de magnitud Mw 6,7 con



período de retorno entre 1 000 y 2 000 años; el segundo segmento que denominan Falla Aeropuerto con disposición estructural NS/60°W, cinemática inversa sinestral y longitud de 10 km, le asignan un sismo máximo de magnitud Mw 6,2 con un período de retorno entre 1 000 y 2 000 años y un tercer segmento NNE-NE/60°W que es una falla inversa de 18 km de longitud a la que le asignan un sismo máximo de magnitud Mw 6,5 con período de retorno entre 1 500 y 3 500 años. Se estima un grado de actividad moderado.

**Falla Alcalá 1:** Se localiza a unos 180 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 150 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Caracterizada por Lalinde (2004) como una falla N10°E/vertical con bloque oeste descendido que desplaza 0,75 m un paleosuelo de 21 570±440 años A.C. (C<sub>14</sub>), con lo que se estima un sismo de magnitud Mw 6,6 y una longitud de segmento de falla de 22 km. Se estima un grado de actividad bajo.

**Falla Alcalá 2:** Localizada unos pocos kilómetros al norte de la falla Alcalá 1. Caracterizada por Lalinde (2004) como una falla NS/74°E con bloque descendido al occidente, desplaza 0,40 m un horizonte de cenizas volcánicas de caída cuya edad se estima superior a 30 000 años, por lo que se le asigna un sismo de magnitud Mw 6,4 y una longitud de segmento de falla de 16 km. Se estima un grado de actividad bajo.

**Falla Consotá:** Se localiza a 175 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 150 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Caracterizada por Lalinde (2004) como una falla normal N53°W/85°SW que desplaza 0,40 m una secuencia de cenizas volcánicas de caída y paleosuelos de 30 710±1.220 años A.C., lo cual implica un sismo de magnitud Mw 6,4 y a partir de la magnitud del sismo se puede estimar una longitud de segmento de falla del orden de 16 km. Se estima un grado de actividad bajo.

**Falla La Glorita:** Se localiza a 175 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a 140 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Definida y caracterizada por Lalinde (2004). Es una falla normal N40°W que desplaza 0,35 m una secuencia de cenizas volcánicas de caída y paleosuelos cuya edad por correlación estratigráfica se estima superior a 30 000 años, lo cual implica un sismo de magnitud Mw 6,4 y a partir de la magnitud del sismo se puede estimar una longitud de segmento de falla del orden de 16 km. Se estima un grado de actividad bajo.

**Falla Cestillal:** Se localiza a más de 175 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y 150 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Definida y caracterizada por Lalinde (2004). Es

una falla normal EW/50°S que desplaza 1,70 m la secuencia de cenizas volcánicas de caída y paleosuelos de edad  $19\,710 \pm 830$  años A.C., lo que implica un sismo de magnitud Mw 6,9 y a partir de la magnitud del sismo se puede estimar una longitud de segmento de falla de 35 km. Se tiene una tasa de desplazamiento de 0,085 mm/año por lo que se estima un grado de actividad de bajo a moderado ya que la autora menciona que en el sitio no se tiene la secuencia de cenizas volcánicas y paleosuelos completa por lo que sólo se puede decir que el evento ocurrió en los últimos 19 000 años.

**Falla Tribunas:** Se localiza a 170 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y 140 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Definida y caracterizada por Lalinde (2004). Es una falla N40°E/vertical, de tipo normal. Presenta desplazamiento de 0,65 m de una secuencia de cenizas volcánicas y paleosuelos de  $13\,150 \pm 310$  años A.C., lo cual implica un sismo de magnitud Mw 6,6 y a partir de la magnitud del sismo se puede estimar una longitud del segmento de falla de 22 km. Se estima un grado de actividad bajo.

**Falla Laguneta:** Se localiza a unos 180 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 150 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Definida y caracterizada por Lalinde (2004). Es una falla N30°E/70°SE. Presenta un desplazamiento de 0,37 m de una secuencia de cenizas volcánicas de caída que por correlación estratigráfica corresponde a los últimos 15 000 años A.C., lo cual implica un sismo de magnitud Mw 6,4 y a partir de la magnitud del sismo se puede estimar una longitud del segmento de falla de 16 km. Se estima un grado de actividad bajo.

**Falla Armenia:** Se localiza a 195 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a 165 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Lalinde (2004) la caracteriza como una falla normal N45°-60°E/vertical, desplaza 0,25 m un paleosuelo de  $6\,300 \pm 230$  años A.C., lo que implica un sismo de magnitud Mw 6,2 y a partir de la magnitud del sismo se puede estimar una longitud de segmento de falla de 11 km. Se estima un grado de actividad moderado.

**Falla Villa María Termales:** Se localiza a unos 150 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 115 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Es un sistema de fallas normales con dirección predominante N65°W que sugiere control de emplazamiento volcánico. Se identificaron por lo menos siete segmentos de falla entre los que se destacan las fallas Tesorito y Termales por su concentración de indicios morfoestructurales (Bohórquez *et al.*, 2001). Se estima un grado de actividad bajo.

## – Sistema de Falla Cauca

**Falla Mistrató:** El GSM (2002) la describe como una falla que se extiende desde el Nororiente de la ciudad de Armenia (Quindío), pasando por Ríosucio (Caldas), hasta cercanías del municipio de Concordia en Antioquia. El rumbo es de N60°-80°W buzando 60°W. Los rasgos geomorfológicos asociados son silletas y drenajes alineados. El movimiento es inverso sinistral y la tasa de actividad moderada. Esta falla pudo ser la falla que generó el sismo de magnitud Ml 5,1 del 24 de abril de 2007 a las 3:53:36 am hora local con epicentro localizado en la latitud 5,79N, longitud 75,91W y profundidad de 32 km. Este sismo se localizó a 6,1 km al suroeste de Hispania, Antioquia.

**Fallas del Sistema Romeral y Cauca en el sector del Valle del Cauca:** López (2006) reporta para la zona del Valle del Cauca evidencias neotectónicas asociadas a terremotos con magnitud Mw mayor que 7,0 con períodos de recurrencia entre 5 000 y 6 000 años.

López identifica en la región de Cali y de occidente a oriente las siguientes fallas: Río Bravo, Garrapatas, Dagua Calima, Roldadillo, Santana, Cauca, Palmira – Buga, La Ribera- Galicia, Potrerillos, Guabas – Pradera, Cauca Almaguer y San Jerónimo. Para los segmentos de falla Piendamó y Paraíso estima magnitudes de 7,3 y 7,4 y menciona que estas estructuras fueron estudiadas por WCC (1983) y caracterizadas asignándoles un sismo de magnitud máxima entre 6,0 y 7,25. En este trabajo aclaran que los datos de desplazamiento identificados en campo no permiten dar estimaciones confiables de magnitudes debido a:

- Los saltos reportados pueden corresponder a más de un evento.
- Los saltos fueron medidos en retrocabalgamiento aunque están asociados al rasgo principal.
- En la trinchera el Ahorcado el plano de falla no fue visible y los eventos fueron interpretados a partir de indicadores estratigráficos postsísmicos.

Por lo tanto, para este trabajo se recomienda considerar que las fallas del Sistema Romeral y del Sistema Cauca, en la zona de Cali, pueden generar sismos de magnitud Mw mayor que 7,0 con períodos de recurrencia entre 5 000 y 6 000 años; los cuales fueron estimados a partir de investigación paleosísmica detallada y apoyada en evidencia de campo con dataciones C<sub>14</sub>. Dada la dificultad para estimar la magnitud del último desplazamiento y estimar el grado de actividad se propone considerar estas fallas con grado de actividad de moderado a alto.

En los estudios realizados por la Universidad de los Andes – Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos en la región de Cali da valores similares pero los períodos de recurrencia estimados son mayores.

#### – Sistema de Fallas al Noroeste

**Falla Abriaquí:** Localizada a unos 70 km de la ciudad de Caldas y a unos 60 km de Copacabana. Esta falla es reportada por Page (1986) como una estructura de dirección N50°W y buzamiento subvertical. En general le asignan una longitud de 35 km.

A unos 5 km al norte de la población de Abriaquí se presenta con una expresión geomorfológica notable que permite definir un segmento de 10 km de longitud donde presenta trechos rectos de corrientes, boquerones en colinas, alineamientos de la vegetación y cambios bruscos de pendiente, ríos desplazados en sentido lateral izquierdo. En esta área se identificaron dos ramales que desplazan abanicos de escombros del Cuaternario en dos sitios diferentes; el primer sitio es al NE y desplaza 5 m un abanico con el bloque descendido al occidente; el segundo sitio se localiza 2 km al suroccidente del anterior sitio y se presentan dos flujos de escombros desplazados al occidente, el flujo inferior está desplazado 4 m, remanentes del flujo de escombros superior coronan la cima de la colina al oriente del valle, y presenta un desplazamiento de 30 m.

Si se considera el desplazamiento de 5 m la magnitud del sismo probable sería Mw 7,2 y si se considera el desplazamiento de 4 m, la magnitud del sismo probable sería Mw 7,1. Considerando la magnitud de los sismos probables, se recomienda dejar la longitud de falla como 35 km y el sismo probable de magnitud Mw 7,2.

Page (1986) estimó el grado de actividad para la falla Abriaquí de bajo a moderado.

- **Sistema de Falla Murindó.** Se localiza a 115 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 100 km al noroccidente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Page (1986) la reporta como identificada por reconocimientos aéreos, con rumbo N10°W y una longitud de 100 km y en su momento le estimó un grado de actividad bajo. A esta falla se asigna el sismo del 17 de octubre de 1992 y su grado de actividad se estima de medio a alto (GSM, 2002). Se estima un sismo máximo de magnitud 7,2 Ms, suponiendo que sea igual o similar a los ocurridos en octubre de 1992.

París *et al* (2000) le asignan una tasa de desplazamiento de 0,2-1 mm/año lo cual le asigna un grado de actividad moderado y una magnitud máxima Mw 7,3. Si se estima la magnitud del sismo a partir de la longitud de la falla se obtiene un sismo probable de magnitud Mw 7,6.

- **Sistema de Falla Murri – Mutatá.** Se localiza a unos 105 km al occidente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 90 km al noroccidente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Page (1986) la describe como una zona de falla con una dirección N10°W a N20°W y una longitud de 300 km. La longitud de 300 km no se considera confiable para los objetivos de este trabajo ya que está considerando la longitud total entre la falla Murri y la falla Mutatá, y en el texto las describe como dos segmentos de falla que se traslapan cerca de Mutatá. La falla Mutatá la describe como una falla inversa de alto ángulo. El terremoto del 7 de septiembre de 1882 en Turbo se asocia con el desplazamiento de esta falla y sugiere un grado de actividad moderado a alto. Se estima un sismo máximo de magnitud 7,5 en la escala de Richter (Ingeominas, 1994).

Page reporta los siguientes datos de desplazamiento estimado a lo largo de la falla:

Cerca al río Murri la falla forma escarpes de unos 20 m de altura en aluviones del Cuaternario Tardío.

Dos a tres kilómetros al norte del río Chever se presenta un flujo de escombros altamente disectado del Cuaternario Tardío, con su superficie desplazada unos 7 m.

Al oriente de Mutatá se encuentra un escarpe de unos 27 m de altura que separa dos terrazas. Los materiales de la terraza oriental son gravas meteorizadas a arcillas y la del lado occidental es un aluvión relativamente fresco; el escarpe probablemente ha sido modificado y su altura aumentada por la erosión de las corrientes.

En el río Guapá, a 40 km al norte de Mutatá, se encuentra un afloramiento a lo largo del río donde se aprecia fallamiento inverso de más de 3 m.

Teniendo en cuenta los valores anteriores se sugiere tomar como sismo probable un sismo de magnitud Mw 7,5 y el grado de actividad alto.

- **Sistema de Fallas Este Oeste**

**Falla Cisneros:** El GSM (2002) la describe como una estructura identificada por fotointerpretación, siendo de dirección N70°W, con evidencias de actividad reciente deficientes por lo que estiman un grado de actividad de bajo a muy bajo.

- **Sistema de Fallas de Palestina.** Se localiza a más de 85 km al oriente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a 90 km al suroriente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Page (1986) la describe como una falla N10°-20°E conformada por varias estructuras entre las que se destacan: Mulato, Jetudo, Jetudo Este, Cocorná, Cimitarra, Bagre Norte y Otú Norte. Con las investigaciones adelantadas sugiere una tasa de desplazamiento superior a 0,2 mm/año para la zona de falla de Palestina como un todo. Se estima un sismo máximo de 7,0 en la escala Ms (IGAC, 1997). Se estima un grado de actividad moderado.

París *et al* (2000) le asignan una longitud de 370 km. Estos autores le asignan una tasa de movimiento entre 0,2 y 1 mm/año y explican que la tasa de desplazamiento de 0,2 mm/año es estimada a partir de las características geomorfológicas y del desplazamiento de la superficie de erosión de la Pre Formación Mesa y estiman que la edad del último movimiento es en el Cuaternario hace menos de 1,6 Ma. El intervalo de recurrencia de los movimientos lo reportan como desconocido.

A partir de la información disponible se recomienda caracterizar esta falla con un sismo máximo de magnitud Ms 7,0 y un grado de actividad moderado.

- **Sistema de Falla Salinas.** Se localiza a 160 km al suroriente de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 170 km al suroriente de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Integral (1998) la describe como una falla inversa de gran ángulo con rumbo NS-N35°E que separa estructuralmente el valle del río Magdalena con la cordillera Oriental y a la cual asocian varios sismos registrados entre los cuales se tiene el sismo de marzo de 1998. Por lo anterior se clasifica como una falla activa con grado de actividad probablemente moderado. Consideran además la falla Alto del Trigo como parte de este sistema de falla. Mejía Villegas – AEI (1997) le asignan una magnitud máxima de 5,2, pero aclaran que si se toma como parte de la zona sismotectónica frontal de la Cordillera Oriental la magnitud máxima asignada es de 7,3.

París *et al* (2000) presenta dos segmentos de falla asociados al Sistema de Falla Salinas. La falla Alto del Trigo, con una longitud de 115 km, un intervalo de recurrencia de 10 000 a 400 000 años y una tasa de movimiento menor que 0,2 mm/año, aclarando que tasas de movimiento entre 0,01 y 0,1 mm/año han sido estimadas a partir del desplazamiento neotectónico de rasgos topográficos. Como edad del último movimiento estiman un tiempo menor de 1,6 Ma. A la falla Bituima, con una longitud de 180 km, un intervalo de recurrencia entre 3 000 y 30 000 años, calculados con base en la tasa de desplazamiento y una magnitud probable Mw 6,3, le asignan una tasa de movimiento menor que 0,2 mm/año, mencionando que tasas de desplazamiento entre 0,01 y 0,1 mm/año se estimaron con base en la deformación de rasgos morfológicos por la Asociación Colombiana de Ingeniería

Sísmica (AIS, 1996); le asigna una edad al último movimiento menor a 1,6 Ma, aclarando que probablemente esté restringido al Cuaternario Temprano (entre 0,75 y 1,6 Ma).

En conclusión con la información disponible esta falla se puede caracterizar como una falla que puede generar un sismo de magnitud Mw 6,3 y un grado de actividad bajo a moderado.

- **Falla Ibagué.** Se localiza a unos 215 km al sur de los municipios de Copacabana, Girardota y Barbosa, y a unos 190 km al sur de los municipios de Caldas, Sabaneta, La Estrella y Envigado. Ingeominas y la Universidad de los Andes (1997) la describen como una falla activa asignándole una magnitud máxima Ms 7,0, una longitud total de falla de 40 km, de los cuales 35 km presentan rasgos neotectónicos fuertes y los 5 km restantes tienen rasgos neotectónicos moderados. Estos autores reportan el segmento Cocora con una longitud de 33 km, de los cuales 8 km presentan rasgos neotectónicos fuertes y los restantes 25 km presentan rasgos moderados; le asignan un sismo de magnitud máxima Ms 6,9. Se estima un grado de actividad alto.

Guzmán *et al* (1998) identifican dos segmentos de la falla Ibagué como activos con recurrencias calculadas entre 600 - 1000 años y 1000 - 2000 años, para magnitudes de momento Mw 6,4 y 6,9 respectivamente.

París *et al* (2000) le asignan una longitud de 124 km, con una tasa de movimiento entre 1 y 5 mm/año, aclarando que se estimó una tasa de movimiento de 1,2 mm/año basada en la deformación de rasgos y depósitos datados como del Cuaternario; le asignan un sismo probable de magnitud Mw 7,0 – 7,2 basado en la longitud más probable de ruptura de 45 km. El movimiento más reciente lo estiman de edad Holocena / post glacial menor que 15 000 años comentando que el más reciente movimiento es de hace unos 3 500 años estimado con base en depósitos datados.

Montes *et al* (2005a) excavaron una trinchera para investigación paleosismológica sobre la falla Ibagué e identificaron alrededor de 10 eventos sísmicos. Montes *et al* (2005b) determinaron por lo menos tres eventos de deformación principales con nueve episodios sísmicos ocurridos entre los 12 500 y 300 años A.C.; calculan, a partir de desplazamientos medidos en la trinchera, un sismo característico de magnitud  $M 7,0 \pm 0,1$ , tasa de actividad promedio de 0,77 mm/año y un período de retorno de aproximadamente 1 300 años. Esta caracterización corresponde al segmento de falla más continuo que se localiza entre el nacimiento del río Cocora y la población de Piedras con una longitud estimada de 60 km. Estos eventos son los responsables del proceso de apertura y evolución de la cuenca de tracción Los Gomos. Suponiendo una tasa de actividad constante, estiman que la falla Ibagué

se pudo haber generado desde el Oligoceno Temprano (33,7 Ma). Proponen que el último evento importante ocurrido a lo largo de la falla Ibagué fue un sismo de magnitud mayor a 6,8 Ms, el cual tiene una edad menor a los 300 años A.C., lo que indicaría que este sismo podría corresponder con el sismo histórico de Ibagué, ocurrido el 31 de diciembre de 1824 ó el 1 de enero de 1825 y cuya descripción de intensidad corresponde más a un sismo de este tipo y no a uno de magnitud mayor que 4 como se reporta en el Catálogo de Grandes Sismos de Colombia para estudios de amenaza sísmica. Estos autores mencionan que los valores asignados a esta falla son comparables con los obtenidos en diferentes partes del mundo para fallas rápidas y altamente peligrosas donde se considera la amenaza sísmica muy alta.

Se propone dejar una información general para la falla Ibagué tomando la longitud de ruptura y el sismo probable reportado por París *et al* (2000), pero la tasa de desplazamiento y grado de actividad reportado por Montes *et al* (2005a) y el segmento de la falla Ibagué estudiado por Montes *et al* (2005b), con los datos reportados por estos autores.

## 6.2 SISMICIDAD REGIONAL

### 6.2.1 Sismicidad Histórica e Instrumental

En el trabajo de Ramírez (1975) se citan los siguientes sismos con epicentro en la ciudad de Medellín:

- El 13 de abril de 1792 con intensidad I, con latitud 6,2°N y longitud 75,6°W. Una serie de temblores empezaron en esta fecha y continuaron hasta el 10 de junio. No cesó de atemorizar a los habitantes de Medellín. Se reportaron muchas casas destruidas en la ciudad de Antioquia y la iglesia de Santa Rosa. 1792 fue llamado el año de los temblores.
- El 15 de septiembre de 1868 con intensidad I, con latitud 6,2°N y longitud 75,5°W en Medellín se sintió un fuerte temblor.
- El 31 de octubre de 1928 con intensidad I, latitud 6,3°N y longitud 75,5°W
- Octubre 11 de 1966 con intensidad I, latitud 6,7N y longitud 75,8W localizado al NW de Medellín.

Page (1986) menciona la ocurrencia de muchos flujos datados en la región de Santafé de Antioquia que se agrupan en el tiempo, de tal forma que sugieren la recurrencia de



eventos regionales, presumiblemente sismos, con períodos de recurrencia de 400 años en los últimos 1800 años.

La información sobre la sismicidad registrada en Colombia se puede considerar reciente. El primer sismógrafo fue instalado durante la década de 1920 y sólo desde 1957 el Instituto Geofísico de Los Andes instaló y empezó a operar una red que permitió localizar los sismos, pero que presentaba un cubrimiento limitado y muy baja precisión. Desde 1993 está en operación la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) del INGEOMINAS, la cual presenta un cubrimiento aceptable en la parte Andina del país. Esta red en la actualidad registra entre 300 y 400 sismos mensuales con magnitud superior a 2.

El catálogo sísmico que cuenta con registros desde 1656, recientemente fue actualizado con base en la información de la RSNC y de agencias internacionales, y fue analizado por parte del GSM durante los estudios para la Microzonificación Sísmica de Medellín.

En las Figura 6.2 y 6.3 se presentan los epicentros de los sismos superficiales y profundos registrados en el país desde 1957, año a partir del cual se considera que la información es más completa y confiable. Se observa que existen algunas concentraciones importantes: Nido de Bucaramanga, donde se generan permanentemente sismos de relativa pequeña magnitud ( $M < 6,0$ ) con profundidades superiores a 100 km, por tanto no representan una amenaza importante para el área metropolitana; zona del Bagre y Zaragoza, en donde se presenta una actividad sísmica importante, aunque menor que la anterior, con una profundidad intermedia a superficial, que ha liberado algunos sismos con magnitud hasta de 6,0 en la escala de Richter incluyendo algunos sismos pequeños con magnitud menor a 5,0; al sur del departamento de Antioquia y en el eje cafetero se encuentra una concentración donde se han liberado sismos muy intensos con gran cantidad de daños y pérdidas de vidas, como los sismos de Pereira de 1995 y más recientemente el de Armenia de 1999. También se destacan en esta figura el Borde Llanero y la sismofuente de Murindó en la Cordillera Occidental, que en 1992 liberó dos sismos con magnitudes cercanas a 7,0.

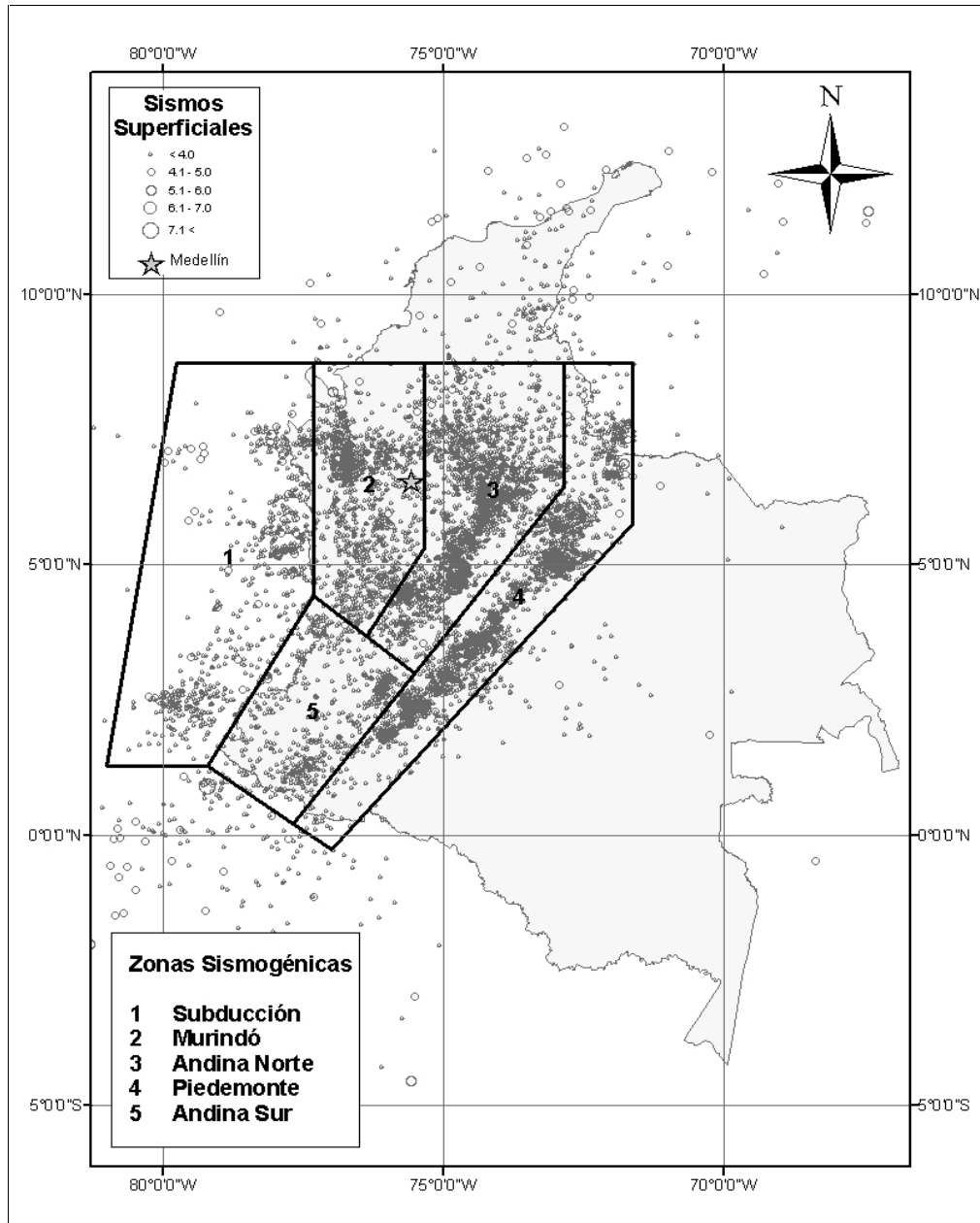
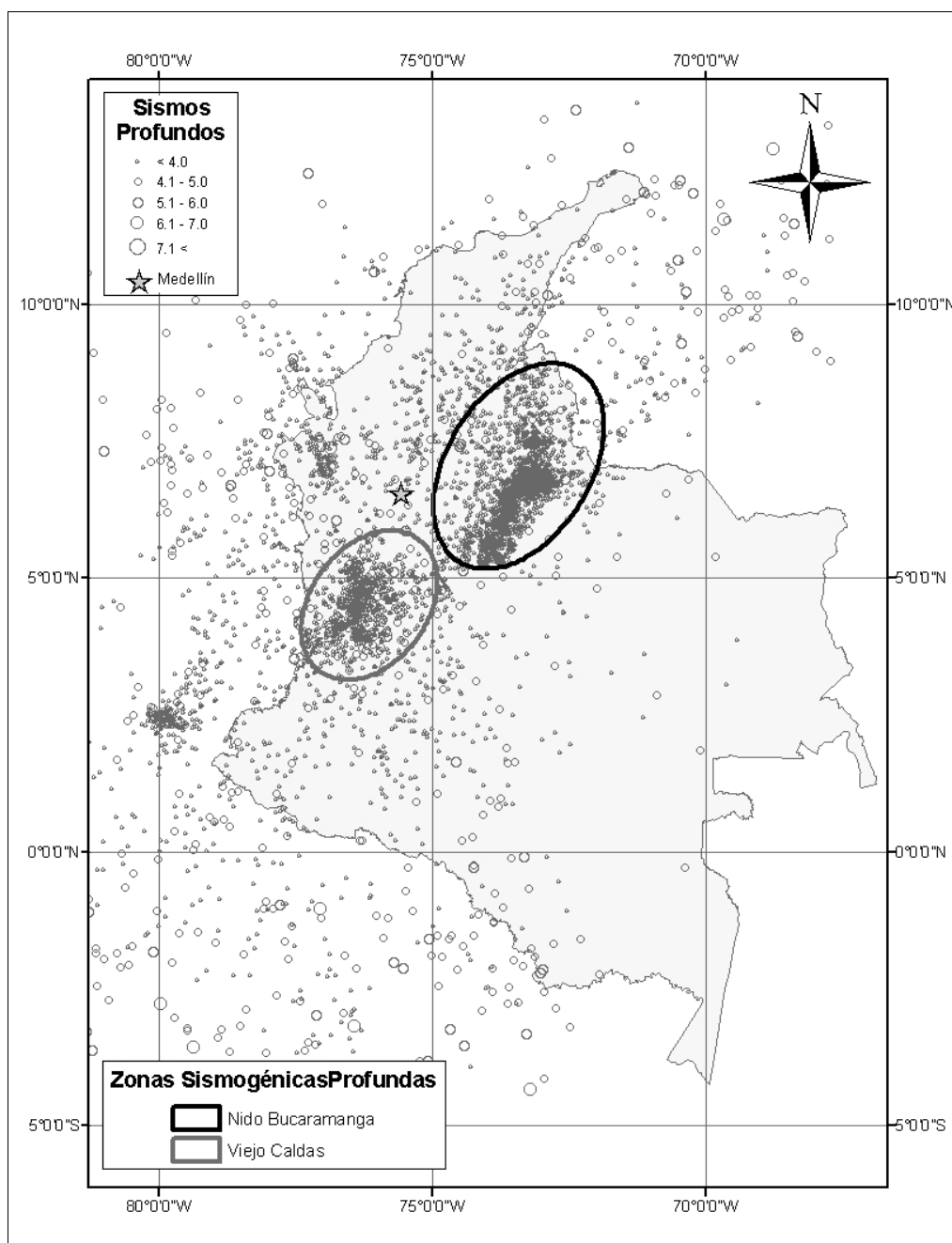


Figura 6.2 Sismicidad y zonas sismogénicas superficiales



**Figura 6.3 Sismicidad y zonas sismogénicas profundas**

A nivel local, la Figura 6.4 muestra la localización de epicentros en la zona del departamento de Antioquia y su relación con el Valle de Aburrá.

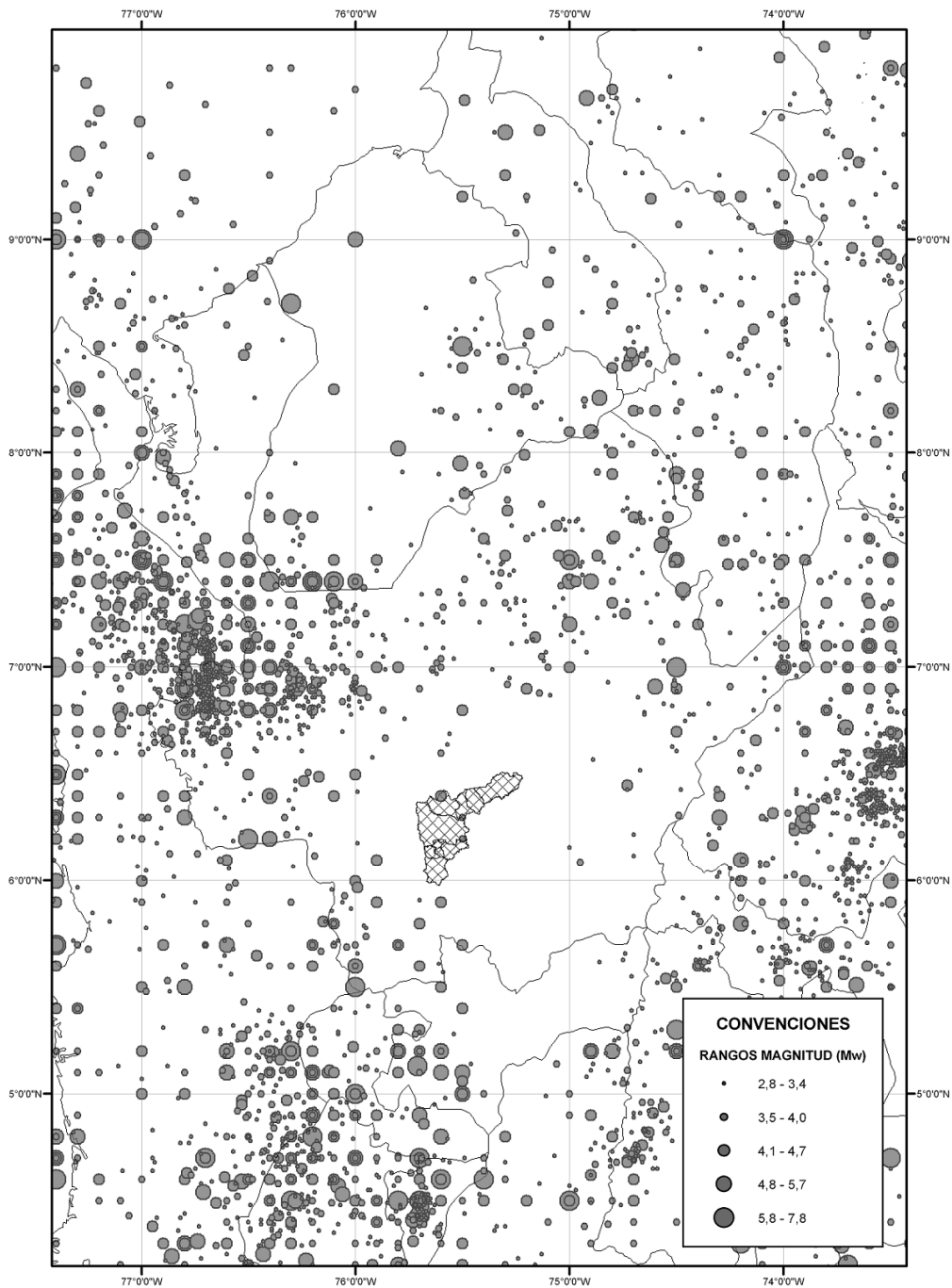


Figura 6.4 Sismicidad histórica e instrumental en la zona de Antioquia

Al localizar los registros del catálogo se nota que en las zonas de Murindó y el llamado Borde Llanero se presenta un número importante de sismos registrados como superficiales, aunque también es posible establecer pequeñas concentraciones de sismos como en la zona del departamento de Caldas y el occidente de Cundinamarca. En cuanto a los sismos profundos, se presentan dos claras concentraciones en el nido de Bucaramanga y la zona del Viejo Caldas hasta la parte sur del departamento de Chocó. Además, se presentan eventos dispersos atribuibles a la zona de subducción general.

En general se puede decir que la sismicidad histórica muestra al Valle de Aburrá como una zona exenta de sismos de gran magnitud en la historia reciente (últimos 500 años aproximadamente), pero que los efectos de sismos moderados y grandes a distancias intermedias (menores a 150 km aproximadamente) sí han causado efectos de importancia en la ciudad.

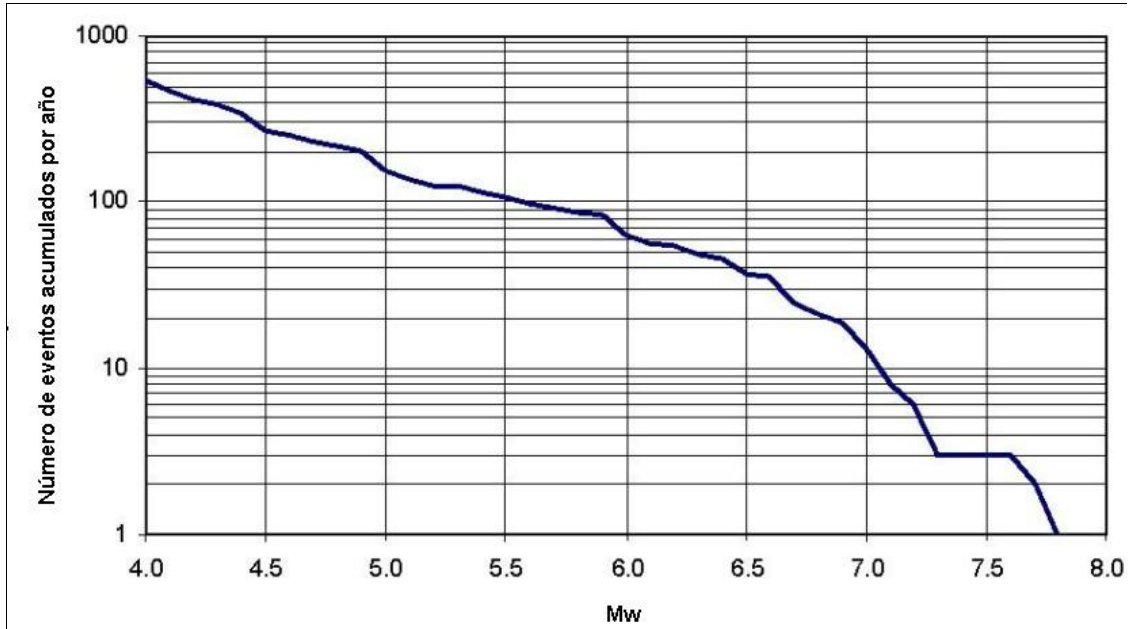
### 6.2.2 Sismicidad Instrumental

Para la evaluación de la amenaza sísmica del Proyecto se partió del catálogo de la Red Sismológica Nacional (1993 – 2003) y del catálogo histórico de Colombia (1566 – 1993), el cual fue proporcionado por el Centro de procesamiento de Información Sismológica de la Universidad Nacional. El catálogo se homogenizó a magnitudes  $M_w$  equivalentes a partir de correlaciones con otras magnitudes.

De estos catálogos se eliminaron los registros con  $M_w$  menores de 4,0 dado que sismos de magnitudes menores no se consideran completos en términos de cubrimiento del catálogo, su uso en la estimación de los parámetros  $a$  y  $b$  de la ecuación de Guttenberg – Richter tiende a sobreestimar la recurrencia de sismos de magnitudes mayores, y además por considerar que estos sismos no producen daños en las estructuras. Igualmente, se eliminaron las posibles réplicas para evitar el sesgo en las curvas de recurrencia y se realizó un análisis de cubrimiento temporal (completez), mediante la definición de los años a partir de los cuales cada rango de magnitud está completo. El resultado para el caso del catálogo completo se presenta en la Tabla 6.1 y en la Figura 6.5 se muestra la tasa de excedencia de magnitudes del catálogo sísmico de Colombia después de realizar el análisis de cubrimiento y la remoción de réplicas.

**Tabla 6.1 Cubrimiento del catálogo**

Intervalo (Ms)	Inicio del intervalo
> 7	1904
6 – 6.9	1918
5 – 5.9	1941
4 – 4.9	1953



**Figura 6.5 Tasa de excedencia de magnitudes del catálogo filtrado**

De la Figura 6.5 se puede concluir que en Colombia se presentan aproximadamente cada año diez sismos de magnitud  $M_w$  igual o mayor a 7,0, y que sismos de magnitud  $M_w$  mayor o igual a 5,0 se presentan en promedio 150 eventos por años, lo cual confirma el carácter de alta actividad sísmica de nuestro país.

## 6.3 SISMOFUENTES

### 6.3.1 Zonas Sismogénicas

Teniendo en cuenta los errores que presentan en su localización los sismos disponibles en los catálogos sísmicos, en especial en el territorio colombiano dada la baja densidad de la red instrumental, resulta impreciso tratar de asignar los sismos a una fuente particular para evaluar las características de sismicidad asociada a cada una de ellas.

Por esta razón, la sismicidad superficial se agrupó en cinco zonas (Subducción Pacífico, Murindó, Andina norte, Andina sur y Piedemonte) considerando la actividad sísmica registrada en cada zona. Por su parte, la sismicidad profunda se agrupó en tres zonas principales (Benioff Viejo Caldas, Nido de Bucaramanga y Subducción general). El límite entre sismicidad superficial y profunda se estableció en 33 km, el cual es un valor usado de manera estándar a nivel mundial cuando no se conoce con certeza el límite local de los sismos corticales. Estas zonas se utilizaron para la definición de los parámetros de actividad sísmica de cada una de las fallas asociadas a cada área. En las Figuras 6.2 y

6.3 se muestran las zonas sísmogénicas consideradas. Así mismo, en las Tablas 6.2 a 6.5 se muestra el listado de las fallas consideradas junto con los parámetros de actividad de cada una. En la Tabla 6.6 se presenta la tasa de actividad para sismos de magnitud  $M_w$  mayores o iguales a 4,0 ( $\lambda_{4,0}$ ) para cada una de estas zonas. De acuerdo con el modelo de recurrencia de magnitudes de Guttenber – Richter, los parámetros de las Tablas 6.2 a 6.6 se calculan a partir de las siguientes ecuaciones, donde  $a$  y  $b$  son los parámetros de la regresión lineal del modelo de Guttenber – Richter.

$$\log \lambda = a + bM_w \quad (6.1)$$

$$\lambda_{4,0} = Rate = 10^{a+b(4,0)} \quad (6.2)$$

$$\beta = b \ln 10 \quad (6.3)$$

**Tabla 6.2 Fallas ubicadas en la zona Andina Norte**

Nombre	Tipo de falla	$M_{\min}$	$M_{\max}$	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Aeropuerto	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00464	Sismos / Año	1.336
Armenia 1	Rumbo	4.0	6.8	Característico	0.03342	Sismos / Año	1.336
Armenia 2	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.02081	Sismos / Año	1.336
Armenia 3	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.02009	Sismos / Año	1.336
Bituima Norte	Inversa	4.0	7.4	Característico	0.01363	Sismos / Año	1.336
Bituima Sur	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00546	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga 4	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.04336	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga 5	Inversa	4.0	7.1	Característico	0.01393	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga NN 1	Rumbo	4.0	6.4	Característico	0.00422	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga NN 2	Rumbo	4.0	6.8	Característico	0.01002	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga NN 3	Rumbo	4.0	6.8	Característico	0.00991	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga NN 4	Rumbo	4.0	6.7	Característico	0.00849	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga Nor 1	Rumbo	4.0	6.2	Característico	0.00277	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga Nor 2	Rumbo	4.0	6.4	Característico	0.00485	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga Nor 3	Rumbo	4.0	6.6	Característico	0.00647	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga Nor 4	Rumbo	4.0	6.2	Característico	0.00278	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.2 Fallas ubicadas en la zona Andina Norte (Cont.)**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Cambao Norte	Inversa	4.0	7.3	Característico	0.06504	Sismos / Año	1.336
Cambao Sur	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.01858	Sismos / Año	1.336
Cambras	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.01393	Sismos / Año	1.336
Carmen Sder. 1	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00073	Sismos / Año	1.336
Carmen Sder. 2	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.00043	Sismos / Año	1.336
Carmen Sder. 3	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00038	Sismos / Año	1.336
Casabe	Normal	4.0	6.9	Característico	0.01703	Sismos / Año	1.336
Chapetón	Inversa	4.0	7.1	Característico	0.01084	Sismos / Año	1.336
Cocora	Normal	4.0	6.8	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
Cocorná	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00929	Sismos / Año	1.336
Corraleja	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00257	Sismos / Año	1.336
Cucuana 1	Normal	4.0	6.8	Característico	0.02322	Sismos / Año	1.336
Cucuana 2	Normal	4.0	6.9	Característico	0.01084	Sismos / Año	1.336
Doima	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00464	Sismos / Año	1.336
El Chocho	Rumbo	4.0	7.1	Característico	0.02477	Sismos / Año	1.336
El Palmar	Rumbo	4.0	6.8	Característico	0.00309	Sismos / Año	1.336
Espíritu Santo 5	Normal	4.0	6.8	Característico	0.4	mm / Año	1.336
F. Alto del Trigo	Inversa	4.0	7.5	Característico	0.08827	Sismos / Año	1.336
F. Cimitarra	Rumbo	4.0	7.1	Característico	0.04026	Sismos / Año	1.336
F. Otu Norte 73	Normal	4.0	7.4	Característico	0.03068	Sismos / Año	1.336
Facatativá	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.00353	Sismos / Año	1.336
Honda Norte	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.01393	Sismos / Año	1.336
Honda Sur	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.01238	Sismos / Año	1.336
Ibagué	Normal	4.0	7.5	Característico	0.00619	Sismos / Año	1.336
Infantas 1	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.01858	Sismos / Año	1.336
Infantas 2	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.01548	Sismos / Año	1.336



**Tabla 6.2 Fallas ubicadas en la zona Andina Norte (Cont.)**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Montenegro	Rumbo	4.0	7.0	Característico	0.01084	Sismos / Año	1.336
Mulato 1	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00109	Sismos / Año	1.336
Mulato 2	Inversa	4.0	5.9	Característico	0.00026	Sismos / Año	1.336
Mulato 3	Inversa	4.0	5.7	Característico	0.00018	Sismos / Año	1.336
Mulatos	Inversa	4.0	7.6	Característico	0.03097	Sismos / Año	1.336
Neri	Rumbo	4.0	6.6	Característico	0.01238	Sismos / Año	1.336
Otú Norte - norte	Normal	4.0	7.0	Característico	0.1	mm / Año	1.336
Otú Norte - sur	Normal	4.0	7.0	Característico	0.1	mm / Año	1.336
Palestina norte	Normal	4.0	7.0	Característico	0.1	mm / Año	1.336
Palestina sur	Normal	4.0	7.0	Característico	0.1	mm / Año	1.336
Paraíso N	Rumbo	4.0	6.1	Característico	0.00059	Sismos / Año	1.336
Paraíso S	Rumbo	4.0	6.4	Característico	0.00095	Sismos / Año	1.336
Piedras	Rumbo	4.0	6.7	Característico	0.01084	Sismos / Año	1.336
Ramal Salinas	Inversa	4.0	7.3	Característico	0.03561	Sismos / Año	1.336
Romeral 1	Rumbo	4.0	7.1	Característico	0.02168	Sismos / Año	1.336
Romeral 2	Rumbo	4.0	6.9	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
Romeral 3	Rumbo	4.0	7.0	Característico	0.01882	Sismos / Año	1.336
Salinas 1	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00362	Sismos / Año	1.336
Salinas 2	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00599	Sismos / Año	1.336
Salinas 3	Inversa	4.0	7.3	Característico	0.01392	Sismos / Año	1.336
Salinas 4	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00432	Sismos / Año	1.336
San Vicente	Inversa	4.0	7.1	Característico	0.00929	Sismos / Año	1.336
Suárez 1	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.00931	Sismos / Año	1.336
Suárez 2	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00616	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.3 Fallas ubicadas en la zona Andina Sur**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Buesaco	Inversa	4.0	7.4	Característico	0.01305	Sismos / Año	1.336
Cali Patía	Inversa	4.0	7.5	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
Calima	Rumbo	4.0	7.5	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
Cauca VdC	Inversa	4.0	7.9	Característico	0.02942	Sismos / Año	1.336
Conjugada El Tambor	Rumbo	4.0	7.0	Característico	0.00196	Sismos / Año	1.336
Dagua	Normal	4.0	7.0	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
El Tambor 1	Rumbo	4.0	7.4	Característico	0.00514	Sismos / Año	1.336
El Tambor 2	Rumbo	4.0	7.3	Característico	0.00373	Sismos / Año	1.336
Guabas Pradera	Rumbo	4.0	7.2	Característico	0.00912	Sismos / Año	1.336
Julumito	Inversa	4.0	6.4	Característico	0.00141	Sismos / Año	1.336
Micay	Inversa	4.0	7.7	Característico	0.03252	Sismos / Año	1.336
Piendamó	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.00402	Sismos / Año	1.336
Río Bravo	Rumbo	4.0	7.4	Característico	0.00774	Sismos / Año	1.336
Romeral 4	Inversa	4.0	7.1	Característico	0.01961	Sismos / Año	1.336
Romeral 5	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00491	Sismos / Año	1.336
Silvia Pijao	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.00179	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.4 Fallas ubicadas en la zona Piedemonte**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Acacias	Inversa	4.0	7.2	Característico	0.01084	Sismos / Año	1.336
Algeciras 1	Rumbo	4.0	7.1	Característico	0.20906	Sismos / Año	1.336
Algeciras 2	Rumbo	4.0	6.9	Característico	0.01393	Sismos / Año	1.336
Bogotá	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.01046	Sismos / Año	1.336
Borde Llanero	Inversa	4.0	7.5	Característico	0.1115	Sismos / Año	1.336
Boyacá	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.01858	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.4 Fallas ubicadas en la zona Piedemonte (Cont.)**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Bucaramanga 1	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.01548	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga 2	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
Bucaramanga 3	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
Colepato	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.1564	Sismos / Año	1.336
Colonia	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.00309	Sismos / Año	1.336
El Mesón	Rumbo	4.0	6.6	Característico	0.00419	Sismos / Año	1.336
Fusagasugá	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00803	Sismos / Año	1.336
Guaicáramo Centro	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00246	Sismos / Año	1.336
Guaicáramo Oeste	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00171	Sismos / Año	1.336
Guaicáramo Sur	Inversa	4.0	7.1	Característico	0.00394	Sismos / Año	1.336
Guayuriba	Inversa	4.0	7.2	Característico	0.07433	Sismos / Año	1.336
Guicáramo Norte	Inversa	4.0	7.2	Característico	0.00431	Sismos / Año	1.336
La Cajita	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00154	Sismos / Año	1.336
La Plata	Rumbo	4.0	7.4	Característico	0.06813	Sismos / Año	1.336
Lenpuga	Inversa	4.0	7.1	Característico	0.02815	Sismos / Año	1.336
Pajarito	Inversa	4.0	7.3	Característico	0.0511	Sismos / Año	1.336
San Pedro	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.00338	Sismos / Año	1.336
Santa María	Inversa	4.0	7.2	Característico	0.03224	Sismos / Año	1.336
Servitá	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00774	Sismos / Año	1.336
Soacha	Inversa	4.0	6.2	Característico	0.00329	Sismos / Año	1.336
Soapaga	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.01084	Sismos / Año	1.336
Tesalia	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.02148	Sismos / Año	1.336
Tunjuelito	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.00424	Sismos / Año	1.336
Ubaque	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.00429	Sismos / Año	1.336
Upanema	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.00309	Sismos / Año	1.336
Usaquén	Rumbo	4.0	6.6	Característico	0.00393	Sismos / Año	1.336
Yopal	Inversa	4.0	7.6	Característico	0.00584	Sism / Año	1.336

**Tabla 6.5 Fallas ubicadas en la zona Murindó**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Anza Tonusco	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.0011	Sismos / Año	1.336
Aurra	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00082	Sismos / Año	1.336
Bahía Solano	Rumbo	4.0	7.6	Característico	0.02168	Sismos / Año	1.336
Cascajosa	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00122	Sismos / Año	1.336
Cauca	Rumbo	4.0	6.7	Característico	0.00161	Sismos / Año	1.336
Cauca 1-1	Rumbo	4.0	6.6	Característico	0.00146	Sismos / Año	1.336
Cauca 8	Rumbo	4.0	7.9	Característico	0.03042	Sismos / Año	1.336
Cauca Cañafisto	Rumbo	4.0	6.7	Característico	0.00151	Sismos / Año	1.336
Cauca Medio	Rumbo	4.0	7.3	Característico	0.00834	Sismos / Año	1.336
Cauca SantaFe 1	Inversa	4.0	6.4	Característico	0.00103	Sismos / Año	1.336
Cordoba	Rumbo	4.0	6.7	Característico	0.00176	Sismos / Año	1.336
Ebejico	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00077	Sismos / Año	1.336
El Carmen	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00169	Sismos / Año	1.336
Espíritu Santo 1	Normal	4.0	7.0	Característico	0.4	mm / Año	1.336
Espíritu Santo 2	Normal	4.0	7.0	Característico	0.4	mm / Año	1.336
Espíritu Santo 3	Normal	4.0	7.0	Característico	0.4	mm / Año	1.336
Espíritu Santo 4	Normal	4.0	7.0	Característico	0.4	mm / Año	1.336
F. Atrato Sur 7	Inversa	4.0	7.8	Característico	0.29578	Sismos / Año	1.336
Garrapatas	Rumbo	4.0	7.3	Característico	0.01393	Sismos / Año	1.336
Iguana Boqueron	Inversa	4.0	6.2	Característico	0.00065	Sismos / Año	1.336
Ituango 23	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.0041	Sismos / Año	1.336
Ituango centro	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00155	Sismos / Año	1.336
Ituango norte	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.00137	Sismos / Año	1.336
Ituango sur	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00118	Sismos / Año	1.336
La Batea	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.00116	Sismos / Año	1.336
La Cajetilla	Rumbo	4.0	5.8	Característico	0.00027	Sismos / Año	1.336
La Chillona 1	Rumbo	4.0	6.4	Característico	0.00081	Sismos / Año	1.336
La Chillona 1-2	Rumbo	4.0	6.1	Característico	0.00047	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.5 Fallas ubicadas en la zona Murindó (Cont.)**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
La Sucia 1-1	Rumbo	4.0	6.4	Característico	0.00097	Sismos / Año	1.336
La Sucia 1-2	Rumbo	4.0	6.4	Característico	0.00097	Sismos / Año	1.336
Mistrato	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00323	Sismos / Año	1.336
Murindo	Rumbo	4.0	7.6	Característico	0.13163	Sismos / Año	1.336
Murri Mutata	Rumbo	4.0	7.4	Característico	0.0449	Sismos / Año	1.336
Naranja	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.0025	Sismos / Año	1.336
Peque E nor - cen	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00075	Sismos / Año	1.336
Peque E norte	Inversa	4.0	6.0	Característico	0.00046	Sismos / Año	1.336
Peque E sur	Inversa	4.0	6.2	Característico	0.00066	Sismos / Año	1.336
Peque E sur - cen	Inversa	4.0	6.2	Característico	0.00067	Sismos / Año	1.336
Peque nor - cen	Inversa	4.0	6.2	Característico	0.00061	Sismos / Año	1.336
Peque norte	Inversa	4.0	6.2	Característico	0.00063	Sismos / Año	1.336
Peque sur	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00194	Sismos / Año	1.336
Peque sur - cen	Inversa	4.0	6.5	Característico	0.00121	Sismos / Año	1.336
Pintada Sur	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00231	Sismos / Año	1.336
Quirimara	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00077	Sismos / Año	1.336
Romeral Amaga	Inversa	4.0	6.0	Característico	0.00046	Sismos / Año	1.336
Romeral Norte 1	Rumbo	4.0	7.0	Característico	0.00419	Sismos / Año	1.336
Romeral Norte 2	Rumbo	4.0	6.8	Característico	0.00192	Sismos / Año	1.336
Romeral Norte 3	Rumbo	4.0	6.9	Característico	0.0027	Sismos / Año	1.336
Romeral Piedecuesta 1	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00162	Sismos / Año	1.336
Romeral Piedecuesta 2	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00162	Sismos / Año	1.336
Romeral Piedecuesta 3	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00271	Sismos / Año	1.336
Romeral Piedecuesta 4	Inversa	4.0	6.7	Característico	0.00156	Sismos / Año	1.336
Romeral Piedecuesta 5	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00464	Sismos / Año	1.336
Romeral Sin Nombre 1	Inversa	4.0	6.8	Característico	0.00195	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.5 Fallas ubicadas en la zona Murindó (Cont.)**

Nombre	Tipo de falla	M <sub>min</sub>	M <sub>máx</sub>	Modelo de recurrencia	Rate	Unidad del rate	$\beta$
Romeral Sin Nombre 2	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00246	Sismos / Año	1.336
Romeral Sin Nombre 3	Inversa	4.0	7.2	Característico	0.02013	Sismos / Año	1.336
Sabanalarga E	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.0029	Sismos / Año	1.336
Sabanalarga W	Inversa	4.0	7.0	Característico	0.00438	Sismos / Año	1.336
Sajonia	Inversa	4.0	6.0	Característico	0.00042	Sismos / Año	1.336
San Jeronimo 1	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00075	Sismos / Año	1.336
San Jeronimo 2	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00075	Sismos / Año	1.336
San Jeronimo 3	Inversa	4.0	6.6	Característico	0.0015	Sismos / Año	1.336
San Jeronimo 4	Inversa	4.0	6.9	Característico	0.00236	Sismos / Año	1.336
Santa Rita E	Rumbo	4.0	6.6	Característico	0.00125	Sismos / Año	1.336
Santa Rita W 1	Normal	4.0	6.5	Característico	0.05	mm / Año	1.336
Santa Rita W 2	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.05	mm / Año	1.336
Santa Rita W 3	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.05	mm / Año	1.336
Santa Rita W 4	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.05	mm / Año	1.336
Santa Rita W 5	Rumbo	4.0	6.5	Característico	0.05	mm / Año	1.336
Sardinas nor - cen	Inversa	4.0	6.0	Característico	0.00049	Sismos / Año	1.336
Sardinas norte	Inversa	4.0	6.1	Característico	0.00055	Sismos / Año	1.336
Sardinas sur	Inversa	4.0	6.4	Característico	0.00105	Sismos / Año	1.336
Sardinas sur - cen	Inversa	4.0	6.3	Característico	0.00074	Sismos / Año	1.336
Tonusco	Normal	4.0	6.9	Característico	0.0033	Sismos / Año	1.336

**Tabla 6.6 Tasa de actividad de las zonas sismogénicas para magnitudes Mw mayores a 4**

Zona sismogénica	Tasa de actividad ( $\lambda_{4.0}$ )	$\beta$
Subducción Pacífico	3.735	1.108
Andina norte	0.968	1.336
Andina sur	0.139	1,336
Piedemonte	0.901	1,336
Murindó	0.667	1,336
Viejo Caldas	0.858	1.108
Nido de Bucaramanga	2.278	2.680

Subducción general	0.680	1.108
--------------------	-------	-------

### 6.3.2 Caracterización de sismofuentes

Para caracterizar cada sismofuente se realizó un nuevo análisis estadístico de los datos con base en la metodología propuesta por Arboleda y Ordaz (1999), la cual parte de un subcatálogo para cada zona sismogénica, y para cada magnitud última proporciona los valores de los parámetros  $\lambda$  y  $\beta$ . El parámetro  $\lambda$  caracteriza la tasa de actividad de una sismofuente dada en función del número de eventos por año iguales o superiores a una magnitud dada (en este caso 4,0) y el parámetro  $\beta$  indica la proporción entre magnitudes grandes y pequeñas que puede producir la falla. Esta metodología es más confiable que las que se habían utilizado en estudios previos porque hace un mejor uso, desde el punto de vista estadístico, de la información histórica disponible. Por otra parte, la actividad de las sismofuentes también se evaluó con base en el grado de actividad de las fallas obtenida a partir de estudios geológicos realizados por diferentes autores a lo largo y ancho de Colombia. A partir de la estimación del grado de actividad, expresado como el movimiento de la falla en el cuaternario reciente, y utilizando la clasificación mostrada en la siguiente tabla, se estimó la tasa de desplazamiento o slip-rate de cada falla.

**Tabla 6.7 Clasificación de la actividad de las fallas (Cluff, 1981)**

Grado de actividad	Desplazamiento
Extremadamente alto	Mayor de 1000 mm/año
Muy alto	100-10 mm./año
Alto	10-1 mm./año
Moderado	1-0,1 mm./año
Bajo	0.1-0,01 mm./año
Muy bajo	0.01-0,001 mm./año
Extremadamente bajo	Menor de 0,001

### 6.4 ECUACIONES DE ATENUACIÓN

Se utilizaron las ecuaciones de atenuación sobre aceleración espectral en roca para sismos continentales y para sismos de subducción y Bennioff desarrollada para Colombia por Gallego y Ordaz (2000). Esta ecuación en particular tiene el mérito de haber sido desarrollada a partir de sismos registrados en Colombia. Esto a su vez puede ser una deficiencia, ya que dado el alto grado de imprecisión en la localización de epicentros en Colombia, cuyo error típico es del orden de 30 km, se tiene un nivel de incertidumbre en las aceleraciones estimadas con esta ecuación, que la incertidumbre que se tendría si los errores de localización fueran menores. Por este motivo se consideraron las ecuaciones de Abrahamson y Silva (1997) y Boore *et al* (1997) para sismofuentes superficiales, y Youngs *et al* (1997) para las sismofuentes de subducción, con el fin de disminuir en cierta medida el nivel de incertidumbre epistémica a este

respecto. Dado lo extenso de las publicaciones en las que se presentan las ecuaciones de atenuación y los parámetros relacionados, se remite al lector a las referencias indicadas.

## 6.5 ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA

### 6.5.1 Aceleración Máxima del Terreno (PGA) y Aceleraciones Espectrales (Sa)

La metodología desarrollada parte de la recopilación de información tectónica obtenida en otros proyectos, tales como los estudios de factibilidad y diseños definitivos de los proyectos hidroeléctricos San Carlos, Jaguas, Riógrande II, Porce II, Nechí, La Herradura, La Vuelta, Río Frío, Cañafisto, Pescadero-Ituango, Río Piedras, entre otros, además de los estudios de microzonificación sísmica para Medellín en 1999 y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en 2002; esta información permite la actualización permanente del catálogo o registro de fallas existentes en el país. Es importante anotar que el catálogo de fallas contiene información geosísmica de cada falla, incluyendo información sobre su ubicación espacial (longitud, buzamiento, etc.), así como información sismológica (tasa de actividad, longitud de ruptura, parámetro  $\beta$ ).

La información sismogénica de cada falla es obtenida a partir del catálogo sísmico, el cual es actualizado y homogenizado evaluando su grado de cubrimiento temporal (completez) para obtener un catálogo con cubrimiento temporal uniforme de la información.

El catálogo de fallas y el catálogo homogenizado de registros sísmicos permiten obtener una base de datos sismológicos confiable, que permite incluir en los análisis de amenaza sísmica la contribución de la sismicidad de fondo (background seismicity), o incluso para fallas donde no se tienen estudios sismológicos puntuales, inferir parámetros sismogénicos con base en la actividad sísmica regional.

Considerando que la amenaza sísmica no puede asignarse a una fuente sismogénica única, y que no se sabe de cual de ellas puede provenir un sismo destructor, en los análisis efectuados se integra el aporte que en la sismicidad hacen cada una de las fallas, de forma que es necesario realizar consideraciones probabilísticas para considerar este aspecto. La evaluación de la amenaza sísmica se realiza en términos probabilísticas a partir de la formulación de Cornell (1968) y McGuire (1976), la cual se resume en la Ecuación 6.4, donde  $\lambda_y$  es la tasa de excedencia del parámetro de interés y,  $v_i$  es la tasa de actividad de la fuente  $i$ ,  $N_s$  es el número de sismofuentes consideradas, y  $f_M$  y  $f_R$  son las funciones de densidad de probabilidad de magnitud y distancia para cada sismofuente:

$$\lambda_y = \sum_{i=1}^{N_s} v_i \iint P[Y > y | m, r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(m) dm dr \quad (6.4)$$



En todo caso, el desarrollo teórico del método está fuera del alcance del presente informe y se remite al lector a consultar la fuente original. Este proceso probabilístico intrínsecamente permite combinar el aporte a las tasas de excedencia de aceleración realizado por las diferentes clases de sismo-fuentes: cercanas, lejanas profundas y locales.

En los análisis de amenaza sísmica se reconocen a nivel internacional dos tipos de incertidumbre, las cuales se manejan dentro del análisis mediante enfoques diferentes. La incertidumbre epistémica, que es la relacionada con la falta de conocimiento del proceso o de los datos que intervienen, se maneja mediante el planteamiento de distintos escenarios de análisis mediante los llamados árboles lógicos (Restrepo-Vélez y Bommer, 2002). La incertidumbre aleatoria, que es la que proviene de la aleatoriedad intrínseca en todo proceso natural como es el de generación de sismos, y cuyo manejo se hace a través de la integración de las funciones de densidad de probabilidad de las ecuaciones de atenuación durante la aplicación del método probabilístico (McGuire, 1993).

El enfoque probabilístico combinado con el análisis mediante un árbol lógico o de probabilidades permite considerar las condiciones extremas en los análisis y obtener curvas de amenaza para diferentes niveles de confianza. La amenaza sísmica se evaluó mediante el programa probabilístico EZ-FRISK (Risk Engineering, 1997), que considera un modelo de plano - fuente y el aporte de la incertidumbre en las diferentes variables. Las ecuaciones de atenuación se truncaron a una variación máxima de dos desviaciones estándar, lo cual es una práctica rutinaria para este tipo de análisis (Abrahamson, 2000; Restrepo-Vélez y Bommer, 2002).

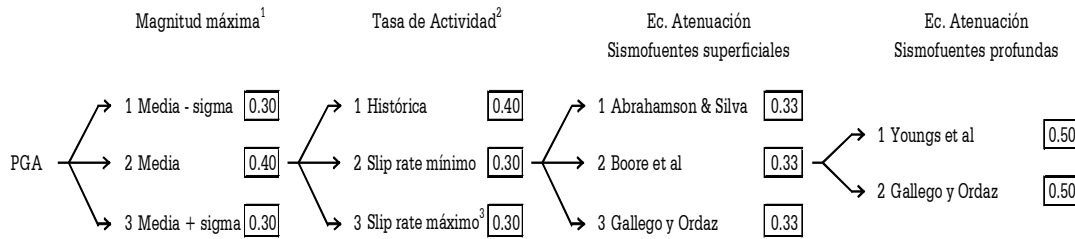
Para un nivel de aceleración determinado, la excedencia total es igual a la suma de las tasas de excedencia de aceleraciones para cada una de las sismo fuentes tenidas en cuenta, que pueden ser lejanas o cercanas, superficiales o profundas.

Los resultados incluyen la curva de amenaza, que representa la frecuencia anual de los diferentes niveles de aceleración máxima esperada en el sitio de interés, la contribución de cada una de las fuentes en la amenaza total, la disgregación de la amenaza por distancia y magnitud, y las formas espectrales, obtenidas mediante métodos probabilísticos (espectro de amenaza uniforme).

Como parte del análisis probabilístico se desarrolló un árbol de probabilidades, con el objeto de incorporar el rango completo de los parámetros obtenidos para cada una de las fuentes de mayor influencia en la amenaza sísmica del Proyecto, e incluir las incertidumbres asociadas a su evaluación (Figura 6.6). Este árbol permitió considerar las condiciones extremas en los análisis, y obtener curvas de amenaza para diferentes niveles de confianza. En particular, se consideró como de mayor relevancia para el proyecto la incertidumbre epistémica sobre la magnitud máxima y la tasa de actividad de

todas las sismofuentes, así como la incertidumbre epistémica sobre el modelo correcto de ecuación de atenuación aplicable para el entorno colombiano.

Para la estimación del valor de 2,89 indicado en la nota 3 de la Figura 6.6 se tuvieron en cuenta los valores de grado de actividad versus desplazamiento de la falla propuestos por Cluff (1981) y mostrados en la Tabla 6.7. Para este propósito se hicieron análisis con la tasa de actividad mínima en términos de slip rate y con la actividad histórica, y se encontró la relación del número de sismos por año entre la tasa de actividad histórica y la definida mediante el slip rate mínimo. Se supuso que la tasa de actividad histórica es el valor medio de la tasa de actividad y que por lo tanto el slip rate máximo a considerar tendría la misma proporción o distancia relativa con respecto a la tasa de actividad histórica, lo que arrojó el valor de 2,89.



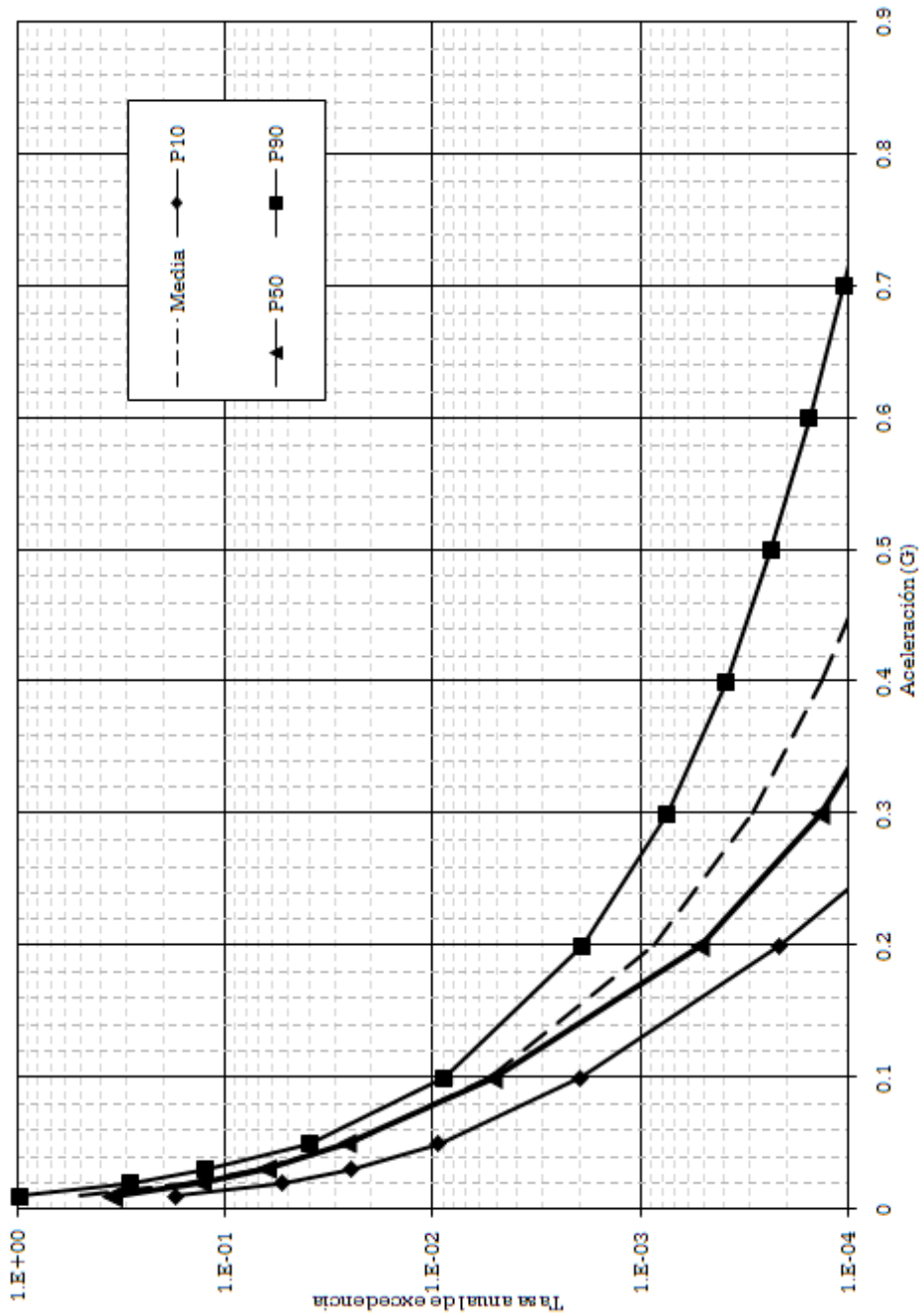
<sup>1</sup> Calculada a partir de las ecuaciones de Wells & Coppersmith (1994).

<sup>2</sup> La histórica fue obtenida del análisis de completéz y de recurrencia de magnitudes, a partir del catálogo colombiano actualizado. El slip-rate fue obtenido a partir de las estimaciones del grado de actividad de los estudios geológicos, correlacionados con las tasas de actividad propuestas por Cluff & Cluff (1981).

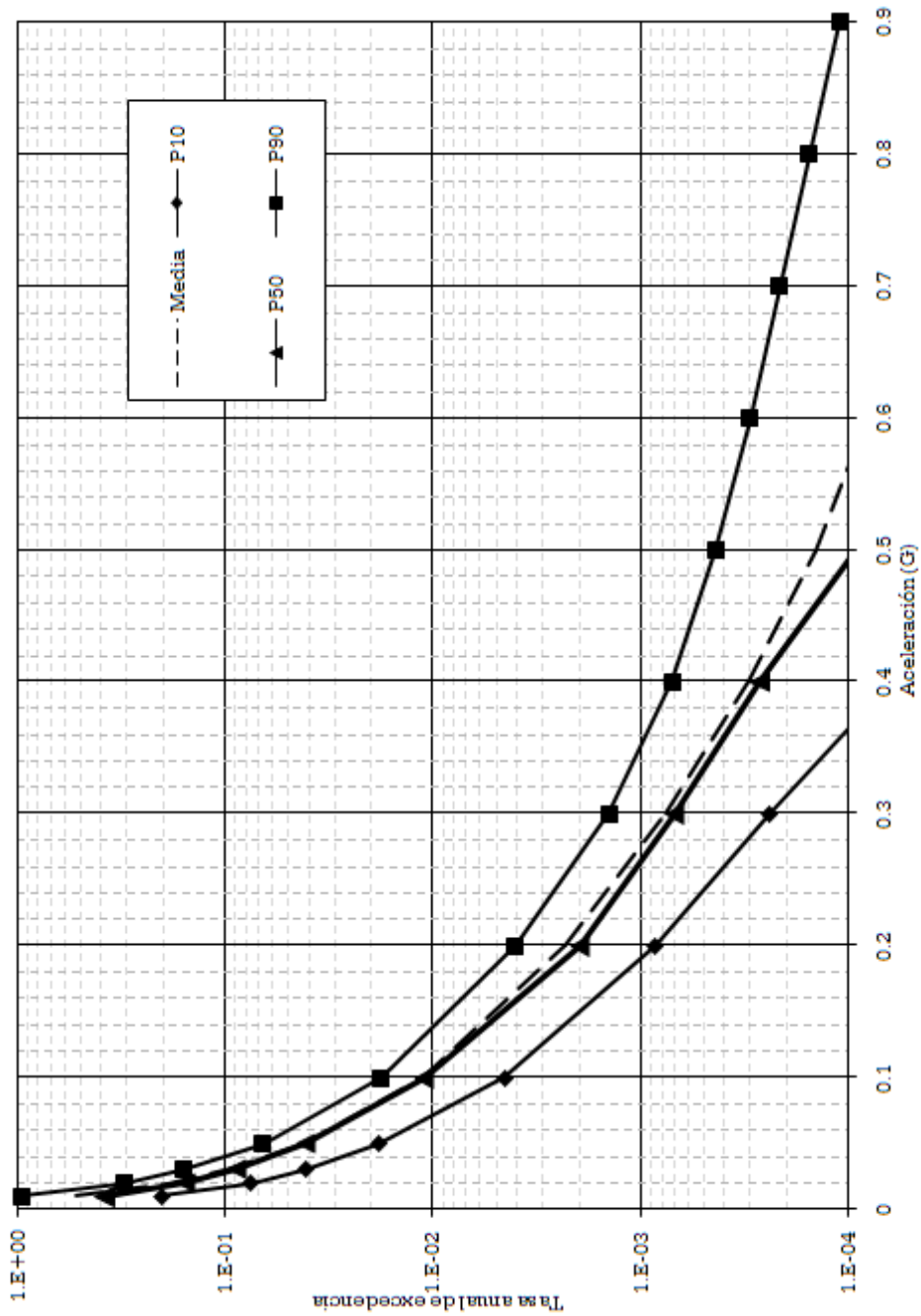
<sup>3</sup> Corresponde al Slip Rate Mínimo multiplicado por 2.89

**Figura 6.6** Árbol de probabilidades o árbol lógico

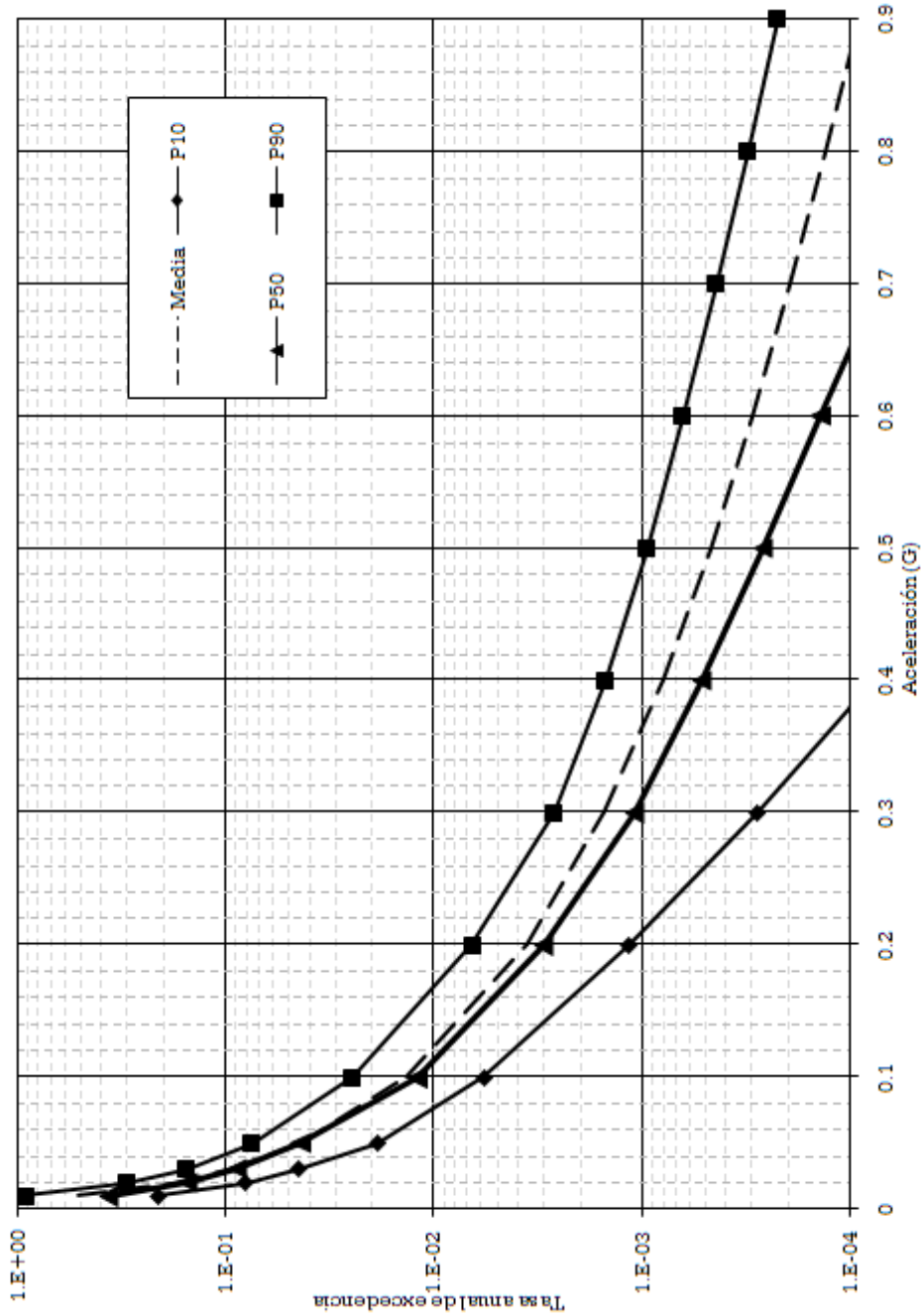
Del análisis de los diferentes casos posibles del árbol de probabilidades se obtienen los percentiles 10, 50 (Mediana) y 90, así como la Media o Esperanza de todos los casos. Este tipo de gráfico permite tener una idea del grado de incertidumbre epistémica sobre la evaluación de los parámetros considerados en el árbol probabilístico. En las Figuras 6.7 a 6.16 se muestran las curvas de amenaza para PGA para los municipios de Barbosa, Bello, Caldas, Copacabana, Envigado, Girardota, Itagüí, La Estrella, Medellín y Sabaneta.



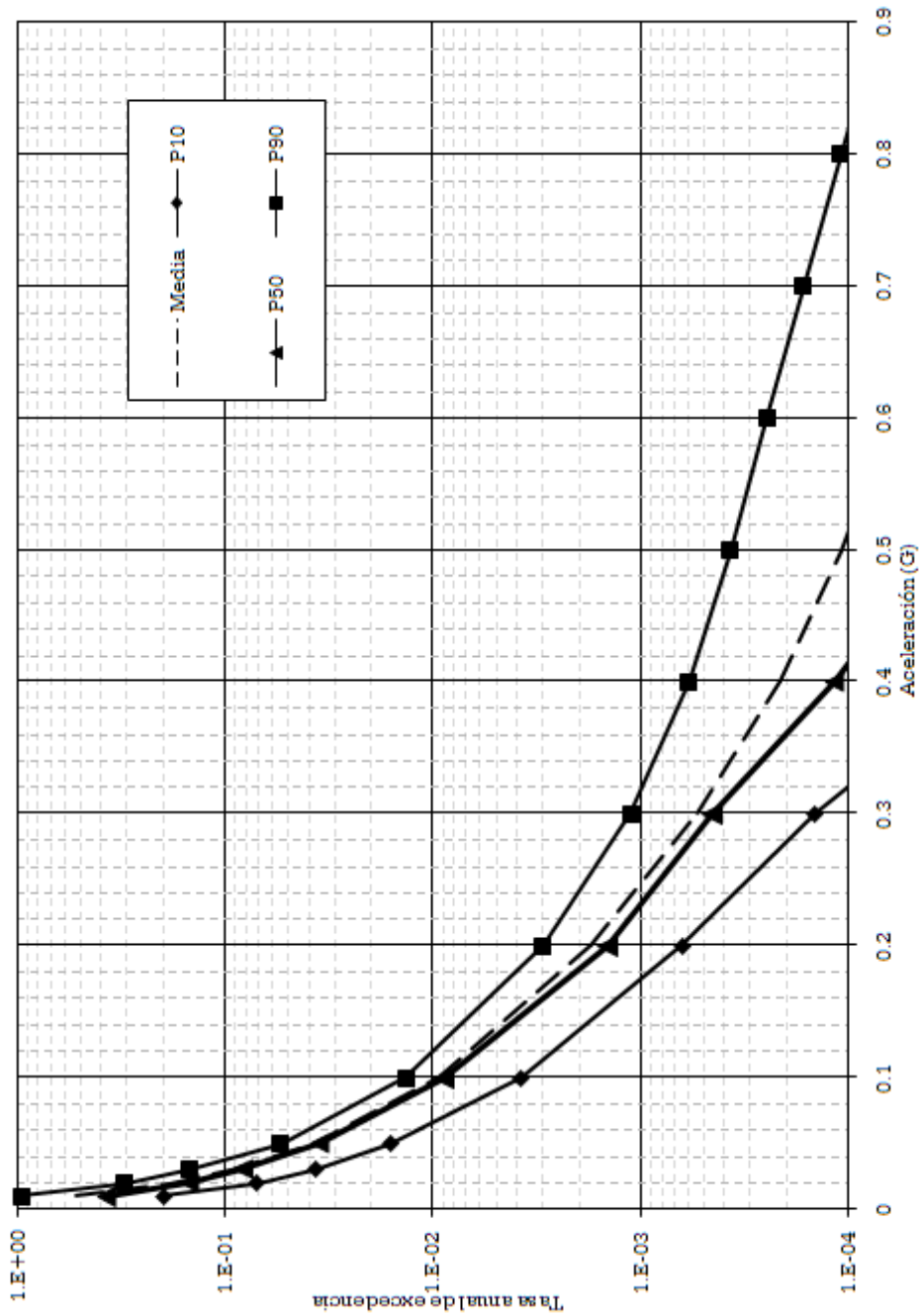
**Figura 6.7** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Barbosa



**Figura 6.8** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Bello



**Figura 6.9** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Caldas



**Figura 6.10** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Copacabana

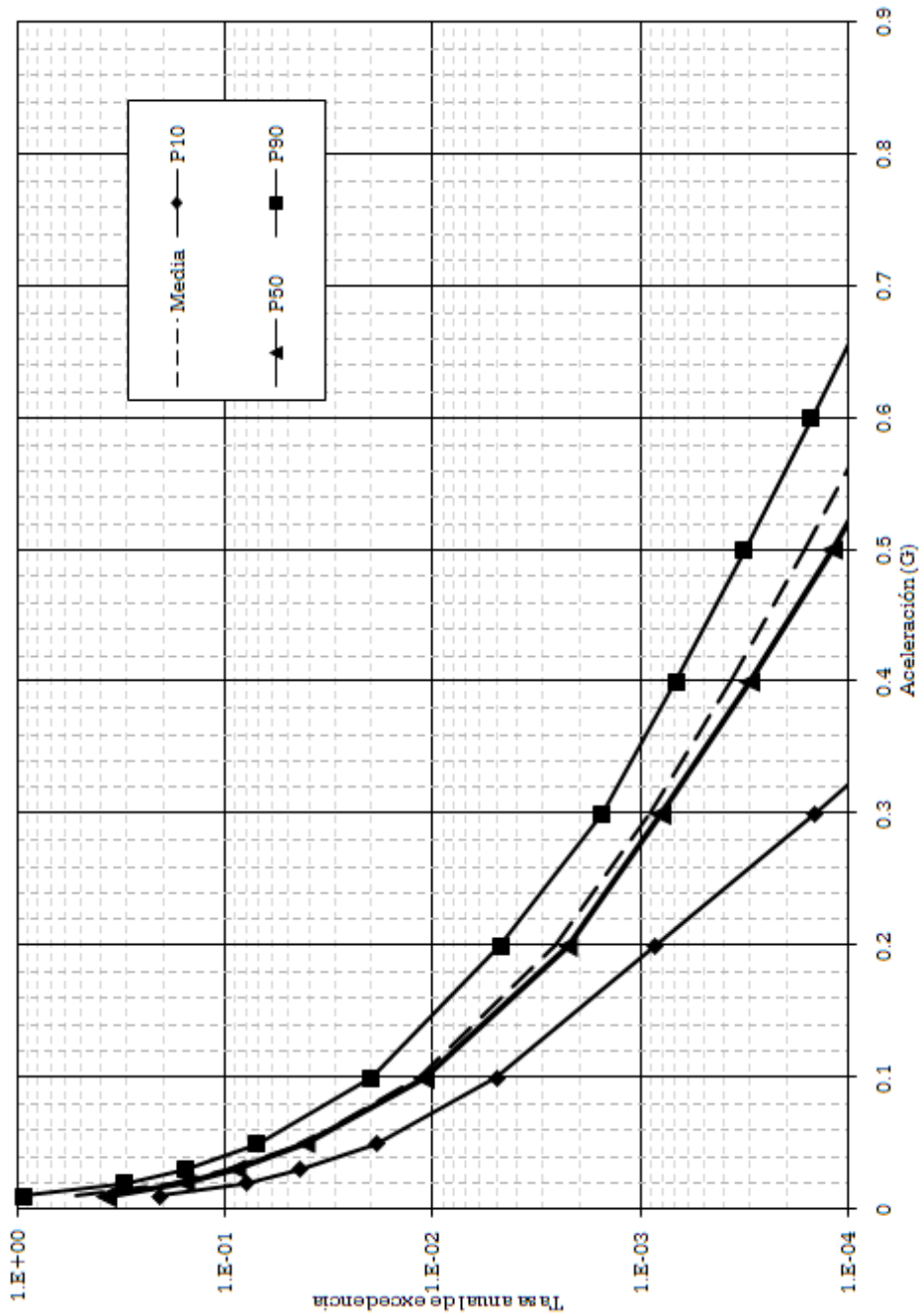


Figura 6.11 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Envigado

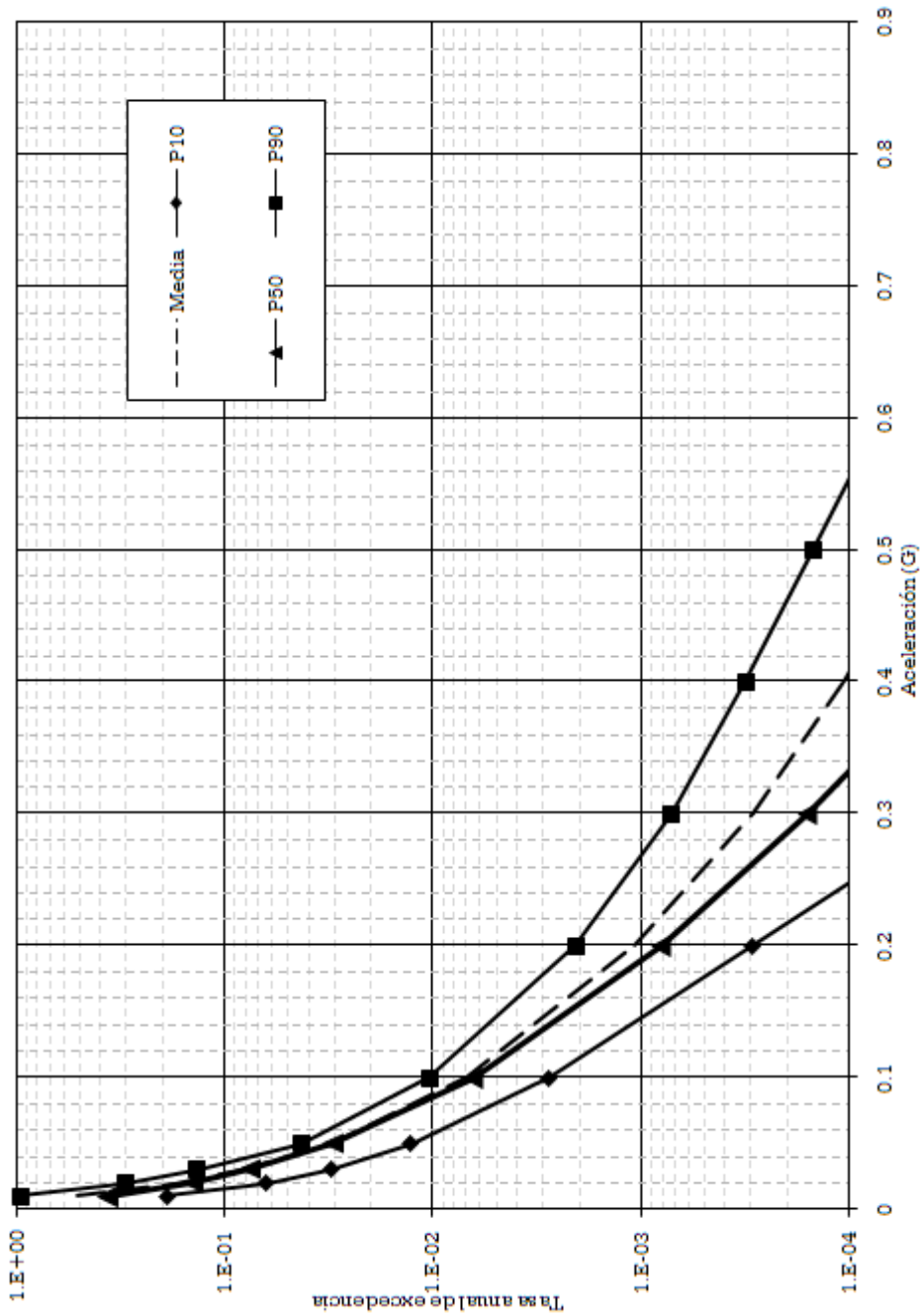
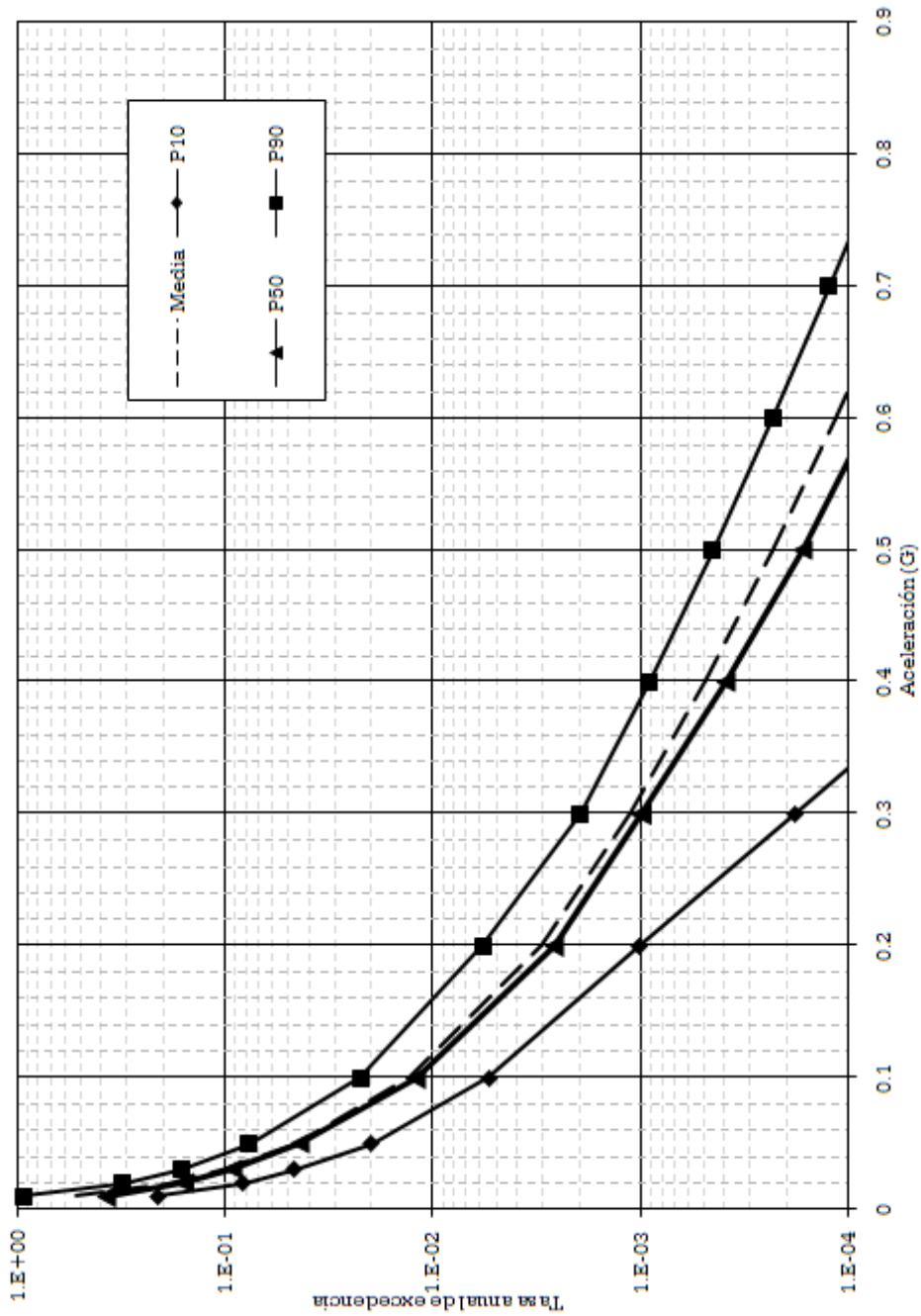


Figura 6.12 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Girardota





**Figura 6.13** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Itagüí

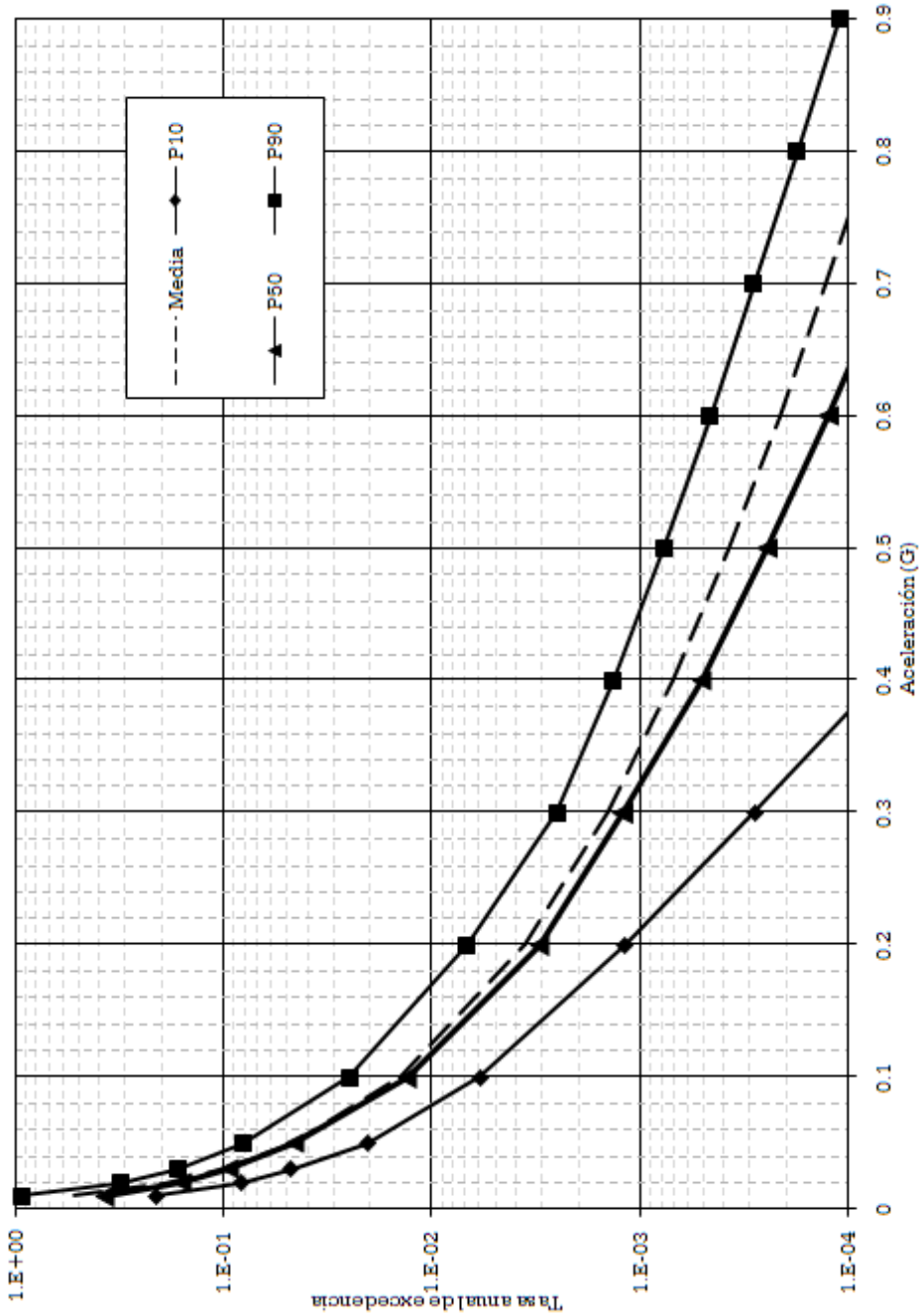
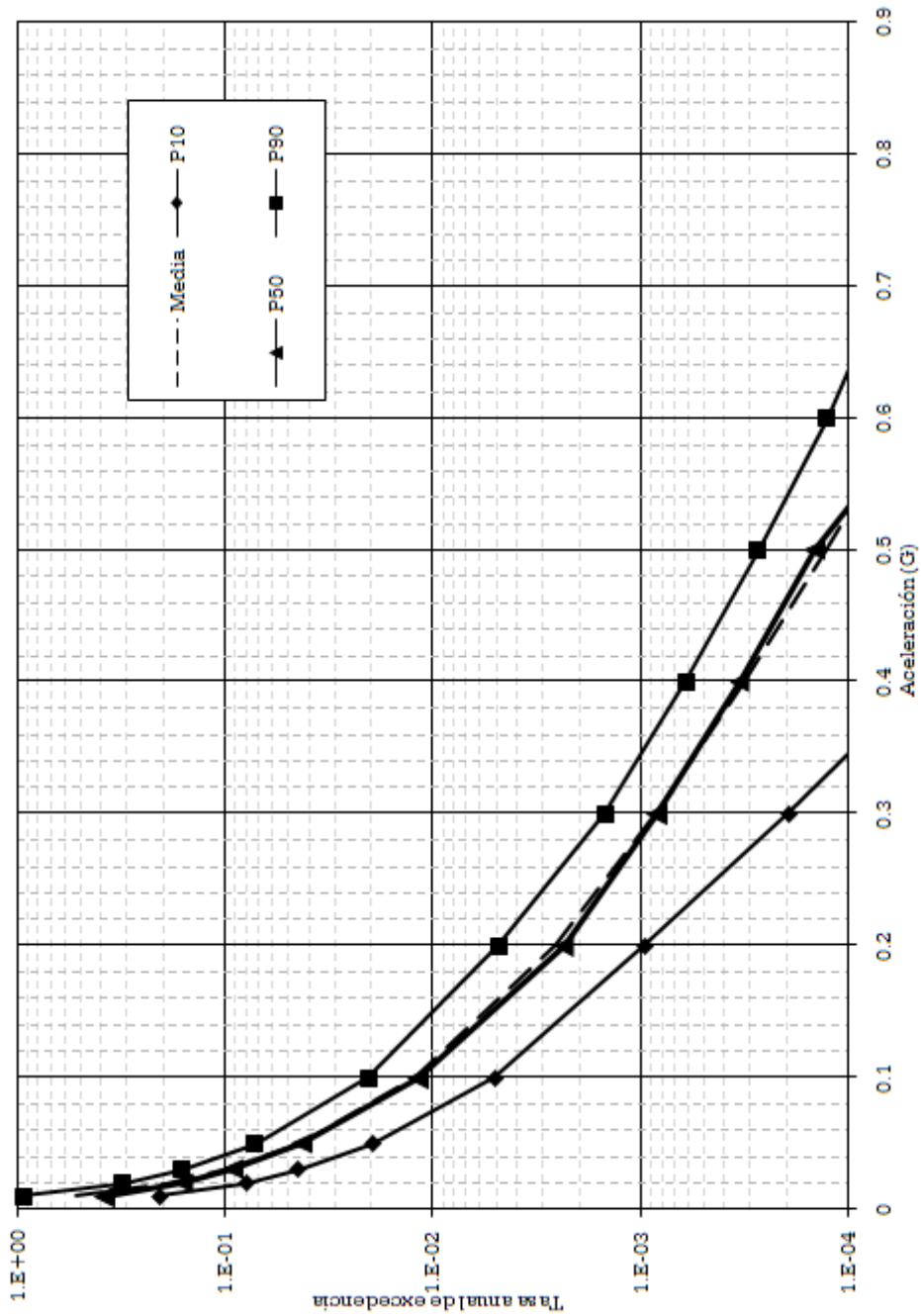
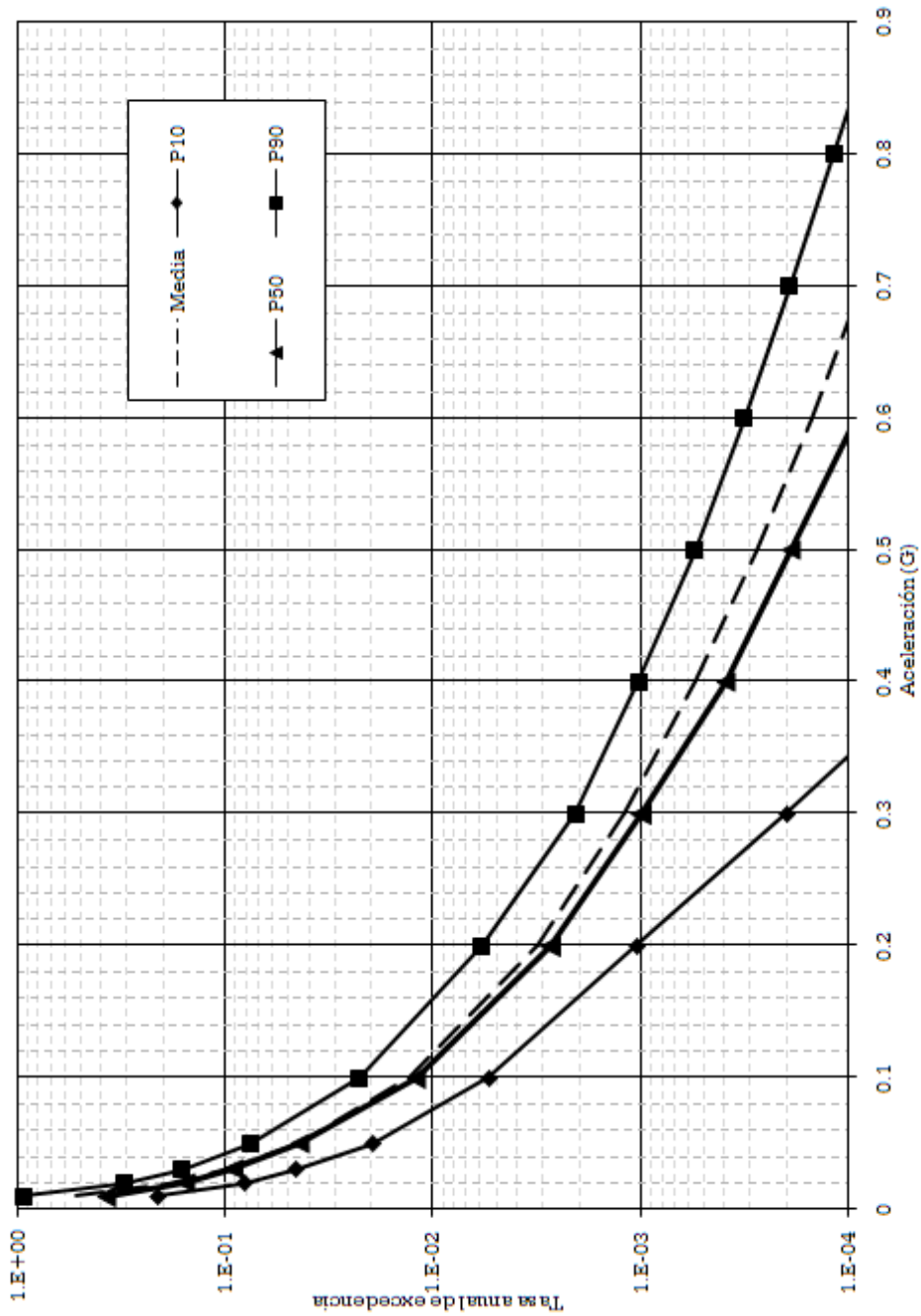


Figura 6.14 Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de La Estrella



**Figura 6.15** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Medellín



**Figura 6.16** Curva de Amenaza Total para PGA para los percentiles P10, P50, P90 y para la Media, para el municipio de Sabaneta

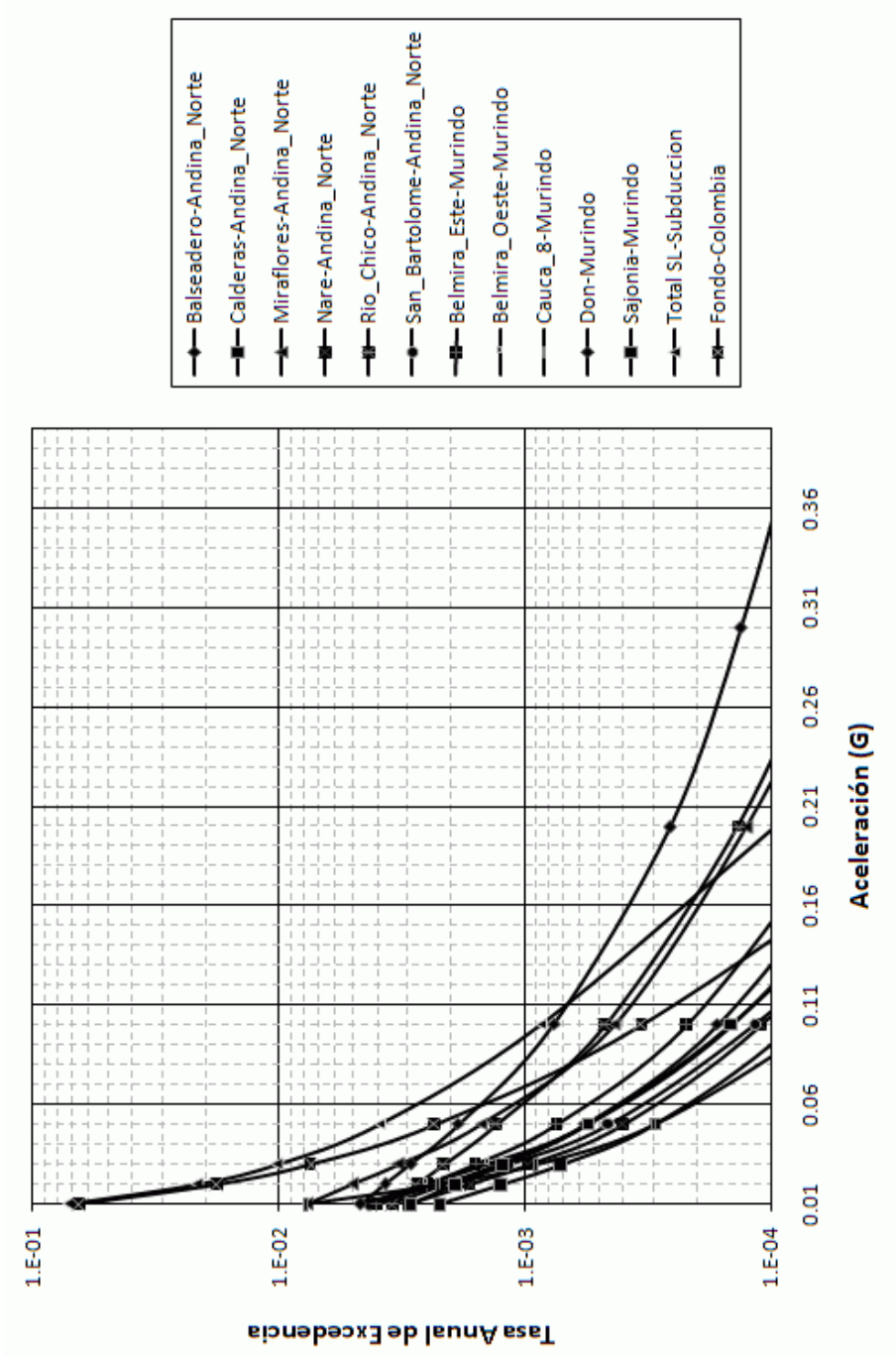
En las gráficas mostradas anteriormente se aprecia una variación en los niveles de amenaza a lo largo del Valle, con los valores más altos hacia los municipios de Caldas y La Estrella, y los valores más bajos hacia el municipio de Barbosa. Este resultado se explica por las diferentes contribuciones a la amenaza en cada municipio por cada una de las diferentes sismofuentes consideradas, tal como se puede apreciar en las figuras 6.17 a 6.26.

Este efecto de la variación de la contribución también se puede ver en los llamados gráficos de disgregación de la amenaza, en donde se muestra la relación de los diferentes pares Magnitud – Distancia y las densidades de probabilidad asociadas. Este tipo de gráfico es muy útil para identificar cuáles son las magnitudes y las distancias que más contribuyen a la amenaza en un sitio específico, para un período espectral específico y para un período de retorno determinado. Mediante este tipo de análisis se pueden identificar los escenarios sísmicos más probables, por ejemplo para la selección de acelerogramas reales para un análisis no lineal de una estructura específica.

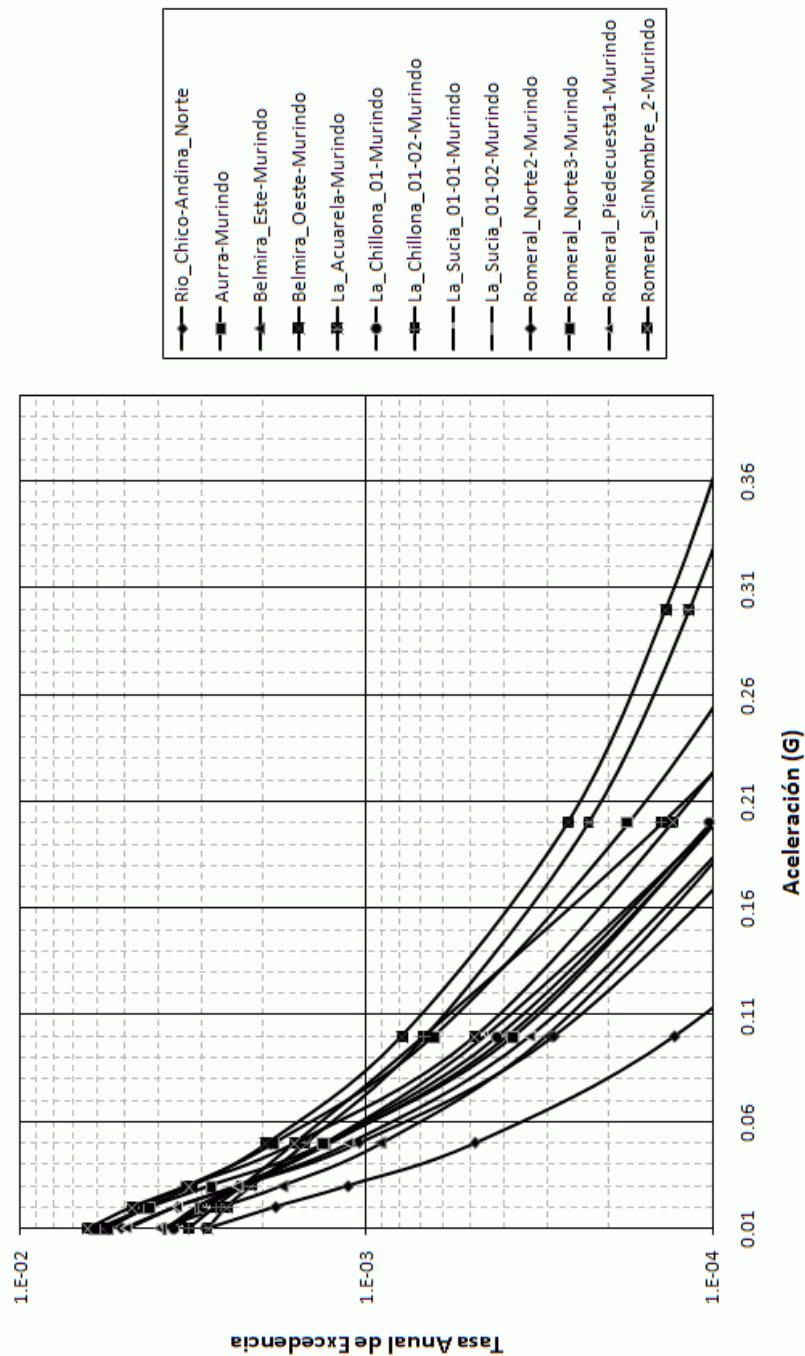
La Figura 6.27 muestra la disgregación para PGA en cada municipio y para un período de retorno de 9,3 años, que corresponde al sismo de control de daños de acuerdo con la NSR-98, y la Figura 6.28 muestra la disgregación para un período de retorno de 475 años, correspondiente al sismo de diseño. Las Figuras 6.29 y 6.30 muestran los mismos resultados pero para aceleraciones espectrales correspondientes a 1 s de período.

En estas figuras se puede observar por ejemplo que para PGA y un período de retorno de 9,3 años la amenaza está dada por sismofuentes muy cercanas y con magnitudes del orden de Mw 5,0 y por sismofuentes a más de 80 km con magnitudes moderadas del orden de Mw 6,5. Para el caso del período de retorno de 475 años y para PGA se muestra que para todos los municipios del Valle de Aburrá la mayor contribución a la amenaza proviene de sismofuentes entre 15 y 20 km de distancia con magnitudes alrededor de Mw 6,5.

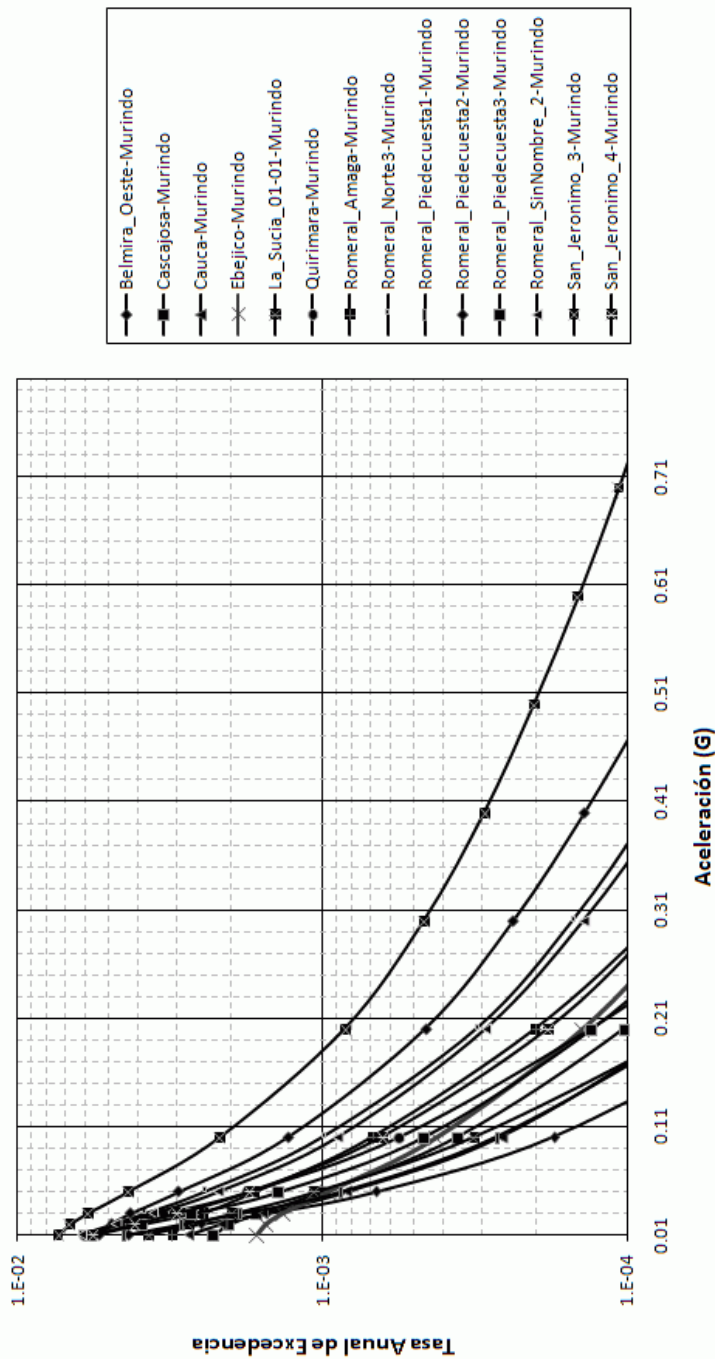
Para el caso de las aceleraciones espectrales a 1 s de período se observa que para un período de retorno de 9,3 años la contribución a la amenaza proviene en un gran porcentaje de sismofuentes distantes a más de 80 km y con magnitudes alrededor de Mw 6,5, mientras que para un período de retorno de 475 años la contribución a la amenaza se da tanto de sismofuentes cercanas entre 15 y 20 km y con magnitudes Mw alrededor de 6,0, como por sismofuentes distantes a más de 80 km con magnitudes Mw superiores a 7,0.



**Figura 6.17** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Barbosa

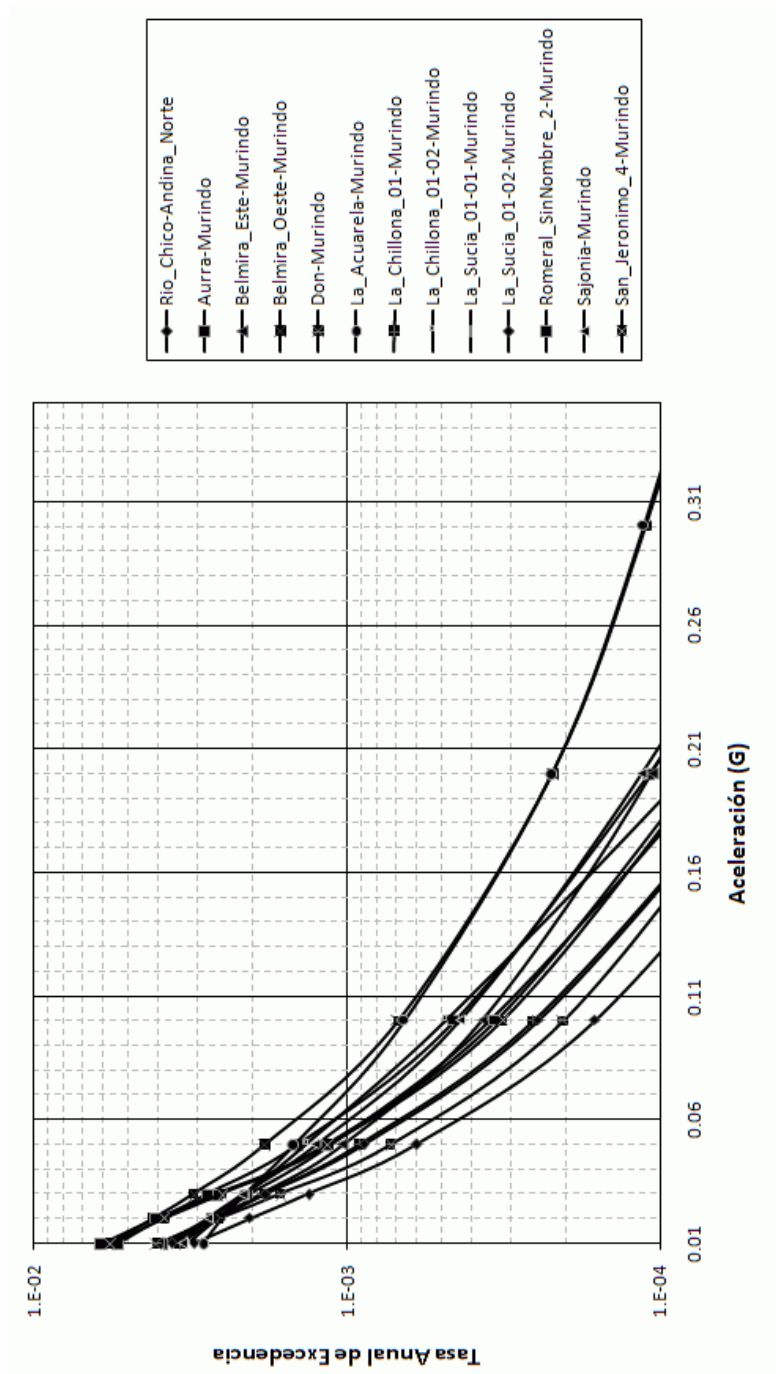


**Figura 6.18** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Bello

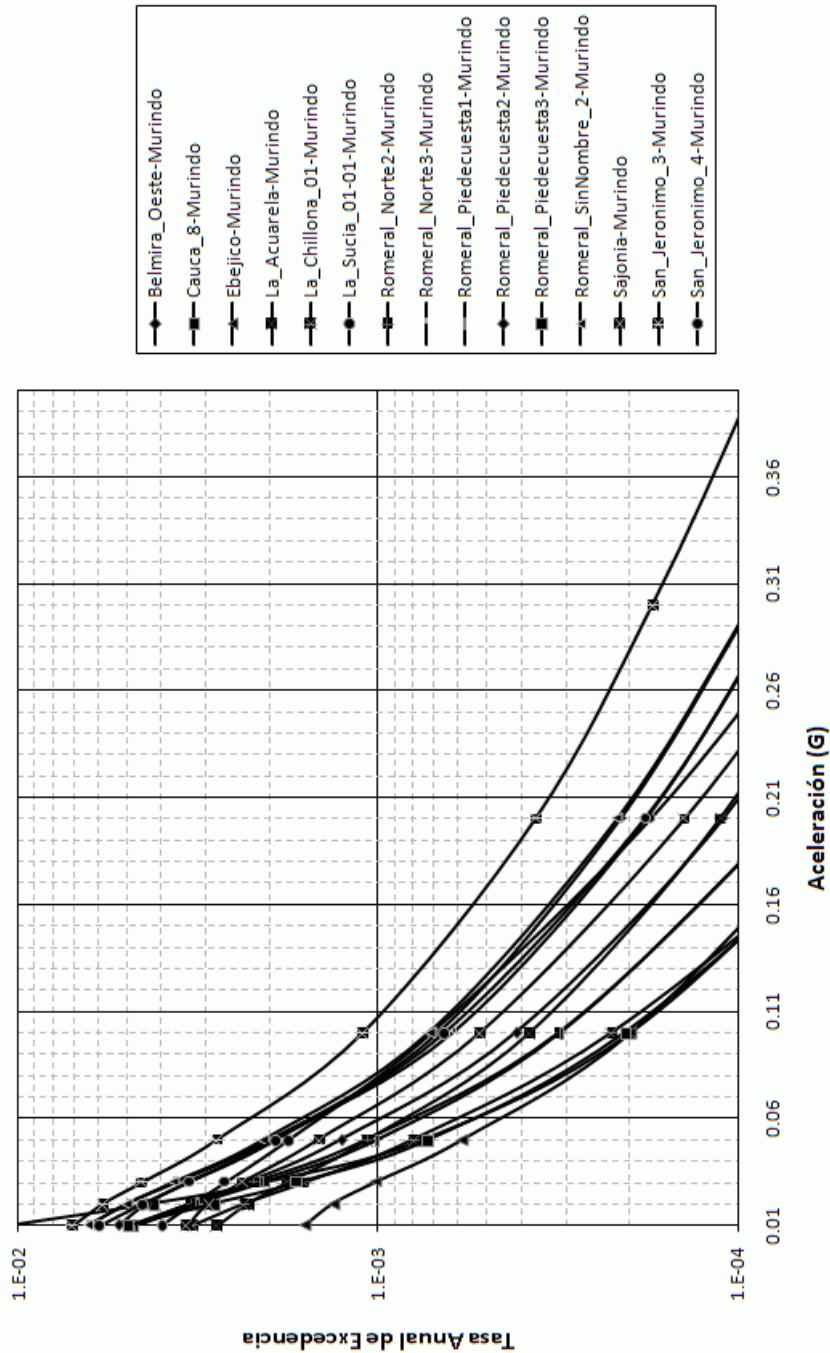


**Figura 6.19** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Caldas





**Figura 6.20** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Copacabana



**Figura 6.21** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Envigado

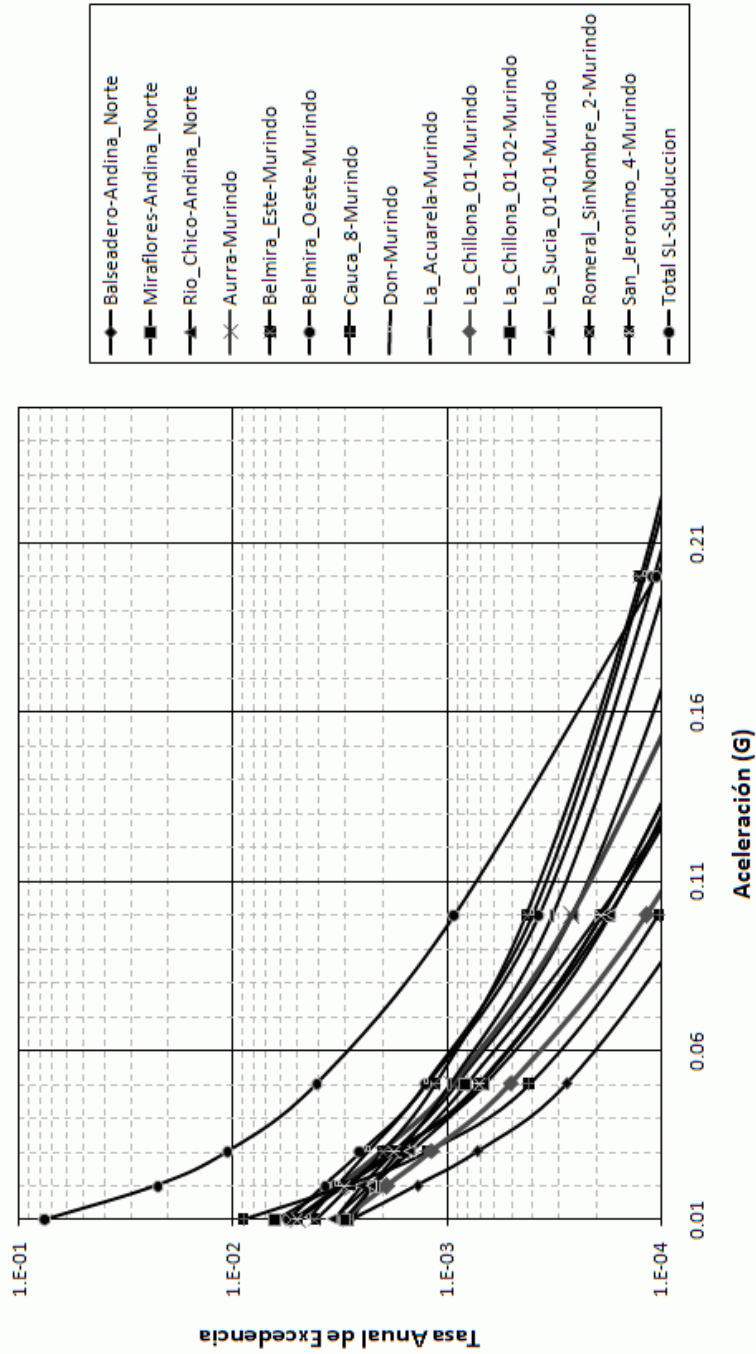
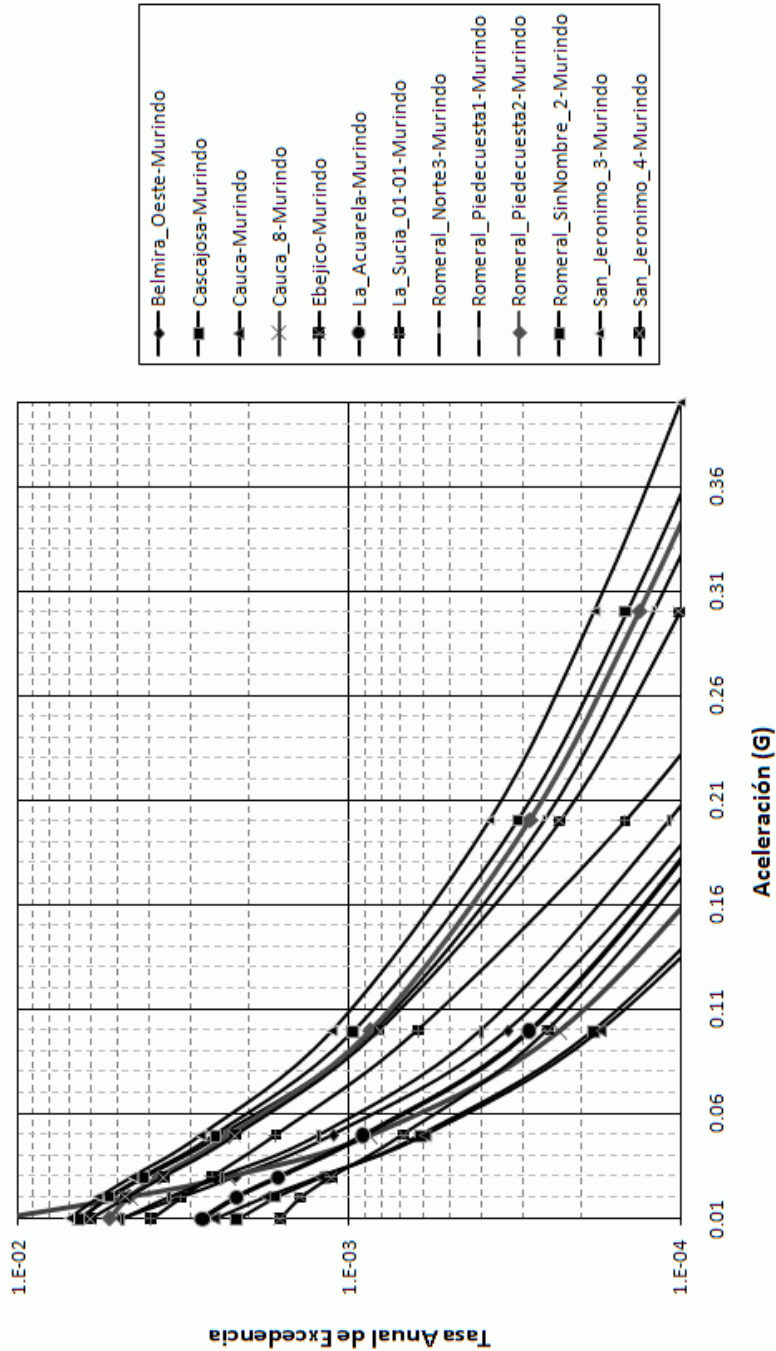


Figura 6.22 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Girardota



**Figura 6.23** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Itagüí

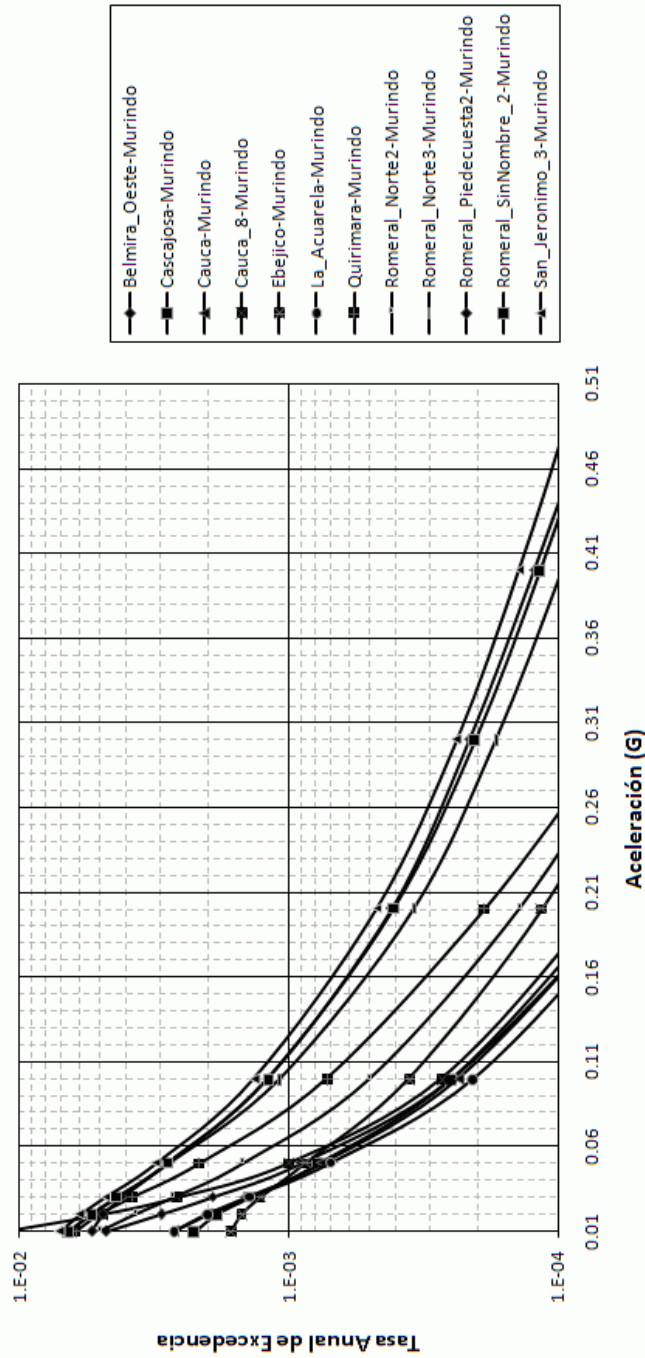
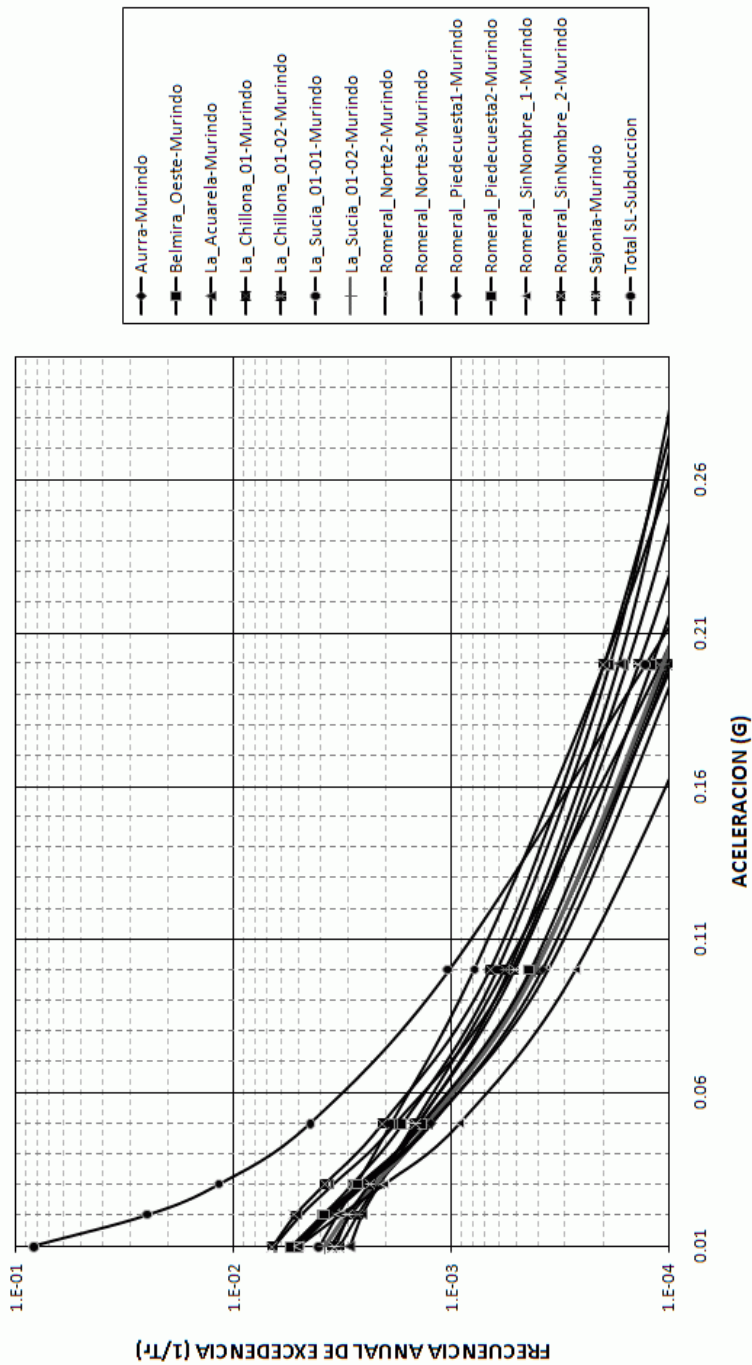
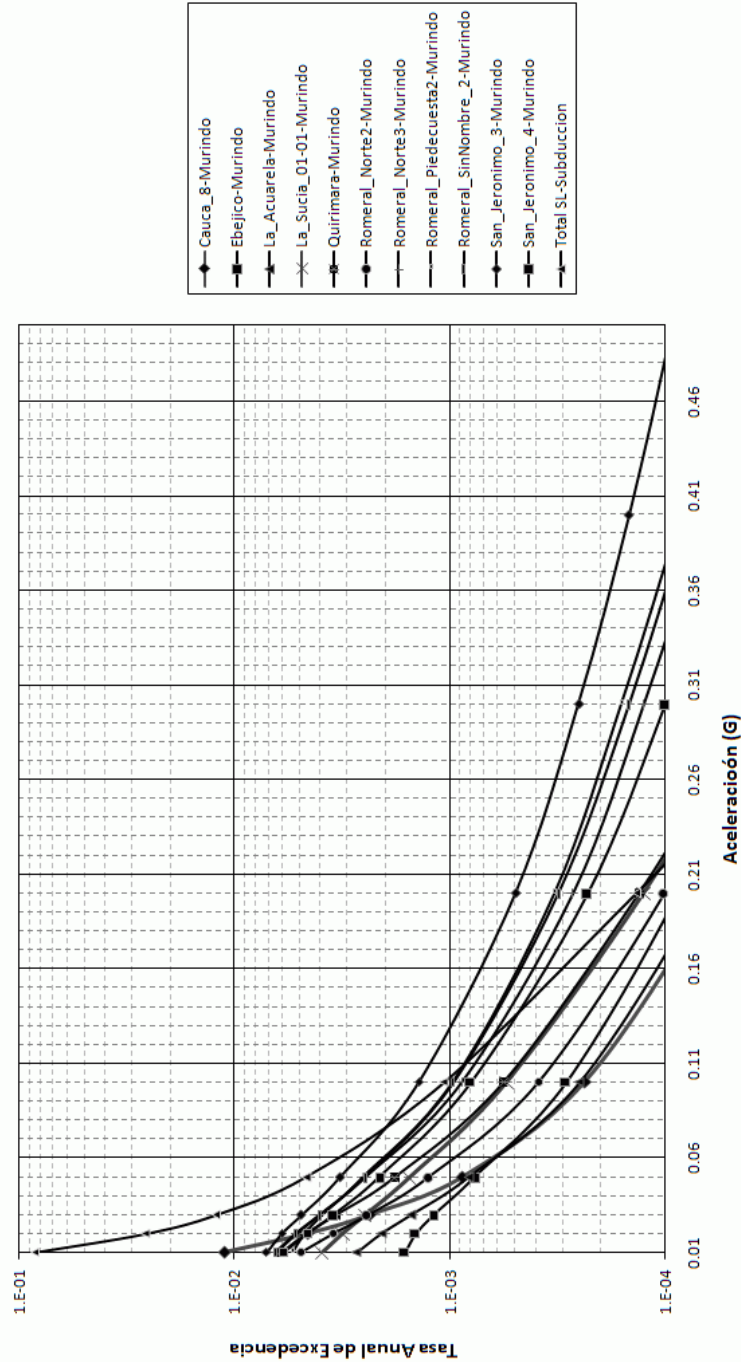


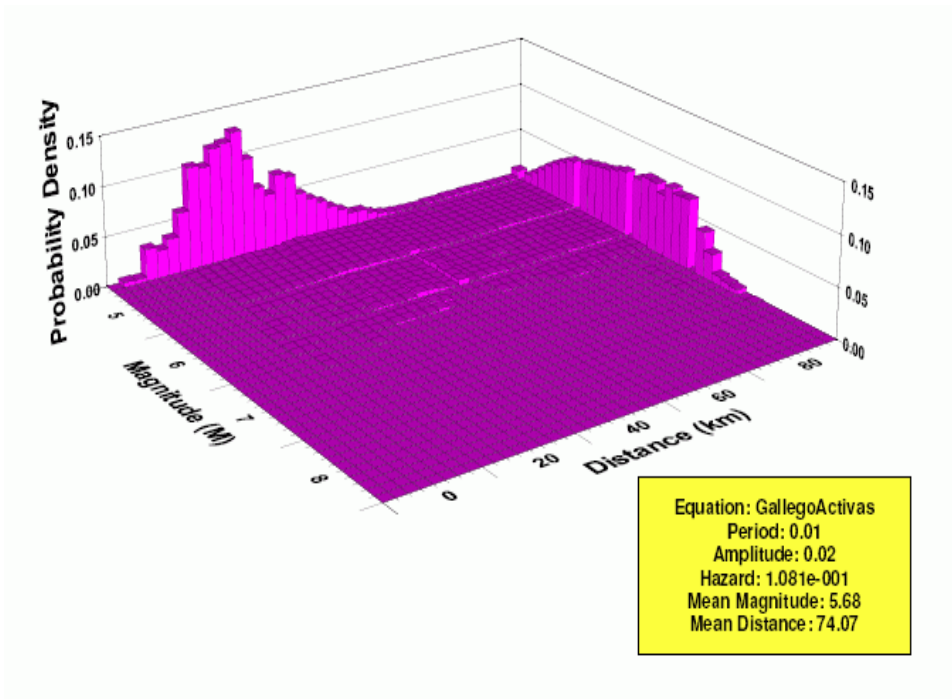
Figura 6.24 Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de La Estrella



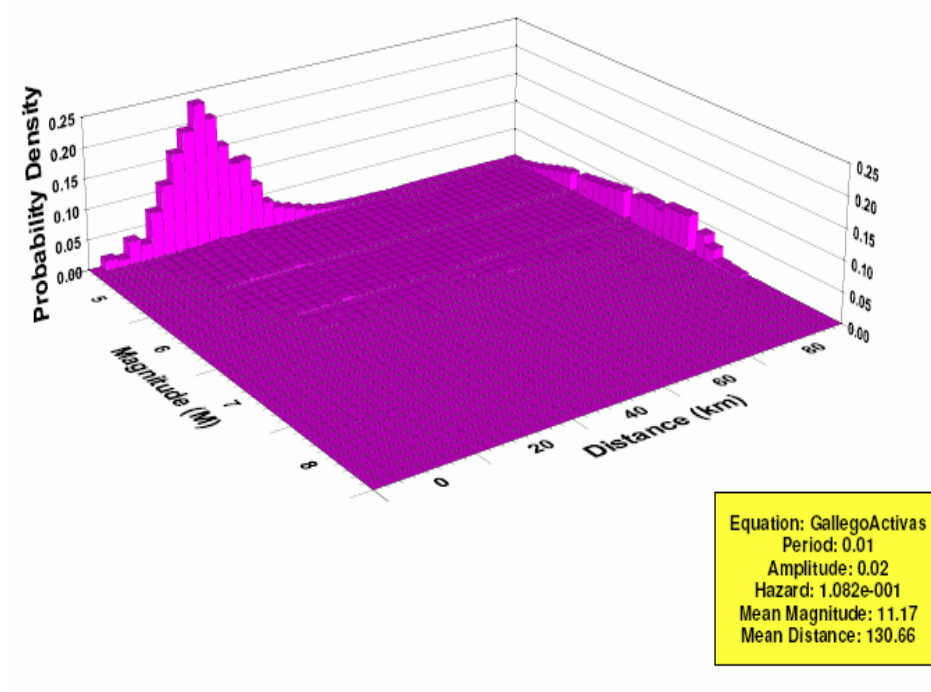
**Figura 6.25** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Medellín



**Figura 6.26** Contribución de las sismofuentes a la amenaza para PGA en el municipio de Sabaneta

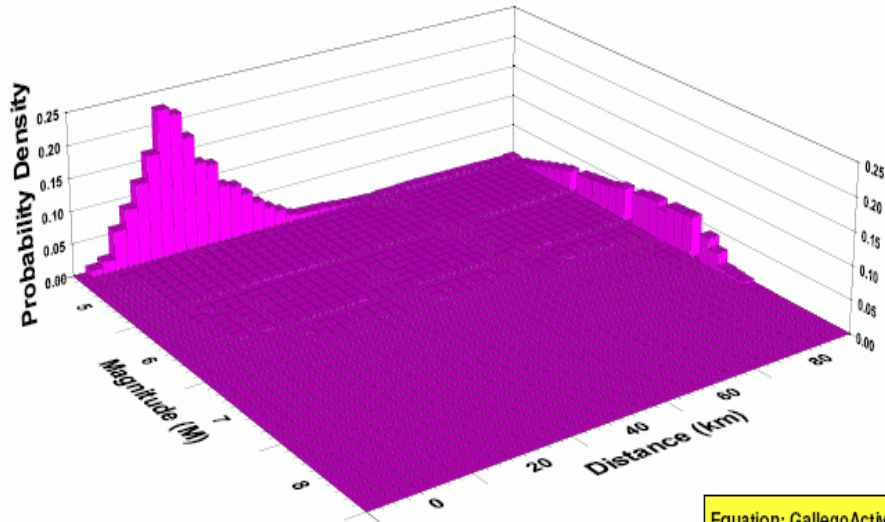


**Barbosa**



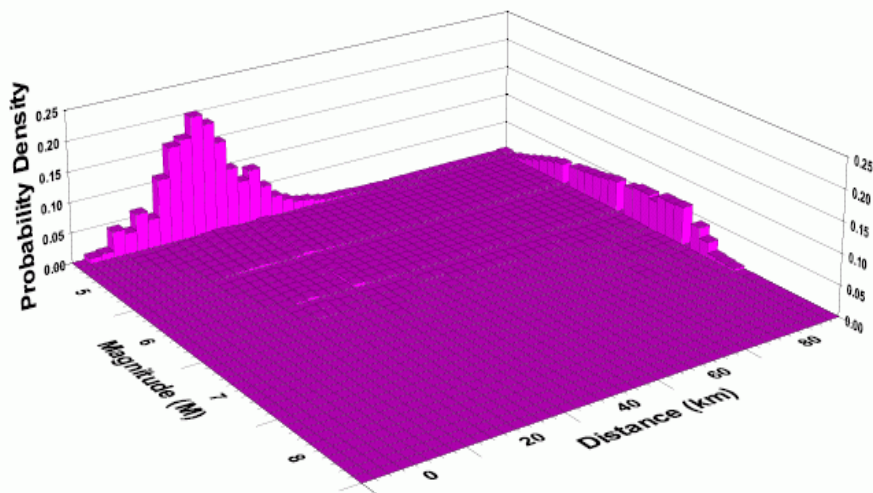
**Bello**





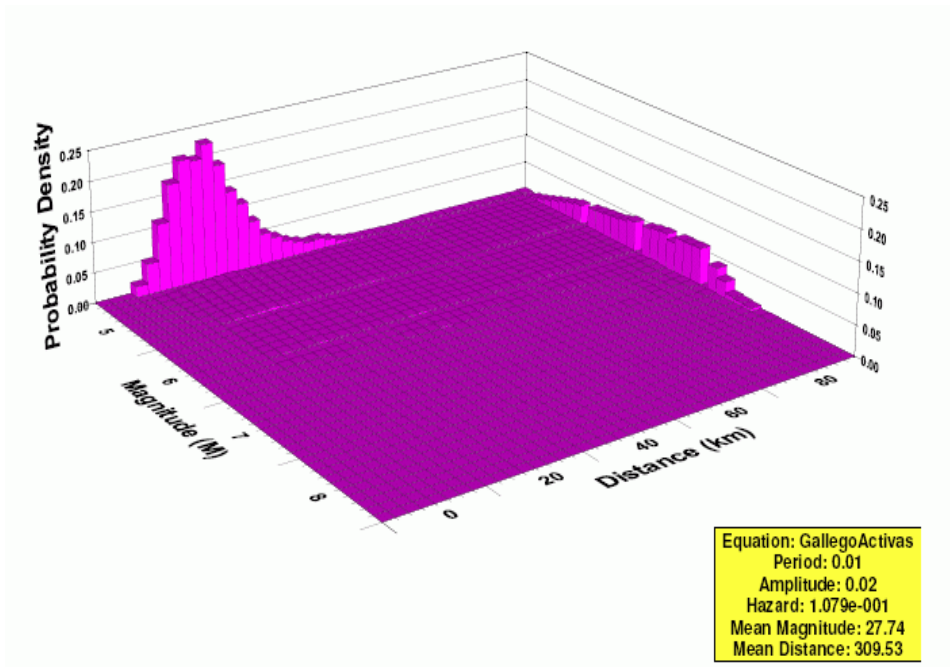
Equation: GallegoActivas  
Period: 0.01  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.080e-001  
Mean Magnitude: 16.68  
Mean Distance: 189.57

Caldas

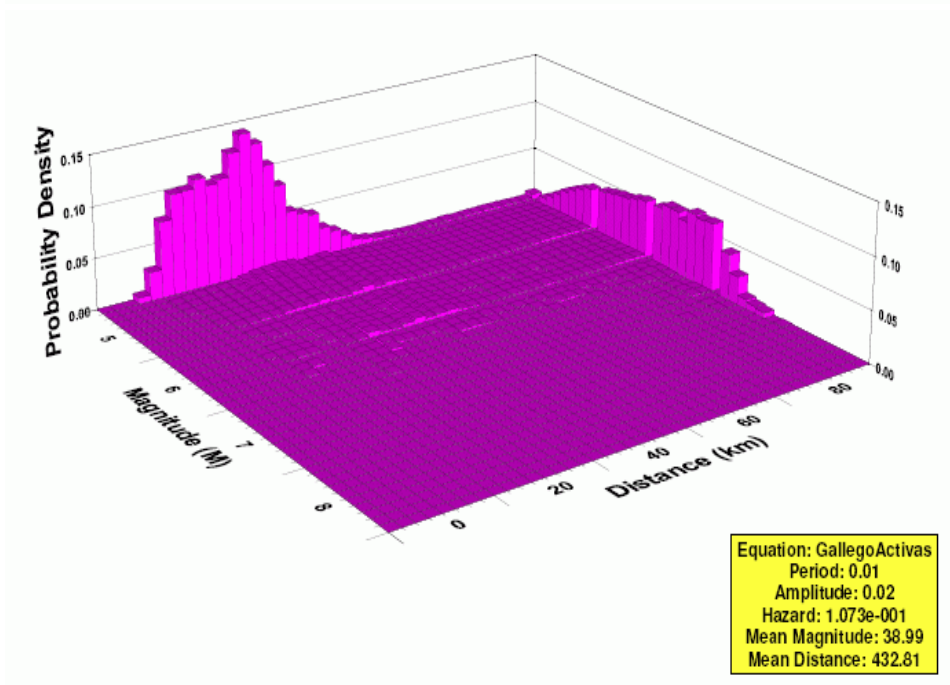


Equation: GallegoActivas  
Period: 0.01  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.080e-001  
Mean Magnitude: 22.23  
Mean Distance: 250.91

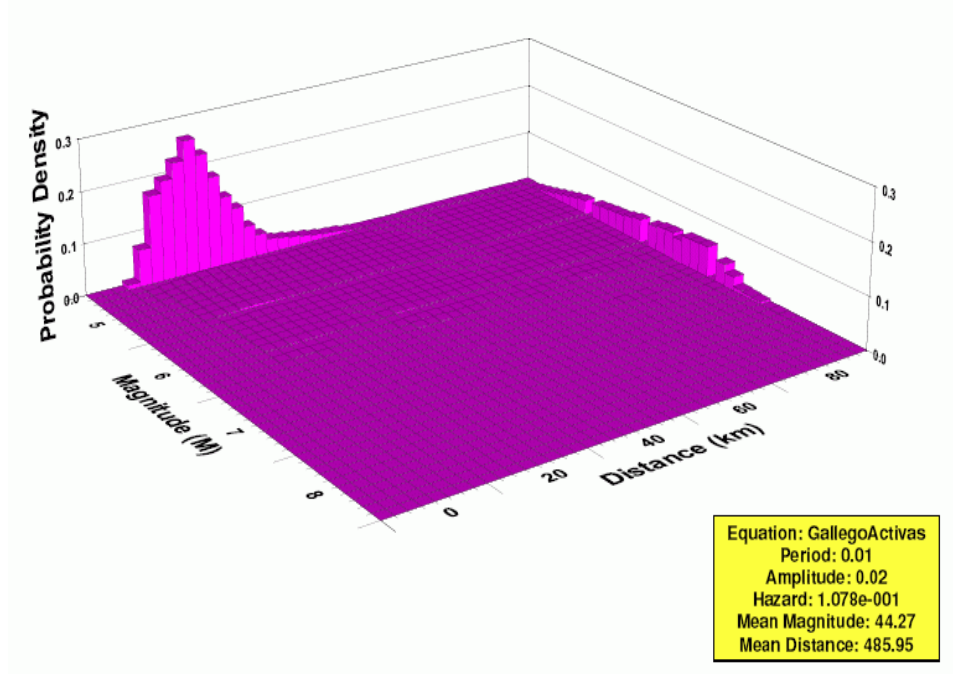
Copacabana



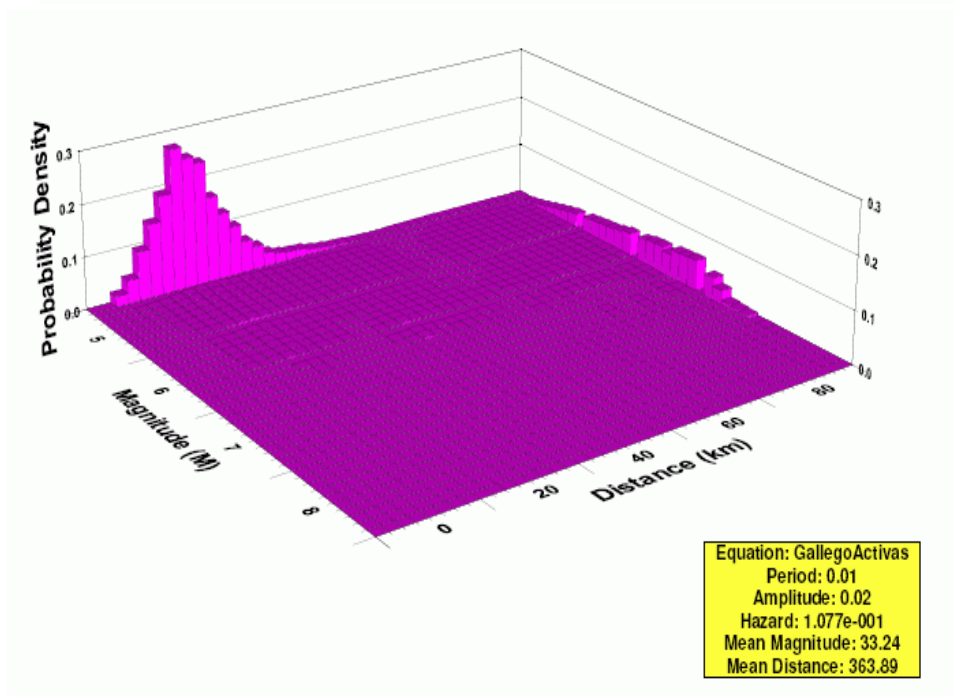
Envigado



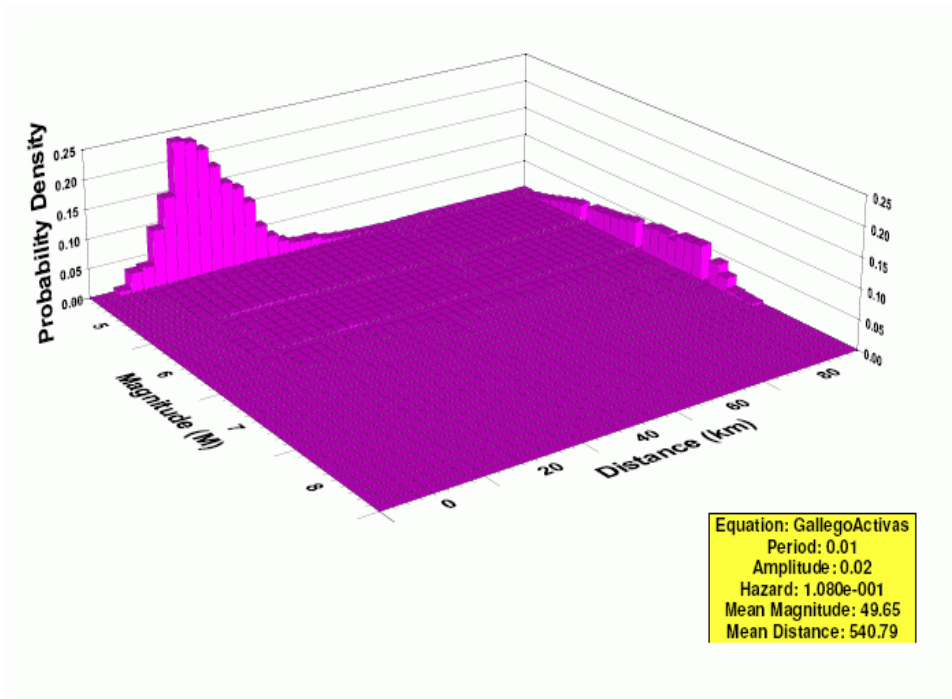
Girardota



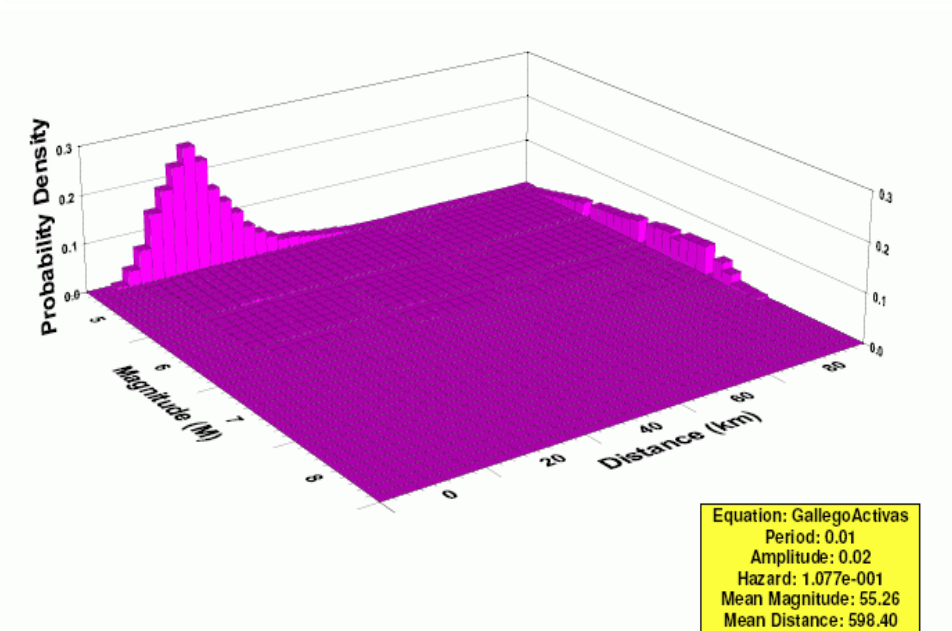
Itagüí



La Estrella

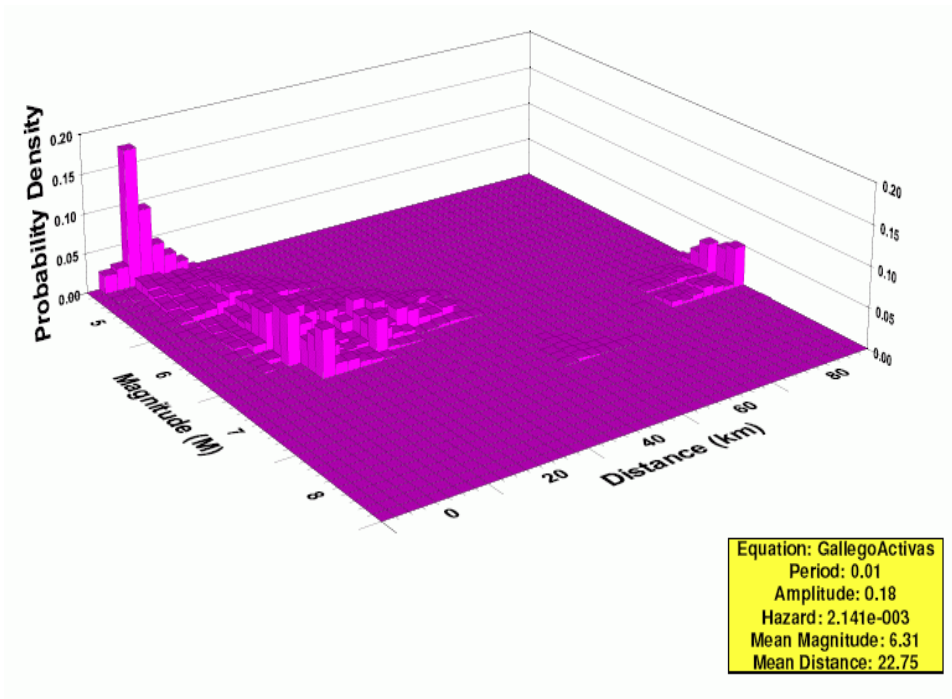


Medellín

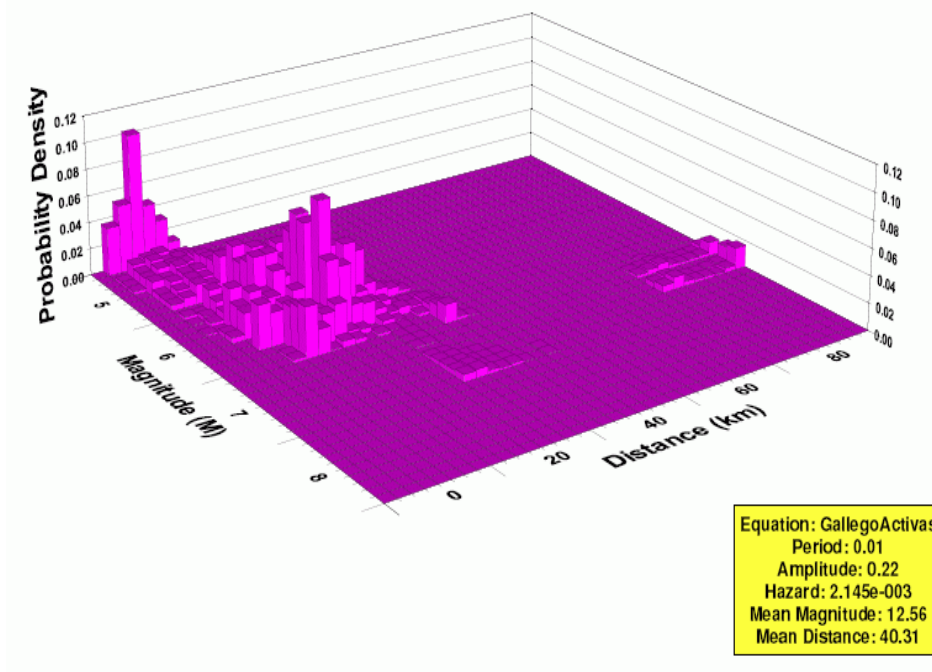


Sabaneta

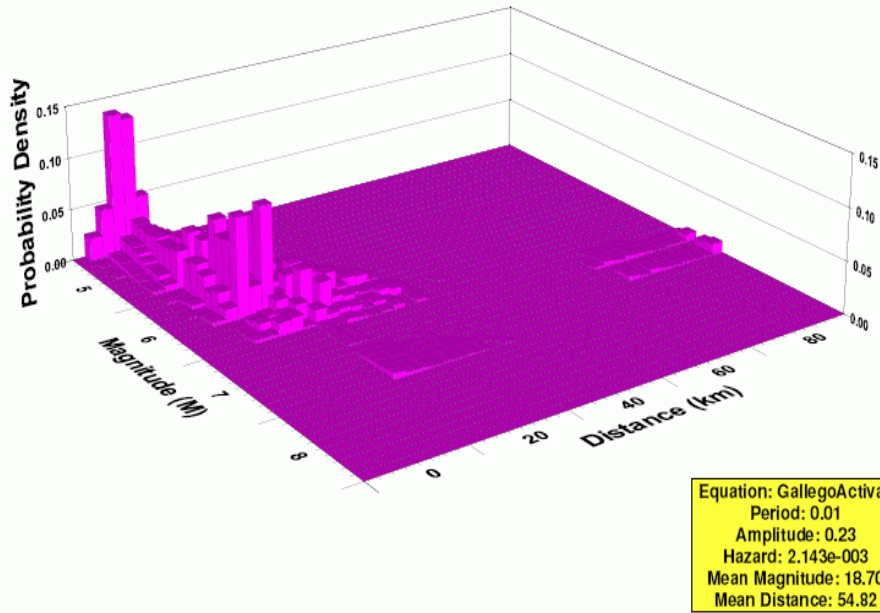
Figura 6.27 Disgregación de la amenaza sísmica para PGA y para un período de retorno de 9,3 años



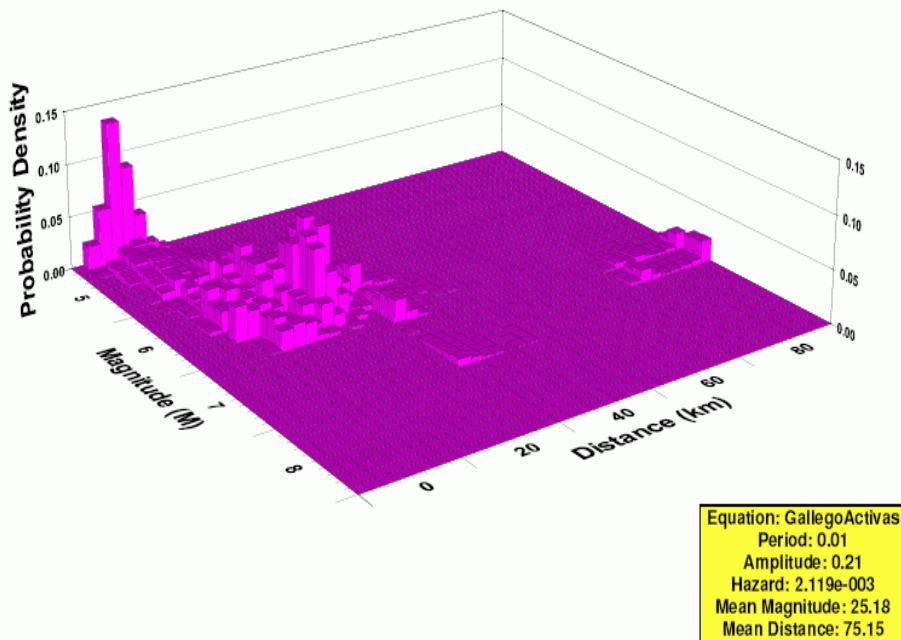
**Barbosa**



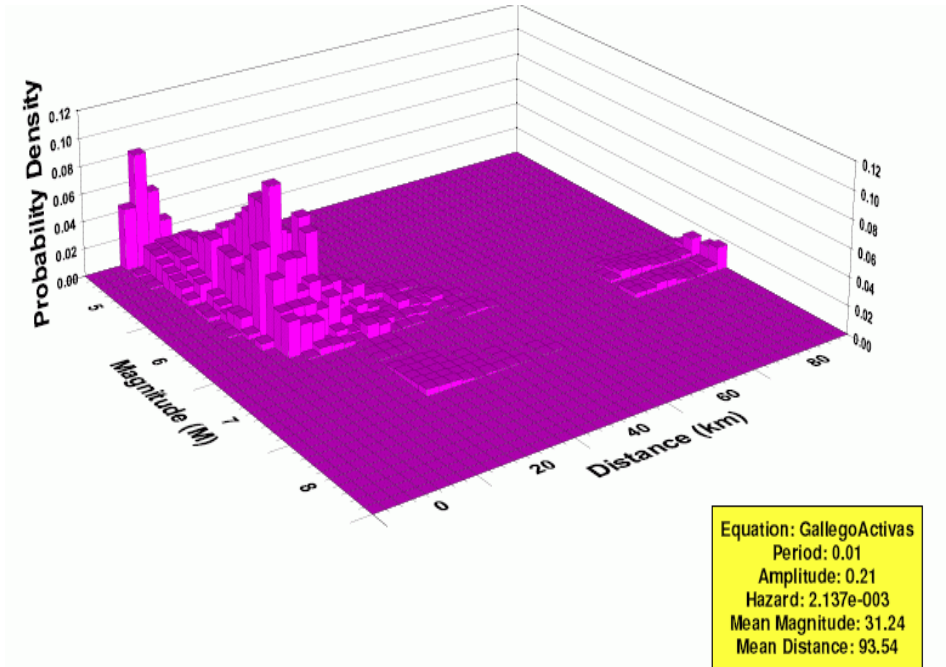
**Bello**



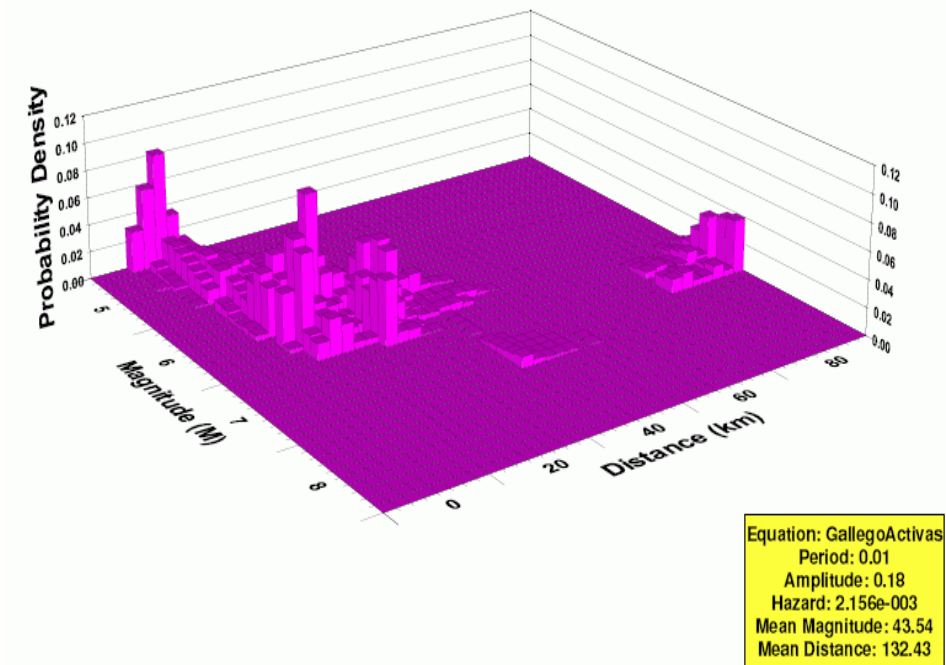
Caldas



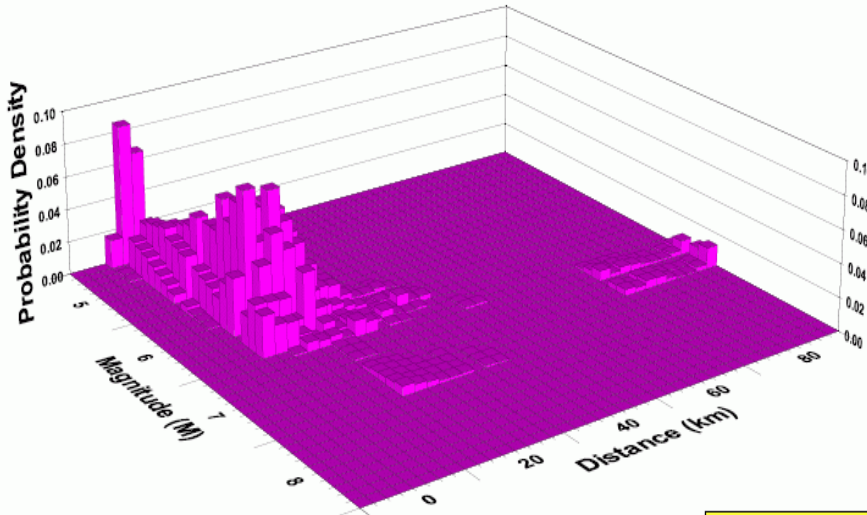
Copacabana



Envigado

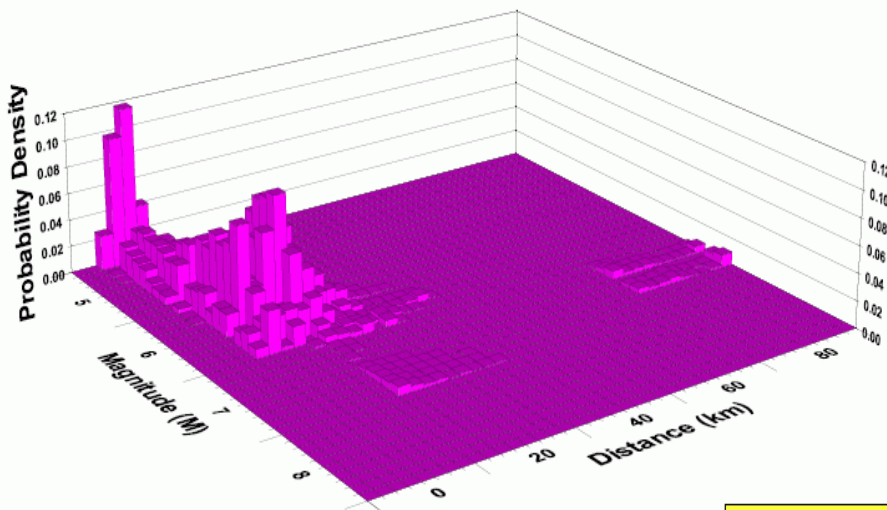


Girardota



Equation: GallegoActivas  
Period: 0.01  
Amplitude: 0.23  
Hazard: 2.152e-003  
Mean Magnitude: 49.88  
Mean Distance: 149.87

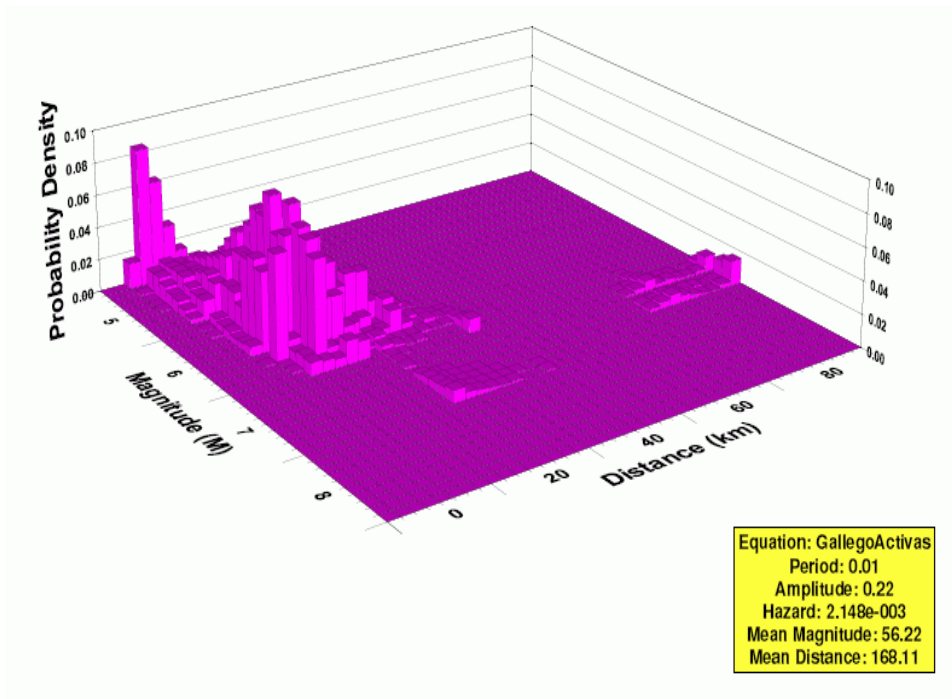
Itagüí



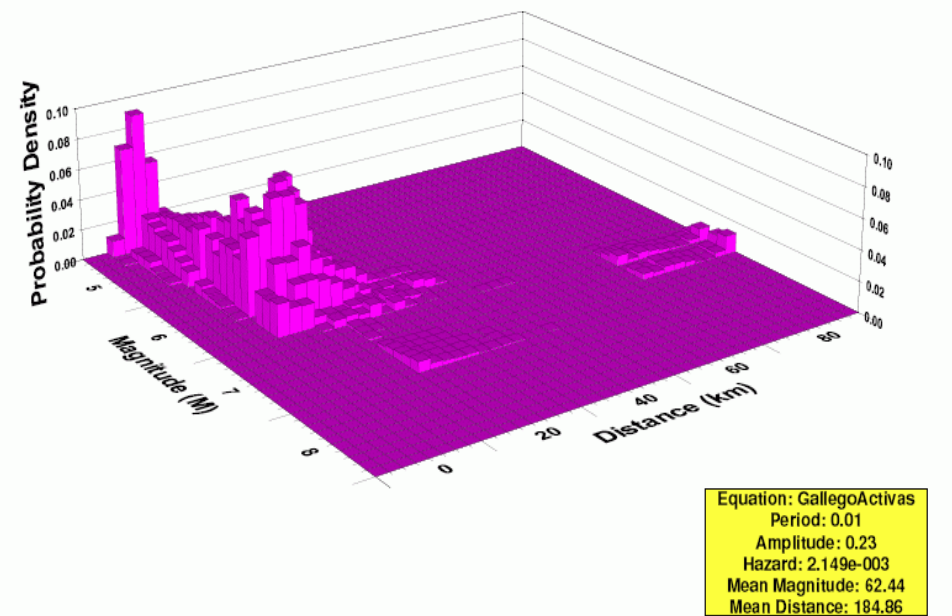
Equation: GallegoActivas  
Period: 0.01  
Amplitude: 0.24  
Hazard: 2.150e-003  
Mean Magnitude: 37.24  
Mean Distance: 107.74

La Estrella



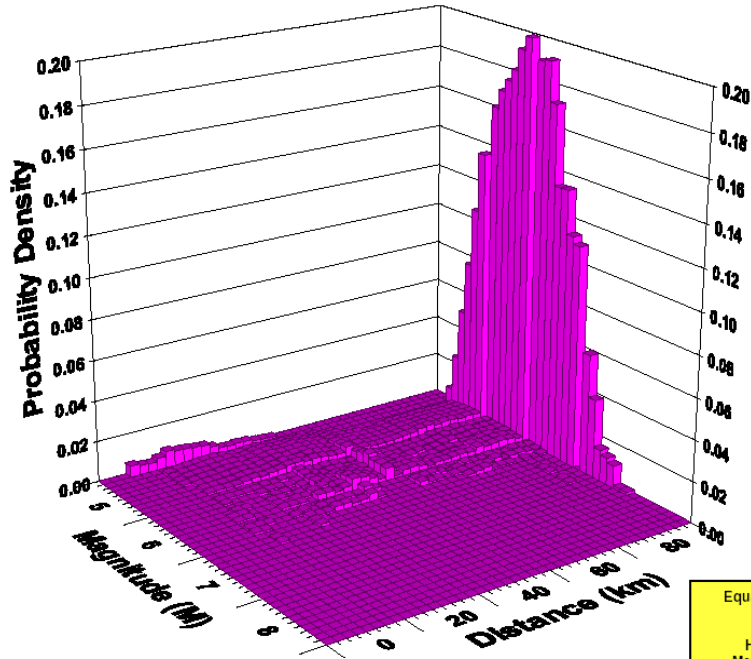


Medellín



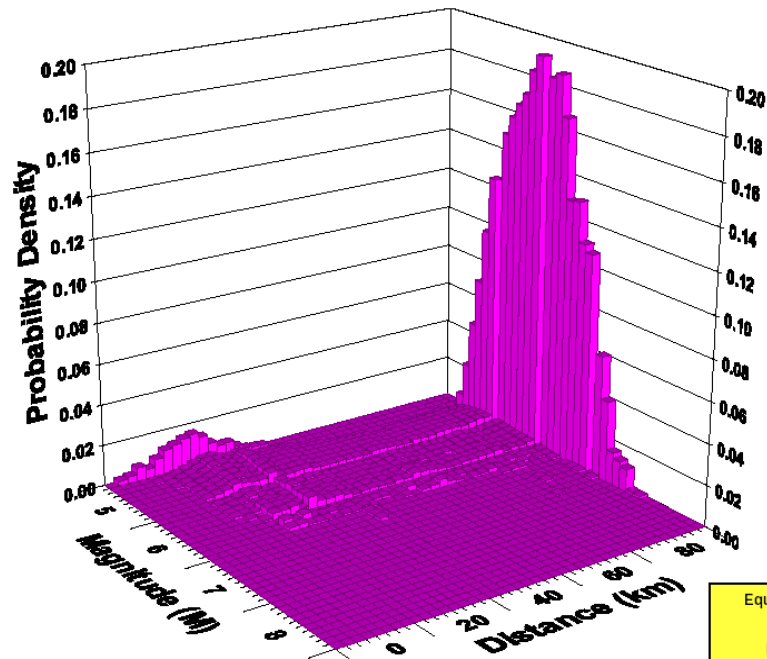
Sabaneta

Figura 6.28 Disgregación de la amenaza sísmica para PGA y para un período de retorno de 475 años



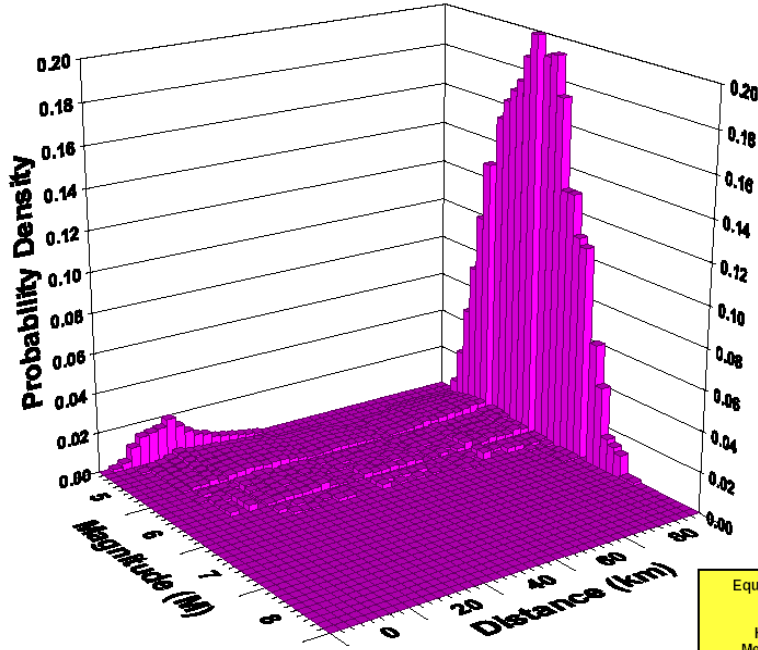
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.091e-001  
Mean Magnitude: 22.09  
Mean Distance: 360.07

**Barbosa**



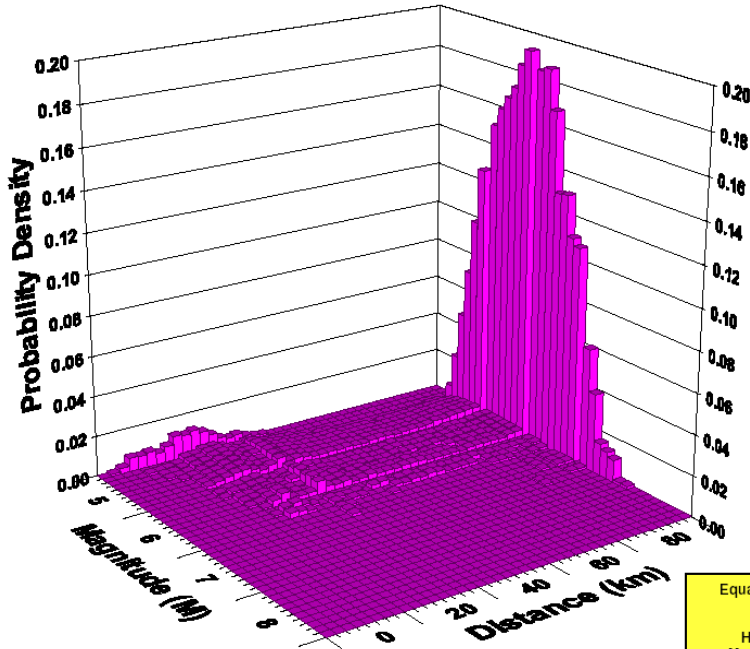
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.096e-001  
Mean Magnitude: 28.53  
Mean Distance: 504.61

**Bello**



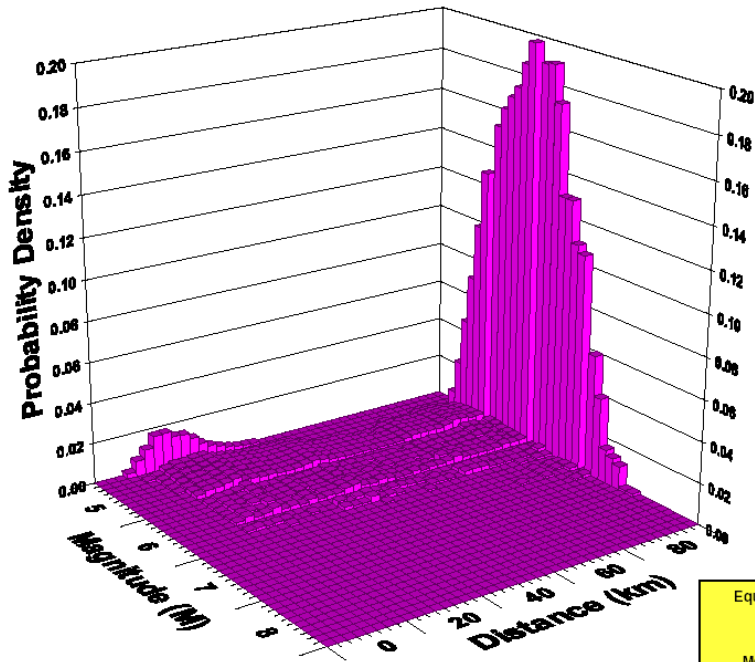
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.091e-001  
Mean Magnitude: 34.77  
Mean Distance: 648.31

Caldas

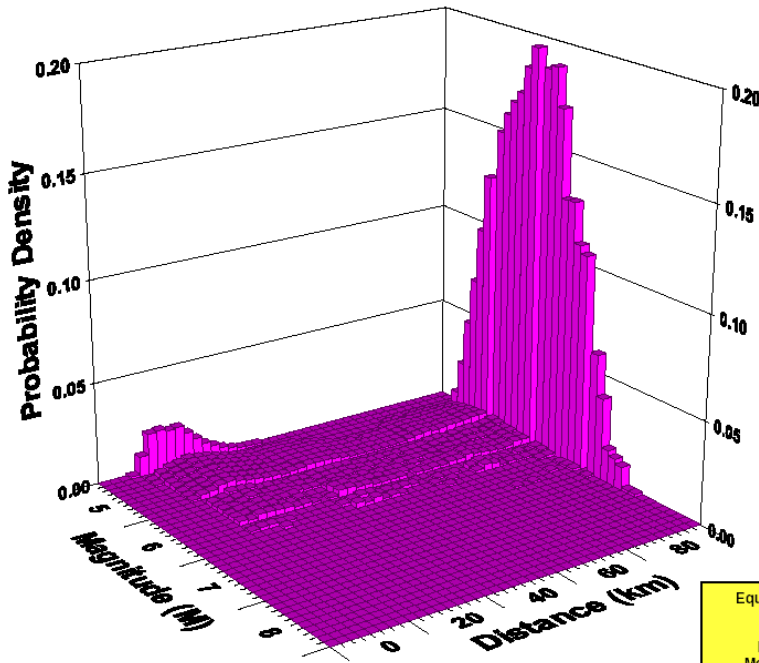


Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.088e-001  
Mean Magnitude: 41.20  
Mean Distance: 794.66

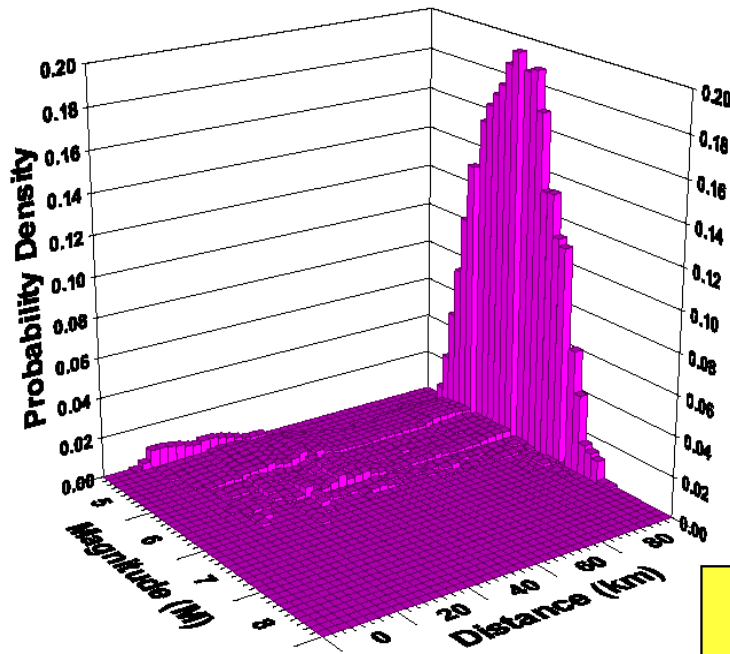
Copacabana



Envigado

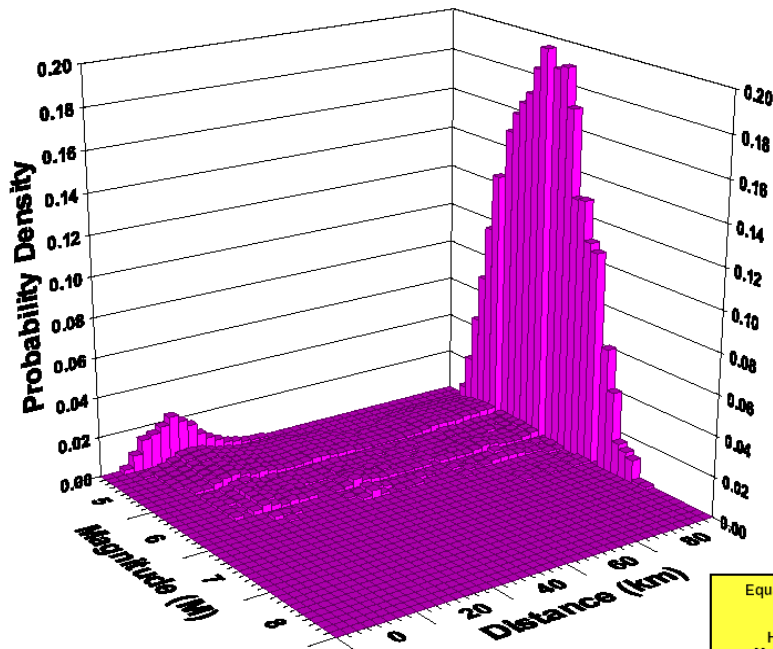


Itagüí



Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.085e-001  
Mean Magnitude: 60.37  
Mean Distance: 1232.28

Girardota



Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.02  
Hazard: 1.089e-001  
Mean Magnitude: 53.84  
Mean Distance: 1081.38

La Estrella

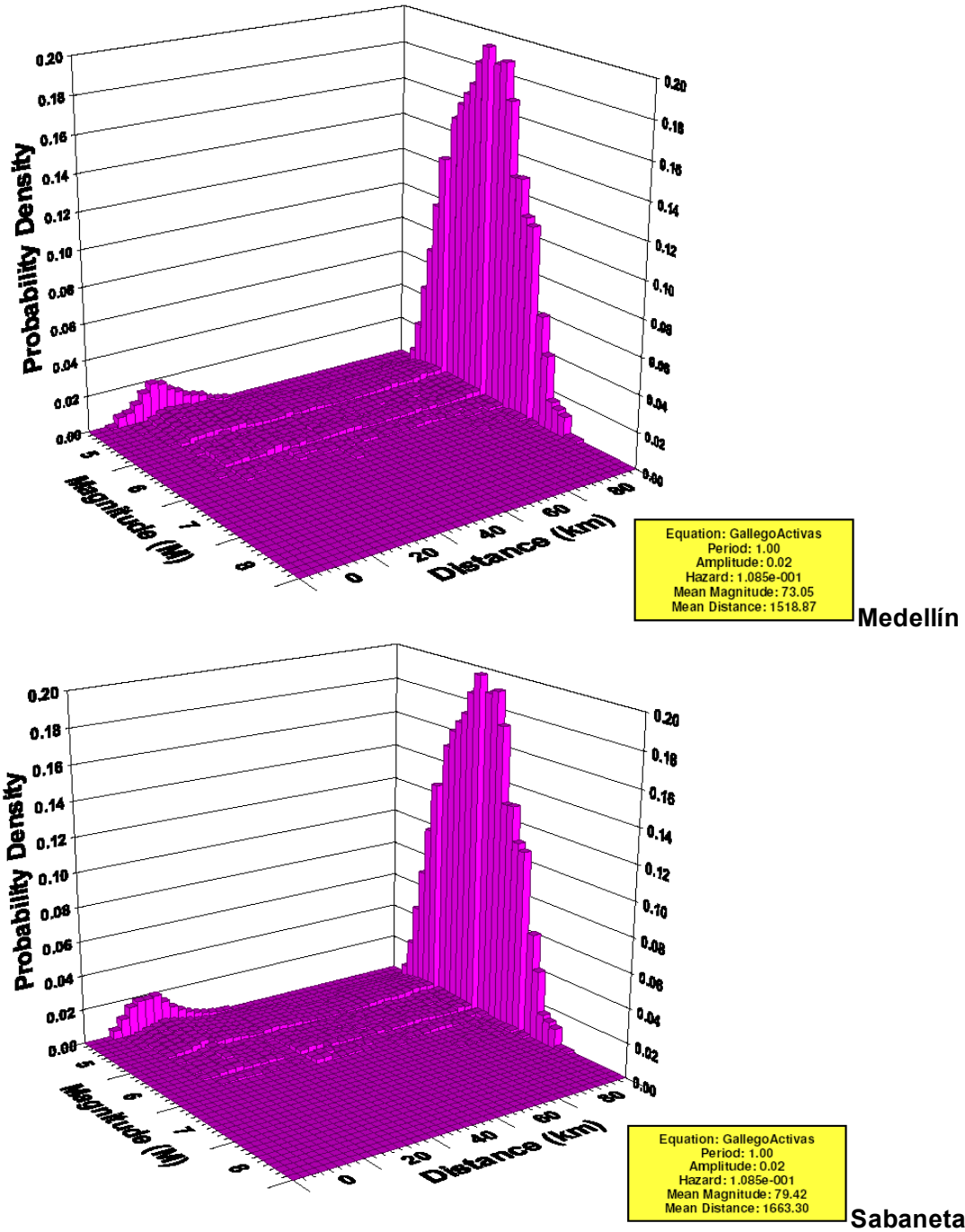
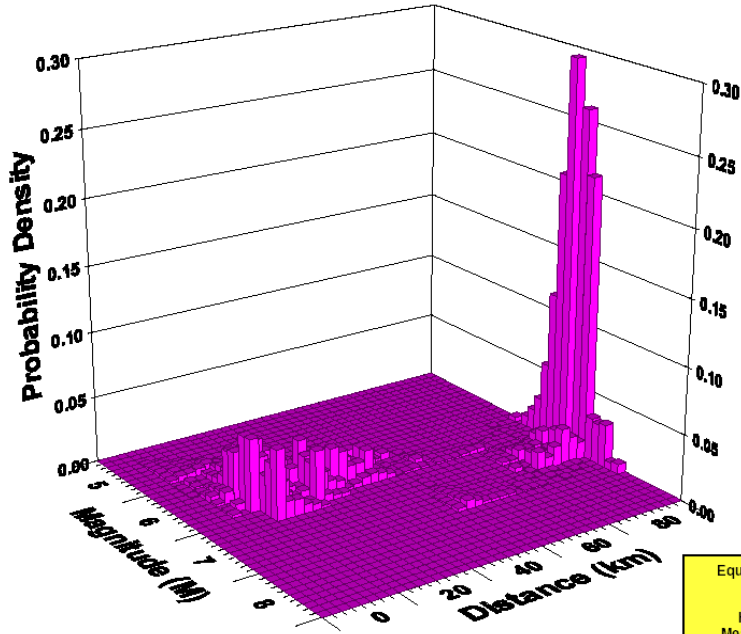
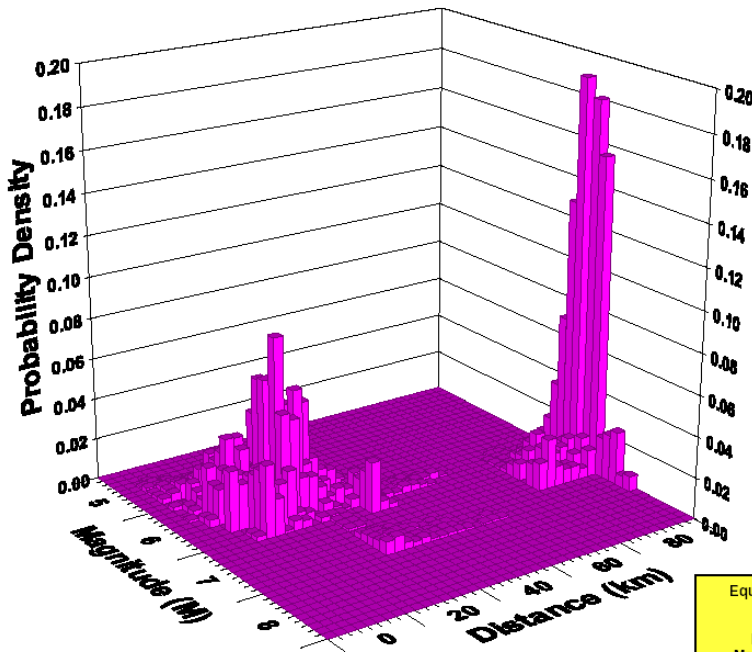


Figura 6.29 Disgregación de la amenaza sísmica para  $T = 1$  s y para un período de retorno de 9,3 años



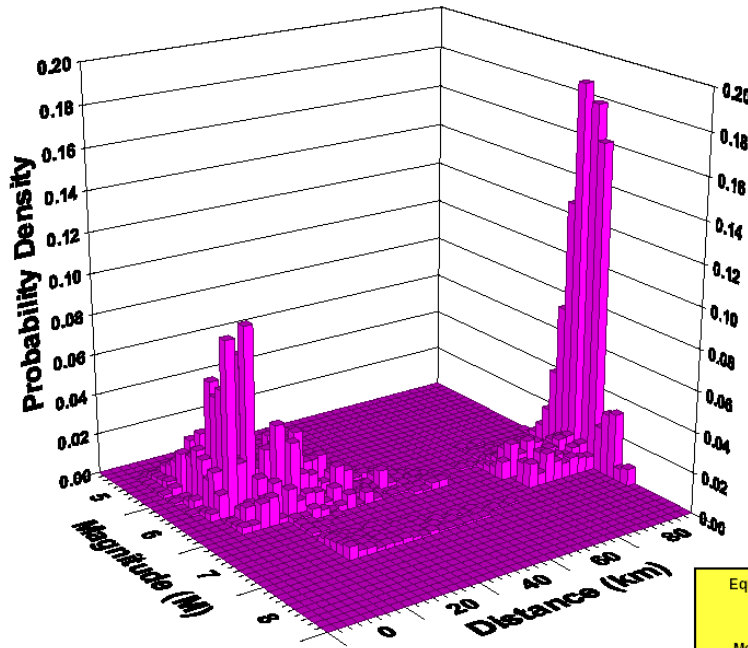
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.16  
Hazard: 2.217e-003  
Mean Magnitude: 7.11.77  
Mean Distance: 9849.97

**Barbosa**



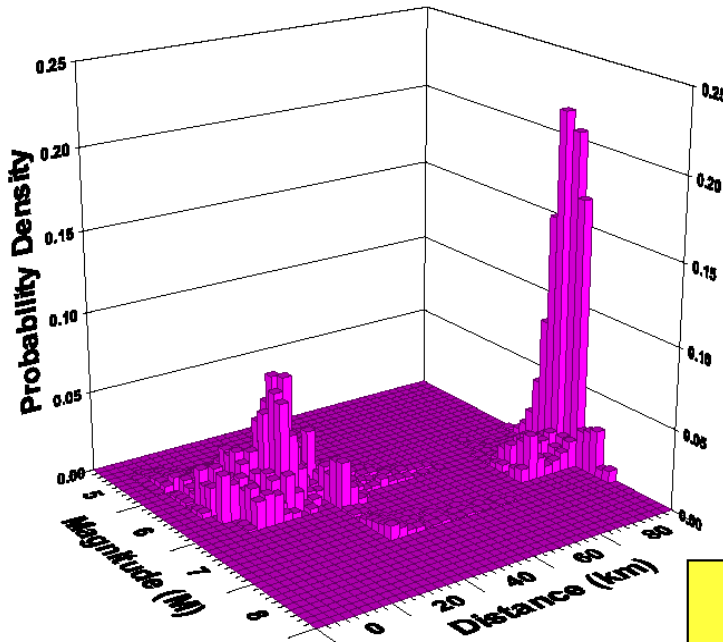
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.17  
Hazard: 2.206e-003  
Mean Magnitude: 7.22.37  
Mean Distance: 9948.22

**Bello**



Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.17  
Hazard: 2.200e-003  
Mean Magnitude: 7.31.15  
Mean Distance: 10021.35

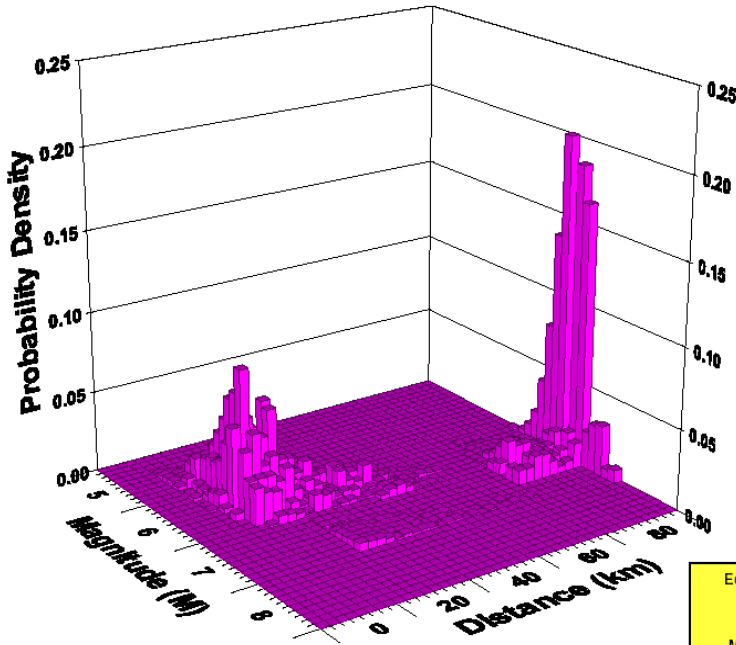
Caldas



Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.17  
Hazard: 2.230e-003  
Mean Magnitude: 7.28.15  
Mean Distance: 9937.33

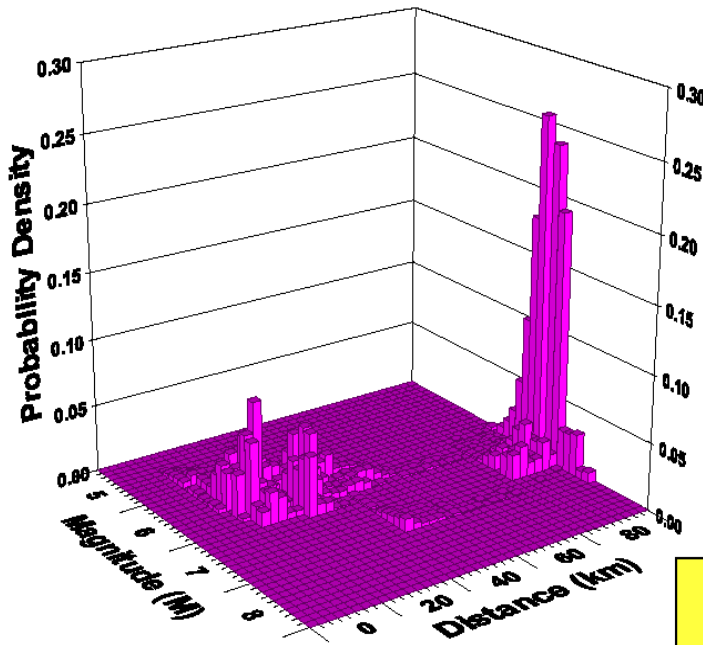
Copacabana





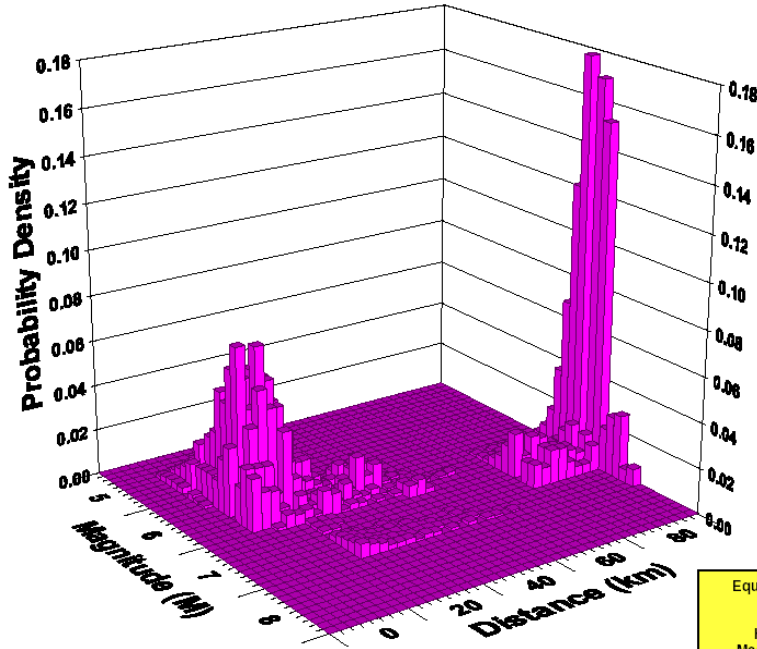
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.17  
Hazard: 2.226e-003  
Mean Magnitude: 7.36.33  
Mean Distance: 10005.16

Envigado



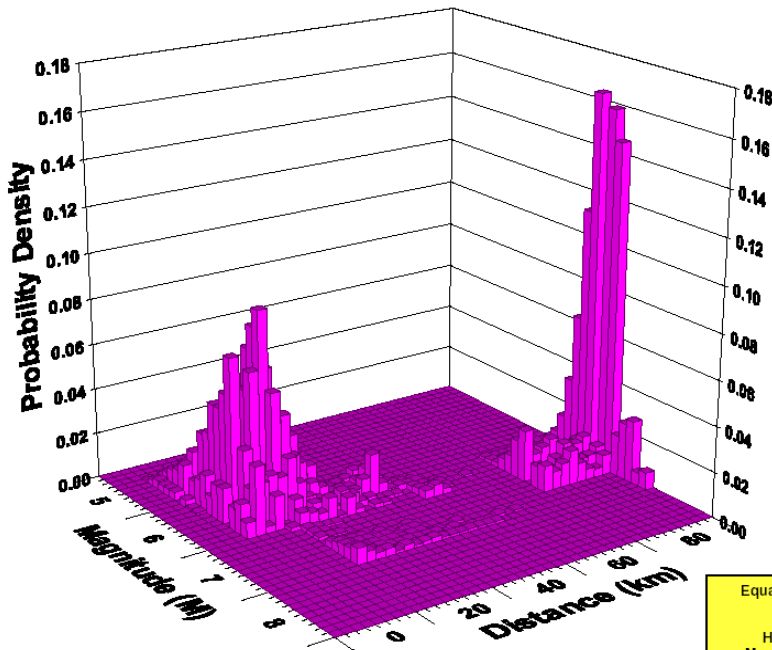
Equation: GallegoActivas  
Period: 1.00  
Amplitude: 0.16  
Hazard: 2.250e-003  
Mean Magnitude: 7.42.08  
Mean Distance: 9998.81

Girardota



Equation: GallegoActivas  
 Period: 1.00  
 Amplitude: 0.17  
 Hazard: 2.201e-003  
 Mean Magnitude: 765.41  
 Mean Distance: 10266.49

**Itagüí**



Equation: GallegoActivas  
 Period: 1.00  
 Amplitude: 0.18  
 Hazard: 2.183e-003  
 Mean Magnitude: 757.71  
 Mean Distance: 10245.57

**La Estrella**

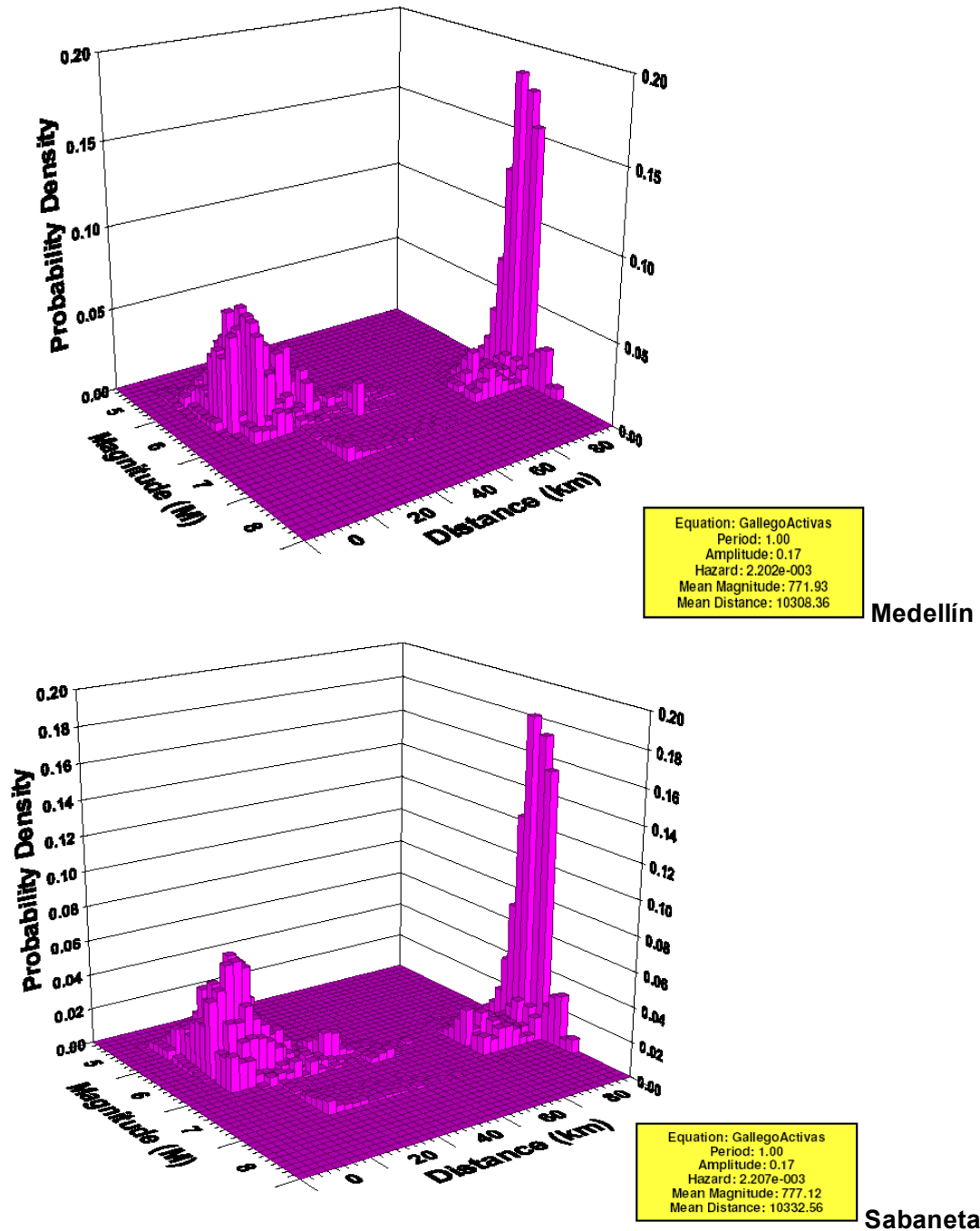


Figura 6.30 Disgregación de la amenaza sísmica para  $T = 1$  s y para un período de retorno de 475 años

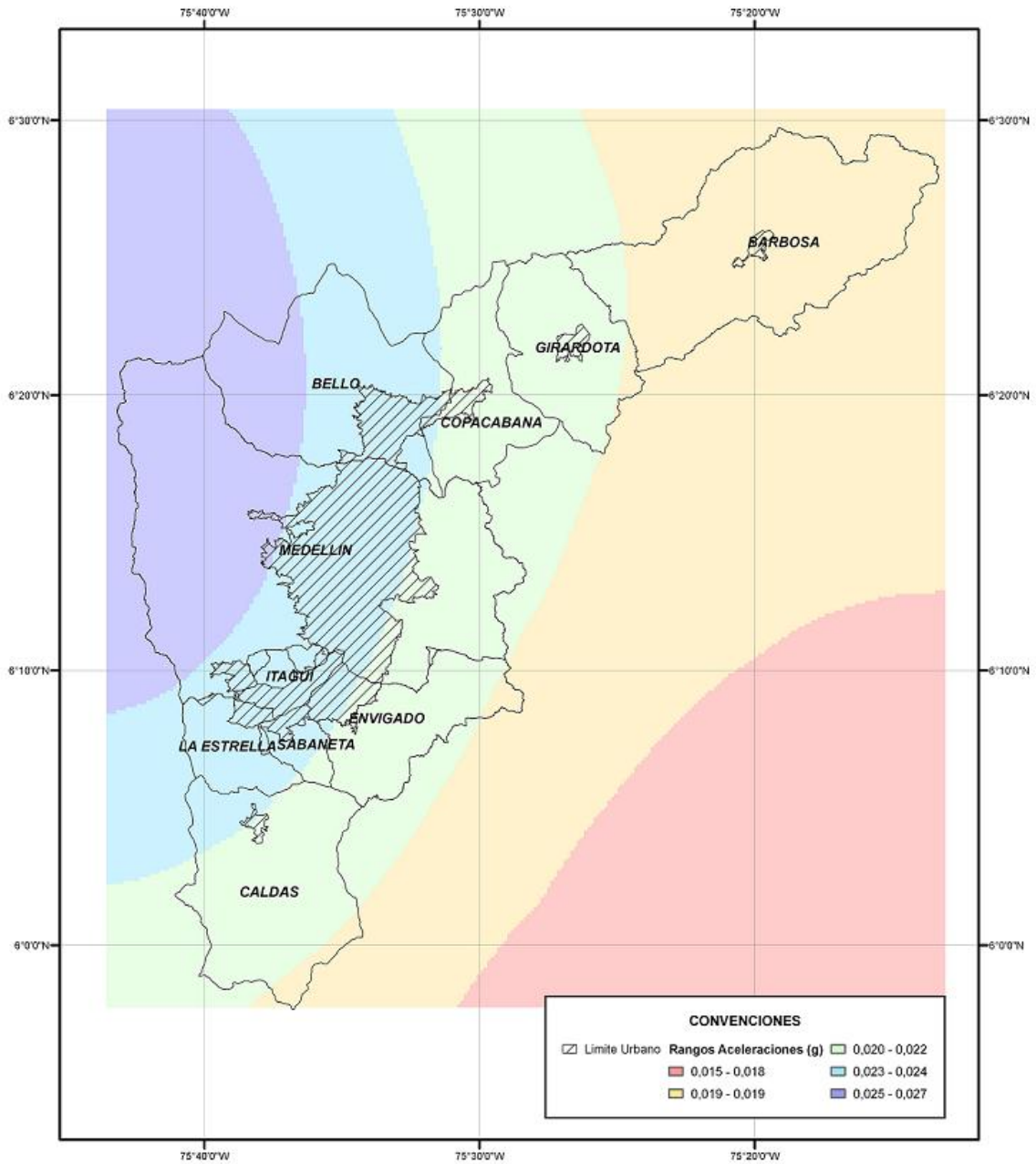
La representación general de la amenaza sísmica en la región se muestra en las Figuras 6.31 y 6.32, para el sismo de 9,3 años y de 475 años, respectivamente. No obstante, es fundamental aclarar que para todos los efectos relacionados con el diseño estructural de acuerdo con la NSR-98, todo el Valle de Aburrá se sigue considerando como de amenaza sísmica Intermedia.

Finalmente, con respecto a la estimación probabilista de la amenaza sísmica, las figuras 6.33 y 6.34 muestran los espectros de amenaza uniforme (Uniform Hazard Spectra) obtenidos para cada uno de los municipios de Valle y para los periodos de retorno de 9,3 años y 475 años, respectivamente. Estos espectros son la media (Percentil 50) de los resultados de todos los casos del árbol lógico.

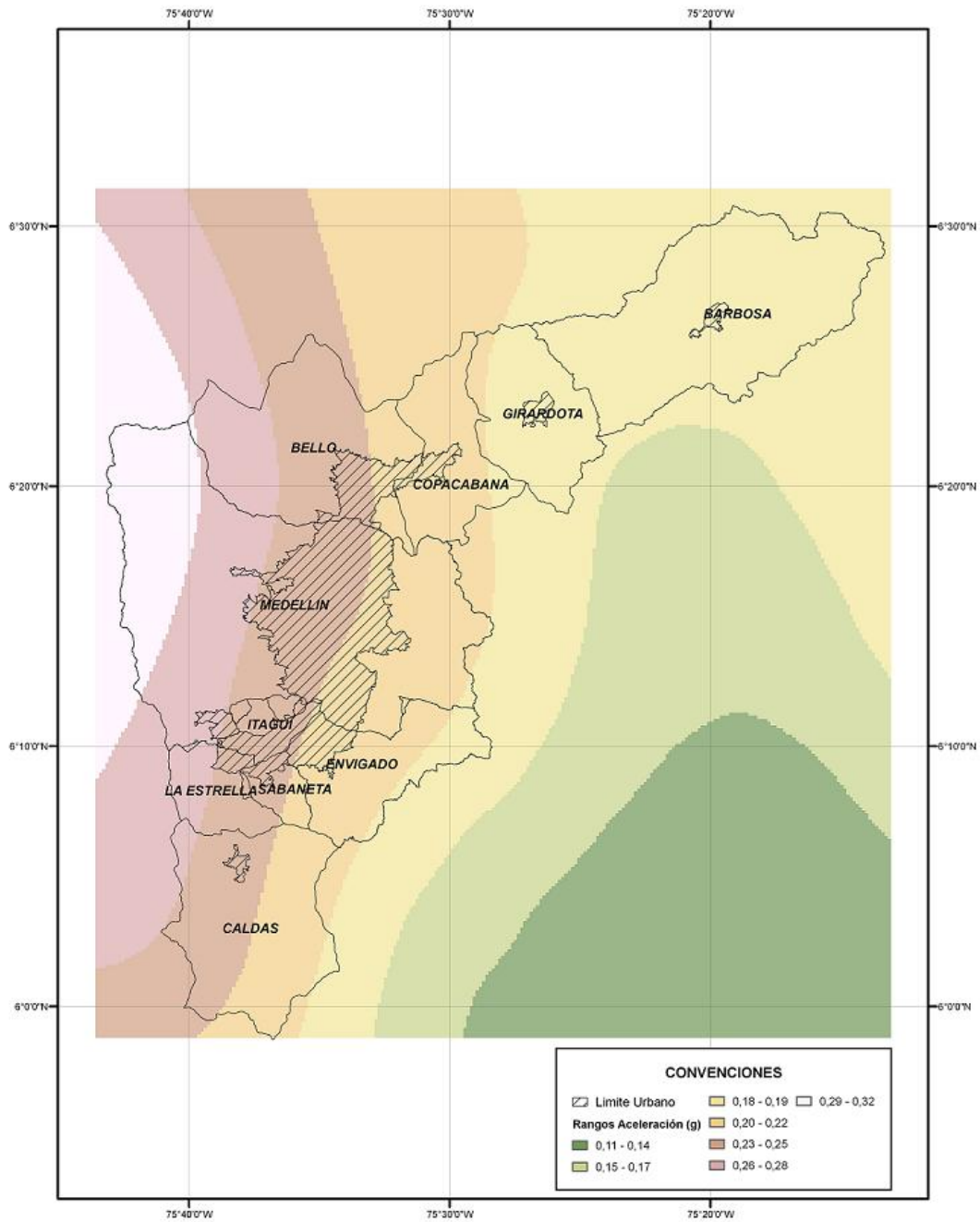
Para concluir, el análisis de amenaza sísmica para aceleración también incluyó la estimación de la amenaza por medios deterministas, que básicamente consiste en calcular la aceleración para la distancia mínima y la magnitud máxima a cada sismofuente. Este tipo de análisis es de aplicación frecuente en proyectos de gran importancia cuya falla sería catastrófica en términos de efectos en la comunidad y el medio ambiente, como por ejemplo centrales hidroeléctricas, plantas nucleares, grandes puentes, etc.

En el análisis determinista se presentan los resultados de las fallas con mayores aceleraciones en cada uno de los municipios del valle de aburrá, para lo cual se consideraron los parámetros de actividad de la rama del árbol lógico que más contribuyó a la amenaza.

La Tabla 6.8 muestra los resultados obtenidos mediante el análisis determinista para el percentil 50.



**Figura 6.31 Amenaza sísmica a nivel regional para PGA y para un período de retorno de 9,3 años**



**Figura 6.32 Amenaza sísmica a nivel regional para PGA y para un período de retorno de 475 años**

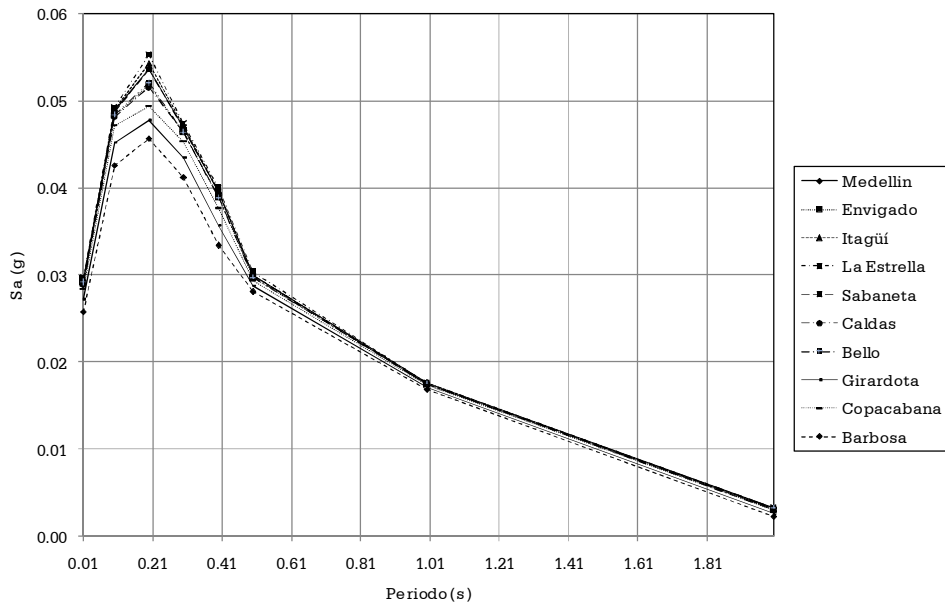


Figura 6.33 Espectros de amenaza uniforme para un período de retorno de 9,3 años

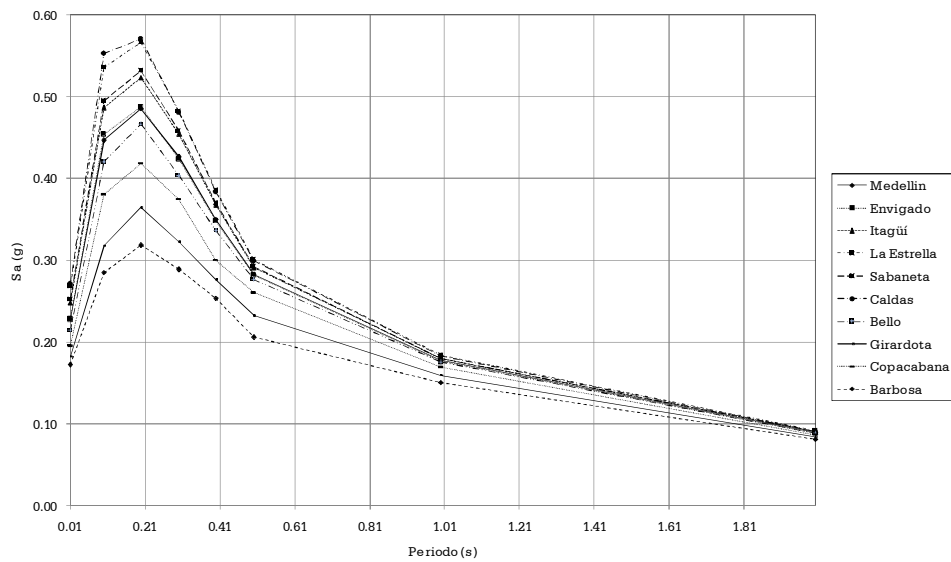


Figura 6.34 Espectros de amenaza uniforme para un período de retorno de 475 años

**Tabla 6.8 Resultados del análisis determinista**

**BARBOSA**

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Don Matías - Calderas	2.51	6.9	0.73
2	Rio Chicó	7.88	6.8	0.70
3	Miraflores	15.57	7.2	0.53
4	Belmira Este	18.41	6.9	0.39
5	Balseadero	21.40	7.0	0.35
6	Belmira Oeste	26.55	7.1	0.29
7	La Acuarela	25.16	6.8	0.25
8	Calderas	26.50	6.8	0.23
9	Nare	28.36	6.9	0.23
10	SL7	71.83	7.7	0.21

**BELLO**

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Belmira Oeste	0.34	7.1	0.78
2	La Acuarela	2.02	6.8	0.70
3	Belmira Este	11.27	6.9	0.64
4	Romeral Norte3	17.41	7.0	0.44
5	Romeral Norte1	18.60	7.0	0.41
6	Aurrá	13.96	6.4	0.39
7	La Sucia 01-01	14.89	6.5	0.38
8	La Chillona 01	14.01	6.4	0.38
9	La Sucia 01-02	15.00	6.5	0.38
10	San Jerónimo 4	19.10	6.9	0.37

**CALDAS**

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Romeral Norte3	4.05	7.0	0.76
2	Romeral SinNombre 2	5.77	6.9	0.73
3	San Jerónimo 4	10.30	6.9	0.71
4	Romeral Piedecuesta2	7.51	6.7	0.66
5	San Jerónimo 3	0.54	6.7	0.66
6	Romeral Piedecuesta3	11.50	7.0	0.66
7	Ebéjico	9.23	6.3	0.53
8	Cauca 8	21.46	8.0	0.52
9	Romeral Norte2	13.76	6.8	0.50
10	Cascajosa	12.78	6.6	0.48



## COPACABANA

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Belmira Oeste	4.49	7.1	0.78
2	Belmira Este	8.18	6.9	0.73
3	La Acuarela	2.79	6.8	0.70
4	Don Matías - Calderas	19.63	6.9	0.36
5	Romeral Norte3	22.01	7.0	0.34
6	Rio Chicó	19.90	6.8	0.34
7	Romeral Norte1	22.20	7.0	0.34
8	Sajonia	14.24	6.2	0.33
9	Cauca 8	36.85	8.0	0.31
10	La Sucia 01-01	18.50	6.5	0.30

## ENVIGADO

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Belmira Oeste	8.72	7.1	0.78
2	La Acuarela	9.24	6.8	0.70
3	San Jerónimo 3	8.08	6.7	0.66
4	Romeral Norte3	12.52	7.0	0.61
5	La Sucia 01-01	10.05	6.5	0.60
6	San Jerónimo 4	12.40	6.9	0.58
7	Romeral SinNombre 2	12.78	6.9	0.57
8	Romeral Norte2	14.71	6.8	0.46
9	Romeral Piedecuesta2	14.41	6.7	0.45
10	Cauca 8	27.30	8.0	0.42

## LA ESTRELLA

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Romeral Norte3	6.35	7.0	0.76
2	Romeral SinNombre 2	6.61	6.9	0.73
3	San Jerónimo 4	10.08	6.9	0.72
4	Romeral Norte2	9.03	6.8	0.70
5	Romeral Piedecuesta2	8.39	6.7	0.66
6	San Jerónimo 3	4.81	6.7	0.66
7	Belmira Oeste	14.87	7.1	0.53
8	La Sucia 01-01	11.22	6.5	0.53
9	Cauca 8	21.20	8.0	0.52
10	Ebéjico	10.35	6.3	0.51

## GIRARDOTA

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Belmira Este	7.09	6.9	0.73
2	Don Matías - Calderas	11.23	6.9	0.65
3	La Acuarela	11.24	6.8	0.61
4	Belmira Oeste	12.83	7.1	0.61
5	Rio Chicó	15.35	6.8	0.44
6	Sajonia	16.08	6.2	0.28
7	Miraflores	29.07	7.2	0.27
8	Cauca 8	44.22	8.0	0.25
9	Romeral Norte1	28.48	7.0	0.25
10	Romeral Norte3	29.40	7.0	0.24

## ITAGÜÍ

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Romeral Norte3	9.45	7.0	0.76
2	Romeral SinNombre 2	9.88	6.9	0.73
3	Belmira Oeste	11.58	7.1	0.68
4	San Jerónimo 3	7.06	6.7	0.66
5	San Jerónimo 4	11.03	6.9	0.66
6	Romeral Norte2	11.44	6.8	0.60
7	La Sucia 01-01	10.15	6.5	0.60
8	Romeral Piedecuesta2	11.79	6.7	0.56
9	La Acuarela	12.38	6.8	0.56
10	Cauca 8	24.12	8.0	0.47

## MEDELLÍN

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Belmira Oeste	5.31	7.1	0.78
2	La Acuarela	7.71	6.8	0.70
3	La Sucia 01-01	11.13	6.5	0.54
4	Romeral Norte3	14.53	7.0	0.53
5	La Sucia 01-02	12.32	6.5	0.48
6	San Jerónimo 4	15.33	6.9	0.47
7	Romeral SinNombre 2	15.96	6.9	0.45
8	La Chilloná 01	12.45	6.4	0.44
9	Romeral Norte2	16.66	6.8	0.41
10	Cauca 8	29.00	8.0	0.40

## SABANETA

Orden	Fuente	Distancia más cercana (km)	Magnitud (Mw)	PGA(g)
1	Romeral Norte3	8.71	7.0	0.76
2	Romeral SinNombre 2	8.93	6.9	0.73
3	San Jerónimo 4	10.57	6.9	0.69
4	San Jerónimo 3	4.67	6.7	0.66
5	Romeral Piedecuesta2	10.49	6.7	0.63
6	Belmira Oeste	12.59	7.1	0.62
7	Romeral Norte2	11.61	6.8	0.59
8	La Sucia 01-01	10.41	6.5	0.58
9	La Acuarela	12.88	6.8	0.53
10	Cauca 8	23.73	8.0	0.47

### 6.5.2 Velocidad Máxima del Terreno (PGV)

Como complemento al análisis de amenaza sísmica, y teniendo como objetivo del análisis de pérdidas para líneas vitales, para las cuales se ha demostrado que el parámetro de intensidad que se relaciona con el daño no es la deriva sino la velocidad pico efectiva o velocidad máxima del terreno, se realizó un análisis probabilista para la estimación de la PGV. Este parámetro, de manera similar a PGA o a las aceleraciones espectrales se estimó por medio de ecuaciones de atenuación propias, en función de la magnitud y la distancia a la fuente, y de las funciones de amplificación debidas a efectos locales producidos por depósitos blandos de suelo. Para este trabajo se usaron las ecuaciones de atenuación sobre PGV recientemente publicadas por Akkar y Bommer (2007).

En la Figura 6.35 se muestran las curvas de amenaza para velocidad máxima del terreno, las cuales se calcularon para los valores medios de magnitud máxima y tasa de actividad mostrados en la Figura 6.6, y para las coordenadas correspondientes al parque principal de cada uno de los nueve municipios.

### 6.5.3 Desplazamiento Máximo del Terreno (PGD)

Para terminar este capítulo y como última pieza del análisis de amenaza, se realizó también el análisis para el PGD. El objetivo de incluir estos resultados es servir como punto de partida para la obtención de espectros coherentes en cuanto a la dependencia espectral de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento, para evitar la sobreestimación de la demanda de desplazamiento que se obtiene cuando se convierten los espectros de aceleración especificados típicamente por las normas.

La idea es que para las estructuras de período de vibración fundamental largo, se cuente con espectros que estimen de manera razonable los niveles de desplazamiento reales a los cuales estarían sujetas tales estructuras.

Los espectros de desplazamiento que se muestran en las Figuras 6.36 a 6.38 se calcularon a partir de la ecuación de atenuación de Gallego y Ordaz (2000), igualmente para los valores medios de magnitud máxima y tasa de actividad mostrados en la Figura 6.6.

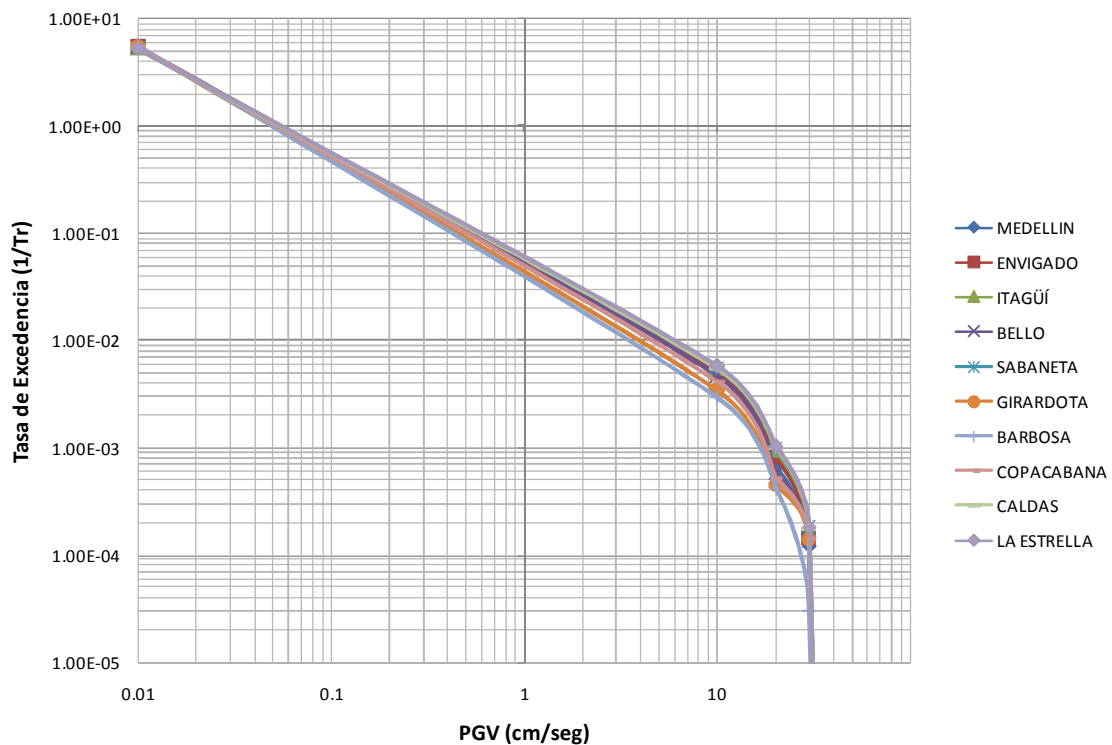


Figura 6.35 Curvas de amenaza para la Velocidad Máxima del Terreno (PGV)

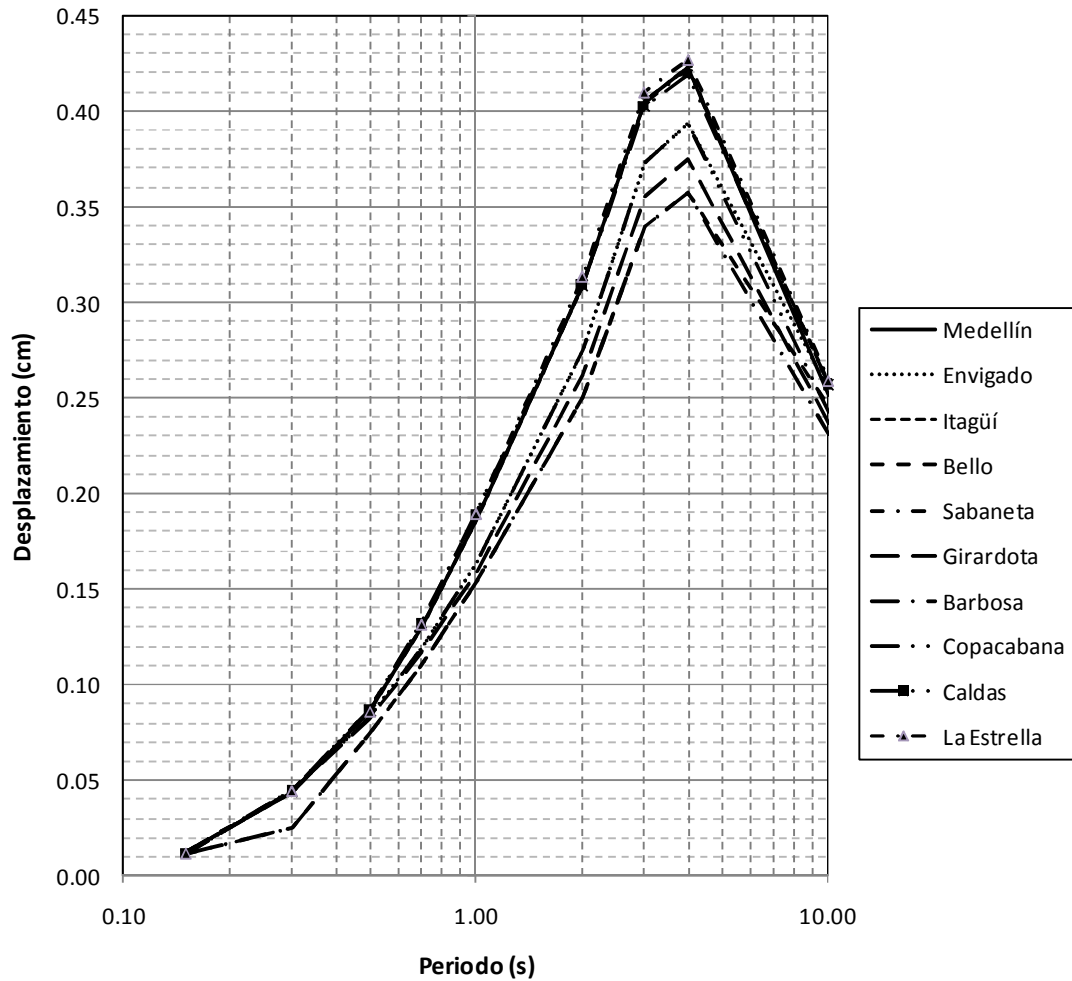


Figura 6.36 Espectro de amenaza uniforme para el Desplazamiento Máximo del Terreno (PGV) y para un período de retorno de 9,3 años

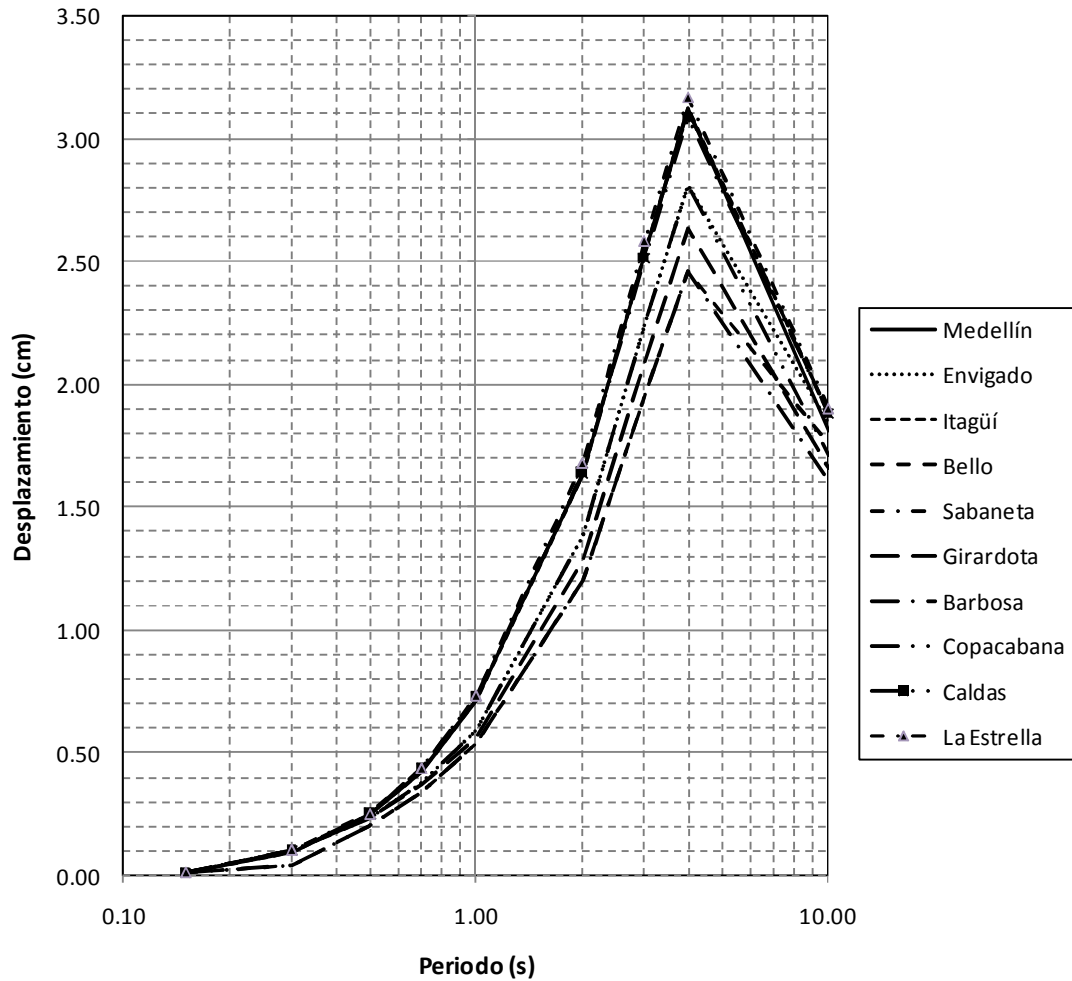


Figura 6.37 Espectro de amenaza uniforme para el Desplazamiento Máximo del Terreno (PGV) y para un período de retorno de 43 años

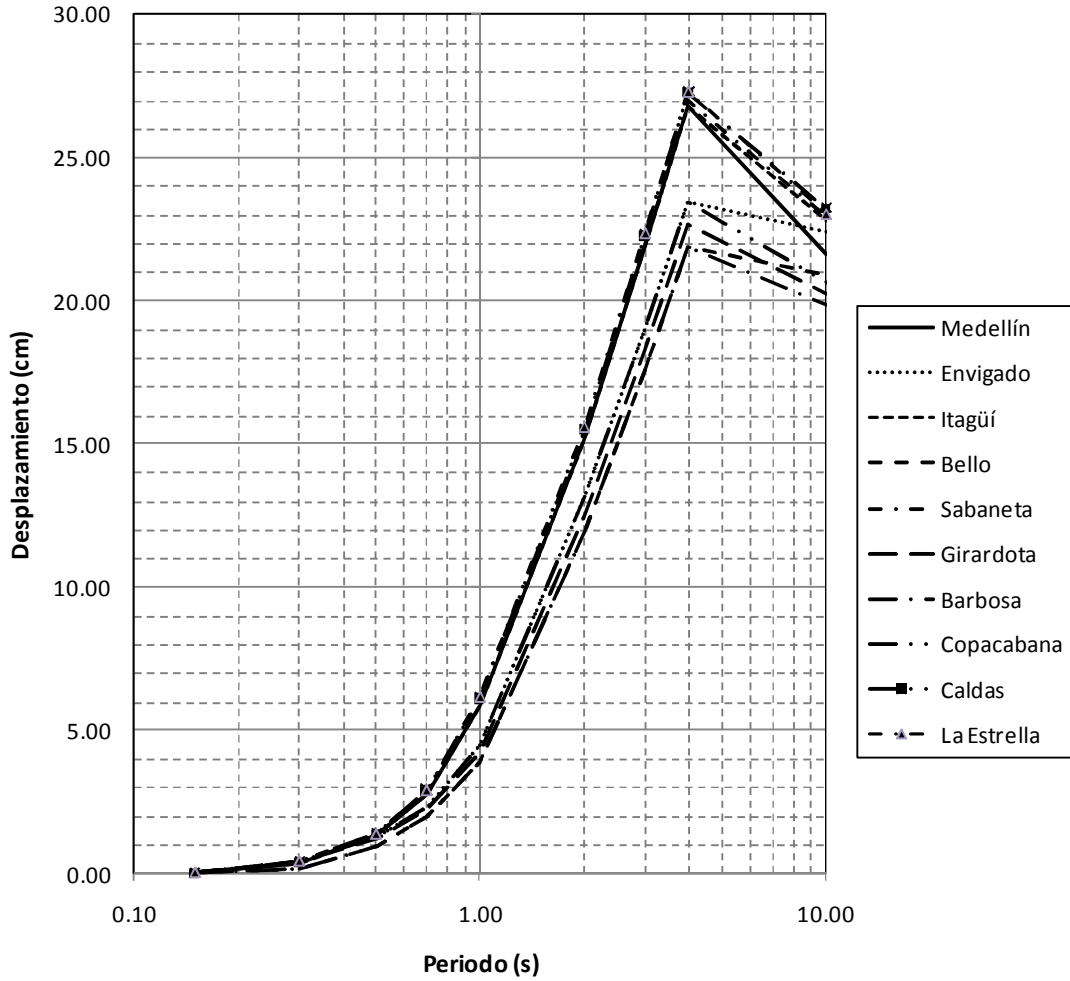


Figura 6.38 Espectro de amenaza uniforme para el Desplazamiento Máximo del Terreno (PGV) y para un período de retorno de 475 años

## 7. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Para caracterizar geotécnicamente las muestras de suelo alteradas e inalteradas obtenidas en las diferentes perforaciones, se llevó a cabo un programa de ensayos estáticos y dinámicos de campo y laboratorio sobre las muestras recuperadas en la exploración de campo. Las pruebas estáticas y dinámicas fueron realizadas en el Laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad EAFIT y los ensayos microsísmicos con el Bender Element fueron ejecutados por el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional sede Medellín.

Para efectuar el análisis de propiedades estáticas y dinámicas se agruparon los materiales explorados por origen, en el caso de suelos residuales y en el caso de suelos transportados por su procedencia (ver Figura 7.1).

**Tabla 7.1 Agrupación de suelos por origen y procedencia**

Número	Formación	Códigos asociados
1	Suelo residual de Anfibolita	PRaM, PaG
2	Suelo residual de Gneis	Pni AM, PRnmS, PRnLC, PnP, Knl
3	Suelo residual de Dunita	KuM, JuR
4	Suelo residual de Esquisto	Pes
5	Suelo residual de Granodiorita y Cuarzodiorita	TRgA, Kcd, PRgN
6	Suelo residual de Diorita	KdA
7	Suelo residual de Gabro	KmP, JgSD, Jg, JgR
8	Suelo residual de Migmatita	PRmPP
9	Suelo residual de Rocas Volcánicas	Kv QG, KvsQG
10	Depósito de Deslizamiento o vertiente	Qd
11	Flujos de Lodos y escombros, recientes y Meteorizados	F Pre, F I, F II, F III, F IV, Fa
12	Depósitos Aluviales	Qal
13	Depósitos Aluviotorrenciales	Qat



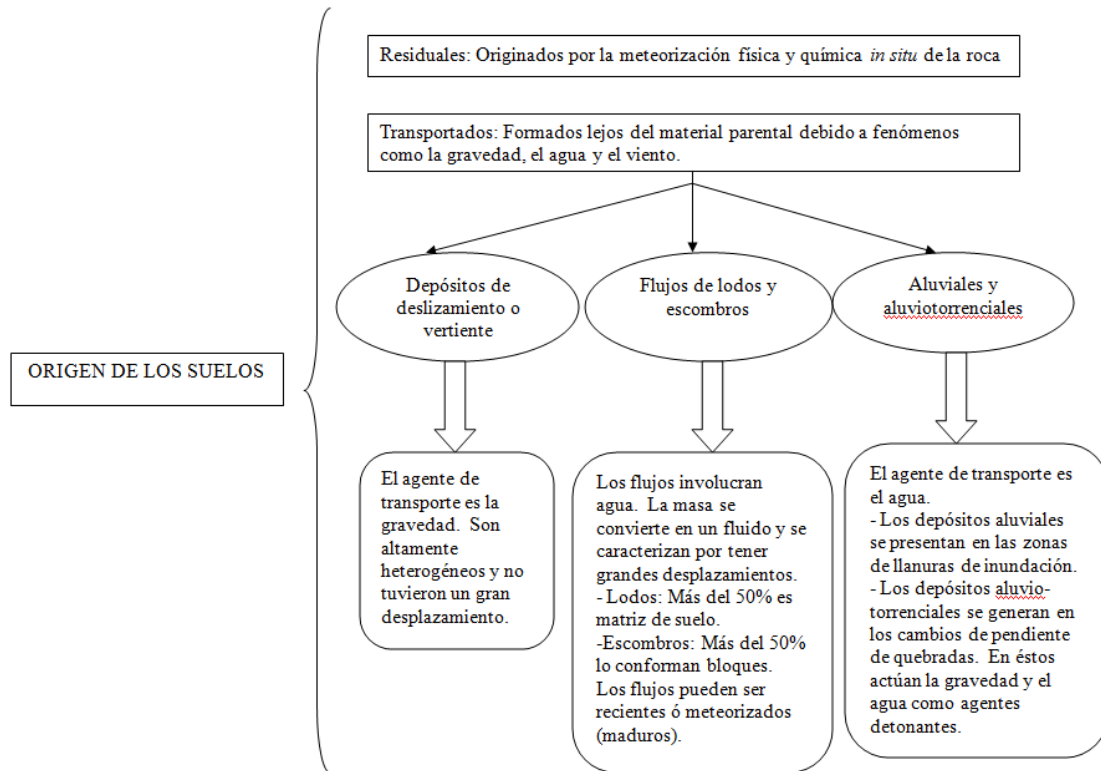


Figura 7.1 Esquema del origen de los suelos

## 7.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN - BASE DE DATOS DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

Para la asignación de propiedades geotécnicas de los tipos de suelo del Valle de Aburrá, se utilizó la base de datos de propiedades estáticas de Solingral S.A. denominada EXPLORA y desarrollada en el motor de base de datos ACCESS, la cual recopila información de exploraciones de campo, ensayos de campo y laboratorio entre los años 1955 y 2007, incluyendo los estudios de microzonificación sísmica previamente realizados en la zona (GSM, 1999; 2002).

Se realizó una selección de proyectos en el Valle de Aburrá que contienen información relevante de exploraciones de campo y ensayos de laboratorio provenientes de penetraciones estándar y perforaciones, descartándose los apiques por su escasa y superficial información.

La totalidad de las muestras recopiladas están identificadas con la localización indicando el municipio en donde fueron tomadas; más del 70% de las muestras tienen coordenadas;

sin embargo, para su agrupación por tipo de suelo se tuvo en cuenta más que sus coordenadas, la profundidad y la descripción del tipo de suelo.

Los resultados de los ensayos estáticos recopilados corresponden a granulometría, humedad, límites de consistencia, resistencia a la compresión simple, penetración estándar SPT y triaxial estático. La base de datos se revisó con el fin de confirmar la calidad de la información, así como para unificar la denominación de las formaciones litológicas y el sistema de unidades.

La consulta de la base de datos contiene resultados de 5601 ensayos de humedad, 2313 límites líquidos, 1994 pesos unitarios y 10 839 golpes del SPT, incluyendo los ensayos realizados en 2007, los ensayos están distribuidos por municipios como se indica a continuación:

**Tabla 7.2 Cantidad de ensayos estáticos recopilados por municipio**

MUNICIPIO	$W$ (%)	$LL$ (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$N_{SPT}$
<b>COPACABANA</b>	32	30	17	89
<b>BARBOSA</b>	4	3	2	64
<b>GIRARDOTA</b>	48	29	23	231
<b>BELLO</b>	39	16	14	-
<b>MEDELLÍN</b>	4669	1703	1626	7787
<b>CALDAS</b>	121	50	61	333
<b>ENVIGADO</b>	409	269	133	1435
<b>ITAGUÍ</b>	122	104	64	448
<b>SABANETA</b>	95	66	26	191
<b>LA ESTRELLA</b>	62	43	28	261
<b>TOTAL</b>	<b>5601</b>	<b>2313</b>	<b>1994</b>	<b>10839</b>

Como se observa en la Tabla 7.2 los municipios en los que se recopiló mayor cantidad de información son Medellín, Envigado, Itagüí y Caldas, respectivamente.

Para el análisis de las propiedades dinámicas se recopiló la información de ensayos realizados en los estudios de microzonificación sísmica de Medellín y del Valle de Aburrá de 2002 (GSM, 1999; 2002), los trabajos de Tesis de Maestría de Otálvaro (2005) y de Betancur (2006). Se recopilaron los ensayos dinámicos de campo y de laboratorio tales como Down-Hole, Péndulo de Torsión, Bender element, Columna Resonante y Triaxial Cíclico, para la obtención de las curvas de degradación, amortiguamiento y velocidad de onda de corte por tipo de suelo.

La información recopilada es fundamental para la microzonificación sísmica, ya que aporta en el proceso de asignación de propiedades geotécnicas del suelo que afectan la respuesta dinámica.

## 7.2 EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

Con el objetivo de conocer las condiciones geológicas y geotécnicas de los diferentes perfiles de suelos presentes en los municipios a microzonificar se ejecutó una campaña de exploración en la cual se ejecutaron 36 perforaciones profundas, adicionales a las realizadas durante los estudios de la microzonificación del año 2002.

Para la elección de los sitios a perforar se realizaron varias actividades, inicialmente se solicitó al Área Metropolitana del valle de Aburrá la información cartográfica relacionada con la definición oficial de las zonas urbanas y las áreas de expansión urbana de cada uno de los municipios involucrados en este estudio, definidas con base en su Plan de Ordenamiento Territorial vigente (POT). Es importante aclarar que en cada uno de los municipios se realizó una concertación con las autoridades de planeación sobre estos asuntos, dichas dependencias brindaron la información referente a los sitios de mayor opción de expansión futura y las características de los asentamientos proyectados en el mediano y largo plazo (industrial y/o residencial).

Por otra parte se recopiló la información geológica obtenida en proyectos anteriores, así como con los mapas preliminares obtenidos por fotointerpretación en este proyecto. Teniendo en cuenta que la campaña exploratoria se ejecutó de sur a norte, los municipios de Caldas y La Estrella no contaban con un mapa geológico preliminar 1:10 000; en ellos se trabajó con el mapa del año 2002; sin embargo, durante la ejecución de las perforaciones las actividades cartográficas ya habían avanzado y se realizaron los ajustes pertinentes. Sobre el mapa geológico el consorcio, en combinación con los profesionales de la geología y la geotecnia que participaron en este proyecto, se propuso un programa de exploración sobre sectores cuya información a profundidad complementara los datos de las microzonificaciones anteriores o que mostraran las características más representativas de las condiciones geológico-geotécnicas de cada uno de los municipios. Este plan exploratorio preliminar se concertó con las secretarías de planeación para su perfeccionamiento. Se solicitaba a los funcionarios que, orientados por el programa inicial, definieran con mayor precisión lugares en las mismas unidades geológicas donde los predios involucrados fuesen públicos o de fácil consecución de permisos, y que a la vez estas perforaciones sirvieran a los municipios para futuros desarrollos; además, en el caso de los sitios en donde deberían instalar los acelerógrafos se deberían buscar sectores en donde se tuviera campo libre y donde existiera una alta probabilidad de mantener estos predios libres de construcción durante el mayor tiempo posible; otro de los criterios fue que los sitios tuvieran las condiciones apropiadas de seguridad para los equipos se planea instalar.

Con esta información se realizaba un listado para que la oficina correspondiente emitiera una autorización escrita para la realización de los trabajos. En caso de existir predios de carácter privado y/o de EPPM las diligencias pertinentes fueron desarrolladas por el Consorcio con apoyo de las dependencias de planeación municipal. En la mayoría de los casos se realizaron visitas de campo conjuntas a los sitios propuestos, de tal manera que

se establecieran las coordenadas específicas del punto a explorar por medio de una perforación y se hiciera un primer contacto con la comunidad.

La profundidad de los sondeos se ajustó a las condiciones particulares del sitio, como el objetivo es conocer los efectos que tienen los suelos sobre las ondas sísmicas, se determinó como criterio general llegar hasta roca o hasta un material que por sus condiciones de dureza y/o consolidación tuvieran velocidades de onda equiparables a roca.

Para la ejecución de las perforaciones se contó con taladros rotatorios, que pueden alternar las herramientas de avance, incluyendo tubos de pared delgada (Shelby), cuchara partida (ensayo de SPT), triconos y coronas de diamante. Con el objeto de obtener muestras representativas de los suelos que caracterizan la zona de estudio se perforó con diámetro HQ; el cual además, permite el fácil acceso de los equipos para la ejecución del ensayo geofísico (Down-Hole). En algunos sondeos, por las condiciones de estabilidad del pozo, fue necesario realizar una reducción del diámetro a NQ.

Las muestras obtenidas que corresponden a: bolsas de suelo remoldeado (tubo de cuchara partida), cilindros de suelo inalterado (Shelby) y bloques de roca o de suelos cohesivos (corona) se almacenaron y etiquetaron. Con todas ellas, acompañadas del registro de campo de la perforación, se realizó una descripción geológica detallada del sondeo. Dicha descripción se realizó según los parámetros del perfil de meteorización definido por Dearman, descrito en la Tabla 4.1, el cual clasifica desde VI hasta I para los materiales totalmente meteorizados a frescos respectivamente.

El programa de investigaciones de campo para la caracterización del subsuelo y la determinación de las propiedades dinámicas y físico – mecánicas del mismo, incluyó un reconocimiento e inspección del sitio, acompañado de la ejecución de 36 perforaciones con taladro rotatorio, con profundidades entre 17,05 m y 43,10 m, con un total de 1082,35 m.

Las perforaciones se distribuyeron en los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Copacabana, Girardota y Barbosa. Como nomenclatura se adoptó inicialmente con la letra P de perforación, las dos letras siguientes indican las iniciales del municipio en donde se localiza la perforación y finalmente el número consecutivo de la perforación. En la Tabla 7.3 se detalla la ubicación de cada sitio con coordenadas y cota. Las coordenadas y la cota fueron medidas en campo con un GPS, para el cual se indica la precisión de cada medida; el origen de las coordenadas es Bogotá.

Las fotos con la localización de cada sondeo se muestran en el Anexo 7.2 y la distribución en planta en el Plano PL-1050-P-01.

Para permitir la realización de los ensayos geofísicos fue necesario una vez terminada la perforación realizar un recubrimiento en tubería de PVC de 2", con lechada entre la tubería y el suelo para garantizar un buen contacto entre estos.

**Tabla 7.3 Resumen de la exploración geotécnica realizada**

Municipio	Sondeo	Ubicación	Geología	Coordenadas		Cota (msnm)
				N	E	
Caldas	PCA01	Estación de Policía del parque principal de Caldas. Cr 49 #129 sur 84	Depósito aluvial meteorizado	1165614	827644	1745
	PCA02	Vereda Alta - Centro educativo Claudina Múnera.	Suelo residual de esquistos	1165000	828679	1856
	PCA03	Parque del barrio Bellavista. Cl 117 B sur #57-65.	Flujo de escombros meteorizado	1166689	827347	1755
	PCA04	Instituto Pedro Luis Álvarez Correa, vereda La Miel, Cl. 127 con Cr. 42.	Flujo de lodos hasta 8,6 m, a partir de allí suelo residual de esquistos	1165856	828484	1759
	PCA05	Losería Colombiana. Cr 54 Cl 159 sur 51.	Flujo aluviotorrencial	1165703	827149	1753
La Estrella	PES06	Cancha de la vereda Pueblo Viejo Parte Alta.	Flujo de lodos meteorizado	1170626	827027	1838
	PES07	Parroquia Santa Isabel de Hungría en la vereda La Tablaza.	Flujo de lodos meteorizado	1168593	827620	1726
	PES08	Glorieta complejo Suramérica.	Flujo de lodos hasta 3,4 m, a partir de allí depósito aluvial	1172755	828597	1611
	PES09	Escuela de Policía Carlos E. Restrepo.	Flujo de escombros fresco	1173233	825664	1887
	PES10	Cl 77 con Cr 59 Urbanización Villa Mira.	Flujo de escombros meteorizado hasta 19,30 m, a partir de allí flujo de escombros fresco	1173129	826899	1740
Sabaneta	PSA11	Finca San Carlos de la vereda La Doctora.	Flujo de lodos hasta 11,6 m, a partir de allí suelo residual de esquistos	1171035	830048	1652
	PSA12	Urbanización Casas Campesinas Espigas en la Circunvalar Oriental.	Suelo residual de esquistos	1171839	829773	1684

**Tabla 7.3 Resumen de la exploración geotécnica realizada (Cont.)**

	PSA13	Zona Industrial.	Depósito aluvial hasta 20 m, a partir de ahí suelo residual de esquistos	1171844	828514	1616
	PSA14	Capilla María Auxiliadora del-calle 56 sur #38 - 147	Suelo residual de neis	1172421	831212	1658
Envigado	PEN15	Barichara - Casas. Cr 20 # 20-03	Flujo de lodos	1174558	835661	1764
	PEN16	Colegio Benedictinos. Cl 24 s # 39-36	Flujo de escombros meteorizado	1175245	834310	1602
	PEN17	Cancha El Dorado	Depósitos aluvio - torrenciales	1173697	832472	1570
	PEN18	Barrio El Trián Parte Alta, "Las Antillas" Calle 45 B sur # 37 - 34.	Suelo residual de neis	1172742	832644	1630
	PEN19	Margen izquierda de la quebrada Zúñiga, frente de Carrefour.	Depósito aluvial	1176174	833580	1517
Copacabana	PCO20	Vereda Trinidad. Cr 79 con Cl 39, conducción Manantiales.	Suelo residual de anfibolita	1192272	839134	1480
	PCO21	Parque del Barrio El Pedregal,.	Flujo de escombros meteorizado	1193364	840626	1449
	PCO22	Parque central de Copacabana	Depósito aluviotorrencial	1193678	841615	
	PCO23	Barrio María, Cr 29 con Cl 45. Sobre el andén.	Flujo aluviotorrencial y flujo de escombros meteorizado	1194581	843037	1435
	PCO24	Finca La Terca (23 A 730) en la vereda Zarzal La Luz.	Flujo de lodos meteorizado	1196103	843108	1490
	PCO25	Vereda Villa Nueva parte Alta. Cl 56 con Cr 58.	Flujo de lodos meteorizado	1194144	840975	1429
Girardota	PGI26	Estación de servicio coralina,	Depósito aluvial	1197707	847645	1387
	PGI27	Coliseo Municipal, en el barrio Girardota La Nueva.	Flujo de escombros meteorizado	1196696	848005	1500
	PGI28	Placa polideportiva del Barrio La Ceiba.	Flujo de escombros	1197004	848960	1398
	PGI29	Colina ubicada al frente del barrio La Ceiba	Suelo residual del Batolito Antioqueño	1196887	849169	-

**Tabla 7.3 Resumen de la exploración geotécnica realizada (Cont.)**

Girardota	PGI30	En el costado izquierdo de la Doble Calzada Niquía.. Finca Sacatín	Depósito de y Batolito Antioqueño	1198016	846954	1419
	PGI31	Lote al lado del matadero municipal	Flujo de escombros	1197269	847973	-
Barbosa	PBA32	Colegio El Hatillo, a un lado de la vía Férrea	Depósito de vertiente	1201117	854110	1366
	PBA33	Tejicóndor en la margen derecha de la quebrada Ovejas. La Chuscala	Suelo residual de esquistos	1202855	859693	1367
	PBA34	Parque Santiago de los Caballeros - Centro del Bienestar del Anciano San Pedro Claver	Depósito aluviorrencial	1203645	861435	-
	PBA35	Parque infantil. Cra 13 con cll 21.	Flujo sobre suelo residual o aluvión	1203975	861069	-
	PBA36	Al lado de la Hacienda - Hotel El Indio	Flujo de escombros	1205598	861023	1348

Los registros de las perforaciones realizadas se presentan en forma de columna estratigráfica de suelo en el Anexo 7.1, en donde se incluye la siguiente información:

- Fecha y localización de los sondeos.
- Profundidad, porcentaje de recobramiento y nomenclatura de las muestras recuperadas.
- Descripción de los distintos estratos encontrados.
- Posición del nivel freático y fecha de registro.
- Tipo de elementos utilizados para el muestreo y para el avance de las perforaciones.
- Registro del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT) con su respectiva corrección para una eficiencia del 60% ( $N_{60}$ ).
- Resumen de las principales propiedades estáticas y dinámicas realizados a lo largo de la estratigrafía.

### 7.3 ENSAYOS DE CAMPO

En este estudio se realizaron ensayos de campo tipo penetración estándar y Down-Hole, para conocer las propiedades estáticas y dinámicas en el sitio.

La metodología del ensayo de penetración estándar es sin duda la más extendida en la disciplina geotécnica, para la determinación *in situ* de algunas propiedades mecánicas del

suelo. Adicionalmente, en este estudio se utiliza como método indirecto para determinar parámetros dinámicos que varían con la profundidad.

### 7.3.1 Ensayo de penetración estándar

El método consiste en hincar un tomamuestras partido de 45 cm de largo aproximadamente colocado al extremo de una varilla, por medio de un peso (martillo) de 63,5 kg que se deja caer libremente desde una altura de 76 cm anotando los golpes necesarios para hincar 15 cm el tomamuestras, hasta penetrar 45 cm. El número de golpes necesarios para la hincada de los últimos 30 cm, se denomina resistencia normal a penetración ( $N$ ). Durante la ejecución del ensayo se presentan diferencias en especial en la energía que llega al tomamuestras, para lo cual es necesario normalizar los resultados de los ensayos de campo a una eficiencia de energía del 60% y para el mismo nivel de confinamiento para que sean comparables, mediante factores de corrección a la energía teórica de referencia  $E_r$  y el valor de  $N$  de campo, así (González, 1999):

$$N_{60} = NC_n \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \quad (7.1)$$

Donde:

$N_{60}$  = Valor de  $N$  corregido

$\eta_1$  = Factor por energía del martillo

$\eta_2$  = Factor por longitud de la varilla

$\eta_3$  = Factor por revestimiento interno del tomamuestras

$\eta_4$  = Factor por diámetro de la perforación

$C_n$  = Factor de corrección por confinamiento efectivo

$N$  = Número de golpes del ensayo

#### $\eta_1$ : Corrección por energía

Se considera que el valor de  $N$  es inversamente proporcional a la energía aplicada al martillo y entonces, para obtener un valor de  $N_{e1}$  a una energía dada  $e_1$ , sabiendo su valor  $N_{e2}$  a otra energía  $e_2$  se aplica la relación siguiente. Normalmente se normaliza para una energía correspondiente al 60% de la energía producida por la caída libre del martillo.

$$N_{e1} = N_{e2} (e_2 / e_1) \quad (7.2)$$

#### $\eta_2$ : Por longitud del eje



Este factor varía de acuerdo con la profundidad a la cual se está realizando el ensayo:

**Tabla 7.4 Corrección por longitud del eje**

Profundidad (m)	$\eta_2$
0 a 4	0,75
4 a 6	0,85
6 a 10	0,95
Mayor a 10	1,0

$\eta_3$ : Corrección por muestreador

**Tabla 7.5 Corrección por muestreador**

Muestreador	$\eta_3$
Sin tubo interno	1,0
Con tubo interno para arena densa	0,8
Con tubo interno para arcilla	0,9
Con tubo interno para arena suelta	0,9

$\eta_4$ : Por diámetro de la perforación

**Tabla 7.6 Corrección por diámetro de la perforación**

Diámetro de la perforación (mm)	$\eta_4$
60 - 120	1,0
150	1,05
200	1,15

$C_n$ : Corrección por confinamiento

Se realiza por medio del factor  $C_n$ , de acuerdo con Seed y Idriss, que según González (1999) esta expresión es la que menos se aparta del valor esperado después de haber analizado términos de distintos autores:

$$C_n = 1 - K \log R_s \quad (7.3)$$

$$(K=1,41 \text{ para } R_s < 1; K=0,92 \text{ para } R_s \geq 1)$$

Para hallar el parámetro  $R_s$  el valor se ha estandarizado a un esfuerzo vertical de referencia  $\sigma'_{vr}$  igual a 95,76 kPa y está definido por:

$$R_s = \frac{\sigma_v}{95,76kPa} \quad (7.4)$$

### 7.3.2 Ensayo Down-Hole

El ensayo Down-Hole es un método geofísico de exploración que permite conocer la variación vertical de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el terreno.

El ensayo consiste en generar una perturbación en la superficie y medir los tiempos de llegada de la perturbación a geófonos instalados a diferentes profundidades dentro de la perforación ejecutada. Con base en los tiempos de llegada y la profundidad se calculan la velocidad de la onda longitudinal (onda P) y la onda transversal o de corte (onda S), dependiendo del tipo de perturbación generada.

Normalmente, los resultados son utilizados en la modelación de la respuesta del sitio para la evaluación de la respuesta del suelo durante sismo, en el diseño estructural y en el diseño de fundaciones para cargas dinámicas, entre otros.

En términos generales, para la realización del ensayo se utilizan los siguientes implementos:

- Geófono: Instrumento que se introduce en la perforación. Cuenta con tres sensores en los tres ejes, dos horizontales ortogonales y uno vertical. El geófono tiene un sistema que le permite asegurarse a la tubería para tomar datos y luego despegarse para moverse en la perforación.
- Sismógrafo: Este equipo está conectado al geófono y permite conocer las gráficas de ruido en tiempo real y las de tiempo contra voltaje en los tres canales cuando se produce el golpe.
- Consola: Permite controlar el “clamp” o mecanismo para asegurar el geófono a la tubería y además permite asignar los canales correspondientes a los geófonos.
- Computador: Permite visualizar y guardar los datos entregados por el sismógrafo.
- Almadana: En este caso particular la empleada tiene un peso de 20 lb, con la cual se golpea una placa metálica y a partir de allí se generan las ondas. A la almadana se le adiciona un sensor el cual detecta cuando se da el golpe para empezar a generar el registro.

Para la realización del ensayo inicialmente se debe hacer una perforación dentro de la cual se instala una tubería de 2” a 6” (0,05 a 0,15 m) de diámetro. La perforación debe quedar firmemente adherida al terreno para lo cual normalmente se inyecta lechada entre la tubería y el suelo de las paredes de la perforación para garantizar un buen contacto.

Las ondas se generan cuando se golpea la almadana contra una placa metálica de dimensiones (0,2 m por 0,2 m). Según el tipo de ondas que se quiera medir se orienta la placa y ésta se dispone en una pequeña excavación a una distancia de dos o tres metros de la perforación; esta excavación se hace de forma cúbica. Para cada profundidad que se desee tomar datos se golpea en la base y en dos paredes paralelas, generando una onda P y dos ondas S de polaridad diferente.

El ensayo se inicia a 2 m de la superficie y se ejecuta entre los intervalos que requiera el estudio, generalmente entre uno y dos metros; dicho intervalo también depende de las condiciones en campo. En cada punto se toman tres datos verificando su calidad, siendo a menudo necesario repetir golpes para lograrlo. Además, se utilizan filtros de baja y alta frecuencia y filtros “notch”, los cuales permiten tener un registro que minimice el ruido causado factores ambientales tales como maquinaria, tráfico cercano o lejano, viento, ondas superficiales o líneas eléctricas.

Después de obtener los datos en campo, se analizan los tiempos de llegada de los tipos de onda en cada profundidad. Para este análisis se deben tener en cuenta muchos criterios como la polaridad de la onda, el ruido presente al tomar los datos, los filtros utilizados, la forma de la onda, el análisis de cada onda por separado y luego en conjunto, la geología y las características geotécnicas del terreno, entre otros.

El análisis consiste en establecer perfiles de los tiempos de llegada de la onda a cada profundidad, separando la onda longitudinal y de corte. Con esta información se tiene una gráfica de tiempo versus profundidad cuya pendiente corresponde a la velocidad. Para hacer un análisis completo se utilizan tres curvas para cada tipo de onda, las cuales son:

- Se obtienen dos o tres tendencias lineales que se aproximen a las tendencias que siguen los puntos.
- Se calcula la velocidad en cada profundidad utilizando la pendiente de tres puntos de la gráfica tiempo versus profundidad que están alrededor del punto de interés, es decir, utilizando el punto de abajo y de arriba. Este procedimiento se hace cada metro, obteniendo una pendiente o velocidad en cada punto.
- Se repite el procedimiento anterior, pero utilizando cinco puntos, dos por debajo, dos por encima y el punto de interés. De esta forma se obtienen pendientes menos variables que utilizando tres puntos.

Con estas tres curvas se tienen tres formas de calcular la velocidad en cada punto, en donde la primera es muy general, mientras que la segunda y tercera son más específicas, aunque tiene la desventaja que generan curvas variables con picos muy altos.

Finalmente se superponen las tres gráficas de cada tipo de onda y se hace un análisis simultáneo de las tres, en el cual se considera las variaciones a cada profundidad para cada tipo de onda, los picos de las tendencias con tres y cinco puntos, y los valores de la tendencia más general. Con este análisis se define un perfil de velocidad para la onda P

y S, el cual representa de una manera clara la estratigrafía y las propiedades dinámicas del sitio.

En Anexo 7.2 se presenta un registro fotográfico con la localización de las perforaciones, así como los resultados del ensayo Down-Hole, las tablas resumen, las limitaciones y los registros de las ondas longitudinales y de corte organizados con la profundidad.

## 7.4 ENSAYOS ESTÁTICOS DE LABORATORIO

### 7.4.1 Pruebas índice

A las muestras de suelo obtenidas de la exploración realizada se les hicieron los siguientes ensayos de clasificación y de propiedades índice:

- Para los suelos grueso granulares análisis granulométrico mediante el análisis mecánico con mallas con base en la norma NTC 1522 y para los suelos fino granulares la prueba del hidrómetro con la norma INV E 124.
- Límites de Atterberg para definir la consistencia del suelo, con las normas NTC 4630 e INV E 125 y 126.
- Humedad Natural con la norma NTC 1495

### 7.4.2 Ensayos de resistencia al corte

Se ejecutaron ensayos de resistencia al esfuerzo cortante sobre muestras inalteradas obtenidas de tubos de pared delgada. En este caso se hicieron ensayos de compresión triaxial consolidados no drenados (CU) con la norma ASTM D 4767-95 para determinar los parámetros de resistencia al corte a corto y largo plazo.

El ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado se hizo sobre muestras inalteradas obtenidas de los horizontes V y VI (según la clasificación de Dearman, 1991) en las zonas donde se ejecutaron ensayos dinámicos en cada una de las perforaciones.

Para los ensayos triaxiales se utilizó una velocidad de aplicación de la carga de 0,1 mm/min correspondiente a una muestra de una altura promedio de 9,8 cm que en 200 minutos logra el 20% de su deformación axial.

Los ensayos ejecutados fueron de deformación controlada, las presiones de confinamiento que se aplicaron a las muestras se calcularon de tal forma que fueran compatibles con el estado de esfuerzos *in situ* al que estaban sometidas las muestras.

Dependiendo del comportamiento del suelo se pueden aplicar los siguientes criterios de falla:

- Máximo esfuerzo desviador  $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$  ó  $(\Delta\sigma_d)_{\max}$
- Máxima relación de esfuerzos principales efectivos  $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_{\max}$
- Nivel de deformaciones admisible, usualmente entre 15% y 20%.

El criterio de falla empleado en este caso fue la máxima relación de esfuerzos principales efectivos.

En la Tabla 7.7 se presentan los resultados de pruebas índice y de resistencia al esfuerzo cortante así como la clasificación geológica de los sitios donde fueron tomadas las muestras para los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Copacabana, Girardota y Barbosa.

En la Tabla 7.8 se presentan los límites superior e inferior de las propiedades índice y de los parámetros de resistencia al corte para los diferentes tipos de formaciones geológicas identificadas en las labores de exploración: suelos residuales de esquistos, gneis, gneis anfibólico, Batolito Antioqueño, depósito aluvial, depósitos recientes y meteorizados.

Tabla 7.7. Resultados de ensayos

MUNICIPIO DE CALDAS																						
PERFORACIÓN	MUESTRA NÚMERO	PROPIEDADES ÍNDICE													VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN	
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	RETENIDO # 4 (CASCAJO) (%)	DE # 4 A # 200 (ARENA) (%)	PASA # 200 (FINOS) (%)	GRAV. ESPEC.	RELACION DE VACÍOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HÚMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD-BENDER V <sub>s</sub> (m/s)	VELOCIDAD-DOWN HOLE V <sub>s</sub> (m/s)	RELACIÓN DE POISSON (ν)	MÓDULO DE ELAST. (kPa)	COHESIÓN C' (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIF. USCS	ORIGEN
	7	2.45-2.90	22.9	40	33.7	6.3	3.5	25.2	64.9						260	0.39				ML	Qal	
	13	7.5-7.7	35.4	39	33.9	5.2	2.8	12.1	85.1					205	0.41					ML	Qal	
	16-19	9-10.75	26.8						37.9	2.705	0.9	87.8	18.0	14.1	385	0.46	12742	35.0	29.0	SM	Qal	
	22	11.50-11.70	45.0	32	23.6	8.0			71.6						385	0.46				ML	Qal	
	25	12.50-12.70	23.84	30	23.8	5.8				2.759	0.8	82.0	19.0	15.3	385	0.46				ML	Qal	
	26	12.70-13.10	32.6												385	0.46						Qal
	28	13.50-13.95	29.43	38	35.6	2.1			78.1	2.828	0.96	87.0	18.7	14.4	385	0.46					ML	Qal
	31	14.50-14.70											17.9		159	385	0.46					Qal
PCA-02	32	14.70-15	25.30												385	0.46					Qal	
	8	4.50-4.85	22.0	38	30.2	8.1			55.2						237	0.19				ML	Pes V-IV	
	11	6-6.20	24.2	34	33.1	1.2			37.9						237	0.19				ML	Pes V-IV	
	17	9-9.20										18.7		190	350	0.39					Pes V-IV	
	17	9-9.20	18.8	24	22.6	1.7				2.768	0.70	74.0	19.3	16.3	350	0.39				SM	Pes V-IV	
	20	10.50-10.70	25.6	24	22.6	1.7									350	0.39				ML	Pes V-IV	
	21	10.7-11.15	25.6												350	0.39						Pes V-IV
	23	12-12.20	22.4	33	30.8	1.9			67.2	2.759	0.76	81.0	19.1	15.6	350	0.39				ML	Pes V-IV	
PCA-03	26	13.5-13.75	22.0	27	25.6	1.1			43.9						350	0.39				ML	Pes V-IV	
	27	13.70-14.15	18.8												440	0.36					Pes V-IV	
	10	4.5-5	43.5												210	0.33					FIIIV-V	
	13	6-6.50	50.8	60	42.6	17.6			72.0	2.741	1.46	95.6	16.5	10.9	210	0.33	15170	16.0	29.0	MH	FIIIV-V	
	16	7.5-8.0	46.6	42	28.3	13.6									210	0.33				ML	FIIIV-V	
	19	9-9.5	31.2	43	29	14.2									238	0.39				ML	FIIIV-V	
	23	11-11.45	30.2	41	26.6	14.7			65.0	2.714	0.90	91.6	18.3	15.0	238	0.39	14204	18.0	34.0	ML	FIIIV-V	
	25	12-12.35											18.3		150	238	0.39					FIIIV-V
	25	12-12.35	27.9	39	25.6	13.8			66.5	2.684	0.76	99.0	19.5	15.3	238	0.39				ML	FIIIV-V	
	25	12-12.35	35.7	43	27.6	15.9				2.639	1.05	90.0	17.5	12.9	238	0.39				ML	FIIIV-V	
PCA-04	26	12.35-12.80	27.7												238	0.39					FIIIV-V	
	28	13.5-13.65	19.5												238	0.39					FIIIV-V	
	29	13.65-14.10	30.4												238	0.39					FIIIV-V	
	37	18-18.2	16.3												238	0.39					FIIIV-V	
	2	1.5-1.75	20.2		NP								18.7		87	415					ML	FIIIV-V
	5	3-3.15	20.0	25	17	7.5			59.2	2.78					415						CL	FIIIV-V

MUNICIPIO DE LA ESTRELLA																						
PERFORACIÓN	MUESTRA número	PROPIEDADES ÍNDICE												VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN		
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	RETENIDO # 4 (CASCAJO) (%)	DE # 4 A # 200 (ARENA) (%)	PASA # 200 (FINOS) (%)	GRAV. ESPEC.	RELACION DE VACIOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HÚMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD-BENDER Vs (m/s)	VELOCIDAD-DOWN HOLE Vs (m/s)	RELACION DE POISSON (ν)	MÓDULO DE ELAST. (kPa)	COHESIÓN C (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIF. USCS	ORIGEN
PES-06	6	3.45-3.90	45.0												171	0.45						Fpre I VI
	9	4.95-5.5	30.3	55	40.8	14.6			91.3						260	0.45						MH Fpre I VI
	12	6.45-7	51.3												260	0.49						Fpre I VI
	21	10.95-11.50										18.9			168	230	0.49					Fpre I VI
	24	12.45-12.75	39.0												230	0.49						Fpre I VI
	29 Y 32	15-16.9	36.9	46	29.5	16.4			70.1	2.737	1.00	100.0	18.3	13.4	230	0.49	18792	28.0	42.0	ML	Fpre I VI	
	29	15-15.45	39.58	46	31.4	15.1			91.6	2.706	1.18	91.0	17.4	12.4	230	0.49					ML	Fpre I VI
	35	18-18.45	27.40	39	28.3	10.4			84.9						300	0.48						ML Fpre I IV-V
38	19.50-19.78	33.20	38	28.8	8.7			89.6	2.763	0.99	93.0	18.1	13.6	300	0.48						ML Fpre I IV-V	
PES-07	2	1.50-1.90	35.2																			capa organica
	6	3.45-3.80	56.6												112	0.45						Fprel VI
	11 y 14	6-8.0	53.7	55	33.2	22.1			80.9	2.815	1.49	96.9	16.7	10.9	260	0.49	29124	42.0	16.0	ML	Fprel VI	
	19	10.50-11.05	39.3	46	34.4	11.1			75.8	2.69	1.13	94.0	17.4	12.5	260	0.49					ML	Fprel VI
	28	15-15.4	21.6												220	0.49						ML Fprel VI
	34	18-18.55	55.2	54	33.8	20.4			96.4	2.68	1.51	98.1	16.6	10.7	220	0.48						MH Fprel VI
PES-08	34	18-18.50											16.3		79	220	0.48					Fprel VI
	3	2.35-2.95	39.6	61	38.1	22.7									301	0.48						MH Fprel VI
	15	9.05-9.40	25.4	34	22.8	11.1			85.6	2.767	0.71	99.0	19.9	15.9	301	0.48						CL Oal
	18	11.05-11.60												153	750	0.43						Oal

MUNICIPIO DE SABANETA																								
PERFORACIÓN	MUESTRA NÚMERO	PROPIEDADES ÍNDICE											VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN					
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	RETENIDO # 4 (CASGAJO) (%)	DE # 4 A # 200 (ARENA) (%)	PASA # 200 (FINOS) (%)	GRAV. ESPEC.	RELACION DE VACÍOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HUMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD- BENDER Vs (m/s)	VELOCIDAD- DOWN HOLE Vs (m/s)	RELACION DE POISSON (ν)	MÓDULO DE ELAST. (kPa)	COHESIÓN C (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIF. USCS	ORIGEN		
PSA-11	3	1.95-2.55	41.4	65	44.9	20		91.9						109	175	0.37				MH	F IV			
	5	3-3.6	19.1												175	0.35					F IV			
	8	4.5-5.1	19.2												175	0.35					F IV			
	11	6-6.5	29.9	43	26.3	17.1		69.0							175	0.35					CL	F IV		
	40	7.5-8										17.9		133	310	0.45						F IV		
	14	7.5-8	49.0	59	34.5	24.2		79.6	2.654	1.24	100.0	17.4	11.7		310	0.45					MH	F IV		
	14	7.5-8	27.64	36	32	4.4			2.649	0.87	84.0	18.1	14.2		310	0.45					SM	F IV		
	20	12.05-12.55	54.94	57	43.9	13.4		87.2	2.887	1.62	97.7	16.8	10.8		266	0.42	10551	55.0	27.0		MH	Pos IV-V		
25	14.05-14.45	33.59	41	30.2	10.7		90.7	2.932	1.16	85.0	17.8	13.3		266	0.46					ML	Pos IV-V			
PSA-12	5	3-3.6	23.5												198	0.31						PRaM-V-VI		
	8	4.5-5.1	36.0												198	0.31						PRaM-V-VI		
	11	6-6.3	32.7	52	38.2	13.3		95.6							198	0.31					MH	PRaM-V-VI		
	17	9-9.55	45.1	54	39.3	14.4		96.4	2.767	1.29	97.0	17.3	11.9		210	0.28					MH	PRaM-V-VI		
	20	10.5-10.9	23.8	56	37.4	18.3		98.7				17.6		110	210	0.28					MH	PRaM-V-VI		
	23	12-12.25	32.8	49	35.4	13.1		99.3							210	0.28					ML	PRaM-V-VI		
	26	13.15-14.10	31.2												210	0.49							PRaM-V-VI	
	29	15-15.6	38.6	49	36.1	12.8		96.4	2.725	1.04	100.0	18.1	13.1		290	0.48	13541	20.0	32.0		ML	PRaM-V-VI		
	32	16.50-16.80	37.3	60	41.7	18.6		95.8							290	0.48						MH	PRaM-V-VI	
	35	18.45-18.95	45.9	55	43.6	11.7		98.1	2.700	1.22	100.0	17.4	12.0		217	0.49						MH	PRaM-V-VI	
	35	18.45-18.95										17.5		111	217	0.49							PRaM-V-VI	
38	20.35-20.80	43.4												217	0.49							PRaM-V-VI		
41	21.65-22	52.7	55	37	18.4		95.6							217	0.49						MH	PRaM-V-VI		
PSA-13	2	1.5-2	67.2	35	21.6	13.6		74.4							170	0.46						CL	Qal	
	7	4.5-5.05	13.9	33	23.5	9.3		68.7							170	0.46							F III-IV	
	10	6-6.50	20.9												265	0.39							F III-IV	
	18	11.60-11.80	33.6	73	38.4	34.3		68.7							175	0.46						MH	F III-IV	
	21	13-13.5	40.4									18.2		82	175	0.46								F III-IV
PSA-14	2	1.5-2.1	26.0	38	27.9	10.1		61.3							173	0.36							PRnLC-V-IV	
	8	4.5-5.1	25.1	38	31.8	5.9		55.8							173	0.36							PRnLC-V-IV	
	14	7.5-8.1	27.6	36	31.9	4.4		45.2	2.649	0.87	84.0	17.7	13.9		234	0.17						ML	PRnLC-V-IV	
	17	9-9.3	25.9	34	26.1	7.8		60.2	2.661	0.78	88.1	18.4	14.6		234	0.17	12843	34	33			ML	PRnLC-V-IV	
	20	10.5-10.8	26.2	38	31.7	6.7		50.7							234	0.17							ML	PRnLC-V-IV
	23	12-12.25	25.8	35	26.8	8.3		59.7							200	0.30							ML	PRnLC-V-IV
	29	15-15.25										18.8		202	270	0.30								PRnLC-V-IV
35	18-18.25	31.3	38	27.9	9.6		59.6							240	0.47							ML	PRnLC-V-IV	



MUNICIPIO DE ENVIGADO																					
PERFORACIÓN	MUESTRA NÚMERO	PROPIEDADES INDICE											VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN		
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	PASA # 200 (FIMOS) (%)	GRAV. ESPEC.	RELACION DE VACÍOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HÚMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD BENDER V <sub>s</sub> (m/s)	VELOCIDAD-DOWN HOLE V <sub>s</sub> (m/s)	RELACIÓN DE POISSON (ν)	MÓDULO DE ELAST. (kPa)	COHESIÓN C (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIF. USCS	ORIGEN	
PEN-15	7	3.0-3.6	21.4	34	19	15	59.0						113.0						CL	FII - V-VI	
	10	5.0-5.6	20.6	26	16	10	62.3	2.71	0.57	97.0	20.8	17.3	147.0	113.0					CL	FII - V-VI	
	13	7.5-8.1	15.4	26	20	6	43.5				21.8	18.9		270.0	0.48		50.0	30.0	CL-ML	FII - V-VI	
	16	9.2-9.55	14.8	26	17	9	43.8	2.72	0.50	80.0	20.8	18.1		270.0	0.48				CL	FII - V-VI	
	23	12.25-12.7	12.1	21	17	4	35.9							270.0	0.48				ML	FII - V-VI	
	30	16.5-16.9	32.7	62	30	32	87.9							270.0	0.48				CH	FII - V-VI	
	33	18.0-18.5	36.8	49	33	16	81.9	2.72	1.07	93.0	17.9	13.1		270.0	0.48					PRnLC- III-IV	
	35	20.0-20.3	39.0	51	33	18	68.9				17.8	12.8	149.0	149.0	0.48	2166	50.0	23.0	MH	PRnLC III-IV	
	42	24.5-24.95	26.8	40	21	19	84.9						149.0	0.26					CL	PRnLC- III-IV	
PEN-16	4	3.4-3.9	22.0	30	24	6	80.3				20.9	17.1		257.0		3482	37.0	27.0	ML	FII- V	
	7	6.0-7.5				N.P	18.3							257.0	0.49					ML	FII- III-IV
	8	7.5-7.95	28.2	39	26	13	72.1							257.0	0.49				ML	FII- III-IV	
	10	9.45-9.95	18.9	31	19	12	70.9	2.75	0.53	98.6	21.3	17.9	221.0	425.0	0.47				CL	FII- III-IV	
	26	26.6-28.1	12.7	39	26	13	42.8							550.0	0.48				ML	FII- III-IV	
PEN-17	7	5.05-5.50	14.7	30	22	8	34.8							252.0	0.45				CL	FIII- IV-V	
	11	8.95-9.55	21.9	37	29	8	30.8							334.0	0.41				ML	FIII- IV-V	
	20	17.6-18.05	42.9	53	33	20	88.6							209.0	0.49				MH	PRnLC- V	
	29 y 30	27.7-28.1	15.8			N.P	39.0														PRnLC- III-IV
PEN-18	20	9.5-10.01	39.6	53	46	7	93.9	2.68	1.18	93.0	17.2	12.3		233.0	0.42				MH	PRnLC- V-VI	
	35	17.5-17.8	34.0	58	36	22	73.5							212.0	0.39				MH	PRnLC- V	
	44	23.5-24	31.4	52	32	20	71.5				17.7	13.5		212.0	0.39	8301	60.0	25.0	MH	PRnLC- V	
	53	29.6-30	34.3	58	36	22	88.5				18.6	13.8	163.0	299.0	0.16	4048	50.0	26.0	MH	PRnLC- V	
PEN-19	3	2.1-2.5	27.5	40	20	20	72.0							190.0					CL	GI	

MUNICIPIO DE COPACABANA																				
PERFORACIÓN	MUESTRA NÚMERO	PROPIEDADES ÍNDICE											VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN	
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	PASA # 200 (FINOS) (%)	GRAV. ESPEC.	RELACION DE VACÍOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HÚMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD-BENDER Vs (m/s)	VELOCIDAD-DOWN HOLE Vs (m/s)	RELACIÓN DE POISSON (v)	MÓDULO DE ELAST. (kPa)	COHESIÓN C' (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIF. USCS	ORIGEN
PCO-20	6	2.45-2.90	22.9	49	29	20	71.3							279.0	400.0				ML	FII- V
	11	4.50-4.80	35.7	50	35	16	85.1							242.0	253.0				MH	FII- V
	14	6.00-6.45	28.5	41	29	13	80.4	2.67	0.78	84.0	18.6	14.9		242.0	253.0				ML	PRnLC- V
	17	7.50-7.95	24.1	31	24	7	75.0				18.8	15.2		242.0	253.0		2290		ML	PRnLC- V
	29	13.50-13.85	28.3	33	28	5	70.7	2.72	0.80	90.0	19.1	15.1		400.0	325.0	0.49			ML	PRnLC- V
	34	16.50-16.90	29.2	40	29	10	75.7							400.0	282.0	0.49			ML	PRnLC- V
	45	27.35-27.55	28.1	44	29	15	86.7							462.0	0.47				ML	PRnLC- III-IV
PCO-21	4	1.50-1.90	23.1	57	24	33	43.2							279.0					CH	Qll
	10	5.60-6.00	31.8	48	30	19	70.4	2.70	1.03	82.0	17.5	13.3		242.0	242.0	0.47			ML	FII- IV-V
	16	9.00-9.45	18.8	37	22	15	71.5	2.88	0.70	76.0	20.1	16.9		242.0	242.0	0.47			CL	FII- IV-V
	24	15.15-15.60	19.9	36	18	18	63.4							400.0	400.0	0.47			CL	FII- III-IV
	35	23.65-24.10	27.3				74.0							482.0						FII- III-IV
PCO-22	7	3.10-3.70	39.2	53	28	25	58.6	2.71	1.05	98.0	18.4	13.2			160.0	0.48			CH	Qal
	10	5.20-5.55	31.5	44	22	22	56.3	2.78	1.03	84.0	18.0	13.7			160.0	0.48			CL	FIV- I-III
	13	7.25-7.70	22.7	32	22	8	39.6								580.0	0.45			CL	FIV- I-III
PCO-23	3	1.20-1.65	17.7	26	18	8	37.1								379.0	0.26			CL	Qat
	15	7.95-8.30	29.6	30	20	10	48.5							589.0	589.0	0.28			CL	FIV- V
	23	13.00-13.45	18.1	39	25	14	44.5							420.0	420.0	0.25			CL	FIV- V
PCO-24	5	1.75-1.90	19.2	36	19	18	47.6												CL	FIV- V-VI
	11	4.50-4.95	40.4	64	33	31	90.0	2.76	1.19	91.0	17.7	12.6			253.0	0.40			MH	FIV- V-VI
	14	6.00-6.60	35.1	42	24	18	69.3	2.83	0.90	100.0	20.1	14.9			253.0	0.40			CL	FIV- V
	17	8.10-8.70	39.2	66	32	34	83.1	2.77	1.12	100.0	18.2	13.1			300.0	0.35			CH	FIV- V
	20	10.10-10.65	44.5	45	31	14	78.4	2.73	1.15	99.0	18.3	12.7			300.0	0.49			ML	FIV- V
	24	12.20-12.65	25.1	34	21	13	58.5								320.0				CL	FIV- I-III
PCO-25	7	3.00-3.60	19.8	38	29	10	66.7	2.76	0.72	76.0	19.3	16.1			320.0	0.44			ML	FIII- V
	10	4.50-5.10	11.5	25	24	1	46.2	2.70	0.54	58.0	19.5	17.5			320.0	0.44			SM	FIII- V
	16	7.90-8.50	16.7	34	29	4	55.9	2.76	0.60	73.0	20.1	17.3			240.0	0.44			ML	FIII- V
	22	11.60-11.80	17.7			NP		2.74	0.76	64.0	18.4	15.6			350.0	0.37				FIII- V
	28	15.00-15.45	31.6	32	23	9	45.9								600.0	0.45			ML	FIV- IV

MUNICIPIO DE GIRARDOTA																				
PERFORACIÓN	MUESTRA NÚMERO	PROPIEDADES ÍNDICE										VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN		
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	PASA # 200 (FINOS) (%)	GRAV. ESPEC.	RELACION DE VACÍOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HÚMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD-BENDER V <sub>s</sub> (m/s)	VELOCIDAD-DOWN HOLE V <sub>s</sub> (m/s)	RELACIÓN DE POISSON (ν)	MÓDULO DE ELAST. (kPa)	COHESIÓN C' (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIF. USCS	ORIGEN
PGI-26	7	3,80-4,40	30.8			NP	49.4						105.0						CL	Qll
	28	14,60-15,00	22.2	48	21	27	45.6						400.0						CL	FIV- IV-V
	30	16,00-16,15	18.1	35	25	10	36.4						620.0						ML	FIV- IV-V
	33	17,60-18,05	29.6	35	27	11	54.6						620.0						ML	Qal
	48	29,60-29,80	25.3	29	20	8	30.4						600.0						CL	Qal
PGI-27	9	4,85-5,45	63.3	52	43	9	93.6	2.79	1.9	96.0	16.0	9.8	270.0						MH	FIII- VI
	12	7,15-7,70	43.4	39	29	10	72.4	2.82	1.3	92.0	17.3	12.1	400.0						ML	FIII- VI
	25	16,10-16,35	28.2	40	22	19	30.9						1200.0						CL	FIII- IV
PGI-28	11	4,30-4,80	50.0	70	47	23	90.0	2.73	1.3	100.0	17.7	11.8	250.0						MH	FIV- V
	17	7,20-7,80	44.4	48	34	14	82.3	2.70	1.14	100.0	18.3	12.6	130.0						ML	KcdA- V
	20	8,70-9,30	39.8	43	33	10	72.0	2.69	1.00	100.0	18.8	13.4	130.0						ML	KcdA- V
	24	10,65-11,25	31.9	38	19	19	52.4	2.79	0.88	100.0	19.5	14.8	190.0						CL	KcdA- V
PGI-29	5	1,80-2,25	34.6	58	28	30	79.5						120.0						CH	KcdA- VI
	10	4,05-4,50	19.0			NP	26.9						370.0							KcdA- V
PGI-30	3	1,05-1,65	40.9	60	33	26	81.9	2.72	1.08	100.0	18.5	13.1	220.0						MH	KcdA- V
	9	4,20-4,80	33.1	41	26	15	73.3	2.79	0.90	100.0	19.5	14.7	220.0						ML	KcdA- V
	13	6,30-6,90	35.3	39	24	15		2.66	0.96	97.0	18.3	13.6	220.0						CL	KcdA- V

PERF.	MUESTRA NÚMERO	MUNICIPIO DE BARBOSA											VELOC. ONDA DE CORTE		DEFORMABILIDAD		RESISTENCIA AL CORTE		CLASIFICACIÓN		
		PROFUNDIDAD (m)	HUMEDAD NATURAL (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	FASA # 205 (FINOS) (%)	GRAV. ESP.	RELACION DE VACIOS	GRADO DE SATUR.	PESO UNITARIO HÚMEDO (kN/m <sup>3</sup> )	PESO UNITARIO SECO (kN/m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD BENDER V <sub>s</sub> (m/s)	VELOCIDAD DOWN HOLE V <sub>d</sub> (m/s)	RELACION DE POISSON (ν)	MÓDULO DE ELAS. (KPa)	COHESIÓN C' (kPa)	ÁNGULO DE FRICCIÓN φ(°)	CLASIFICACIÓN USCS	ORIGEN	
PBA-32	5	1,85-2,30	29,1	53	24	29													CH	F-IV	
	7	3,00-3,60	22,2	42	24	18	37,2							260,0	0,16				CL	F-IV	
	10	4,50-5,10	26,9	31	22	9	49,7	2,63	0,74	96,0	19,3	14,8		470,0	0,26		43,0	28,0	ML	F-IV	
	14	7,05-7,50	28,6											470,0	0,26					F-IV	
	17	8,60-9,05	33,6	31	24	7	48,9							470,0	0,26				ML	F-IV	
	19	10,15-10,75	39,3	37	28	9	61,0	2,7	1,1	99,00	17,60	12,6		210,0	0,47				ML	F-IV	
	20	10,75-11,20	30,0											210,0	0,47					F-IV	
	23	12,70-13,15	36,5	37	25	12	58,7							210,0	0,47				ML	KedA	
	27	15,50-15,75											187,8	210,0	0,47						KedA
	28	15,70-15,80												400,0	0,35						KedA
30	17,15-17,25	18,4											400,0	0,35						KedA	
33	19,15-19,25	17,6	-	NP	NP	11,1							980,0	0,39						KedA	
35	20,35-21,45	25,6				17,2							980,0	0,39						KedA	
PBA-33	5	1,95-2,40	40,4	98	38	60	91,0							210,0	0,38				CH	Qll	
	8	3,60-4,05	32,9											210,0	0,38						PES-VI
	11	5,10-5,55		54	38	16	77,5							210,0	0,38				MH	PES-VI	
	14	6,85-7,30	45,9											210,0	0,38						PES-VI
	16	8,45-8,55	37,8	51	41	10	81,5	2,79	1,20	88,0	17,2	11,8	136,6	210,0	0,38				MH	PES-VI	
	17	8,85-9,30	54,6	59	42	17	89,7							210,0	0,38				MH	PES-V	
	23	12,75-13,20	47,3	54	41	13	88,3							300,0	0,45				MH	PES-V	
	26	14,75-15,20	44,2											300,0	0,45						PES-V
	28	16,15-16,75	56,7	56	47	9	93,6	2,82	1,65	97,0	16,4	10,4	223,3	300,0	0,45				MH	PES-V	
	29	16,75-17,20	55,0											300,0	0,45						PES-V
31	18,55-19,15	55,0	68	53	15		2,87	1,68	94,0	16,3	10,5		300,0	0,45		22,6	32,5	MH	PES-V		
32	19,15-19,50	57,6	65	47	18	94,6							300,0	0,45				MH	PES-V		
34	20,40-20,80	65,0	76	52	24	99,1							300,0	0,45				MH	PES-V		
40	25,15-25,60	21,7											350,0	0,43						PES-V	
PBA-34	6	2,55-3,00	28,0	33	23	10	55,8							306,0	0,32				CL	F-IV	
	8	3,50-4,35	22,0	36	23	13		2,59	0,69	82,0	18,3	15,0		306,0	0,32				CL	F-IV	
	9	4,00-4,35	24,3											306,0	0,32						F-IV
	11	5,60-6,05	33,9	38	19	18	57,1							306,0	0,32				CL	F-IV	
	13	6,50-7,00	32,9	30	20	10	50,3	2,63	0,87	100,0	18,4	13,8	117,7	306,0	0,32				CL	F-IV	
	14	7,00-7,30	28,5	28	18	10	52,0							306,0	0,32				CL	F-IV	
	16	8,45-8,55	21,6											306,0	0,32						F-IV
	18	9,90-10,30	25,8	31	26	5	45,7	2,69	0,70	98,0	19,4	15,5	181,2	460,0	0,47		0,0	40,0	SM	F-IV	
19	10,50-10,95	22,6	29	24	5	48,7							460,0	0,47				ML	F-IV		
24	13,15-13,60		28	21	6	43,7							460,0	0,47					CL-ML	F-IV	
PBA-35	2	1,50-2,00		53	25	28	65,9							323,0	0,43				CH	F III-IV	
	3	2,10-2,60	36,7	45	24	21	67,7							323,0	0,43				CL	F III-IV	
	8	5,15-5,70	24,5	25	20	5	43,1	2,63	0,59	100,0	20,2	16,2	254,0	323,0	0,43				SC-SM	F III-IV	
	18	11,05	21,7				38,4							323,0	0,48					KedA	
PBA-36	16	13,85-14,35	24,4	32	23	9	52,2	2,75	0,71	94,0	19,5	15,7	196,5	250,0	0,49				ML	KedA	
	17	14,15-14,65	14,2	38	24	14	56,2							250,0	0,49				CL	KedA	
	19	15,50-16,00	15,5				43,9							250,0	0,49					KedA	
	22	18,45-18,95	18,5	36	25	12								250,0	0,49				ML	KedA	
	24	20,00-20,45	20,0				47,9							400,0	0,48					KedA	
	26	22,00-22,45	22,0											323,0	0,43					KedA	

**Tabla 7.8. Valores límite de propiedades índice por formación ensayos realizados en este estudio**

MUNICIPIO	CLASIFICACIÓN USCS	PROPIEDADES ÍNDICE														RESISTENCIA AL CORTE			
		HUMEDAD NATURAL, w (%)		LÍMITE LÍQUIDO, LL (%)		ÍNDICE DE PLASTICIDAD, IP (%)		% FINOS		GRAVEDAD ESPECÍFICA, G <sub>s</sub>		RELACIÓN DE VACÍOS, e		PESO UNITARIO HÚMEDO, γ <sub>h</sub> (kN/m <sup>3</sup> )		ÁNGULO DE FRICCIÓN, φ' (°)		COHESIÓN, c (kPa)	
		Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior	Límite inferior	Límite Superior
<i>SUELO RESIDUAL DE ESQUISTOS</i>																			
CALDAS	ML	18	25	24	38	1	8	44	67	2,76	2,77	0,70	0,76	18,7	19,3				
SABANETA	ML - MH	35	55	40	57	10	13	87	91	2,89	2,93	1,16	1,62	16,8	17,8	27	27	55	55
INTERVALO	ML - MH	18	55	24	57	1	13	44	91	2,76	2,93	0,70	1,62	16,8	19,3	27	27	55	55
<i>SUELO RESIDUAL DE GNEIS</i>																			
SABANETA	ML	25	31	33	38	4	10	45	61	2,65	2,66	0,78	0,87	17,7	18,8	33	33	34	34
COPACABANA	ML	24	30	31	41	5	15	70	87	2,67	2,72	0,78	0,80	18,6	19,1				
INTERVALO	ML	24	31	31	41	4	15	45	87	2,65	2,72	0,78	0,87	17,7	19,1	33	33	34	34
<i>SUELO RESIDUAL DE GNEIS ANFIBÓLICO</i>																			
SABANETA	MH	23	45	49	60	12	18	95	99	2,70	2,77	1,04	1,29	17,3	18,1	32	32	20	20
ENVIGADO	MH	27	40	53	58	6	22	70	94	2,68	2,72	1,07	1,18	17,2	18,6	25	26	60	50
INTERVALO	MH	23	45	49	60	6	22	70	99	2,68	2,77	1,04	1,29	17,2	18,6	25	32	20	50
<i>SUELO RESIDUAL DEL BATOLITO ANTIOQUEÑO</i>																			
GIRARDOTA	CL - ML	19	40	38	60	10	26	52	82	2,69	2,79	0,88	1,14	18,3	19,5				
<i>DEPÓSITO ALUVIAL</i>																			
CALDAS	ML	23	35	30	40	2	8	65	78	2,70	2,82	0,80	0,96	17,9	19,0	29	29	35	35
GIRARDOTA	CL - ML	24	30	30	50	8	28	27	55										
INTERVALO	CL - ML	23	35	30	50	2	28	27	78	2,70	2,82	0,80	0,96	17,9	19,0	29	29	35	35
<i>FLUJOS RECIENTES</i>																			
CALDAS	ML	30	50	40	43	8	18	60	72	2,64	2,78	0,76	1,46	16,5	19,5	29	34	16	18
SABANETA	MH - CL	20	40	36	64	17	20	70	92	2,65	2,65	0,87	1,24	17,4	18,2				
ENVIGADO	CL - ML	12	22	30	40	6	13	30	80	2,75	2,75	0,53	0,53	20,9	21,3	27	27	37	37
COPACABANA	CL - ML	18	32	32	66	8	31	45	90	2,73	2,88	0,70	1,15	17,5	20,1				
GIRARDOTA	CL - ML - MH	18	63	35	52	9	27	36	94	2,73	2,82	1,30	1,90	16,0	17,7				
INTERVALO	CL - ML - MH	12	63	30	66	6	31	30	94	2,64	2,88	0,53	1,90	16,0	21,3	27	34	16	37
<i>FLUJOS MADUROS</i>																			
LA ESTRELLA	ML - MH	30	55	38	55	8	22	70	96	2,68	2,81	1,00	1,51	16,3	18,9	16	42	42	28
ENVIGADO	CL - ML	12	21	21	34	4	15	43	88	2,71	2,72	0,50	0,57	20,8	21,8	30	30	50	50
COPACABANA	CL - ML	17	35	26	50	8	20	45	85	2,70	2,76	0,54	0,72	18,4	20,1				
INTERVALO	CL - ML - MH	12	55	21	55	4	22	43	96	2,68	2,81	0,50	1,51	16,3	21,8	16	42	42	50

En la Tabla 7.9 se presentan los valores promedio, desviación estándar, máximos y mínimos por tipo de material de la base de datos procesada.

La variación de las propiedades índice de un perfil geotécnico está asociada con su tasa de meteorización, la cual a su vez es fundamentalmente gobernada por la composición mineralógica del material parental; el patrón de discontinuidades, que controla la facilidad de penetración del agua subterránea y la historia climática de la región. En el Valle de Aburrá se presentan precipitaciones promedio anuales variables, por consiguiente los materiales están sometidos a procesos de meteorización de diferente intensidad y además de esto, los minerales que conforman el material parental al meteorizarse generan diferentes colores, texturas y consistencia. Es por esto que a continuación se hace un análisis de propiedades índice donde la principal fuente de clasificación es la geología (tipo de formación).

De las Tablas 7.7 y 7.8 se puede concluir que en general, la humedad natural varía entre 12% y 63%; sin embargo, los suelos residuales derivados de gneis y los depósitos aluviales presentan variaciones menores (24% a 31%); la reducción de la humedad con la profundidad sólo presenta una tendencia clara en las muestras obtenidas de las perforaciones de Girardota. El límite líquido tiene un rango de variación entre 20% y 60%; pero nuevamente, los suelos residuales derivados de gneis presentan un intervalo más cerrado, entre 30% y 40%. De los índices de plasticidad, que se encuentran entre 1% y 30%, tienen la menor variación los suelos residuales derivados de esquistos y gneis (hasta 15%) y las mayores variaciones las tienen los depósitos aluviales y los flujos recientes (hasta 30%). Los suelos que presentan un mayor Límite Líquido corresponden a los suelos residuales de anfíbolita.

No hay una tendencia clara del porcentaje de finos con la profundidad, exceptuando los valores obtenidos de las perforaciones PGI 27 y PGI 28 de Girardota, en donde se observa claramente la reducción del porcentaje de finos con la profundidad, dichas perforaciones corresponden a un flujo y a un suelo residual del Batolito Antioqueño, respectivamente.

En cuanto al tipo de suelo (se trabajó con el Sistema de Clasificación Unificada, USCS), los suelos residuales de gneis anfibólico se clasificaron como limos de alta compresibilidad (MH) y en los suelos transportados se presenta en un alto porcentaje arcillas de baja plasticidad (CL).

En la Tabla 7.8 se resaltan los pesos unitarios húmedos que presentan un valor inusualmente alto (entre 20 y 21 kN/m<sup>3</sup>), corresponden a flujos recientes y maduros; dichos pesos unitarios están asociados a bajos valores de relaciones de vacíos como puede observarse en la misma tabla ( $e$  entre 0,50 y 0,57). Valores altos de gravedad específica, como los encontrados en los suelos residuales de esquistos en Sabaneta (2,93), están asociados a minerales tales como biotitas (del grupo de las micas) y hornblendas (del grupo de los anfíboles), estos minerales son los que se encuentran en

mayor proporción en los esquistos, lo cual quiere decir que no han sufrido mucha alteración durante el proceso de meteorización que ha tenido este material.

Los parámetros de resistencia al corte no muestran muchas variaciones, el ángulo de fricción interna se encuentra en un intervalo entre 25° y 34°, a excepción de los flujos maduros de La Estrella en donde se obtuvo un  $\phi$  de 42°. Las mayores variaciones se presentan en la cohesión, en donde se tienen valores entre 15 kPa y 60 kPa; la cohesión depende de las condiciones ambientales tales como la succión matricial, la cual es función grado de saturación; por tanto depende del régimen de lluvias en que se tomaron las muestras y se hizo la prueba de resistencia al corte.

La información resultante de la exploración, se complementó mediante recopilación de registros de perforaciones, ensayos de campo y laboratorio, realizados en la ciudad de Medellín y en los municipios del norte (Bello, Copacabana, Girardota y Barbosa) y del sur (Caldas, La Estrella, Itagüí, Sabaneta y Envigado) del Valle de Aburrá por la firma Solingral S.A.; esta recopilación incluye la información de ensayos de la Microzonificación de Medellín de 1999 y del Valle de Aburrá de 2002 y también se utilizaron las tesis de maestría de Otálvaro (2005) donde se hace una caracterización estática y dinámica de los suelos residuales del Gabro, y de Betancur (2006) en donde se hace una caracterización estática y dinámica de los suelos residuales del Stock de Altavista. Con dicha información se creó una base de datos que permitió caracterizar de una manera más detallada cada una de las formaciones geológicas existentes en el Valle de Aburrá.

De la Figura 7.3 a la Figura 7.17 se presentan los resultados del procesamiento de las bases de datos. Para cada formación identificada se presenta la variación de la humedad, límite líquido, índice de plasticidad y el peso unitario húmedo y seco con la profundidad, los valores de los límites de Atterberg en la carta de plasticidad y la variación de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad.

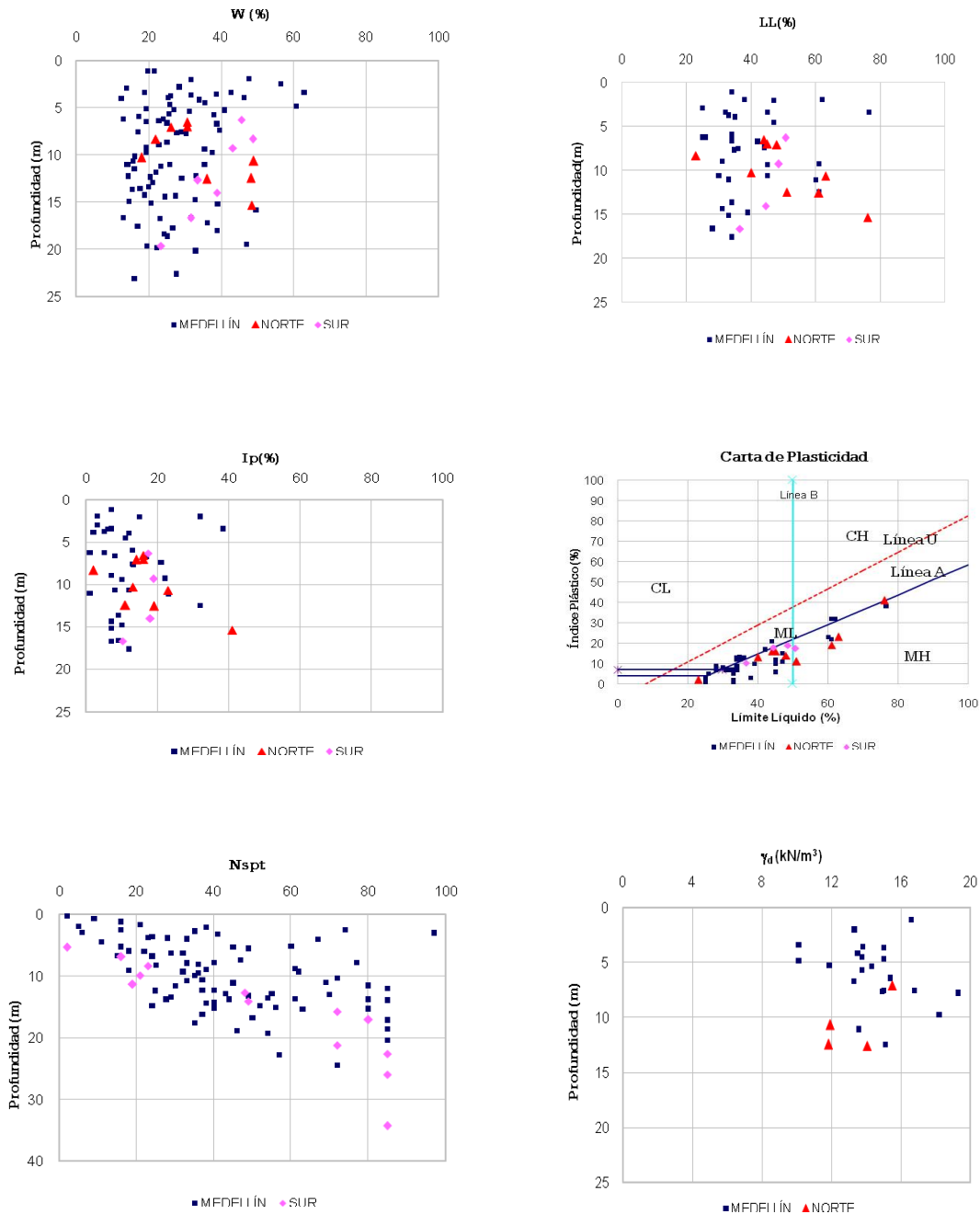


Figura 7.3 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de anfibolita



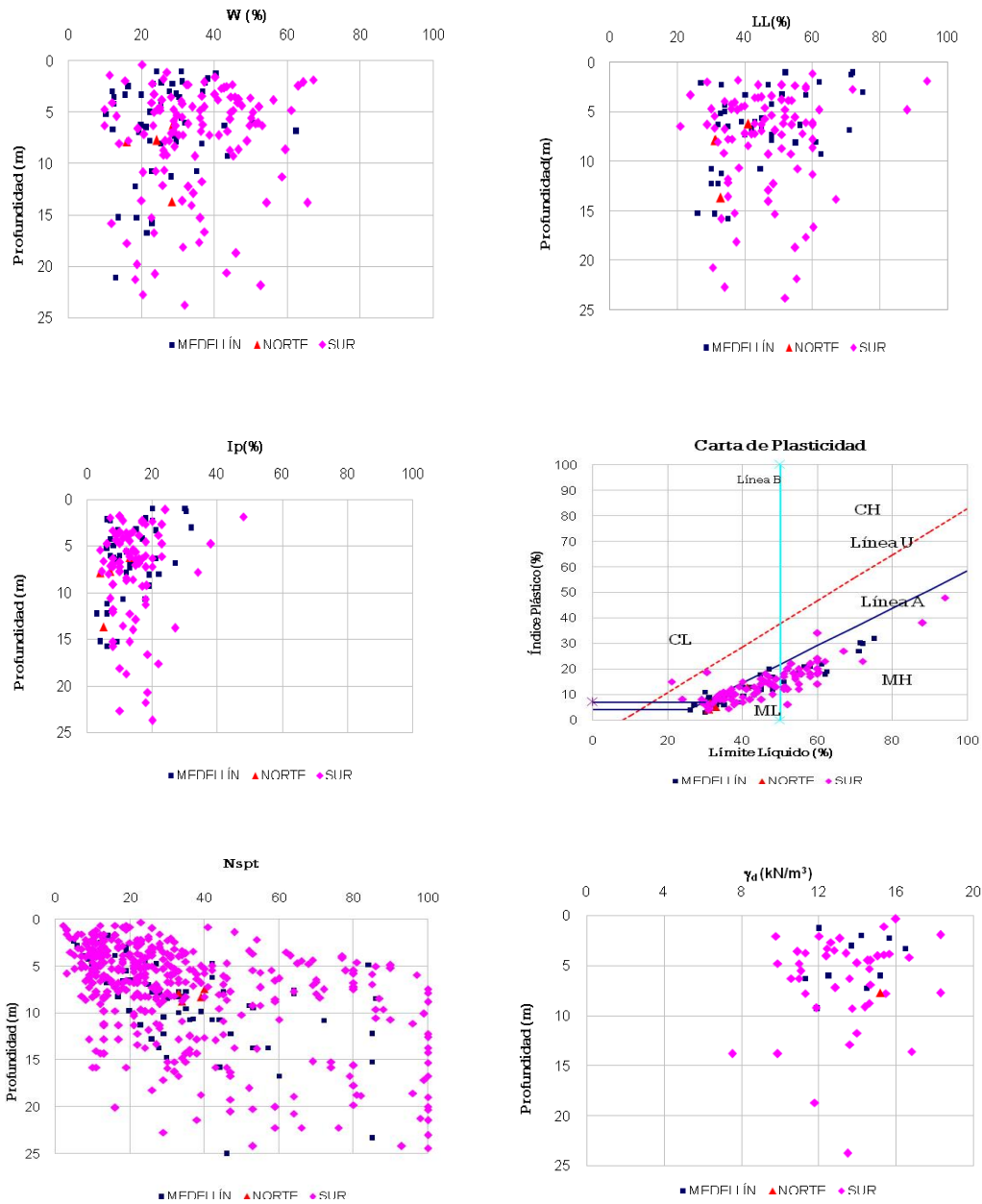


Figura 7.4 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales Neis

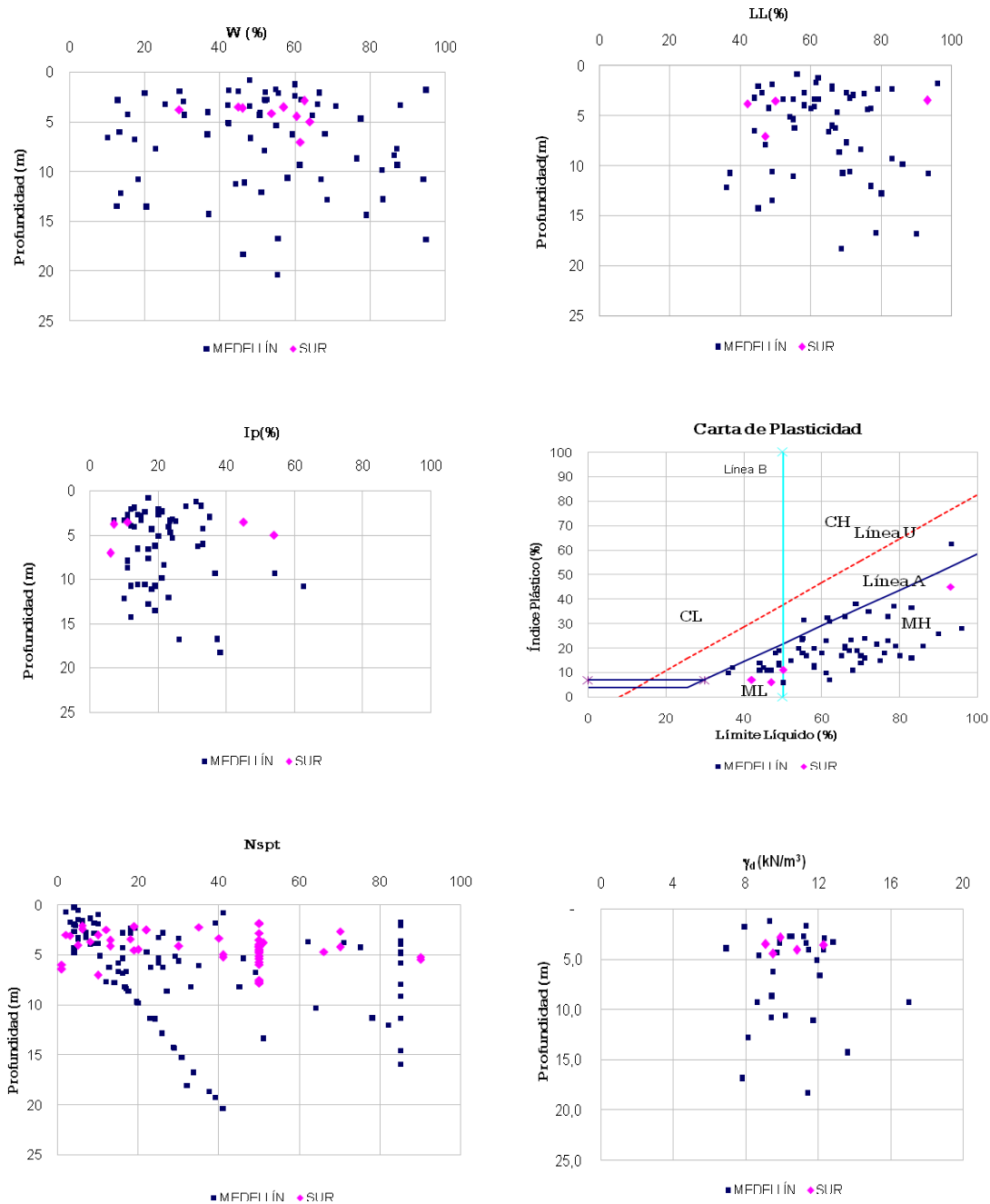


Figura 7.5 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de dunita

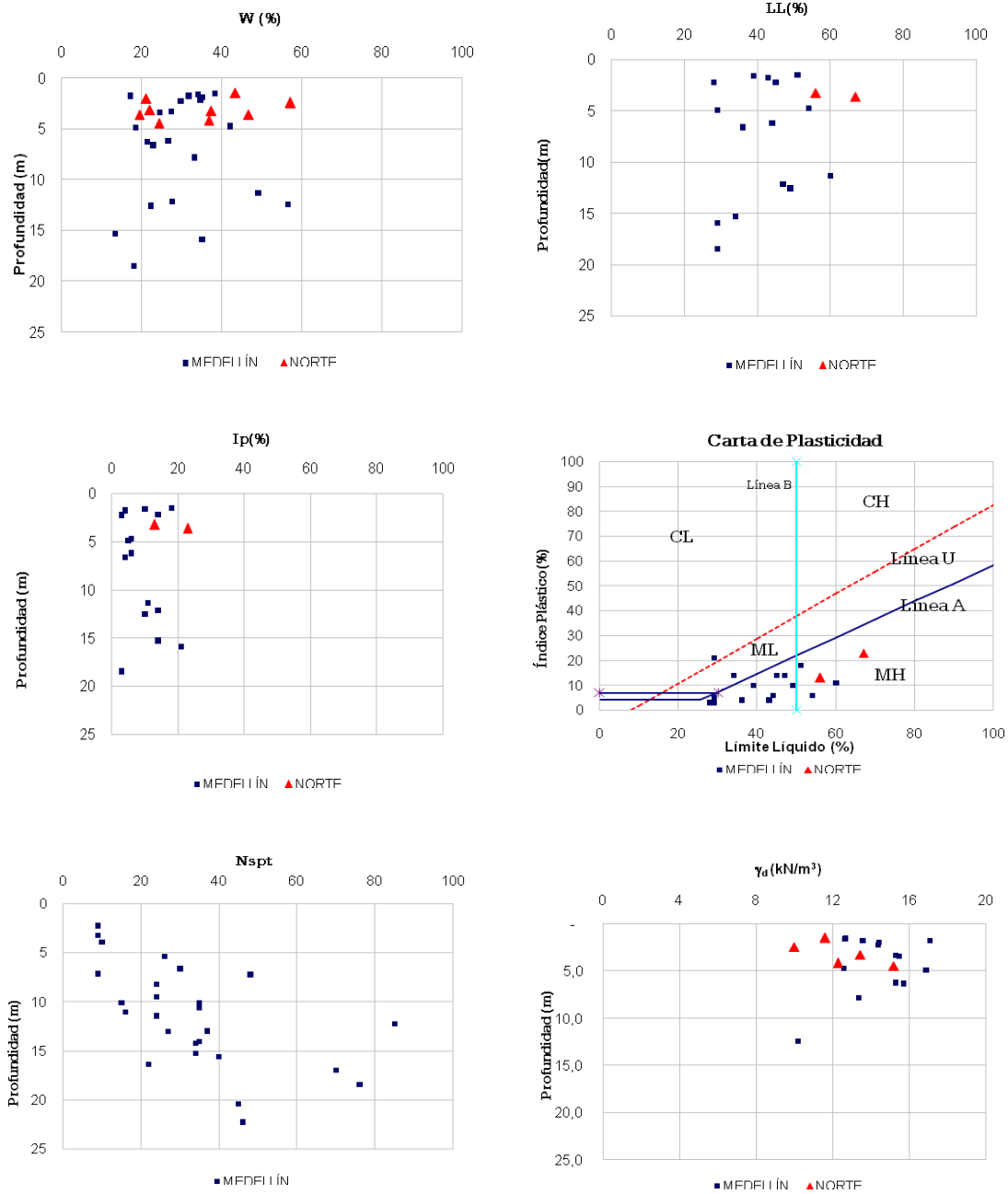


Figura 7.6 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de esquistos

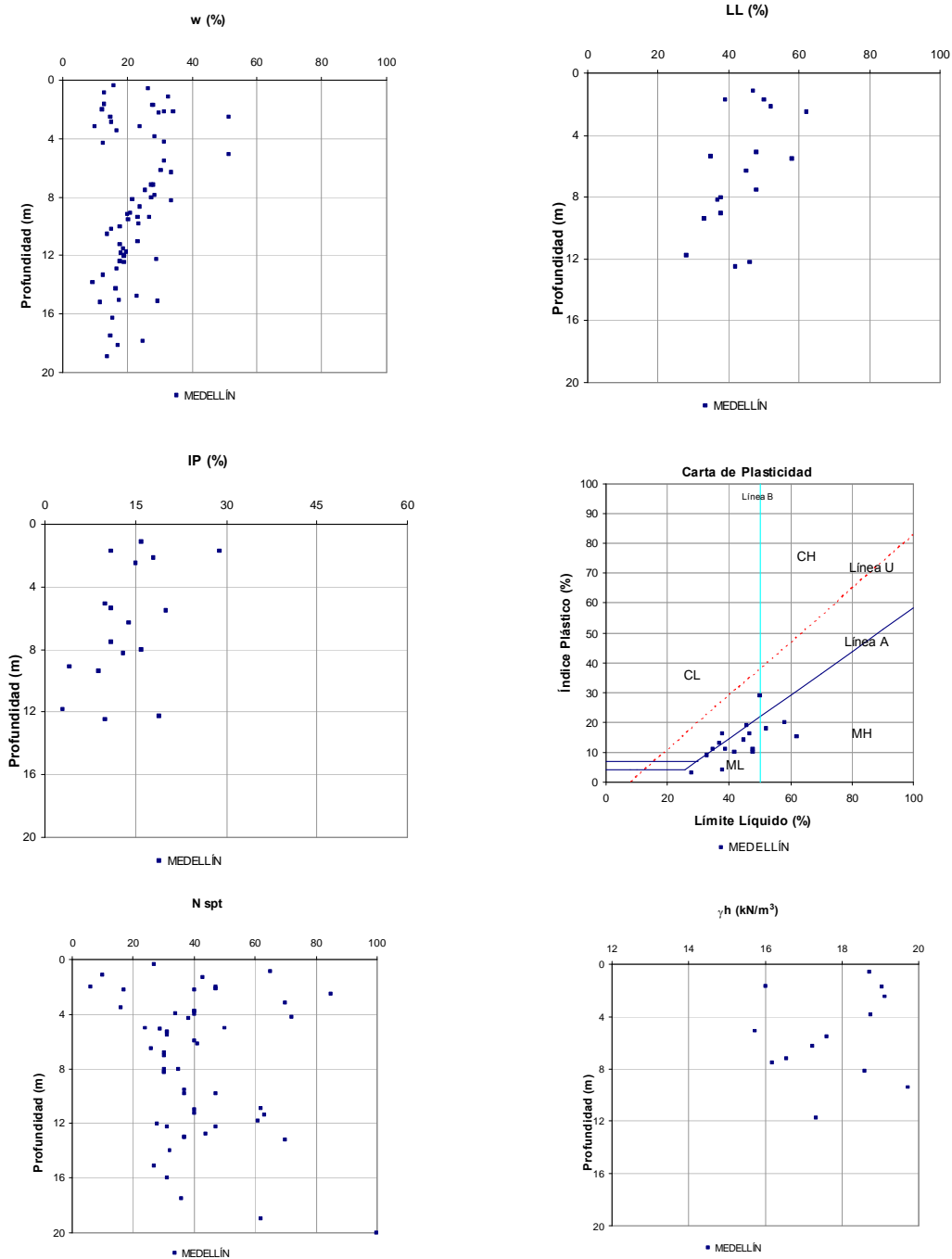


Figura 7.7 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de granodiorita y cuarzdiorita

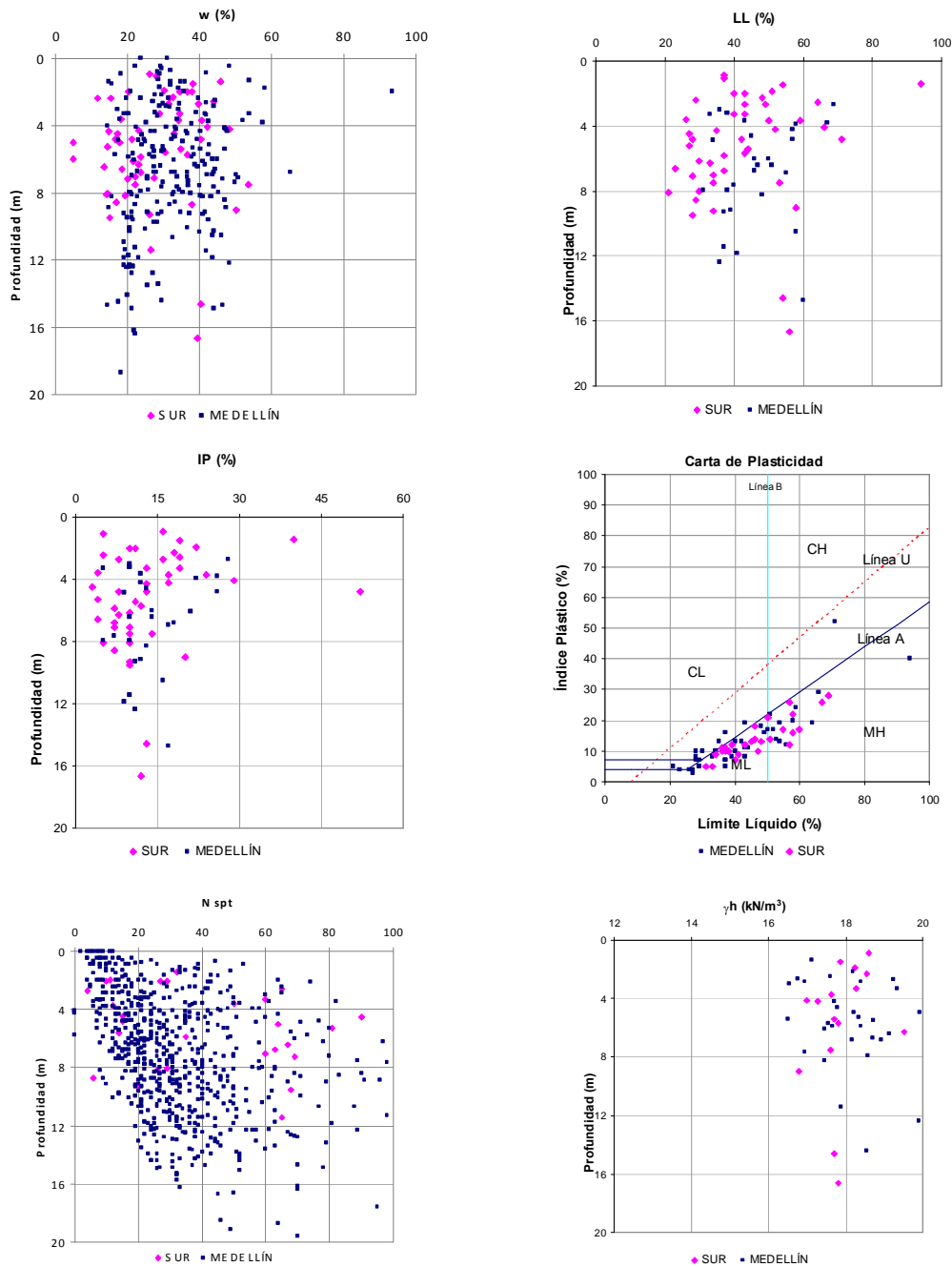


Figura 7.8 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de diorita

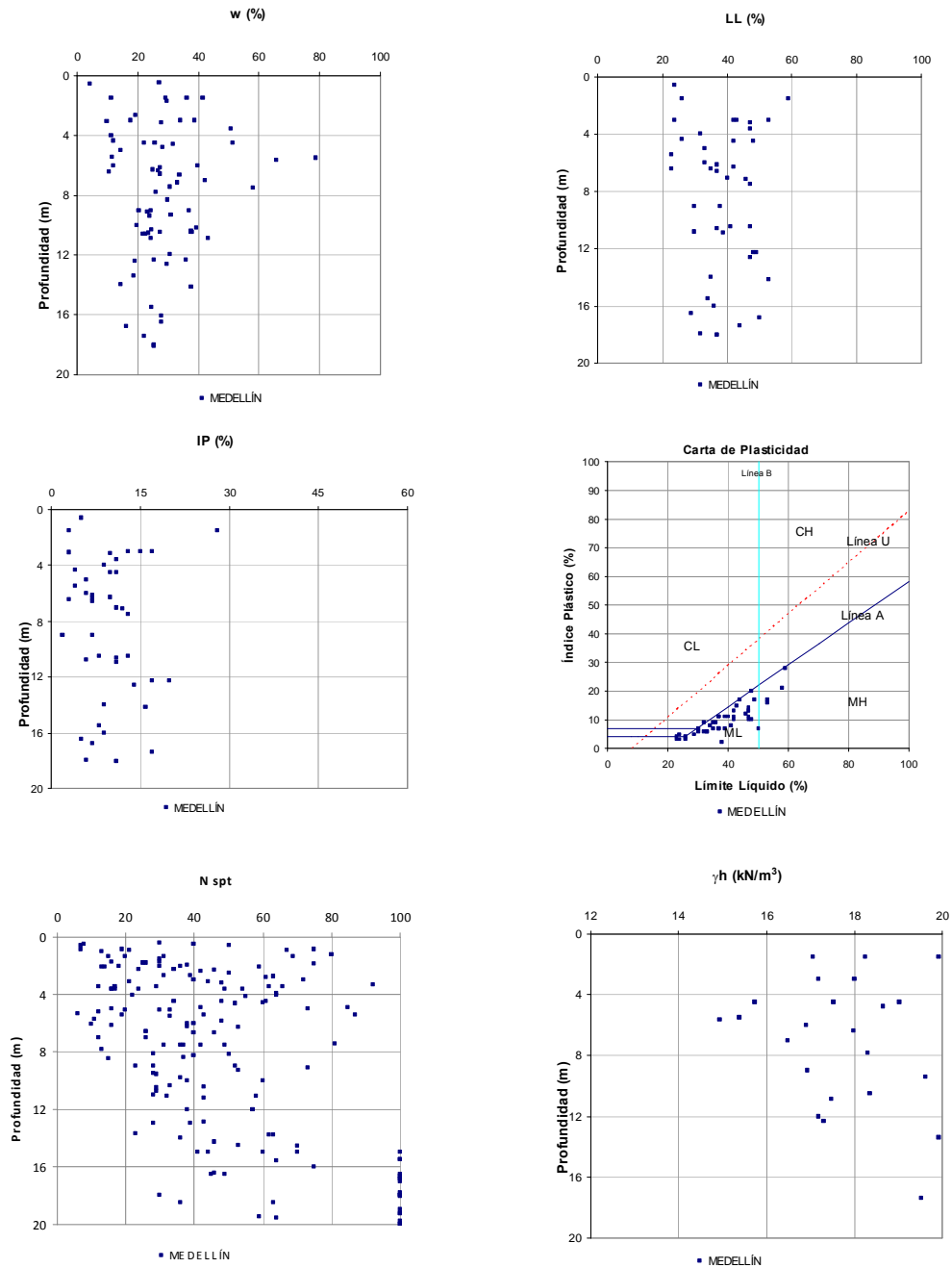


Figura 7.9 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de gabro

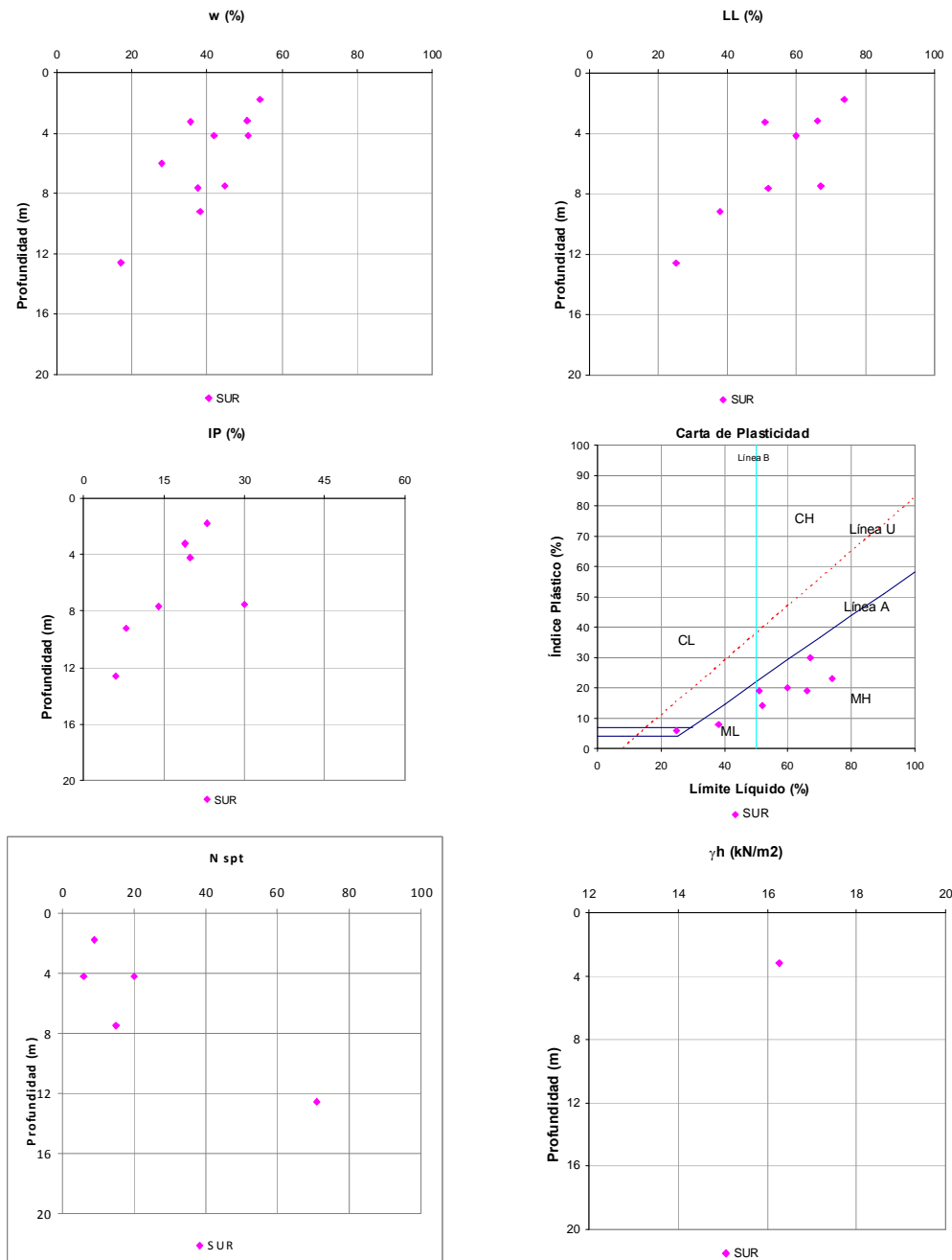


Figura 7.10 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de Migmatitas

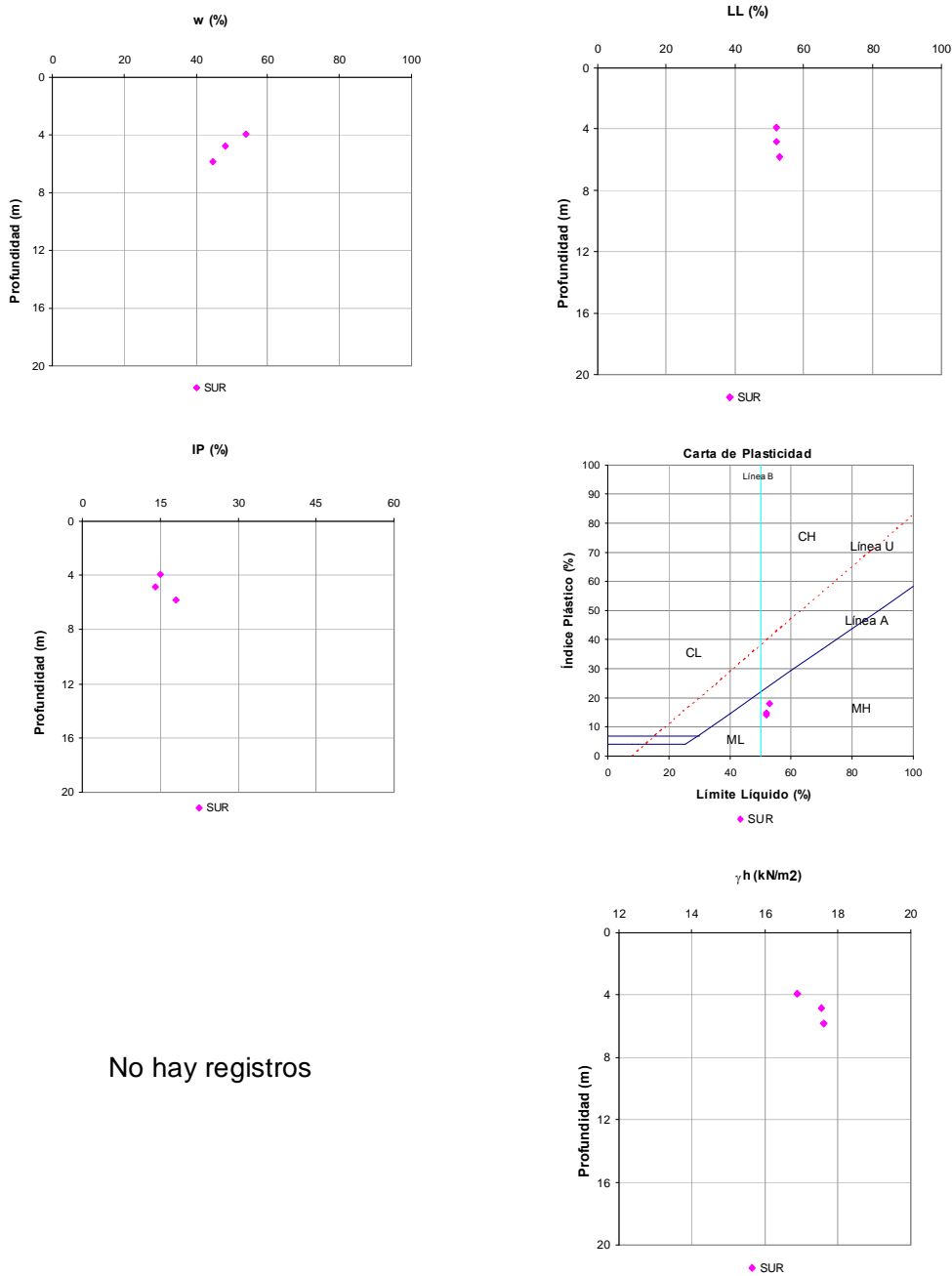


Figura 7.11 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los suelos residuales de Rocas Volcánicas



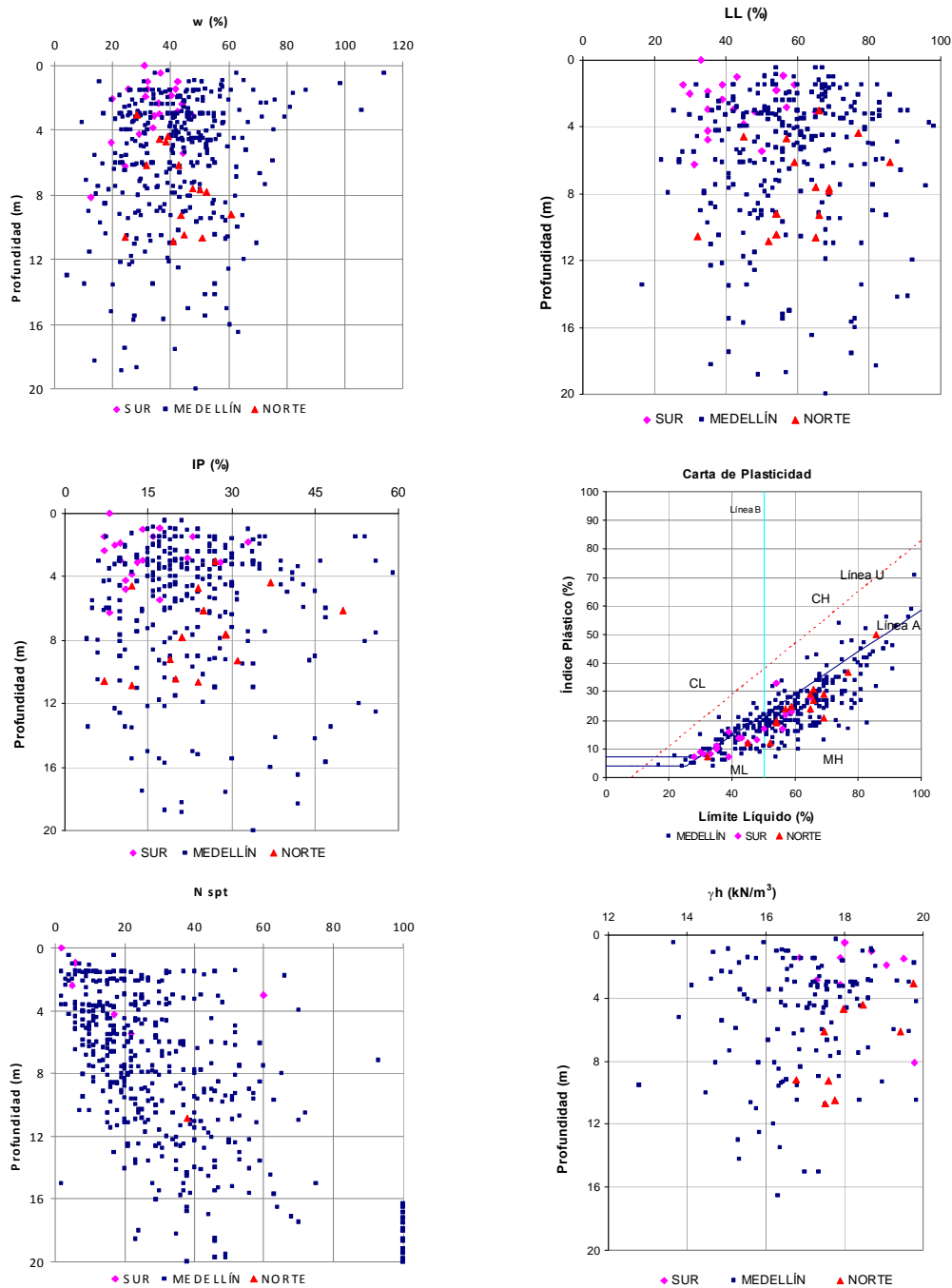


Figura 7.12 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los depósitos de deslizamiento y de vertiente

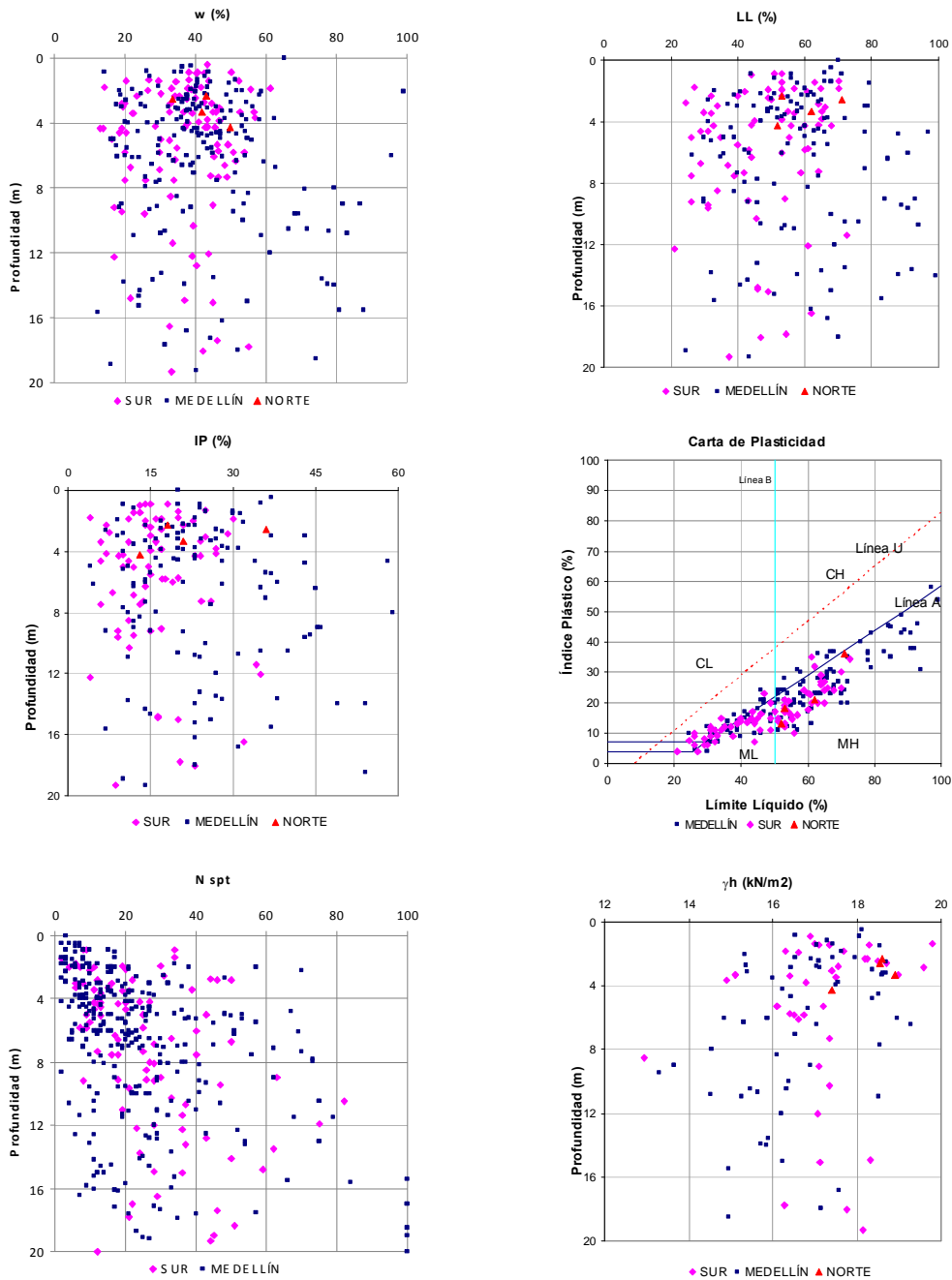


Figura 7.13 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los flujos de lodos recientes y meteorizados

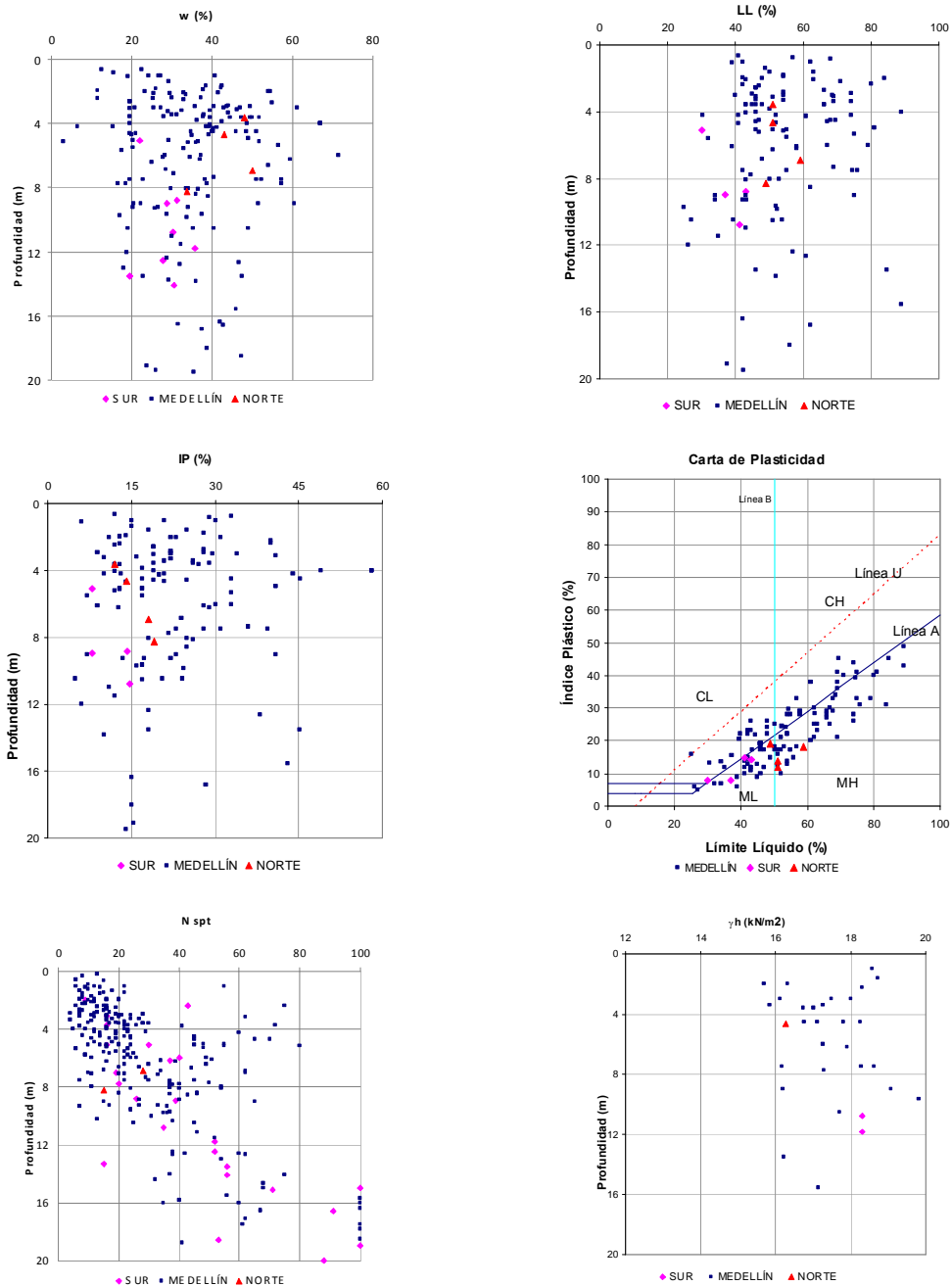


Figura 7.14 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los flujos de escombros recientes y meteorizados

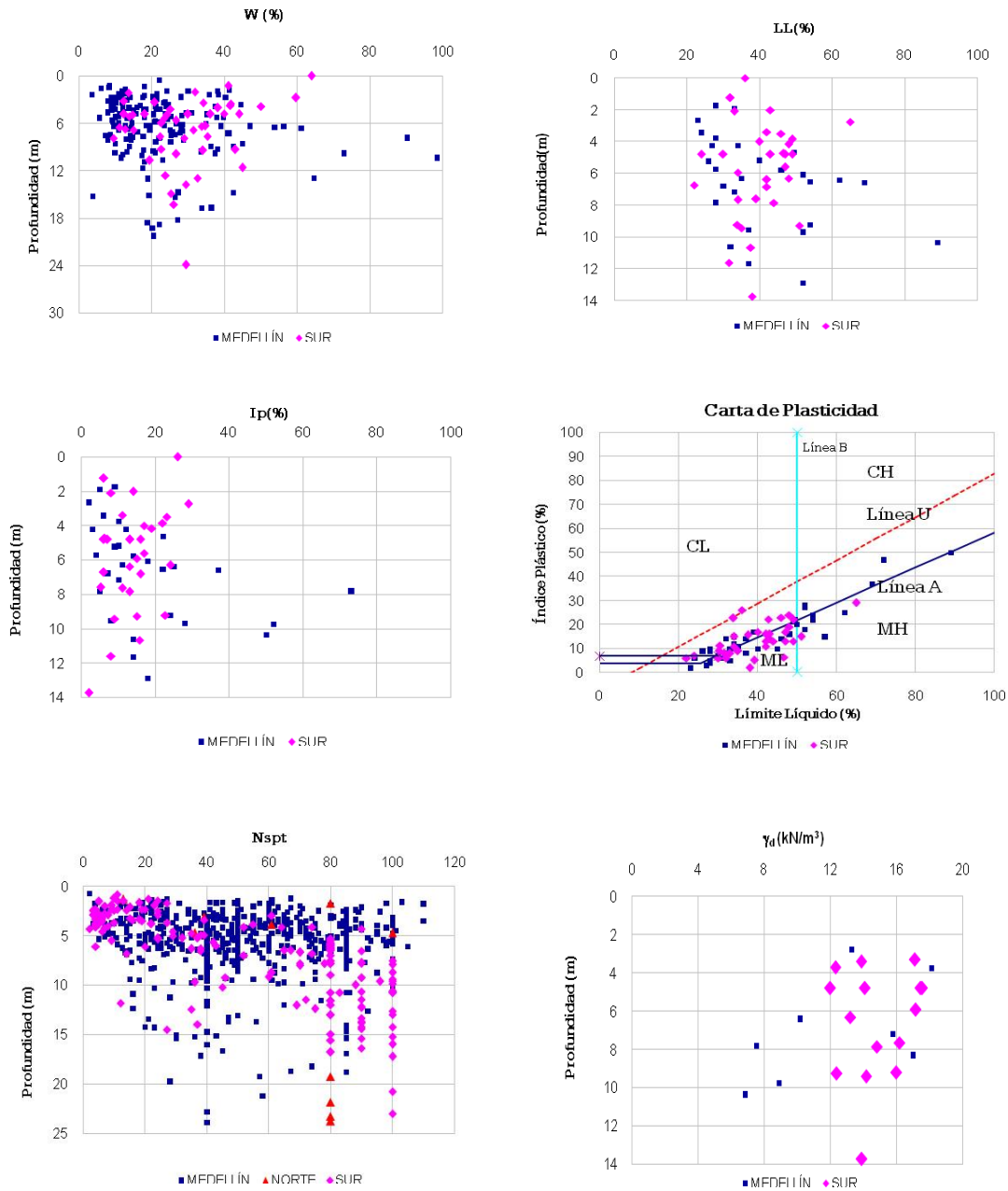


Figura 7.15 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los depósitos aluviales gruesos

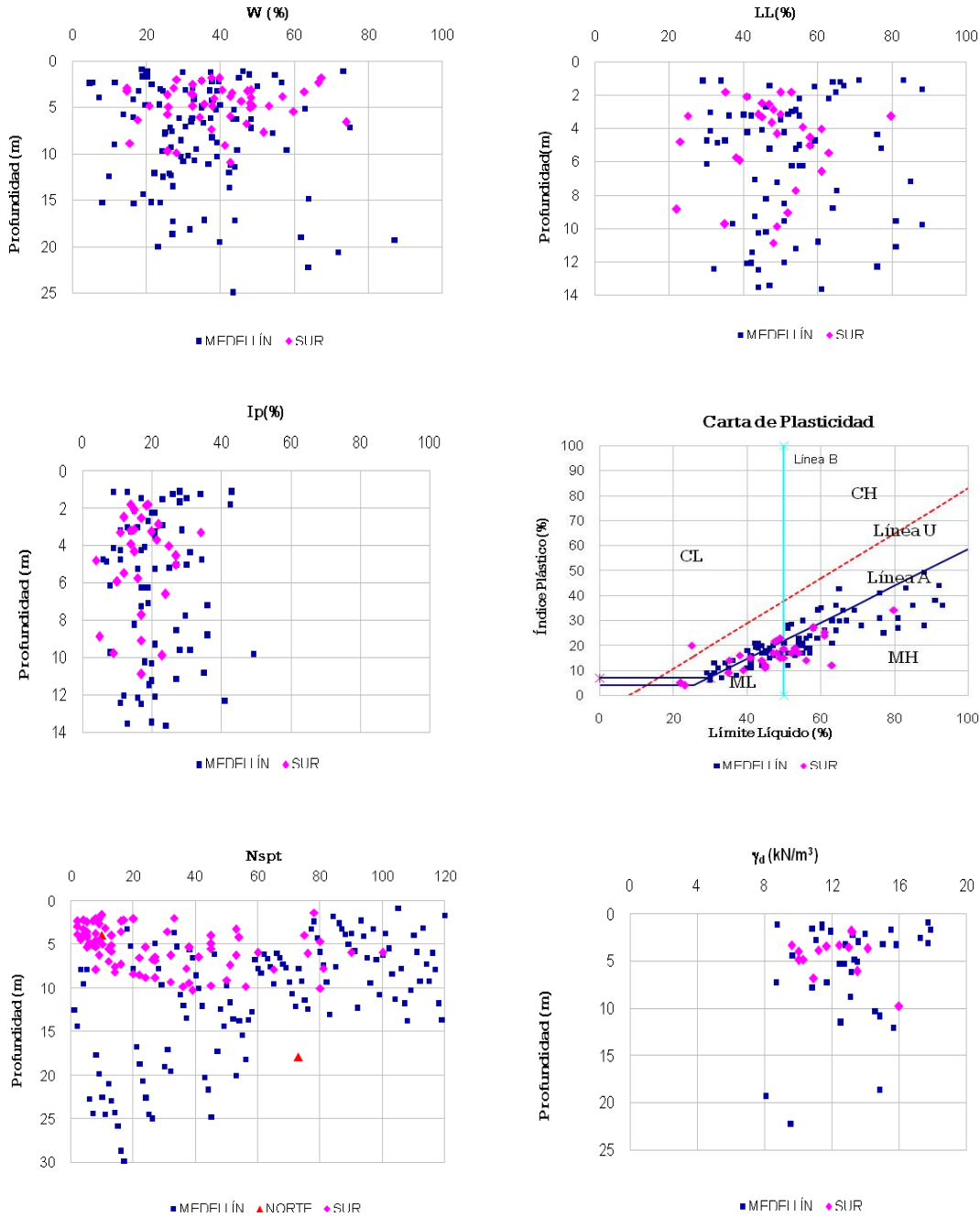


Figura 7.16 Variación de propiedades índice y  $N_{spt}$  con la profundidad para los depósitos aluviales finos

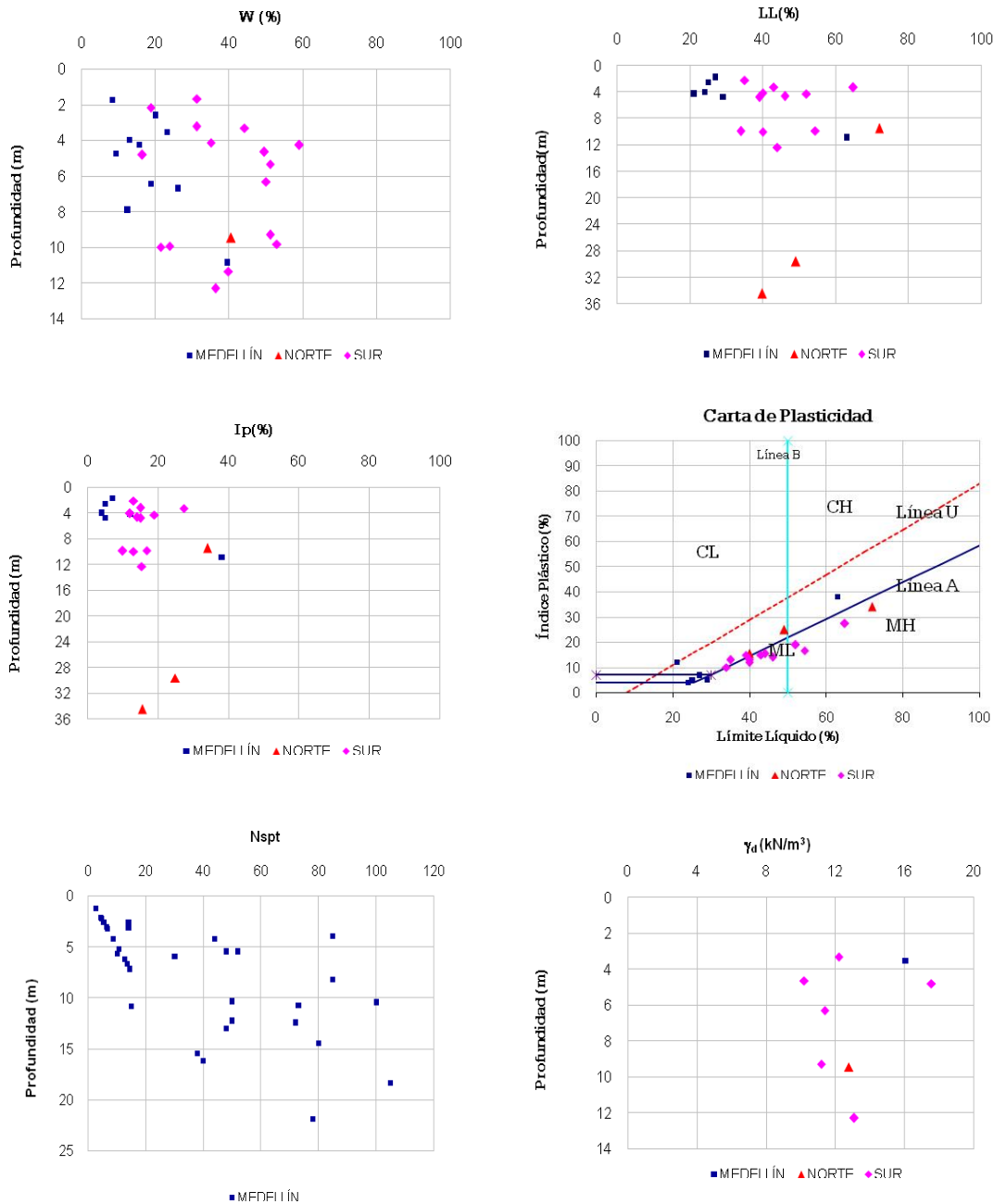


Figura 7.17 Variación de propiedades índice y  $N_{SPT}$  con la profundidad para los depósitos aluviotorrenciales

**Tabla 7.9 Análisis estadístico de propiedades índice de la base de datos**

Código	Material	w (%)					LL (%)					IP (%)				
		Prom.	Desv.	Máx.	Mín.	Datos	Prom.	Desv.	Máx.	Mín.	Datos	Prom.	Desv.	Máx.	Mín.	Datos
1	Suelo Residual de Anfibolita	28,6	11,9	62,9	12,4	63	43,9	14,0	76,5	25,0	26	13,7	10,0	41,0	1,0	26
2,1	Suelo Residual de Gneis, Medellín	27,1	10,2	50,2	10,2	78	45,2	12,6	75,0	26,0	46	13,9	7,2	32,0	3,0	46
2,2	Suelo Residual de Gneis, Sur y Norte	33,6	13,7	67,0	9,8	113	45,7	13,1	94,0	24,0	80	14,1	7,5	48,0	4,0	80
3	Suelo Residual de Dunita	55,6	18,3	94,9	12,8	52	66,1	14,2	102,4	37,0	38	23,1	12,6	62,6	6,0	38
4	Suelo Residual de Esquistos	30,3	11,2	57,1	10,8	52	42,1	11,1	67,0	25,2	30	10,3	6,3	28,0	3,0	30
5	Suelo Residual de Cuarzodiorita	21,9	8,6	51,4	9,3	68	43,9	8,9	62,0	28,0	17	13,5	6,2	29,0	3,0	17
6	Suelo Residual de Diorita	31,2	11,1	93,6	4,9	281	43,6	13,0	94,0	21,0	75	13,5	8,1	52,0	3,0	75
7	Suelo Residual de Gabro	28,6	12,5	79,0	4,4	75	39,1	9,1	59,0	23,0	47	10,0	5,3	28,0	2,0	47
8	Suelo Residual de Migmatitas	39,9	11,3	54,1	17,2	10	54,1	16,3	74,0	25,0	8	17,4	7,9	30,0	6,0	8
9	Suelo Residual de Rocas Volcánicas	48,9	4,6	53,9	44,8	3	52,3	0,6	53,0	52,0	3	15,7	2,1	18,0	14,0	3
10	Depósito de Vertiente y deslizamiento	41,3	15,3	113,7	4,4	380	57,8	17,1	138,0	16,8	321	22,9	11,9	82,0	4,0	321
11,1	Flujo de lodos	40,4	15,3	99,0	12,3	316	55,8	18,6	134,9	21,0	218	21,6	11,8	63,0	4,0	210
11,2	Flujo de escombros	35,1	12,8	71,5	3,0	181	55,0	16,5	106,0	25,0	129	22,5	11,7	58,0	5,0	115
12,1	Depósitos aluviales gruesos	24,3	18,3	147,0	3,7	216	44,9	17,7	117,0	23,0	63	17,3	12,8	73,0	2,0	63
12,2	Depósitos aluviales finos	38,0	35,7	308,0	4,5	119	55,1	17,3	119,0	29,0	88	22,7	10,3	63,0	6,0	88
13	Depósitos aluvio-torrenciales	30,7	15,3	59,0	8,3	23	41,1	15,7	64,8	21,0	12	15,8	10,4	38,0	4,0	12

De la Figura 7.3 a la Figura 7.17 y de la Tabla 7.9, se puede concluir que:

- Es claro el incremento la resistencia a la penetración estándar con la profundidad tal como se observa en el suelo residual de neis (ver la Figura 7.4) y en el suelo residual de diorita (ver la Figura 7.8); mientras que en las propiedades índice no se aprecia una tendencia clara con la profundidad. En los suelos residuales derivados de anfibolita y gabro se observa claramente que a partir de 10 m se tienen valores de resistencia a la penetración estándar superiores a 20 golpes. En los suelos residuales derivados de la cuarzodiorita del Batolito Antioqueño, a partir de 4 m el  $N_{SPT}$  es superior a 20 golpes. En los suelos transportados como es de esperarse, se presentan mayores variaciones: en algunos casos como en los depósitos aluviales finos y gruesos se puede obtener superficialmente rechazo (ver Figuras 7.15 y 7.16), como también se pueden obtener valores muy bajos inclusive a 15 m como se puede observar en la Figura 7.13 y en la Figura 7.16.
- En los suelos residuales se clasifican desde limos de baja compresibilidad hasta suelos de alta compresibilidad. Los suelos más plásticos corresponden a los suelos residuales de migmatitas y dunitas, mientras que en los suelos residuales de esquistos, granodiorita y diorita presentan menores plasticidades. Los otros suelos presentan plasticidad media. En los suelos transportados la variación es mucho más amplia.
- En cuanto a la humedad, la mayor parte de los suelos residuales presentan humedades medias en un intervalo entre el 25% y el 35%, en general con tendencia a disminuir con la profundidad con excepción de de los suelos residuales de dunita y de diorita. Dado el hecho de que el suelo residual de las dunitas es más fino el intervalo de humedades en estos suelos presenta una humedad del orden de 56%. Por el contrario los suelos residuales de rocas ígneas como la cuarzodiorita, el gabro y la diorita presentan granos de mayor tamaño y los valores de humedad promedio son más bajos del orden de 22%.
- Los suelos transportados finos presentan en general suelos más finos que los residuales por lo tanto las humedades son mayores del orden de 40%; estos materiales presentan valores máximos por encima del 100%, inclusive en los depósitos aluviales finos se presentaron valores superiores a 300%, para estos materiales se obtuvo la mayor desviación estándar (35%).
- Los valores de límite líquido se encuentran en un intervalo cerrado (40% a 55%), por fuera de este intervalo y con valores excepcionalmente altos están los suelos residuales de dunita con un promedio de 66% para un número de datos de 38 y con valores máximos por encima de 100% como sucede con los suelos transportados. Al comparar las humedades naturales con sus respectivos límites de plasticidad se puede concluir que los suelos presentan una humedad media, por lo tanto la consistencia de los suelos es en general media.
- El índice de plasticidad para suelos residuales se encuentra en general entre 10% y 15%, exceptuando nuevamente los suelos residuales derivados de dunita cuyo valor medio es 23%. Los índices de plasticidad de depósitos y flujos están entre 15% y 23%, para este parámetro se obtuvieron las menores desviaciones (en general por debajo de 10%). Con estos valores se puede concluir que la plasticidad de los suelos es media a baja, es decir suelos que son susceptibles a sufrir erosión y que pueden cambiar de condiciones ante pequeños cambios en el contenido de agua.



A continuación se presentan los datos estadísticos de las bases de datos de los pesos unitarios húmedos en la Tabla 7.10.

**Tabla 7.10 Peso unitario húmedo ( $\text{kN/m}^3$ ),  $\gamma_h$  por formación geológica**

Unidad	Media	Desviación estándar	Máx	Mín	No. datos
Suelo residual de Cuarzodiorita	17,9	1,53	20,3	15,7	15
Suelo residual de gabro	17,9	1,52	20,9	14,9	25
Suelo residual de diorita	18,2	1,03	20,7	16,5	49
Suelo residual de dunita					
Suelo residual de migmatita	16,3	-	-	-	1
Depósito de vertiente	17,4	1,52	20,8	13,7	168
Flujo de lodos	17,1	1,49	20,9	13,3	113
Flujo de escombros	17,9	1,43	20,9	15,7	38

Puede observarse de la Tabla 7.10 que las variaciones en los pesos unitarios es muy baja (se tienen desviaciones estándar entre  $1 \text{ kN/m}^3$  y  $1,5 \text{ kN/m}^3$ ) y todos están en promedio en un intervalo entre  $17 \text{ kN/m}^3$  y  $18 \text{ kN/m}^3$ , siendo el límite superior  $20 \text{ kN/m}^3$  y el límite inferior  $15 \text{ kN/m}^3$  y en algunos casos  $13 \text{ kN/m}^3$ . Con excepción de los suelos de dunita que presentan valores más bajos.

## 7.5 ENSAYOS DINÁMICOS DE LABORATORIO

El comportamiento de un suelo cuando es sometido a cargas cíclicas está controlado por lo que se conoce como propiedades dinámicas del suelo. Para evaluar las propiedades dinámicas del suelo se ejecutaron ensayos geofísicos en campo: Down-Hole, microsísmicos en laboratorio: Bender Element y ensayos dinámicos en laboratorio: Columna Resonante y Triaxial Cíclico.

A continuación se describirá cada uno de los ensayos y se presentará la metodología empleada paso a paso para determinar las propiedades dinámicas tales como módulo de rigidez, fracción de amortiguamiento crítico, velocidades de onda de corte, módulo de rigidez máximo y degradación del módulo de rigidez con la deformación angular, para cada una de las formaciones geológicas de los municipios que comprende el proyecto.

Los resultados de los ensayos dinámicos se presentan en el Anexo 7.3, y en la Tabla 7.11 se presenta un resumen con las condiciones para la elaboración de los ensayos dinámicos.

### 7.5.1 Ensayo Triaxial Cíclico

Este ensayo, normalizado bajo la designación D3999-91 de la ASTM, permite determinar el comportamiento esfuerzo - deformación y la resistencia al esfuerzo cortante de una muestra cilíndrica de suelo cuando es sometida a cargas cíclicas. Permite determinar los módulos de elasticidad ( $E$ ), de rigidez al esfuerzo cortante ( $G$ ), fracción de amortiguamiento crítico ( $\beta$ ), comportamiento esfuerzo - deformación ( $\sigma-\varepsilon$ ), y la generación de presión intersticial para niveles de deformación angular entre 2% y 1%.

La prueba consiste en imponer un esfuerzo desviador cíclico axial o series de carga axiales repetidas de compresión y tracción instantáneas de magnitud fija (carga controlada) o deformación cíclica (deformación controlada) sobre una muestra de suelo cilíndrica encerrada en una celda triaxial y sometida a una presión de confinamiento (ver Foto 7.1); para este estudio se realizaron ensayos de deformación controlada; las cargas cíclicas originan un cambio de dirección del esfuerzo cortante en un plano de  $45^\circ$ , en los procesos de carga y descarga. El ensayo se repite para varios niveles de deformación con el propósito de determinar la variación de  $E$  y  $\beta$ . Las muestras se ensayaron con humedad natural. En este caso se aplicó una frecuencia de 1 Hz y 30 ciclos de carga para cada nivel de deformación en todas las muestras.

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	S (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PBA 36	16	Columna	60	13,85 - 14,15	ML	2.75	0.71	32.0	9.0	18.3	24.4	80	0.0109	0.0858	3.54
		Triaxial	60	13,85- 14,15	ML	2.75	0.84	32.0	9.0			94	0.2114	1.0347	4.83
PBA 35	8	Columna	25	5,7-6,15	SC-SM	2.63	0.72	25.0	5.0	18.1	24.5	90	0.0236	0.0855	3.60
		Triaxial	25	5,7-6,15	SC-SM	2.63	0.59	25.0	5.0			100	0.1411	1.0145	4.75
PBA 34	18	Columna	40	9,9-10,3	SM	2.69	0.70	31.0	5.0	18.2	25.8	94	0.0064	0.0839	3.52
		Triaxial	40	9,9-10,3	SM	2.69	0.74	31.0	5.0			98	0.1395	0.9334	4.83
PBA 34	13	Columna	75	6,5-7,0	CL	2.64	0.87	30.0	10.0	18.7	32.9	100	0.0143	0.0847	3.48
		Triaxial	75	6,5-7,0	CL	2.64	0.87	30.0	10.0			100	0.1299	0.9314	4.84
PBA 33	28	Columna	70	16,15- 16,75	MH	2.82	1.70	56.1	8.5	16.8	56.7	94	0.0046	0.1052	3.56
		Triaxial	70	16,15- 16,75	MH	2.82	1.65	56.1	8.5			97	0.1165	0.7160	4.94
PBA 33	16	Columna	40	8,25-8,85	MH	2.79	1.15	51.7	10.3	17.2	37.8	91	0.0105	0.0853	3.50
		Triaxial	40	8,25-8,85	MH	2.79	1.20	51.7	10.3			88	0.7024	0.2742	4.85
PBA 32	19	Columna	45	10,15- 10,75	ML	2.65	1.05	37.0	9.0	18.0	39.3	92	0.0170	0.0350	3.58
		Triaxial	45	10,15- 10,75	ML	2.65	1.13	37.0	9.0			99	0.1461	0.8977	4.83

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	S (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PBA 32	10	Columna	50	4,50-5,10	SC	2.63	0.74	31.0	9.0	18.0	26.9	88	0.0345	0.1066	3.51
		Triaxial	50	4,50-5,10	SC	2.63	0.81	31.0	9.0			96	0.2462	0.8674	4.82
PGI 27	9	Columna resonante	60	4,85-5,45	MH	2.79	1.84	52.0	9.0	16.0	63.3	96	0.0017	0.0300	3.56
		Triaxial cíclico	60	4,85-5,45	MH	2.79	1.85	52.0	9.0			96	0.1400	1.4390	4.86
PGI 27	12	Columna resonante	40	7,15-7,7	ML	2.82	1.23	39.0	10.0	17.3	43.4	99	0.0390	0.1232	3.54
		Triaxial cíclico	40	7,15-7,7	ML	2.82	1.33	39.0	10.0			92	0.1398	1.3580	4.94
PGI 28	11	Columna resonante	30	4,3-4,8	MH	2.73	1.33	70.0	23.0	17.7	50.0	100	0.0196	0.0911	3.45
		Triaxial cíclico	30	4,3-4,8	MH	2.73	1.31	70.0	23.0			100	0.1476	0.8311	4.90
PGI 28	20	Columna resonante	45	8,7-9,3	ML	2.69	1.05	43.0	10.0	18.8	39.8	100	0.0245	0.1061	3.53
		Triaxial cíclico	45	8,7-9,3	ML	2.69	1.00	43.0	10.0			100	0.1475	1.3739	4.96

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$S$ (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PGI 30	3	Columna resonante	15	1,05-1,65	MH	2.72	1.22	60.0	26.0	18.5	40.9	91	0.0058	0.0593	3.52
		Triaxial cíclico	15	1,05-1,65	MH	2.72	1.08	60.0	26.0			100	0.1336	0.6783	4.91
PGI 30	9	Columna resonante	50	4,2-4,8	ML	2.79	0.99	41.0	15.0	19.5	33.1	93	0.0085	0.0535	3.56
		Triaxial cíclico	50	4,2-4,8	ML	2.79	0.90	41.0	15.0			100	0.1317	0.9485	4.87
PCO 20	14	Columna resonante	70	6-6,45	ML	2.67	0.79	41.1	12.6	18.3	24.8	84	0.0060	0.0383	3.54
		Triaxial cíclico	70	6-4,65	ML	2.67	0.79	41.1	12.6			85	0.1477	0.9098	4.91
PCO 20	29	Columna resonante	140	13,5-13,85	ML	2.72	0.80	32.9	4.6	19.0	26.5	90	0.0146	0.1164	3.54
		Triaxial cíclico	140	13,5-13,85	ML	2.72	0.80	32.9	4.6			0.2965	1.3495	4.92	
PCO 21	10	Columna resonante	70	5,6-6	ML	2.70	1.04	48.2	18.6	18.8	31.8	82	0.0926	0.2160	3.54
		Triaxial cíclico	70	5,6-6	ML	2.70	1.04	48.2	18.6			83	0.3696	1.4897	4.89

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$S$ (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PCO 21	16	Columna resonante	50	9-9,45	CL	2.88	0.72	36.6	14.9	18.8	18.8	75	0.0291	0.0925	3.56
		Triaxial cíclico	50	9-9,45	CL	2.88	0.70	36.6	14.9			77	0.1447	0.8923	4.77
PCO 22	7	Columna resonante	40	3,1-3,7	CH	2.71	1.09	52.7	25.3	19.3	39.2	98	0.0151	0.0696	3.74
		Triaxial cíclico	40	3,1-3,7	CH	2.71	1.05	52.7	25.3			100	0.2139	1.0199	5.12
PCO 22	10	Columna resonante	60	5,2-5,55	CL	2.78	1.03	43.8	21.9	19.3	31.5	85	0.0175	0.0841	3.54
		Triaxial cíclico	60	5,2-5,55	CL	2.78	1.03	43.8	21.9			0.1447	0.5911	4.93	
PCO 24	11	Columna resonante	50	4,5-4,95	MH	2.76	1.20	63.7	30.7	19.7	40.4	93	0.0188	0.0929	3.58
		Triaxial cíclico	50	4,5-4,95	MH	2.76	1.19	63.7	30.7			94	0.1375	0.7020	4.91
PCO 24	14	Columna resonante	55	6-6,6	CL	2.83	0.96	41.6	17.6	17.5	35.1	100	0.0113	0.0617	3.47
		Triaxial cíclico	55	6-6,6	CL	2.83	0.90	41.6	17.6			100	0.1371	1.5607	4.87

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$S$ (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PCO 24	17	Columna resonante	50	8,1-8,7	CH	2.77	1.08	66.2	33.8	18.3	39.3	100	0.0112	0.0794	3.55
		Triaxial cíclico	50	8,1-8,7	CH	2.77	1.12	66.2	33.8			97	0.1328	0.7513	4.91
PCO 24	20	Columna resonante	60	10,1-10,65	ML	2.73	1.23	45.1	13.9	16.9	44.5	98	0.0097	0.1031	3.48
		Triaxial cíclico	60	10,1-10,65	ML	2.73	1.15	45.1	13.9			100	0.1275	1.2070	4.93
PCO 25	10	Columna resonante	50	4,5-5,1	SM	2.70	0.54	25.0	1.2	15.0	11.5	58	0.0125	0.0427	3.52
PCO 25	7	Triaxial cíclico	40	3-3,6	ML	2.76	0.70	38.0	9.5		19.8	78	0.1416	0.8734	4.76
PCO 25	16	Columna resonante	85	7,9-8,5	ML	2.76	0.63	34.0	4.0	17.8	16.7	73	0.0137	0.0379	3.54
		Triaxial cíclico	85	7,9-8,5	ML	2.76	0.60	34.0	4.0			77	0.1419	1.4564	4.87
PEN 15	10	Columna resonante	30	5-5,6	CL	2.71	0.54	26.6	10.2	21.7	20.4	100	0.0085	0.0641	3.63
		Triaxial cíclico	30	5-5,6	CL	2.71	0.53	26.6	10.2			100	0.1299	0.6647	4.94

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$S$ (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PEN 15	16	Columna resonante	50	9,2-9,55	CL	2.72	0.44	25.6	8.8	21.6	14.8	90	0.0048	0.0629	3.51
		Triaxial cíclico	50	9,2-9,55	CL	2.72	0.49	25.6	8.8			81	0.1287	0.6574	4.98
PEN 15	33	Columna resonante	90	18-18,55	ML	2.72	1.01	49.3	16.5	18.0	36.8	99	0.0023	0.0571	3.53
		Triaxial cíclico	90	18-18,55	ML	2.72	1.07	49.3	16.5			94	0.1340	0.6887	4.95
PEN 16	10	Columna resonante	10	9,45-9,95	CL	2.75	0.47	31.0	11.9	21.4	16.2	95	0.0127	0.1003	3.53
		Triaxial cíclico	20	9,45-9,95	CL	2.75	0.53	31.0	11.9			18.9	99	0.1450	0.8845
PEN 18	20	Columna resonante	10.5	9,5-10,1	MH	2.68	1.14	53.2	7.2	17.2	39.6	93	0.0063	0.1127	3.55
		Triaxial cíclico	10.5	9,5-10,1	MH	2.68	1.17	53.2	7.2			91	0.1410	1.013	4.90
PSA 14	14	Columna	75	7,5-8,10	SM	2.65	0.87	36.3	4.4	18.4	27.6	84	0.0135	0.1234	3.56
		Triaxial	75	7,5-8,10	SM	2.65	0.82	36.3	4.4			88	0.1180	0.5365	4.91



**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$S$ (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PSA 12	35	Columna	85	18,45-18,95	MH	2.70	1.33	55.3	11.7	17.2	45.9	93	0.0073	0.1410	3.62
		Triaxial	85	18,45-18,95	MH	2.70	1.29	55.3	11.7			100	0.1433	0.7567	4.81
PSA 12	17	Columna	105	9-9,55	MH	2.77	1.29	53.7	14.4	17.3	45.1	97	0.0071	0.1173	3.56
		Triaxial	105	9-9,55	MH	2.77	1.29	53.7	14.4			97	0.1293	0.6542	4.91
PSA 11	25	Columna	60	14,05-14,45	ML	2.93	1.16	40.9	10.5	17.5	33.6	95	0.0290	0.1054	3.63
		Triaxial	60	14,05-14,45	ML	2.93	1.10	40.9	10.5		35.7	89	0.2722	0.2231	4.82
PSA 11	14	Columna	40	7,5-8,0	MH	2.65	1.24	58.7	24.2	17.5	49.0	100	0.0125	0.0976	3.53
		Triaxial	40	7,5-8,0	MH	2.65	1.24	58.7	24.2		49.0	100	0.1362	1.1084	4.86
PES 08	15	Columna	30	9,05-9,40	CL	2.77	0.71	33.9	11.1	19.6	25.4	99	0.0167	0.0831	3.54
		Triaxial	30	9,05-9,40	CL	2.77	0.74	33.9	11.1		25.7	90	0.1536	0.6269	4.89
PES 07	19	Columna	50	10,5-11,05	ML	2.70	1.13	45.5	11.1	16.2	39.3	94	0.0137	0.0476	3.51
	34	Triaxial	90	18-18,55	MH	2.68	1.51	54.3	20.4		55.2	98	0.1460	0.9817	4.96
PES 06	29	Columna	60	15-15,45	ML	2.71	1.18	46.4	15.1	11.5	39.6	91	0.0132	0.1263	3.51
	38	Triaxial	80	19,5-19,78	ML	2.76	0.98	37.4	8.7			93	0.1403	0.6031	4.84

**Tabla 7.11 Resumen de condiciones de ensayos dinámicos (Cont.)**

PERF.	MUESTRA	ENSAYO DINÁMICO	$\sigma'_c$ (kPa)	PROF. (m)	CLASIF. (USCS)	$G_s$	$e$	LL (%)	IP (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	S (%)	$\gamma_{min}$ (%)	$\gamma_{max}$ (%)	DIÁMETRO (cm)
PCA 03	25	Columna	50	12-12,35	ML	2.64	1.05	43.4	15.9	18.3	35.7	90	0.0083	0.0534	3.47
		Triaxial	50	12-12,35	ML	2.68	0.75	39.3	13.8		27.9	99	0.1506	1.0146	4.83
PCA 02	26	Columna	85	9-9,2	SM	2.78	0.70	24.3	1.7	18.7	18.8	74	0.0113	0.1143	3.61
		Triaxial	130	13,5-13,75	SM	2.77	0.76	26.7	1.1		22.0	80	0.2307	0.7138	4.97
PCA 01	28	Columna	50	12,5-12,7	ML	2.76	0.80	29.7	5.8	17.9	23.8	82	0.0119	0.0438	3.47
		Triaxial	55	13,5-13,9	ML	2.83	0.96	37.7	2.1		29.4	87	0.0622	0.9849	5.08



Foto 7.1 Ensayo triaxial cíclico

El procedimiento utilizado para calcular las propiedades dinámicas para un ciclo de carga de un ensayo triaxial cíclico es el siguiente:

- Del ensayo Down-Hole, en el cual se calculó la velocidad de onda de corte y de onda compresiva, se obtiene la relación de Poisson de la siguiente ecuación:

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (7.5)$$

- Las deformaciones axiales unitarias se convierten en deformaciones angulares de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\gamma = (1 + \nu)\varepsilon \quad (7.6)$$

Donde:  $\gamma$  es la deformación angular,  $\nu$  es la relación de Poisson y  $\varepsilon$  la deformación axial unitaria.

Cuando el ensayo se efectúa en condiciones saturadas,  $\nu=0,5$ . En este caso los ensayos se efectuaron con humedad natural.

- Se determina la deformación unitaria máxima ( $\varepsilon_{max}$ ) y mínima ( $\varepsilon_{min}$ ) y el esfuerzo correspondiente a cada una de ellas ( $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$ ).
- Se calcula el módulo de elasticidad,  $E$  o módulo de Young. El módulo de Young se puede determinar con la relación entre el esfuerzo axial cíclico y la deformación unitaria  $\varepsilon$ , definida por la pendiente de la línea que une los extremos de un ciclo de histéresis.

$$\sigma = \frac{P}{A_{muestra}} \quad (7.7)$$

$$E = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}} \quad (7.8)$$

- Se calcula el área del ciclo de histéresis; en este caso se empleó el método analítico para el cálculo del área de una poligonal cerrada, como se muestra en las ecuaciones 7.9 y 7.10.

$$2A = \sum_{i=1}^n X_i (Y_{i-1} - Y_{i+1}) \quad (7.9)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i (\sigma_{i-1} - \sigma_{i+1})}{2} \quad (7.10)$$

- Se calculan las áreas de los triángulos correspondientes a las deformaciones angulares máxima y mínima.

$$A_{\Delta max} = \frac{\sigma_{max} [\varepsilon_{max} (1+\nu)]}{2} \quad (7.11)$$

$$A_{\Delta min} = \frac{\sigma_{min} [\varepsilon_{min} (1+\nu)]}{2} \quad (7.12)$$

- Se calcula la fracción de amortiguamiento crítico para las deformaciones unitarias y esfuerzos máximo y mínimo a partir del área del ciclo histerético (que cambia con el nivel de deformación aplicada y el número de ciclos). El área del ciclo de histéresis corresponde a la energía disipada en un ciclo de oscilación y el área triangular se asocia con la energía máxima almacenada por el sistema (ver Figura 7.2 y Figura 7.3).

$$\beta_{\max} = \frac{A}{4\pi A_{\Delta \max}} \quad (7.13)$$

$$\beta_{\min} = \frac{A}{4\pi A_{\Delta \min}} \quad (7.14)$$

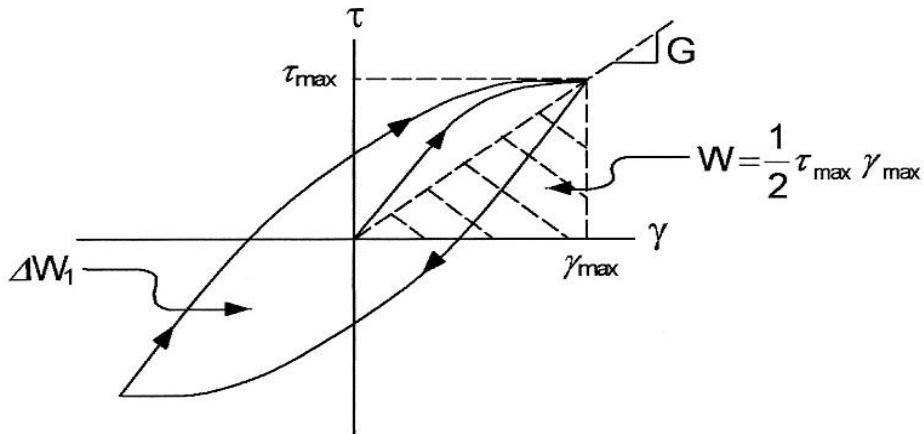
Donde  $A$  es el área de la curva del ciclo de histéresis.

- Se estima la fracción de amortiguamiento crítico promedio

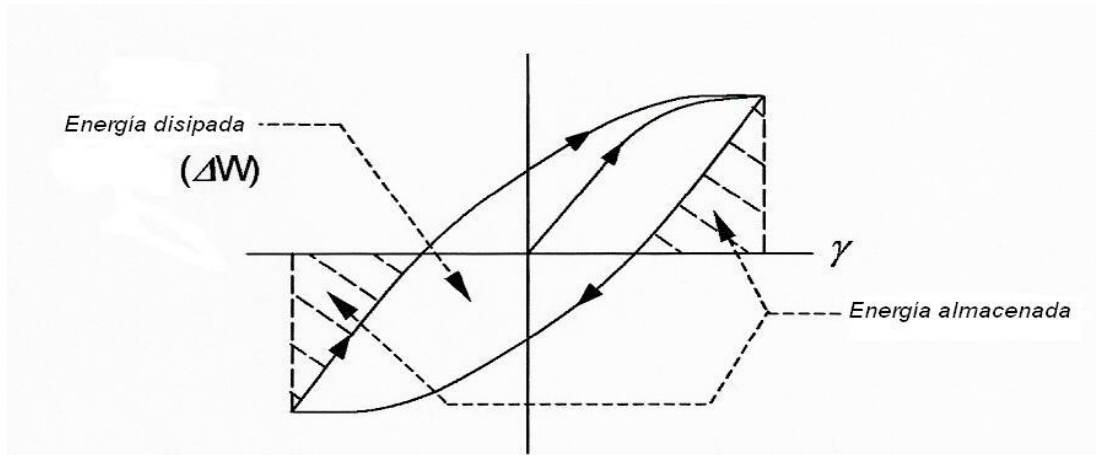
$$\beta_{prom} = \frac{\beta_{\max} + \beta_{\min}}{2} \quad (7.15)$$

- La deformación angular para un ciclo corresponde a:

$$\gamma_{cicloi} = \varepsilon_{\max} (1 + \nu) \quad (7.16)$$



**Figura 7.18** Parámetros empleados para definir la fracción de amortiguamiento crítico,  $\beta$



**Figura 7.19 Definición gráfica de energía disipada y energía almacenada**

- El módulo de rigidez de un ciclo es:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (7.17)$$

- Los valores de  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $E$  y  $G$  se estimaron con el promedio de los obtenidos para los 30 ciclos ejecutados en cada nivel de deformación.

### 7.5.2 Ensayo de Columna Resonante

Este ensayo, normalizado bajo la designación D4015-92 de la ASTM, permite determinar los módulos  $E$  y  $G$ ,  $V_s$  y  $\beta$  en muestras cilíndricas huecas o macizas de suelo en condiciones alteradas e inalteradas por medio de vibración, para niveles de deformación entre  $1 \times 10^{-4}\%$  y  $1 \times 10^{-2}\%$ .

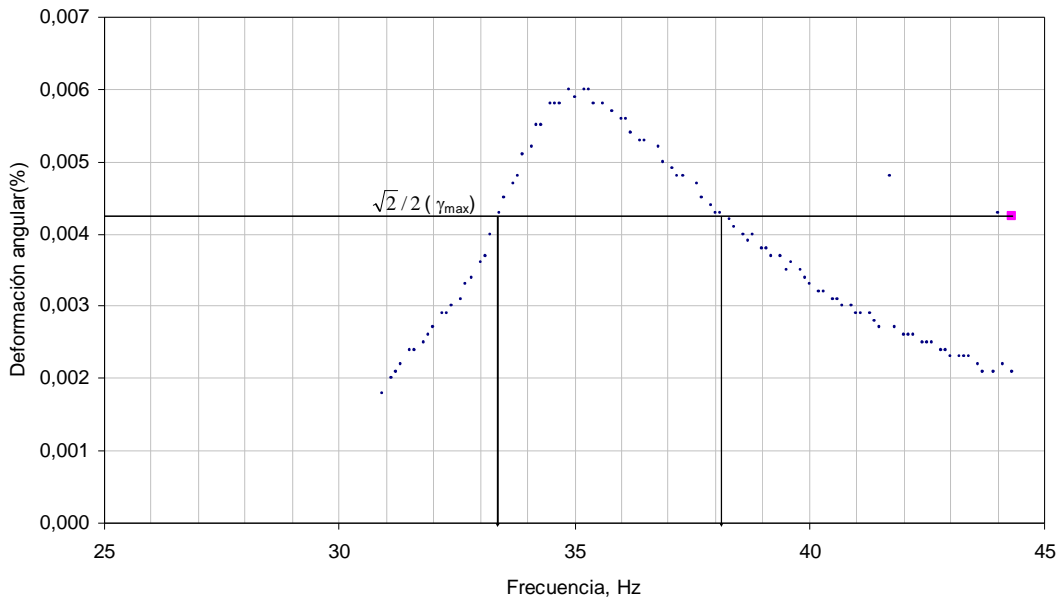
El ensayo consiste en someter una muestra de suelo (ver Foto 7.2) a excitaciones o cargas torsionales armónicas por medio de un sistema electromagnético, donde la frecuencia y la amplitud pueden ser controladas. La magnitud de la carga se controla a través del voltaje. Luego de fijar un voltaje se incrementa gradualmente la frecuencia hasta obtener la respuesta máxima (cuando el sistema muestra - cabezal entra en resonancia en su primer modo de vibración). La menor frecuencia para la cual la respuesta es máxima, representa la frecuencia fundamental o de resonancia de la muestra. Este procedimiento se repite para varios voltajes. El efecto de la deformación en el módulo de rigidez se obtiene variando la deformación angular. Los amortiguamientos se calculan con el método del ancho de banda.

El método del ancho de banda es utilizado para la determinación de amortiguamiento viscoso en vibraciones forzadas. Consiste en determinar la frecuencia ( $f_n$ ) con la cual se logra la máxima deformación ( $\gamma_{max}$ ), a partir de la cual se redefinen dos frecuencias,  $f_1$  y  $f_2$ , cuya amplitud es una fracción de la amplitud máxima (Figura 7.4), con las cuales se calcula el amortiguamiento (Ecuación 7.18).

$$\beta = \frac{1}{2} \left( \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_n} \right) \quad (7.18)$$



Foto 7.2 Ensayo de columna resonante



**Figura 7.20 Curva de resonancia utilizada para calcular el amortiguamiento**

El módulo de rigidez se calcula a partir de la onda de corte estimada a partir de la frecuencia de resonancia,  $V_s$  y el peso unitario húmedo de la muestra,  $\gamma_h$  (Ecuación 7.19).

$$G = V_s^2 \rho_h \quad (7.19)$$

### 7.5.3 Microsísmica (Bender Element)

Los Bender Elements son transductores electromecánicos de alta impedancia, capaces de convertir energía mecánica en eléctrica y viceversa. Cada Bender Element consta de dos placas piezocerámicas delgadas que están unidas rígidamente a una placa de metal central, formando una superficie conductora entre ellas y sobre los lados exteriores. La polarización del material cerámico en cada placa y la conexión eléctrica son tales que cuando el voltaje es aplicado al elemento, una placa se elonga y la otra se acorta, o en otras palabras, una placa queda a tracción y la otra a compresión. Este proceso produce una señal mecánica. El ensayo consiste en medir el tiempo de propagación de una onda de corte a través de una muestra de suelo.

El procedimiento consiste en colocar un Bender Element en la parte superior y otro en la parte inferior de una muestra cilíndrica de suelo (ver Foto 7.3), el generador de ondas emite un voltaje, el elemento superior (ver Foto 7.4) se dobla al recibir ese voltaje y empuja al suelo en una dirección perpendicular a la longitud del elemento, esto produce una onda de corte que se propaga, hasta que llega al receptor. En el osciloscopio se



registra en una gráfica el tiempo de llegada de la onda versus amplitud de las ondas generada y recibida (ver Figura 7.21).

El tiempo de viaje de la onda de corte es la distancia entre el punto donde se inicia la onda del generador y el punto de mayor deflexión de la onda recibida. Con el tiempo de viaje, la altura de la muestra y la longitud que penetra el elemento flexor en el suelo se obtiene la velocidad de onda de corte. El ensayo se realiza con varias frecuencias hasta que se estabiliza la velocidad de la onda de corte (ver Figura 7.22).



Foto 7.3 Montaje del ensayo



Foto 7.4 Bender element

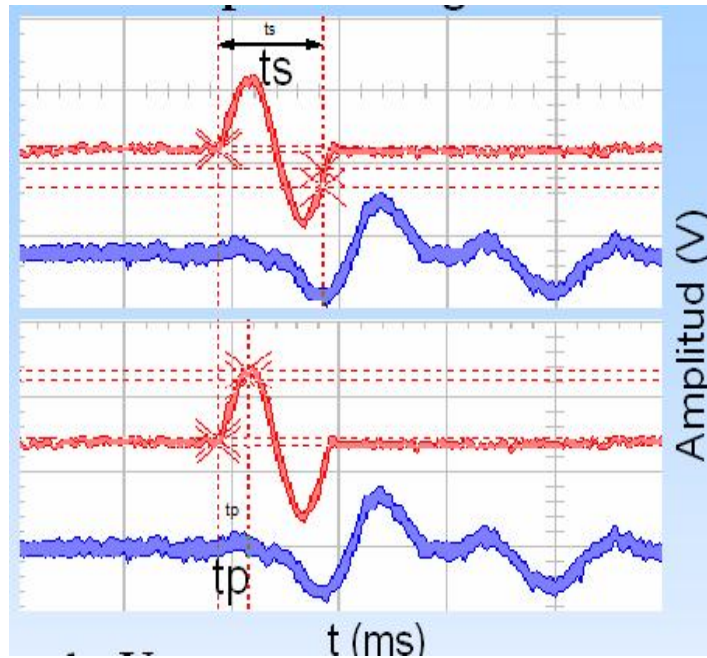


Figura 7.21 Tiempos de llegada

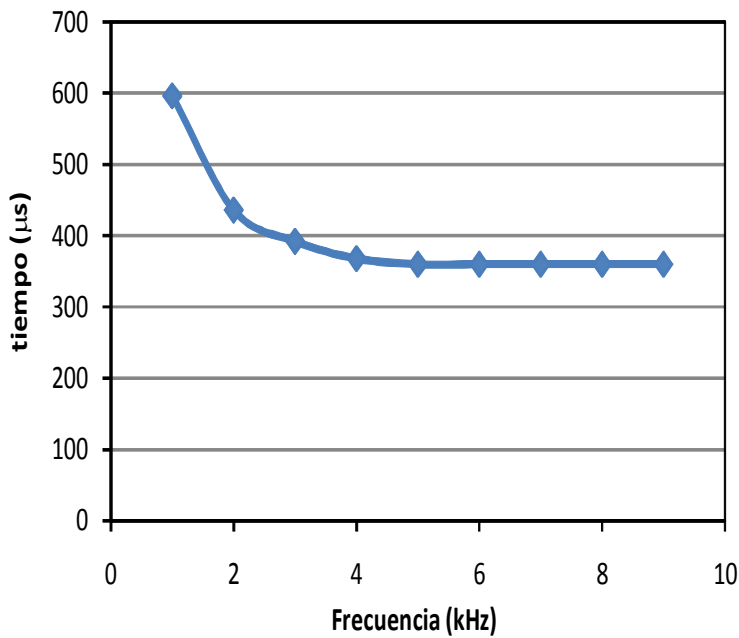


Figura 7.22 Curva frecuencia versus tiempo, muestra PES08-M18

La velocidad de onda de corte se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_S = \frac{H - (2l_{bender})}{t_s} \quad (7.20)$$

#### 7.5.4 Ajustes de Curvas de Degradación del Módulo de Rigidez y Amortiguamiento

Con las velocidades de onda de corte obtenidas del ensayo Bender Element se calcula el módulo de rigidez máximo con la siguiente ecuación:

$$G_{max} = V_{S_{bender}}^2 \rho_h \quad (7.21)$$

Los módulos de rigidez obtenidos del ensayo triaxial cíclico y del ensayo de columna resonante se normalizan con  $G_{max}$ .

A continuación se relacionan las metodologías para hacer los ajustes a la degradación del módulo de rigidez y el amortiguamiento con la deformación angular.

#### 7.5.5 Modelo de Romo

El modelo hiperbólico de degradación de la rigidez (Ecuación 7.22) propuesto por Romo (1987) y cuya expresión matemática se deriva del modelo de Hardin y Drnevich, tiene como variable  $\gamma_m$ , que es la deformación correspondiente al 50% de  $G/G_{max}$ , y las constantes  $a$  y  $b$ , inherentes al tipo de suelo;  $a$ , controla la pendiente y concavidad de la curva y  $b$ , el valor mínimo de la relación  $G/G_{max}$ .

$$\frac{G}{G_{max}} = 1 - \frac{\frac{\gamma}{\gamma_m}}{a + b \frac{\gamma}{\gamma_m}} \quad (7.21)$$

La ecuación para determinar la fracción de amortiguamiento crítico (Ecuación 7.22) es función del  $\gamma_m$  obtenido del ajuste de  $G/G_{max}$ . El amortiguamiento mínimo ( $\beta_{min}$ ), para deformaciones muy pequeñas ( $1 \times 10^{-4}\%$ ) controla la tendencia de la curva hasta la deformación de referencia ( $\gamma_m$ ) y el amortiguamiento máximo ( $\beta_{max}$ ), limita el crecimiento de la curva para valores mayores a  $\gamma_m$  y equivale al amortiguamiento para una deformación teórica de 100%.

$$\beta = \beta_{\min} + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_m}}{\frac{1}{\beta_{\min}} + \frac{\gamma}{\beta_{\max} - \beta_{\min}}} \quad (7.22)$$

### 7.5.6 Fredlung y Xing

Se ajustó la formulación de Fredlund y Xing (1994) empleada en curvas de succión para modelar la degradación del módulo de rigidez, considerando que las formas de las curvas son similares y que es posible obtener la deformación crítica (umbral límite de deformaciones) para la cual se produce un cambio brusco en la curva de variación de la rigidez que se puede interpretar como el momento en el cual se afecta la estructura del suelo.

La ecuación original planteada por estos autores es la siguiente:

$$w = w_{sf} \left[ 1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\psi}{h_r}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{hr}\right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln\left[e^1 + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right]^{m_f}} \right] \quad (7.23)$$

Donde:

- $w$ : Contenido gravimétrico de agua
- $w_{sf}$ : Contenido gravimétrico de agua para obtener una saturación del 100%
- $AEV$ : Valor de entrada de aire
- $a_f$ : Parámetro de ajuste relacionado con el valor de entrada de aire
- $n_f$ : Parámetro de ajuste relacionado con la zona de mayor inclinación de la curva
- $m_f$ : Parámetro de ajuste relacionado con el contenido de agua residual
- $h_r$ : Succión correspondiente al contenido de agua residual
- $\psi$ : Succión matricial del suelo

La adaptación a la degradación del módulo de rigidez es la siguiente:

$$G / G_{\max} = (G / G_{\max})_0 \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{\gamma}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{k}{h_r} \right)} \right] \left[ \frac{1}{\ln \left[ e^1 + \left( \frac{\gamma}{a_f} \right)^{n_f} \right]^{m_f}} \right] \quad (7.24)$$

Donde:

$G/G_{\max}$ : Módulo de rigidez normalizado.

$(G/G_{\max})_0$ : Módulo de rigidez normalizado inicial.

$\gamma_{th}$ : Umbral límite de deformaciones, a partir de esta deformación la estructura del suelo se afecta.

$a_f$ : Parámetro de ajuste relacionado con el umbral límite de deformaciones

$n_f$ : Parámetro de ajuste relacionado con la zona de mayor o menor inclinación de la curva.

$m_f$ : Parámetro de ajuste relacionado que controla el valor mínimo de  $G/G_{\max}$

$h_r$ : Valor donde se interceptan la línea de mayor pendiente de la curva y la línea correspondiente al valor mínimo

$k$ : Valor para el cual  $G/G_{\max}=0$

$\gamma$ : Deformación angular

### 7.5.7 Otálvaro

El modelo de pérdida de rigidez con el nivel de deformación a cortante, corresponde a una modificación del modelo propuesto por Hardin y Drnevich (1972), el cual presenta una similitud considerable con el modelo propuesto por van Genuchten (1980) para la curva característica humedad-succión del suelo. El modelo es descrito por la siguiente expresión:

$$\frac{G}{G_{Max}} = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{\gamma}{\gamma_Y} \right)^n \right]^m} \quad (7.25)$$

Donde:

$\gamma_Y$ : nivel de deformación por cortante donde empieza la pérdida de la estructura y el suelo comienza un comportamiento inelástico.

$n$ : parámetro de ajuste que controla la tasa con la cual ocurre la pérdida de rigidez del suelo con el incremento de la deformación por cortante.

*m*: parámetro de ajuste que controla la pérdida de rigidez del suelo a grandes deformaciones.

### 7.5.8 Curvas de Degradación y Amortiguamiento

La respuesta dinámica de los suelos depende de las propiedades dinámicas del mismo, como son el módulo de rigidez al esfuerzo cortante y la fracción del amortiguamiento crítico, así como la variación de estas propiedades con el nivel de deformación por cortante.

Estas propiedades dinámicas se pueden expresar como variables aleatorias que tienen una función de densidad de probabilidad que se ajusta a partir de los datos experimentales.

La caracterización del comportamiento dinámico de los suelos se efectúa mediante la realización de ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas. Para tal efecto, se realizaron ensayos triaxiales cíclicos, ensayos de columna resonante y ensayos de velocidad de onda corte sobre muestras inalteradas confinadas en cámaras triaxiales Bender Element.

El módulo de rigidez al corte máximo se estima con base en mediciones en campo de velocidades de onda de cortante en ensayos Down-Hole; sin embargo, para efectos de compatibilidad con los ensayos realizados sobre muestras inalteradas, se tienen en cuenta las velocidades obtenidas del ensayo Bender-Element.

Para obtener las curvas de degradación y amortiguamiento características de los suelos representativos de las formaciones más importantes en el Valle de Aburrá se recopilaron los ensayos dinámicos de la microzonificación sísmica de Medellín (GSM, 1999) y la microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (GSM, 2002), así como los ensayos dinámicos realizados en los trabajos Otálvaro (2005) y Betancur (2006).

Como se mencionó en la metodología para el análisis de ensayos, existen diferentes métodos de ajuste para las curvas de degradación del suelo, luego de comparar los métodos se utilizó para la degradación del módulo de rigidez el ajuste de Hardin y Drnevich modificado por Otálvaro y para el amortiguamiento el ajuste de Romo. Se seleccionó el ajuste de Hardin y Drnevich para el módulo de rigidez ya que se ajusta más uniformemente a los datos de laboratorio y se descartó el de Romo porque no cubre datos con deformaciones bajas y módulos altos.

El ajuste de Hardin y Drnevich modificado por Otálvaro para aplicarlo al módulo de rigidez se representa mediante la siguiente función:

$$\frac{G}{G_{Max}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_Y}\right)^n\right]^m} \quad (7.26)$$

El ajuste de Romo para el amortiguamiento se representa con la expresión:

$$\beta = \beta_{min} + \frac{\frac{\gamma}{\gamma_m}}{\frac{1}{\beta_{min}} + \frac{\gamma}{\beta_{max} - \beta_{min}}} \quad (7.27)$$

El procedimiento para la realización de los ajustes consistió en la obtención de dos bandas envolventes de los datos medidos en laboratorio, de tal modo que representen la posible variación de las propiedades dinámicas del suelo, acotando los datos mediante límites superior e inferior. Esto con el fin de realizar una variación aleatoria entre estas bandas para la asignación de propiedades dinámicas de cada formación litológica.

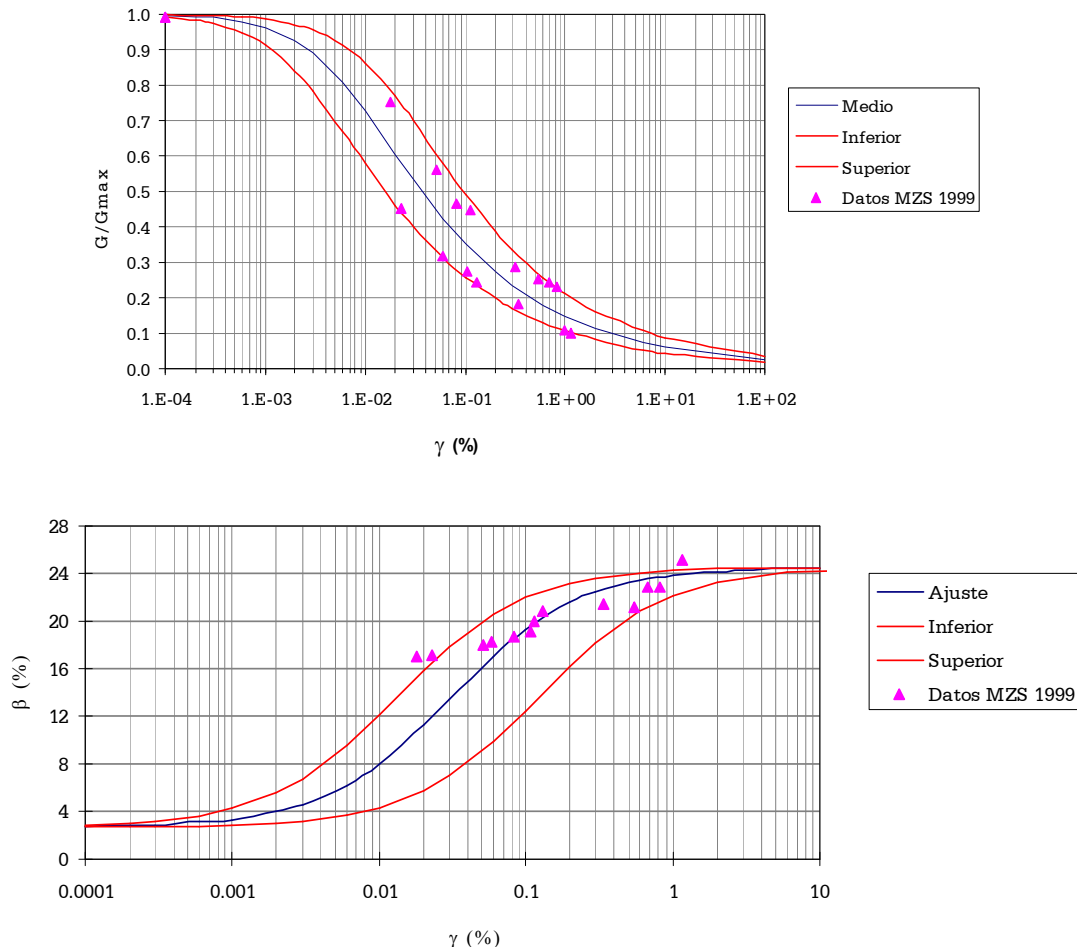
Los parámetros de las bandas obtenidos de los ajustes para cada unidad litológica se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 7.12 Parámetros de Curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento**

Formación	Curva de Degradación Módulo G (Hardin)				Amortiguamiento, % (Romo)			
	N	m	$\gamma_{r(máx)}$	$\gamma_{r(mín)}$	$\beta_{mín}$	$\beta_{máx}$	$\gamma_{r(máx)}$	$\gamma_{r(mín)}$
1. S.R. Anfibolita	1,10	0,35	0,018	0,003	2,67	24,53	0,02	0,002
2. S.R. Gneis	1,55	0,40	0,048	0,005	1,96	27,82	0,15	0,006
3. S.R. Dunita	0,80	0,60	0,080	0,006	6,96	30,67	0,80	0,040
4. S.R. Esquistos	2,50	0,25	0,030	0,012	3,00	22,00	0,20	0,010
5. S. R. Granodiorita y Cuarzodiorita	1,30	0,45	0,075	0,010	4,01	28,38	0,01	0,090
6. S.R. Diorita	2,20	0,30	0,025	0,008	4,49	14,90	0,01	0,150
7. S. R. Gabro	1,50	0,45	0,050	0,008	3,13	14,77	0,01	0,200
8. vertientes. R. Migmatitas	1,80	0,35	0,090	0,005	3,0	23,0	0,007	0,19
9. S. R. Rocas Volcánicas	1,80	0,35	0,090	0,005	3,0	23,0	0,007	0,19
10. Depósitos de deslizamiento y de vertiente	1,50	0,35	0,050	0,005	0,22	16,15	0,02	0,300
11. Flujos de lodos y escombros, recierntes y meteorizados	1,80	0,35	0,090	0,005	3,00	23,00	0,007	0,19
12. Depósitos Aluviales	1,60	0,45	0,150	0,007	1,33	23,00	0,02	0,001
13. Depósitos Aluvio- torrenciales	2,00	0,21	0,008	0,002	4,78	23,52	0,50	0,060

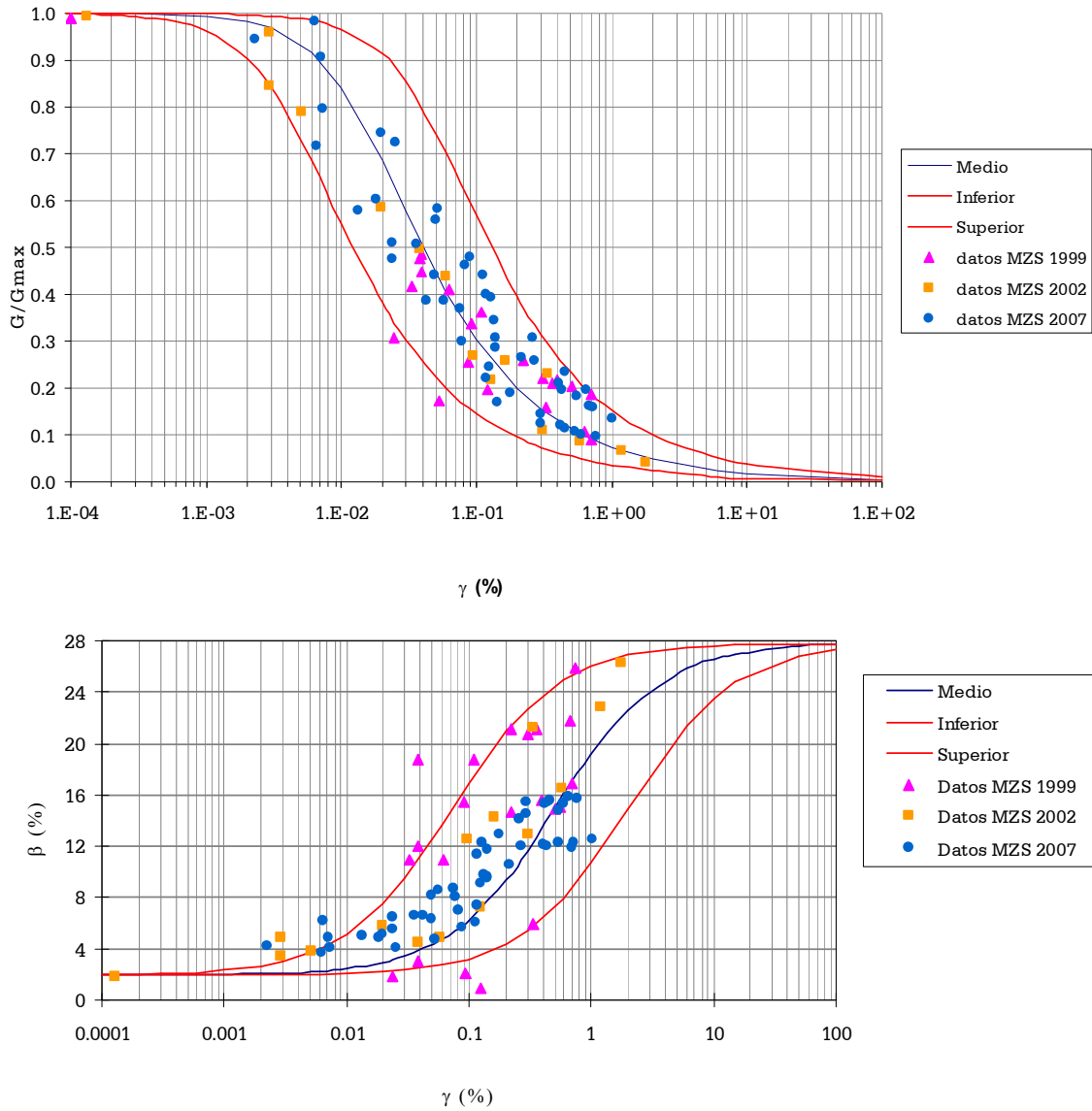
Para las formaciones de migmatita y rocas volcánicas no se tenían ensayos dinámicos por lo que se asignaron las curvas de flujo de lodos y escombros para considerar una posible variación. Como se observa las mayores dispersiones se presentan en los suelos transportados, especialmente en los flujos de lodos y de escombros, así como en los depósitos aluviales. En los suelos residuales la dispersión es menor. En los suelos residuales se detecta un cambio más brusco en la pendiente de la curva de degradación del módulo de rigidez, a partir del umbral de deformaciones, si se compara con el de los suelos transportados en donde la degradación es gradual.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas para cada unidad litológica:

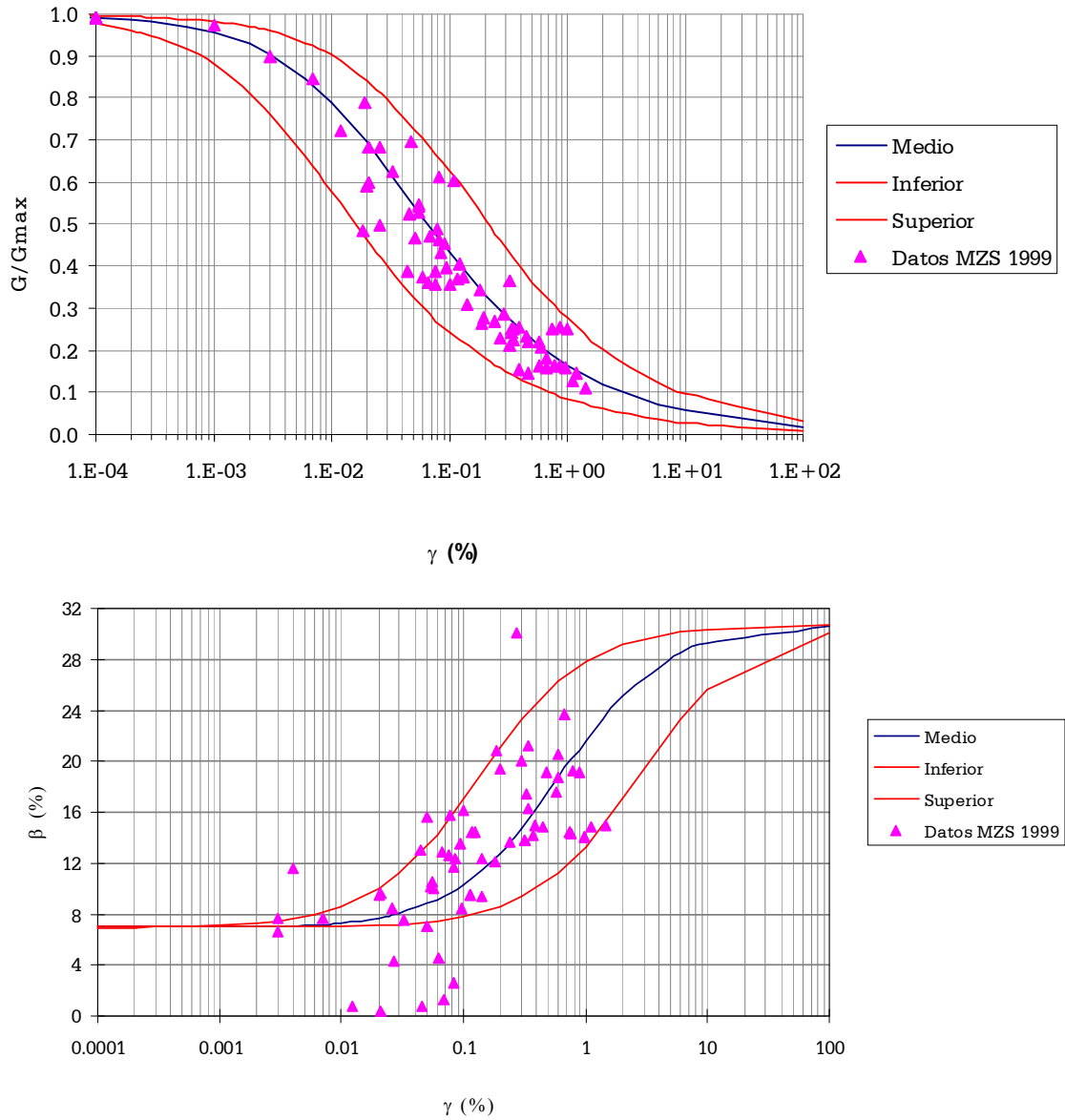


**Figura 7.23 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de anfibolita**





**Figura 7.24 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de gneis**



**Figura 7.25** Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de dunita

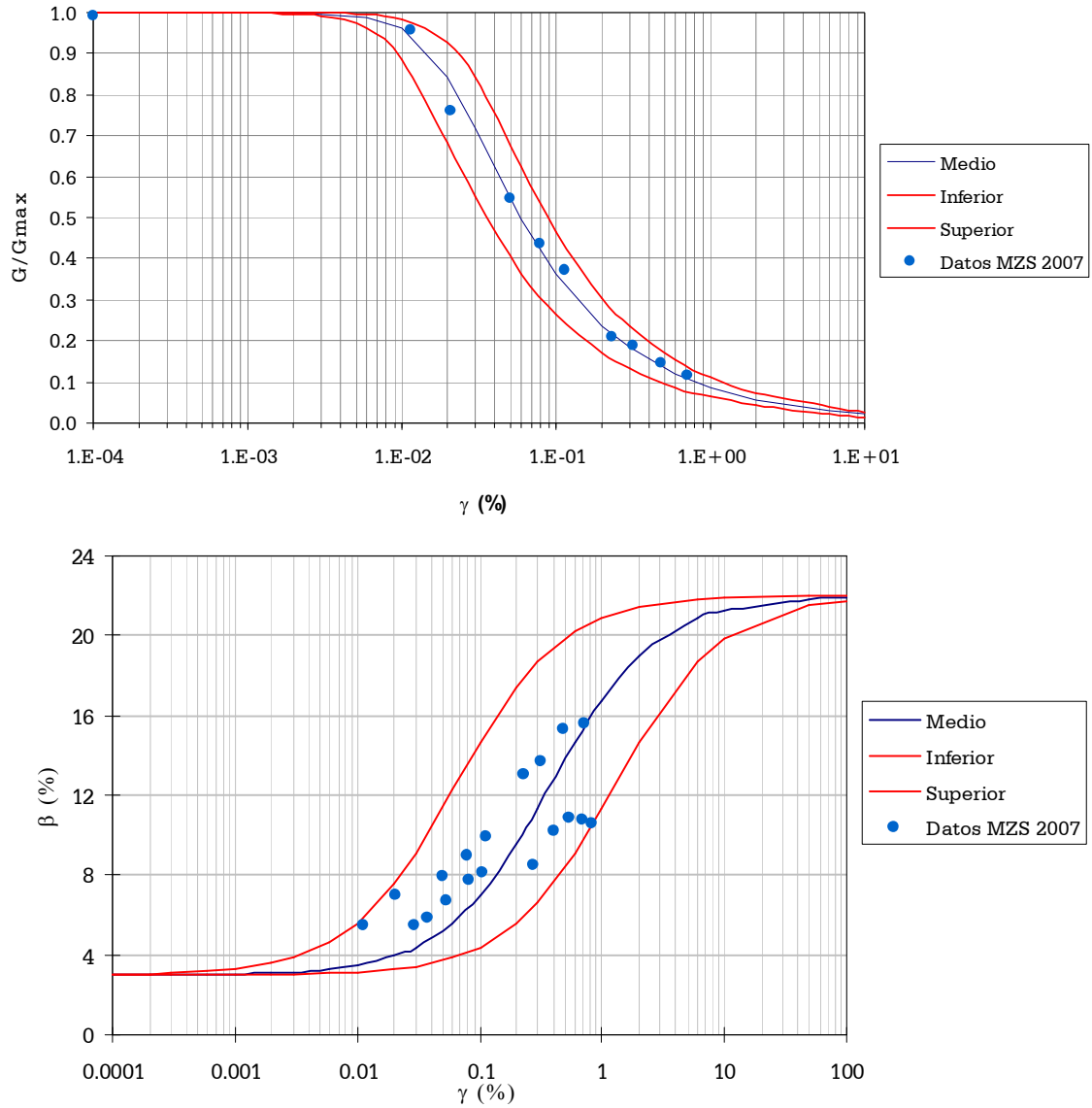
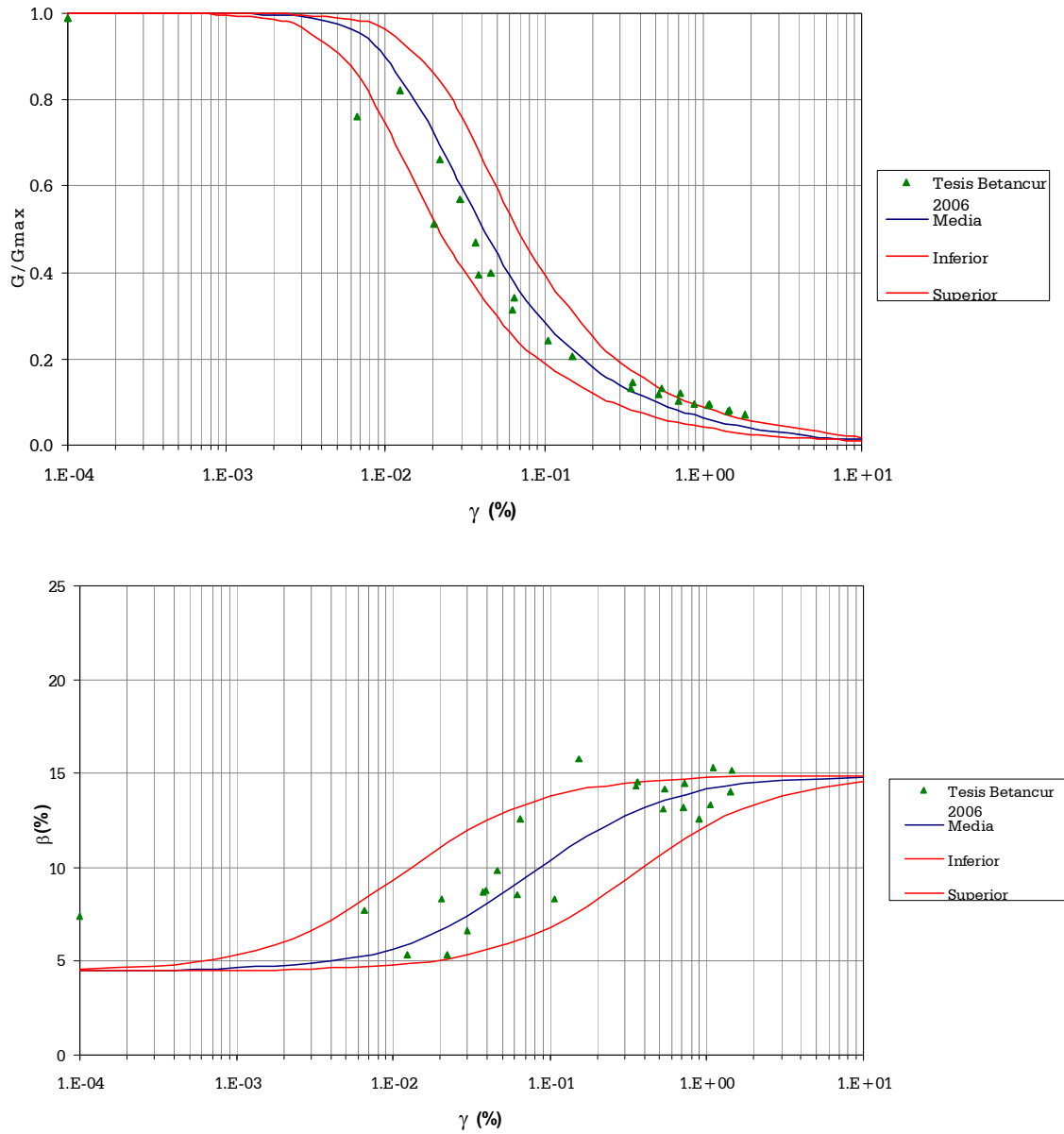


Figura 7.26 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de esquistos



**Figura 7.27** Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de diorita

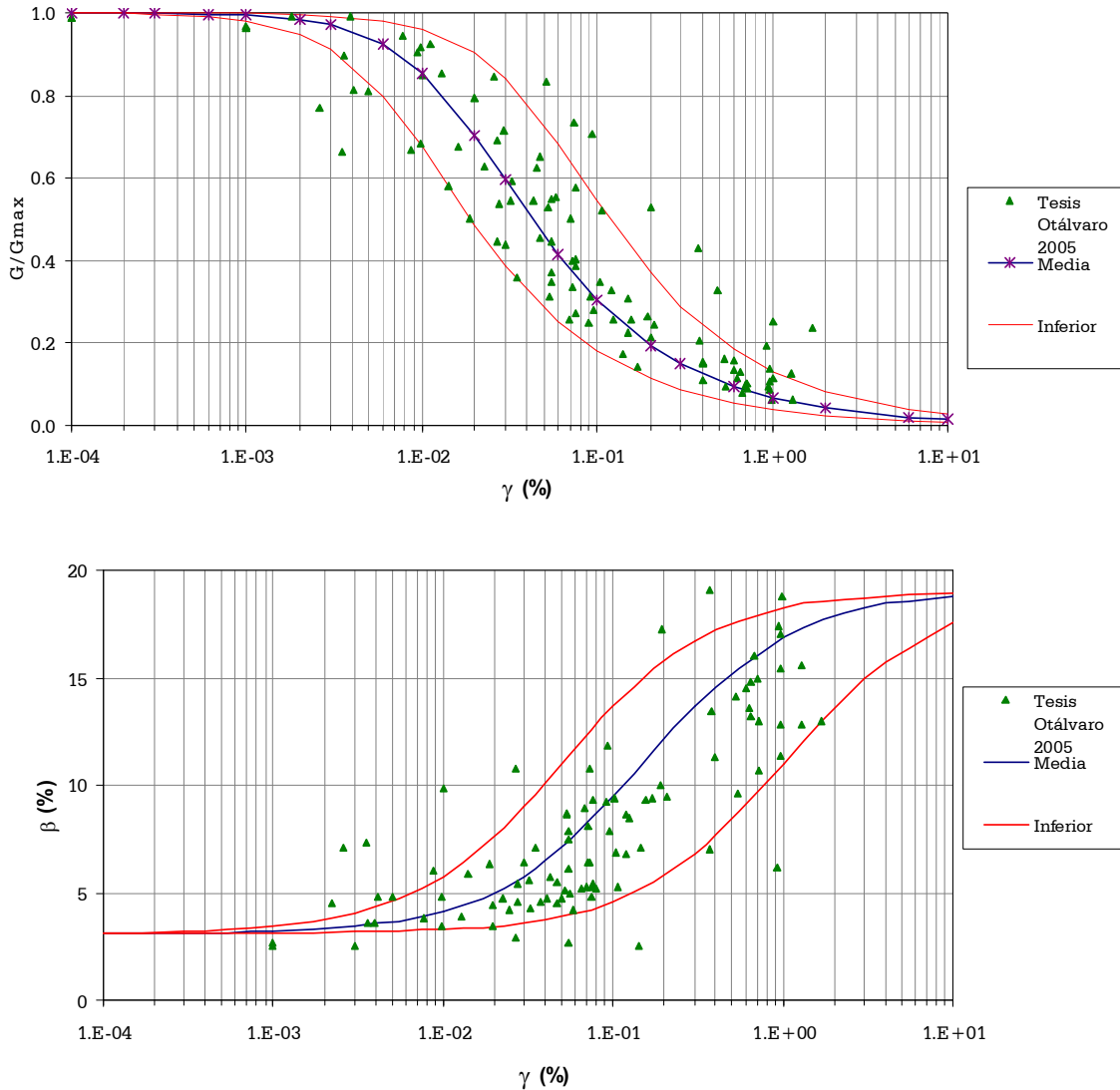
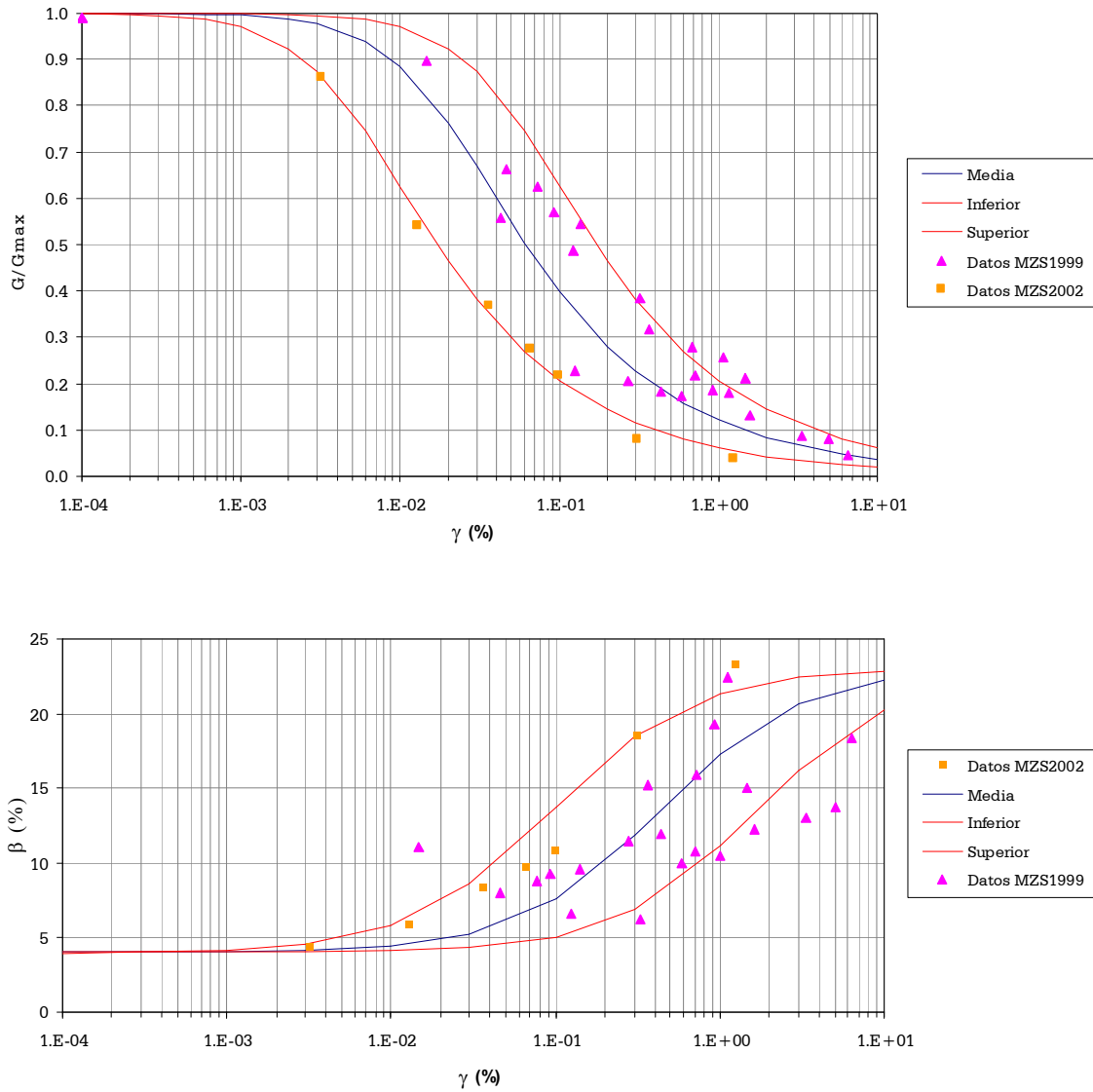


Figura 7.28 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de gabro



**Figura 7.29** Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los depósitos de vertiente

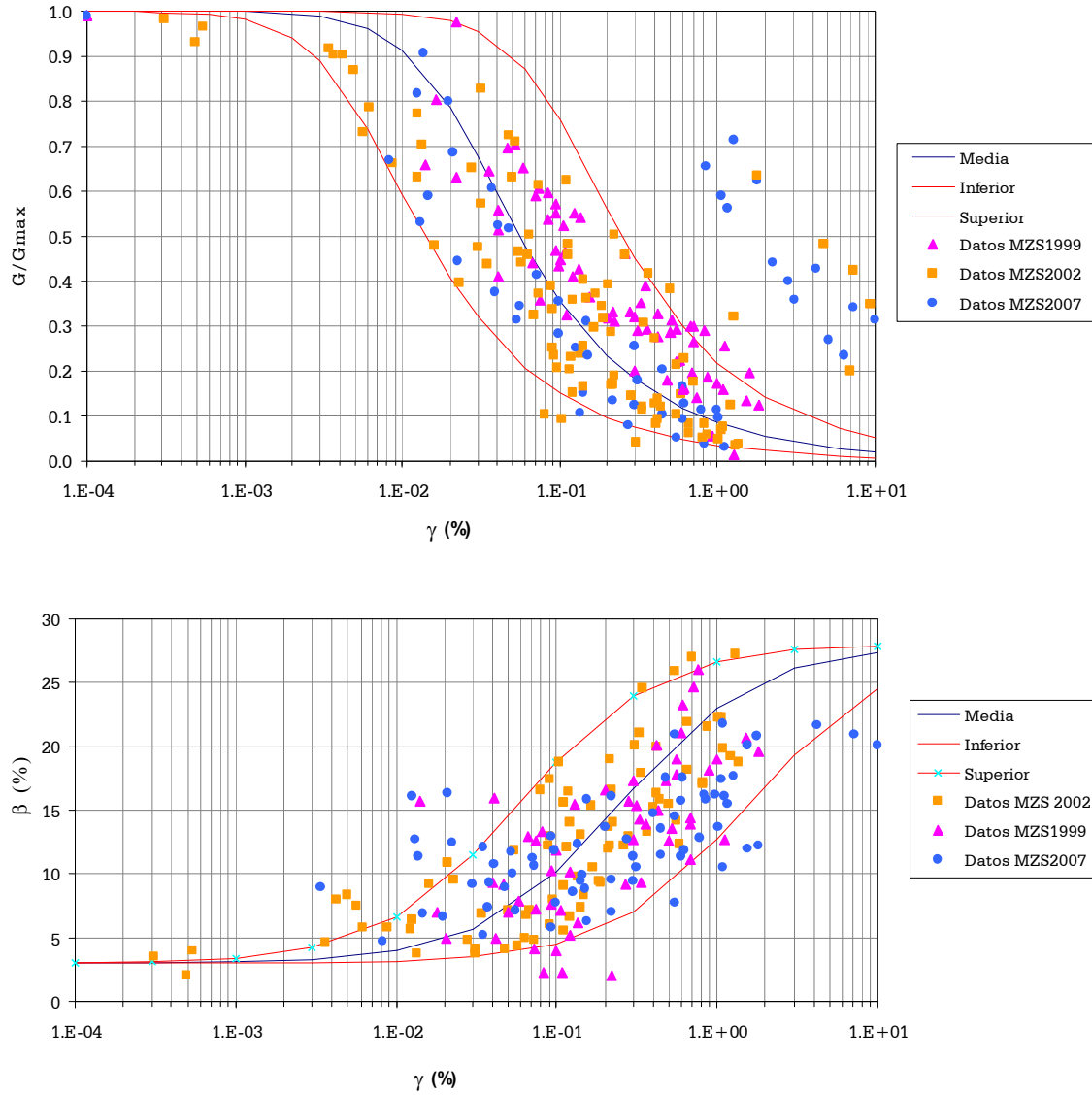
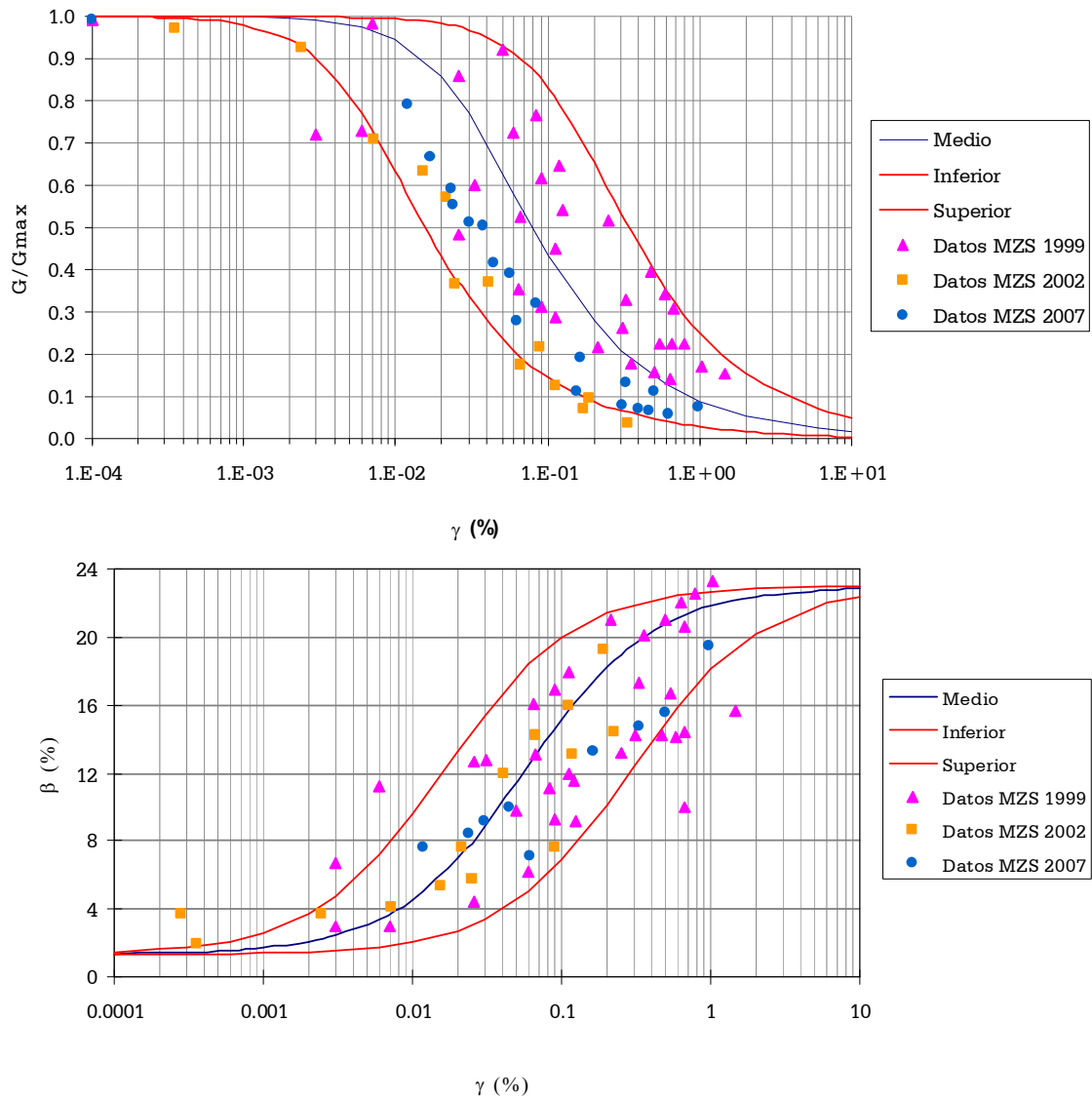


Figura 7.30 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los flujos de lodos y escombros



**Figura 7.31** Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los depósitos aluviales



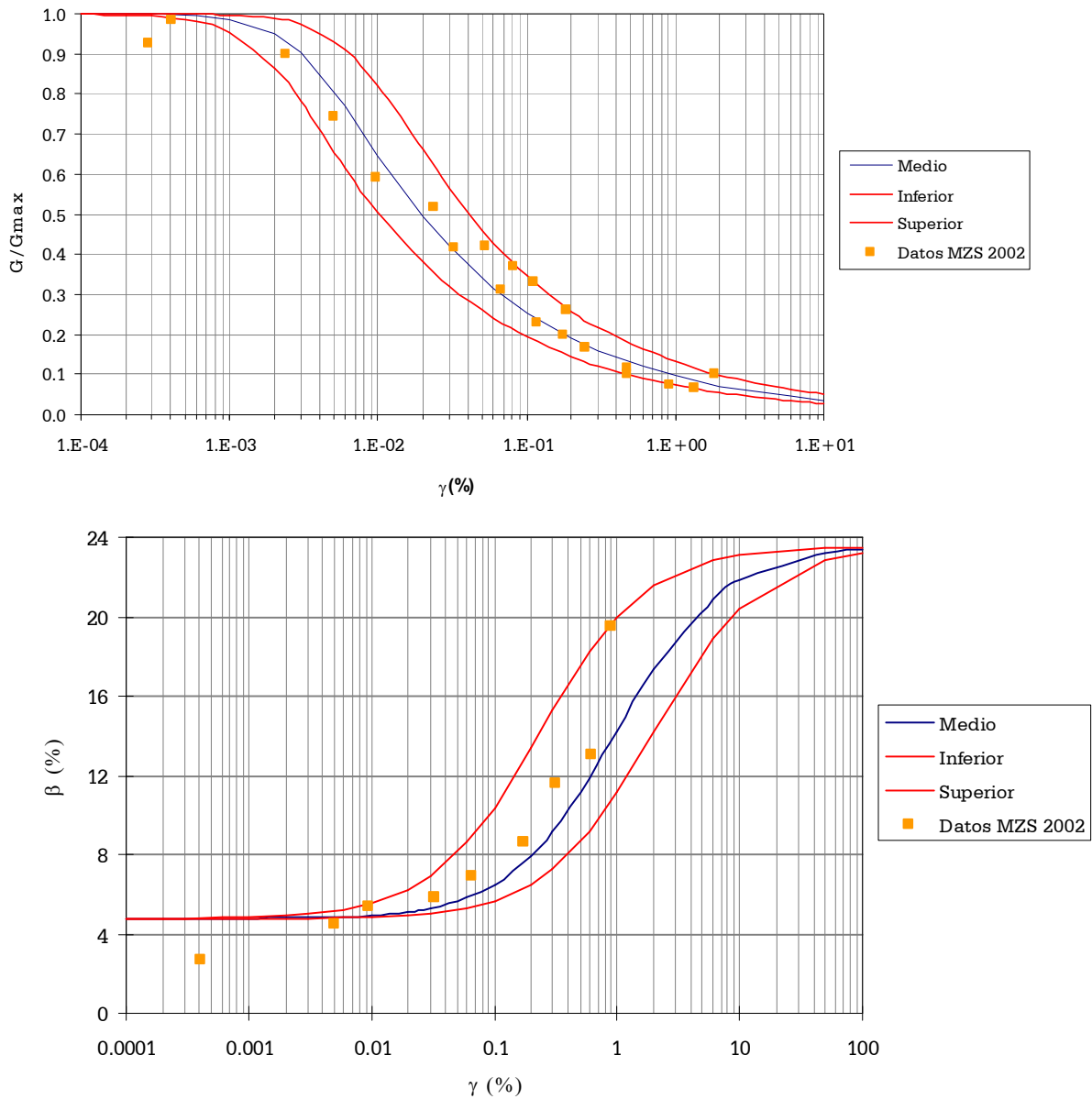
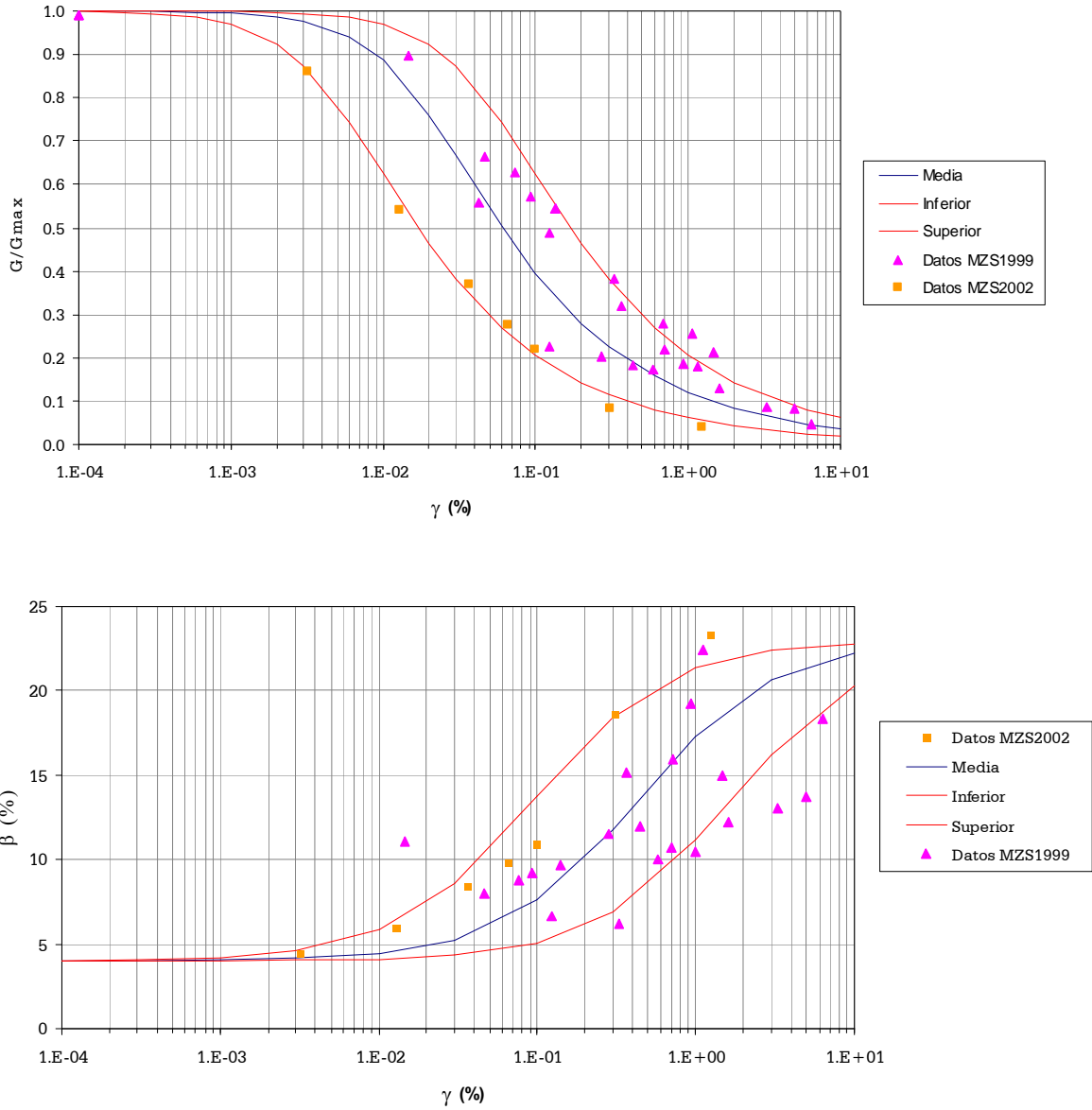


Figura 7.32 Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los depósitos aluviotorrenciales



**Figura 7.33** Curvas de degradación de módulo y de amortiguamiento para los suelos residuales de cuarzodiorita

## 7.6 VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE

Las relaciones entre las propiedades estáticas y dinámicas se hicieron a través de la velocidad de onda de corte. Las mediciones en campo de la velocidad de onda de corte corresponden a las tomadas mediante el ensayo Down-Hole, el cual se realizó en todas las perforaciones hechas para este proyecto como se muestra en la Tabla 7.13. Se buscó que cada formación en cada municipio tuviera al menos una perforación, para así tener registro de propiedades dinámicas y estáticas de cada material.

**Tabla 7.13 Cantidad de ensayos de campo tipo Down-Hole**

Municipio	Número de ensayos
Caldas	5
La Estrella	5
Sabaneta	4
Envigado	5
Copacabana	6
Girardota	6
Barbosa	5
<b>Total</b>	<b>36</b>

La formación correspondiente a la diorita para este estudio tiene mediciones en dos ensayos Down-Hole; sin embargo, estos datos no pueden ser usados en el análisis puesto que la diorita se encuentra a más de 20 m de profundidad. Las formaciones rocas volcánicas y migmatitas no presentan ensayos Down-Hole.

Debido a que no se cuenta con suficientes mediciones para determinar la magnitud de la velocidad de la onda de corte en cada punto que se evalúa la respuesta del sitio, fue necesario predecir los valores a partir de las propiedades estáticas y ensayos de penetración estándar. Se tomó como referencia para cada profundidad, los valores que se tenían de la velocidad de onda de corte con sus correspondientes propiedades estáticas, en la Tabla 7.14 se presenta la cantidad de datos tenidos en cuenta en el análisis, diferenciando los valores medidos para este estudio.

**Tabla 7.14 Cantidad de valores de velocidad recopilados por formación**

UNIDAD	# VALORES PARA $V_s$ (ESTUDIO ACTUAL)	# VALORES PARA $V_s$ (BASE DE DATOS)
Anfibolita	3	20
Dunita	0	22
Gneis	60	20
Esquisto	27	8
D. Aluvial	28	50

**Tabla 7.14 Cantidad de valores de velocidad recopilados por formación (Cont)**

D. Aluviotorrencial	0	15
Residual cuarzodiorita	14	24
Residual de gabro	0	25
Depósito de vertiente	0	31
Flujos	125	260

La estimación de los valores de velocidad de onda de corte, se realizó mediante un modelo de regresión múltiple, consistente en encontrar la posible relación entre una variable dependiente (velocidad) y otras variables independientes, y escoger el mejor modelo de regresión que se ajuste.

Inicialmente se efectuó un análisis de sensibilidad de las propiedades estáticas con la velocidad, mediante la representación gráfica presentada en la Figuras 7.18 a 7.22, se encontró que esta variable se relaciona con la profundidad ( $Z$ ), el número de golpes ( $N$ ) o la humedad ( $W$ ) de acuerdo con la formación. Además, se determina el tipo de función que se va a usar en las correlaciones.

Por lo tanto, se utilizaron modelos no lineales que pueden ser convertidos en lineales, a través de transformaciones de las variables, a continuación se presenta una transformación como ejemplo.

Una vez obtenidas las variables independientes a ser usadas en el análisis, de acuerdo con la formación y adoptando como criterio que la velocidad varía con la profundidad, se procedió a dibujar los diagramas de dispersión de cada variable con la profundidad y se buscó aquella función (logarítmica, lineal, polinómica, potencial o exponencial) que mejor se ajustara a la nube de puntos. La elección de la función no sólo fue con el criterio del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) si no, la que más representara la variación lógica de la propiedad estudiada.

Del análisis se observó que había una dependencia entre los valores del número de golpes del ensayo de penetración estándar ( $N$ ) con la profundidad, mientras que la otra variable independiente (humedad) no presentaba la misma tendencia. Las abscisas y ordenadas de las gráficas se representan con la función logaritmo natural para obtener sólo valores positivos, además se descartaron algunos valores extremos para disminuir la dispersión. La cantidad de valores del número de golpes se presenta en la Tabla 7.15.

Para el caso de la humedad natural, que los diagramas de puntos mostraban una falta de relación entre las variables, se hace uso de la herramienta de la distribución Beta para generar aleatoriamente los valores de entrada al modelo. En la Tabla 7.16 se presenta las ecuaciones obtenidas para cada unidad litológica, en función de la profundidad donde se va a obtener el valor de la velocidad de onda de corte.

**Tabla 7.15 Cantidad de valores de  $N_{spt}$  por formación**

<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD DE DATOS</b>
Anfibolita	246
Dunita	128
Gneis	510
Esquisto	149
D. Aluvial	1664
D. Aluviotorrencial	131
Residual cuarzodiorita	61
Diorita	703
Residual de Migmatita	5
Residual de gabro	213

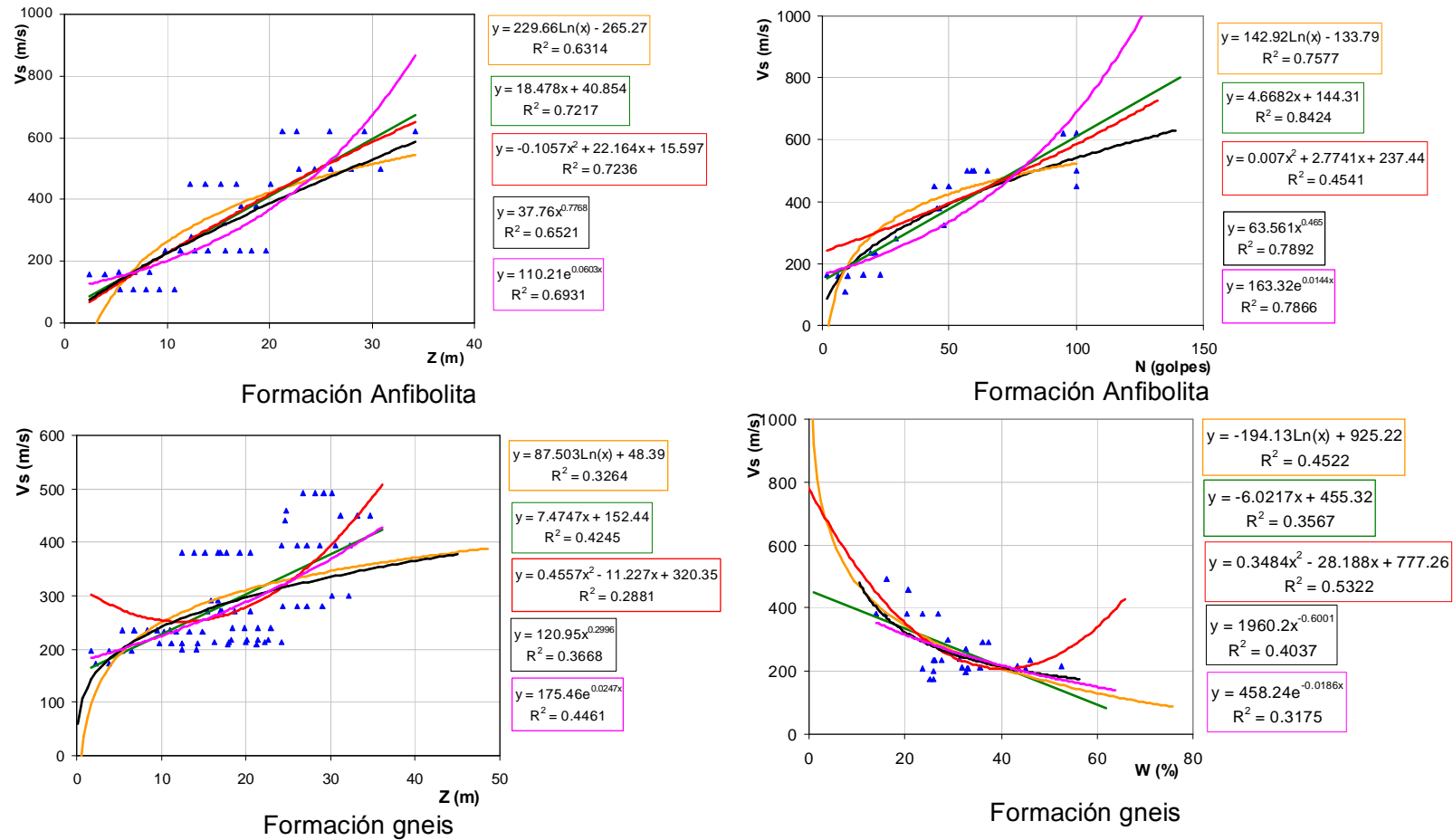


Figura 7.34 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 1 y 2

— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial

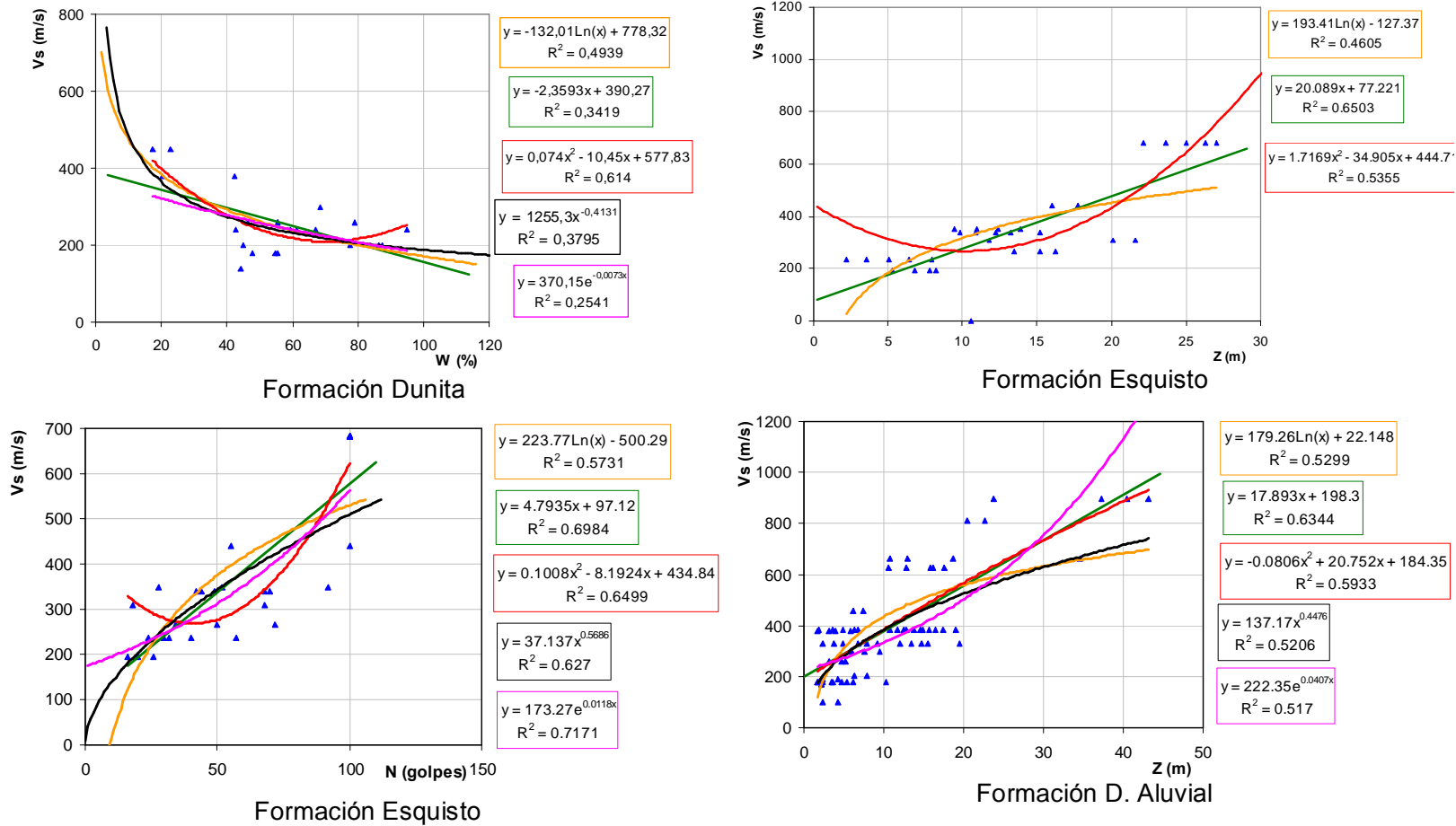
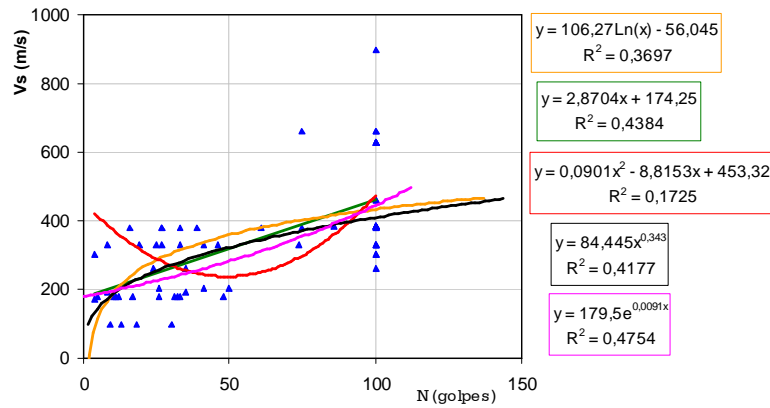
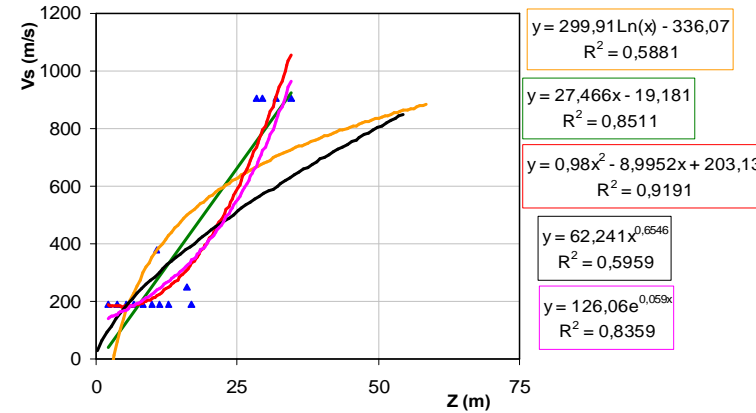


Figura 7.35 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formaciones 3,4 y12

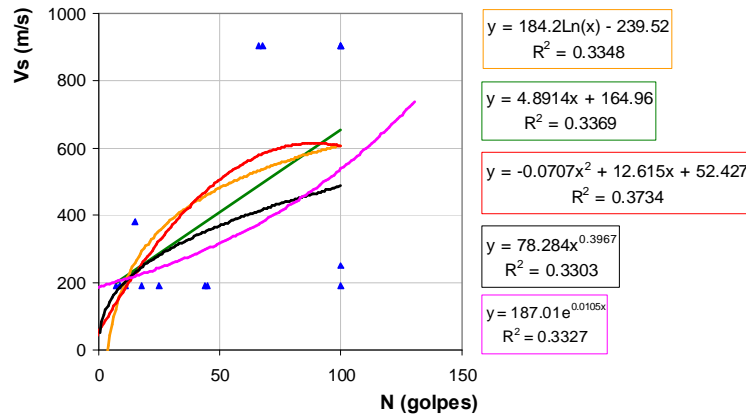
— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial



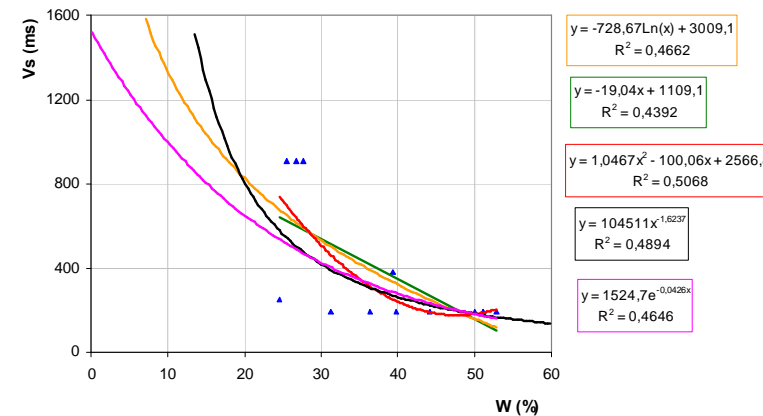
Formación D. Aluvial



Formación D. Aluviorrencial



Formación D. Aluviorrencial

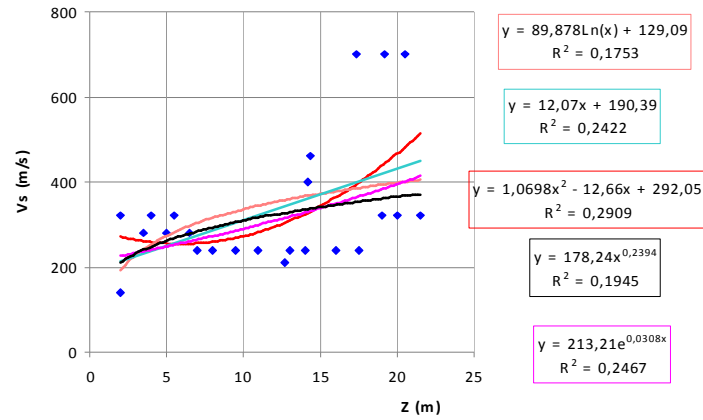


Formación D. Aluviorrencial

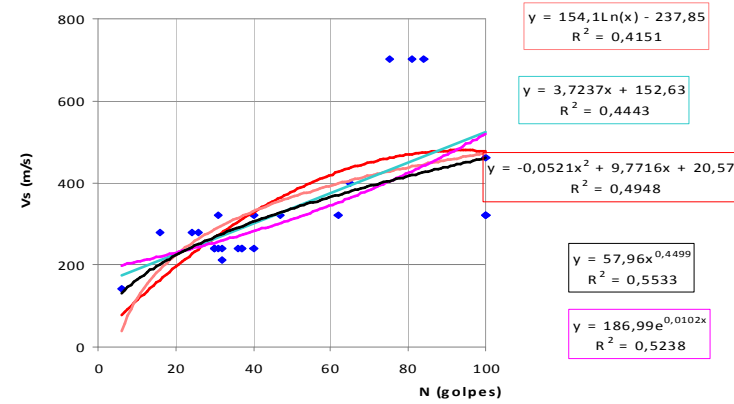
Figura 7.36 Gráficas de  $Z$ ,  $W$ , o  $N$  contra  $V_s$  – Formaciones 12 y 13

— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial

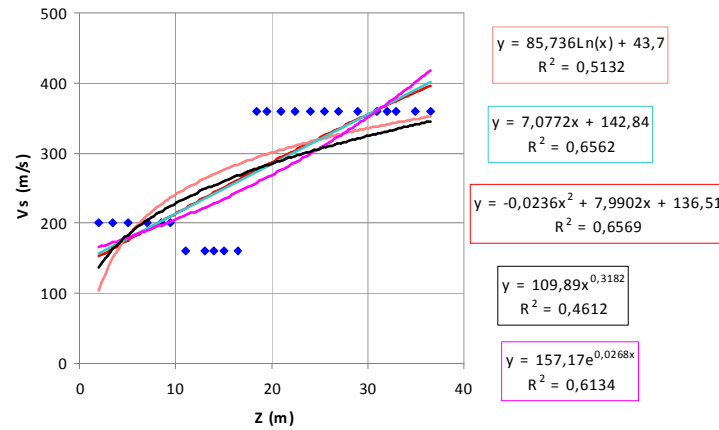




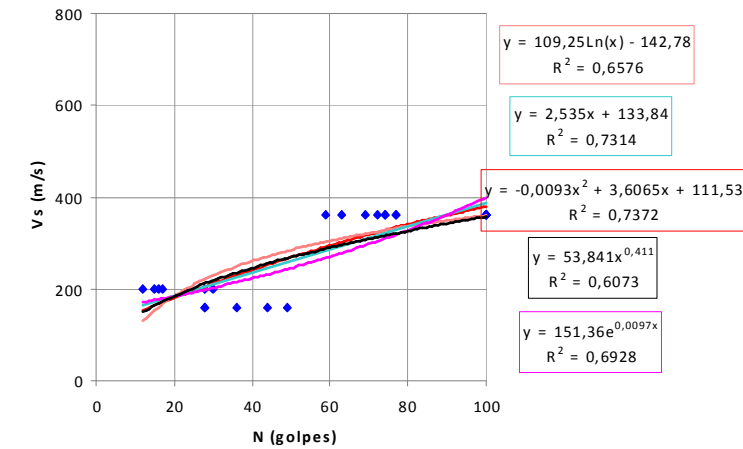
Formación Cuarzodiorita



Formación Cuarzodiorita



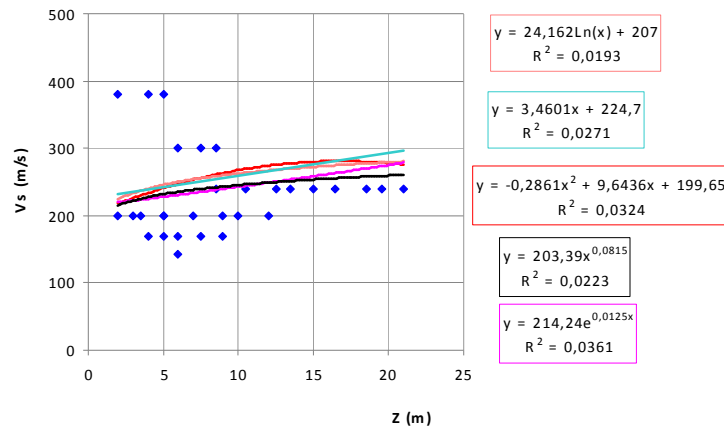
Formación Gabro



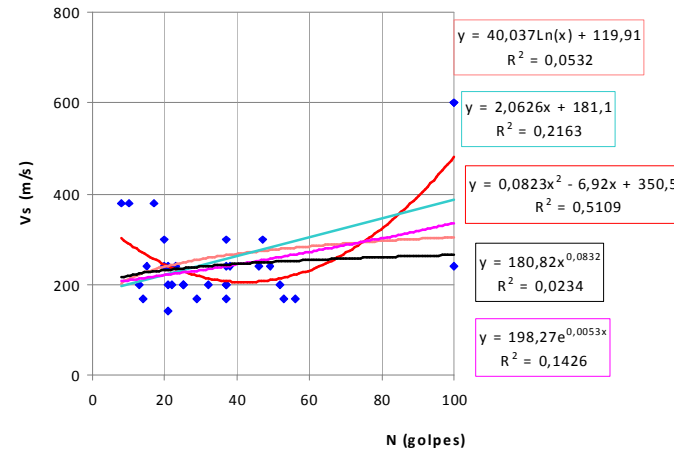
Formación Gabro

Figura 7.37 Gráficas de Z, W, o N contra  $V_s$  – Formaciones 5 y 7

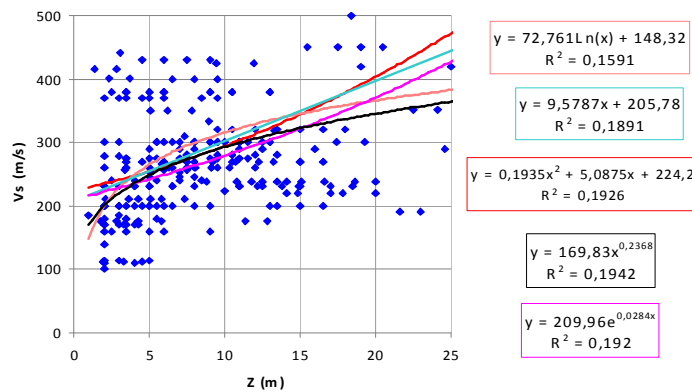
— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial



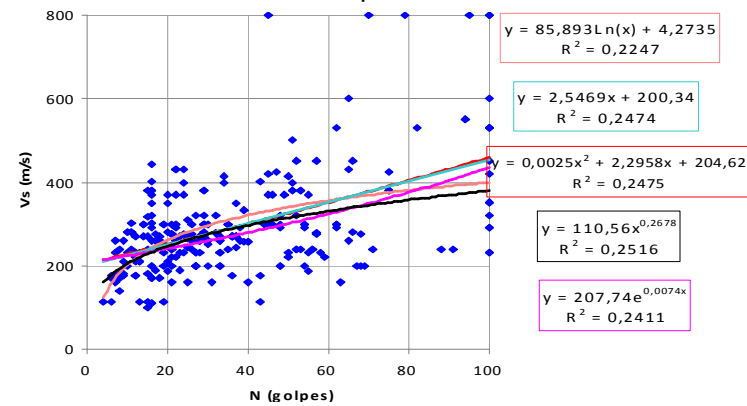
Formación Depósito de vertiente



Formación Depósito de vertiente



Formación Flujos de lodos y escombros



Formación Flujos de lodos y escombros

Figura 7.38 Gráficas de Z, W, o N contra Vs – Formación 10 y 11

— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial

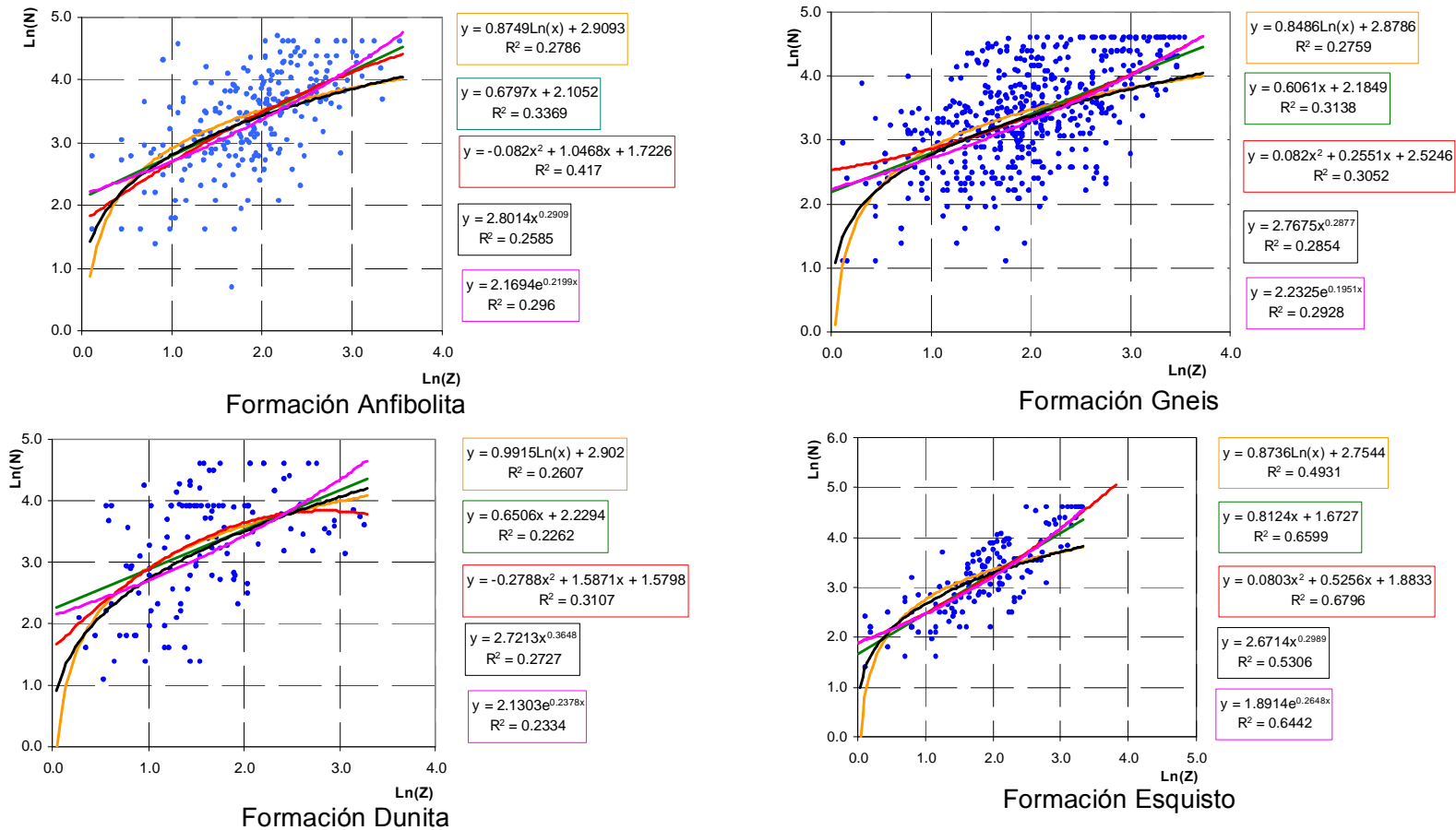
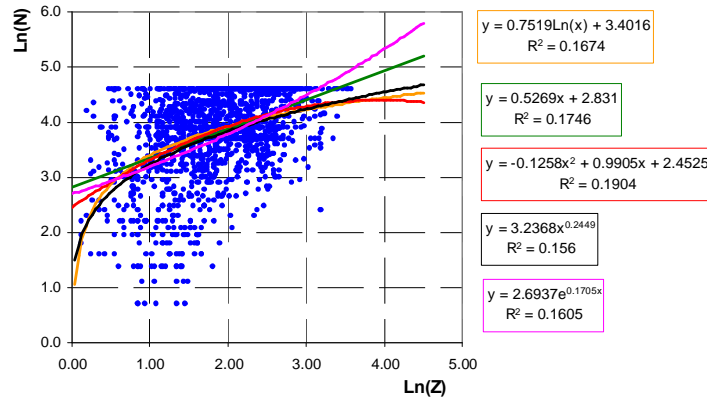
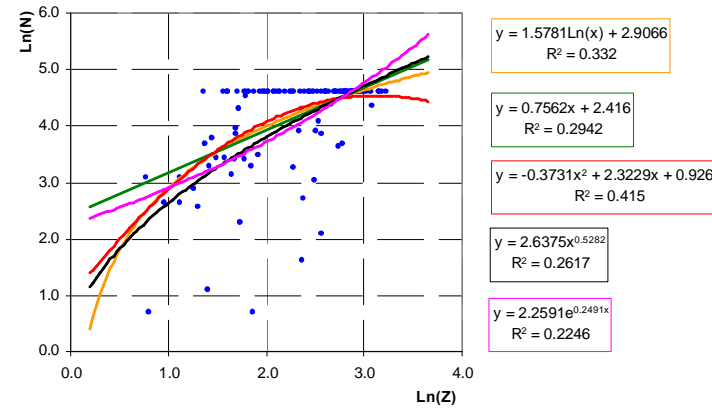


Figura 7.39 Gráficas de  $Z$ ,  $W$ , o  $N$  contra  $V_s$  – Formaciones 1 a 4

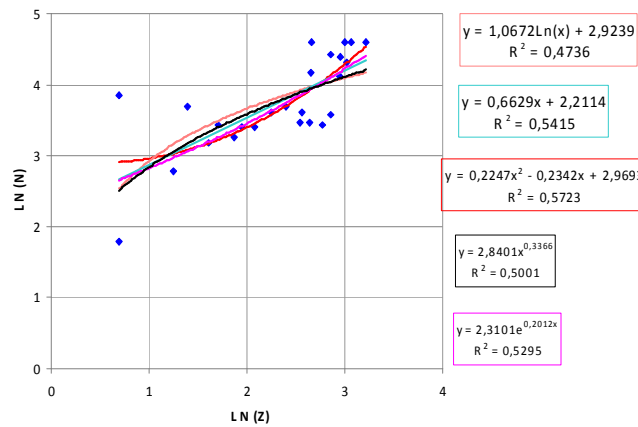
— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial



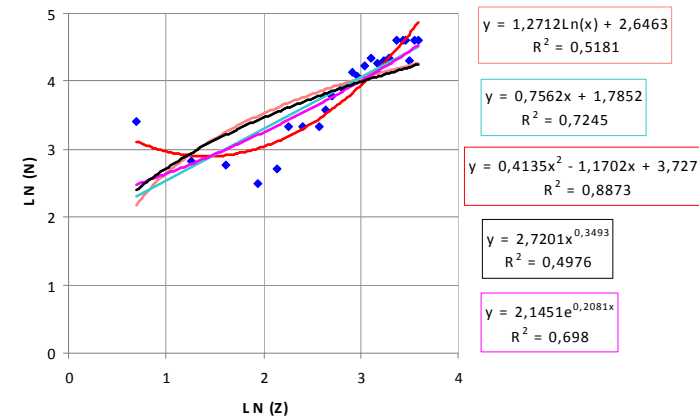
Formación D. aluvial



Formación D. aluviotorrencial



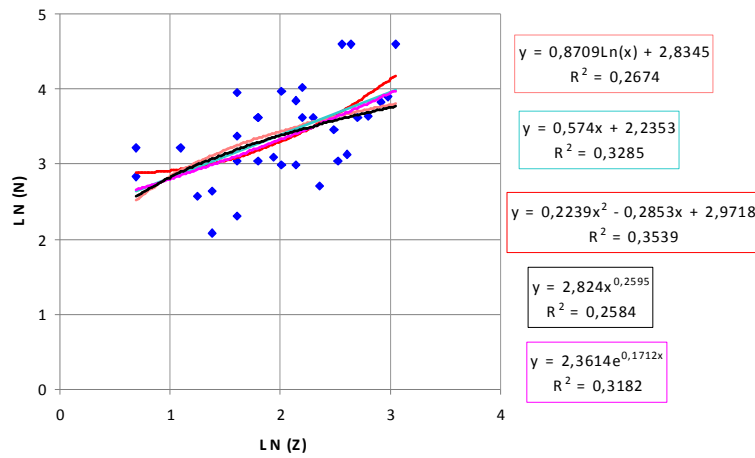
Formación Cuarzodioria



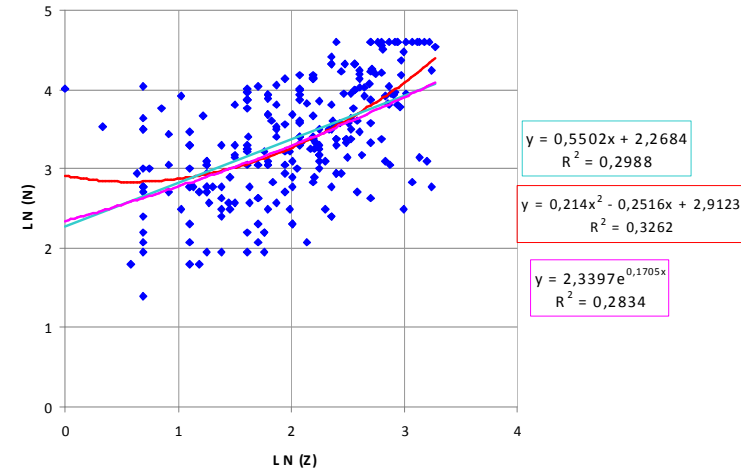
Formación Residual de Gabro

Figura 7.40 Gráficas de  $Z$ ,  $W$ , o  $N$  contra  $V_s$  – Formaciones 5, 7, 12y13

— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial



Formación deposito de vertiente



Formación flujos de lodos y escombros

**Figura 7.41 Gráficas de Z, W, o N contra  $V_s$  – Formaciones 10 y 11**

— Logarítmica — Lineal — Polinómica — Potencial — Exponencial

En la Tabla 7.16 se presenta un resumen de las ecuaciones obtenidas para determinar los valores de entrada al modelo de regresión, para una determinada profundidad. En la Tabla 7.17 se presentan las ecuaciones obtenidas para determinar los valores de la velocidad por unidad litológica. Donde  $\varepsilon$  corresponde a un número aleatorio con distribución normal estándar, para tener en cuenta la dispersión de los datos.

**Tabla 7.16 Ecuaciones de las variables independientes por unidad litológica**

UNIDAD	ECUACIÓN	$R^2$	$\sigma$
Anfibolita	$Ln(N) = -0,082 (LnZ)^2 + 1,0468 LnZ + 1,7226 + \varepsilon\sigma$	0,417	0,52
Dunita	Distribución beta para $W (a=10,30, b=88,10, r=0,83, t=1,18)$		
Gneis	Distribución beta para $W (a=9,8, b=67, r=1,42, t=2,30)$ $Ln(N) = 0,6061Ln(Z) + 2,1849 + \varepsilon\sigma$	0,314	0,45
Esquisto	$Ln(N) = 0,0803 (Ln(Z))^2 + 0,5256 Ln(Z) + 1,8833 + \varepsilon\sigma$	0,680	0,59
D. Aluvial	$Ln(N) = -0,1319 (Ln(Z))^2 + 0,9426 Ln(Z) + 2,6306 + \varepsilon\sigma$	0,190	0,31
D. Aluviotorrencial	$Ln(N) = -0,3731 (Ln(Z))^2 + 2,3229 Ln(Z) + 0,9268 + \varepsilon\sigma$ Distribución beta para $W (a=8,30, b=59, r=0,92, t=1,19)$	0,415	0,6
Residual cuarzodiorita	$Ln(N) = 0,2247(Ln(Z))^2 - 0,2342Ln(Z) + 2,9693 + \varepsilon\sigma$	0,570	0,66
Residual de gabro	$Ln(N) = 0,7562 Ln(Z) + 1,7852 + \varepsilon\sigma$	0,720	0,68
Depósito de vertiente	$Ln(N) = 0,2239(Ln(Z))^2 - 0,2853Ln(Z) + 2,9718 + \varepsilon\sigma$	0,350	0,63
Flujos	$Ln(N) = 0,214(Ln(Z))^2 - 0,2516Ln(Z) + 2,9123 + \varepsilon\sigma$	0,330	0,70

**Tabla 7.17 Fórmulas de  $V_s$ , a partir de una regresión múltiple**

UNIDAD	ECUACIÓN	$R^2$ (%)	$\sigma$ (m/s)
Anfibolita	$V_s = 55,6054 + 15,2633Z + 0,930851N + \varepsilon\sigma$	78,4	80
Dunita	$V_s = -37,3737 + 1477,78W^{-0,4131} + \varepsilon\sigma$	51,5	61
Gneis	$V_s = 493,558 + 182,794e^{0,0247Z} - 149,361Ln(W) + \varepsilon\sigma$	74,2	47
Esquisto	$V_s = 19,7613 + 15,1092Z + 71,4851e^{0,0118N} + \varepsilon\sigma$	83,9	67
D. Aluvial	$V_s = 79,3983 + 10,5321Z + 94,3324e^{0,0091N} + \varepsilon\sigma$	58,9	105
D. Aluviotorrencial	$V_s = 45,27 + 30,1788Z - 199,267e^{0,0105N} + 1142,08e^{-0,0426W} + \varepsilon\sigma$	88,6	103
Residual cuarzodiorita	$V_s = 153,06 + 3,744N - 0,1206Z + \varepsilon\sigma$	44,0	121
Residual de gabro	$V_s = 134 + 2,65214N - 0,36287Z + \varepsilon\sigma$	73,0	50
Depósito de vertiente	$V_s = 196 + 2,4639N - 3,288664Z + \varepsilon\sigma$	23,0	99
Flujos	$V_s = 181 + 1,89189N + 4,68611Z + \varepsilon\sigma$	28,0	109

En general el valor de  $R^2$  que presentaría mayor incertidumbre en la variable de respuesta corresponde a las unidades geológicas de flujos y depósito de vertiente.

El valor del error estándar ( $\sigma$ ) es más alto en las formaciones correspondientes a los depósitos aluvial, aluviotorrencial y de vertiente, al residual de cuarzodiorita, y a los flujos, lo cual indica una mayor dispersión de los datos. Estas unidades se caracterizan por la heterogeneidad en su composición.

En los depósitos aluviales no fue posible diferenciar una estratigrafía detallada (finos y gruesos) debido a la escala de trabajo para este estudio y a la compleja dinámica de los fenómenos que los originan (ríos trenzados, meándricos etc). Así mismo para los depósitos aluviotorrenciales y los flujos la dispersión de los datos se debe a los procesos genéticos asociados, involucrando materiales con diferentes grados de meteorización. En

la unidad definida como cuarzoriorita se estima que la dispersión es producto de la gran extensión de este cuerpo dentro del área de estudio, con amplias variaciones texturales apareciendo facies de gabros, dioritas, granitos, entre otros, los cuales no es posible delimitar, adicionalmente, los perfiles de meteorización varían según su localización en el valle y sobre la ladera misma.

Para la unidad correspondiente al gneis, se observó para las variaciones con la velocidad de que el encontrado en Medellín presenta un comportamiento diferente con respecto al resto de municipios, aunque es poco notorio cuando se grafican con la profundidad.

Finalmente, se realizó una verificación de las ecuaciones con los resultados de los ensayos obtenidos de la base de datos, se encontró la necesidad de restringir las ecuaciones con los valores máximos y mínimos estimados a partir de las velocidades obtenidas de este estudio, de la microzonificación sísmica del Área Metropolitana del año 2002 y de la microzonificación sísmica de Medellín del año 1999 (Véase la Tabla 7.18).

**Tabla 7.18. Valores máximos y mínimos medidos de  $V_s$**

Tipo de suelo	$V_s$ Máxima (m/s)	$V_s$ Mínima (m/s)
Anfibolita	1500	110
Gneis	860	175
Aluvial	900	100
Aluviotorrencial	900	192
Dunita	450	125
Esquistos	950	194
Cuarzodiorita	700	140
Diorita	100	900
Gabro	360	160
Depósito de vertiente	600	142
Flujos	980	100

Como se mencionó anteriormente, en las formaciones correspondientes a rocas volcánicas y migmatitas no se tienen ensayos Down-Hole ni de penetración estándar, por lo tanto se supusieron valores máximos y mínimos con base en los resultados de la base de datos actualizada, teniendo en cuenta las formaciones de un comportamiento semejante. Estos valores son velocidad mínima 100 m/s y velocidad máxima 900 m/s para ambas.

En general, se presentan velocidades de onda de corte mínimas entre 100 m/s y 160 m/s, valores que corresponden a suelo suelto de baja densidad, el cual se encuentra en superficie. Los valores máximos de la velocidad de onda de corte varían entre 600 m/s y 1500 m/s, magnitudes que corresponden a roca meteorizada, a depósitos o flujos con bolas de roca grandes o muy consolidados.



**ESTA HOJA HA SIDO  
INTENCIONALMENTE DEJADA EN  
BLANCO**

## 8. MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

Cuando se estudian las condiciones dinámicas a las que se encuentra sometido un perfil de suelo bajo carga dinámica, es importante diferenciar cada una de las variables que lo perturban y convierten en un sistema cuya respuesta presenta características únicas. En este sentido, es importante reconocer que un perfil de suelo como sistema físico-dinámico, debe entenderse como un sistema en tres dimensiones, cuya evolución geológica lo convierte en un sistema heterogéneo, y que como ente dinámico presenta variaciones espacio temporales; que lo transforma en un sistema con alto grado de complejidad (Correa, 2005).

La ciencia en general y la ingeniería en particular postulan problemas cuyas soluciones demandan diferentes clases de modelos y técnicas de modelado. Cualquier metodología diseñada para razonar acerca de estos modelos debe ser: a) suficientemente flexible para permitir el manejo de varios grados de incertidumbre y complejidad y b) suficientemente poderosa para tratar con situaciones en las cuales la señal de entrada pueda ser o no controlable (García *et al.*, 2006).

En la actualidad, existen diferentes metodologías que intentan acercarse a las condiciones de comportamiento “real” del suelo sometido a una excitación sísmica; es decir, metodologías que disminuyen las hipótesis relacionadas a la concepción del perfil de suelo como sistema dinámico. Es posible establecer tres tipos de metodologías para determinar la respuesta sísmica, que en lo general, están relacionadas a la concepción bajo la cual se entiende el problema. La primera de estas intenta explicar el comportamiento del suelo a través de modelos matemáticos dimensionales, tomados de teorías elásticas (de acuerdo a las dimensiones requeridas para explicar el fenómeno). El segundo, intenta a partir de relaciones entrada-salida establecer una función para fijar el comportamiento del suelo (Funciones de Transferencia lineales, relaciones espectrales, etc.) (Safak, 1997) y finalmente, métodos que intentan establecer la respuesta del perfil de suelo a partir de datos sobre el comportamiento del mismo (*i.e.* Arai *et al.*, 1990). La elección de cualquiera de estas metodologías depende de la cantidad de datos disponibles y del entendimiento que se tenga sobre el problema en estudio.

A continuación se expone la metodología empleada para la evaluación de la respuesta sísmica en el estudio de microzonificación sísmica para los municipios del Valle de Aburrá. En términos generales esta comprende:

- Determinación de las señales excitadoras, considerando el espectro obtenido del análisis probabilístico realizado.
- Determinación de las variables para la caracterización del suelo.
- Metodología para el cálculo de la respuesta dinámica considerando las incertidumbres asociadas.
- Cálculo de la respuesta e interpretación de los resultados.

En este estudio de microzonificación se evalúa la respuesta sísmica de los perfiles de suelo presentes en los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado. Como producto de esto se determinará el espectro de respuesta esperado en superficie para diferentes puntos ubicados previamente en las áreas urbanas y las zonas de expansión de cada uno de estos municipios, según se describirá a continuación.

## 8.1 ELEMENTOS TEÓRICOS

Cuando se idealiza el perfil de suelo a través de un modelo que supone reproduce el comportamiento frente a carga dinámica, pueden encontrarse diferentes modelos para evaluar la respuesta de sitio. Es así como, es posible encontrar modelos como el modelo unidimensional de onda de corte o aquellos basados en soluciones numéricas aproximadas como los métodos de elementos finitos y diferencias finitas.

En este estudio se emplea el modelo unidimensional de onda de corte a través de un software llamado SHAKE91 (Schnabel *et al.*, 1972) propuesto inicialmente por Kanai *et al.*, 1966, para obtener la respuesta ante carga dinámica. Hasta la fecha este modelo ha sido usado satisfactoriamente en otros estudios de microzonificación, debido a las buenas aproximaciones de respuesta al ser comparado con mediciones provenientes de registros acelerográficos. A continuación se expone brevemente el soporte teórico de dicho modelo.

Este modelo propone la solución de la ecuación diferencial de onda unidimensional. Para resolver esta ecuación es necesario establecer un modelo constitutivo que permita solventar el hecho de que se encuentran mezclados esfuerzos con desplazamientos. Para tal propósito, se ha aceptado un comportamiento viscoelástico, representado a través del modelo Kelvin-Voigt. En este modelo, el esfuerzo de corte  $\tau$ , es la suma de una parte elástica y una viscosa.

Adicionalmente se emplea un modelo lineal equivalente que modifica el modelo Kelvin-Voigt, con el objetivo de incorporar dentro del análisis el comportamiento no lineal del suelo cuando se superan niveles de deformación de  $10^{-3}$  o  $10^{-4}$  (Ishijara, 1996). En el modelo lineal equivalente, el módulo de rigidez  $G$  y la fracción de amortiguamiento crítico  $\beta$  son determinados a partir de un proceso recursivo que se considera, el correspondiente al nivel de deformaciones inducidas por el sismo específico.

A través de este modelo es posible obtener la respuesta del suelo asociada con la propagación vertical de ondas de corte, considerando las siguientes hipótesis:

- Perfil de suelo compuesto de estratos horizontales de extensión infinita, cuyas fronteras no generen movimientos adicionales al primario.
- El comportamiento del perfil de suelo se debe primordialmente a la propagación de ondas SH, la cuales reflejan y refractan ondas del mismo tipo.

- Los materiales que constituyan cada uno de los estratos se consideran isótropos y homogéneos en toda su extensión, es decir, cualquier punto dentro del estrato tendrá las mismas características que otro punto dentro del mismo estrato.
- El perfil de suelo se considera en campo libre, es decir, no se contemplan efectos por las construcciones en superficie, por lo cual el esfuerzo cortante en superficie es igual a cero.
- Cada estrato del sistema está completamente definido por su valor de módulo de rigidez ( $G$ ), relación de amortiguamiento crítico ( $\beta$ ), densidad y espesor.
- La dependencia de las propiedades dinámicas con la deformación se toma en cuenta utilizando un procedimiento lineal equivalente basado en el nivel medio de deformación efectiva calculada para cada capa (Schnabel *et al.*, 1972), que a su vez independiza los parámetros dinámicos de la frecuencia.

De esta manera, la respuesta dinámica de un perfil de suelo ante carga sísmica depende de (Betancur, 2006):

- Las características del movimiento: mecanismo focal, distancia al foco, duración, amplitud, energía liberada y contenido frecuencial.
- Efectos geométricos: geomorfología, disposición de los estratos en profundidad y geformas enterradas.
- Características de los perfiles de suelo: espesor, velocidad de onda de corte, amortiguamientos, impedancia.

## 8.2 METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA

La determinación de la respuesta sísmica depende básicamente de cuatro elementos: La fuente excitadora, el modelo matemático que represente el comportamiento del perfil de suelo frente carga sísmica, Parámetros dinámicos y físicos que permitan generar conocimiento sobre el sistema estudiado, y conocimiento sobre la geología de la o las zonas estudiadas. Cada uno de estos cuatro elementos poseen incertidumbres que han sido estudiadas a partir de diferentes metodologías (Romo *et al.*, 2003, Auvinet *et al.*, 2005, entre otros).

Por ejemplo, los trabajos de exploración geotécnica consisten en la realización de sondeos para efectuar ensayos de campo y recuperar muestras de suelo de los sitios estudiados. Con base en los resultados obtenidos de estos trabajos y de pruebas de laboratorio efectuadas en las muestras recuperadas, se pueden definir entre otros, los perfiles estratigráficos de los sitios estudiados, así como sus propiedades índice y mecánicas.

Aún con los avances en los procedimientos de ensayos y las técnicas para monitorear las variables, resultado de esta exploración, existe gran incertidumbre en la aplicación de metodologías estándar y la determinación del criterio para la interpretación de las

respuestas monitoreadas en sistemas de suelo. Asociada a la recolección de datos pueden establecerse dos tipos de incertidumbre: la aleatoria debida a la naturaleza propia de la respuesta del suelo ante la prueba misma y la epistémica, originada por la falta de conocimiento del proceso.

El incremento en la cantidad y calidad de las bases de datos pueden reducir la incertidumbre epistémica, pero en el caso de la incertidumbre aleatoria se requiere del conocimiento profundo sobre el tipo de prueba, condiciones de ensayo, limitaciones prácticas y criterios de interpretación de los resultados.

La metodología empleada en este estudio, pretende incorporar a través de tratamientos estadísticos, la incertidumbre o desconocimiento sobre el comportamiento de los datos y a su vez expresar la variabilidad que presentan los mismos, debido a las condiciones en las que fueron determinados. Así mismo, intenta de una manera racional cuantificar la falta de conocimiento sobre los procesos que interfieren directamente en la determinación de la respuesta sísmica.

La metodología empleada se presenta en la Figura 8.1. El desarrollo de esta metodología requiere de tres pasos básicos para obtener la respuesta sísmica de los perfiles de suelo estudiados:

PASO 1) Determinación de los parámetros geométricos, físicos y dinámicos para el perfil de suelo de suelo evaluado, considerando la incertidumbre relacionada con la determinación y desconocimiento de los parámetros.

PASO 2) Evaluación de la respuesta a partir del modelo unidimensional para cada uno de los de los sitios estudiados.

PASO 3) Cálculo de la incertidumbre asociada a la determinación de la respuesta, la cual se obtiene involucrando un factor de incertidumbre dentro de la relación espectral entre el espectro de respuesta en superficie y el espectro de respuesta en la base rígida ( $RRS$ ). A continuación se describen cada uno de los pasos involucrados.

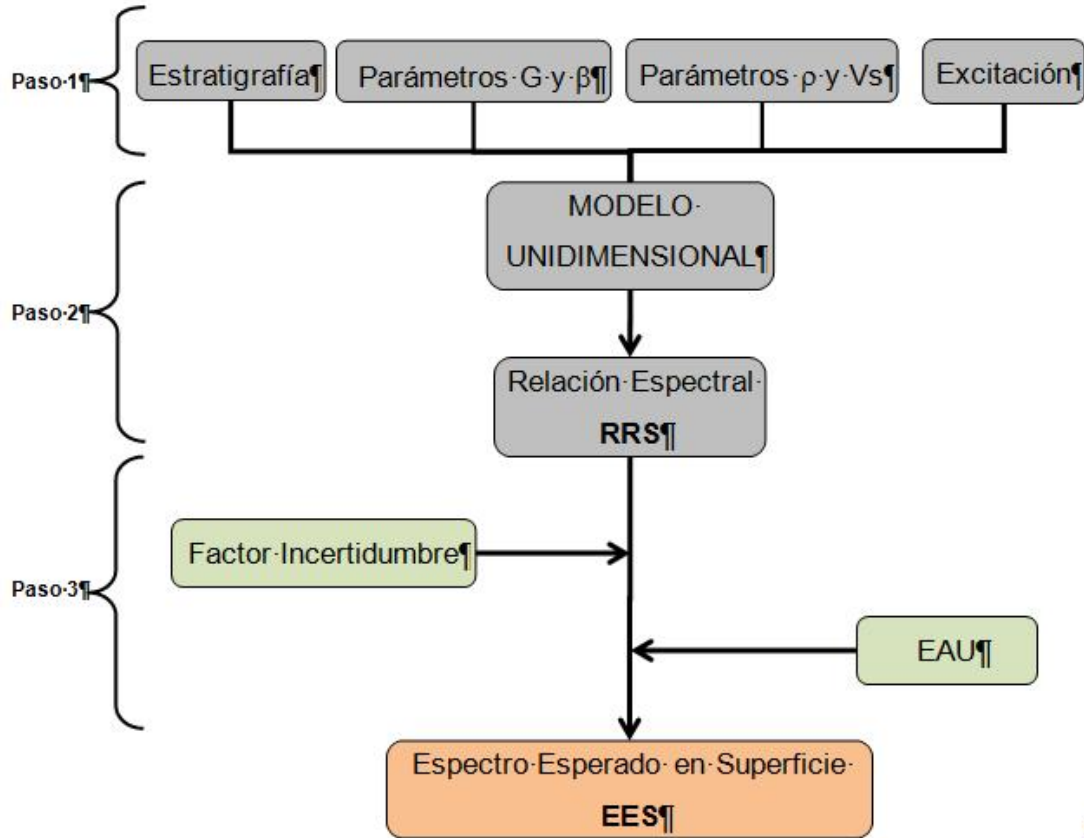
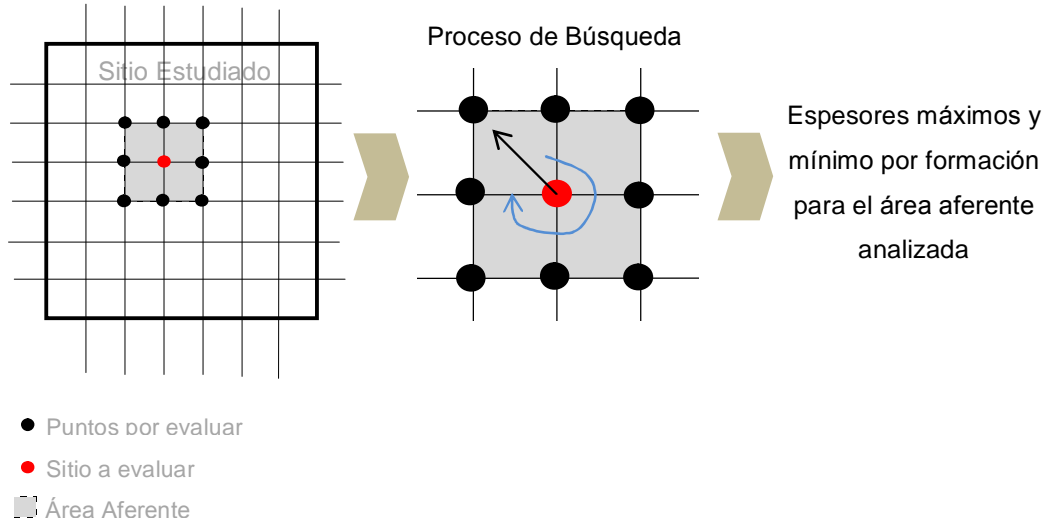


Figura 8.1 Metodología empleada para la determinación de la respuesta sísmica

### 8.2.1 PASO 1

- **Estratigrafía.** Es posible establecer la estratigrafía de un sitio particular, a partir de la interpretación geológica y la exploración directa e indirecta realizadas en un sitio. Cuando se enfrentan áreas de estudio mayores, sería económicamente inviable realizar perforaciones puntuales para identificar la estratigrafía de una región particular. Por tal motivo, se ha hecho necesario el planteamiento de metodologías que nos acerquen a las características de estratigráficas de una zona de estudio (Auvinet *et al.*, 2005).

En este trabajo, se propone una metodología aproximada para considerar el efecto de la estratigrafía, el cual establece un proceso de búsqueda de las unidades litológicas presentes en un sitio de evaluación de la respuesta con respecto a los sitios vecinos. De esta manera, se establece para cada unidad litológica presente en cada sitio evaluado, las variaciones que pueden sufrir los espesores de cada formación para el área aferente considerada (Figura 8.2).



**Figura 8.2 Metodología empleada para la determinación de las variaciones de espesor para cada uno de los sitios evaluados**

Este proceso consta de los siguientes pasos:

1. Se tomaron los ejes geológicos levantados durante el estudio geológico de cada municipio en particular
2. A partir de este se construyó una malla de puntos en donde se hizo el cálculo de la respuesta. Estos puntos están ubicados cada 200 m y adicionalmente se incluyen puntos de evaluación en sitios con características geológicas particulares.
3. Con el propósito de considerar dentro del cálculo de la respuesta, las variaciones de espesor que pueda tener cada formación geológica dentro del área afluyente (200x200 aproximadamente), se hace una búsqueda de los puntos más cercanos al sitio evaluado y se obtiene el espesor mínimo y máximo entre los cuales puede variar el espesor de cada formación encontrada dentro de este sitio.
4. Al determinarse los espesores máximo y mínimo de cada una de las formaciones, se procede a establecer una función de probabilidad tipo Beta (ver Distribución Beta), la cual proponga aleatoriamente espesores ( $e$ ) dentro del rango  $e_{máx} - e_{mín}$  que puedan encontrarse entre las formaciones del perfil de suelo estudiado.

Esta forma de estudiar la variación de espesores dentro del análisis de la respuesta sísmica, permite de forma aproximada, involucrar el desconocimiento que tenemos sobre los procesos geológicos que llevaron a cabo durante la formación de las unidades litológicas presentes en un área determinada.

- **Determinación de Cuadrículas.** La lectura de los diferentes perfiles estratigráficos por municipio, se estableció mediante una cuadrícula definida en 200 m por 200 m, aproximadamente, según los requerimientos de la escala de detalle de la información

geológica, que corresponde a 1:10 000 y en puntos donde las características geológicas lo ameritaban.

Inicialmente, se tiene el levantamiento de los perfiles geológicos, la dirección de lectura de estos perfiles se define según el análisis de las unidades litológicas, variando así el sentido de cada una de ellas por municipio, por ejemplo los perfiles del municipio de Caldas tienen una dirección este-oeste y las lecturas se hacen perpendiculares, o sea norte sur. Para el municipio de Barbosa, en cambio la lectura de los perfiles es norte sur y de las secciones estratigráficas son por ende este-oeste. Es importante mencionar, que la cuadrícula sólo aplica para las áreas urbanas y las zonas de expansión y no para toda el área del municipio.

Además de esta cuadrícula y según las condiciones geológicas relacionadas con cambios de unidad litológica o contacto, presencia de fallas y continuidad de unidad, entre otros, se definieron lecturas adicionales de columnas estratigráficas, buscando así cubrir al máximo todos los terrenos del área metropolitana y no dejar vacíos litológicos en los análisis posteriores de la microzonificación.

Se realizaron perfiles por municipio, siendo 32 para Caldas, 31 para La Estrella, 19 para el municipio de Sabaneta, 24 para Envigado, 24 para Copacabana, 12 para Girardota y 13 para Barbosa. La lectura de las columnas estratigráficas se hace en los respectivos perfiles. La información extraída de los perfiles corresponde a unidades litológica, espesor, coordenadas de los puntos donde afloran las formaciones y hasta donde van en profundidad y el nombre de la unidad litológica respectiva. En el Plano 8.1 se indican los perfiles sobre los planos en planta de cada municipio, además en el Anexo 8.1 se muestran las tablas con perfiles de cada intersección de cuadrícula con coordenadas, espesores y tipo de material, cuadro de convenciones.

Utilizando la base de datos geotécnicos recopilada para el proyecto, se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos.

- **Distribución Beta.** Se realizó el análisis teniendo en cuenta el tipo de unidad geológica y la base de datos de los municipios del norte, Medellín y sur. Basado con el análisis de correlación entre las variables con la profundidad, se determinaban aquellas propiedades que serían parte del modelo para la obtención de la velocidad de onda de corte y que no presentaban ninguna dependencia con la profundidad.

Las variables antes mencionadas corresponden a la densidad húmeda y en algunas unidades litológicas a la humedad, para lo cual se utilizó para el análisis estadístico la función de probabilidad Beta para variables continuas. La distribución Beta proporciona la densidad de probabilidad de los datos en un intervalo de longitud finita, dado por el máximo y el mínimo de los valores.

A continuación se presenta la expresión de la función de densidad de probabilidad ( $f_{dp}$ ) para la distribución Beta:



$$f(x, r, t, a, b) = \frac{1}{B(r, t)} \frac{(x-a)^{r-1} (b-x)^{t-1}}{(b-a)^{r+t-1}} \quad a \leq x \leq b$$

Donde:

$r$  = Parámetro de forma de la distribución

$t$  = Parámetro de forma de la distribución

$a$  = Límite inferior de la distribución

$b$  = Límite superior de la distribución

$B(r, t)$  = Función Beta

La función Beta se define como:

$$B(r, t) = \int_0^1 x^{r-1} (1-x)^{t-1} dx = B(r, t) = \frac{\Gamma(r)\Gamma(t)}{\Gamma(r+t)}$$

Donde  $\Gamma(r)$  = Es la función Gamma

Los parámetros de forma de la distribución, se obtienen a partir de la media y desviación estándar de los datos, Así:

$$\mu(x) = a + \frac{r}{r+t} (b-a) \quad \sigma = \sqrt{\frac{rt}{(r+t)^2 (r+t+1)}} (b-a)$$

Adicionalmente, se grafica junto con la función de densidad de probabilidad el histograma correspondiente, a través de las frecuencias y las frecuencias relativas. En este caso las densidades corresponden a la altura de cada rectángulo del histograma.

La cantidad de datos tenidos en cuenta para el análisis de la densidad húmeda en general es mayor a 30, exceptuando la cantidad de valores para la cuarzodiorita y el gabro de 15 y 25 datos respectivamente. Para la variación de la humedad se contó con 31 y 38 datos correspondiente al depósito aluviotorrencial y la dunita, y una cantidad considerable de 213 valores para la unidad correspondiente al gneis.

A continuación se presentan las figuras obtenidas y las tablas resumen por unidad litológica:

**Tabla 8.1 Parámetros de la distribución Beta para la densidad húmeda**

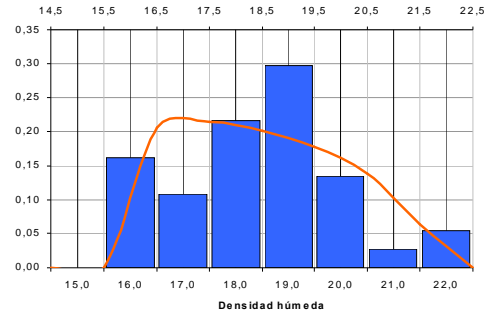
Densidad húmeda (kN/m <sup>3</sup> )				
	$\gamma_h$ (máx)	$\gamma_h$ (mín)	$r$	$t$
Anfibolita	15,9	25,2	1,2	3,0
Gneis	11,2	22,8	4,7	3,4
Dunita	14,2	18,7	1,5	1,5
Esquisto	13,0	20,0	1,8	0,9
Granodiorita y Cuarzodioritas	15,5	20,5	0,9	0,8
Dioritas	16,5	21,0	1,3	2,2
Gabro	14,5	21,0	1,8	1,7
Migmatitas	13,0	21,0	3,2	2,8
Rocas Volcánicas	13,0	21,0	3,2	2,8
Depósitos de Deslizamiento y Vertiente	13,6	20,9	2,5	2,2
Flujos	13,0	21,0	3,2	2,8
Depósitos Aluviales	13,6	21,4	1,4	1,4
Depósitos Aluviotorrenciales	15,3	20,5	2,0	2,1

**Tabla 8.2 Parámetros de la distribución Beta para la humedad**

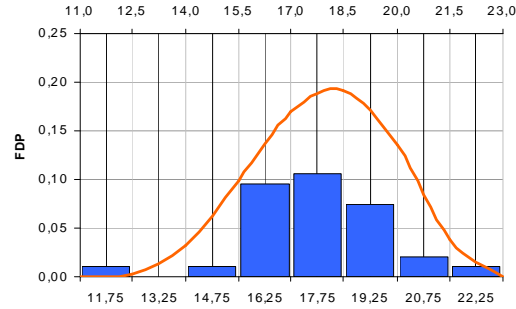
Humedad (%)				
	$W$ (máx)	$W$ (mín)	$r$	$t$
Dunita	88	10,3	0,83	1,18
Gneis	67	9,8	1,42	2,3
D. aluviotorrencial	59	8,30	0,92	1,19

Ya que no se contaba con ensayos de laboratorio para la formación correspondiente a la Migmatita, se estima los valores correspondientes a las densidades de los flujos, por presentar un comportamiento geológico similar.

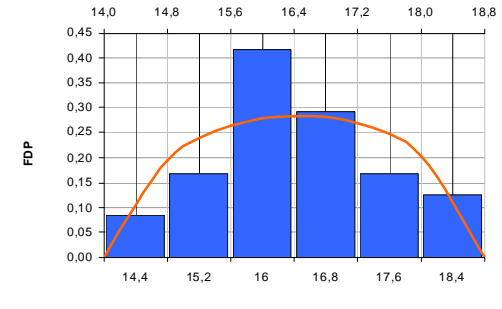
- **Parámetros Dinámicos  $G$  y  $\beta$ :** El comportamiento dinámico del suelo hasta se ha determinado a partir de dos parámetros extraídos de modelos constitutivos de la mecánica clásica. Estos parámetros se conocen como módulo de rigidez al esfuerzo cortante y la relación de amortiguamiento crítico (busca simular las características de disipación de energía que tiene el material). Este par de parámetros dependen de varios factores (Hardin & Drnevich, 1972), destacándose la dependencia de la deformación angular inducida y el contenido frecuencial de la señal excitadora. Los modelos empleados en la actualidad se concentran en el primero de los factores mencionados.



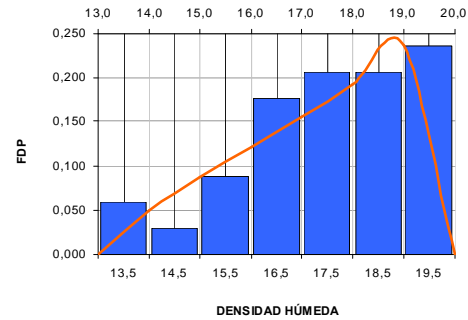
**Formación Anfibolita**



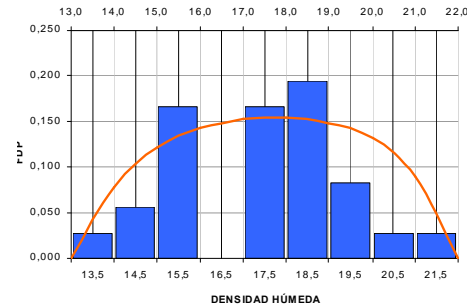
**Formación Gneis**



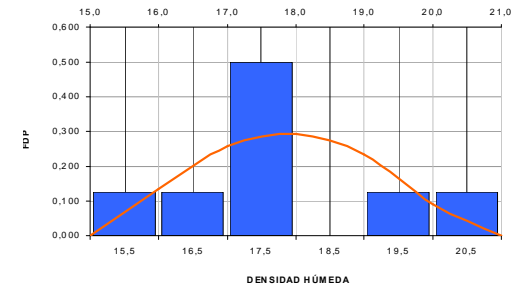
**Formación Dunitas**



**Formación Esquistos**

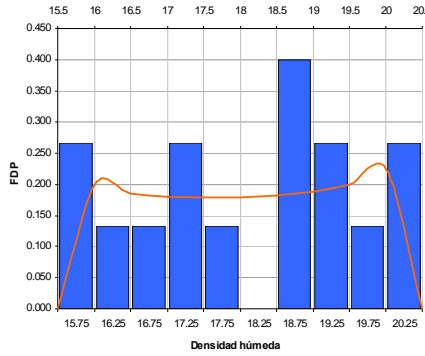


**Formación D. Aluviales**

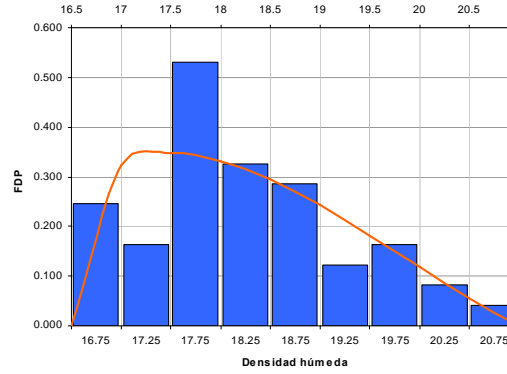


**D. aluviotorrencial**

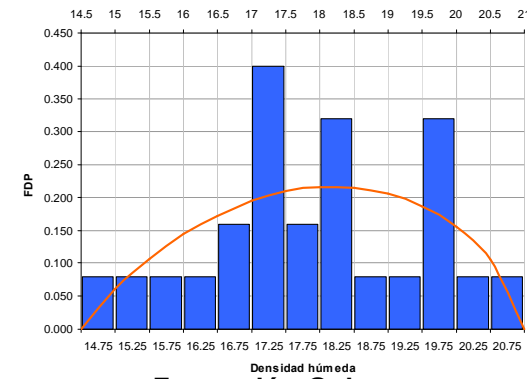
Figura 8.3 Funciones de densidad de distribución probabilística para la densidad húmeda, formaciones 1, 2, 3, 4, 12 y



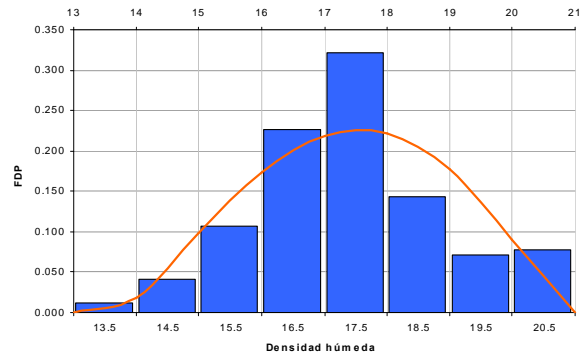
**Formación Cuarzodiorita**



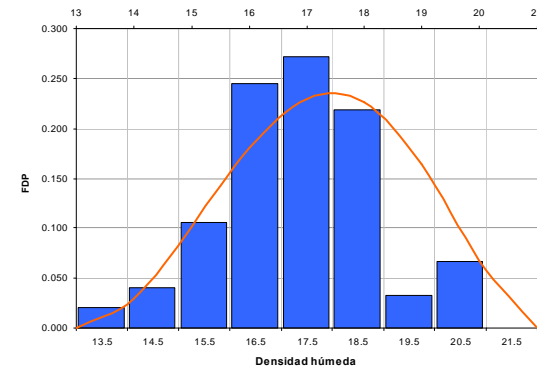
**Formación Diorita**



**Formación Gabro**

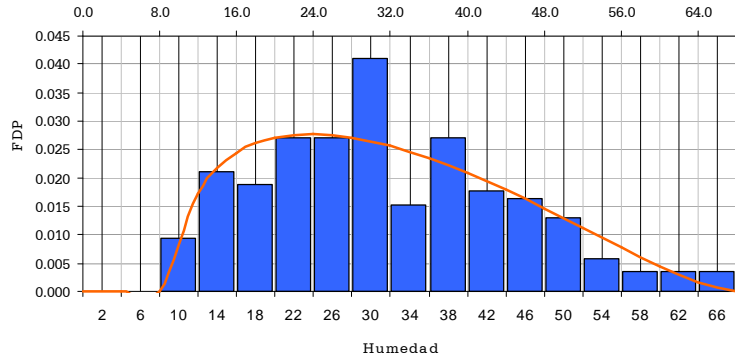


**Formación D. de vertiente**

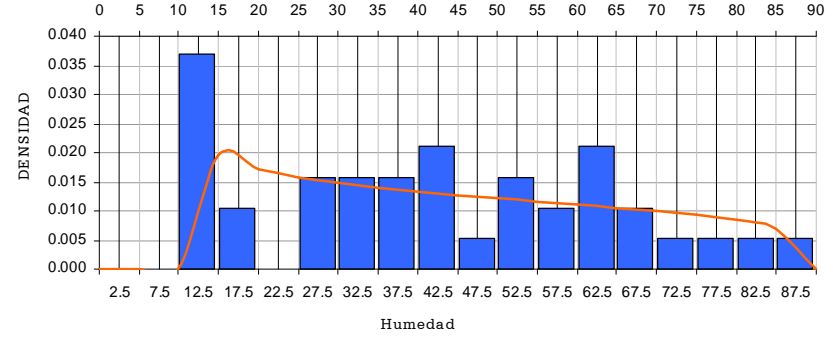


**Flujo de Lodos y escombros**

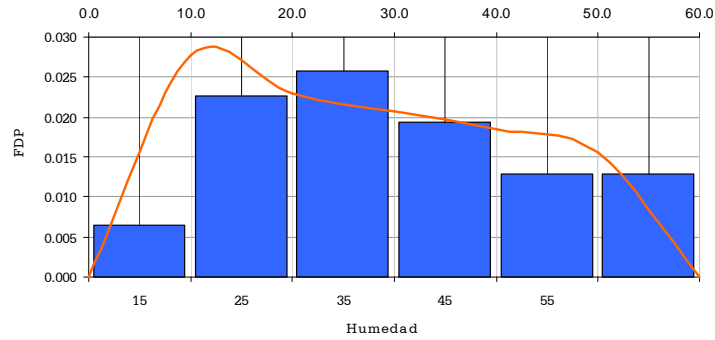
**Figura 8.4** Funciones de densidad de distribución probabilística para la densidad húmeda, formaciones 5,6,7,10 y 11



**Formación Gneis**



**Formación Dunita**



**Formación D. aluviotorrencial**

**Figura 8.5 Gráficas de Densidad de probabilidad para la humedad, formaciones 2, 3 y 13**

De acuerdo con esto, los parámetros dinámicos en la actualidad, se obtienen de procedimientos combinados de campo y laboratorio de los cuales se extraen curvas de comportamiento  $G$  vs  $\gamma$  y  $\beta$  vs  $\gamma$ . Dependiendo de los procedimientos ejecutados dentro de las pruebas de campo y laboratorio, condiciones de confinamiento y grado de alteración de la muestra, estas curvas para un material perteneciente a la misma formación pueden arrojar curvas con formas diferentes.

Considerando las variaciones que pueden presentarse en las curvas de degradación de los parámetros dinámicos dentro de una misma formación geológica, se propone asignar para cada uno de los análisis de respuesta sísmica las posibles variaciones que presentan las curvas dentro de cada formación. Se asigna por ello el mismo peso a las curvas de degradación que puedan presentarse dentro de un rango predefinido durante la interpretación de los ensayos dinámicos realizados para cada formación (ver Capítulo 7). Debido a que estas curvas tienen la misma probabilidad de ocurrencia dentro de cada formación geológica, la variación de estos parámetros se estudia a partir de una distribución uniforme.

- **Parámetros Peso unitario húmedo ( $\gamma$ ) y Velocidad de Onda de Corte ( $V_s$ ).** Este par de parámetros permiten caracterizar mecánicamente los materiales dentro del perfil de suelo estudiado. Por un lado, El peso unitario húmedo, relaciona el peso total con el volumen total del suelo. Este parámetro da idea de la composición del perfil de suelo, es decir, valores altos de peso volumétrico son típicos de materiales arenosos y limosos fuertemente compactados ( $\geq 13 \text{ kN/m}^3$ ), valores entre  $11 \text{ kN/m}^3$  y  $13 \text{ kN/m}^3$  son típicos de materiales arcillosos. Las variaciones encontradas de peso volumétrico para las formaciones encontradas en los sitios estudiados se presentan en la Tabla 8.3.

**Tabla 8.3 Variaciones del peso unitario húmedo dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en los municipios estudiados**

Peso unitario húmedo ( $\text{kN/m}^3$ )				
	$\gamma_{h(\text{máx})}$	$\gamma_{h(\text{mín})}$	$r$	$t$
Anfibolita	15,9	25,2	1,2	3,0
Gneis	11,2	22,8	4,7	3,4
Dunita	14,2	18,7	1,5	1,5
Esquisto	13,0	20,0	1,8	0,9
Granodiorita y Cuarzodioritas	15,5	20,5	0,9	0,8
Dioritas	16,5	21,0	1,3	2,2
Gabro	14,5	21,0	1,8	1,7
Migmatitas	13,0	21,0	3,2	2,8
Rocas Volcánicas	13,0	21,0	3,2	2,8
Depósitos de Deslizamiento y Vertiente	13,6	20,9	2,5	2,2
Flujos	13,0	21,0	3,2	2,8
Depósitos Aluviales	13,6	21,4	1,4	1,4
Depósitos Aluviotorrenciales	15,3	20,5	2,0	2,1

La velocidad de onda de corte, se refiere a la velocidad con la que una onda de corte se propaga a través del suelo con determinadas características, y depende de la rigidez y densidad del material. Así, al aumentar el peso volumétrico del suelo se incrementa la velocidad de onda de corte. Este parámetro es fundamental en todo diseño sísmico, ya que además de ser un parámetro que da idea de las propiedades físicas del material, permite la estimación del módulo de rigidez máximo. Las variaciones de velocidad de onda de corte para cada una de las formaciones geológicas de los sitios estudiados se presentan en la Tabla 8.4.

**Tabla 8.4 Variaciones de la velocidad de onda de corte dentro de las diferentes formaciones geológicas presentes en los municipios estudiados**

Tipo de suelo	$V_s$	
	Máxima (m/s)	Mínima (m/s)
Anfibolita	1500	110
Gneis	860	175
Aluvial	900	100
Aluviotorrencial	900	192
Dunita	450	125
Esquistos	950	194
Cuarzodiorita	700	140
Diorita	900	100
Gabro	360	160
Depósito de vertiente	600	142
Flujos	980	100

El análisis de de estos parámetros permitió establecer que sus variaciones siguen una función de probabilidad de tipo Beta. Así, para la determinación de la respuesta sísmica, se proponen valores aleatorios que siguen esta distribución, de tal manera que se considere las variaciones que pueden presentar internamente los materiales de cada una de las formaciones, tanto por agentes físicos o químicos al interior de cada formación, y que contribuye a la incertidumbre relacionadas este par de parámetros a las adicionales, producto del procedimiento de ensayo para su determinación y a las condiciones en las que fue realizado el muestreo.

- **Excitación.** El estudio de movimientos sísmicos posee dos dificultades que deben ser superadas para adquirir un mejor conocimiento y entendimiento del fenómeno. La primera de ellas está relacionada con el supuesto restrictivo que se plantea acerca de la naturaleza de la fuente de vibración. El segundo concierne a la selección de un método apropiado para investigar las propiedades de las señal monitoreada, donde modos normales, transformada de Laplace y Fourier son usualmente seleccionados (García *et al.*, 2006). Algunos autores han expuesto (e.g., Garcia *et al.*, 2003; Huang & Turcotte, 1990) que algunos procesos no lineales podrían estar involucrados dentro de la generación del sismo y los procesos de respuesta de sitio; sin embargo; aún existe discusión al respecto (Beresnev *et al.*, 1996). Esto requiere reconsiderar los métodos y técnicas involucradas en estos análisis. La dinámica de sistemas reales es

frecuentemente caracterizada por un número de estados que coexisten y por la presencia de fluctuaciones. Por ejemplo, las ecuaciones de atenuación son usadas para definir la ocurrencia de un sismo con una magnitud particular a una distancia específica del sitio. Debido a las incertidumbres inherentes en las variables que describen el origen, las condiciones de sitio y el conocimiento acerca del proceso de transmisión de ondas a partir del origen al sitio y que están relacionadas básicamente al pobre conocimiento que se tiene sobre las mismas. Se han realizado diversos estudios que proponen diferentes metodologías para estudiar dichos efectos (e.g. Atkinson & Boore 2003, Youngs *et al.* 1997, Anderson 1997, Crouse 1991, Singh *et al.* 1989, Singh *et al.* 1987).

Para tener en cuenta la incertidumbre asociada a la determinación de la aceleración esperada, dependiendo de las características tectónicas de la región estudiada, en este estudio se realizó un estudio de amenaza sísmica que involucra la estimación cuantitativa de la aceleración que puede alcanzar la base de un perfil de suelo (roca) en una zona particular. El análisis de amenaza sísmica puede ser analizado determinísticamente, cuando se asume un escenario sísmico particular o probabilísticamente, en el cual las incertidumbres en el tamaño del sismo, localización y tiempo de ocurrencia son explícitamente considerados (Kramer, 1996).

El modelo de evaluación de respuesta empleado en este estudio requiere de registros de aceleraciones que representen el ambiente tectónico de la zona de estudio. La selección de estos registros deben, en el mejor de los casos, adaptarse a registros históricos obtenidos de las redes acelerográficas dispuestas dentro de la zona en estudio. En caso contrario, se hace necesario determinar señales que posean características que se ajusten a los espectros obtenidos de los análisis de amenaza.

Debido a la poca historia de las redes acelerográficas dispuestas dentro del territorio nacional, se ha visto la necesidad dentro de los estudios de microzonificación sísmica adelantados en el país, emplear registros sísmicos de otras regiones del mundo, asociados generalmente a sismos reconocidos a nivel mundial por su magnitud o catástrofes producidas en la región particular.

Considerando el ambiente tectónico que enmarca el comportamiento sísmico del territorio colombiano y las características de las sismofuentes a las cuales está expuesta el Valle de Aburrá, se estudiaron principalmente catálogos sísmicos de países cuyos procesos tectónicos semejaran a los ocurridos en territorio colombiano. En Colombia, se presentan dos claros procesos generadores de eventos sísmicos: i) un proceso de subducción, en el cual la corteza oceánica subduce a la corteza continental (Región occidental del país) y ii) un proceso intraplaca donde se presentan eventos sísmicos por el movimiento de fallas activas.

De este análisis se determinó, producto del ambiente tectónico reinante y la confiabilidad y estado de los registros acelerográficos, que el catálogo sísmico de Costa Rica, es una fuente de información útil dentro de las evaluaciones realizadas para este estudio.



**Tabla 8.5 Características de los eventos sísmicos analizados del catálogo sísmico de Costa Rica.**

Evento (dd/mm/aaaa)	Epicentro	Magnitud (Mw)	Profundidad (km)	Origen
25/03/1990	Cóbano de Punta Arenas	7.1	16.3	Subducción
22/12/1990	Piedras Negras - Alajuela	6	5	Local
22/04/1991	Valle de la Estrella Limón	7.7	10	Local
20/08/1999	Dominical de Osa	6.8	22	Subducción
25/12/2003	Puerto Armuelles de Panamá	6.6	26	Local
20/11/2004	Damas de Aguirre	6.2	25	Subducción
09/05/1998	Rivas de Pérez Zeledon	4.2	13	Local
16/09/2003	Santiago de Puriscal	5.4	54.9	Subducción
17/10/2003	Orosí	4.2	10	Local

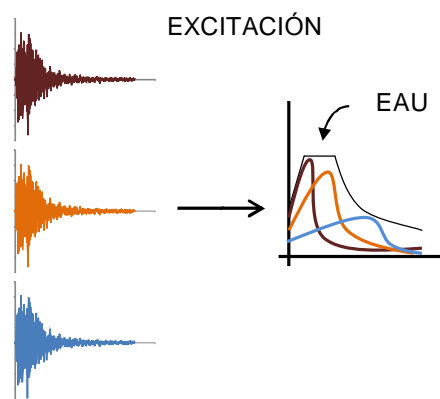
Costa Rica forma parte del llamado cinturón de fuego del Pacífico, caracterizado por una alta sismicidad y vulcanismo activo. A escala regional, las estructuras tectónicas que afectan Costa Rica son: Placa Caribe y la microplaca de Panamá, las cuales interactúan con la placa del Coco y la Placa de Nazca. La dinámica global de las placas tectónicas permite establecer un empuje de la placa de Coco sumergiéndose bajo la Placa Caribe, originando una zona de subducción o zona de Benioff. En Costa Rica, se presentan dos fuentes principales de generación de sismos: i) una fuente producto del desplazamiento relativo entre las placas, Sismos Interplaca o ii) la otra, producto de la interacción entre las fallas localizadas al interior de la placa Caribe, Sismos Intraplaca. (Microzonificación Sísmica de San José de Costa Rica, 2005).

Para integrar la información sísmica a los análisis del presente estudio, se solicitó al Laboratorio de Ingeniería Sísmica de Costa Rica, algunos de los registros obtenidos en diferentes estaciones de la red sísmológica de Costa Rica, para eventos con diferentes magnitudes, profundidades y procesos de generación. (Tabla 8.5).

La metodología desarrollada para la selección de los sismos empleados como excitación del modelo empleado para la obtención de la respuesta sísmica, consideró la siguiente metodología:

- Se seleccionó el Espectro de Amenaza Uniforme (EAU o UHS por sus siglas en inglés) de cada uno de los municipios, calculados a partir del estudio de amenaza probabilístico realizado (Ver Capítulo 6).
- Se realizó una búsqueda para tres diferentes regiones del UHS, a partir de los espectros de respuesta obtenidos de los registros sísmicos entregados por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de Costa Rica (sismo semilla).
- Se comparó la forma del sismo semilla con la forma del UHS. A partir de esta comparación se determinaba si el espectro de respuesta de aceleraciones del sismo semilla coincidía en la aceleración de alguna de las tres zonas del EAU. En caso afirmativo, se tomaba este sismo semilla como registro para el cálculo de la respuesta. Caso contrario, se procedía al escalamiento de la señal a través de Funciones de Green (Ordaz *et al.*, 1995).

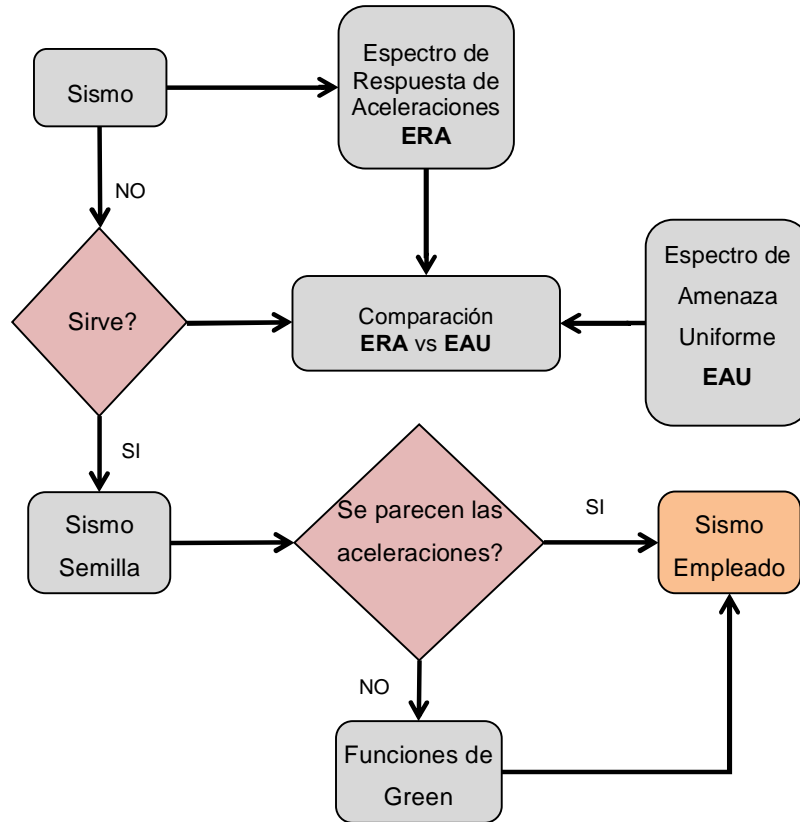
- d) Este proceso se repite para las otras zonas del espectro de amenaza uniforme (Figura 8.6). Esta metodología tiene dos propósitos fundamentales: i) Enmarcar la respuesta a condiciones de excitación reales, es decir, proponer aceleraciones que se hayan presentado en sistemas tectónicos existentes y no que surjan de formulaciones matemáticas (Sismos Sintéticos, referencias) y ii) Cubrir el espectro de amenaza considerando varias posibles fuentes de generación de sismos dentro de la región estudiada.



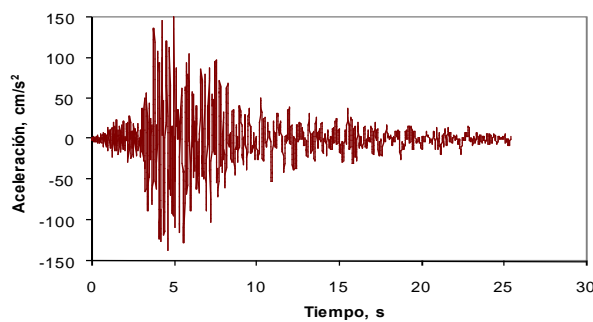
**Figura 8.6 Resultado del procedimiento para la selección de los sismo de excitación**

En la siguiente Figura 8.7 se sintetiza la metodología expuesta.

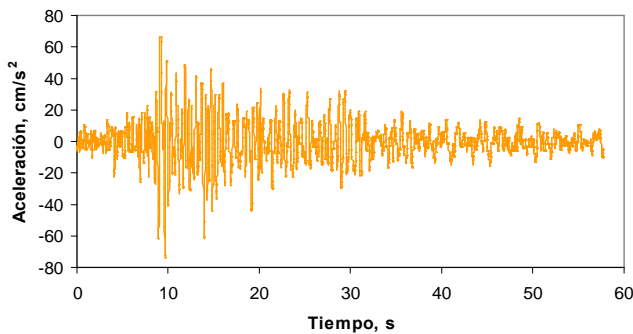
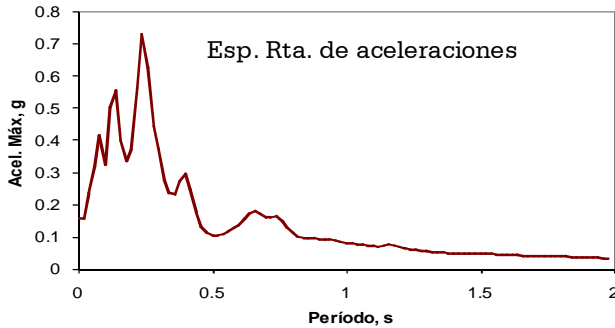
Este proceso fue realizado para obtener sismos de excitación a partir de los UHS obtenidos para 475 años y 9,3 años de período de retorno en cada uno de los municipios (Figuras 8.8 y 8.9). En general, se encontraron como sismos útiles los registrados por el laboratorio de Ingeniería Sísmica de Costa Rica, excepto en uno de los casos donde se estableció un sismo registrado por la Red Acelerográfica de Medellín (Estación CSJ) y el registro del sismo de Armenia (Colombia) de 1999 obtenido en la bocatoma del Acueducto de Pereira.



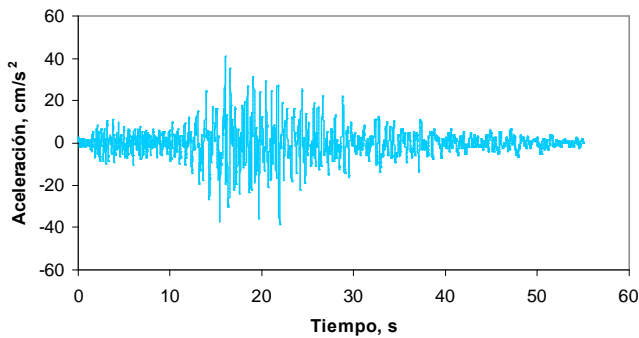
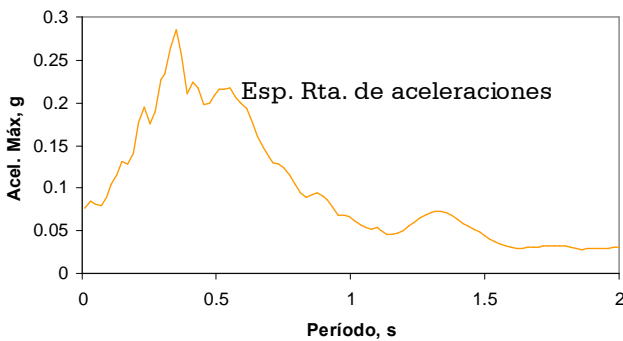
**Figura 8.7 Diagrama de flujo del procedimiento empleado para la obtención de los sismos para la excitación del modelo unidimensional.**



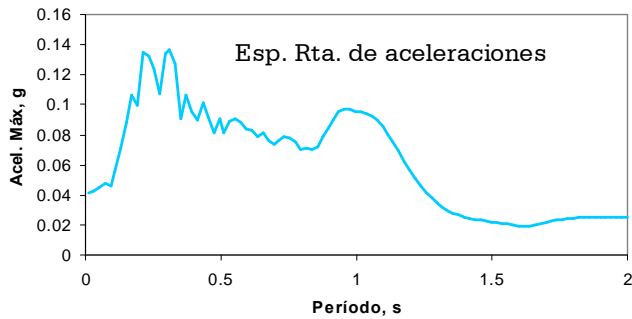
**Código:** BOCAT  
**Fecha:** 25/01/1999  
**Estación:** Bocatoma - Pereira  
**Magnitud (Mw):** 6.2  
**Proceso Origen:** Local  
**Tipo de Suelo:** Blando  
**Dist. Epicentral (km):** 14  
**Dist. Hipocentral (km):** 42  
**Condición de Sitio:** Campo Libre



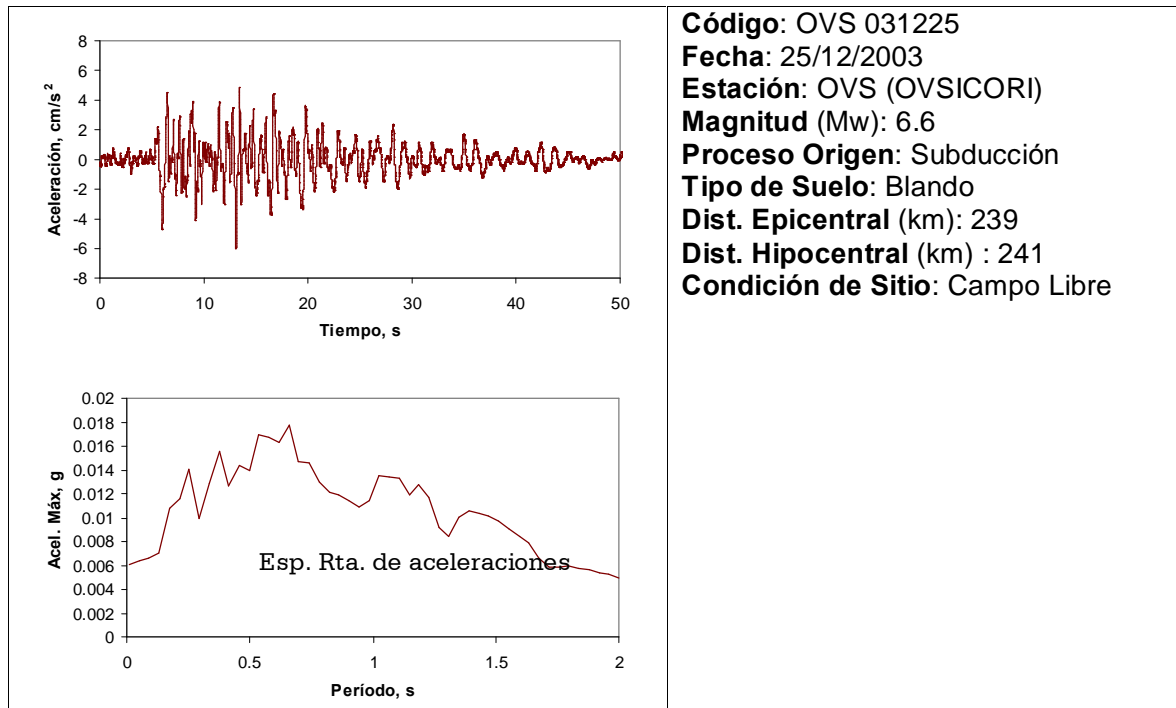
**Código:** BN1 910422  
**Fecha:** 22/04/1991  
**Estación:** BN1  
**Magnitud (Mw):** 7.7  
**Proceso Origen:** Local  
**Tipo de Suelo:** Blando  
**Dist. Epicentral (km):** 114  
**Dist. Hipocentral (km) :** 114  
**Condición de Sitio:** Base edificio



**Código:** ECA 990820  
**Fecha:** 20/08/1999  
**Estación:** ECA (Esc. Católica Activa)  
**Magnitud (Mw):** 6.5  
**Proceso Origen:** Subducción  
**Tipo de Suelo:** Blando  
**Dist. Epicentral (km):** 105  
**Dist. Hipocentral (km) :** 107  
**Condición de Sitio:** Campo Libre



**Figura 8.8 Eventos empleados como excitación para condiciones de amenaza para 475 años**



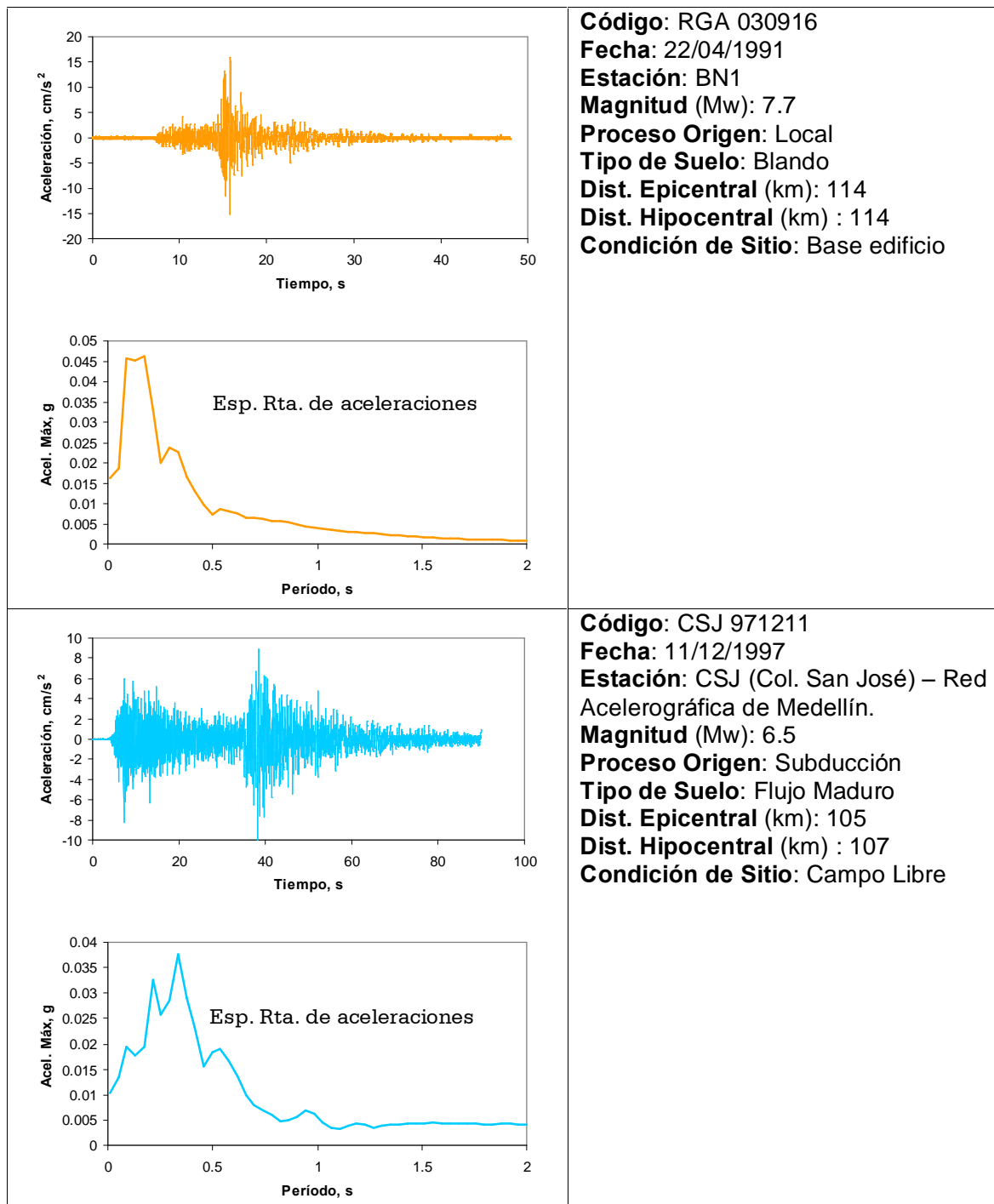


Figura 8.9 Eventos empleados como excitación para condiciones de amenaza para 9,3 años

## 8.2.2 PASO 2

Para calcular la respuesta sísmica a través del modelo unidimensional se emplearon tres sismos cuyos espectros de respuesta cubren diferentes zonas de los espectros de amenaza uniforme para 475 años y 9., años (3 sismos por cada espectro de amenaza). Posteriormente se proponen 30 casos de variación de las variables involucradas y con ello se producen 30 respuestas asociadas a cada sismo de excitación. Con las respuestas en superficie y la señal de excitación (roca) se obtienen, para cada uno de los casos seleccionados, las relaciones espectrales, *RRS* (Ratio Response Spectra). Con este análisis se obtienen 90 posibles relaciones espectrales para cada sitio evaluado. Este proceso se presenta en la Figura 8.10.

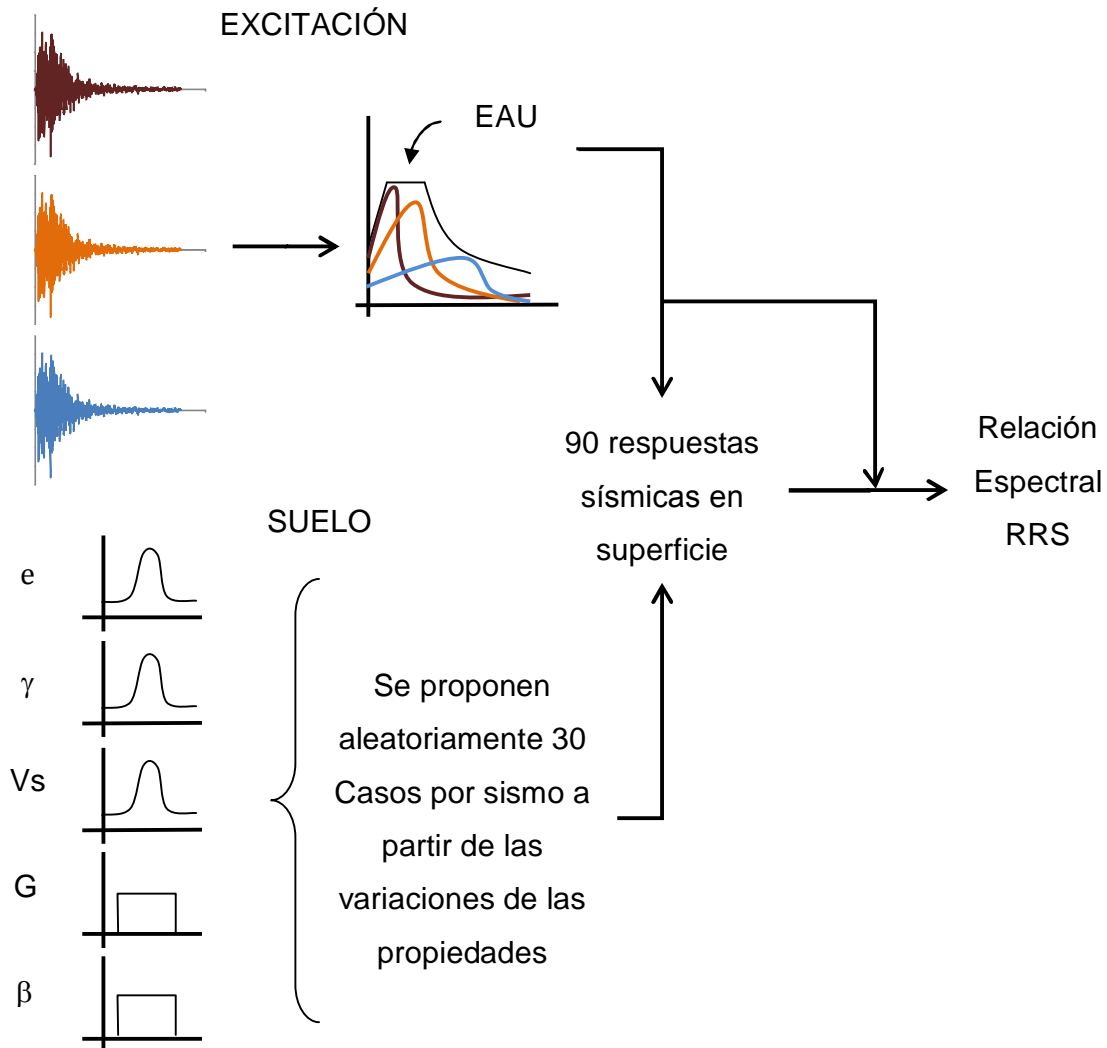


Figura 8.10 Metodología para la determinación de las relaciones espectrales

### 8.2.3 PASO 3

Una de las grandes desventajas que poseen los espectros de diseño propuestos en las diferentes microzonificaciones, es que se realizan cortes indiscriminados sobre las posibles respuestas del suelo, obviando con ello posibles aceleraciones alcanzadas dentro del perfil de suelo evaluado. A partir de la metodología propuesta en este estudio se propone establecer: i) Los efectos que puede sufrir el perfil de suelo evaluado, para diferentes condiciones de excitación del mismo, a través de la RRS, y ii) el espectro de aceleraciones esperado en superficie a partir de la multiplicación del espectro de amenaza uniforme esperado para el sitio evaluado por la media de la relación espectral obtenida en el paso anterior.

Para considerar las incertidumbre dentro de la RRS, Jaramillo (2006) propone un factor que permite cuantificar dicha incertidumbre a través de la media obtenida de la relaciones espectrales entre la señal de roca y la respuesta obtenida a partir del modelo 1D. De esta manera, multiplicando la media por el factor de incertidumbre y el espectro de amenaza uniforme en roca, se obtiene el espectro de respuesta esperado en suelo. Esta respuesta contiene las variaciones e incertidumbres asociadas al desconocimiento sobre ciertas partes del fenómeno y a los procedimientos para la determinación de los datos en campo y laboratorio.

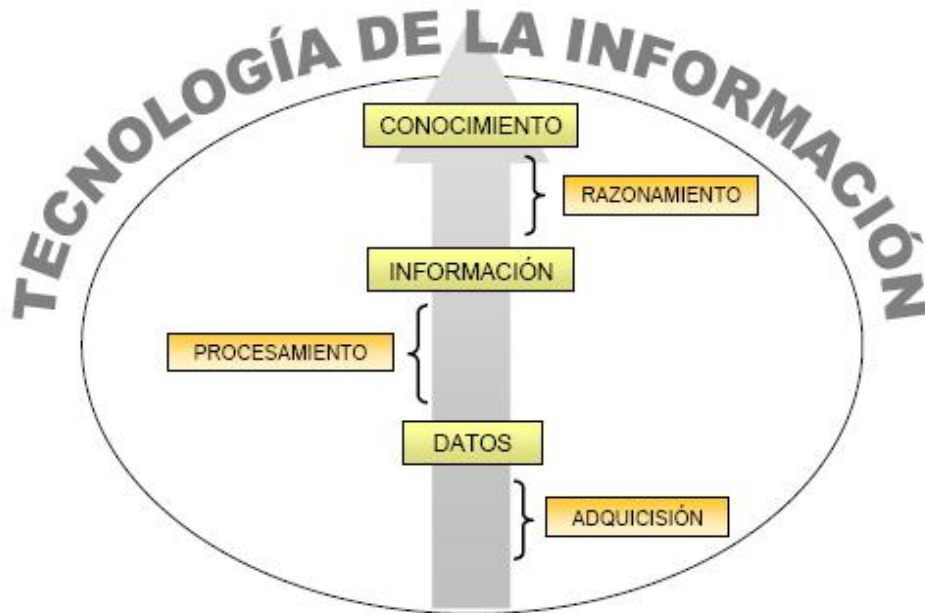
## 8.3 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

En la actualidad, somos partícipes de la revolución digital, la cual consta de los siguientes elementos: a) Computadoras (almacenan información en forma digital), b) Software (hacen a los PCs, poderosos y flexibles) y c) Redes de Comunicación (magnifican el poder de PCs). Es en esta era, en la que quizá hayan ocurrido los más profundos cambios en la forma de pensar, trabajar y producir. En esencia hemos entrado a la era de la conectividad y donde el futuro competitivo de las empresas está marcado por el aprendizaje alcanzado a través de la habilidad para interconectarse con los elementos de un producto o servicio.

Bajo este contexto, se ha originado a nivel mundial un concepto para integrar los elementos constitutivos de la era digital a cada una de las metodologías aceptadas en los diferentes sectores de la sociedad. Este concepto se conoce como TI y tiene como propósito fundamental capturar e integrar de forma eficiente la información y las diferentes formas de pensamiento. Así, a través de la adquisición automática de los datos de un sistema en estudio, es posible en tiempo real construir una base de datos, que procesada suministre información del sistema. De tal modo que a partir del razonamiento y análisis de dicha información se construye conocimiento sobre el comportamiento de dicho sistema (Figura 8.11).

Las TI agrupan los métodos para capturar información por medios automáticos, incluyendo el cómputo y las telecomunicaciones, a la vez que considera una amplia gama de sistemas electrónicos para capturar, almacenar, manipular, comunicar y desplegar dicha información.





**Figura 8.11 Elementos de la Tecnología de la Información, (Rengers et al., 2002).**

Luego de realizar la evaluación de la respuesta para cada uno de los municipios evaluados en este estudio, se hace la presentación de los mismos a través un sistema que combina una herramienta para la visualización de datos y una para la fácil accesibilidad a la información (Internet). El procedimiento esta cubierto por una teoría reciente conocida como *Tecnología de la Información TI*, en donde, el conocimiento se define como: “Justificación de la verdad en respuesta humana a un medio complejo” y la Información se define como algo que agrega conocimiento y entendimiento, incluyendo la captura e interpretación de los datos (Rengers et al., 2002).

Las TI influyen en la manera en que los ingenieros geólogos y geotecnistas interpretan la realidad, cómo se comunican, qué saben y cómo piensan. Esto permite ahorrar costos, incrementar la velocidad y flexibilidad en la recolección, almacenamiento, recuperación, análisis, comunicación y presentación de los datos; es decir, el desarrollo de una mejor ciencia y tecnología.

Los aspectos que motivan el uso de las TI en geociencias son (Loudon, 2000):

1. Capacidad de procesamiento de las computadoras. Esto permite la realización de análisis con métodos numéricos más robustos; así como el empleo de técnicas de visualización para una presentación gráfica más apegada a la realidad.
2. Manipulación y manejo de la información. Se aumenta la actividad de mover los elementos de una figura en un sistema gráfico, a la capacidad de capturar, almacenar y recuperar grandes volúmenes de información.

El trabajo con las TI no significa la transformación de la información hacia un formato digital y la manipulación de esa información con algoritmos cada vez más complicados; sino hacia cambios de pensamiento que se traduzcan en modificaciones de las metodologías empleadas a partir de las posibilidades que nos ofrece la era digital y formalizar el desempeño de éstas. En definitiva, tecnología para hacerlas piezas estándar de la actividad geotecnista práctica (Correa, 2006).

Toda la información de los modelos espaciales y de las características geotécnicas de los estratos del suelo en las obras de ingeniería civil (túneles, excavaciones profundas, etc.) puede analizarse a través de modelos tridimensionales (3D) del suelo. Los modelos 3D desarrollados recientemente permiten para cierto número de datos: i) una definición automática de las fronteras, ii) entrada interactiva de datos reales y virtuales para considerar varios escenarios del problema, y iii) una poderosa técnica de visualización que permite exportar, la configuración espacial y los parámetros geotécnicos de los diferentes estratos, hacia modelos numéricos.

### **8.3.1 Integración espacial de los datos, modelado con SIG y Técnicas de visualización**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), en términos generales, son sistemas que permiten manejar información de mapas geográficos de manera digital. Permite la introducción, procesamiento, almacenamiento y recuperación de conjuntos de datos georeferenciados y ofrece procedimientos para lograr la interoperabilidad de tales conjuntos de datos a través de la modificación de los sistemas de proyección y los formatos. La integración de diferentes conjuntos de datos a través de la sobreposición es posible con SIG para procesos de modelado espacial.

El principal valor del SIG radica en su funcionalidad; es decir, permite al usuario crear nueva información por medio de la combinación y manipulación de la información existente. Con los recientes avances en las técnicas de visualización 3D, el usuario del SIG puede observar la información desde una amplia variedad de perspectivas lo que le permite crear y construir nuevo conocimiento.

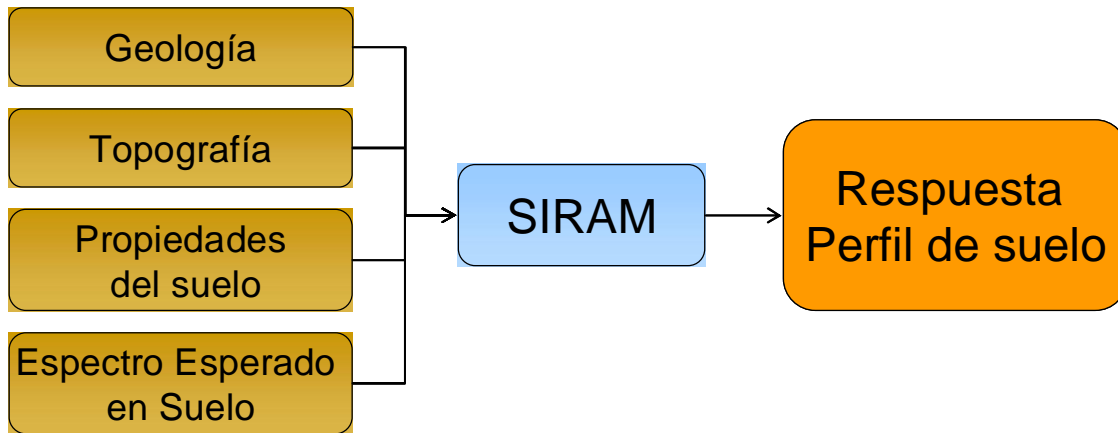
Por lo general, conocemos más de los que somos capaces de expresar; por ello la visualización permite mejorar la comunicación. Tradicionalmente la visualización de la información en geotecnia se ha realizado en forma de mapas, diagramas de bloques y secciones transversales (Dearman, 1991). Las TI han abierto todo un nuevo espectro de visualización, logrando mapas más apegados a la necesidad del cliente.

### **8.3.2 Empleo de la TI dentro de la microzonificación sísmica de los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.**

En este estudio se emplea la TI de la información para mejorar la relación diseñador – usuario, a través de un ambiente visual de fácil comprensión y un servicio de comunicación eficiente, que permita acceder a información sobre la respuesta sísmica de

un perfil de suelo ubicado en punto dentro de cualquiera de los municipios evaluados. El esquema de la presentación de estos resultados sigue el esquema presentado en la Figura 8.12. En dicho esquema se presenta el Sistema Integrado de Respuesta del Área Metropolitana (SIRAM). Este sistema se encuentra alimentado con información de la geología, topografía, propiedades del suelo y los resultados de la evaluación de la respuesta en los diferentes puntos de evaluación de cada uno de los municipios, siguiendo la metodología descrita en el punto anterior.

Esta información permite al SIRAM determinar para puntos de interés para una obra en particular establecer cual es el espectro de respuesta esperado para dicho sitio; es decir, es posible determinar las aceleraciones que se pueden alcanzar en el sitio de interés para efectos de diseño estructural y que dependen del estudio de amenaza sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y las características particulares de la respuesta de los materiales de cada uno de los sitios.



**Figura 8.12 Elementos del Sistema Integrado de Respuesta del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.**

Un ejemplo y visualización de los resultados para el municipio de Caldas se presenta en las Figuras 8.13 y 8.14. En primera instancia, se hace una presentación del Valle de Aburrá a través de un mapa interactivo, el cual permite ingresar a través de un *click* del *mouse* en el municipio deseado. A partir de esto se despliega un mapa del municipio de interés, al cual es posible acceder en cualquier punto por medio de otro *click*. El sistema está en posibilidad de dar información de la respuesta sísmica esperada en cualquier punto del municipio (Zona Urbana y Expansión) y dar una aproximación de la estratigrafía típica de este sitio.

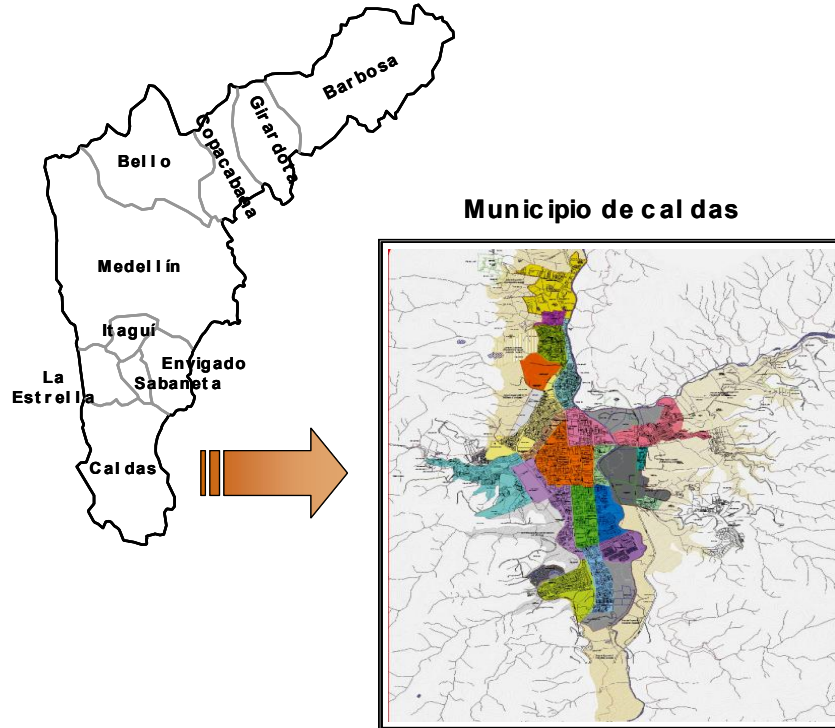


Figura 8.13 SIRAM. Solicitud para la evaluación de la respuesta sísmica en el Municipio de Caldas.

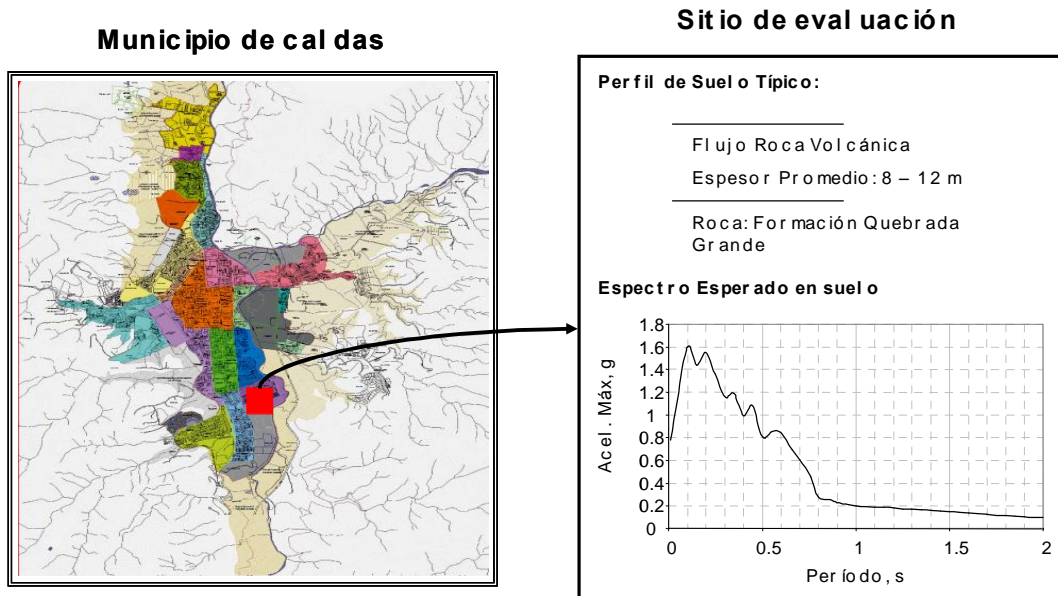


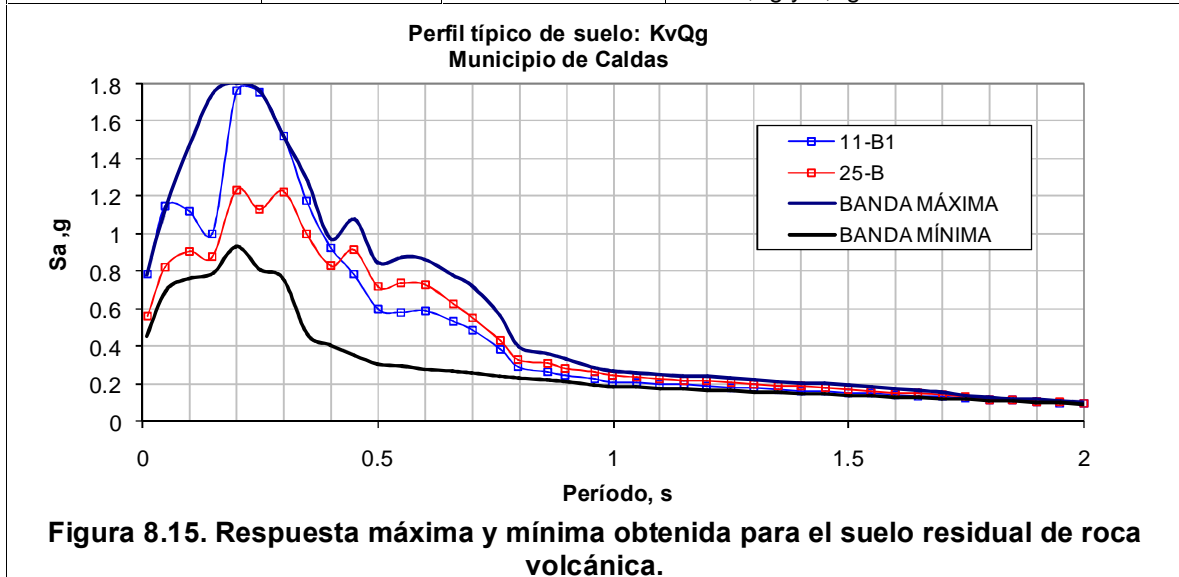
Figura 8.14 SIRAM. Presentación del perfil de suelo típico y el espectro de respuesta esperado en suelo para el sitio de interés.

### 8.3.3 Análisis de espectros de respuesta para perfiles típicos

De los resultados obtenidos de los espectros de respuesta en los municipios estudiados, se consideraron para el análisis las respuestas correspondientes a los perfiles más representativos de cada municipio. A continuación se presentan los espectros de respuesta de los perfiles en donde se obtuvieron las respuestas máximas y mínimas, además de las bandas que agrupan las respuestas de todos los perfiles analizados:

- Municipio de Caldas

Perfil	$Sa_{máx}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de roca volcánica (KvQg)	1,2 – 1,8	0,22	Bajo las variaciones consideradas dentro del análisis, las posibles respuestas para este perfil típico de suelo, presentan un pico dominante alrededor de 0,22 s. La respuesta máxima y mínima se presenta en la Figura 8.15. Las variaciones de espesores entre ambos sitios son de: 8m para el sitio 11B1 ( $Sa_{máx}= 1,8g$ ) y de 22 m para el sitio 25-B ( $Sa_{máx}= 1,2g$ ). Un segundo pico se presenta en períodos más bajos alrededor de 0,08 s, con una aceleración máxima que puede moverse entre 0,9g y 1,2g.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y suelo residual de roca volcánica (KvQg)	1,1 – 1,6	Variable dependiendo del espesor	<p>En la Figura 8.16 se presenta la banda de las respuestas en que oscilan las aceleraciones máximas, para este tipo de suelo.</p> <p>Se observa, que para el caso donde <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> está cercano a 1,6g el periodo fundamental se encuentra entre 0,20 s y 0,25 s. El espesor del perfil de suelo en este sitio (16C) alcanza los 14 m.</p> <p>Por otro lado, la respuesta para el sitio 25C2 se presenta como el límite inferior para el periodo fundamental de las posibles respuestas que pueden encontrarse en sitios caracterizados por un perfil de suelo como el presentado. La <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> en este sitio está entre 1g – 1,1g, con un rango de períodos muy amplio que se mueve entre 0,2 s y 0,45 s. El espesor de suelo para el sitio 25C2 es de 50 m</p>

Perfil típico de suelo: Flujo y KvQg  
Municipio de Caldas

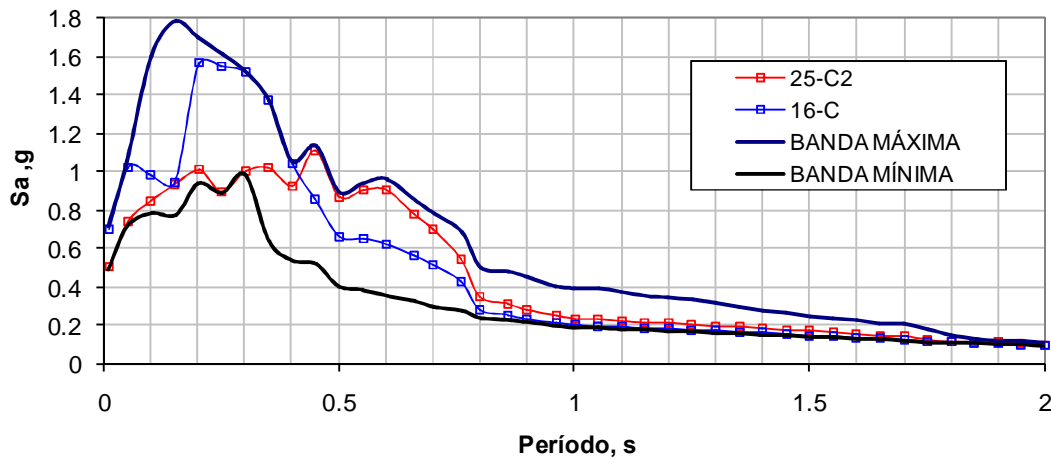


Figura 8.16. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de roca volcánica.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo Residual de Esquisto (Pes)	1,4 – 1,8	0,25	<p>La respuesta máxima y mínima para este perfil de suelo se presenta en la Figura 8.17. En esta se observa un pico dominante en 0,25 s.</p> <p>La respuesta máxima se obtuvo para el sitio 27P1, el cual alcanzó una aceleración <math>Sa_{m\acute{a}x} = 1,8</math> g. El espesor de suelo en este sitio es de 14 m.</p> <p>La respuesta mínima se obtuvo para el sitio 32Q, el cual alcanzó una aceleración <math>Sa_{m\acute{a}x} = 1,4</math> g. El espesor de suelo en este sitio es de 33 m.</p> <p>Un segundo pico puede apreciarse por debajo de 0,01 s con aceleraciones máximas que varían entre 1 g y 1,2 g.</p>

Perfil típico de suelo: Pes  
Municipio de Caldas

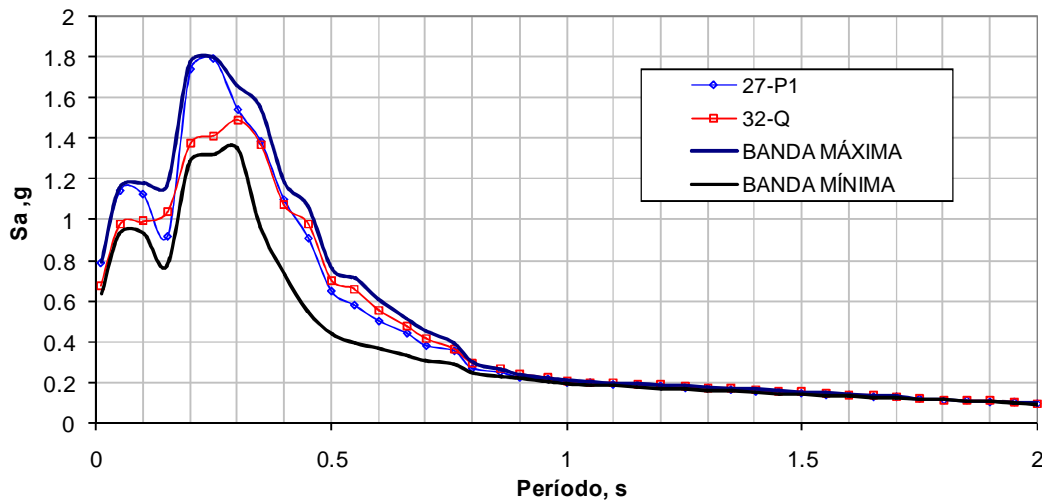


Figura 8.17. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de esquisto.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo	1.0 – 1.2	Variable dependiendo del espesor	El periodo fundamental de este perfil de suelo puede variar entre 0.2 s y 0.35 s. Para el sitio 23F la respuesta tiene una aceleración $Sa_{m\acute{a}x}=1.2$ g. En este sitio el espesor de suelo alcanza los 30m. Para el sitio 24E (sitio con respuesta más baja para el periodo fundamental) la aceleración $Sa_{m\acute{a}x}$ es 1.1 g. La banda de posibles es amplia, de tal manera que no existe un máximo único. El rango de períodos varía entre 0.2 s y 0.45s. El espesor de suelo en este sitio es de 37m.

Perfil típico de suelo: Flujo  
Municipio de Caldas

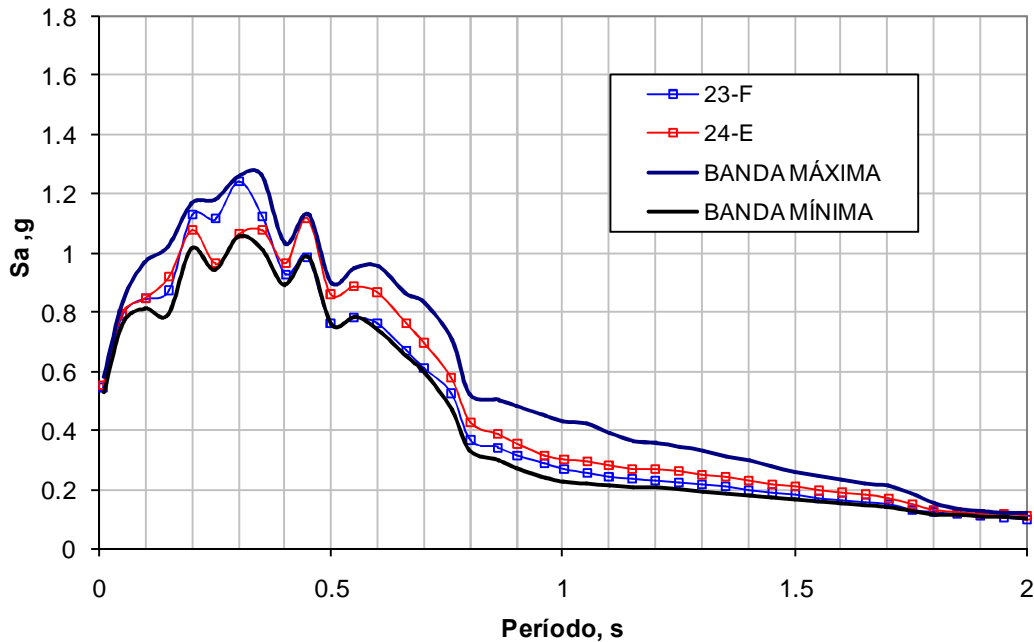
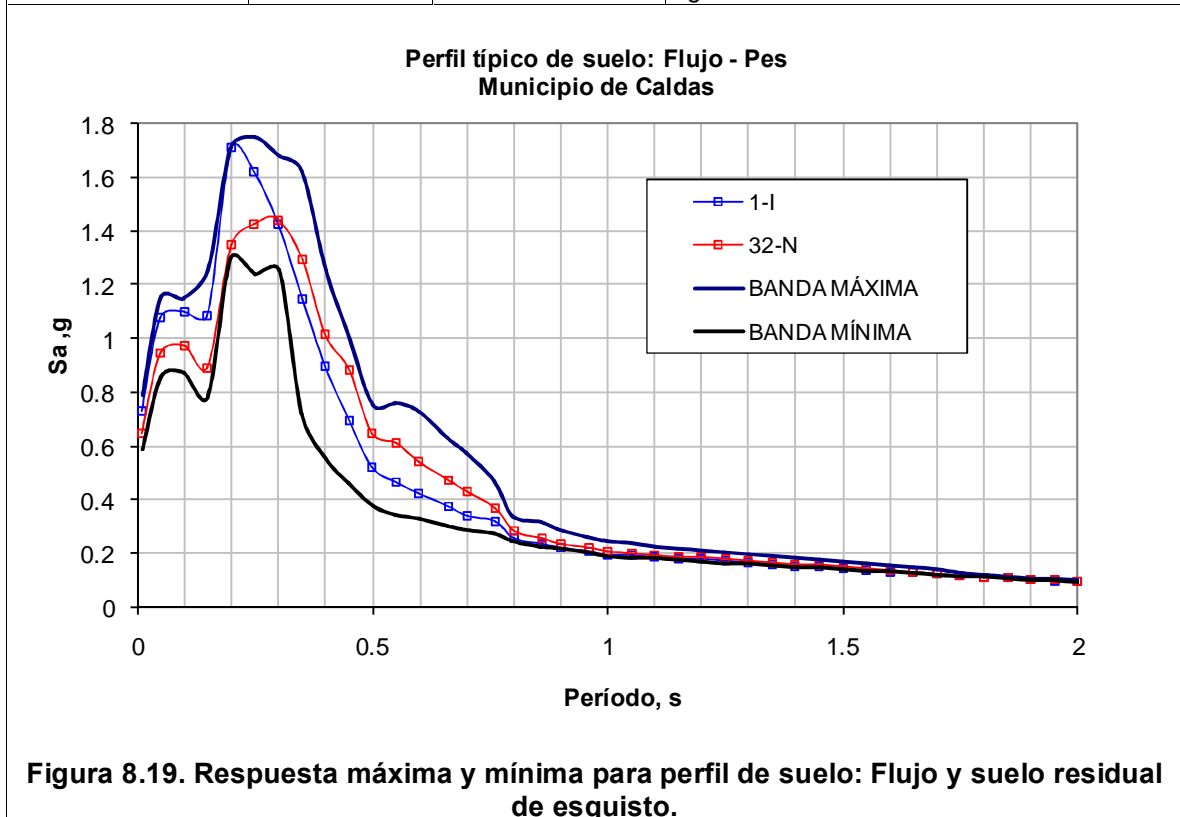


Figura 8.18. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y suelo residual de Esquisto (Pes)	1.4-1.7	0.2 – 0.3	Las aceleraciones máximas alcanzadas para los sitios con respuestas extremas para el periodo fundamental (Máxima: 1I y Mínima: 32N) varían entre 1.4 y 1.7g. Los espesores del suelo para ambos casos están entre 9m y 26m respectivamente. Cuando $Sa_{m\acute{a}x}=1.4$ g (sitio 32N), los periodos varían entre 0.2 y 0.3 s. Para el caso cuando $Sa_{m\acute{a}x}=1.7$ g (sitio 1I) el periodo fundamental esta en 0.2 s. Ver Figura 8.19.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo Residual de Gneis (Pni)	1	0.2 - 0.3	La aceleración máxima $Sa_{m\acute{a}x}$ (sitio 24G) obtenida para este tipo de suelo, está próxima a 1g y tiene un período fundamental que varía entre 0.2 s y 0.3 s. El espesor en este sitio está próximo a los 14 m. La respuesta en este sitio presenta un segundo modo de vibración, con un $Sa_{m\acute{a}x} = 0.9$ g en un período de 0.45 s. En el sitio 25H1, la $Sa_{m\acute{a}x}$ está cercana a 0.6 g. Esta aceleración se repite en dos períodos: 0.2 s y 0.65 s. Sin embargo, en este rango las aceleraciones se mantienen cercanas a 0.6 s..

Perfil típico de suelo: Pni  
Municipio de Caldas

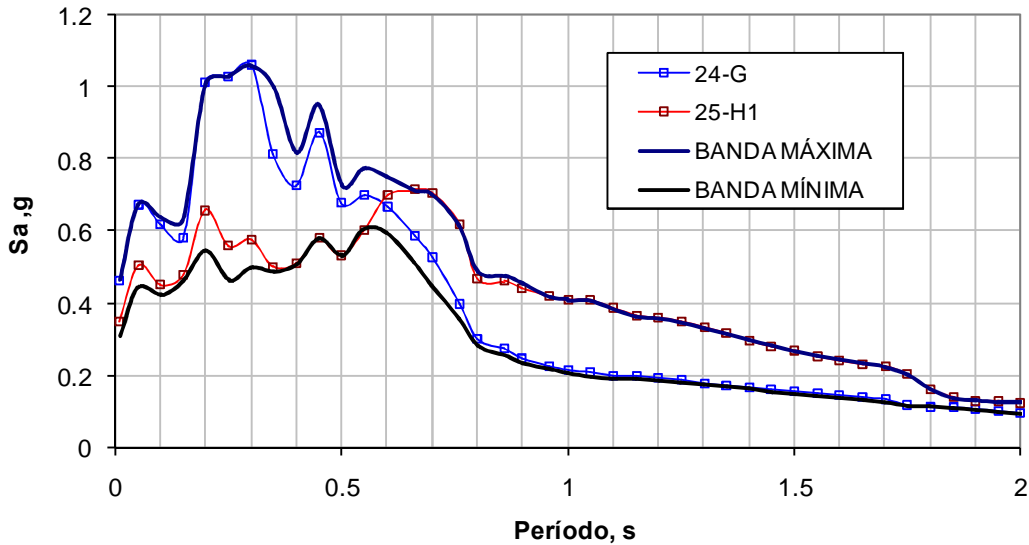


Figura 8.20. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Neis.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de esquistos (Pes) y suelo residual de Gneis (Pni)	0.77-0.89	Variable dependiendo del espesor	<p>Las respuestas varían el período fundamental, desde 0.35 s en el sitio 17G (<math>Sa_{m\acute{a}x}=0.84</math> g) con un segundo modo de vibración a 0.45 s (<math>Sa_{m\acute{a}x} = 0.77</math> g) hasta 0.45 s con aceleración <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> igual a 0.89 g.</p> <p>Para esta formación se encuentran tres sitios que fijan la tendencia de la respuesta para este perfil típico de suelo. Estos sitios presentan diferencias en el espesor de suelo, con espesores de 36m, 50m y 25 m para los sitios 17G, 18G1 y 18G2 respectivamente.</p> <p>A partir de las variaciones en el espesor del suelo la respuesta puede sufrir variaciones en su período fundamental entre 0.15 s a 0.45 s.</p>

Perfil típico de suelo: Pes - Pni  
Municipio de Caldas

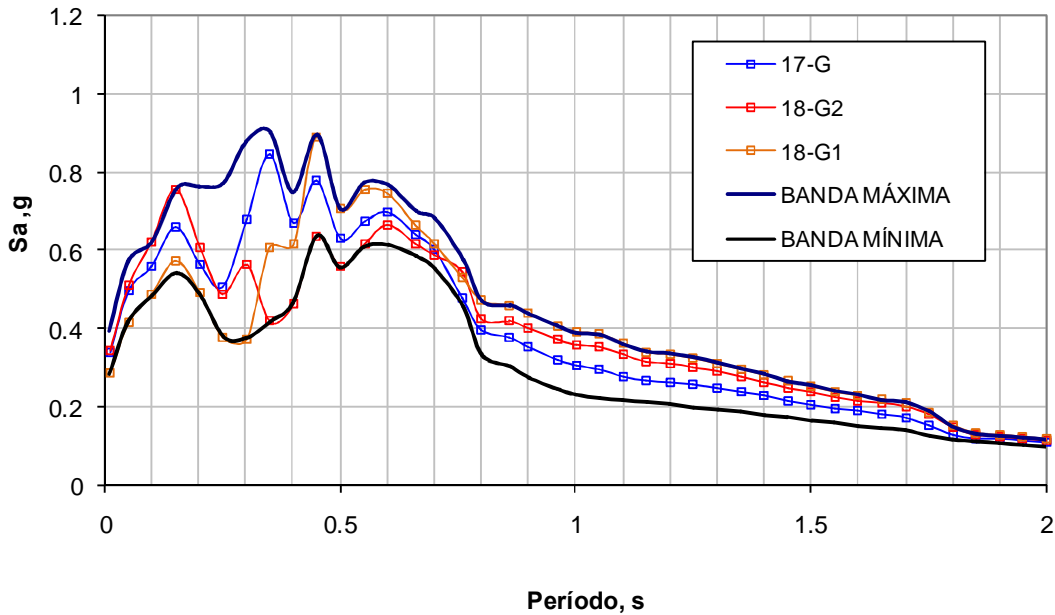


Figura 8.21. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de esquistos y Suelo residual de Neis. Municipio de Caldas

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo, depósito aluvial (Qa) y suelo residual de roca volcánica (KvQg)	1,2-1,5	0,25	Las variaciones de espesor encontradas en este sitio fueron de 17,6m y 28,85m para los sitios 3H1 y 12E3 respectivamente. Las variaciones en el espesor del perfil de suelo, repercute en el orden de magnitud de las aceleraciones máximas alcanzadas. Así, las variaciones en las respuestas están entre 1,2 g y 1,5 g para un período de 0,25 s: Este período se conserva para los sitios con respuesta máxima (3H1) y respuesta mínima (12E2).

Perfil típico de suelo: Qa - KvQg  
Municipio de Caldas

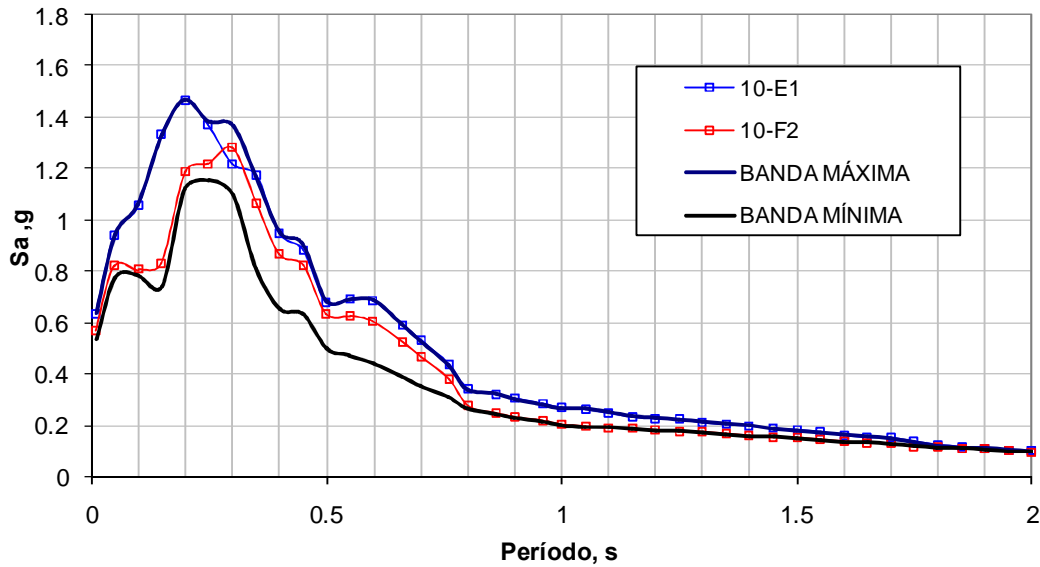
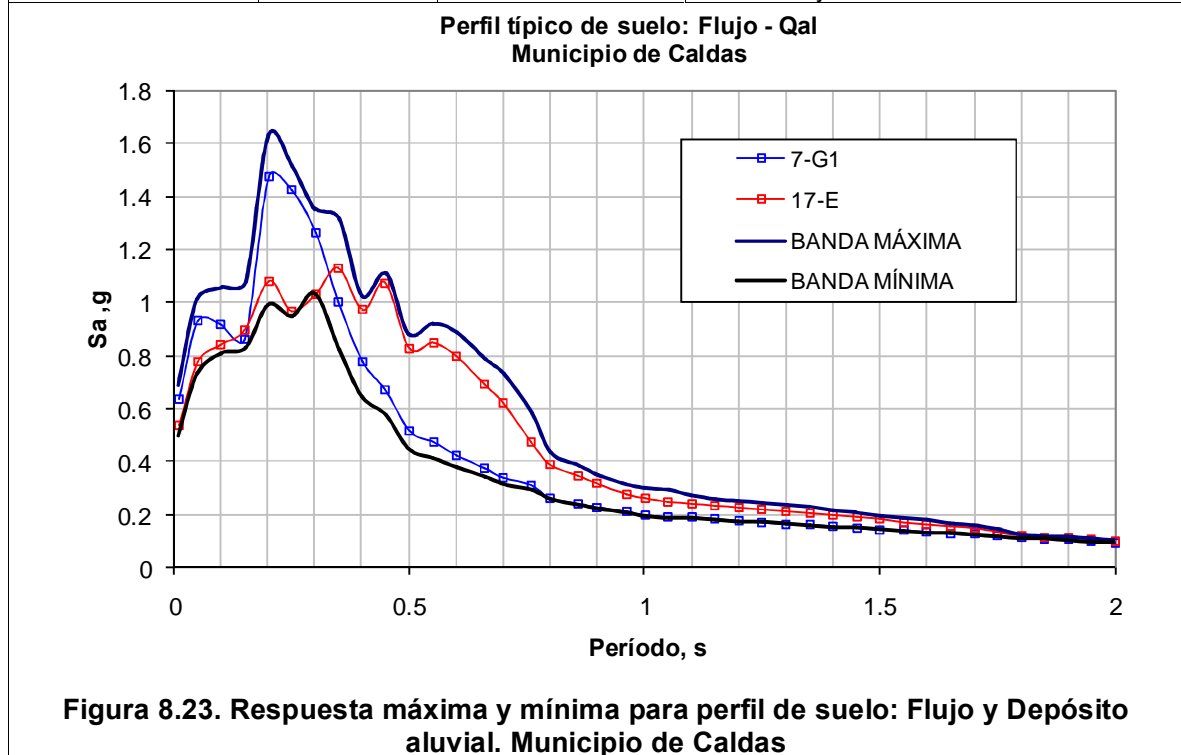


Figura 8.22. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre suelo residual de roca volcánica. Municipio de Caldas

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y depósito aluvial (Qal)	1,1-1,5	Variable dependiendo del espesor	Las variaciones en la respuesta de este tipo de suelo varían entre 1.6 g y 1 g, en la respuesta máxima para periodos entre 0.2s y 0.3 s. Como casos representativos se presentan los sitios 7G1 y 17E, cuyos espesores son de 13m y 33m respectivamente. Para el sitio 7G1 la aceleración espectral máxima ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) es de 1.5 g con un período de 0.2 s. El sitio 17E, con espesor de suelo mayor, presenta una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.1g$ , para períodos entre 0.2 s y 0.45 s.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal)	0.15-0.35	Variable dependiendo del espesor del sitio	<p>La alta heterogeneidad de los materiales de este tipo de depósitos, hace que se presenten respuestas con diferentes características de aceleración y frecuencia, cuyos valores picos de respuesta máxima varían desde 0.6 g a 1.7 g, para periodos fundamentales que varían entre 0.1 y 0.2 s, respectivamente.</p> <p>Se encontraron tres (3) sitios con respuestas típicas. El sitio 14F tiene un espesor de 52m y alcanza una <math>Sa_{m\acute{a}x}=1.2g</math> con un período fundamental de 0.35 s.</p> <p>El sitio 24F1 tiene un espesor de 28m y alcanza una <math>Sa_{m\acute{a}x}=1.7g</math> con un período de 0.2 s.</p> <p>Se hace notar la presencia de un tercer sitio, el cual rompe la tendencia que se ha venido presentando en los análisis anteriores; en la cual, los sitios con espesores grandes presentan las <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> más bajas dentro del tipo de suelo estudiado. Este sitio (31M) tiene un espesor de 15 m, una <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> cercana a 1.3 g y un período fundamental de 0.15 s.</p>

Perfil típico de suelo: Qal  
Municipio de Caldas

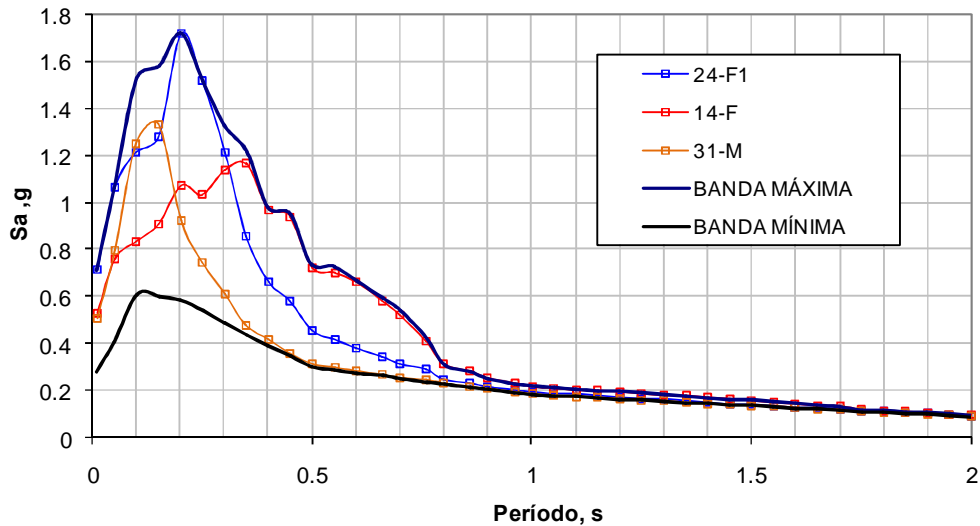


Figura 8.24. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial. Municipio de Caldas.

• Municipio de La Estrella

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (Qal) sobre suelo residual de esquisto (Pes)	1.5 – 1.7	0.15 - 0.2	Las respuestas obtenidas de este perfil de suelo, presentan un pico dominante entre 0.15s y 0.2s. Las aceleraciones espectrales máximas ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) varían en un rango relativamente estrecho entre 1.5g (sitio 4L) y 1.7g (Sitio 4M) donde los espesores del perfil de suelo están entre 22m y 34m respectivamente. Se observa un comportamiento importante en el sitio 18L, con una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.6g$ en un período de 0.15 s. En este sitio el espesor del perfil de suelo es de 15m.

Perfil típico de suelo: Qal sobre Pes  
Municipio de La Estrella

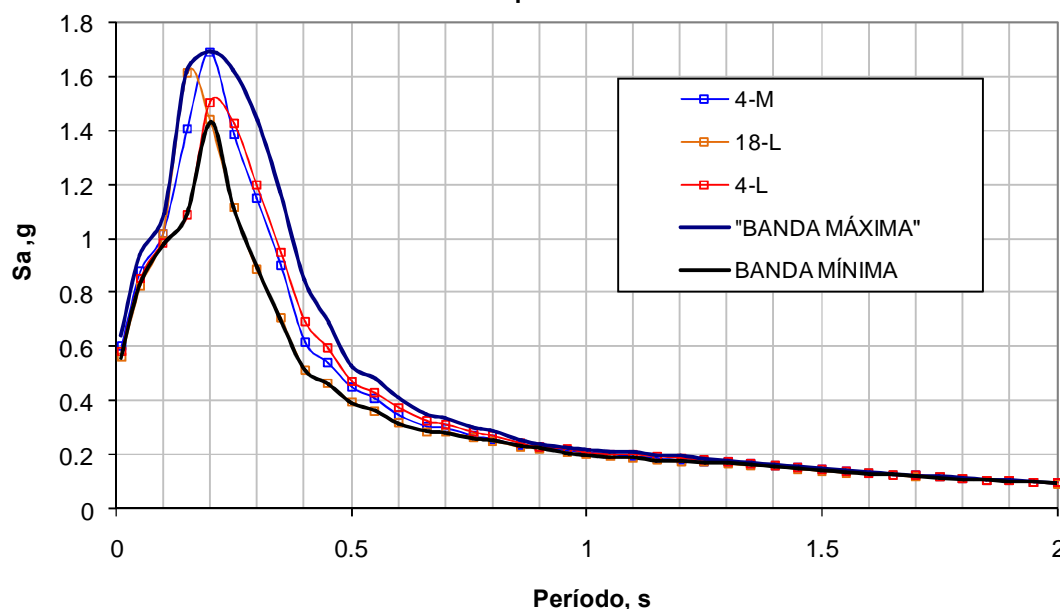


Figura 8.25. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre suelo residual de esquisto

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal)	1.4-1.7	Variable dependiendo del espesor del sitio	La respuesta depende del espesor del perfil de suelo en cada sitio. Las aceleraciones espectrales máximas varían entre 1.7 g y 1 g. Los sitios presentados en la figura tienen espesores de 20m (sitio 17L), 46m (sitio 8L1) y 57m (sitio 24P) y la $Sa_{m\acute{a}x}$ en cada uno de estos sitios es de 1.7g, 1.4 g y 1.4g respectivamente. Esta variación de espesores, además de generar cambios en el nivel de aceleraciones, produce un cambio en el período fundamental del depósito, pasando de un período de 0.2s (sitio 8L1) a un período de 0.35s (sitio 24P).

Perfil típico de suelo: Qal  
Municipio de La Estrella

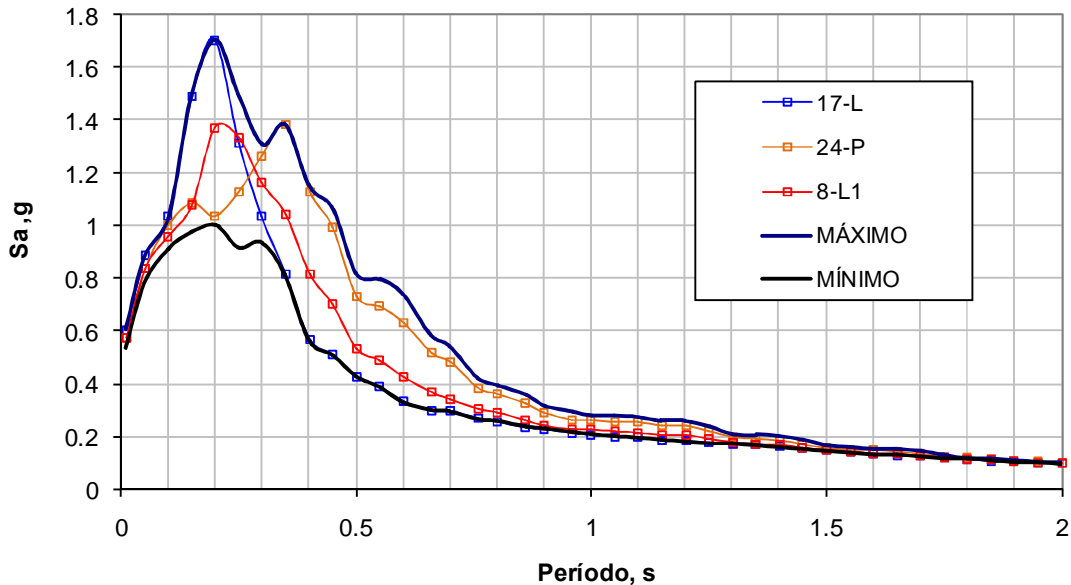
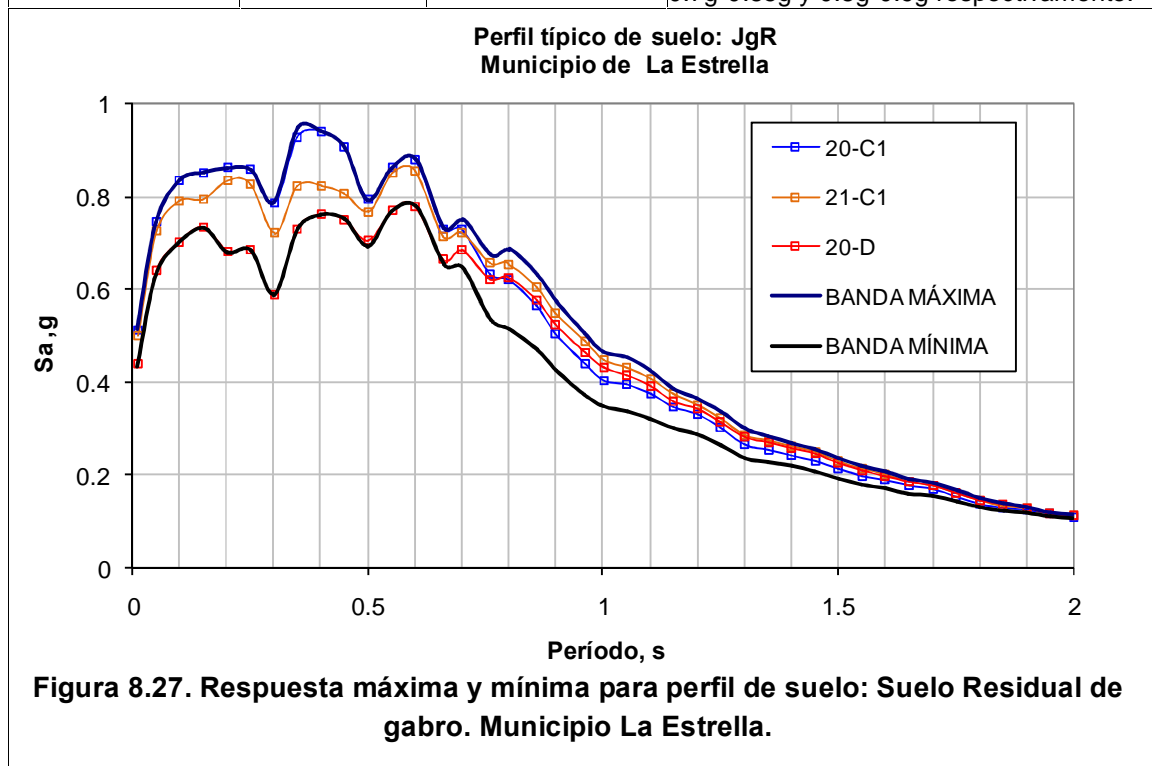


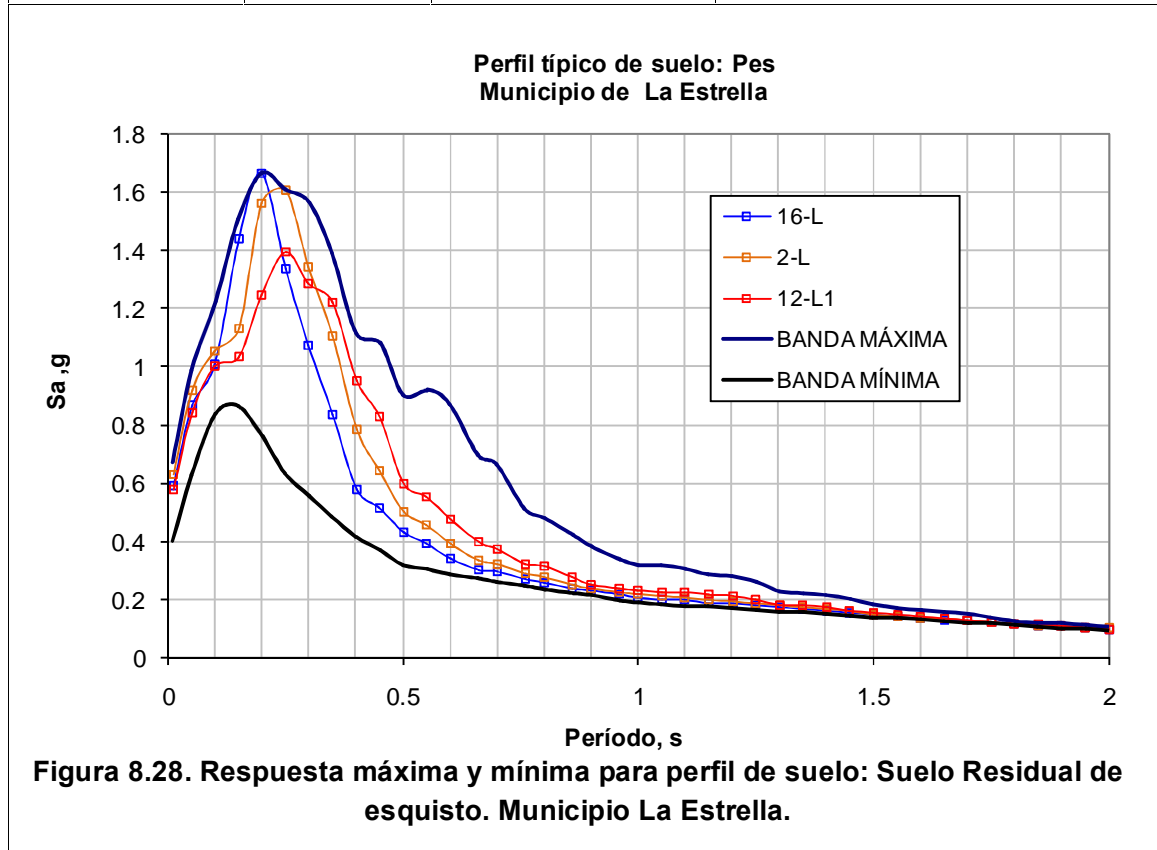
Figura 8.26. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial.  
Municipio La Estrella



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de Gabro (JgR)	0.75-0.95	0.4	La respuesta máxima y mínima de este perfil de suelo se presenta a continuación. Se caracteriza por tener una meseta entre 0.1 s y 0.6 s con valores de respuesta máxima que oscilan en un rango relativamente estrecho, entre 0.60 g y 0.95 g. Se encuentran otros modos de vibración destacables en 0.15s y 0.6s donde la respuesta varía entre 0.7g-0.85g y 0.8g-0.9g respectivamente.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de esquisto (Pes)	1.4-1.6	Variable dependiendo del espesor del sitio	La $Sa_{m\acute{a}x}$ en este perfil de suelo varía entre 0.8 g a 1.6g que ocurren en un período que varía entre 0.15s y 0.25s.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluviotorrencial (Qat) y Flujo	0.8-1.7	Variable dependiendo del espesor del sitio	Este perfil de suelo está fuertemente influenciado por los espesores de las formaciones geológicas constituyentes, ya que además de causar variaciones en las aceleraciones espectrales, produce cambios en los períodos fundamentales. Presentan una variación con picos máximos entre 1.7 g y 1.4 g, y picos mínimos del orden de 0.8 g, con un rango de variación de los periodos espectrales entre 0.1 s y 0.35 s. El sitio 2J1 con 24m de espesor tiene una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.7g$ en un período de 0.2s. Por otro lado, el sitio 24J1 (espesor de 56m); sitio con menor respuesta, tiene una $Sa_{m\acute{a}x} = 0.8g$ la cual se presenta en un período amplio que varía entre 0.1 y 0.25 y vuelve a encontrarse en 0.6s. Un sitio con un espesor intermedio (34m) se encontró en el sitio 27M2. Se observa como la respuesta en este sitio es menor que en el caso del sitio 2J1 y el período se desplaza de 0.2s a 0.35s con respecto a dicho sitio.

Perfil típico de suelo: Qat sobre Flujo  
Municipio de La Estrella

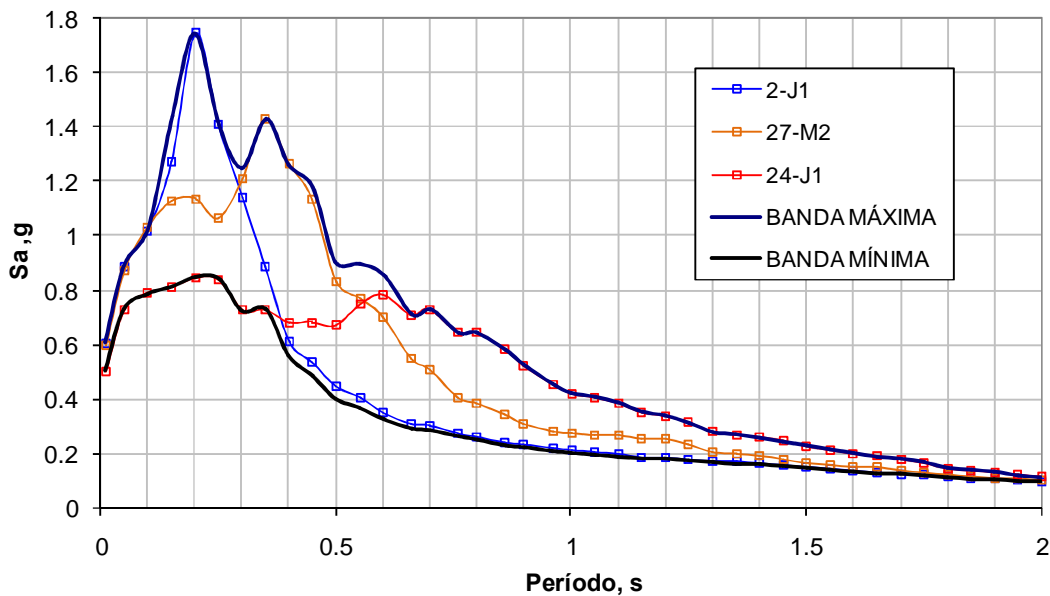
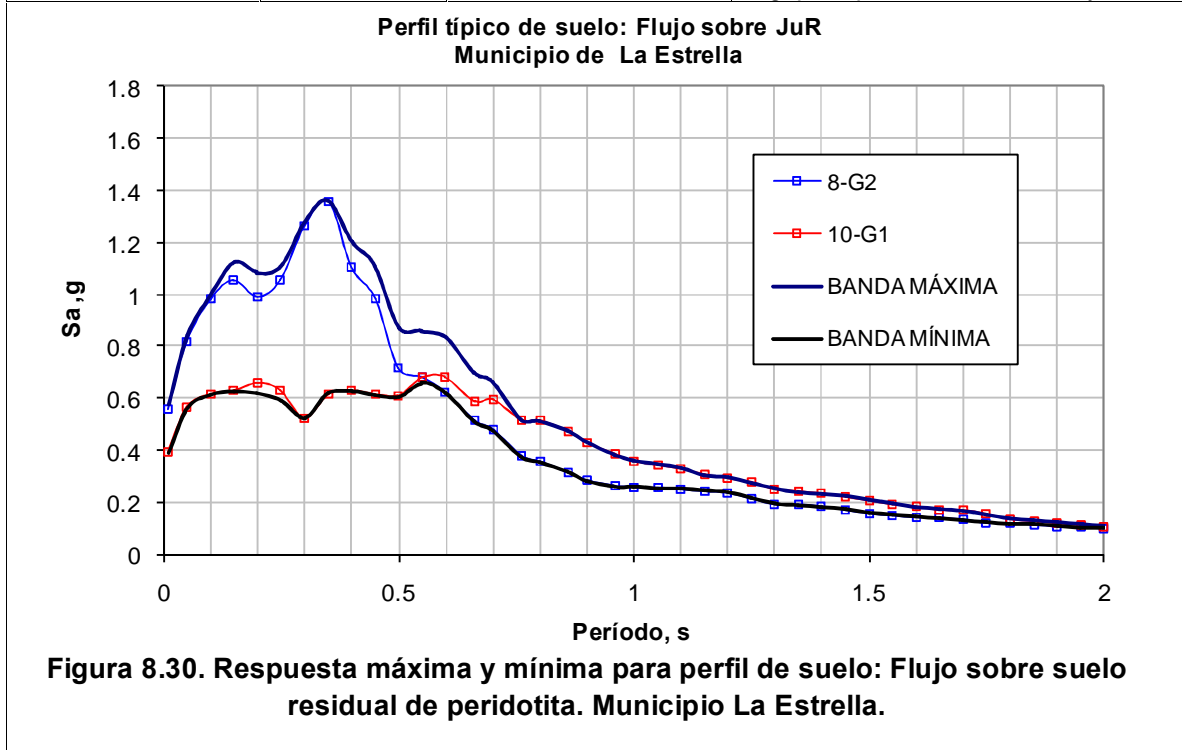


Figura 8.29. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluviotorrencial sobre flujo. Municipio La Estrella.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y suelo residual de peridotita (JuR)	0.6-1.4	Variable dependiendo del espesor	Las variaciones este tipo de suelo oscilan entre 1.4 g y 0.60 g. Los espectros presentan un contenido frecuencia ancho con periodos fundamentales entre 0.1 s y 0.5 s. Como ejemplos extremos se presentan en los sitios 8G2 y 10G1, cuyos espesores son de 12m y 37m respectivamente. Para el sitio 7G1 la aceleración espectral máxima ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) es de 1.4g con un período de 0.35 s. El sitio 17E, con espesor de suelo mayor (37m), presenta una $Sa_{m\acute{a}x} = 0.6g$ , para periodos entre 0.1s y 0.6s.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y suelo residual de Gabro (JgR)	0.8-1.4	Variable dependiendo del espesor de cada formación geológica	De acuerdo con la figura 8.31 la respuesta máxima se presenta para periodos entre 0.2 y 0.45 s, para los cuales se obtienen aceleraciones espectrales del orden de 1.2 g, y los valores menores tienen un valor del orden de 0.70, para un rango de periodos similar. La aceleración espectral máxima se encontró para el sitio 22E, con una aceleración de 1.4g en un período de 0.35s. Aquí el espesor del perfil de suelo es 31m, de los cuales 21m corresponden al espesor del flujo y los 10m restantes corresponden al suelo residual de gabro. Con un espesor de 32m se presenta el sitio 20D1 (sitio con menor nivel de aceleración) de los cuales 6m corresponden al espesor del flujo y 26m a suelo residual de gabro. En este sitio, no hay un pico de aceleración único, encontrando que la $Sa_{m\acute{a}x}$ es de 0.8g la cual se presenta entre 0.15s y 0.6s aproximadamente. La diferencia en las respuestas máximas y mínimas encontradas es dependiente de la diferencia entre los espesores de flujo y el suelo residual de gabro en cada sitio.

Perfil típico de suelo: Flujo sobre JgR  
Municipio de La Estrella

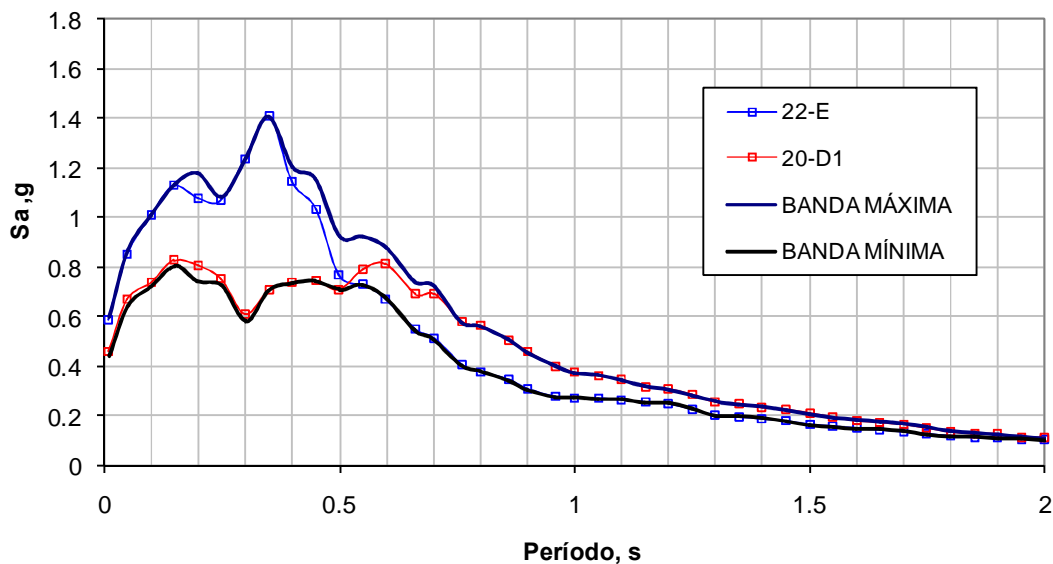
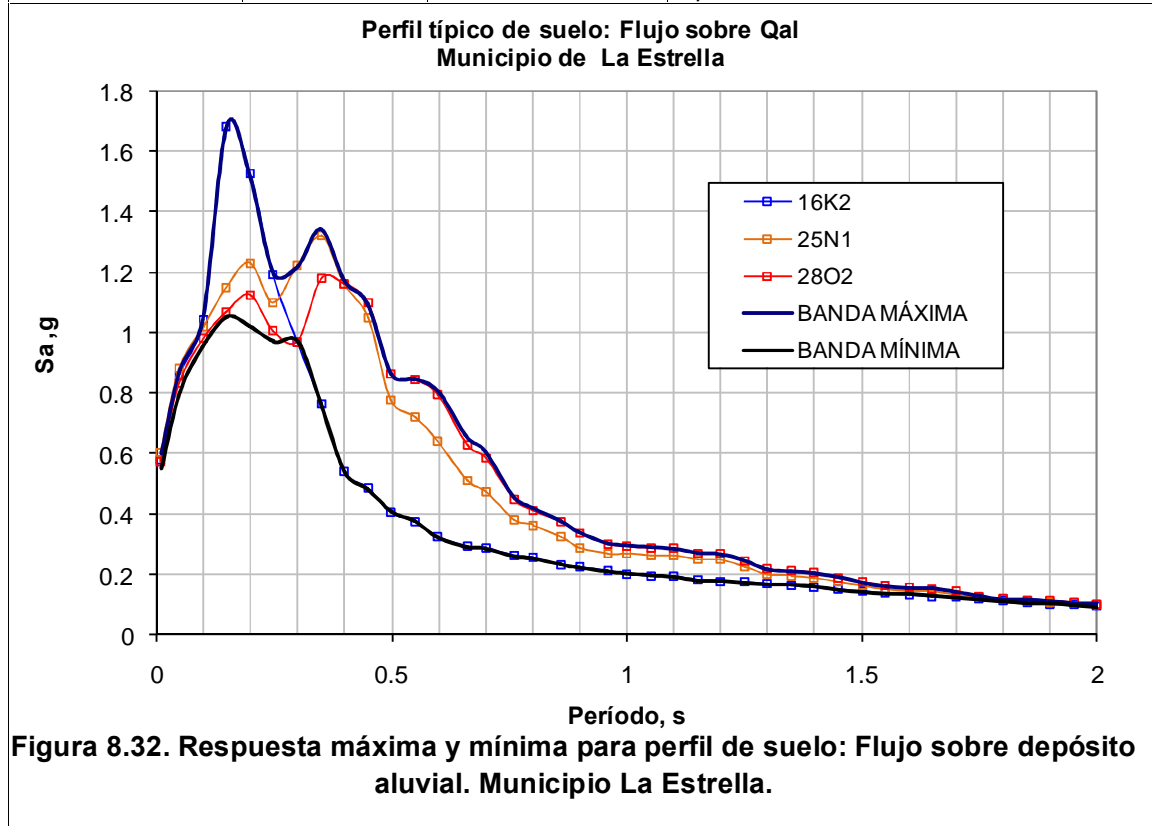


Figura 8.31. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre suelo residual de gabro. Municipio La Estrella.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y Depósito Aluvial (Qal)	1 – 1.3	Variable dependiendo del espesor	Las aceleraciones espectrales máximas oscilan entre 1.7 g y 1 g. La mayor $Sa_{m\acute{a}x}$ encontrada en este perfil de suelo, se presentó en el sitio 16K2 con una aceleración de 1.7g en un período de 0.15s. El espesor del perfil de suelo en este sitio, alcanza los 18 m. Los sitios 25N1 y 28O2 presentan una $Sa_{m\acute{a}x}$ que varían entre 1.2g y 1.3g en un período de 0.35s. Los espesores de este par de sitios varían entre 32m para el sitio 25N1 y 49m en el sitio 28O2. En este par de sitios se expresa un segundo modo de vibración en un período de 0.2s con $Sa_{m\acute{a}x}$ entre 1g y 1.2g. Se puede concluir que para espesores por encima de los 18m la respuesta de este perfil de suelo modifica sus características de vibración desplazando el período fundamental de 0.15s a 0.35s.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo	0.7-1.4	0.1 - 0.35	<p>Las aceleraciones encontradas en este perfil de suelo van desde 0.7g) a 1.4g, con variaciones en el período fundamental entre 0.1s y 0.35s.</p> <p>Es interesante observar la respuesta para los sitios 22J y 23J1 (flujo de gabro) donde la <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> varía entre 0.7g y 1 g que se diferencian de las respuestas presentadas para los sitios 1J1 y 6G1 caracterizados por flujos provenientes de otra fuente.</p> <p>Las respuestas máximas encontradas para este perfil de suelo se encuentran en los sitio 6G1 y 1J1 (espesores de 45m y 29m respectivamente) con una <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> cercana a 1.4g entre un período de 0.25s y 0.35s.</p>

Perfil típico de suelo: Flujo  
Municipio de La Estrella

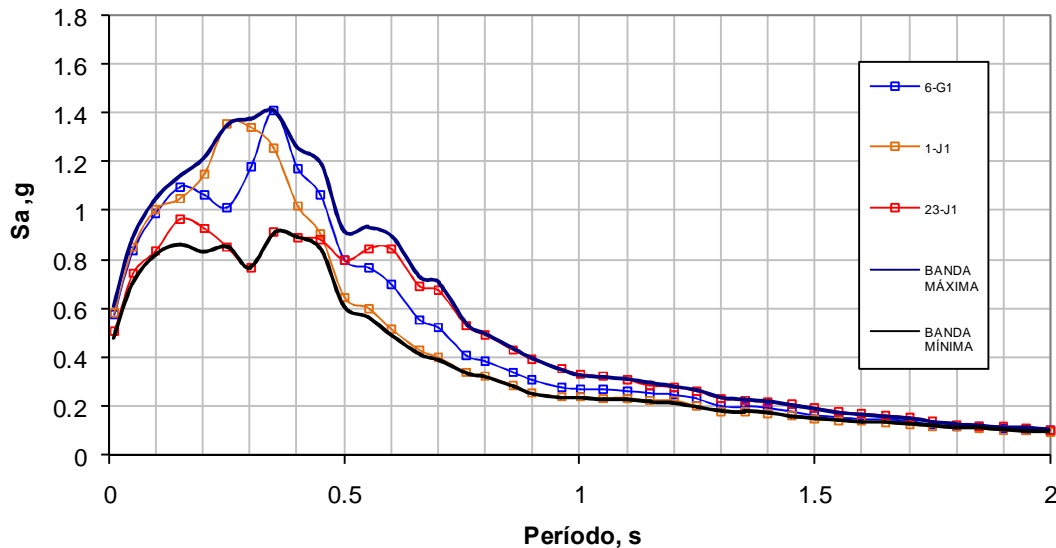


Figura 8.33. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo. Municipio La Estrella.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (Qal) y Flujo	0.6-1.3	0.1 – 0.6. Dependiendo del espesor del perfil	Las variaciones de espesor de los sitios caracterizados por este perfil de suelo producen una amplia variación de las respuestas máximas de aceleración, de forma que se encuentran valores entre 1.4 g y 0.4 g, y alcanzan periodos fundamentales de hasta 0.6 s.. Se tienen casos representativos como el sitio 20L tiene un espesor de 38m, que alcanza una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.3g$ en un período fundamental de 0.25s. Con un espesor mayor (54m) se encuentra el sitio 6L1 cuya $Sa_{m\acute{a}x}$ tiene una respuesta de 0.6g, la cual ocurre en diferentes períodos (entre 0.1s y 0.6s).

Perfil típico de suelo: Qal sobre flujo  
Municipio de La Estrella

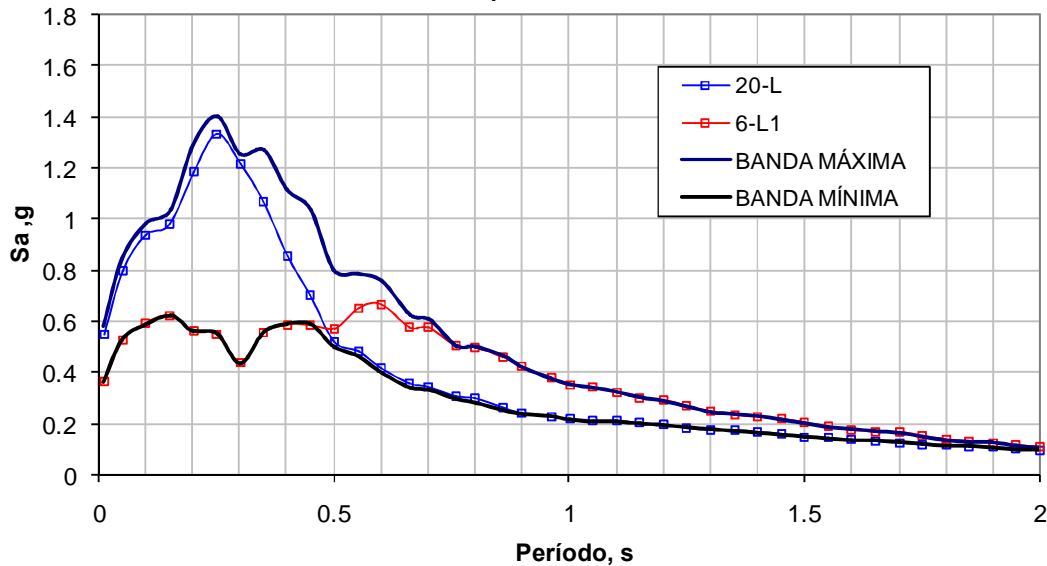
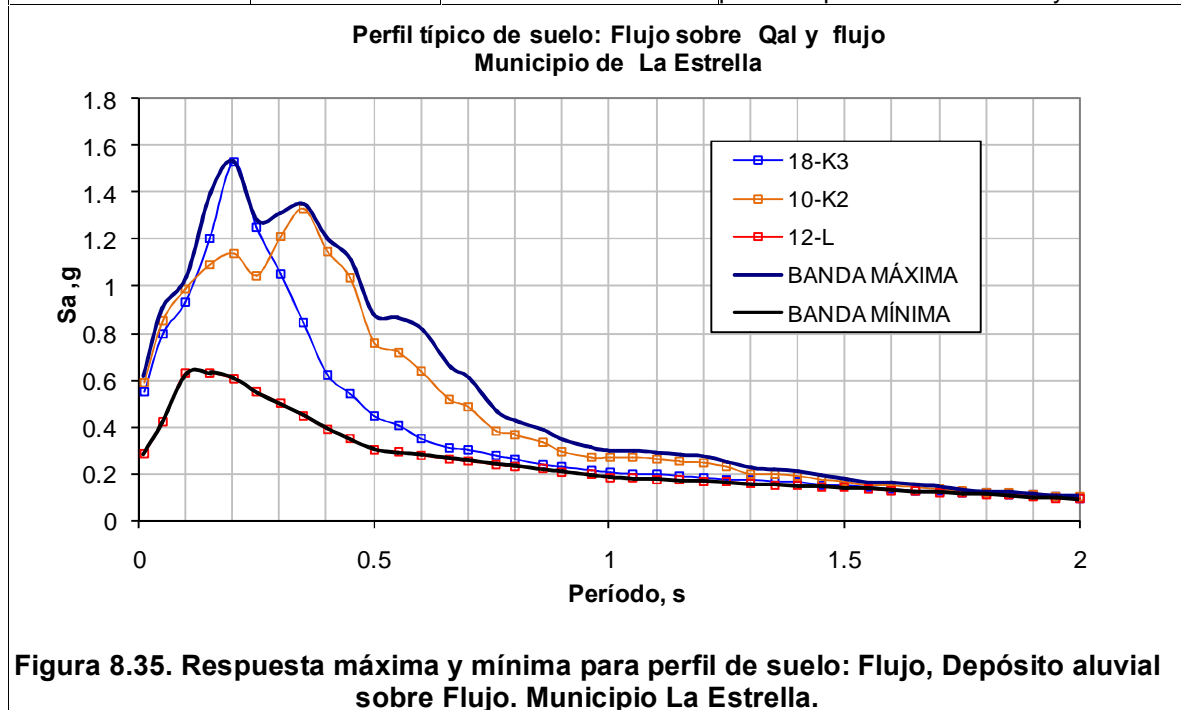


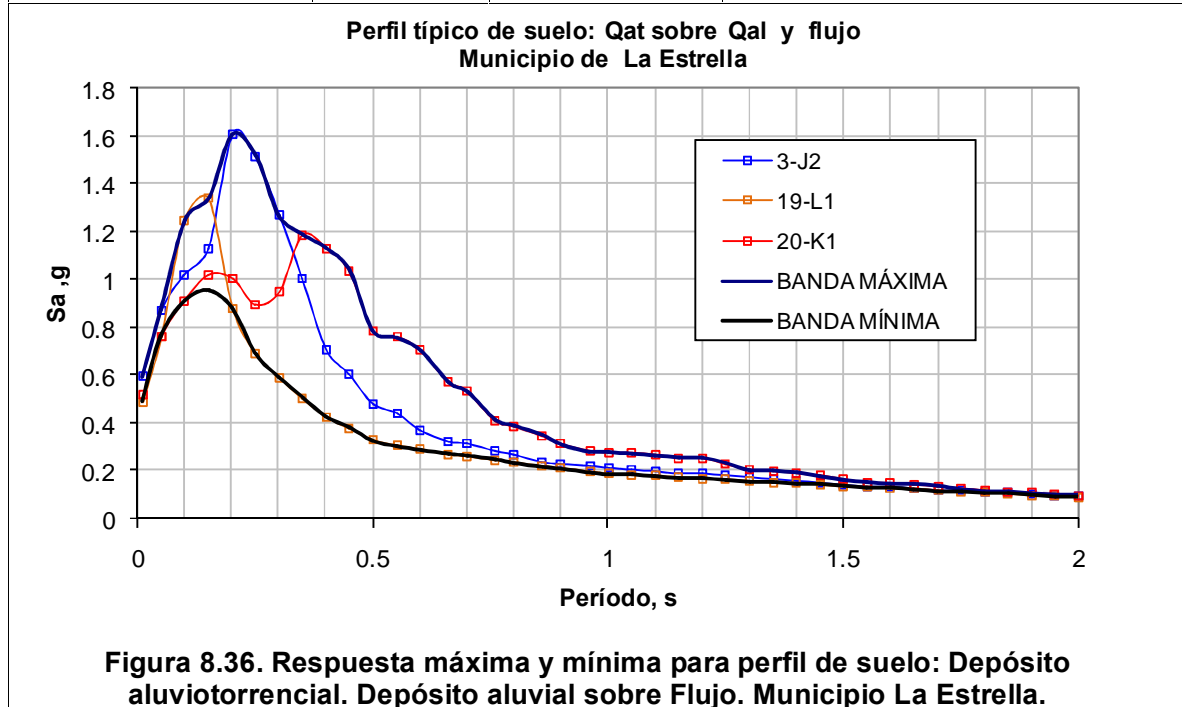
Figura 8.34. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre Flujo. Municipio La Estrella.



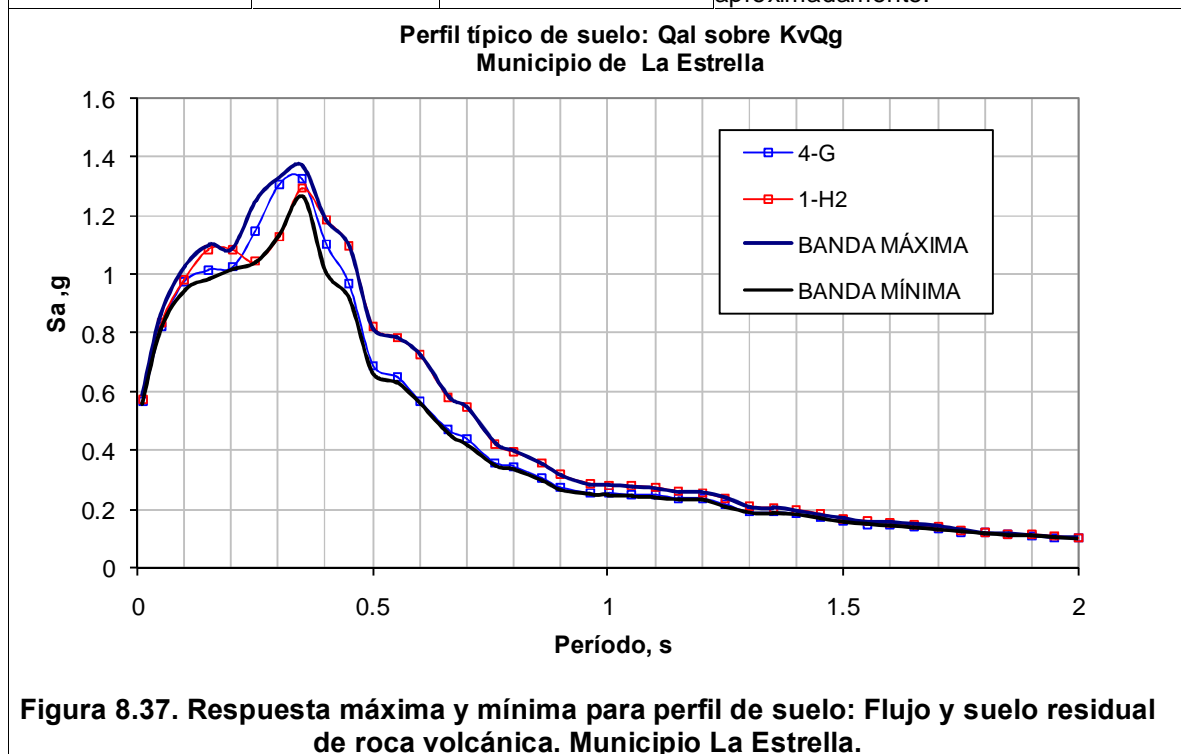
Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo, Depósito Aluvial (Qa) y Flujo.	0.6 – 1.5	Variable dependiendo del espesor	Debido a la variabilidad en los tipos de materiales, la respuesta también presenta un amplio rango de variación, que va desde 0.6 g para 0.1 s, en un suelo rígido, hasta 1.5 g en un suelo un poco más rígido. Se pueden distinguir 2 características fundamentales: a) 2 períodos donde se presentan $Sa_{m\acute{a}x}$ importantes, 1.5 g (sitio 18K3) y 1.3 g (sitio 10K2) con períodos de 0.2 s y 0.35 s respectivamente. b) En el sitio 12L se alcanza una $Sa_{m\acute{a}x}$ de 0.6g en un período que varía entre 0.1s y 0.2s.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluviotorrencial (Qat), depósito Aluvial (Qal) y flujo	1.2-1.6	Variable dependiendo del espesor de las formaciones geológicas	Presenta un amplio rango de variación, con aceleraciones máximas entre 1.6 g y 0.9 g. Las variaciones durante la conformación de los depósitos aluviotorrenciales y aluviales no permite establecer un valor máximo $Sa_{m\acute{a}x}$ en un período fundamental único. Es decir, el espesor de cada una de las formaciones geológicas involucradas, determinan las características de la respuesta en cada uno de los sitios caracterizados con este perfil de suelo. Un ejemplo de esto se presenta entre los sitios 20K1, 19-L1 y 3J2, donde la diferencia de espesores del depósito aluviotorrencial (11m, 6m y 3m respectivamente) tienen una fuerte influencia en la respuesta de estos sitios.

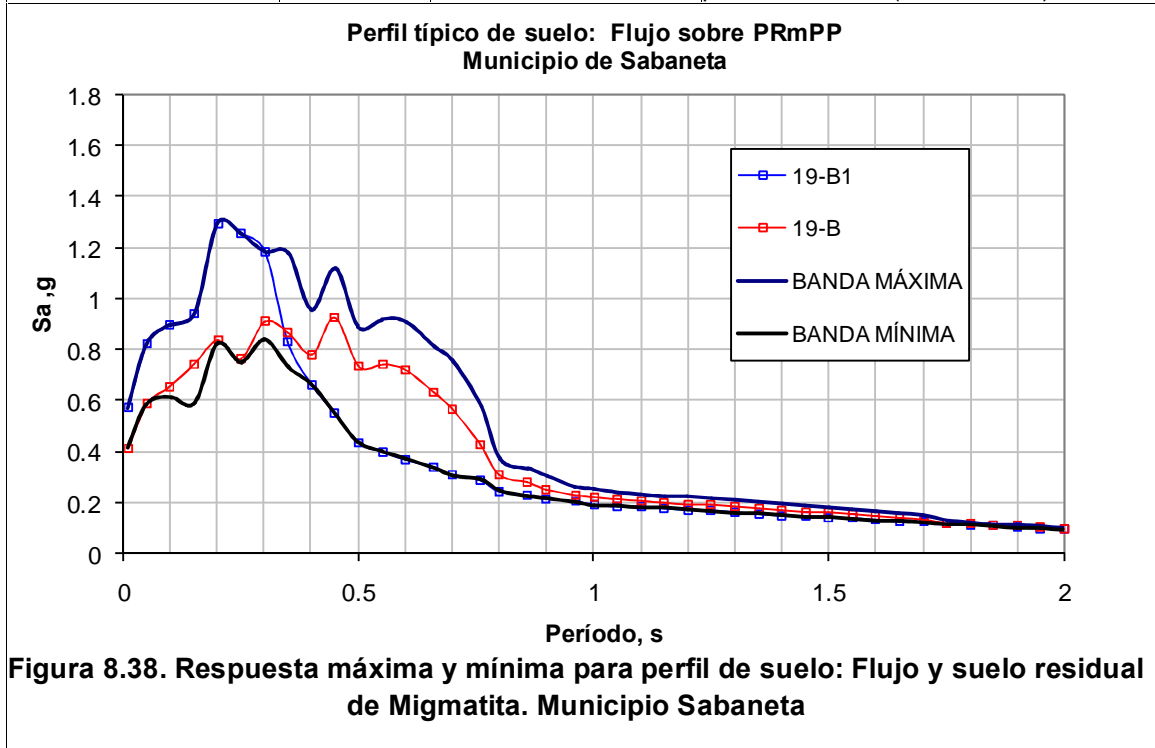


Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y suelo residual de roca volcánica (KvQg)	1.3	0.35	En el municipio de la Estrella, los sitios caracterizados por este perfil de suelo no presentan variaciones significativas en la respuesta, La respuesta de este perfil, presenta una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.3g$ en un período fundamental de 0.35s aproximadamente.



• Municipio de Sabaneta

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y Suelo residual de Migmatita (PRmPP)	0.9-1.3	Variable dependiendo del espesor	Estos materiales presentan espectros con una ancho de banda importante, con valores máximos para periodos entre 0.2 s y 0.6 s, con valores máximos que varían en un rango moderado entre 0.8 g y 1.2 g. Como ejemplo, los espesores encontrados para esta formación son de 13m para el sitio 19B1 y 23m para el sitio 19B. Esto genera que el suelo presente variaciones en su nivel de aceleración y su período fundamental. Así, es posible observar en la figura 8.38 como la $Sa_{m\acute{a}x}$ varía entre 0.9g (19B) a 1.3g (sitio 19B1), presentándose un cambio en el período fundamental del perfil analizado. (0.2s a 0.45s).



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y Suelo residual de esquisto (Pes)	1.1-1.6	Variable dependiendo del espesor	Los períodos donde se presentan las mayores respuestas en esta formación varían entre 0.2s a 0.35s. En este rango ocurren aceleraciones entre 1.1g y 1.6g dependiendo del espesor del flujo superficial. Las variaciones de espesor para esta formación están entre 15m y 49m.

Perfil típico de suelo: Flujo sobre Pes  
Municipio de Sabaneta

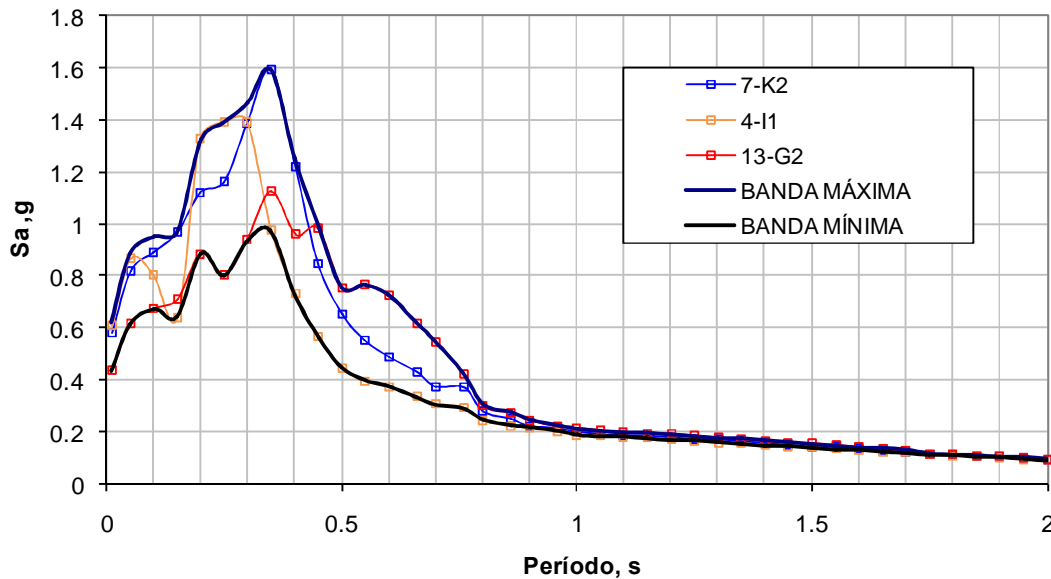
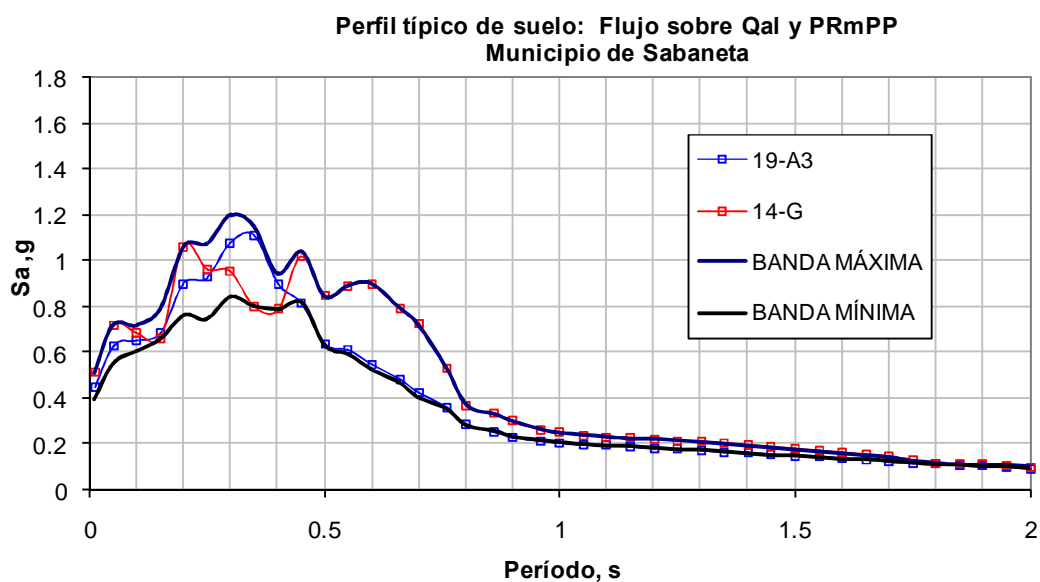


Figura 8.39. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo y suelo residual de Esquisto. Municipio Sabaneta.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo, Depósito Aluvial (Qal) y Suelo residual de Migmatita (PRmPP)	1 – 1.1	Variable dependiendo del espesor	Esta formación presenta espectros aplanados, con un rango de periodos entre 0.2 s hasta 0.6 s y un rango de aceleraciones espectrales máximas entre 0.8 g y 1.2 g. Los sitios 19A3 y 14G representan las respuestas máxima y mínimo para este perfil de suelo, los cuales tienen un espesor de 27m y 63m respectivamente. En el sitio 19A3, ocurre una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.1g$ en un período fundamental de 0.35g. En el sitio 14G, se presentan dos picos con aceleraciones próximas a 1g que ocurren en un período de 0.2s t 0.45s. Se nota que para el mayor espesor se alcanzan periodos fundamentales de 0.6 s.



**Figura 8.40. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre depósito aluvial y suelo residual de Migmatita. Municipio Sabaneta.**

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y Depósito Aluvial (Qal)	0.8 – 1.3	Variable dependiendo del espesor	El rango de variación presenta un amplio contenido espectral, con periodos fundamentales entre 0.2 s hasta 0.6 s., con aceleraciones espectrales máximas entre 0.8 g y 1.3 g. La mayor aceleración espectral máxima ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) se presenta en el sitio 16A1 (espesor 29m), el cual alcanza una aceleración de 1.3g en un período fundamental de 0.2s. El sitio 711, con $Sa_{m\acute{a}x}$ menor, tiene un espesor de 63m y una aceleración de 0.9g que ocurre en un período de 0.35s y 0.45s. En este sitio se presenta una $Sa_{m\acute{a}x} = 0.8g$ en un período de 0.2s.

Perfil típico de suelo: Flujo sobre Qal  
Municipio de Sabaneta

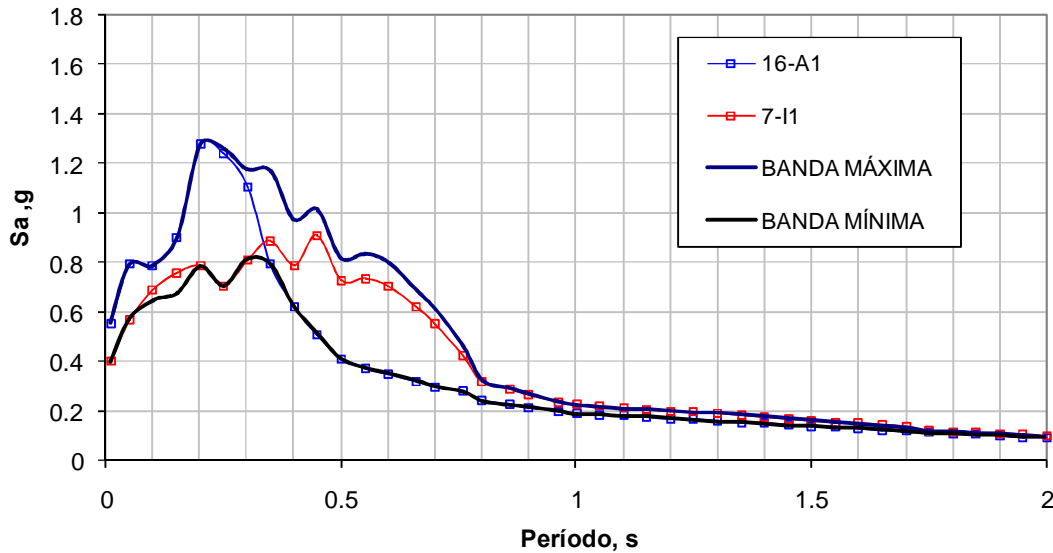


Figura 8.41. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre depósito aluvial. Municipio Sabaneta.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (Qal) y suelo residual de Esquisto (Pes)	0.9 – 1.1	0.35	Corresponde a un rango de variación de suelos rígidos, con periodos fundametnales entre 0.2 s y 0.3 s y aceleraciones espectrales máximas entre 1 g y 1.4 g. Las variaciones en el espesor de este perfil de suelo, no produce variaciones significativas en la respuesta.

Perfil típico de suelo: Qal sobre Pes  
Municipio de Sabaneta

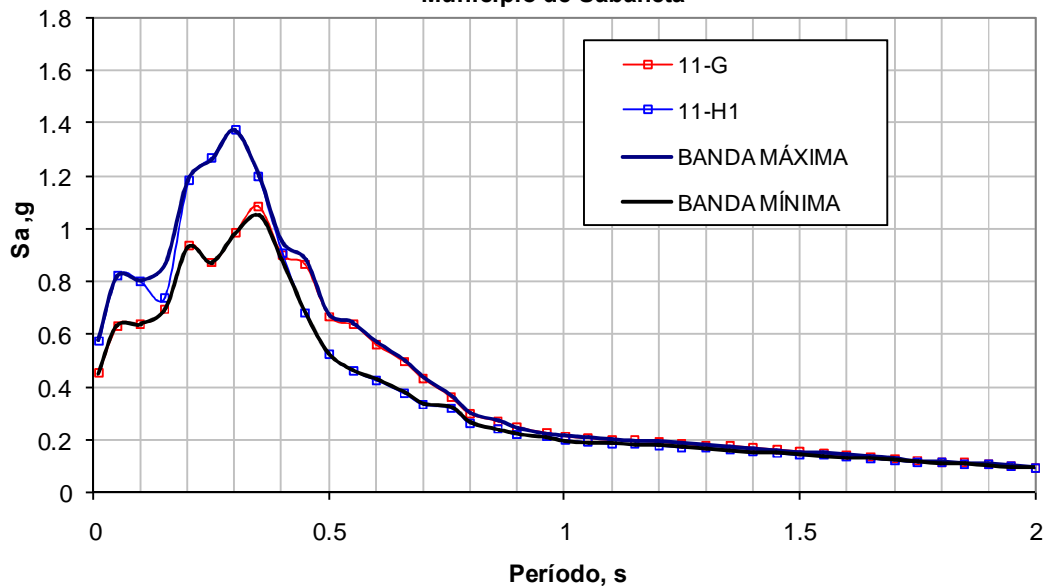


Figura 8.42. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre Flujo y suelo residual de esquisto. Municipio Sabaneta.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal) y flujo	0.95 – 1.05	0.2 – 0.3	Corresponde a suelos relativamente rígidos con rangos estrechos para la variación de los periodos fundamentales ( 0.2 s y 0.35 s) y de las aceleraciones espectrales máximas (0.9 g y 1.15 g). Los espesores de los sitios donde se presentan estas aceleraciones varían entre 31m (sitio 17B) y 67m (sitio 7H1).

Perfil típico de suelo: Qal sobre Flujo  
Municipio de Sabaneta

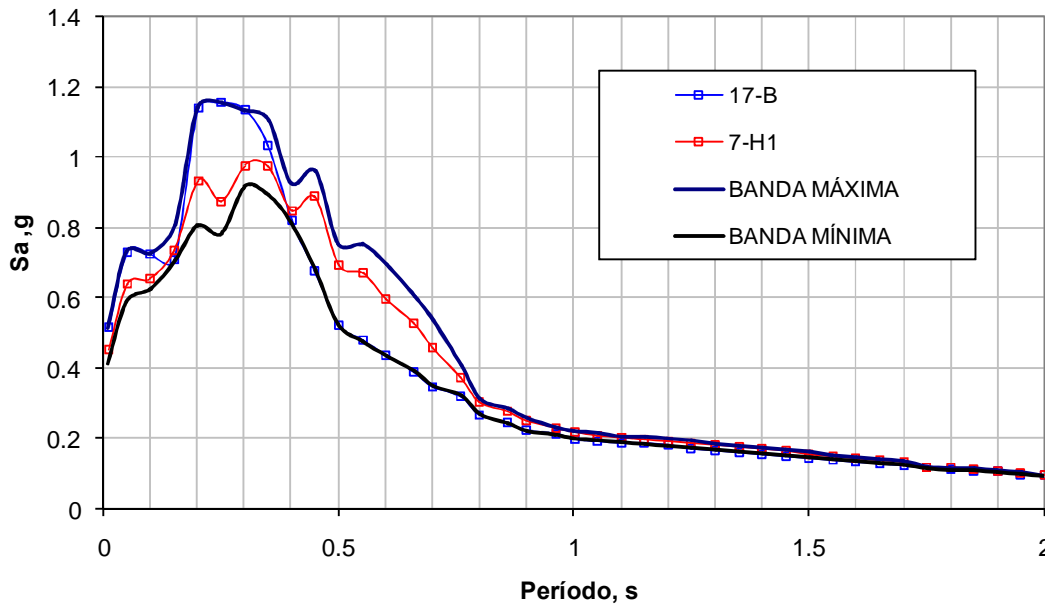
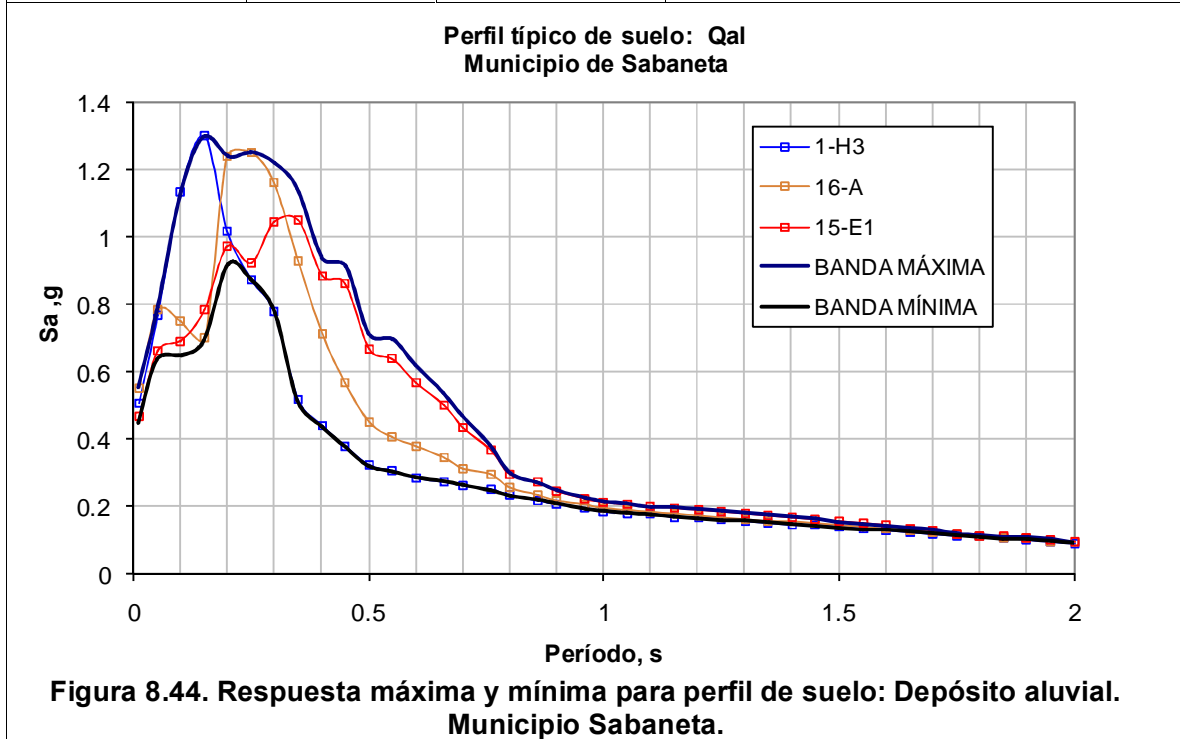


Figura 8.43. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Flujo sobre Depósito aluvial. Municipio Sabaneta.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (QaI)	1 - 1.3	Variable dependiendo del espesor	Corresponde a suelos relativamente rígidos con un rango estrecho para la variación de los periodos fundamentales ( 0.2 s y 0.35 s), pero un poco mayor para las aceleraciones espectrales máximas (0.9 g y 1.30 g).. De esta manera, se pasa de un $Sa_{m\acute{a}x}$ de 1.3g para el sitio 1H3 el cual tiene 3m de espesor aproximadamente y por otro lado el sitio 15E1 con un espesor de 75m en el cual se reduce la $Sa_{m\acute{a}x}$ ( $Sa_{m\acute{a}x}=1.1g$ ) y se desplaza el período fundamental hasta 0.35s. El sitio 16ª con un espesor intermedio, respecto a los sitios anteriores (23m), presenta una $Sa_{m\acute{a}x}=1.25g$ y un período fundamental en 0.25s.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de Migmatita (PRmPP)	1 – 1.3	Variable dependiendo del espesor	Esta formación presenta espectros con un rango de variación amplio en cuanto a los periodos fundamentales, el cual se ve muy influenciado por el espesor de los suelos, de forma que se pueden obtener periodos fundamentales entre 0.2 s y 0.6 s, y aceleraciones espectrales máximas entre 0.8 g y 1.3 g. La respuesta máxima y mínima de este perfil de suelo, está limitado por la respuesta de los sitios 9P1 y 18I respectivamente. El sitio 9P1 con un espesor de 39 m, presenta un una $Sa_{m\acute{a}x} = 1.3g$ con período fundamental en 0.35s. El sitio 18I con un espesor de 45m, presenta dos picos importantes con la misma $Sa_{m\acute{a}x} = 1g$ , los cuales ocurren en 0.2s y 0.45s. Sin embargo, la forma que se presenta el espectro en este sitio, sugiere la ocurrencia de aceleraciones próximas a 0.9g entre 0.2s y 0.5s.

Perfil típico de suelo: PRmPP  
Municipio de Sabaneta

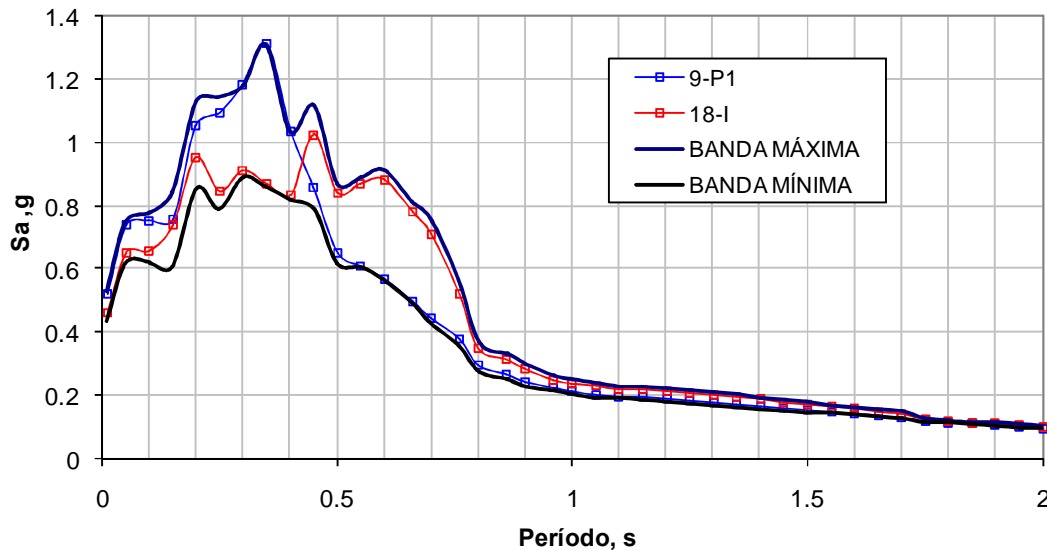


Figura 8.45. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Migmatita. Municipio Sabaneta.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de Esquisto (Pes)	1.4 – 1.6	0.15-0.35. Variable dependiendo del espesor.	Los espectros obtenidos definen una banda de respuestas máximas para periodos cortos (0.15 s a 0.35 s, pero con una amplia variación en la respuesta máxima, la cual varía entre 1 g y 1.6 g. El espesor de esta formación geológica varía entre 4m y 20m, el cual determina las características de la respuesta en cada sitio.

Perfil típico de suelo: Pes  
Municipio de Sabaneta

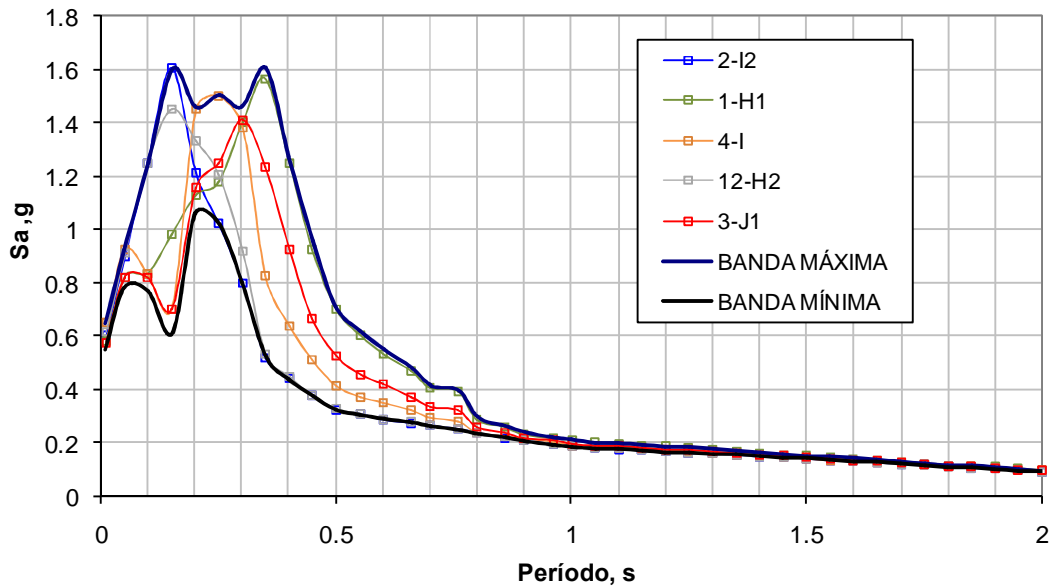
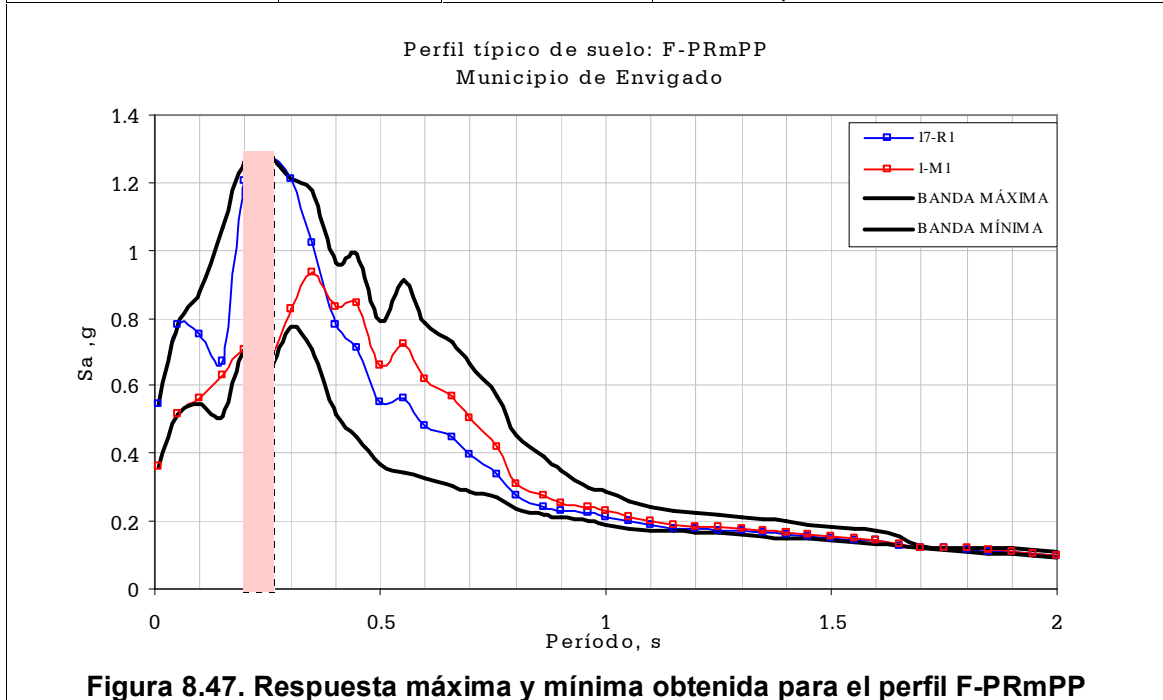


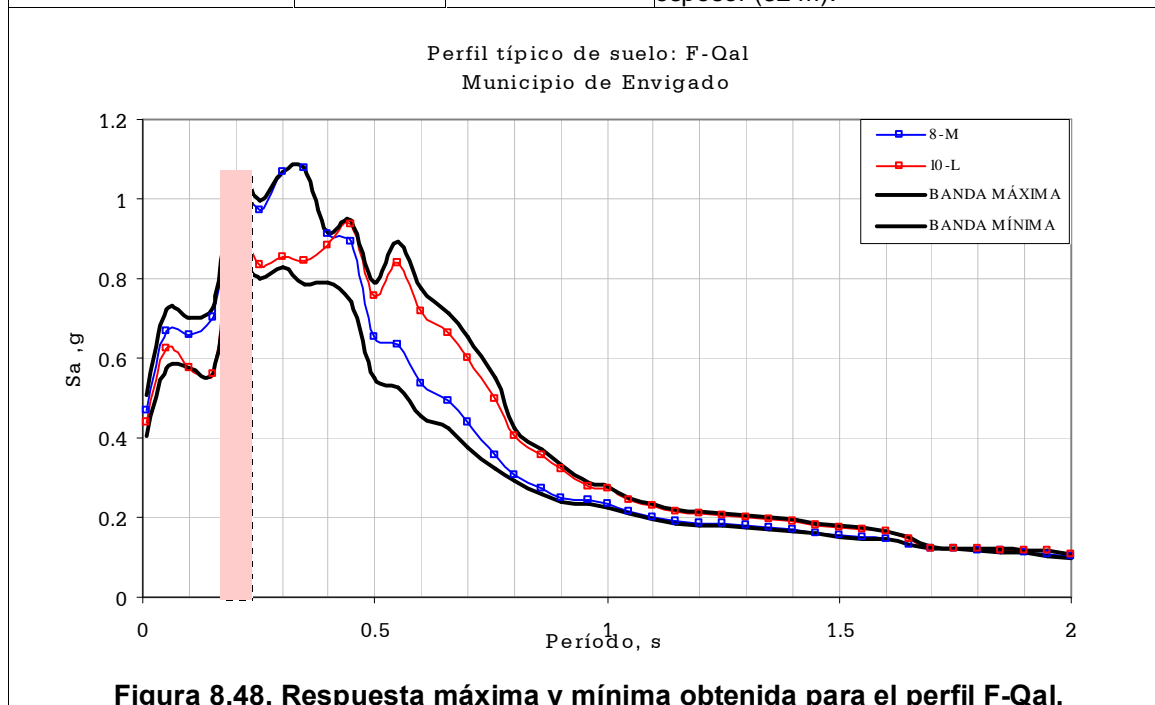
Figura 8.46. Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Suelo residual de Esquisto. Municipio Sabaneta.

• Municipio de Envigado

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo sobre Migmatitas (PRmPP)	1,3	0,25	De la Figura 8.47 se observan valores altos de la respuesta de aceleraciones máximas, entre los periodos 0,2 s y 0,55 s, representados por una serie de picos cuyos valores oscilan entre 0,7 g y 1,3 g. Entre las respuestas espectrales de las 286 columnas estratigráficas analizadas, en esta figura se presentan dos curvas que corresponden a los valores extremos, presentando espesores de flujo de 11,0 m y 4 m; 9 m y 22 m de suelos residuales de migmatitas, para las respuestas máxima y mínima respectivamente.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo sobre depósito aluvial (Qat)	1,1	0,35	<p>En la Figura 8.48 se presenta la banda de las respuestas en que oscilan las aceleraciones máximas, para este tipo de suelo. Las repuestas de mayor valor (1,1 g) se presentan en el segundo y tercer pico, para períodos de 0,2 s y 0,35 s respectivamente. Sin embargo, se obtienen aceleraciones espectrales altas para períodos de hasta 0.55 s.</p> <p>El espesor de flujo de migmatitas en el perfil que representa la respuesta máxima (8-M) es de 4,5 m, mientras en el perfil de respuesta mínima (10-L) es de mayor espesor (32 m).</p>



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluviotorrencial (Qat) y flujo sobre Migmatitas (PRmPP)	1,1	0,3	De acuerdo con la Figura 8.49, se observa un alto rango de variación de la respuesta espectral para este perfil (entre 0,55 g y 1,1 g), para los periodos comprendidos entre 0,2 s y 0,8 s. Cuando se tiene en cuenta las 20 columnas características de este perfil, se observa como entre los periodos de 0,2 s y 0,55 s, la respuesta de aceleraciones máximas presentan una serie de picos máximos que en general alcanzan un valor de 1,0 g, y unos valores mínimos del orden de 0.6 g en un rango de periodos similar. Los espesores correspondientes con la respuesta máxima (16-I2) son de 2,0 m tanto para el depósito como para el flujo, y de 14 m para el suelo residual de Migmatitas. La diferencia en cuanto a espesores para el perfil representativo de la respuesta mínima (14-M1), corresponde al depósito (16 m).

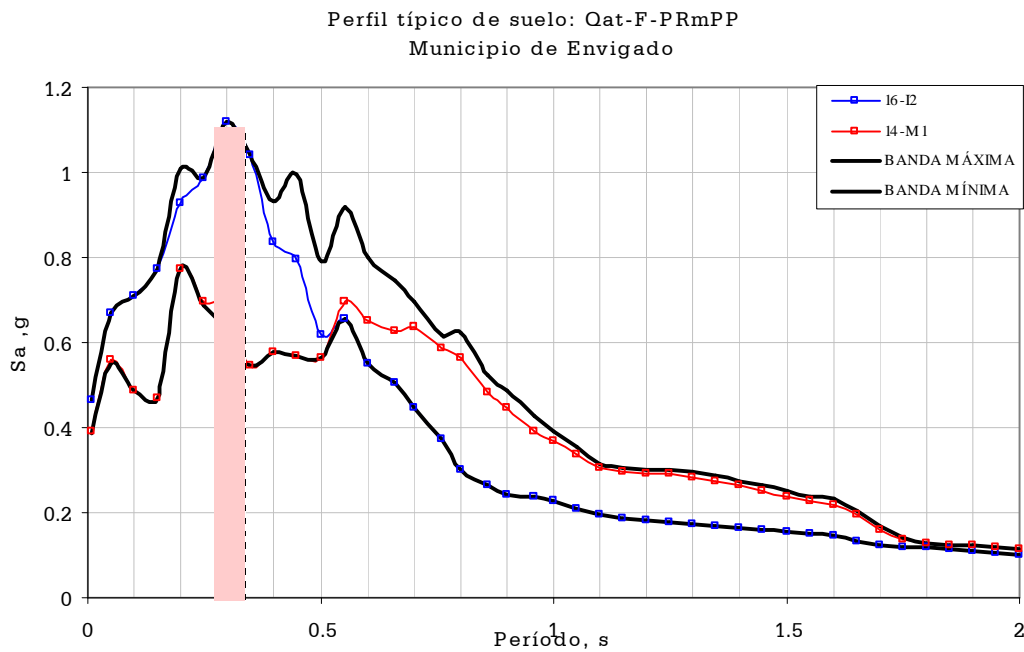


Figura 8.49. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil Qat-F-PRmPP

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluviotorrencial (Qat) sobre Migmatitas (PRmPP)	1,3	0,25	Para este tipo de perfil se observa un pico característico, con variaciones de la aceleración máxima entre 0,75 g y 1,3 g, correspondiente a períodos entre 0,2 s y 0,3 s. En el caso de suelos espesos se alcanzan periodos fundamentales de hasta 0.7 s. En cuanto a los espesores de las repuestas de los perfiles máximos y mínimos analizadas (16-F2 y 14-Q), varía el espesor del depósito aluvial de 7,5 m a 43 m, para el perfil 16-F2 y 14Q respectivamente, mientras que el espesor del suelo residual de Migmatita es similar para ambos (10 m).

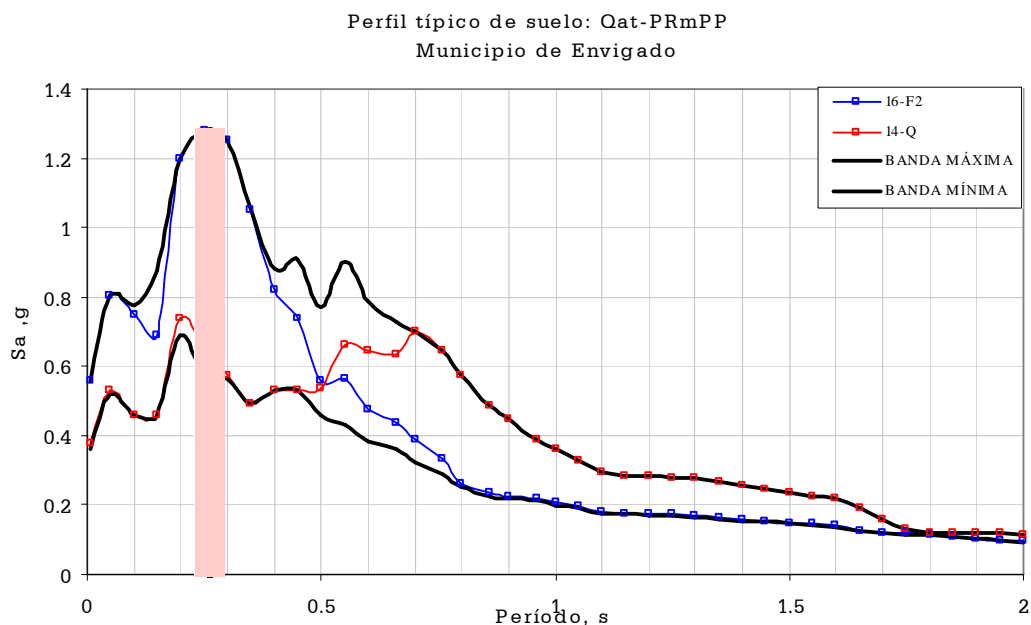
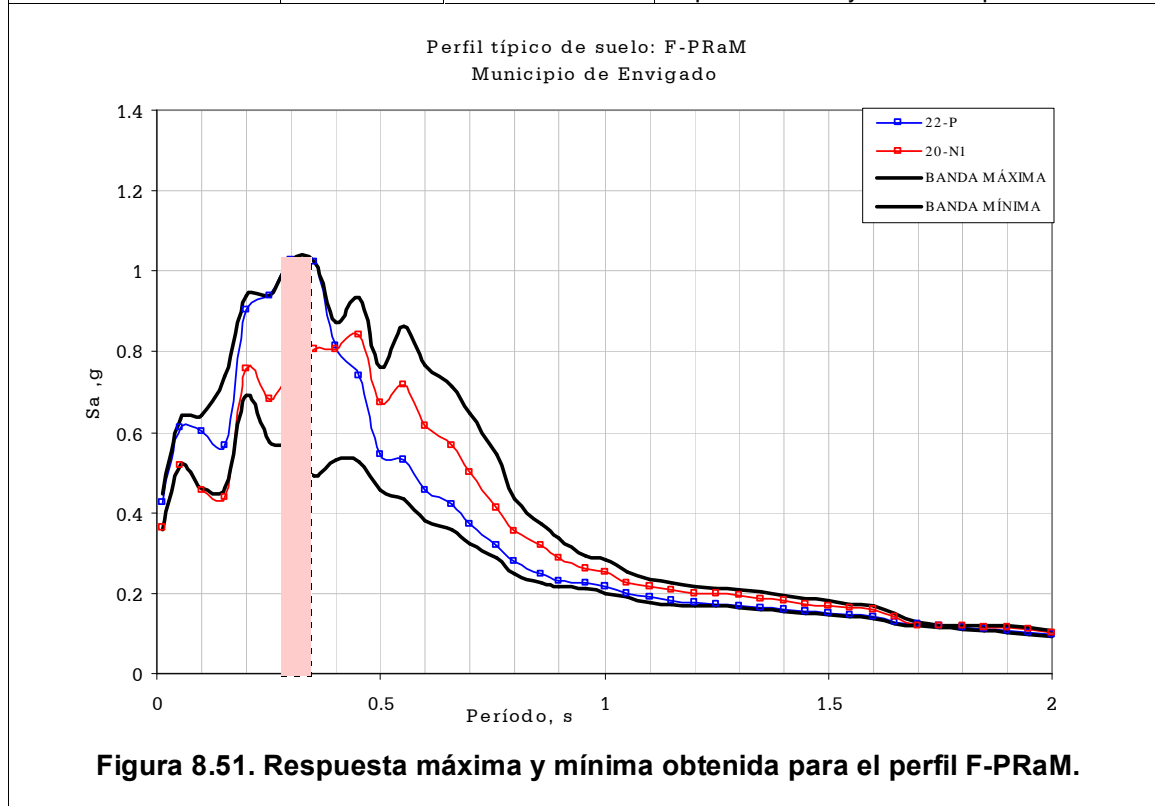


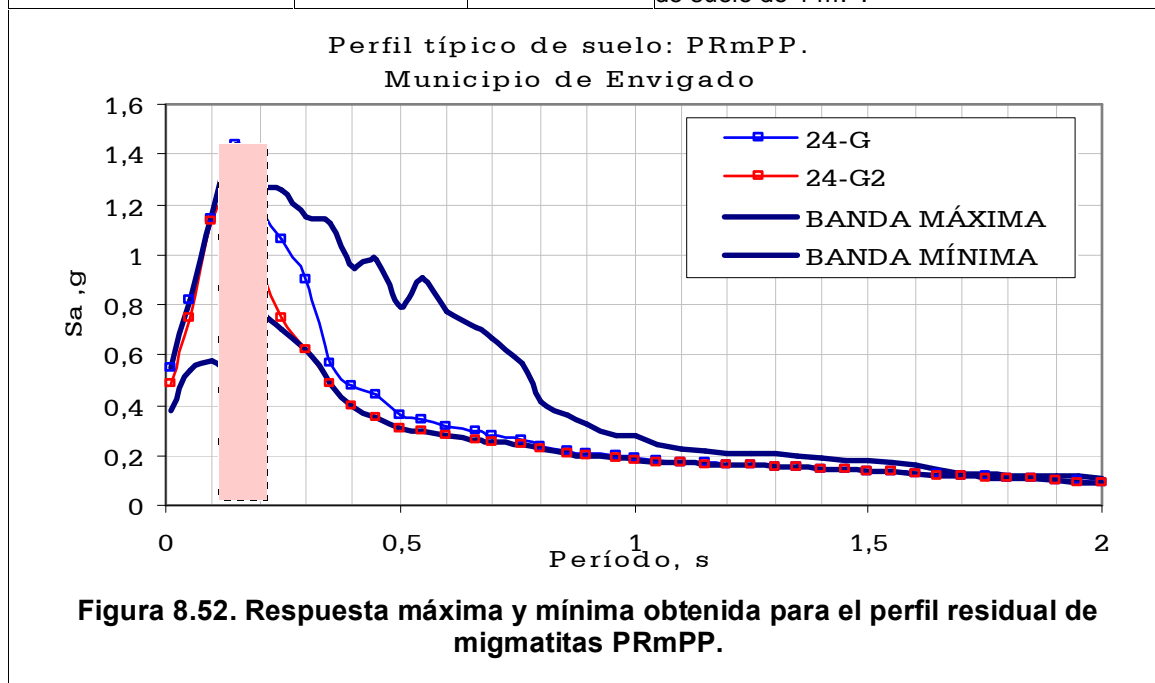
Figura 8.50. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de Qat-PRmPP.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo sobre anfibolita (PRaM)	Aprox. 1,0	0,3	Presenta en un rango de períodos fundamentales entre 0,2 s y 0,55 s en los cuales se presenta respuestas de aceleraciones máximas entre 0,5 g y aproximadamente 1,0 g. La respuesta para la columna 22-P que representa un límite superior de las posibles respuestas que pueden encontrarse, es $Sa_{m\acute{a}x}$ de 1,0 g para un período de 0,3 s. Los espesores para el flujo son de 22 m y 9 m, para el suelo residual de anfibolita de 17 m y 25 m para los perfiles 22-P y 20-N1 respectivamente.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamenta l (s)	Observaciones
Residual de migmatitas (PRmPP)	0.8 – 1.44	0,15	La banda de mínimos y máximos es el resultado de la recopilación de resultados de espectros de 187 columnas estratigráficas de este tipo de perfil de suelo. Se puede observar un amplio rango de valores de aceleración para los períodos menores de 0.8 s. Además, puede apreciarse una zona de pico alto muy definida alrededor de un período de 0.15 s. El valor máximo de aceleración se obtuvo para el perfil 24-G, el cual tiene un espesor de suelo de 1 m. .



Perfil	$Sa_{máx}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y depósito aluvial (Qal) sobre residual de anfibolita (PRaM)	0,7 – 1,1	0,3	Bajo las variaciones consideradas dentro del análisis, las respuestas máximas para este perfil típico de suelo, presentan picos dominantes entre 0.2 s y 0,3 s. Se observa una tendencia similar en el comportamiento del perfil para diferentes espesores de suelo, mostrando una serie de picos en períodos iguales los dos perfiles mostrados, la banda es estrecha lo que indica un comportamiento homogéneo. El espesor de suelo en el perfil de la respuesta máxima es de 60 m.

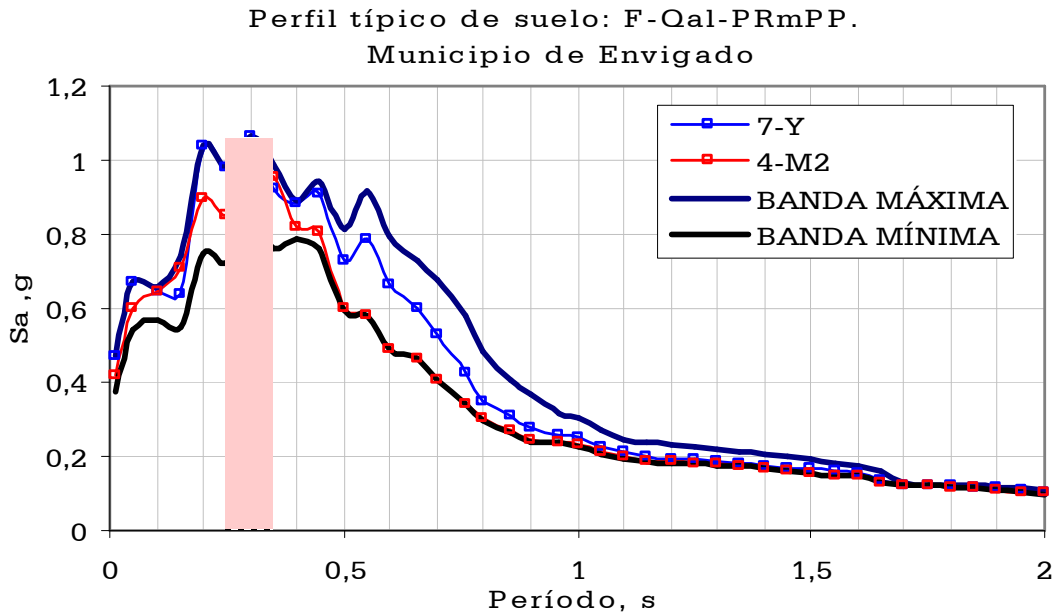


Figura 8.53. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo y depósito aluvial sobre residual de anfibolita PRaM.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qat).	0,9 – 1,12	0,3 s	La respuesta dinámica típica para este perfil de suelo presenta un comportamiento que se ajusta a una banda estrecha que agrupa los valores de aceleración obtenidos para 82 columnas estratigráficas analizadas. En esta banda los periodos fundamentales varían entre 0.2 s y 0.35 s, y respuestas máximas entre 0.9 g y 1.1 g. El perfil 13-R que presenta la respuesta máxima, tiene dos picos de similar valor de $Sa$ igual a 1,1 g para periodos de 0.2 s y 0.32 s. Este perfil tiene un espesor de suelo de 68 m.

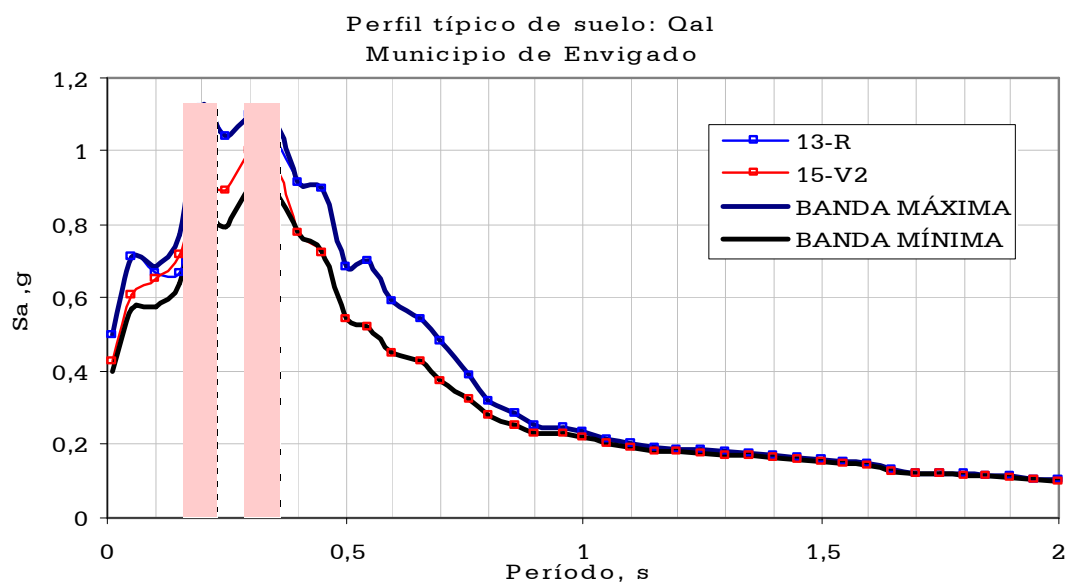


Figura 8.54. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de depósito aluvial.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluviotorrencial (Qat) sobre flujo y depósito aluvial (Qat).	0,9 – 1,1	0,2 – 0,45	Se configura un meseta tanto para las respuestas máximas mas altas como las mas bajas para valores de período entre 0,2 s y 0,5 s, con valores de aceleración máxima entre 1,1 g y 0.8 g. La banda corresponde a los límites máximos y mínimos de los espectros de respuesta para 15 columnas estratigráficas analizadas. El perfil para el que se obtuvo la respuesta máxima tiene un espesor de suelo de 80 m.

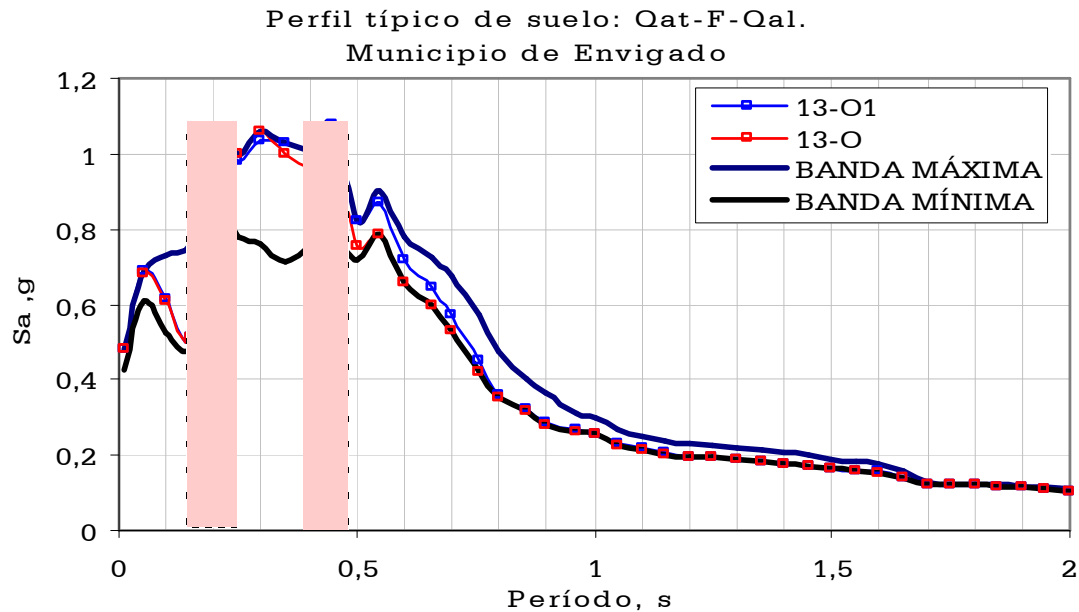


Figura 8.55. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de depósito aluviotorrencial sobre flujo y depósito aluvial

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de anfíbolita (PRaM)	0,7 – 0,9	0,35 – 0,45	Los espectros obtenidos definen una banda relativamente estrecha en cuanto a la variación de las aceleraciones espectrales y los periodos fundamentales. Se observan dos picos máximos con un valor de $Sa_{m\acute{a}x}$ de 0.9 g para periodos de 0,35 s y 0,45 s. La banda es estrecha lo que indica un comportamiento homogéneo asociado a perfiles de suelos similares. El espesor de suelo en el perfil de la respuesta máxima es de 16,5 m.

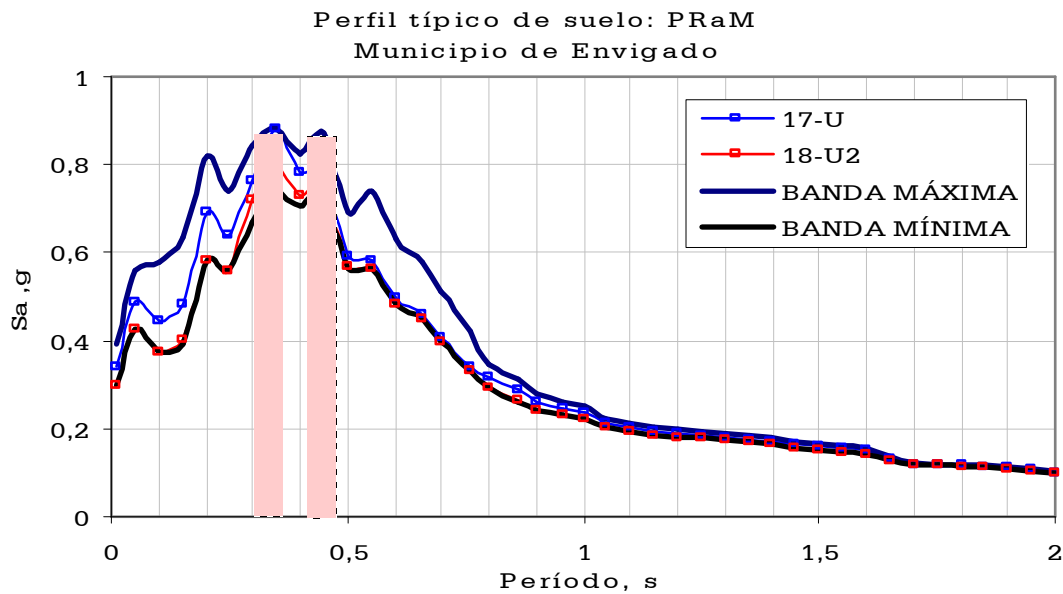
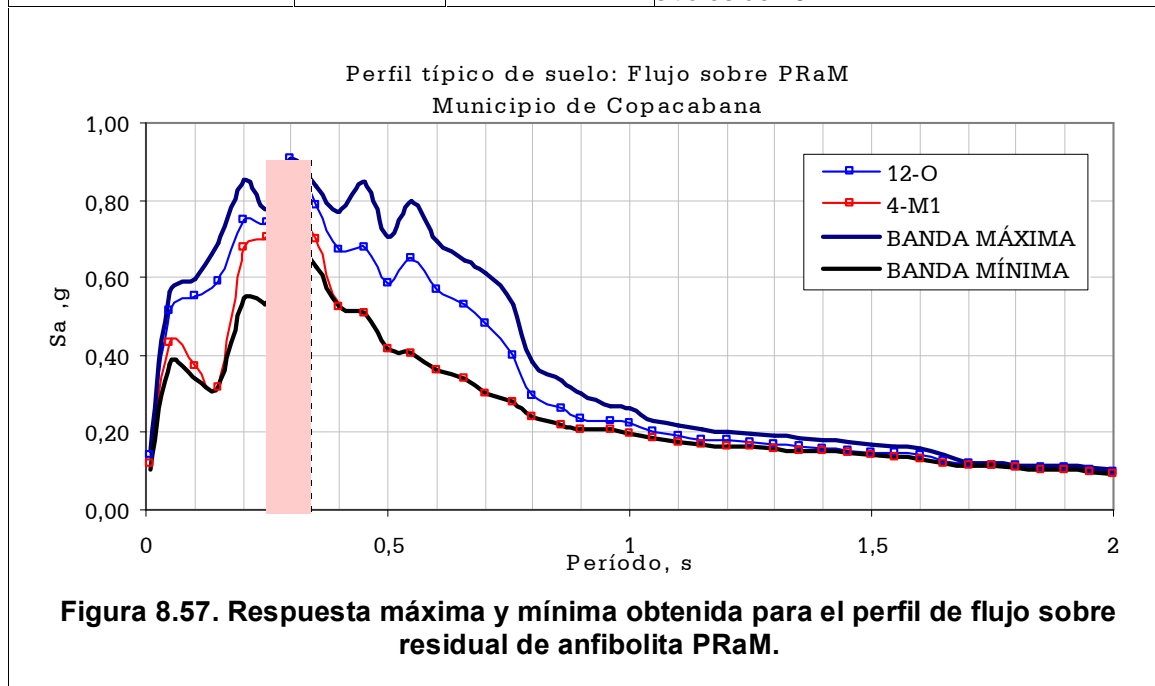


Figura 8.56. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de Suelo residual de anfíbolita

• Municipio de Copacabana

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo sobre residual de anfibolita (PRaM)	0.7 – 0.9	0.3 s	Los límites máximo y mínimo, obtenidos del análisis de 120 perfiles típicos, indican un amplio rango de variación de los periodos fundamentales (0.2 s a 0.7 s), con una variación menor en cuanto a los valores de aceleración espectral. Para el sitio 12-O, el cual presenta el pico máximo, la respuesta tiene una aceleración $Sa_{m\acute{a}x}=0.9$ g. En este sitio el espesor de suelo alcanza los 38m. Para el sitio 4M1 (sitio con respuesta más baja para algunos períodos) la aceleración $Sa_{m\acute{a}x}$ es 0.8 g. El espesor de suelo en este sitio es de 16m.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y depósito aluvial (Qal) sobre residual de anfibolita (PRaM)	0.7 – 1.1	0.3 s	<p>Como resultado de compilar los espectros obtenidos para el total de 22 perfiles analizados, se encuentran espectros con picos en diferentes período, variando desde 0.2 s hasta 0.55 s, lo cual es reflejo de la variación de las propiedades y espesores de estos materiales.</p> <p>La variación de los valores de aceleración, se pueden apreciar para cada período mediante la banda que limita los máximos y mínimos.</p> <p>Entre la gráfica 16-K del pico máximo y la gráfica 4-P correspondiente a la de valores de aceleración bajos para un amplio rango de períodos, se observa un comportamiento similar, siguiendo una misma tendencia y evidenciando un valor de <math>Sa_{m\acute{a}x}</math> para el mismo valor de período, Para el perfil 16-K la respuesta tiene una aceleración <math>Sa_{m\acute{a}x}=1.1</math> g. En este sitio el espesor de suelo alcanza los 58m.</p>

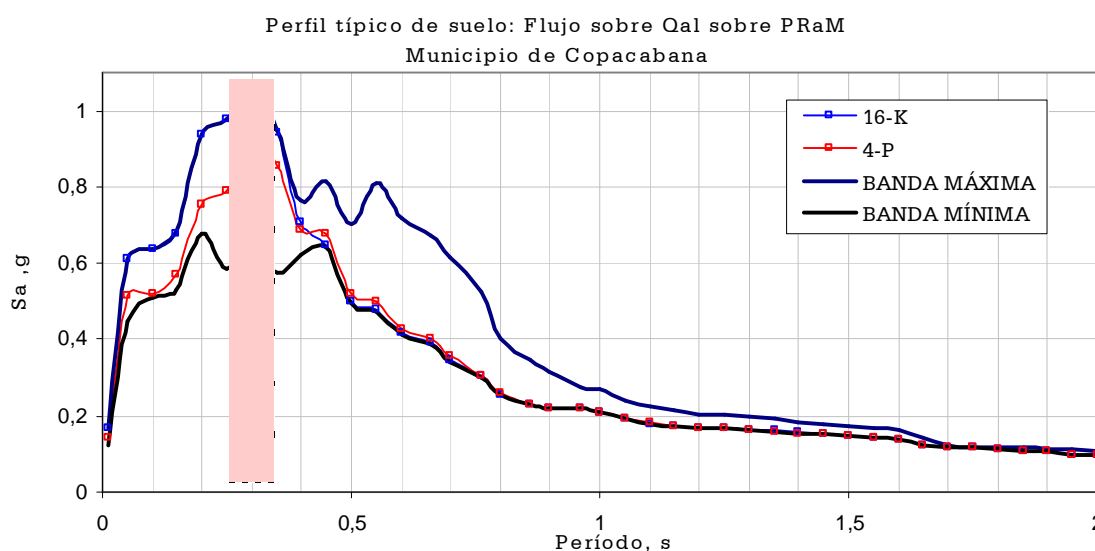
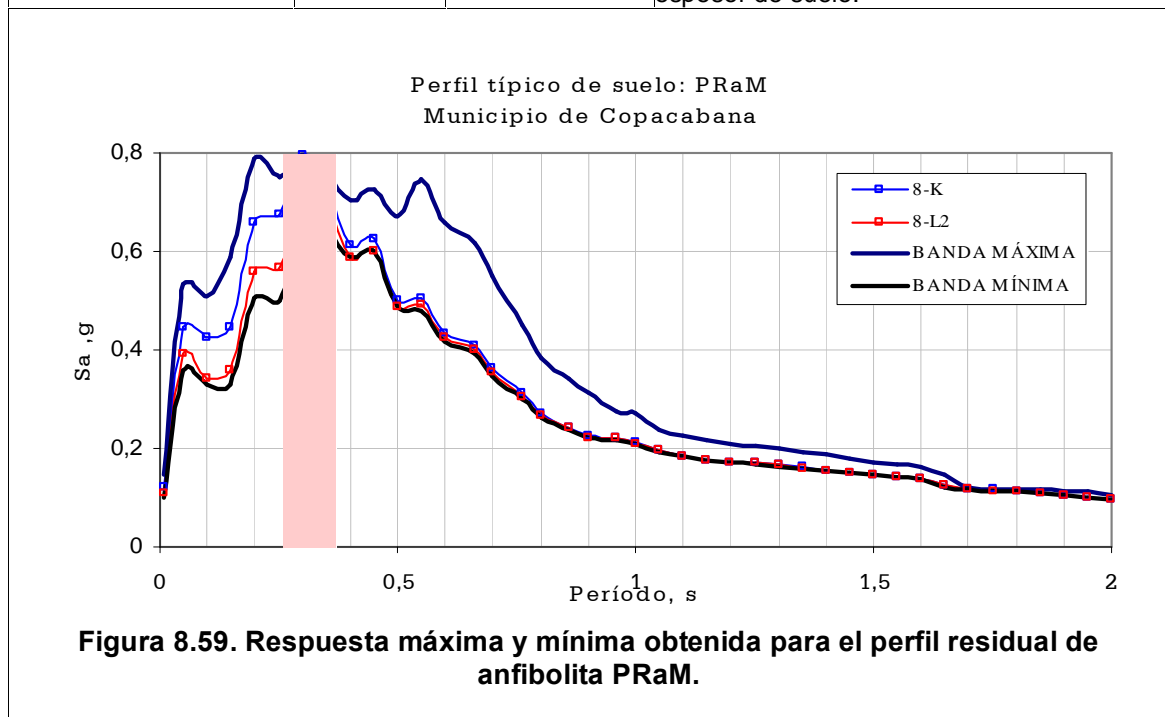


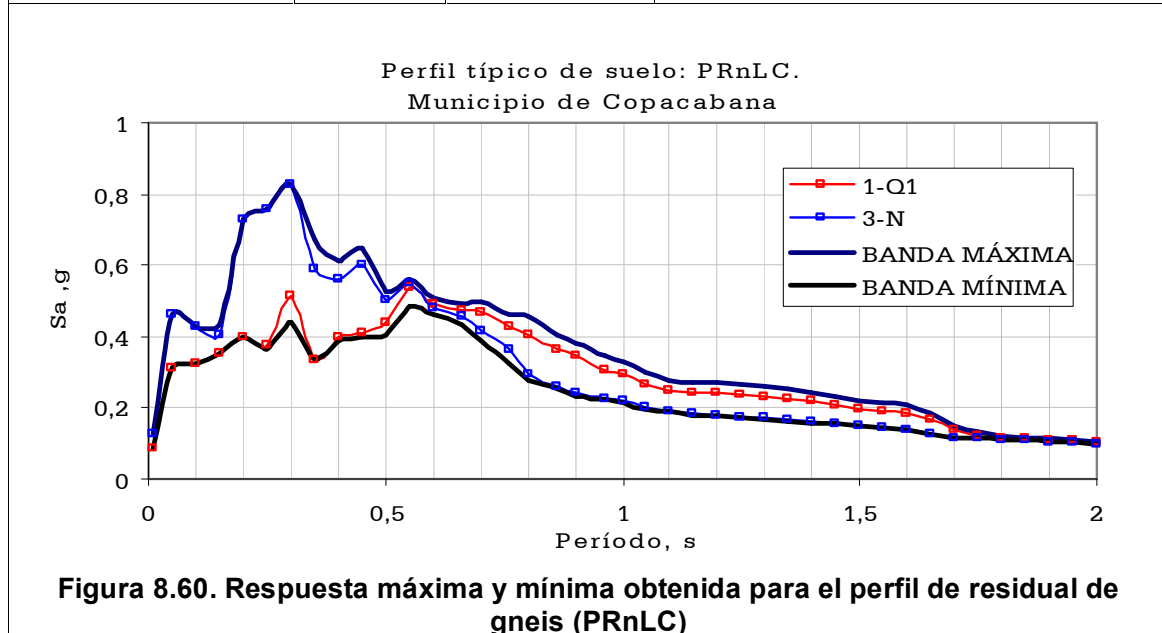
Figura 8.58. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo y depósito aluvial sobre residual de anfibolita PRaM.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Residual de anfibolita (PRaM)	0.7 – 0.8	0.3 s	La respuesta dinámica típica para este perfil de suelo presentan espectros de respuesta con un contenido espectral amplio, presentando períodos fundamentales entre 0.2 s y 0.55 s. Para el perfil 8-K se obtiene la respuesta máxima, este perfil consta de 15 m de espesor de suelo.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Residual de gneis (PRnLC)	0.4 – 0.82	0.3 s	La banda corresponde a los límites máximos y mínimos de los espectros de respuesta para 13 columnas estratigráficas analizadas, en esta se puede observar la variación del comportamiento para este tipo de suelo. En general se presentan amplificaciones moderados con aceleraciones espectrales máximas entre 0.4 g y 0.8 g, variando en una rango de periodos entre 0.2 s y 0.6 s. Se observa como para la respuesta máxima de aceleración ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) es de 0,82 g, el período fundamental es de 0,3 s. El pico máximo se alcanza para un perfil con 18 m de suelo.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal)	0.75 – 1.1	0.3 s	Debido a lo homogéneo de este perfil, se observa como las bandas que representan los valores límites de la respuesta $Sa_{m\acute{a}x}$ son estrechas para las 14 columnas estratigráficas estudiadas. Los espesores del depósito son variables hasta alcanzar 110m. La respuesta corresponde a la de suelos relativamente rígidos a pesar de los espesores importantes que se pueden encontrar.. El período fundamental correspondiente a la aceleración máxima de 1,1 g es de 0,3 s y se da para el perfil 11-L con un espesor de depósito de 60 m.

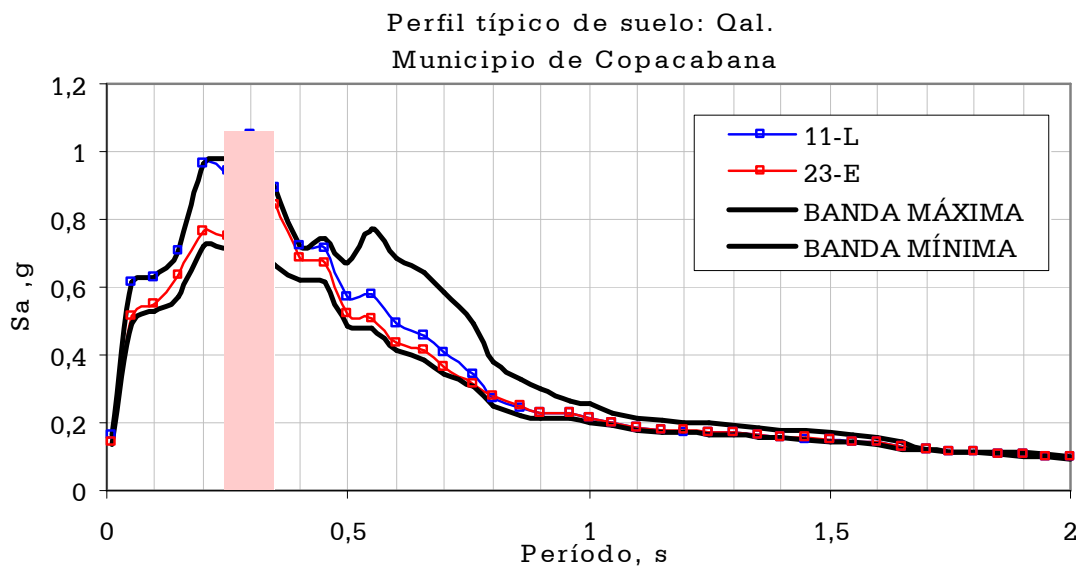


Figura 8.61. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo sobre PRaM.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal) sobre residual de anfíbolita (PRaM)	0.8 – 1.1	0.2-0.3 s	Los perfiles de esta formación producen espectros relativamente estrechos con amplificaciones importantes para periodos entre 0.2 s y 0.4 s, con aceleraciones espectrales máximas que varían entre 0.85 g y 1.1 g. El valor de $Sa_{m\acute{a}x}$ obtenido de 1.1 g corresponde a un perfil cuyo espesor de suelo es de 64 m. Las bandas indicadas, corresponden a la compilación de los resultados de 17 columnas estratigráficas típicas de este perfil de suelo.

Perfil típico de suelo: Qal sobre PRaM  
Municipio de Copacabana

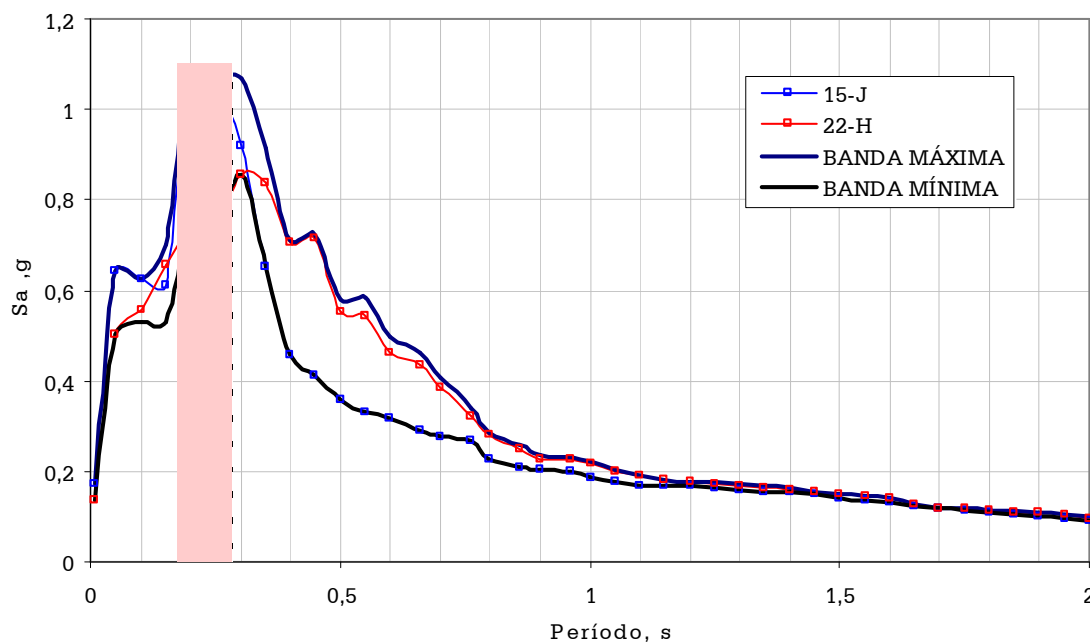


Figura 8.62. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de flujo sobre PRaM.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal) sobre flujo sobre depósito aluvial (Qal).	0.7 – 0.9	0.3 s	Bajo las variaciones consideradas dentro del análisis, las posibles respuestas para este perfil típico de suelo, presentan un pico dominante alrededor de 0.3 s. La respuesta máxima y mínima se presenta en la siguiente figura. Se muestra una tendencia similar en el comportamiento del perfil para diferentes espesores de suelo, mostrando una serie de picos en períodos iguales para los perfiles estudiados. La banda es estrecha lo que indica un comportamiento homogéneo. El espesor de suelo en el perfil de la respuesta máxima es de 60 m.

Perfil típico de suelo: Qal sobre Flujo y Qal  
Municipio de Copacabana

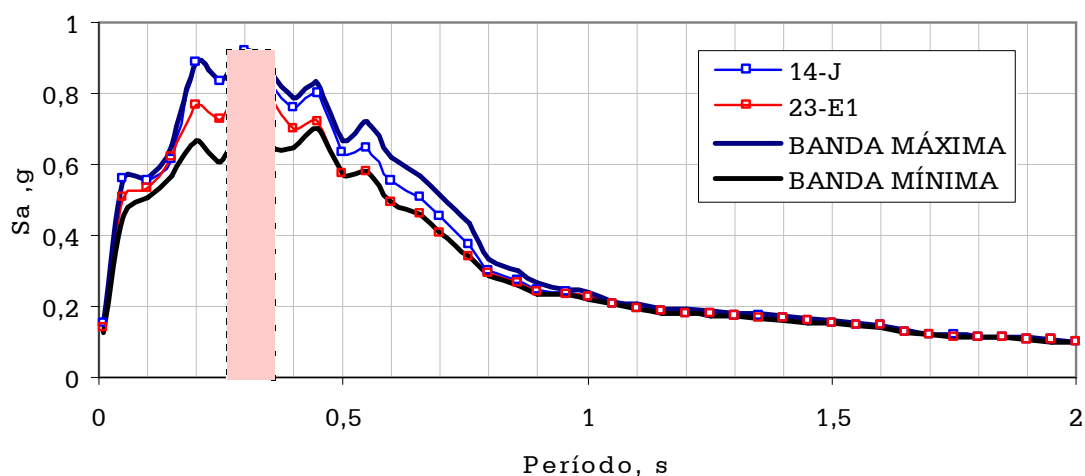
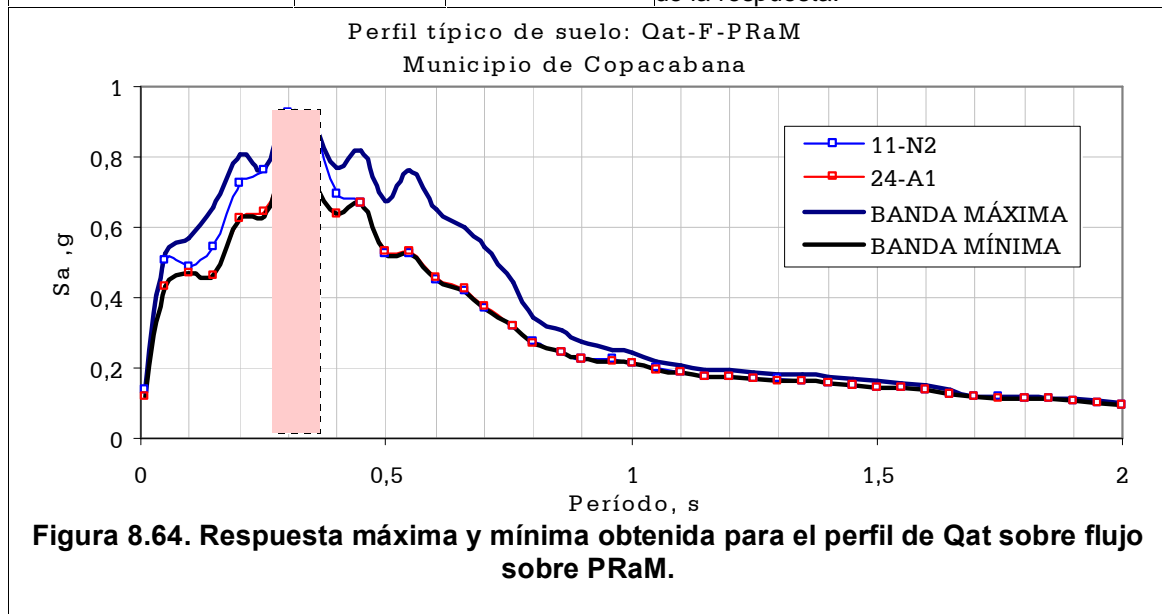


Figura 8.63. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil Depósito aluvial sobre flujo sobre Depósito aluvial.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluviotorrencial (Qat) sobre flujo sobre residual de anfibolita (PRaM)	0.78– 0.93	0.32 s	Este tipo de perfil presenta un espectro de respuesta similar para las 12 columnas estratigráficas analizadas. Presentándose un valor máximo de aceleración de 0.93 g para un período de 0.32 s en el perfil 11-N2 cuyo espesor de suelo es de 19 m. En general este es el pico más representativo de la respuesta.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal) sobre flujo, sobre depósito aluvial (Qal) sobre residual de anfibolita (PRaM)	0.7-0.91	0.2 s - 0.3 s	La respuesta obtenida para estos suelos permite definir una banda estrecha, que configura una especie de meseta con aceleraciones espectrales relativamente constantes para periodos entre 0.2 s y 0.55 s, variando en aceleraciones espectrales máximas entre 0.65 g y 0.85 g. El perfil para el que se obtuvo la respuesta máxima tiene un espesor de suelo de 50 m.

Perfil típico de suelo: Qal-F-Qal-PRaM  
Municipio de Copacabana

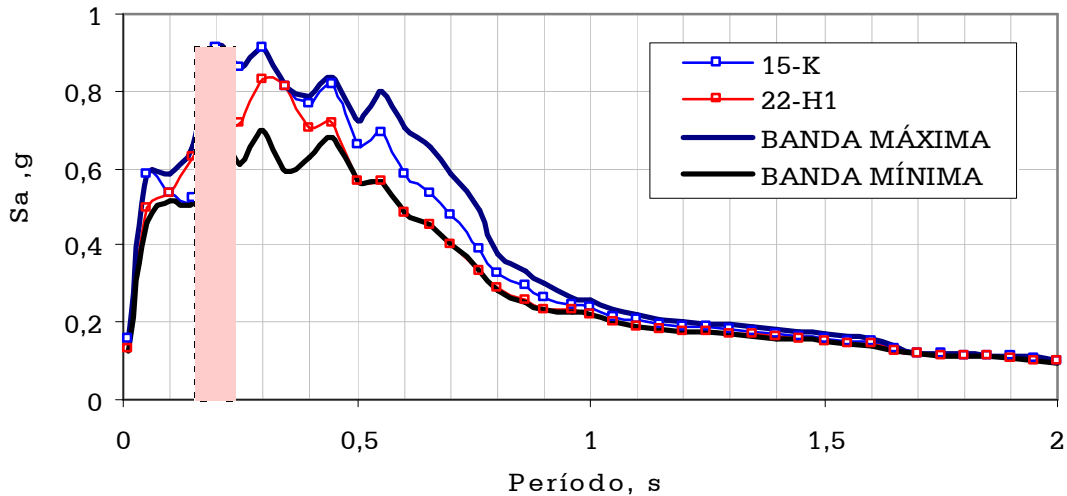
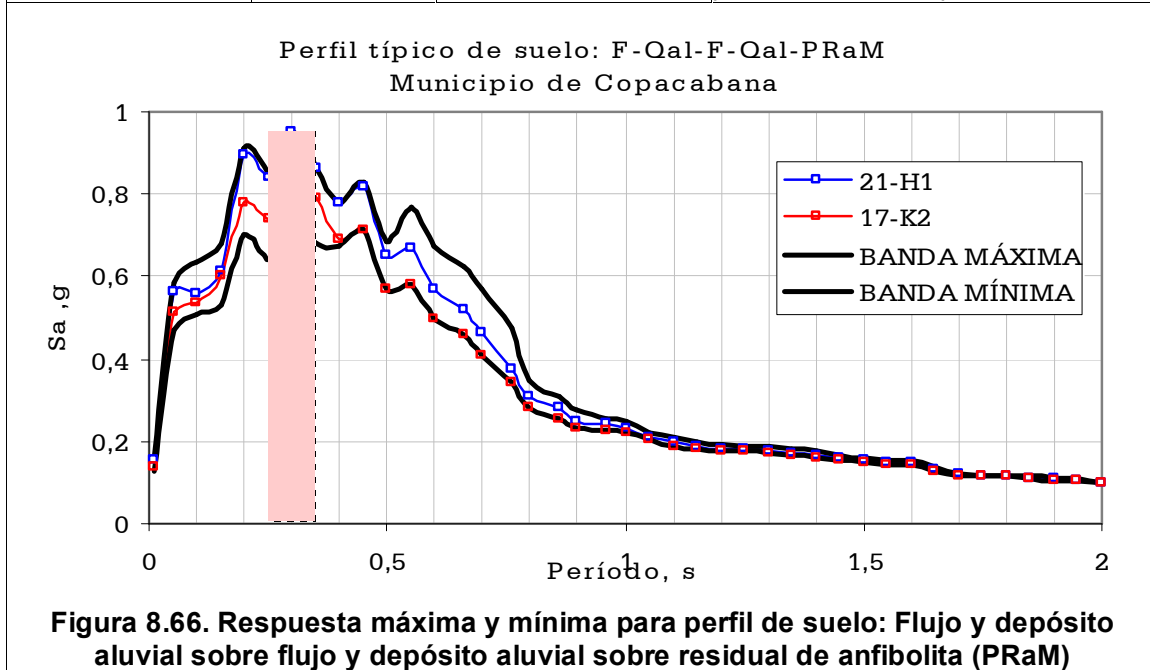


Figura 8.65 Respuesta máxima y mínima para perfil de suelo: Depósito aluvial sobre flujo, sobre depósito aluvial sobre residual de anfibolita (PRaM)

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y depósito aluvial (Qal) sobre flujo y depósito aluvial (Qal) sobre residual de anfíbolita (PRaM)	0.75-0.95	0.3 s	Se observa comportamiento similar para las 11 columnas estratigráficas analizadas, evidenciando la tendencia de picos para los mismos periodos. Los espectros presentan contenidos frecuenciales entre 0.2 s y 0.5 s, con aceleraciones espectrales máximas entre 0.7 g y 0.95 g. El pico máximo corresponde a un perfil de 56 m de espesor de suelo.





• Municipio de Girardota

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo sobre batolito Antioqueño (KcdA)	1,1	0,25	Debido a la variabilidad en cuanto a los espesores y características de los materiales se obtiene un amplio rango de variación de los espectros de respuesta. Se observa que se tienen periodos fundamentales desde 0.2 s hasta 0.55 s, con valores máximos entre 0.6 g y 1.1 g. Se observa que la mayor variación en aceleraciones espectrales e obtiene para periodos entre 0.4 s y 0.8 s. Las bandas corresponden a los límites máximos y mínimos de los espectros de respuesta para 86 columnas estratigráficas estudiadas. Se observa como para la respuesta máxima de aceleración ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) es de 1,1 g, el período fundamental es de 0,25 s. El pico máximo se alcanza para un perfil con 11,0 m de flujo derivado de granodiorita sobre un suelo residual de batolito de 10 m de espesor (8-K2).

Perfil típico de suelo: F-KcdA  
Municipio de Girardota

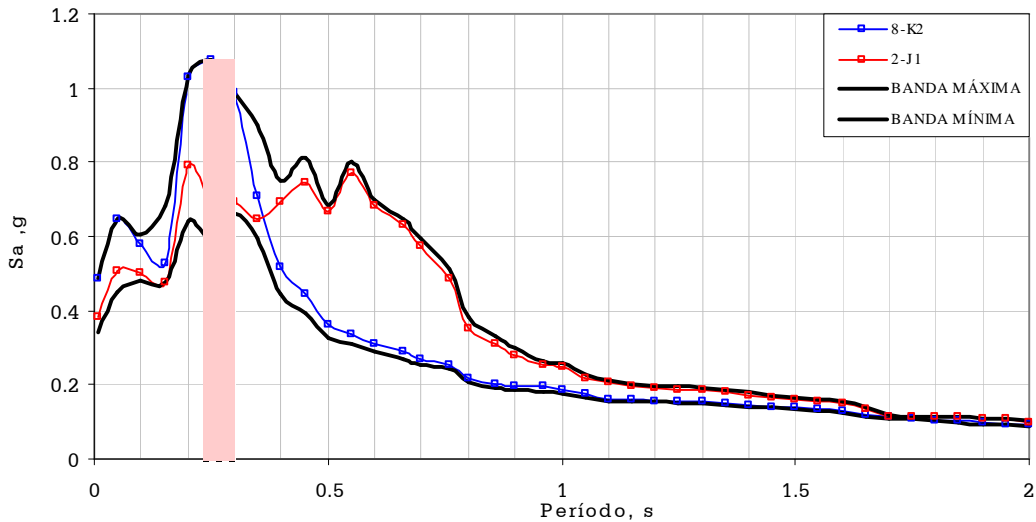


Figura 8.67 Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil F-KcdA.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial (Qal)	0,8	0,35	Debido a lo homogéneo de este perfil, se observa como las bandas que representan los valores límites de la respuesta $Sa_{m\acute{a}x}$ son muy próximas (0,8 g y 0,74 g), de acuerdo con las 47 columnas estratigráficas estudiadas. Los espesores del depósito son variables hasta alcanzar 250 m. El período fundamental correspondiente a la aceleración máxima de 0,8 g es de 0,35 s, lo cual refleja la rigidez de estos suelos.

Perfil típico de suelo: Qal  
Municipio de Girardota

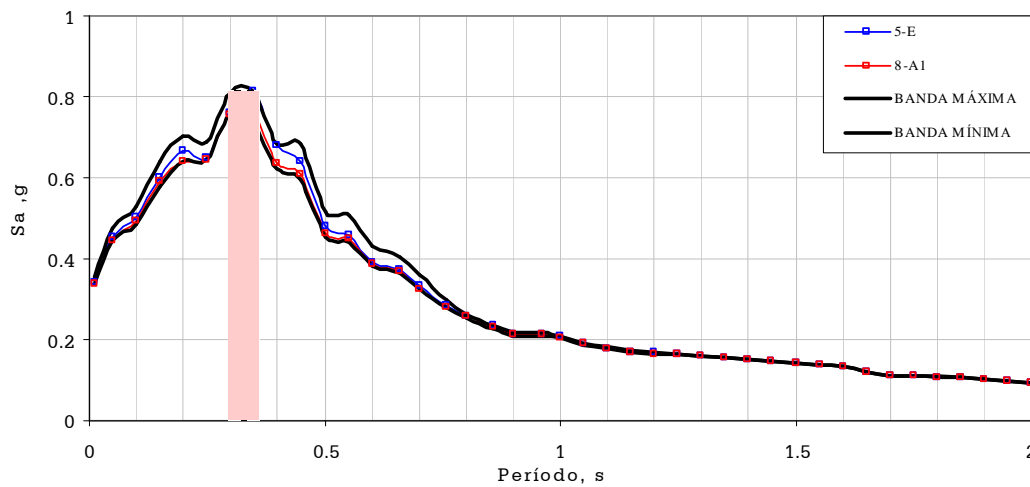


Figura 8.68. Respuesta máxima y mínima obtenida para el depósito aluvial Qal.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito aluvial sobre el batolito Antioqueño (KcdA)	1,0	0,2	En general para esta formación se observan dos picos bien definidos en la forma espectral, el primero para periodos entre 0,05 y 0,1 ( $Sa_{m\acute{a}x}=0,6$ ) y el segundo en un rango cerca al periodo fundamental correspondiente a $Sa_{m\acute{a}x}$ de 1,0 g. El perfil que representa la respuesta mínima (2-E1), está compuesto por un espesor de depósito aluvial (73 m) contrariamente a lo que se presenta para la respuesta máxima (9-J1), con un espesor de 2,4 m.

Perfil típico de suelo: Qal-KcdA.  
Municipio de Girardota

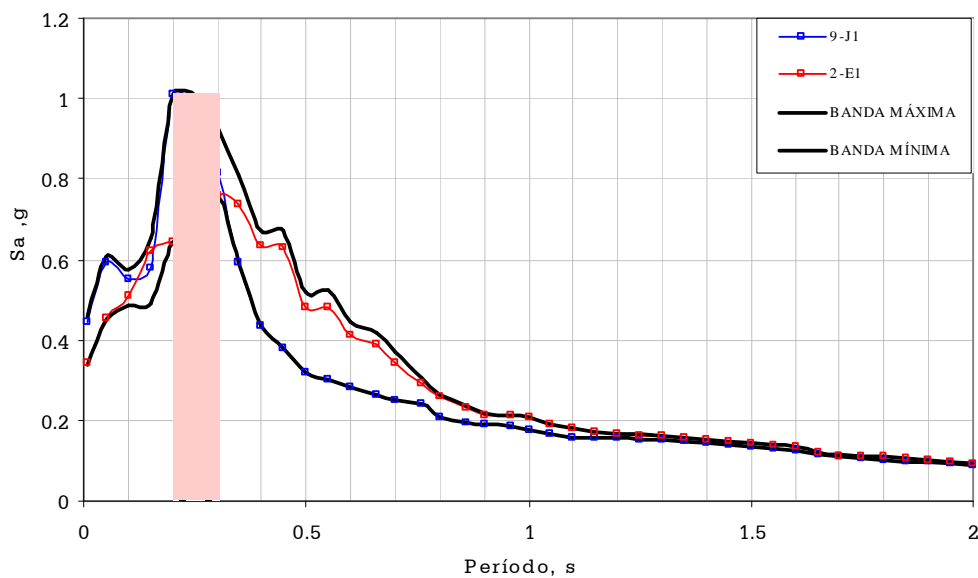


Figura 8.69. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil Qal-KcdA

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y depósito aluvial sobre el batolito Antioqueño (KcdA)	1,0	0,2	Tanto la forma espectral como los valores de las aceleraciones máximas para este perfil son similares a la respuesta del perfil anterior, cuando no se tiene en cuenta el material correspondiente al flujo. Es así, como el pico dominante se presenta para un período de 0,2 s, y un $Sa_{m\acute{a}x}$ de 1,0 g (perfil 11-G). Los espesores que representan los flujos y los depósitos aluviales son de 35 m y 57 m para la respuesta máxima (11-G) y mínima (5-H) respectivamente.

Perfil típico de suelo: F-Qal- kcdA.  
Municipio de Girardota

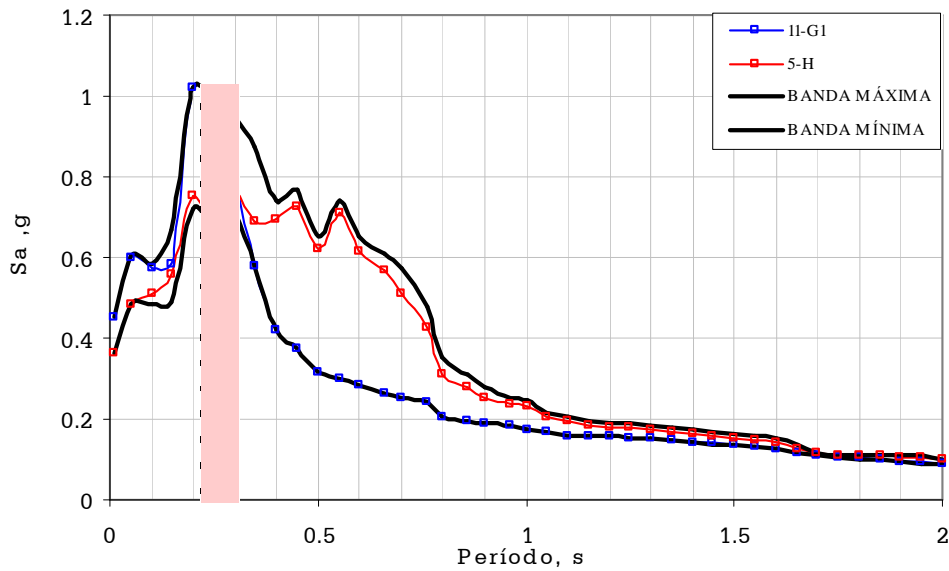


Figura 8.70. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil de F-Qal-KcdA.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Batolito Antioqueño (Granodioritas y cuarzodioritas) (KcdA)	0,9	0,3	Aunque la cantidad de perfiles analizados son relativamente pocos (11), si se observa una uniformidad en la forma espectral, observándose un rango de respuestas máximas similares entre 0,2 s y 0,45 s, con valores desde 0,72 g y 0,92 g. La respuesta correspondiente al pico máximo (perfil 7-H3) es de 0,92, con espesor de flujo y depósito aluvial de 25 m.

Perfil típico de suelo: KcdA.  
Municipio de Girardota

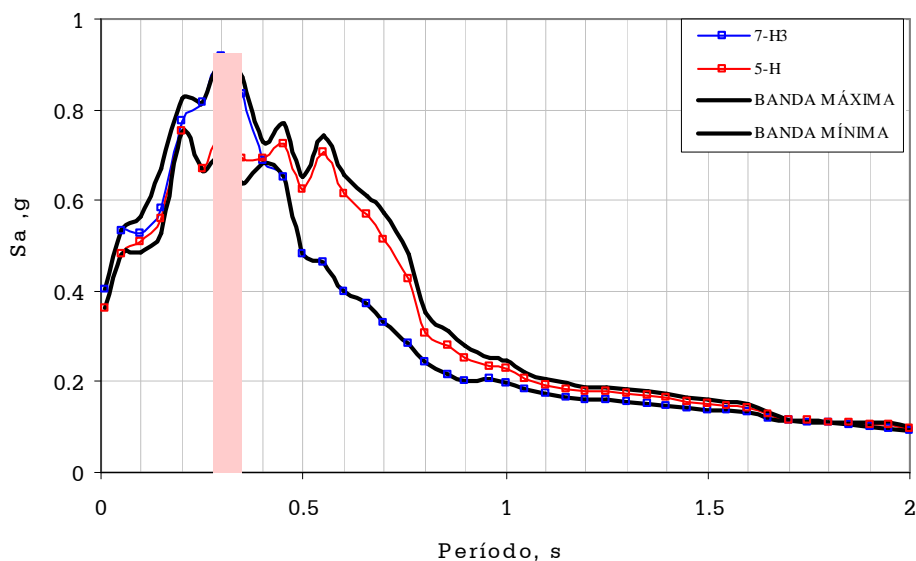


Figura 8.71. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil KcdA.

• Municipio de Barbosa

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo residual de Batolito (KcdA)	0.75 – 0.95	0.25 s. Pueden presentarse aceleraciones importantes en 0.15s.	Las variaciones de espesores encontradas para este perfil de suelo dentro del municipio de Barbosa, varían entre 8m y 23m. Esta diferencia de espesores, produce variaciones en la aceleración espectral máxima ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ), que para esta formación, varía entre 0.8g y 0.95g, para un período fundamental de 0.25s., hasta valores de 0.55 g. En esta formación se encontraron niveles de aceleración importantes a períodos cercanos a 0.15s (sitio 6D) con una aceleración máxima de 0.75g. Este último sitio presenta un espesor de 13m.

Perfil típico de suelo: KcdA  
Municipio de Barbosa

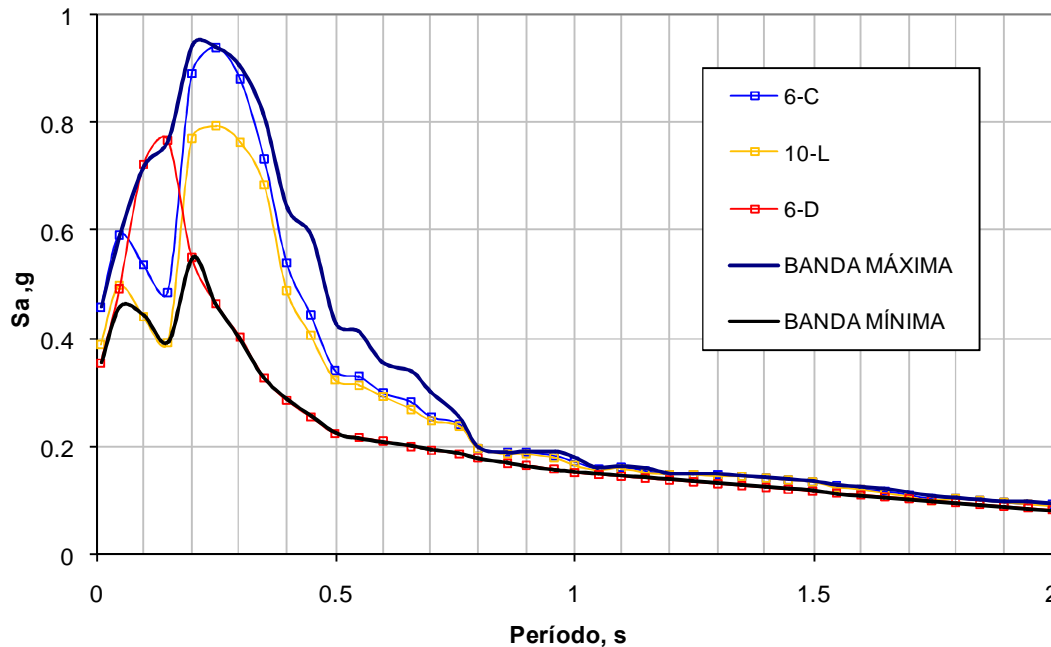


Figura 8.72. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil KcdA. Municipio de Barbosa.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y suelo residual de Batolito (KcdA)	0.8 - 1	0.2 – 0.3	Las aceleración espectral máxima ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) de esta formación, corresponde a periodos que varían en un rango de 0.2s y 0.3s; en donde la $Sa_{m\acute{a}x}$ varía entre 0.6 g como valor mínimo, hasta 1 g. El espesor máximo y mínimo de esta formación dentro del municipio de Barbosa es de 40 m y 18 m respectivamente.

Perfil típico de suelo: Flujo-KcdA  
Municipio de Barbosa

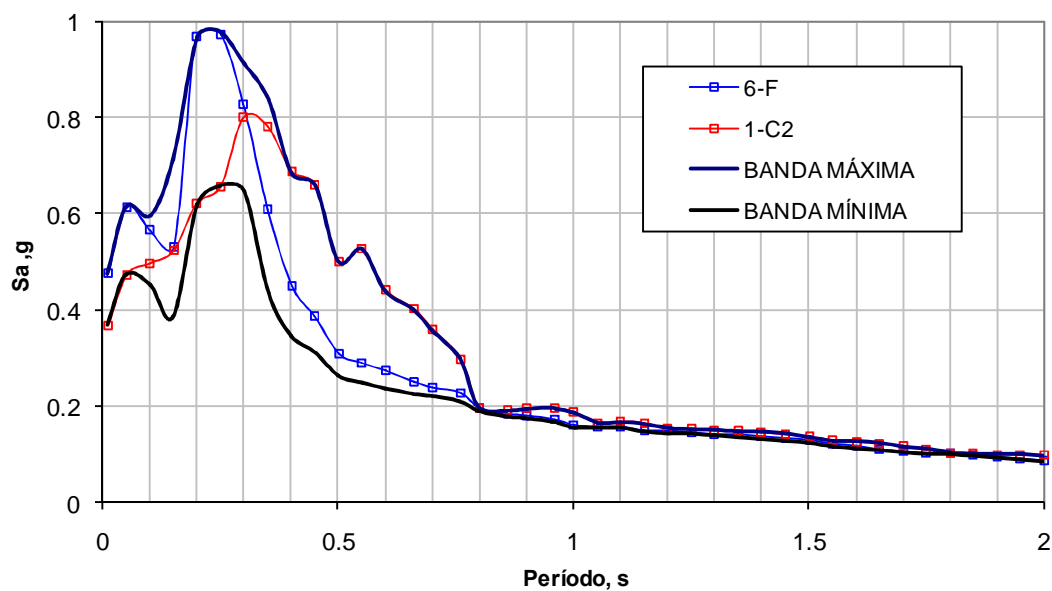


Figura 8.73. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Flujo y suelo residual de Batolito. Municipio de Barbosa.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y Suelo Residual de Esquisto (Pes)	0.85 -1	0.2 – 0.35	Las mayores aceleraciones espectrales máximas ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) se presentan entre los períodos de 0.2s y 0.35s con aceleraciones que varían entre 0.85g (sitio 4B) y 1g (sitio 5D1). Los espesores de esta formación varían entre 48m para el sitio 5D1 y 23°m para el sitio 4B.

Perfil típico de suelo: Flujo-Pes  
Municipio de Barbosa

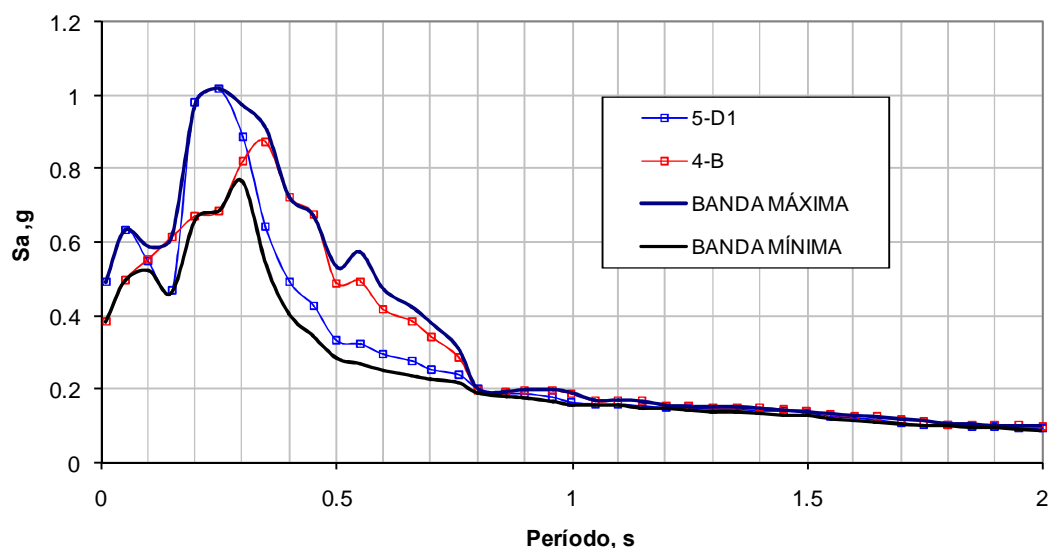


Figura 8.74. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Flujo y suelo residual de esquisto. Municipio de Barbosa.



Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Suelo Residual de Esquisto (Pes)	0.95 – 1.05	0.2 – 0.3	Las aceleraciones espectrales máximas ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) varían entre un período de 0.2s y 0.3s aproximadamente. En este rango se presentan aceleraciones entre 0.95g y 1.05g. Los espesores de los sitios donde se presentan estas aceleraciones varían entre 24m (sitio 3A) y 38 m (sitio 2E). Se trata de suelos relativamente homogéneos.

Perfil típico de suelo: Pes  
Municipio de Barbosa

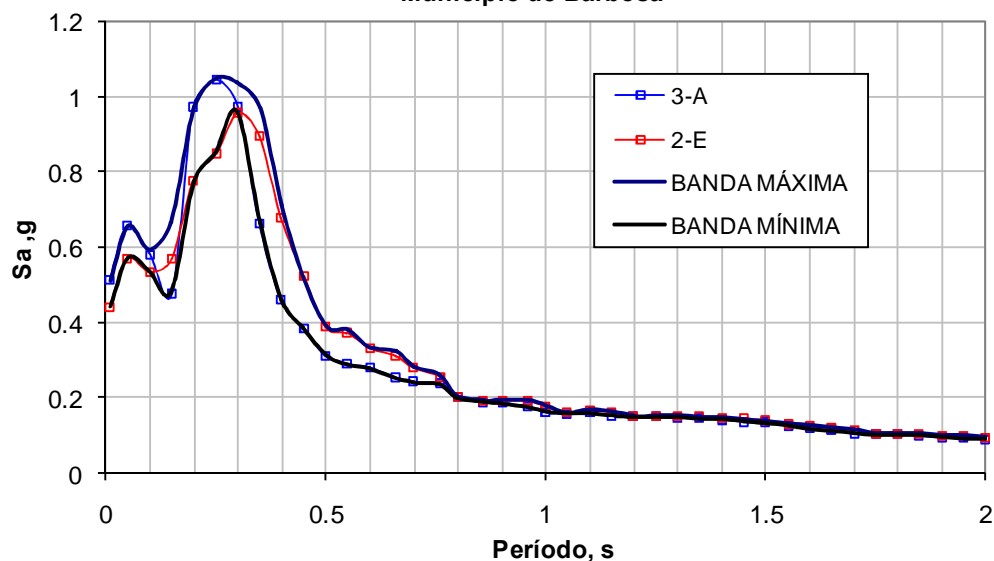


Figura 8.75. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Suelo residual de esquisto. Municipio de Barbosa.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (QaI) y suelo residual de Batolito (KcdA)	0.75 – 0.9	0.2 – 0.3	Las respuestas máximas y mínima de esta formación varían entre los periodos fundamentales de 0.2s y 0.3s. En este rango de periodos la $Sa_{m\acute{a}x}$ varía entre 0.75g para el sitio 12M1 y de 0.9g para el sitio 9N1; los espesores del perfil de suelo varían entre 14 m (sitio 9N1) y 30m (sitio 12M1).

Perfil típico de suelo: QaI-KcdA  
Municipio de Barbosa

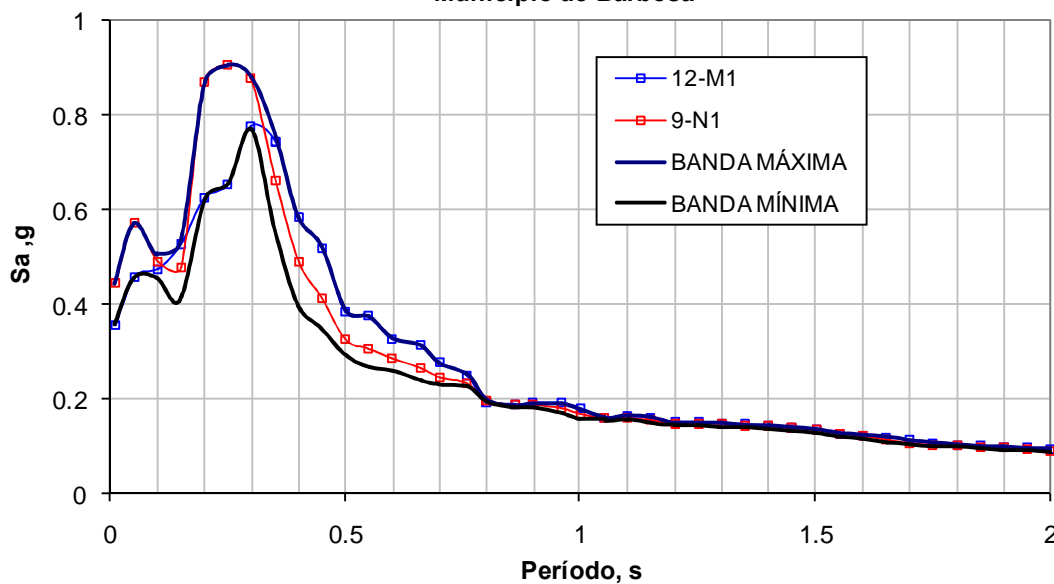
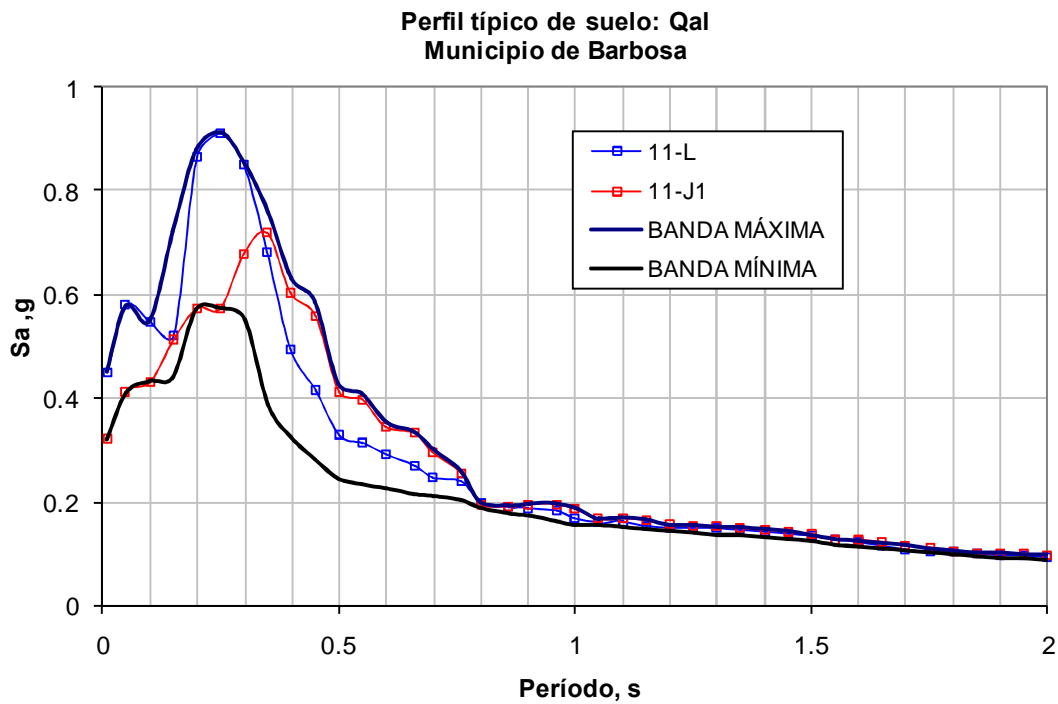
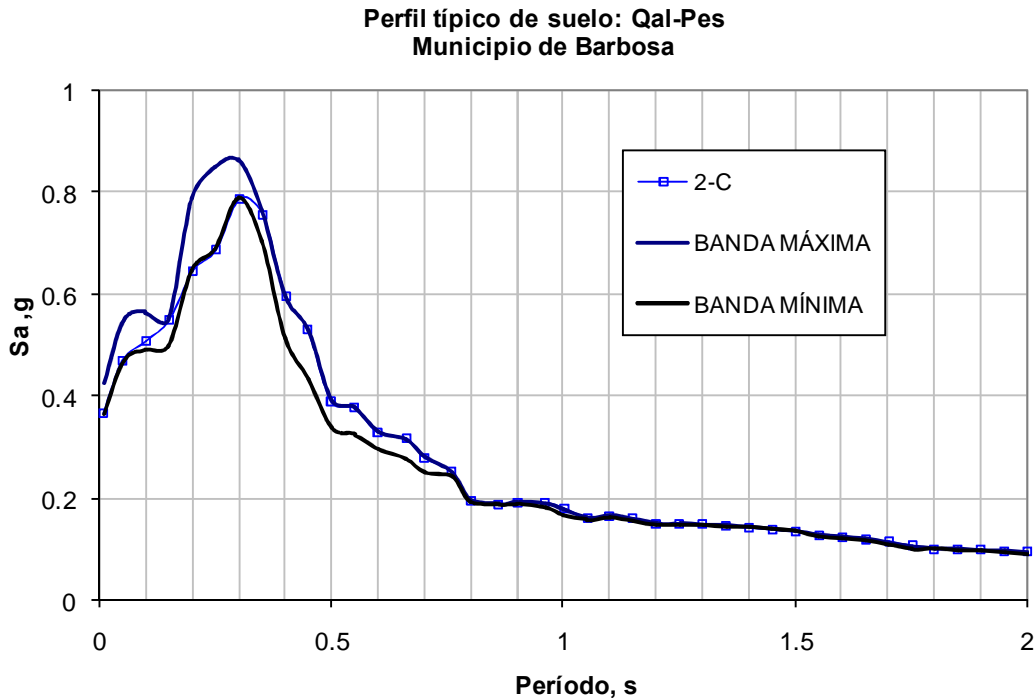


Figura 8.76. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Depósito aluvial y Suelo residual de Batolito. Municipio de Barbosa.

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (Qa1)	0.7 – 0.9	0.2 - 0.35	Los períodos donde se presentan las aceleraciones espectrales máximas ( $Sa_{m\acute{a}x}$ ) varían entre 0.2s y 0.35s, períodos en los cuales se alcanza una aceleración máxima de 0.9g y 0.7 g respectivamente. La diferencia entre este nivel de aceleraciones están relacionados directamente con el espesor del depósito, pasando de una aceleración mayor para el sitio 11L con espesor de 16 m a una respuesta menor en el sitio 11J1 con un espesor de 54m.

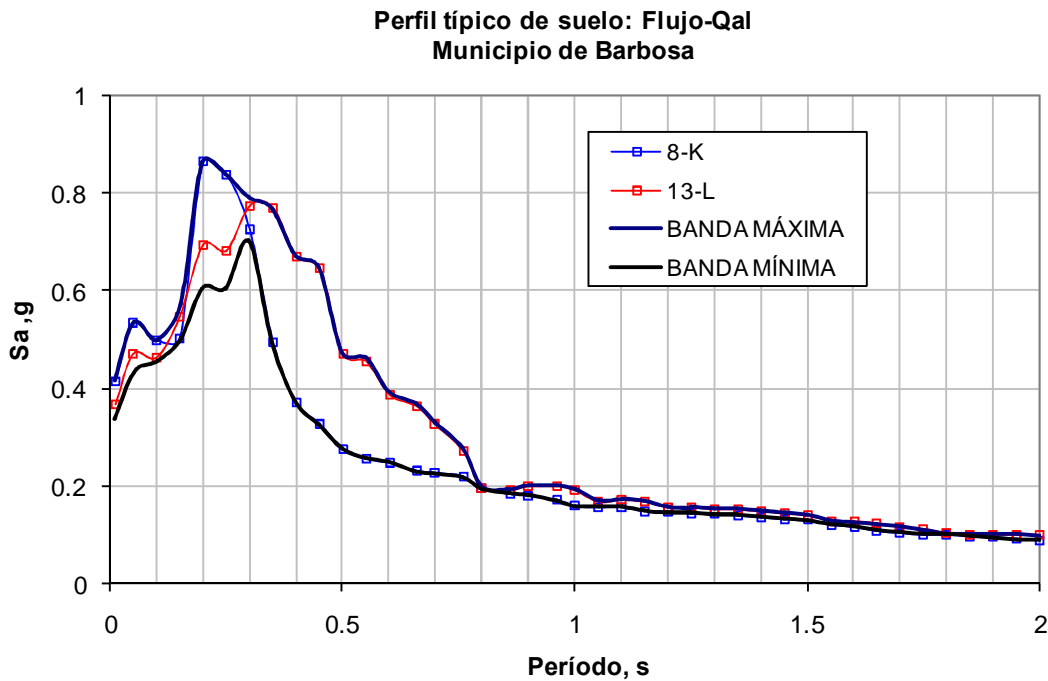


Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Depósito Aluvial (Qal) y Suelo residual de esquisto (Pes)	0.85	0.3	La respuesta para este perfil típico de suelo en los sitios estudiados dentro del municipio de Barbosa, no presenta diferencias significativas en el nivel de aceleraciones. Según se observa en la figura 8.78 se puede considerar una $Sa_{m\acute{a}x}$ igual a 0.85g que ocurre en un período fundamental de 0.3s. Los espesores de los sitios analizados en esta formación varían entre 38m a 47m.



**Figura 8.78. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Depósito aluvial y suelo residual de Esquisto. Municipio de Barbosa.**

Perfil	$Sa_{m\acute{a}x}$ (g)	Período Fundamental (s)	Observaciones
Flujo y Depósito aluvial (Qal)	1.2-1.5	0.3	Los espesores encontrados para esta formación varían entre 17m para el sitio 8K y 83m para el sitio 13L. Esto genera que el suelo presente variaciones en su nivel de aceleración y su período fundamental. Así, es posible observar en la figura 8.79 como la $Sa_{m\acute{a}x}$ varía entre 0.75g (sitio 13L, 83m de espesor) a 0.85g (sitio 8K, 17m de espesor), donde el período fundamental se mueve entre 0.2s a 0.35s.



**Figura 8.79. Respuesta máxima y mínima obtenida para el perfil: Flujo y Depósito aluvial y suelo residual de Esquistos. Municipio de Barbosa.**

## 9. DISEÑO DE LA RED ACELEROGRÁFICA

### 9.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de instrumentación y microzonificación sísmica del Área Metropolitana del Valle de Aburrá tiene como objetivo final definir y reglamentar las especificaciones para diseño sísmo resistente de obras de infraestructura en cada punto del Valle.

Para poder desarrollar estas investigaciones es absolutamente necesaria la instalación y operación de equipos de registro sísmico llamados acelerógrafos. Estos equipos registran la historia de aceleraciones producida por un sismo en el sitio donde están ubicados.

Desde hace 11 años la ciudad de Medellín, gracias al proyecto de Instrumentación y Microzonificación de la ciudad, cuenta con una red acelerográfica de 21 acelerógrafos. Esta red, propiedad del Municipio de Medellín, ha sido la base para la formación del catálogo de movimientos fuertes de la ciudad de Medellín, que actualmente cuenta con más de 1 000 registros acelerográficos que le han permitido a la ciudad avanzar con paso firme en el conocimiento del fenómeno sísmico que la amenaza.

De las 21 estaciones en superficie, 20 están equipadas con acelerógrafos tipo ETNA de la firma KINEMATRICS y 1 con un acelerógrafo K2 de 6 canales de la misma firma. Este último tiene conectado un acelerómetro profundo FBA-23DH de KINEMATRICS, instalado en un pozo que alcanza el basamento rocoso del valle. Actualmente, el acelerómetro profundo está ubicado en la estación Tanque El Tesoro de EPM (EET). La ubicación de las 21 estaciones se muestra en el plano de la ciudad que se incluye a continuación en la Figura 9.1.

En la Tabla 9.1 se indica la localización de cada una de las estaciones superficiales y profundas, así como también la clasificación de los depósitos de suelo debajo de cada estación, de acuerdo al Apéndice H-1, Procedimiento Alternativo para la Definición de los Efectos Locales, de la Norma NSR-98.

Convencidos de que la Red Acelerográfica de Medellín, RAM, fue y sigue siendo pilar fundamental en la microzonificación sísmica de la ciudad, se planteó la instalación y operación de una red acelerográfica para el Valle de Aburrá que complemente la ya instalada en Medellín y se conviertan en el pilar de soporte de las microzonificaciones sísmicas de los Municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá.

En una primera etapa, terminada en 2002, se diseñó la Red Acelerográfica del Valle de Aburrá, RAVA, que estaría conformada por 20 acelerógrafos distribuidos en todos los municipios del Valle de Aburrá exceptuando Medellín, y en función de las formaciones

geotécnicas superficiales existentes en cada uno de ellos (GSM, 2002). En esta primera etapa, además del diseño, se instalaron dos acelerógrafos ETNA (Foto 9.1), de la serie ALTUS, fabricados por la firma KINEMETRICS. El primero de estos dos equipos se ubicó en el Hogar de los Recuerdos en Itagüí, localizado en las terrazas aluviales del río Medellín de este municipio. El segundo equipo se ubicó en el Hospital Marco Fidel Suárez de Bello, localizado en los flujos de lodos y escombros de la urbanización Niquía.

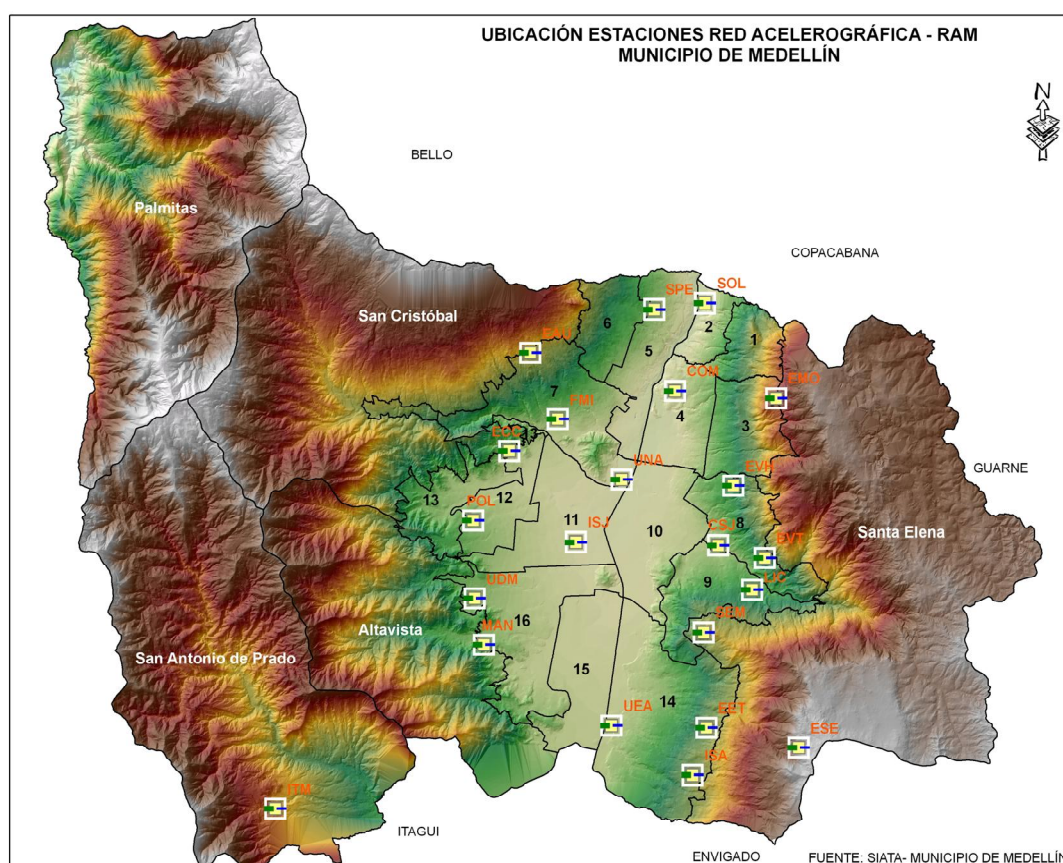


Figura 9.1. Localización de las estaciones de la Red Acelerográfica de Medellín

Tabla 9.1. Estaciones Red Acelerográfica de Medellín (RAM)

Estación	Código	Lat. (°N)	Lon. (°W)	Alt. (m)	Equipo	Suelo	Sector
Jardín Botánico	BOT	6.271	75.565	1460	ETNA	C	Jardín Botánico
Colegio San José	CSJ	6.247	75.555	1620	ETNA	B	Enciso
Tanque de Aures EPM	EAU	6.296	75.602	2026	ETNA	C	Aures
Centro de control EPM	ECC	6.271	75.608	1450	ETNA	C	Sta. Rosa de Lima
Tanque el Tesoro EPM	EET	6.201	75.557	1650	K2	C	El Poblado
Planta la Montaña EPM	EMO	6.284	75.541	2170	ETNA	C	Sto. Domingo Sabio

**Tabla 9.1. Estaciones Red Acelerográfica de Medellín (RAM) (Cont.)**

Santa Elena	ESE	6.194	75.532	2820	ETNA	A	Sta. Elena
AEROCIVIL							
Planta Villahermosa	EVH	6.262	75.552	1730	ETNA	B	Villahermosa
Tanque Villa Tina EPM	EVT	6.244	75.544	1822	ETNA	B	Villa Tina
Facultad de Minas	FMI	6.278	75.595	1537	ETNA	B	Robledo
Itagüí	ITA	6.182	75.665	1611	EPISENSOR		Itagui
ISA	ISA	6.262	75.552	1730	ETNA	C	El Poblado
Inspección San Joaquín	ISJ	6.373	75.591	1427	ETNA	B	San Joaquín
Liceo U. De Medellín	LIC	6.236	75.547	1688	ETNA	B	Buenos Aires
Colegio Padre Manyanet	MAN	6.222	75.613	1605	ETNA	C	Belén
Fund. Amigo Policía	POL	6.253	75.616	1633	ETNA	C	La América
Seminario Mayor	SEM	6.225	75.554	1877	ETNA	C	Las Palmas
Fun. Solidaridad. por Col	SOL	6.236	75.546	1460	ETNA	C	Zamora
Sena Pedregal	SPE	6.350	75.500	1499	ETNA	B	Pedregal
Universidad de Medellín	UDM	6.235	75.616	1595	ETNA	D	Belén
Universidad EAFIT	UEA	6.203	75.581	1518	ETNA	C	La Aguacatala
Universidad Nacional	UNA	6.258	75.578	1488	ETNA	C	Carlos E. Restrepo



**Foto 9.1 Acelerógrafo ETNA de la serie ALTUS**

A continuación se precisan los criterios que se consideraron para la ubicación definitiva de estaciones acelerográficas en esta segunda etapa de la RAVA, se detallan las características de los equipos instalados y se precisan los sitios de ubicación de las estaciones.



## 9.2 CRITERIOS DE DISEÑO

Por claridad en la exposición, a continuación se transcriben los criterios que se tuvieron en cuenta en el diseño de la RAVA, ejecutado en la primera etapa del proyecto, para la ubicación de las estaciones acelerográficas.

La totalidad de las estaciones están ubicadas en campo libre, esto es, lejos de edificaciones u obras de infraestructura que puedan introducir modificaciones importantes al movimiento propio del suelo, y en rangos de frecuencias importantes para la interpretación apropiada de los registros. Se evitaron sitios con cambios fuertes de topografía, como cimas de cerros o líneas de piedemonte, que puedan introducir efectos locales geométricos importantes en el movimiento propio de la formación geotécnica que se quiere registrar. En donde no sea posible evitar emplazamientos en donde se combinen formaciones geotécnicas con topografías complejas, como es lo usual en nuestra geografía, este hecho deberá tenerse en cuenta para hacer una interpretación adecuada de las señales que se registren en estos sitios; se deberán usar modelos 2D o 3D para su interpretación.

Finalmente, con el propósito de suministrar las condiciones de funcionamiento y seguridad adecuadas a los instrumentos de registro sísmico (acelerógrafos), se construyeron un grupo de casetas similares a la mostrada en la Foto 9.2. Las casetas se construyeron dentro de instalaciones públicas o privadas como instituciones gubernamentales, centros deportivos y recreación, etc. que estuvieron dispuestas a ceder el espacio físico y las condiciones mínimas de seguridad para la instalación de los acelerógrafos.



**Foto 9.2 Caseta acelerográfica del Hogar de los Recuerdos en Itagüí**

La totalidad de los equipos instalados en esta segunda etapa se orientaron de tal forma que se registren simultáneamente las aceleraciones del terreno en las direcciones NS, EW y vertical, correspondiendo con las direcciones locales del equipo, longitudinal, transversal y vertical, respectivamente. Esta orientación coincide con la orientación de los equipos de la Red Acelerográfica de Medellín y la Red Acelerográfica Nacional administrada por el Ingeominas.

### **9.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS ACELERÓGRAFOS**

En esta segunda etapa se instalaron 9 acelerógrafos CUSP-3C (Ver Foto 9.3) diseñados y fabricados por la firma Canterbury Seismic Instruments de Christchurch, en Nueva Zelanda.



**Foto 9.3 Acelerógrafo CUSP-3C**

En lo que sigue se considera como unidad de medida de la aceleración la aceleración de la gravedad, g.

Estos acelerógrafos están compuestos por tres sensores de aceleración MEMS (fabricados con técnicas de microelectrónica) que operan con niveles de ruido promedio (RMS) inferiores a  $70 \mu\text{g}$ , muy inferiores a las aceleraciones mínimas de interés en ingeniería sísmica, que son del orden de  $500 \mu\text{g}$ . El nivel máximo de registro de estos sensores es de  $\pm 3\text{g}$ , suficiente para una aplicación en ingeniería sísmica; es muy improbable que en campo libre se lleguen a registrar aceleraciones máximas superiores a  $3\text{g}$ .

La tarjeta de conversión análogo-digital de este acelerógrafo es de 24 bits, que genera un rango dinámico de 108 db, es decir, que la resolución y la aceleración mínima registrada por el acelerógrafo es de  $50 \mu\text{g}$ , semejante al nivel de ruido de los sensores y muy inferior a las aceleraciones mínimas de interés en ingeniería sísmica.

El acelerógrafo CUSP-3C se comunica con el usuario a través del protocolo TCP-IP que es el mismo que se utiliza en Internet. Lo anterior significa que si el acelerógrafo está conectado a la red de Internet, éste se podrá operar y consultar desde cualquier parte del mundo a través de su dirección IP. Cuando el equipo no está conectado a la red, el equipo se puede operar y consultar desde cualquier computador portátil a través del puerto estándar de Ethernet y haciendo uso de cualquier navegador de que disponga el computador portátil.

Por último, es importante mencionar que el acelerógrafo CUSP-3C tiene incorporado un GPS que constantemente está consultando el sistema satelital de posicionamiento global, para corregir las coordenadas de ubicación del equipo, y lo más importante,

corregir la señal de tiempo del reloj interno del equipo. Este procedimiento garantiza desviaciones respecto al tiempo UTC menores a 400  $\mu$ s, es decir, que con equipos independientes e instalados en dos sitios distantes, pueden hacerse cálculos de los tiempos entre llegadas de las fases de un evento sísmico.

#### 9.4 UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS

En el plano M\_RedAcelero\_AM\_0101 se indica la ubicación de las estaciones acelerográficas de la primera y segunda etapas de la Red Acelerográfica del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, RAVA, complementaria de la Red Acelerográfica de Medellín, RAM. El número al que hace referencia el plano M\_RedAcelero\_AM\_0101 se relaciona entre paréntesis al final de la descripción de cada uno de los sitios de ubicación de las estaciones.

En la Tabla 9.2 se enumeran las 10 estaciones con las que cuenta actualmente la RAVA, las mismas que se describen en detalle a continuación.

**Tabla 9.2 Estaciones Red Acelerográfica del Valle de Aburrá (RAVA)**

Estación	Código	Lat. (°N)	Lon. (°W)	Alt. (m)	Equipo	Suelo	Sector
Caldas	CAL	06°05'55.70"	75°38'34.46"	1700	CUSP-3C	B	Locería Colombiana
La Estrella	EST	06°09'55.74"	75°38'90.83"	1650	CUSP-3C	D	Tanque agua EPM
El Ancón Sur	ANC	06°08'94.86"	75°38'09.03"	1600	CUSP-3C	A	Subestación de energía EPM
Sabaneta	SAB			1600	CUSP-3C	B	Polideportivo Norte
Itagüí	ITA	6.182	75.665	1611	ETNA	C	Hogar de los recuerdos
Envigado	ENV	06°09'99.99"	75°33'96.63"	1600	CUSP-3C	C	Planta de Tratamiento Ayurá
Copacabana	COP	06°20'71.25"	75°30'64.61"	1450	CUSP-3C	B	IMUSA
Girardota	GIR	06°22'46.42"	75°26'97.36"	1400	CUSP-3C	C	Casa de la Cultura
La Tasajera	TAS			1500	CUSP-3C	A	Túnel Central Hidr.
Barbosa	BAR	06°26'09.13"	75°19'68.35"	1300	CUSP-3C	D	Casa del anciano

En el municipio de Caldas se cuenta con un acelerógrafo ubicado en el Centro de Capacitación de Locería Colombiana que está fundado sobre los depósitos de vertiente de la zona centro (2).

En el municipio de La Estrella se cuenta con dos acelerógrafos: uno en un afloramiento rocoso en el Ancón Sur, ubicado en la subestación eléctrica de EPM del mismo nombre (1). Esta estación al sur del valle complementará la estación en roca ubicada en el alto de Santa Elena y perteneciente a la RAM. El segundo acelerógrafo está ubicado en predios del tanque de EPM para abastecimiento de agua al casco urbano del municipio,

fundado sobre los depósitos de vertiente en los que está la mayor parte de la zona urbana (3).

En el municipio de Sabaneta se cuenta con un acelerógrafo ubicado dentro de las instalaciones de la unidad deportiva, que descansa sobre los depósitos aluviales donde también está ubicado el centro de la ciudad (4).

En el municipio de Itagüí se cuenta desde la primera etapa con una estación acelerográfica ubicada en predios del Hogar de los Recuerdos, fundado sobre los depósitos aluviales en donde también está ubicado el centro de la ciudad (5).

En el municipio de Envigado se cuenta con una estación acelerográfica ubicada en predios de la Planta de Tratamiento La Ayurá de propiedad de EPM, localizada sobre los depósitos de vertiente al este de la zona urbana (Loma del Chocho) (6).

En el municipio de Bello se contaba desde la primera etapa con una estación acelerográfica ubicada en predios del Hospital Marco Fidel Suarez, localizado sobre los flujos de lodos y escombros de la urbanización Niquía (7). Infortunadamente, este equipo fue robado.

En el municipio de Copacabana se cuenta con una estación acelerográfica ubicada en predios de la Planta de IMUSA, localizada sobre el depósito fluvio torrencial de la zona centro del municipio (8).

En el municipio de Girardota se cuenta con dos estaciones acelerográficas, ubicada la primera en el afloramiento rocoso en el portal de entrada del túnel de acceso a la Central Hidroeléctrica la Tasajera de EPM (9). Esta estación al norte del valle complementará las estaciones en roca ubicadas en el municipio de Caldas al sur del valle y la perteneciente a la RAM y ubicada en el alto de Santa Elena. La segunda estación en el municipio de Girardota está ubicada en predios del Cuerpo de Bomberos del municipio, localizado sobre los flujos de escombros de la zona centro (10).

Finalmente, en el municipio de Barbosa se cuenta con una estación acelerográfica ubicada en el Centro de Bienestar del Anciano San Pedro Claver, localizada sobre los flujos de escombros de la zona centro (11).

## 10. VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO

### 10.1 INTRODUCCIÓN

Los terremotos han representado y seguirán representando una de las mayores amenazas que enfrenta el mundo para su seguridad y su bienestar, físico y económico. Los temblores de tierra ocurren frecuentemente causando muertes, heridas y pérdidas materiales que pueden incapacitar economías locales y nacionales. Un sólo evento sísmico puede resultar en billones y trillones de pesos en pérdidas, aunque reclame solamente decenas de vidas humanas.

El desarrollo de información y procedimientos que eventualmente contribuyan a la reducción del riesgo sísmico comienza con el conocimiento y evaluación del fenómeno sísmico mismo, continúa con la medición del impacto sobre las comunidades y se dirige a la reducción general del riesgo sísmico.

En este capítulo se presenta el procedimiento desarrollado para alcanzar el segundo paso, es decir, la medición del impacto esperado en las comunidades del Valle de Aburrá, debido a la amenaza sísmica que sobre ellas se cierne. En otras palabras, la cuantificación del riesgo sísmico.

La medición del impacto de un terremoto sobre un ambiente urbano requiere de la estimación de la amenaza sísmica y de la evaluación de la vulnerabilidad del entorno, medida en términos de variables como densidad de población, calidad de materiales y construcción, tipología estructural, edad del edificio, etc.

El riesgo se describe entonces, con base en las dos componentes de amenaza y vulnerabilidad, en función de la cantidad y distribución de pérdidas humanas y pérdidas físicas. Sin embargo, la representación del riesgo obedece a una amenaza que se mide en términos de probabilidades, pues no se conocen con certeza los eventos que sucederán en una región en el futuro.

Diversos métodos para la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de estructuras se han desarrollado en años recientes, los cuales utilizan diferentes enfoques para los datos de entrada, para el procesamiento de la información y para la presentación de los resultados. Dolce et al (1994) dividen las metodologías de acuerdo con el tipo de entrada, la clase de metodología y los resultados. Se pueden obtener virtualmente cualquier combinación de entrada-método-resultado, que se traduce en métodos con diferentes niveles de precisión y aplicabilidad. No obstante, en Dolce et al. (1994) reconoce que por ejemplo para estructuras de mampostería, las cuales representan del orden del 85% de las viviendas en el Valle de Aburrá (Morales et al, 2004), al momento de su publicación sólo estaban disponibles metodologías del tipo

híbrido, combinando el juicio de expertos con métodos estadísticos y no existía ninguna metodología basada explícitamente en conceptos de mecánica estructural.

En la actualidad existe una serie de procedimientos para la evaluación de la vulnerabilidad y/o riesgo estructural, los cuales tienen diferentes alcances y capacidades de cálculo. Cada uno de estos procedimientos tiene ventajas y desventajas en su formulación, éstas últimas están generalmente relacionadas con el tratamiento de las fuentes de incertidumbre, las cuales están inevitablemente siempre presentes en un estudio de estimación de riesgo sísmico. Además, la mayoría o tal vez la totalidad de las metodologías existentes están enfocadas a la determinación de la vulnerabilidad de las edificaciones, dejando para etapas posteriores la convolución con la amenaza sísmica para la estimación total del riesgo, siendo en algunos casos muy poco clara la manera de lograr este último objetivo.

Uno de los primeros métodos disponibles es el llamado método de matrices de probabilidad de daño, DPM (Whitman, 1973). El DPM se basa en la idea que un grupo de edificios que tienen una tipología estructural común tendría el mismo comportamiento ante cargas sísmicas y en consecuencia el nivel de daño sería estadísticamente igual para todo el grupo de edificios. El daño se caracteriza por algún nivel de incertidumbre que se representa por la matriz de probabilidad de daño. Una de las versiones más populares de este método ha sido desarrollada en Italia y se conoce como el método GNDT de primer nivel (GNDT, 1993), el cual incluye tres clases de vulnerabilidad de A a C, para cada una de las cuales existe una DPM. En este método la demanda sísmica se estima mediante la escala de intensidad macrosísmica EMS-98 (Grüntal, 1998) y el daño se describe por medio de una definición cualitativa. Una importante limitación de este método es la definición de la demanda sísmica en términos de intensidad macrosísmica, la cual tiene la deficiencia adicional de ser una medida discreta de intensidad.

Las DPM calibradas para un grupo específico de edificio pueden no ser válidas para otras regiones y además están afectadas por un cierto nivel de subjetividad que aumenta el nivel de incertidumbre en los resultados. Una extensión de este procedimiento es el llamado método GNDT de segundo nivel que se basa en información de campo recolectada mediante un formato especialmente diseñado. La información contenida en el formato está orientada a identificar la tipología y las características constructivas de cada edificio, que luego son combinadas bajo ciertas reglas para obtener un índice de vulnerabilidad absoluto *IV*. Este índice de vulnerabilidad se obtiene como una media ponderada de once parámetros, de los cuales sólo uno se obtiene a partir de un modelo mecánico. La demanda sísmica se representa por medio de valores de aceleración pico del terreno *PGA*, y la probabilidad de alcanzar cierto nivel de daño, que se representa mediante un escalar *D* entre 0 y 1, se calcula mediante curvas de fragilidad en el dominio *D-PGA*, utilizando *IV* como parámetro de entrada.

Uno de los primeros estudios en el cual se hizo uso de una descripción mecánica del comportamiento estructural con propósitos de estimación de la vulnerabilidad de estructuras de mampostería fue presentado en la metodología VULNUS desarrollada por Bernardini et al (1990). Esta metodología se basa en la evaluación de las características mecánicas y geométricas de cada edificio, las cuales son combinadas con la evaluación de otros factores que controlan la respuesta de la estructura y que son manejados mediante juicios cualitativos. El proceso completo se desarrolla mediante la teoría de lógica difusa (*fuzzy set theory*) que se utiliza para la definición de un criterio de seguridad. Esta metodología tiene el inconveniente que ha sido calibrada solamente para tipologías de edificio italianas y además la correlación con parámetros que representen la demanda sísmica está aún en proceso de desarrollo.

En años recientes han sido desarrollados otros métodos desde una perspectiva diferente, tratando de resolver las limitaciones identificadas en muchos de los métodos existentes. Por ejemplo, la metodología HAZUS fue desarrollada por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos – FEMA (1999) y se basa en tres conceptos fundamentales: curva de capacidad, punto de diseño y curva de fragilidad. La curva de capacidad es la relación entre la resistencia a carga lateral de una estructura y el desplazamiento lateral y se obtiene mediante un análisis estático de tipo pushover. La curva de capacidad se expresa en términos de aceleración espectral y desplazamiento en la parte superior de la edificación para poder compararse con el espectro de demanda. La curva de capacidad es controlada por la capacidad de fluencia, la fuerza resistente y la capacidad última, siendo posible representar mediante una sola curva la correspondiente resistencia a cierto desplazamiento que representa un estado límite determinado. La curva de fragilidad representa la función de distribución acumulada CDF de la probabilidad de alcanzar o exceder un estado límite de daño específico para una respuesta máxima dado cierto nivel de demanda sísmica. A pesar de que esta es una metodología muy completa, que incluye también la evaluación de la vulnerabilidad para otros tipos de fenómenos naturales, es posible identificar ciertos problemas potenciales en su aplicación, como por ejemplo que las curvas de capacidad típicas que se incluyen en la base de datos del programa son estrictamente válidas para tipologías de edificio utilizadas en los Estados Unidos y requieren ser calibradas o modificadas antes de ser usadas en otros entornos.

El procedimiento llamado FaMIVE que fue desarrollado por D'Ayala & Speranza (2002) tiene como objetivo la evaluación de la vulnerabilidad de edificios históricos en centros urbanos y está claramente basado en principios de mecánica. FaMIVE usa un grupo predefinido de reglas para la identificación del mecanismo de colapso más probable, para el cual se evalúa un factor de carga o de colapso (*collapse multiplier*) mediante un proceso estático equivalente. Este factor de colapso sufre manipulaciones adicionales que llevan a la definición de un valor de vulnerabilidad relativo. A pesar de que este método es muy riguroso en el cálculo del factor de colapso, no presenta una indicación clara de la manera en que el índice de vulnerabilidad obtenido se puede comparar con la demanda sísmica y además no se tiene en cuenta de ninguna manera el efecto de las



fuentes de incertidumbre que existen necesariamente en la capacidad estructural, la respuesta dinámica y la demanda sísmica.

En los últimos años se han propuesto métodos adicionales que se basan en aspectos mecánicos, que sin embargo están en estados iniciales de desarrollo o tienen ciertos aspectos que ameritan ser revisados y mejorados. Por ejemplo, Calvi (1997, 1999) propuso una metodología simplificada para la estimación de la vulnerabilidad de clases de edificios, incluyendo una formulación para edificaciones de mampostería. Esta propuesta fue pionera en el uso combinado de la definición de la capacidad estructural con modelos mecánicos simplificados y la comparación de la capacidad y demanda de desplazamientos como criterio para la evaluación del riesgo sísmico. No obstante, este método no incluye el tratamiento de las fuentes de incertidumbre.

Un enfoque similar al propuesto por Calvi fue recientemente presentado por Lang (2002). Este método se basa en el cálculo de la capacidad de desplazamiento del edificio, para lo cual se sigue un enfoque de tipo mecánico y compara luego la capacidad con la demanda utilizando el espectro de respuesta de desplazamiento. El principal inconveniente de este método está en la definición de la curva de capacidad y la demanda sísmica como relaciones deterministas, ignorando toda la incertidumbre inherente en su definición. Además, la aplicación del método se hace edificio por edificio y no se indica de manera explícita la posibilidad de aplicar la metodología a escala urbana.

Restrepo-Vélez (2004) ha propuesto, entre otras, la siguiente lista de características que se consideran deseables en una metodología "ideal" para la estimación del riesgo sísmico de edificaciones:

- Utilizar una medida continua, en vez de discreta, para definir la demanda sísmica y utilizar una representación más completa de la demanda sísmica en la forma de espectro de respuesta, en vez de un parámetro individual como por ejemplo PGA.
- Utilizar desplazamiento o deformación como un indicador del nivel de demanda, las cuales tienen una mejor correlación con los niveles de daño.
- Considerar la incertidumbre en la demanda sísmica, la cual se reconoce como uno de los componentes de variabilidad más importantes que se deben incluir en una evaluación rigurosa del riesgo sísmico.
- Considerar las fuentes de incertidumbre que se originan en la capacidad y en la respuesta estructural.
- Usar criterios de mecánica para la definición de la capacidad estructural.
- Tener la posibilidad de evaluar el riesgo sísmico para cada clase de edificios, teniendo en cuenta diferentes niveles en la calidad de los datos y el refinamiento de los modelos mecánicos simplificados.
- Evitar, hasta donde sea posible, subjetividades en la definición de parámetros, factores y pesos de ponderación.
- Requerir ajustes mínimos para ser aplicado en diferentes regiones.

La estimación de la vulnerabilidad o el riesgo sísmico a escala urbana en Colombia ha sido realizada en el pasado sólo para unas pocas ciudades. Cardona & Yamín (1997) llevaron a cabo la estimación de escenarios de pérdidas debidas a sismo como parte de un proyecto integrado de riesgo para la ciudad de Bogotá, en el cual se utilizó el método DPM. Las matrices de daño se ajustaron a partir de las publicadas en el ATC-13 (Whitman, 1973; ATC, 1985). Chavarría & Gómez (2001) hicieron una adaptación de la metodología GNDT de Segundo nivel para un estudio específico en la ciudad de Cali.

Un enfoque diferente para la estimación del riesgo sísmico a escala urbana fue desarrollado para la ciudad de Bogotá por Cardona (2001) por medio de un método holístico, el cual considera los aspectos sociológicos, económicos, psicológicos y de ingeniería por medio de la teoría de dinámica de sistemas complejos. Ese enfoque tiene el mérito de presentar la concepción del riesgo desde una perspectiva global, permitiendo una evaluación multidisciplinaria del riesgo, la cual podría ser de interés para algunos organismos del Estado. No obstante, el enfoque carece del nivel de detalle requerido para la identificación de configuraciones estructurales y tipos de edificios en riesgo, lo cual puede ser de utilidad para ejecutar programas de reforzamiento estructural a escala urbana, para las compañías de seguros, o aún para los propietarios o el público en general. Además, la definición de las curvas de fragilidad estructural para cada tipo de edificio fue hecha mediante métodos de computación paralela, lo cual hace la aplicación restrictiva desde el punto de vista económico.

Cardona & Hurtado (1990) propusieron un método para la estimación de la vulnerabilidad Estructural, pero limitada a edificaciones de mampostería de uno y dos pisos. Este método tiene la ventaja de ser fácilmente adaptable a las condiciones de sismicidad regionales. No obstante, no considera la componente probabilística del problema ni diferentes mecanismos de falla estructural. En general, el método tiende a sobreestimar el coeficiente de resistencia sísmica (Restrepo-Vélez, 2004).

PERCAL es una metodología desarrollada para la estimación de pérdidas económicas debidas a sismo, como parte de un programa para la prevención del riesgo sísmico en la ciudad de Medellín (PNUD, 1994; Jaramillo, 1996). En esta metodología la demanda sísmica para el caso de estructuras de concreto se representa por medio de los desplazamientos espectrales en la cubierta del edificio, mientras que para estructuras de mampostería la demanda está representada por el espectro de respuesta de aceleración.

Esta metodología se basa en modelos mecánicos simples que tienen en cuenta varios parámetros relacionados con el tipo de cubierta, uso, número de pisos, edad y estrato socioeconómico. A partir de esas variables el programa hace una combinación probabilística de los parámetros para estimar la probabilidad de alcanzar o exceder cierto estado límite. PERCAL tiene la ventaja de utilizar un esquema enteramente probabilístico para combinar los parámetros utilizados en el modelo mecánico, considerando de manera simplificada las incertidumbres relacionadas. Además, el

programa requiere relativamente poca información, la cual se puede obtener de mapas de uso frecuente en oficinas del gobierno. Adicionalmente, requiere poca capacidad de cómputo y ha sido específicamente diseñada para la estimación de la vulnerabilidad y el riesgo a escala urbana. Esta metodología tiene también algunas importantes desventajas, como por ejemplo no tener en cuenta la incertidumbre asociada con la demanda sísmica.

A partir de las metodologías antes descritas, y teniendo en cuenta sus méritos, sus desventajas, y las necesidades particulares de este proyecto, a continuación se presenta la metodología IE-RISS, la cual, además de considerar todos los aspectos positivos anteriormente indicados, es consistente con la naturaleza aleatoria del fenómeno sísmico y se basa en la teoría de las probabilidades.

## 10.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

La evaluación de la vulnerabilidad física del entorno urbano requiere de un inventario de construcciones clasificado en función de las siguientes variables: uso, sistema estructural, sistema de cubierta, edad de la construcción, estrato socioeconómico y pendiente del terreno.

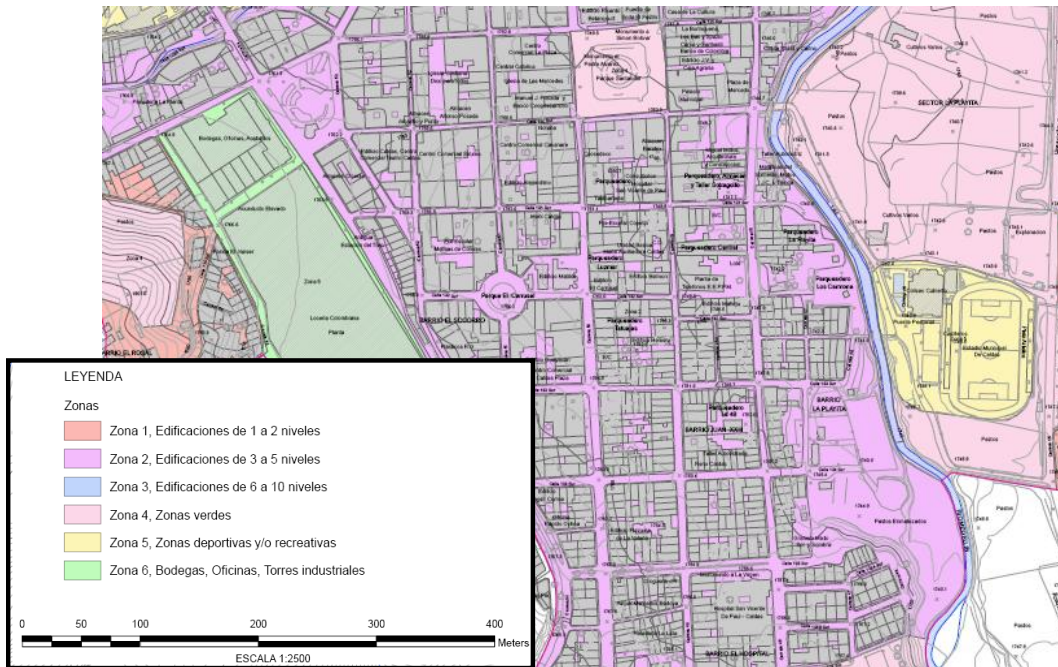
La división por zonas se realizó inicialmente mediante el análisis de imágenes aéreas, en las cuales se identificaron fundamentalmente alturas predominantes en las edificaciones y usos característicos. Después se realizaron recorridos de campo en todos los municipios con el fin de verificar los límites de las zonas definidas en la fase anterior y recolectar los datos de caracterización de cada zona. Cada encuestador utilizó el Formulario de Inspección detallada-V.1.1 y el Formulario de Inspección por Manzana-V.1. Municipio, que se presentan en el Anexo 10.1.

Las zonas definidas para realizar los análisis se presentan en la Tabla 10.1.

**Tabla 10.1 Zonas definidas para los análisis de vulnerabilidad**

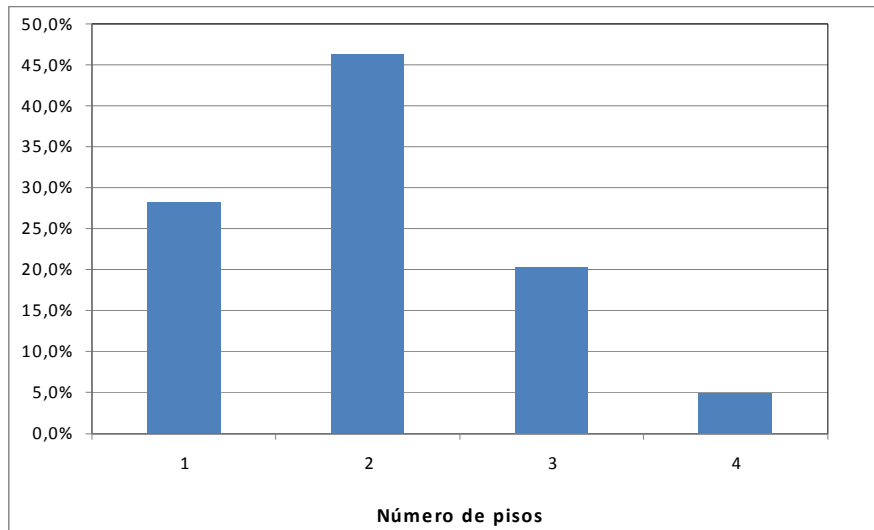
Zona	Tipo estructural
Zona 1	Predominantemente edificaciones de 1 a 2 niveles
Zona 2	Predominantemente edificaciones de 3 a 5 niveles
Zona 3A	Predominantemente edificaciones de 6 a 10 niveles
Zona 3B	Predominantemente edificaciones de 11 a 15 niveles
Zona 3C	Predominantemente edificaciones de 16 niveles en adelante
Zona 4	Zonas verdes
Zona 5	Zonas deportivas y/o recreativas /espacios abiertos
Zona 6A	Bodegas
Zona 6B	Oficinas
Zona 6C	Torres industriales
Zona 7	Zonas heterogéneas, mezcla de zonas

Con los datos obtenidos se hicieron mapas de inventario de construcciones como el que se muestra en la Figura 10.1 y se alimentó la base de datos que procesa automáticamente las estadísticas para cada manzana y realiza el ordenamiento de los datos que se usan como insumo para la modelación estructural y el cálculo del riesgo sísmico. En los planos X\_VulnerEstr\_Ba\_1001, X\_VulnerEstr\_Ca\_1010, X\_VulnerEstr\_Co\_1003, X\_VulnerEstr\_Es\_1009, X\_VulnerEstr\_Gi\_1002, X\_VulnerEstr\_Sa\_1008, V\_VulnerEstr\_Be\_1004, V\_VulnerEstr\_En\_1006, V\_VulnerEstr\_It\_1007 y L\_VulnerEstr\_Me\_1005.mxd se muestran las distribuciones de zonas homogéneas con relación a la tipología de construcción para cada uno de los municipios del Área Metropolitana. Cada zona homogénea representa un área urbana con un tipo de construcción predominante en cuanto al número de pisos, sin significar esto que en la zona sólo hay edificaciones de una misma altura.

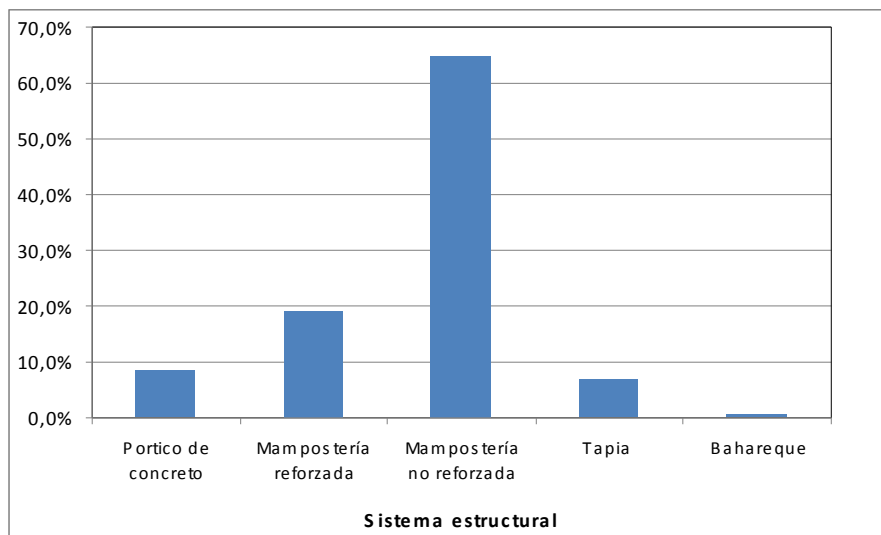


**Figura 10.1 Ejemplo de inventario de construcciones urbanas**

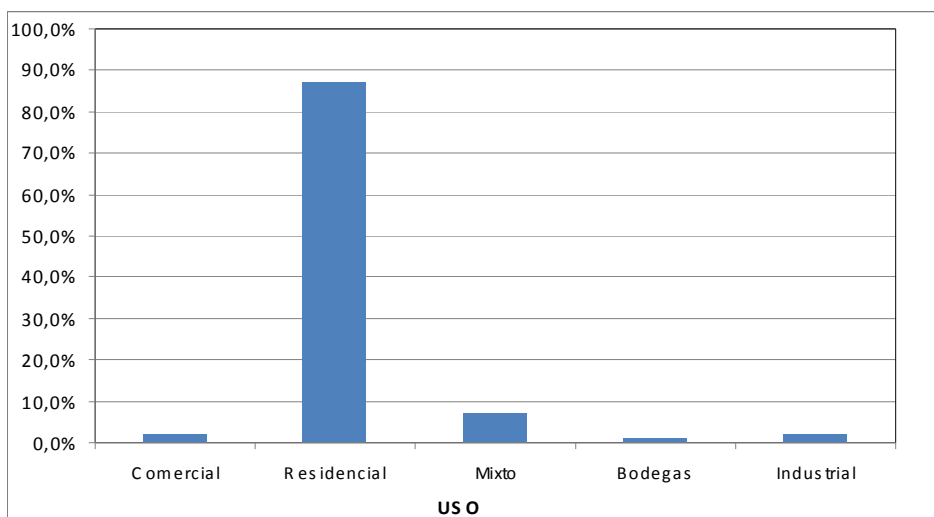
En las Figuras 10.2 a 10.4 se presenta a manera de ejemplo, las funciones de distribución de las variables utilizadas, para las zonas 1 del municipio de Envigado.



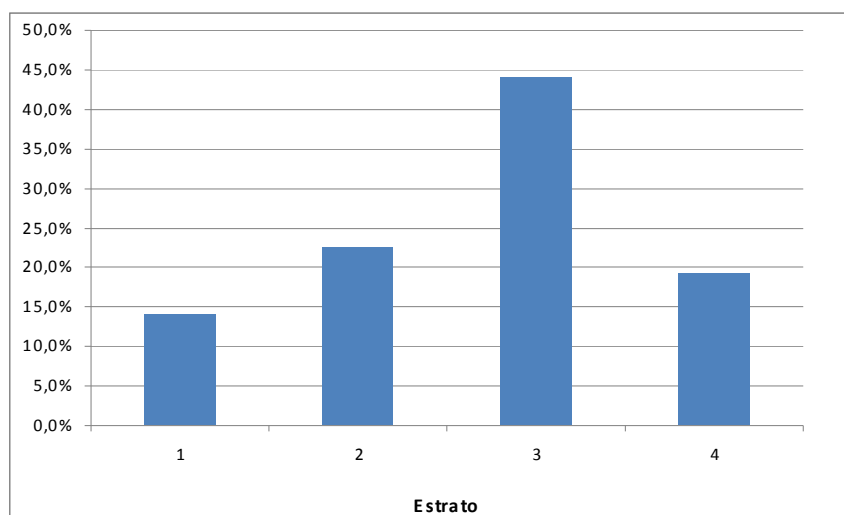
**Figura 10.2 Distribución de número de pisos para la zona 1 del municipio de Envigado**



**Figura 10.3 Distribución de la tipología estructural de la zona 1 del municipio de Envigado**



**Figura 10.4 Distribución del uso de las edificaciones de la zona 1 del municipio de Envigado**



**Figura 10.5 Distribución del estrato de las edificaciones de la zona 1 del municipio de Envigado**

De las figuras presentadas anteriormente podemos interpretar lo siguiente para la zona 1 del municipio de Envigado:

- Se nota que en la zona 1 de este municipio, y acorde a su propia definición, el 75% de las edificaciones tienen 1 (29%) o 2 (46%) pisos, el 20% 3 pisos y el 5% restante 4 pisos.

- También se puede apreciar claramente que el sistema estructural predominante es la mampostería no reforzada con cerca del 65% de las edificaciones, le sigue la mampostería reforzada con el 19% y el restante 16% se encuentra entre pórticos de concreto, tapia y bahareque.
- El uso de las edificaciones de esta zona es claramente residencial con el 87%, seguido por el mixto (7%) y el resto de usos (comercial, bodegas e industrial) con el 6%.
- El estrato predominante es el 3 con el 44%, seguido por el 2 con el 23%, el 4 con el 19% y el 1 con el 14%.

Gráficas similares para todas las zonas de todos los municipios se presentan en el Anexo 10.2.

Adicionalmente, en la Tabla 10.2 se presentan los valores por metro cuadrado utilizados para los análisis, los cuales fueron tomados de los precios de mercado de bienes nuevos en cada uno de los municipios y se encuentran en función del uso y del estrado de la edificación.

**Tabla 10.2 Valores por m<sup>2</sup> utilizados en el análisis**

Estrato	Residencial	Comercial	Bodega	Industrial
1	500 000	500 000	870 000	1 500 000
2	620 000	620 000	870 000	1 500 000
3	928 500	928 500	870 000	1 500 000
4	1 505 000	1 980 000	870 000	1 500 000
5	1 890 000	2 485 000	870 000	1 500 000
6	2 385 000	3 100 000	870 000	1 500 000

### 10.3 RIESGO SÍSMICO

Tradicionalmente se han hecho estimaciones de escenarios de pérdidas por sismos para indicar la distribución geográfica y el nivel de pérdidas que puede llegar a tener una zona. Como la descripción lo indica, estos escenarios necesariamente están asociados a un sismo particular y es aquí en donde reside el principal problema de esta descripción de pérdidas: que es particular para un sismo.

Sin conseguirlo, a este “Sismo” se lo describe con calificativos que intentan definirlo inequívocamente: “El Sismo máximo probable”, “El Sismo esperado”, “El Sismo de 500 años de periodo de retorno”, etc. Sin excepción, ninguna de estas descripciones permite seleccionar objetivamente un evento; cualquier sismo que se elija tendrá un

altísimo componente de subjetividad en su elección y además de incertidumbre, dada la gran variabilidad inherente en la estimación de la amenaza sísmica. Lo anterior se debe justamente a que la única forma de describir racionalmente la amenaza sísmica de un sitio es a través de la teoría de probabilidades, y no es posible definirla coherentemente en términos de un sólo individuo de la población, es decir de un sólo evento sísmico entre todos los sismos probables, lo cual resultaría ser solamente una muestra de toda la de todo el espacio muestral probable.

Es necesario entonces introducir un procedimiento que sea consecuente con la naturaleza aleatoria del fenómeno físico, considerando no las pérdidas debido a un evento sísmico, sino las pérdidas esperadas en un sitio en función de su tasa de ocurrencia o su periodo de retorno promedio, tal como se hace con la amenaza sísmica de un sitio, en términos de la tasa de ocurrencia o el periodo de retorno promedio de las aceleraciones máximas en el terreno.

Esta metodología no calcula las pérdidas debidas a un sismo probable, sino que calcula lo que se conoce en la literatura acerca del tema como la curva de pérdidas máximas probables (*Probable Maximum Loss* o PML).

Es importante aclarar que con esta metodología no se puede definir con precisión a cuál fuente y a cuál magnitud corresponde una pérdida total asociada a una tasa de ocurrencia. A lo sumo, en un proceso que se denomina “desagregación”, se podrán calcular las probabilidades que tiene cada fuente y sus magnitudes de generar esas pérdidas.

Las curvas de PML son entonces una muy buena descripción estadística del proceso de ocurrencia de pérdidas totales en un sitio. Sin embargo, podría objetarse que carece de la supuesta fortaleza de los escenarios de pérdidas que indican la distribución geográfica de los daños, parámetro básico para el cálculo del riesgo.

La industria aseguradora ha resuelto esta inquietud con elegancia. Para tener un indicativo de la distribución geográfica de las pérdidas de su cartera de clientes, han propuesto calcular las pérdidas promedio anuales de cada edificación o punto geográfico. Este indicador tiene la bondad de considerar las pérdidas de cada edificación debidas a todos los eventos que se presentan durante su vida y considerando, además, la recurrencia cuando se calcula el promedio anual de estas pérdidas. Este indicador deja claro que hay edificaciones que recurrentemente tienen pérdidas mayores que otras, pero sin necesidad de hacer conjeturas acerca del evento en particular que las podría producir.

Desde el punto de vista matemático, las pérdidas promedio anuales armonizan perfectamente bien con las curvas de pérdidas máximas probables (PML) de cada edificación. Se puede demostrar que las pérdidas promedio anuales de una edificación se pueden calcular como la suma de todas las pérdidas en que incurre una edificación,



pero ponderadas por su tasa de ocurrencia, esto es, la integral ponderada de la curva de PML.

Debido al contenido frecuencial de los eventos sísmicos, que como sabemos influye enormemente en el daño que estos infringen a los edificios, es perfectamente posible que para el evento escogido para calcular un escenario, una edificación particular no sufra daños pero que en promedio durante su vida esta edificación esté siendo afectada constantemente por otro tipo de eventos más recurrentes. Estas imprecisiones nada despreciables en el momento de estimar la distribución geográfica de pérdidas promedio, son las que motivan la propuesta de la estrategia adoptada por las compañías aseguradoras para describir el riesgo de cada edificación, y graficar, en lugar de los escenarios asociados a sismos particulares, la distribución geográfica de pérdidas promedio anuales.

Los escenarios de pérdidas promedio anuales se pueden presentar de dos maneras, ambas muy ilustrativas: o en valores de pérdidas, es decir, en pesos, o en porcentaje del valor de las pérdidas en relación con el valor actual de la infraestructura. Este último escenario se acerca al concepto puro de “riesgo sísmico” en cuanto que independiza el valor promedio de las pérdidas del valor de la infraestructura.

Establecida esta metodología para el cálculo de las pérdidas, estas pueden calcularse en función de daños en edificaciones y en líneas vitales y también en función de pérdidas humanas, es decir, en la evaluación de cantidades de personas afectadas.

### 10.3.1 Pérdida Máxima Probable (PML)

Aunque tradicionalmente se ha llamado pérdida máxima probable, PML, a la pérdida total asociada a un evento “poco probable”, una descripción rigurosa de las pérdidas se da a través de su tasa de excedencia, que no es otra cosa que una descripción probabilística de las pérdidas totales. De esta descripción es posible extraer información como la esperanza de la pérdida máxima si se abre una ventana de tiempo, o, en otras palabras, a cuál periodo de recurrencia corresponde una pérdida de determinado porcentaje.

La tasa de excedencia de pérdidas para una fuente particular,  $v(p)$ , se escribe como se presenta a continuación:

$$v(p) = \lambda_0 \int_M \int_0^\infty \Pr(\text{pérdida} > p/a) f_{A/M}(a/M) da \Big| f_M(M) dM \quad (10.1)$$

Donde,  $\lambda_0$  es la tasa de excedencia de magnitudes en la fuente y  $a$  es la aceleración producida en el sitio por la magnitud  $M$ .

Cuando se trata de las pérdidas sobre un conjunto de  $n$  bienes, la estrategia utilizada en este trabajo es estimar la esperanza de la pérdida total,  $ET(P)$ , como la suma de las esperanzas de las pérdidas individuales,  $Ei(P)$ , y estimar la variancia de la pérdida total,  $VarT(P)$ , como la variancia de la suma de variables aleatorias correlacionadas.

Después de calcular los parámetros,  $ET(P)$  y  $VarT(P)$ , que definen las pérdidas totales del conjunto de bienes, se calcula la tasa de excedencia de pérdidas de la misma forma que se hace para un solo bien.

Si se suman las tasas de excedencia de pérdidas de todas las fuentes sísmicas potencialmente dañinas para el conjunto de bienes en estudio, se obtiene la tasa total de excedencia de pérdidas. Esta curva es la representación probabilista de las pérdidas, considerando las pérdidas mayores o iguales a cada valor de pérdida como un proceso poissoniano con tasa de ocurrencia anual igual a  $\nu(p)$ .

### 10.3.2 Pérdida Promedio Anual (PPA)

Se define la pérdida promedio anual (PPA) como el promedio de las pérdidas anuales para un bien o grupo de bienes. La PPA de un proceso estocástico poissoniano con tasa de ocurrencia anual  $\lambda_0$ , está dada por:

$$PPA = \lambda_0 \cdot E(\text{Pérdida}) \quad (10.2)$$

$$E(\text{Pérdida}) = \int_0^{\infty} E(\text{Pérdida}/Sa) \cdot P_{Sa}(Sa) dSa \quad (10.3)$$

Donde,  $Sa$  es la aceleración espectral en la superficie en el periodo estructural correspondiente a la estructura que se está analizando.

### 10.3.3 Pérdidas Físicas en Edificaciones

Las pérdidas promedio anual se calculan en edificaciones y en líneas vitales. Para las primeras, el daño se relaciona con la deriva de cada tipología estructural, como respuesta ante movimientos del terreno.

La deriva se calcula con base en variables como el número de pisos, la tipología estructural, la edad de la edificación, el estrato socioeconómico, etc. Con base en la deriva se propone un nivel de daños y, a su vez, este nivel de daños se cuantifica en

términos de pérdida porcentual o directamente en valor de reposición. Este procedimiento se realiza por medio de un programa comercial para computador, el IE-RISS, desarrollado por EAFIT y la firma INTEGRAL S.A., cuyo uso está debidamente autorizado para este proyecto.

Para estimar las derivas de piso o distorsiones de entrepiso, se considera la estructura como un sistema de un sólo grado de libertad caracterizado por su periodo fundamental de vibración,  $T$ , la forma modal correspondiente,  $\phi$ , y la distribución relativa de masas en la altura. Suponiendo que se cuenta con estos tres elementos, la deriva del piso  $i$ ,  $\delta_i$ , se puede expresar como:

$$\delta_i = \frac{Sa(T) \cdot T^2}{4\pi^2} FP \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{h_i} \quad (10.4)$$

en donde la primera parte de la expresión representa el desplazamiento espectral,  $S_d(T)$ , en función del periodo de la estructura, y la segunda parte de la expresión,  $FP$ , representa el factor de participación, dado por:

$$FP = \frac{\phi^T \bar{M}}{\phi^T [M] \phi} \quad (10.5)$$

donde  $[M]$  y  $\bar{M}$  son la forma matricial y vectorial, respectivamente, de la distribución relativa de masas en altura.

Si la forma modal está normalizada al desplazamiento del último nivel, el producto  $S_d(T) FP$  resulta ser entonces el desplazamiento relativo del último nivel para la intensidad representada por el  $S_a(T)$  correspondiente.

La deriva del piso  $i$ ,  $\delta_i$ , se puede escribir en función del desplazamiento del último nivel de la estructura,  $\delta_T$ , como:

$$\delta_i = \delta_T \cdot \beta \quad (10.6)$$

donde:

$$\delta_T = \frac{S_d(T) FP}{H} \quad (10.7)$$

$H$  representa la altura total de la edificación y  $\beta$  está dado por:

$$\beta = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{h_i} H \quad (10.8)$$

Cuando no se tiene información detallada de la estructura que permita, a través de metodologías convencionales de dinámica estructural, establecer con precisión los parámetros involucrados, se propone el siguiente procedimiento aproximado para estimar las derivas de piso. Se considera en primer lugar que las estructuras como mínimo se definen en términos de cuatro variables fáciles de investigar y sobre las que se tienen mapas temáticos de las ciudades: Número de pisos,  $N_p$ , *Edad* de la edificación, *Uso* de la edificación y *Tipo* estructural.

Adicionalmente, se consideran las siguientes simplificaciones: en primer lugar, que la distribución de masas en la altura es uniforme, lo mismo que las alturas de entrepiso, suposiciones que no están muy alejadas de la realidad cuando se trata de edificaciones destinadas al mismo uso en todos sus niveles. La primera simplificación da como resultado que los elementos de la formulación para el cálculo del factor de participación se convierten en la matriz identidad y un vector de unos, respectivamente.

El periodo fundamental de vibración de la estructura se estima con la siguiente expresión, que es la que se especifica en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98, como primer estimado del periodo fundamental de una edificación:

$$T = C_t H^{3/4} \quad (10.9)$$

donde  $C_t$  es un coeficiente que depende del tipo estructural, una de las variables que se considera para definir la estructura, y está definido en el Artículo A.4.2.2 de las NSR-98.

La altura de la edificación  $H$  se puede escribir en este caso en función del número de pisos de la edificación,  $N_p$ , y la altura promedio de entrepisos,  $h$ . El periodo se puede escribir entonces como:

$$T = C_t (N_p h)^{3/4} \quad (10.10)$$

La altura promedio de entrepiso,  $h$ , se define en términos de las variables *Edad* y *Uso* de la edificación a través de una tabla producto de un análisis estadístico de una muestra de edificaciones en el país.

El modo fundamental de vibración,  $\phi$ , que aparece involucrado en el cálculo del factor de participación,  $FP$ , y en el cálculo del factor  $\beta$ , se estima mediante la configuración deformada que resulta de aplicar una carga triangular a una viga en voladizo en la que se considera variable la relación,  $\alpha$ , entre la participación de la deformación por cortante

y la deformación por flexión. La solución analítica a este problema fue publicada por Heidebrecht y Stafford (1973).

En este punto se está en condiciones de definir de manera aproximada la deriva elástica de piso para cualquiera de los pisos de una edificación en función de las cuatro variables fundamentales: *Edad*, *Uso*, *Número de pisos* y *Tipo* estructural, y obviamente, en función de la sollicitación, que en este caso está representada por la aceleración espectral,  $S_a(T)$ , a nivel de la superficie del suelo.

Para considerar el comportamiento no lineal de la estructura se utilizó la estrategia propuesta por Miranda (1999; 2000), según la cual, la relación entre el desplazamiento elástico y el desplazamiento inelástico de un sistema de un grado de libertad,  $\beta_3$ , es una función del periodo de la estructura,  $T$ , de la ductilidad,  $\mu$ , y del tipo de suelo; como se sabe, para periodos muy grandes, independientemente de la ductilidad, la relación del desplazamiento elástico al inelástico tiende a 1, de tal manera que  $\beta_3$  tiene en esta propuesta una forma funcional bien definida.

Si en estas expresiones propuestas por Miranda se introduce la relación de resistencia elástica de la estructura en términos de aceleración de diseño, a aceleración espectral solicitante,  $\gamma$ , se tiene:

$$\beta_3 = \mu\gamma \quad (10.11)$$

pudiéndose estimar la ductilidad demandada,  $\mu$ , en función del periodo de la estructura,  $T$ , de la relación de la resistencia proveída sobre la resistencia demandada,  $\gamma$ , y del tipo de suelo.

En definitiva, la deriva de piso considerando el comportamiento inelástico de la estructura,  $\delta_i$ , se estima como:

$$\delta_i = \mu\gamma\delta_e \quad (10.12)$$

La información sobre la resistencia proveída en términos de aceleración se estima en función de la edad de la edificación, relacionando ésta con la vigencia de los códigos para diseño sísmico de la época, o de la práctica profesional en el momento.

Para estimar el daño el programa IE-RISS considera la siguiente forma funcional o función de vulnerabilidad:

$$E(D) = 1 - 0,5 \left( \frac{\delta_i}{\delta} \right)^p \quad (10.13)$$

Donde  $E( )$  representa el operador Esperanza,  $D$  representa el porcentaje de daño,  $\delta_i$  representa la deriva de entrepiso,  $\bar{\delta}$  es un parámetro de la expresión que representa la deriva de entrepiso para que se presente un daño del 50%, y finalmente,  $\rho$  es otro parámetro de la expresión que debe obtenerse por algún método de calibración.

Para un tipo de edificación particular es necesario entonces definir los dos parámetros de los que depende la función de vulnerabilidad.  $\bar{\delta}$  tiene un significado físico claro, pero  $\rho$  no lo tiene. Se ha optado entonces en el programa por reparametrizar la ecuación en términos de la deriva y el daño correspondiente, en dos estados cualquiera:  $(ED_1, \delta_1)$  y  $(ED_2, \delta_2)$ , y en términos de éstos calcular  $\bar{\delta}$  y  $\rho$ , y definir completamente la función de vulnerabilidad.

El daño asociado a una deriva particular es una variable aleatoria: la ecuación 10.13, define su media. La función de densidad de probabilidad del daño se considera con forma Beta, debido, en primer lugar, a que en su forma estándar tiene un intervalo entre 0 y 1, y, en segundo lugar, a su versatilidad para representar muchas formas diferentes.

Para el cálculo de la desviación del daño,  $\sigma(D)$ , se propone lo siguiente:

$$\sigma(D) = 4\sigma(0,5)E(D)(1 - E(D)) \quad (10.14)$$

La desviación del daño es función de la Esperanza del daño, de tal manera que es igual a cero para los daños extremos: nulo y total, y es máximo para una Esperanza del daño igual a 0,5,  $\sigma(0,5)$ . Esta desviación es el parámetro que define la incertidumbre del daño.

De la ecuación 10.14 se puede deducir la expresión para el coeficiente de variación. Este resulta igual a:

$$CV(D) = 4\sigma(0,5)(1 - E(D)) \quad (10.15)$$

entonces,

$$\sigma(0,5) = \frac{CV(0,5)}{2} \quad (10.16)$$

Esta ecuación ayuda a proponer un valor razonable para la desviación asociada a un daño igual a 0,5. Independientemente de la estructura, se propone entonces para  $CV(0,5)$  un valor igual a 0,5, es decir, que  $\sigma(0,5)$  es igual a 0,25.

Ahora, para definir la Esperanza del daño dada la deriva de entrepiso, y de acuerdo con el procedimiento descrito en párrafos anteriores, se proponen derivas para dos niveles de daños:

**Tabla 10.3. Derivas para cada tipo estructural para el 0,10% y el 80% de daño.**

Tipo estructural	$\delta(0,001)$	$\delta(0,80)$
Mampostería no reforzada	0,001	0,0048
Mampostería reforzada	0,001	0,015
Concreto reforzado con muros de mampostería adosados	0,0015	0,023

**Tabla 10.3. Derivas para cada tipo estructural para el 0,10% y el 80% de daño (Cont.)**

Tipo estructural	$\delta(0,001)$	$\delta(0,80)$
Concreto reforzado sin muros de mampostería adosados	0,002	0,0285
Muros de concreto reforzado	0,002	0,0285
Acero con muros de mampostería adosados	0,0015	0,023
Acero sin muros de mampostería adosados	0,002	0,0285

Así, finalmente, los parámetros de la ecuación pueden escribirse en términos de las dos derivas,  $(\delta_1, \delta_2)$ , y de los dos niveles de daño  $(D_1, D_2)$ , como:

$$\rho = \frac{\ln\left(\frac{\ln(1,0 - D_1)}{\ln(1,0 - D_2)}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)} \quad (10.17)$$

$$\bar{\delta} = \exp\left(\frac{\rho \ln(\delta_1) - \ln\left(\frac{\ln(1,0 - D_1)}{\ln(0,5)}\right)}{\rho}\right) \quad (10.18)$$

#### 10.3.4 Pérdidas Físicas en Líneas Vitales

Para las líneas vitales se utiliza exactamente el mismo procedimiento que para las edificaciones, sólo que en este caso el parámetro de intensidad que se relaciona con el daño no es la deriva sino la velocidad pico efectiva,  $PGV$ . Este parámetro, lo mismo que

las aceleraciones espectrales, se estima directamente de ecuaciones de atenuación propias, en función de la magnitud y la distancia a la fuente, y de las funciones de amplificación debidas a efectos locales producidos por depósitos blandos de suelo. Para este trabajo se usaron las ecuaciones de atenuación sobre *PGV* de Akkar y Bommer (2007).

Las funciones de daño o funciones de vulnerabilidad como se les conoce en la literatura sobre el tema, utilizadas para líneas vitales, se tomaron de la metodología contenida en el programa para computador HAZUS, desarrollado por la Agencia Federal de Manejo de Emergencias, FEMA (Federal Emergency Management Agency, 1999). Las funciones se describen con las siguientes ecuaciones, en función de la fragilidad de las tuberías que conforman las líneas vitales:

$$\text{Tuberías frágiles: } \text{Daños / km} = 0,0001(PGV(\text{cm / s}))^{2,25} \quad (10.19)$$

$$\text{Tuberías dúctiles: } \text{Daños / km} = 0,00003(PGV(\text{cm / s}))^{2,25} \quad (10.20)$$

En términos de la forma funcional del IE-RISS, las funciones de vulnerabilidad de los dos tipos de tubería resultan ser:

Tubería Frágil:

$$PGV(5,62341E-07)=0.1 \text{ cm/s} \quad PGV(0,084589701)=20 \text{ cm/s} \quad (10.21)$$

Tubería Dúctil:

$$PGV(1,68702E-07)=0.1 \text{ cm/s} \quad PGV(0,02537691)=20 \text{ cm/s} \quad (10.22)$$

Como los “daños” en este caso son tan cercanos a “cero”, el coeficiente de variación en el intervalo es aproximadamente constante. Un valor razonable para este coeficiente de variación es 1,0, con lo que se especifica  $\sigma(0,5)=0,25$ .

### 10.3.5 Pérdidas Humanas

Para estimar las pérdidas humanas es necesario contar con información del nivel de ocupación de cada inmueble. Éste se estima como el producto del área de la vivienda por la densidad de ocupación, en la noche y en el día, que es función del uso de la edificación y del estrato socioeconómico.

Las pérdidas humanas se clasifican de acuerdo con su severidad, desde heridas leves que no requieren hospitalización, hasta la muerte instantánea. Esta clasificación se basa en la propuesta del programa HAZUS que se presenta en la Tabla 10.4.



**Tabla 10.4. Niveles de afectación**

<b>Nivel de severidad de la afectación</b>	<b>Descripción de la afectación</b>
1	Heridas que requieren asistencia médica básica pero sin hospitalización
2	Heridas que requieren mayor asistencia médica y hospitalización, pero que no amenazan la vida.
3	Heridas que representan una amenaza inmediata a la vida si no se tratan adecuadamente y con celeridad. La mayoría de estas heridas son causa de colapso estructural.
4	Muerte instantánea o heridas fatales.

Como en el caso de daños, los resultados en este caso se dan como curvas de PML que relacionan porcentaje de afectados en cada nivel contra periodo de retorno. Estas curvas después se pueden multiplicar por el número de personas en la ciudad o en el área metropolitana, y se obtiene la curva de PML en número de personas. Similarmente, las pérdidas promedio anual pueden darse en porcentaje o en valor para cada predio.

Para establecer las funciones de vulnerabilidad de personas afectadas se usan las tasas de ocurrencia que sugiere el HAZUS, pero en lugar de asociarlas con niveles de daños cualitativos, como lo hace ese programa, se asocian a niveles de daño cuantitativos de acuerdo con las equivalencias de la Tabla 10.5.

**Tabla 10.5. Niveles cuantitativos y cualitativos de daño**

<b>Estado de daño</b>	<b>Daño, %</b>
Leve	5
Moderado	20
Severo	45
Completo	80

El HAZUS propone para cada estado de daño y para cada tipo de edificación, un porcentaje de afectados, que depende del nivel de afectación. Para cada uno de los grados de afectación que se indican en la Tabla 10.4 y para diferentes tipos de edificaciones, el HAZUS propone los siguientes porcentajes de ocurrencia:

**Tabla 10.6. Tasas de afectación en edificaciones de mampostería no reforzada**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,4	0,04	0	0
severo	2	0,2	0,002	0,002
completo	20	4	0,515	0,515

**Tabla 10.7. Tasas de afectación en edificaciones de mampostería reforzada**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,2	0,02	0	0
severo	1	0,1	0,001	0,001
completo	14	2,8	0,408	0,408

**Tabla 10.8. Tasas de afectación en edificaciones de concreto reforzado con muros de mampostería adosados**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,2	0,02	0	0
severo	1	0,1	0,001	0,001
completo	14	2,8	0,408	0,408

**Tabla 10.9. Tasas de afectación en edificaciones de concreto reforzado sin muros de mampostería adosados**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,2	0,02	0	0
severo	1	0,1	0,001	0,001
completo	11,75	2,35	0,3085	0,3085

**Tabla 10.10. Tasas de afectación en edificaciones de muros de concreto reforzado**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,2	0,02	0	0
severo	1	0,1	0,001	0,001
completo	11,75	2,35	0,3085	0,3085

**Tabla 10.11. Tasas de afectación en edificaciones de acero con muros de mampostería adosados**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,2	0,02	0	0
severo	1	0,1	0,001	0,001
completo	14	2,8	0,408	0,408

**Tabla 10.12. Tasas de afectación en edificaciones de acero sin muros de mampostería adosados**

Estado de daño	% afectación 1	% afectación 2	% afectación 3	% afectación 4
leve	0,05	0,005	0	0
moderado	0,2	0,02	0	0
severo	1	0,1	0,001	0,001
completo	11,75	2,35	0,3085	0,3085

Para cada nivel de afectación se puede ajustar la Esperanza de la función de vulnerabilidad con los valores extremos y proponer un valor para la desviación semejante al que se utiliza para los daños. Para la determinación de la curva de vulnerabilidad de cada grado de afectación el límite superior se fijó en un 10% por encima del valor de ocurrencia reportado por el HAZUS para un estado de daño completo.

Si se consideran los niveles de daño definidos en la Tabla 10.3 y las funciones de vulnerabilidad para los diferentes tipos de edificaciones, definidas en la Tabla 10.1, se tiene entonces que las funciones de vulnerabilidad para los diferentes grados de afectación a las personas resultan ser:

**Tabla 10.13. Funciones de vulnerabilidad de afectación a personas**

Tipo de Edificación	Afectación 1	Afectación 2	Afectación 3	Afectación 4
Mampostería no reforzada	$\delta(0,0005)=0,001588$ $\delta(0,20)=0,004791$	$\delta(0,00005)=0,001588$ $\delta(0,04)=0,004791$	$\delta(0,00002)=0,003488$ $\delta(0,00515)=0,004791$	$\delta(0,00002)=0,003488$ $\delta(0,00515)=0,004791$
Mampostería reforzada	$\delta(0,0005)=0,0011701$ $\delta(0,14)=0,01520674$	$\delta(0,00005)=0,0011701$ $\delta(0,028)=0,01520674$	$\delta(0,00001)=0,007272$ $\delta(0,00408)=0,0152067$	$\delta(0,00001)=0,007272$ $\delta(0,00408)=0,0152067$
Concreto reforzado con muros de mampostería adosados	$\delta(0,0005)=0,0017552$ $\delta(0,14)=0,02281011$	$\delta(0,00005)=0,0017552$ $\delta(0,028)=0,02281011$	$\delta(0,00001)=0,0109168$ $\delta(0,00408)=0,0228101$	$\delta(0,00001)=0,0109168$ $\delta(0,00408)=0,0228101$

**Tabla 10.13. Funciones de vulnerabilidad de afectación a personas (Cont)**

Tipo de Edificación	Afectación 1	Afectación 2	Afectación 3	Afectación 4
Concreto reforzado sin muros de mampostería adosados	$\delta(0,0005)=0,0031521$ $\delta(0,1175)=0,0286964$	$\delta(0,00005)=0,0031521$ $\delta(0,0235)=0,0286964$	$\delta(0,00001)=0,01521141$ $\delta(0,003085)=0,028696$	$\delta(0,00001)=0,01521141$ $\delta(0,003085)=0,028696$
Muros de concreto reforzado	$\delta(0,0005)=0,0031521$ $\delta(0,1175)=0,0286964$	$\delta(0,00005)=0,0031521$ $\delta(0,0235)=0,0286964$	$\delta(0,00001)=0,0152114$ $\delta(0,003085)=0,028696$	$\delta(0,00001)=0,0152114$ $\delta(0,003085)=0,028696$
Acero con muros de mampostería adosados	$\delta(0,0005)=0,0017552$ $\delta(0,14)=0,02281011$	$\delta(0,00005)=0,0017552$ $\delta(0,028)=0,02281011$	$\delta(0,00001)=0,0109168$ $\delta(0,00408)=0,0228101$	$\delta(0,00001)=0,0109168$ $\delta(0,00408)=0,0228101$
Acero sin muros de mampostería adosados	$\delta(0,0005)=0,0031521$ $\delta(0,1175)=0,0286964$	$\delta(0,00005)=0,0031521$ $\delta(0,0235)=0,0286964$	$\delta(0,00001)=0,01521141$ $\delta(0,003085)=0,028696$	$\delta(0,00001)=0,01521141$ $\delta(0,003085)=0,028696$

Finalmente, de forma similar al caso de las pérdidas físicas, debido al valor tan bajo de los “daños”, entonces, el coeficiente de variación para el intervalo de interés de los daños es aproximadamente constante e igual a  $4\sigma(0,5)$ . Un valor razonable para este coeficiente de variación es 1,0, con lo que se especifica:  $\sigma(0,5)=0,25$ .

## 10.4 RESULTADOS

### 10.4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis de riesgo para todos los municipios del Valle de Aburrá.

Con el fin de una mejor comprensión de los resultados en la Tabla 10.14 se presentan los valores considerados en los cálculos para el costo de las edificaciones y el número de habitantes de cada municipio.

La población de cada municipio fue obtenida del Censo General realizado en el año 2005 por el departamento Nacional de Estadística - DANE.

Para el análisis de riesgo sólo se utilizaron datos de población urbana en cada uno de los municipios analizados, ya que el alcance de este estudio sólo incluía las áreas urbanas y zonas de expansión.

Para estimar el valor de las edificaciones se obtuvieron inicialmente los precios promedio por metro cuadrado de mercado, en función del uso y del estrato de la edificación (Tabla 10.2) los cuales fueron tomados de revistas especializadas de venta de inmuebles. Para la determinación del valor de la cartera en cada uno de los municipios se estimó la distribución probabilística de la zona en función del número de

pisos, el estrato, el sistema estructural y el uso de la edificación. Con base en la probabilidad y a la cuantía por metro cuadrado reportado, el valor de la cartera se evalúa como:

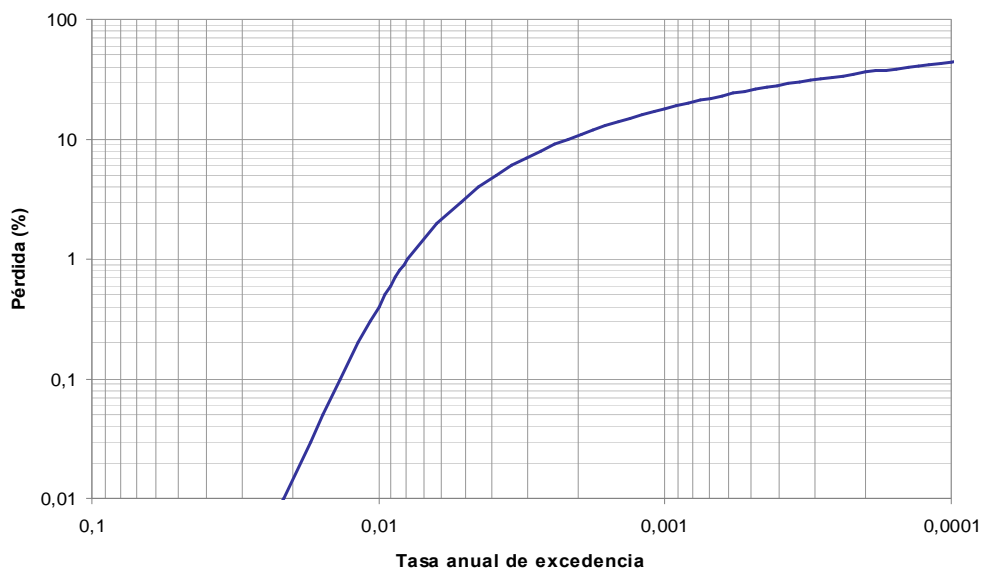
$$Valor\ Cartera = \sum probabilidad \times \frac{precio}{m^2} \times Área \quad (10.23)$$

**Tabla 10.14 Valor de las edificaciones y número de habitantes para cada municipio**

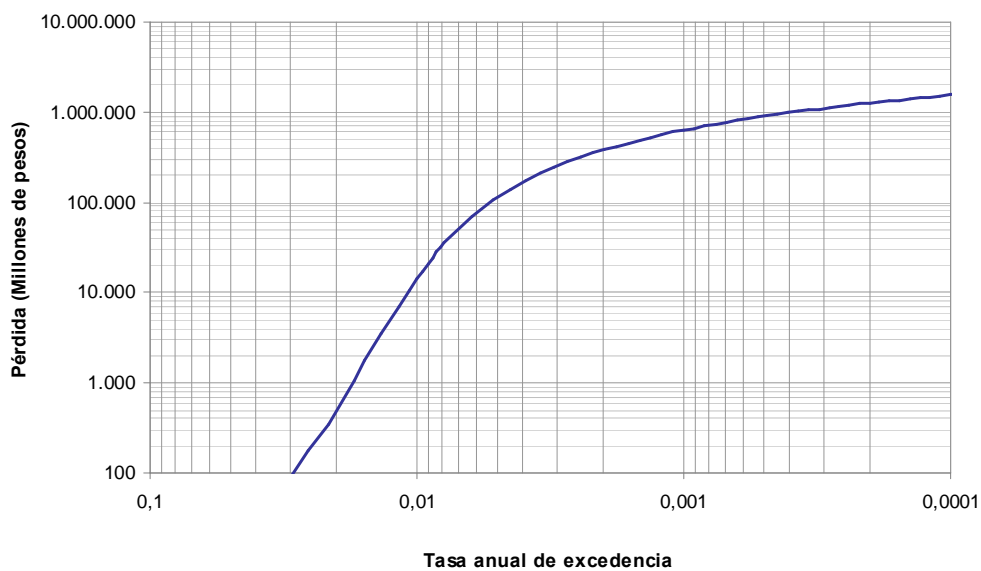
Municipio	Valor de las edificaciones (Millones de pesos)	Número de habitantes
Barbosa	3 507 783	18 721
Bello	23 344 846	359 404
Caldas	2 901 487	52 632
Copacabana	6 547 303	53 033
Envigado	28 371 306	166 742
Girardota	4 004 300	25 201
Itagüí	21 657 242	209 498
La Estrella	4 445 154	28 538
Medellín	454 725 230	2 187 356
Sabaneta	6 253 885	35 528

#### 10.4.2 Barbosa

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.6 y 10.7 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Barbosa, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.15 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.6 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Barbosa**



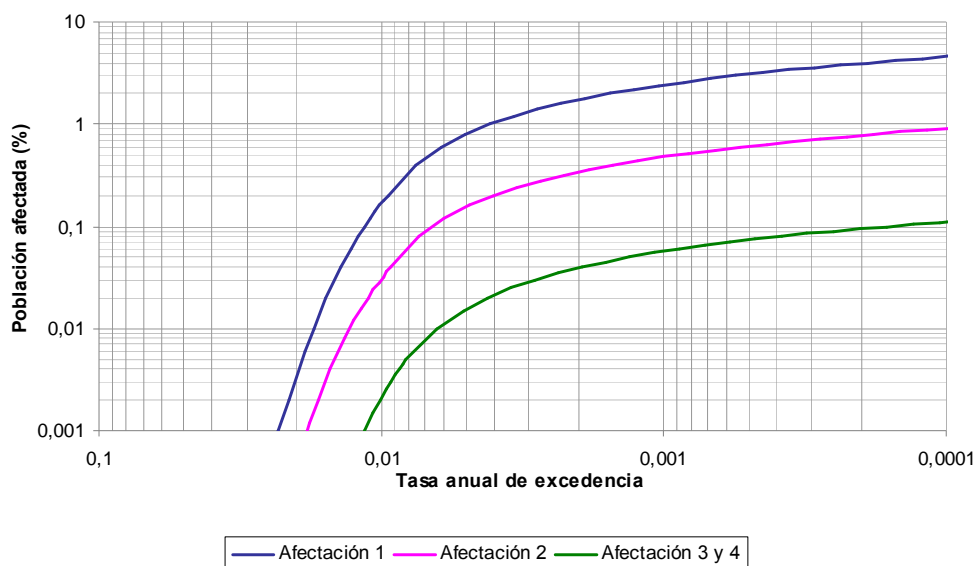
**Figura 10.7 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Barbosa**

**Tabla 10.15 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Barbosa para periodos de exposición de 50 y 100 años**

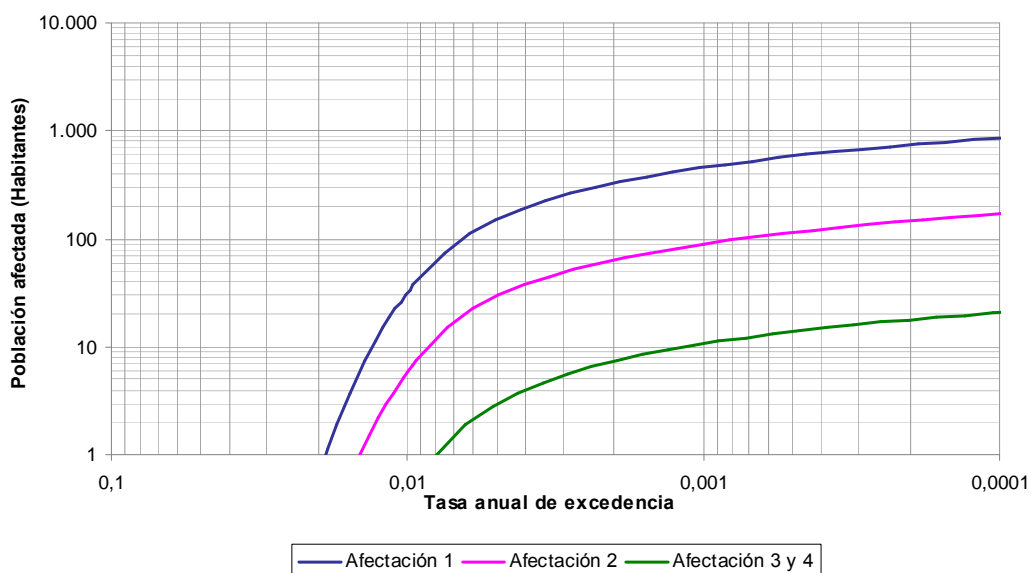
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,39	13 814	39,5	63,4
2,0E-03	500	10,85	380 755	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	17,99	631 012	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	28,15	987 556	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	36,07	1 265 259	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	43,99	1 543 123	0,5	1,0

La manera de interpretar estos resultados es que por ejemplo se obtendría en promedio cada 100 años una pérdida del 0,39% de las edificaciones debido a fenómenos sísmicos, lo que correspondería a unos 13 814 millones de pesos (pesos del año 2006). Otra manera de interpretar estos resultados es que por ejemplo para una vida útil de una edificación de 50 años la probabilidad de que las pérdidas excedan el 10,85% es del 9,5%, mientras que para una vida útil de 100 años la probabilidad de exceder una pérdida del 10,85% es del 18,1%. Análisis similares pueden hacerse para cada uno de los municipios, en relación con las pérdidas de edificaciones debidas a sismos.

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.8 y 10.9 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Barbosa, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.16 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.8 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Barbosa**



**Figura 10.9 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Barbosa**

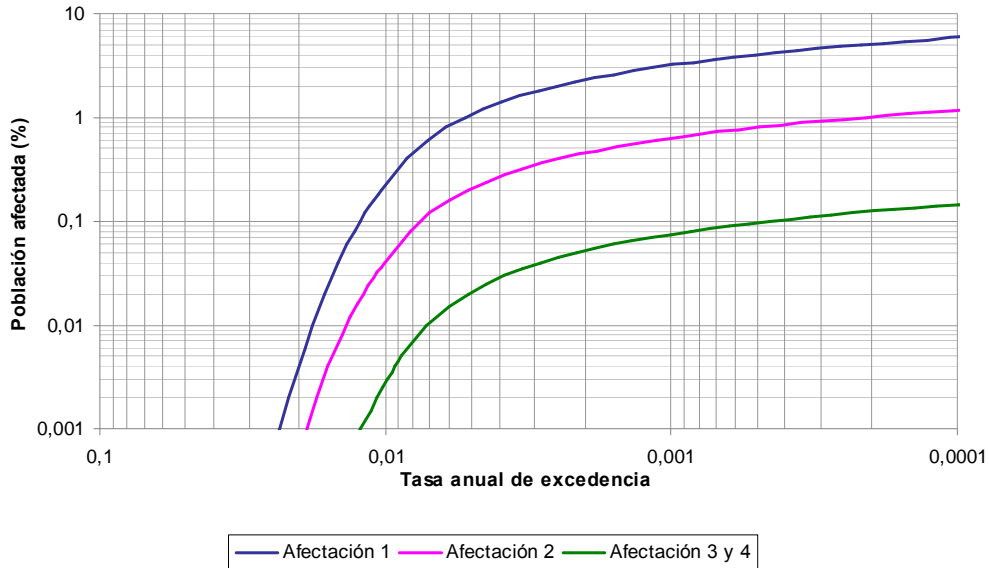


**Tabla 10.16 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Barbosa para periodos de exposición de 50 y 100 años**

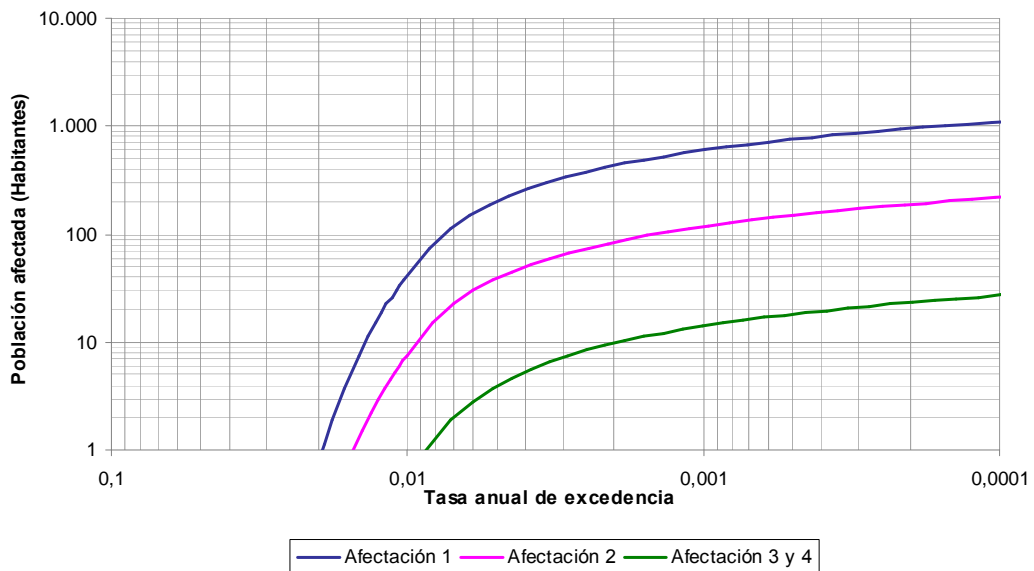
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los niveles de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los niveles de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,17	0,03	0,00	32	6	0	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,75	0,34	0,04	328	65	7	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	2,44	0,48	0,06	456	90	11	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	3,31	0,65	0,08	620	123	15	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	3,95	0,78	0,10	740	147	18	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	4,58	0,91	0,11	857	170	21	0,5	1,0

La interpretación de estos resultados puede hacerse, por ejemplo, diciendo que en promedio cada 1000 años un 2,44% de la población sufrirá niveles de afectación leves, un 0,48% afectación seria y un 0,06% de la población sufrirá afectación severa o incluso la muerte, debido a eventos sísmicos, lo que representa aproximadamente 456, 90 y 11 personas, respectivamente. También puede decirse que si una persona vive en promedio 50 años tiene un 4,9% de probabilidades de tener algún tipo de lesión debido a un sismo. Análisis similares pueden hacerse para los demás municipios, tanto para eventos sísmicos que ocurran de día como de noche.

En la Figuras 10.10 y 10.11 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Barbosa, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.17 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.10 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Barbosa**

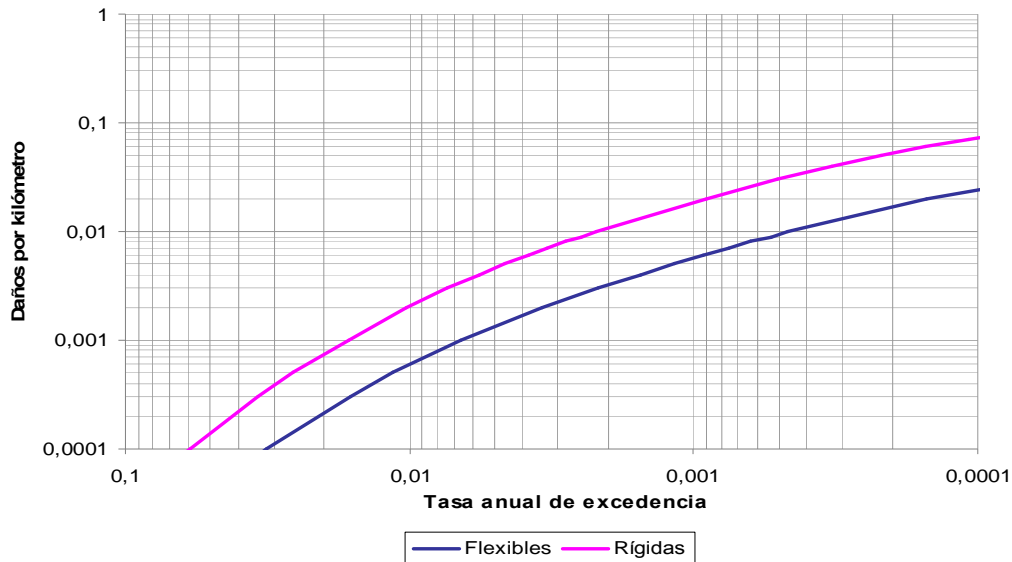


**Figura 10.11 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Barbosa**

**Tabla 10.17 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Barbosa para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,23	0,04	0,00	44	8	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	2,31	0,45	0,05	432	85	10	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	3,18	0,63	0,08	596	118	14	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	4,29	0,85	0,10	803	159	19	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	5,09	1,01	0,12	954	189	23	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	5,87	1,17	0,14	1 100	219	27	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.12 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Barbosa. Igualmente, en la Tabla 10.18 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.12 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Barbosa**

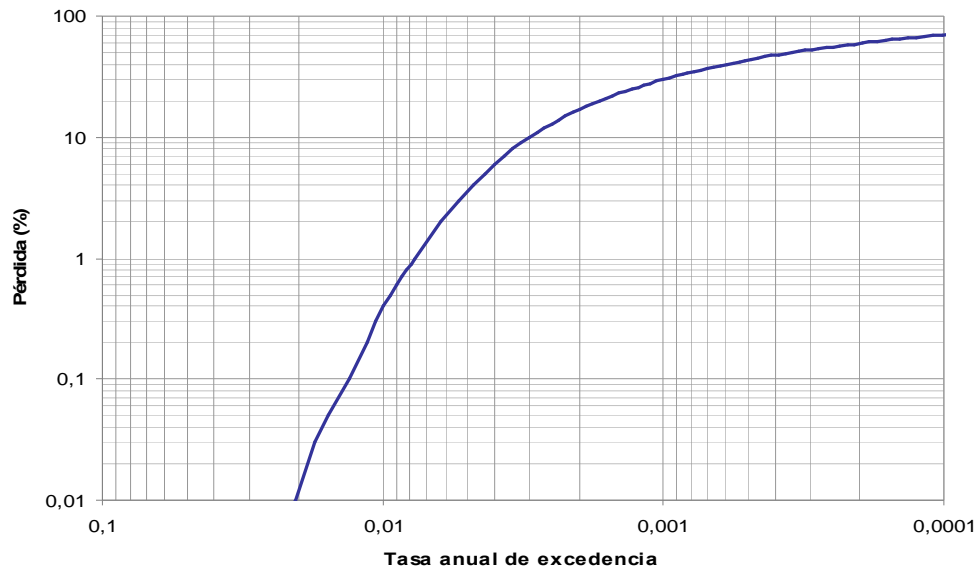
**Tabla 10.18 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Barbosa en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0021	0,0006	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0115	0,0033	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0192	0,0057	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0359	0,0120	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0529	0,0184	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0724	0,0257	0,5	1,0

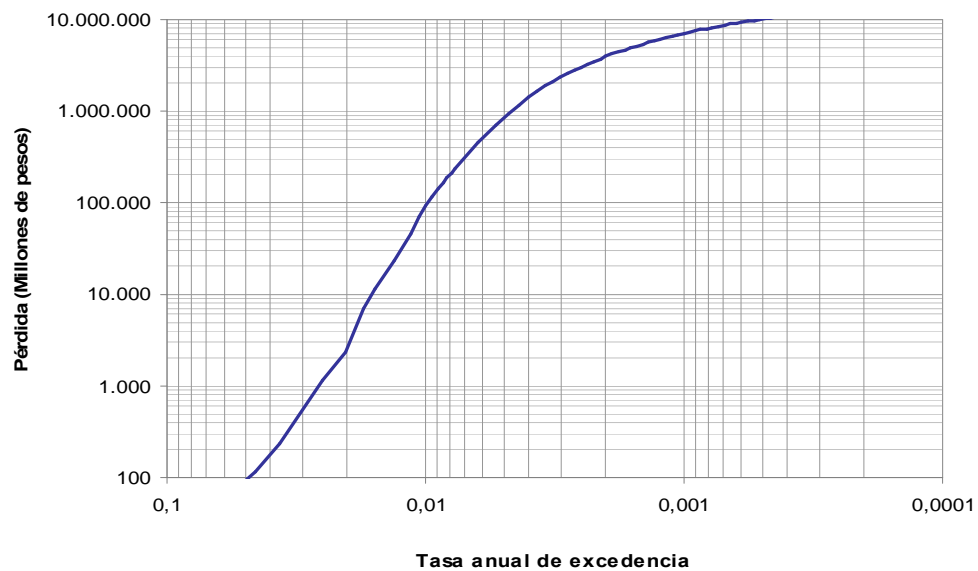
Con relación a los daños en tuberías, los resultados pueden interpretarse en el sentido de que en promedio cada 500 años se obtendrían 0,0115 daños por kilómetro en tuberías rígidas y 0,0033 daños por kilómetros en tuberías flexibles, o sea que en 100 km de tuberías se tendrían 1,15 daños en redes rígidas y 0,33 en redes flexibles, o lo que es lo mismo, un daño cada 87 km para redes rígidas o un daño cada 300 km para redes flexibles. Así mismo, puede decirse que si una tubería tiene una vida útil promedio de 50 años tendrá una probabilidad del 39,5% de que se presenten 0,0021 daños por kilómetro en tuberías rígidas o del 2,0% de que se presenten 0,0359 daños por kilómetro en el mismo tipo de tuberías. Este mismo tipo de análisis puede hacerse para los demás municipios en relación con los probables daños en tuberías rígidas y flexibles debidos a sismo.

#### 10.4.3 Bello

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.13 y 10.14 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Bello, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.19 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.13 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Bello**

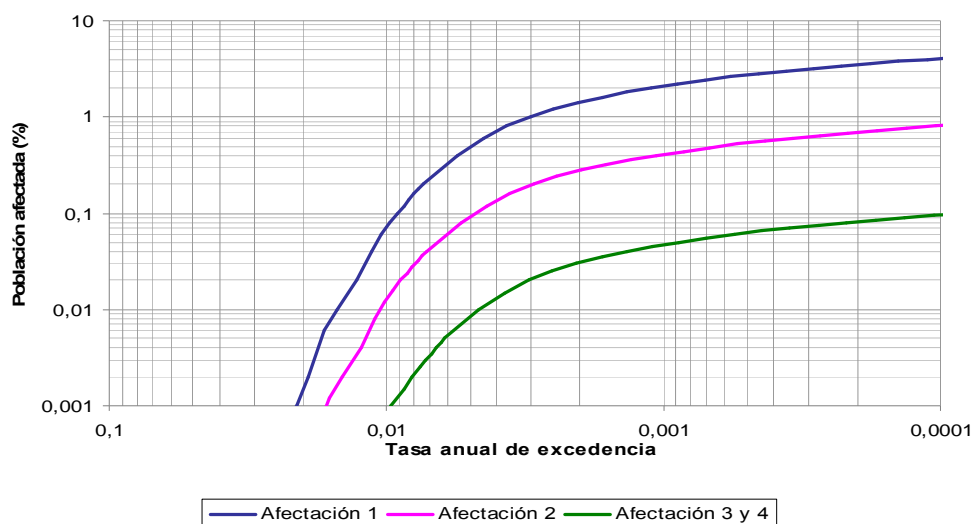


**Figura 10.14 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Bello**

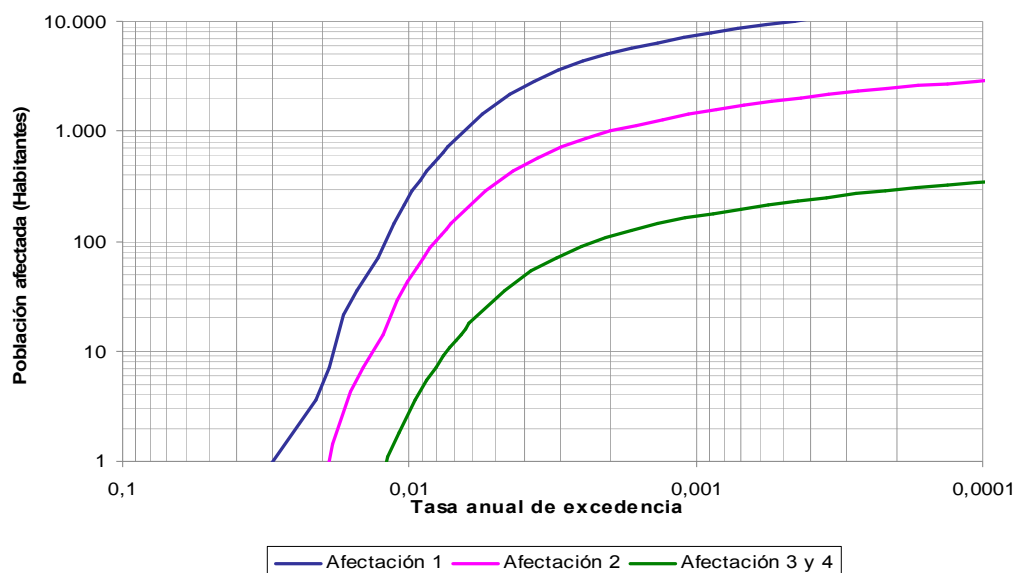
**Tabla 10.19 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Bello para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,39	91 240	39,5	63,4
2,0E-03	500	16,98	3 965 061	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	30,09	7 025 284	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	47,54	11 098 430	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	59,68	13 932 028	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	70,29	16 408 522	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.15 y 10.16 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Bello, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.20 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.15 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Bello**

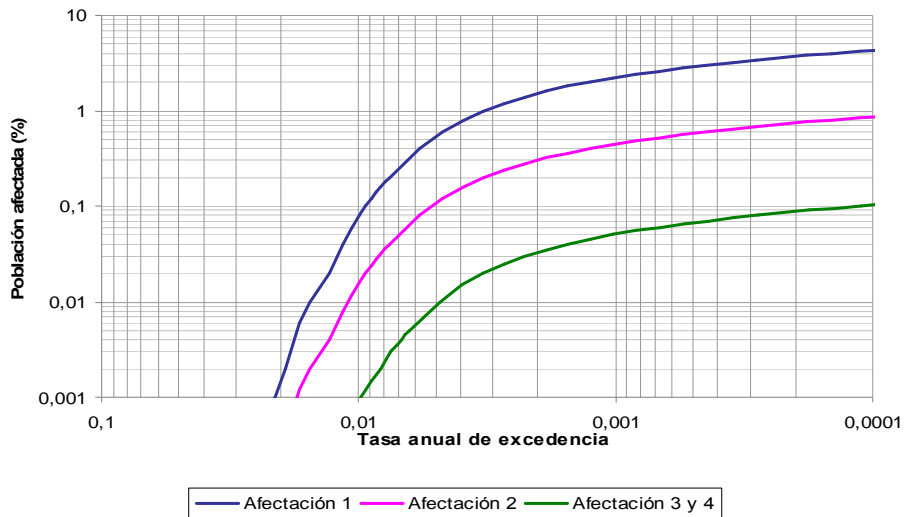


**Figura 10.16 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Bello**

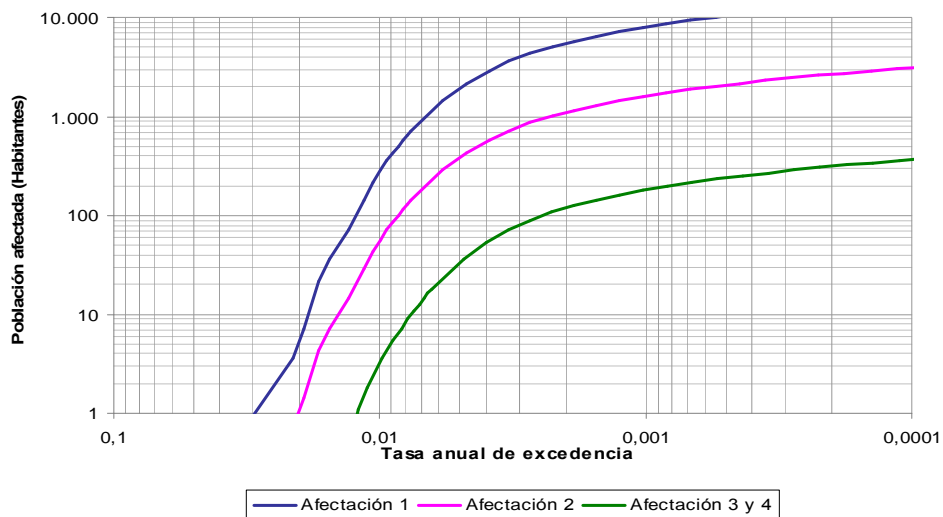
**Tabla 10.20 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Bello para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,07	0,01	0,00	260	46	3	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,43	0,28	0,03	5 128	1 001	111	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	2,10	0,41	0,05	7 534	1 478	169	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	2,92	0,57	0,07	10 493	2 066	242	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	3,51	0,69	0,08	12 633	2 491	294	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	4,09	0,81	0,10	14 715	2 906	345	0,5	1,0

En la Figuras 10.17 y 10.18 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Bello, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.21 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.17 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Bello**



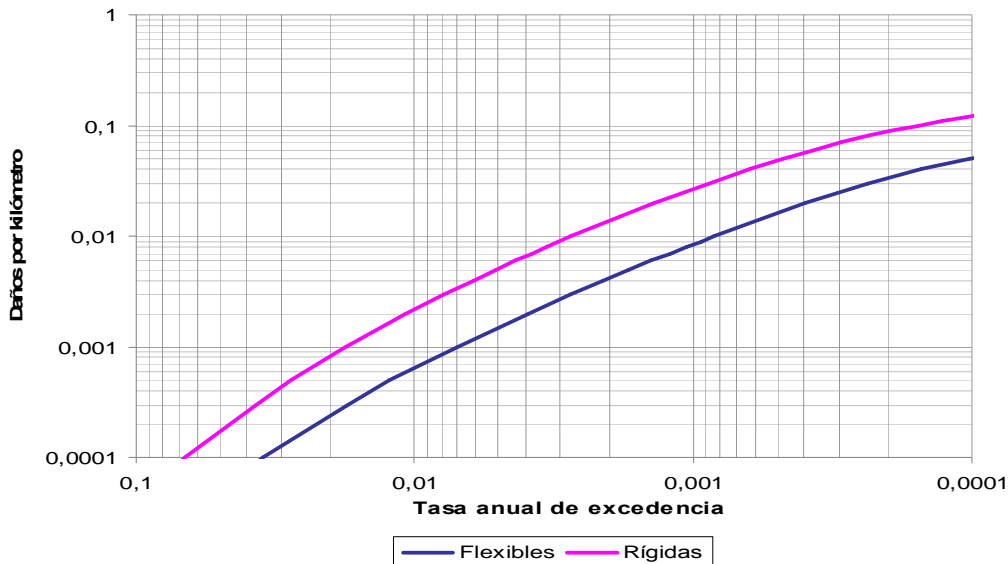
**Figura 10.18 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Bello**



**Tabla 10.21 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Bello para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,08	0,02	0,00	282	56	3	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,53	0,31	0,03	5 497	1 099	120	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	2,23	0,45	0,05	8 011	1 602	182	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	3,09	0,62	0,07	11 116	2 223	259	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	3,71	0,74	0,09	13 345	2 669	314	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	4,31	0,86	0,10	15 508	3 102	368	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.19 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Bello. Igualmente, en la Tabla 10.22 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



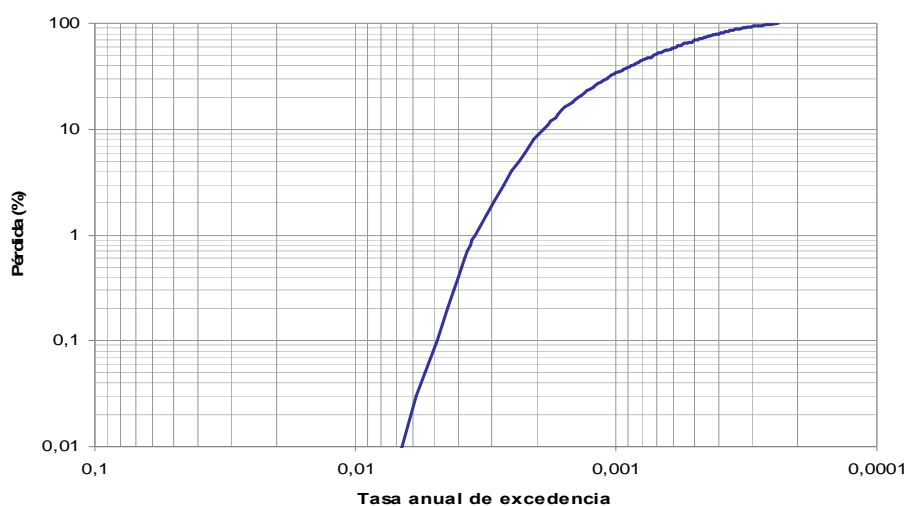
**Figura 10.19 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Bello**

**Tabla 10.22 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Bello en periodos de exposición de 50 y 100 años**

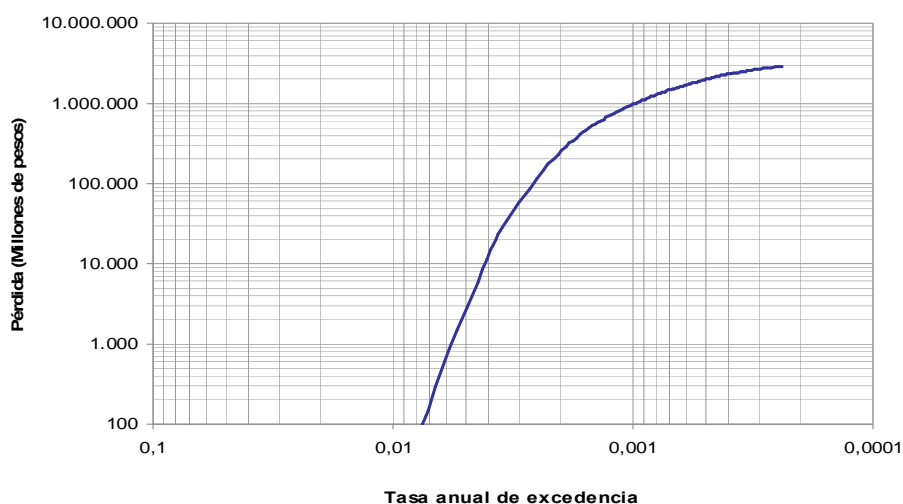
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0023	0,0007	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0155	0,0043	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0276	0,0085	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0572	0,0199	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0885	0,0344	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,1224	0,0504	0,5	1,0

#### 10.4.4 Caldas

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.20 y 10.21 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Caldas, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.23 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.20 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Caldas**

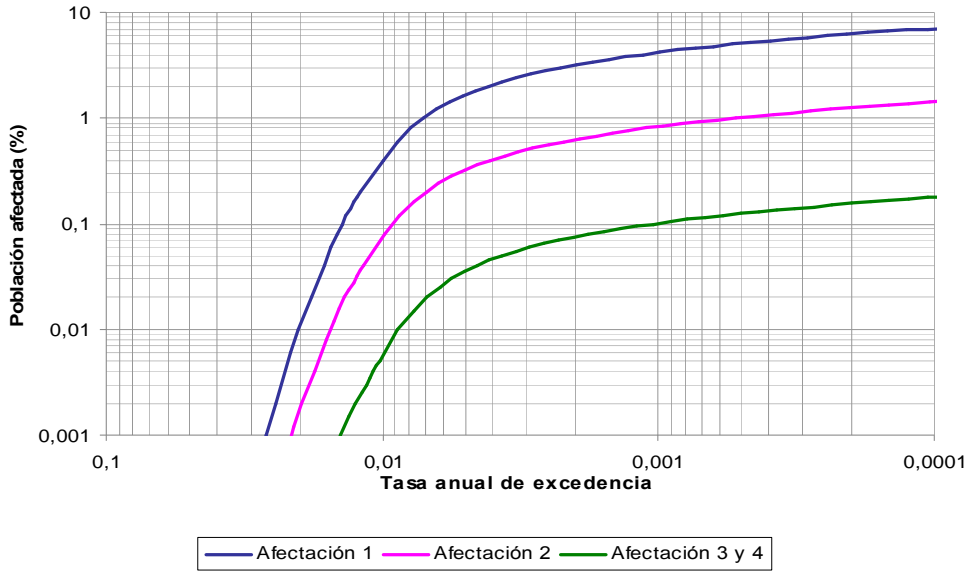


**Figura 10.21 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Caldas**

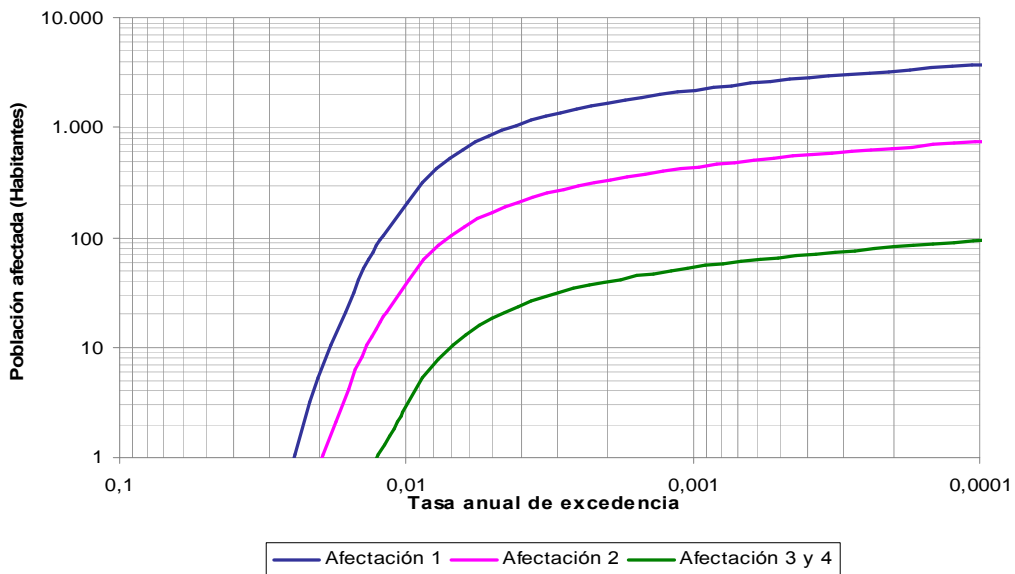
**Tabla 10.23 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Caldas para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,00	14	39,5	63,4
2,0E-03	500	8,62	250 207	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	33,72	978 332	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	80,39	2 332 367	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	99,17	2 877 295	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	99,58	2 889 391	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.22 y 10.23 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Caldas, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.24 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.22 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Caldas**

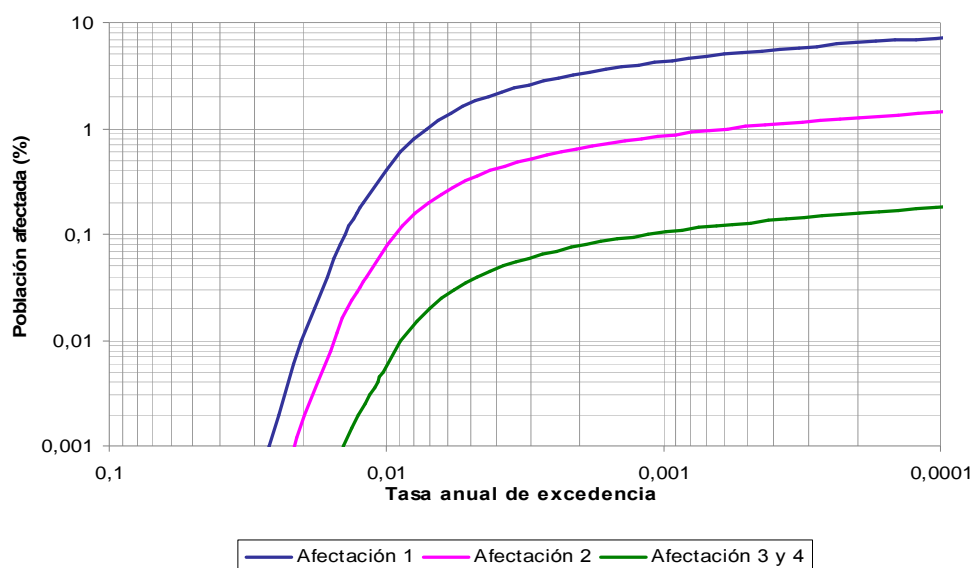


**Figura 10.23 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Caldas**

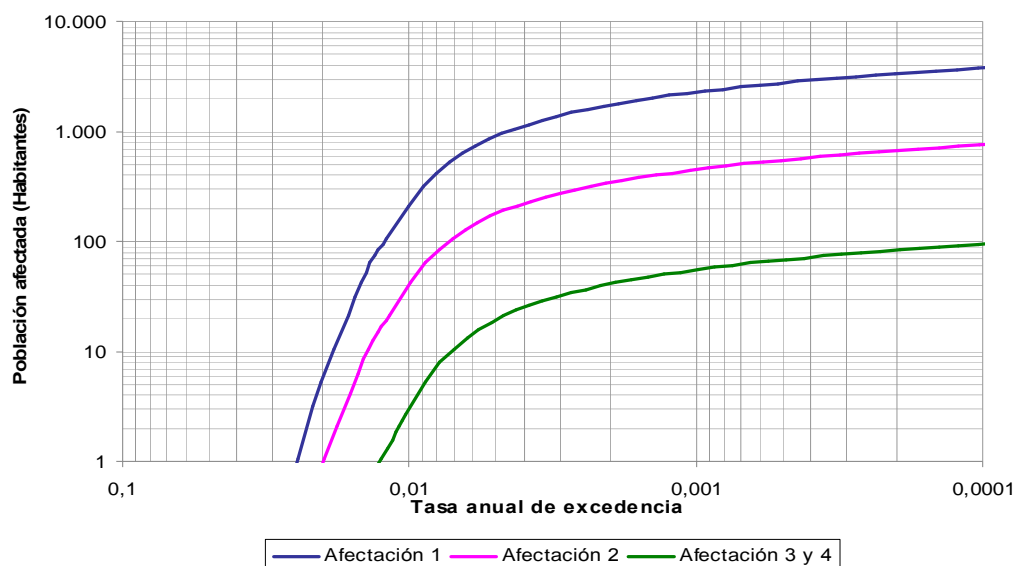
**Tabla 10.24 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Caldas para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,40	0,08	0,01	209	40	3	39,5	63,4
2,0E-03	500	3,19	0,63	0,08	1 677	332	40	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	4,18	0,83	0,10	2 201	436	53	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	5,39	1,07	0,13	2 836	564	70	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	6,25	1,24	0,16	3 287	655	82	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	7,07	1,41	0,18	3 723	743	93	0,5	1,0

En la Figuras 10.24 y 10.25 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Caldas, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.25 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.24 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Caldas**

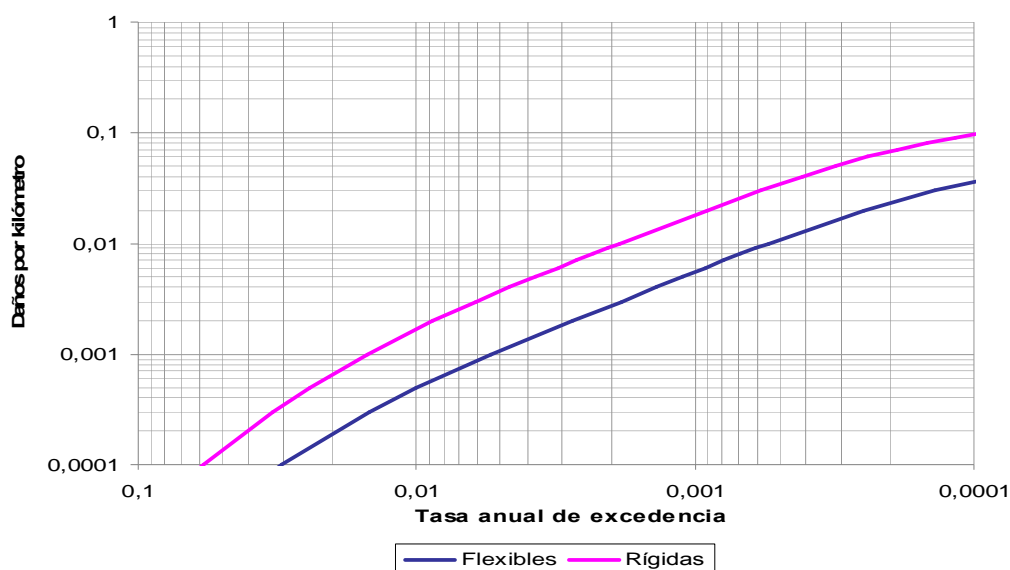


**Figura 10.25 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Caldas**

**Tabla 10.25 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Caldas para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,41	0,08	0,01	217	41	3	39,5	63,4
2,0E-03	500	3,29	0,65	0,08	1 729	342	41	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	4,31	0,85	0,10	2 266	449	55	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	5,54	1,10	0,14	2 915	579	72	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	6,41	1,28	0,16	3 373	672	84	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	7,25	1,45	0,18	3 817	762	95	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.26 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Caldas. Igualmente, en la Tabla 10.26 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.26 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Caldas**

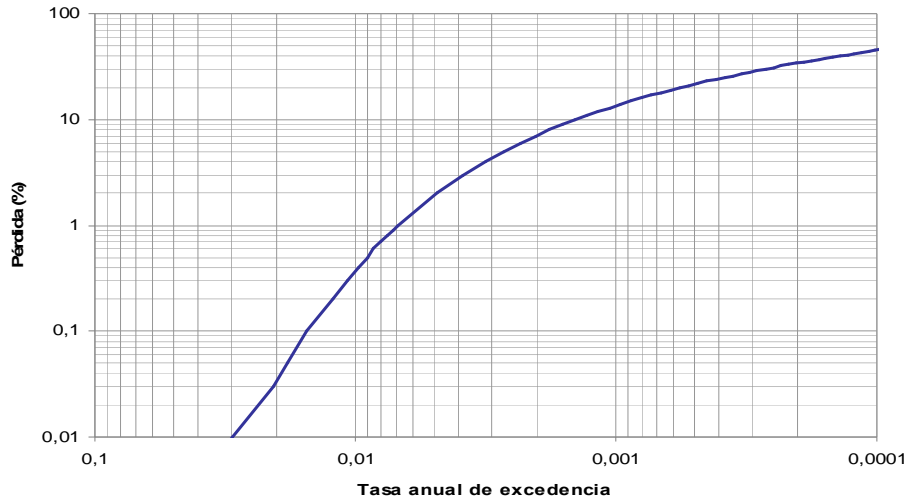
**Tabla 10.26 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Caldas en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0018	0,0005	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0093	0,0028	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0190	0,0056	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0414	0,0149	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0677	0,0244	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0971	0,0367	0,5	1,0

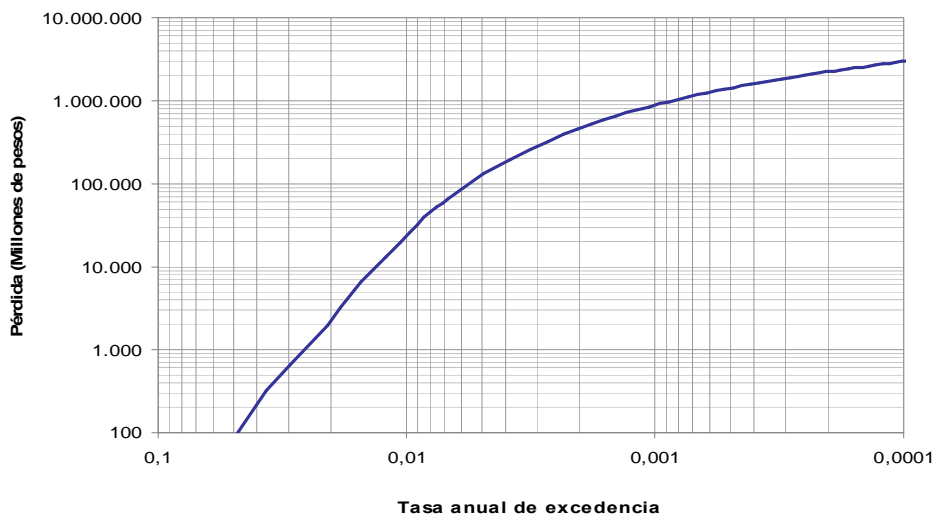
#### 10.4.5 Copacabana

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.27 y 10.28 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Copacabana, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.27

se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.27 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Copacabana**



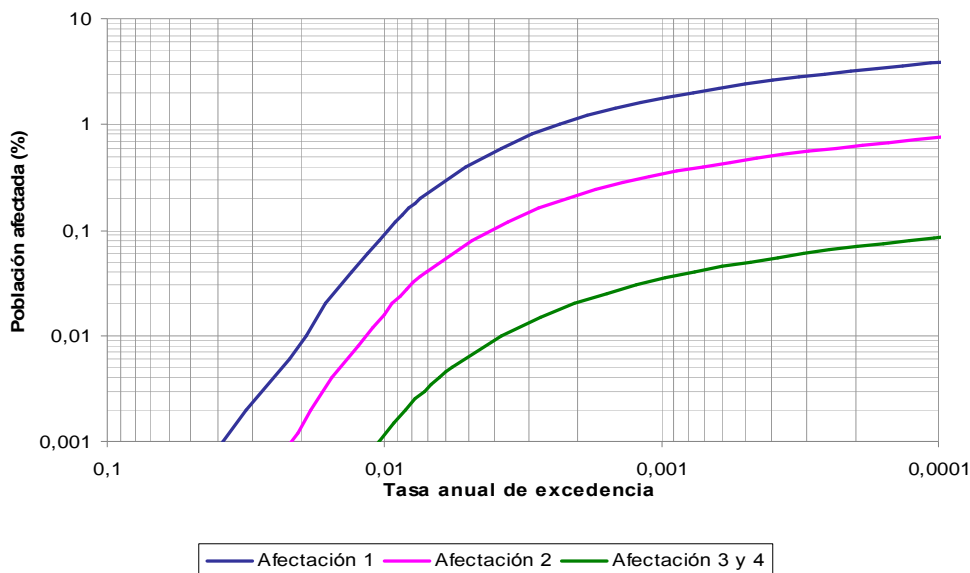
**Figura 10.28 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Copacabana**



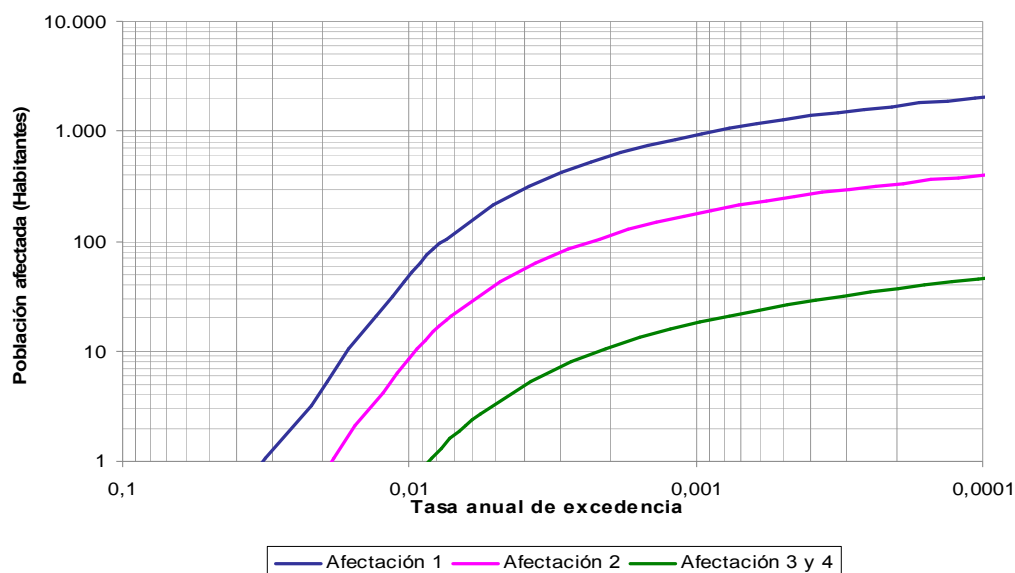
**Tabla 10.27 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Copacabana para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,37	24 332	39,5	63,4
2,0E-03	500	7,17	469 526	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	13,60	890 713	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	24,45	1 600 808	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	34,26	2 243 084	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	45,15	2 955 953	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.29 y 10.30 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Copacabana, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.28 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.29 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Copacabana**

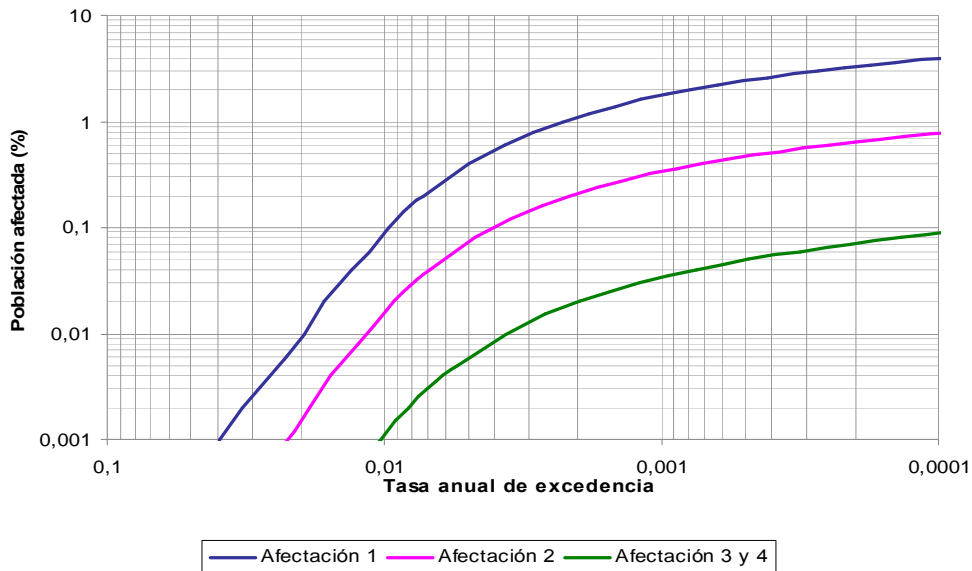


**Figura 10.30 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Copacabana**

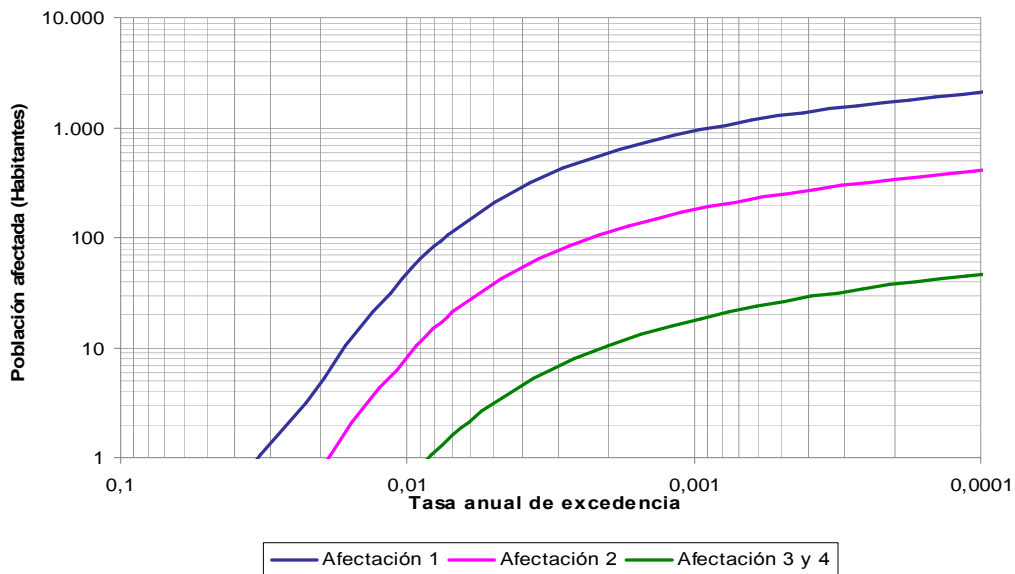
**Tabla 10.28 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Copacabana para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,09	0,02	0,00	49	9	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,14	0,22	0,02	602	115	11	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	1,76	0,34	0,03	933	180	18	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	2,60	0,50	0,05	1 378	268	29	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	3,24	0,63	0,07	1 717	334	37	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	3,87	0,76	0,09	2 052	401	46	0,5	1,0

En la Figuras 10.31 y 10.32 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Copacabana, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.29 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.31 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Copacabana**

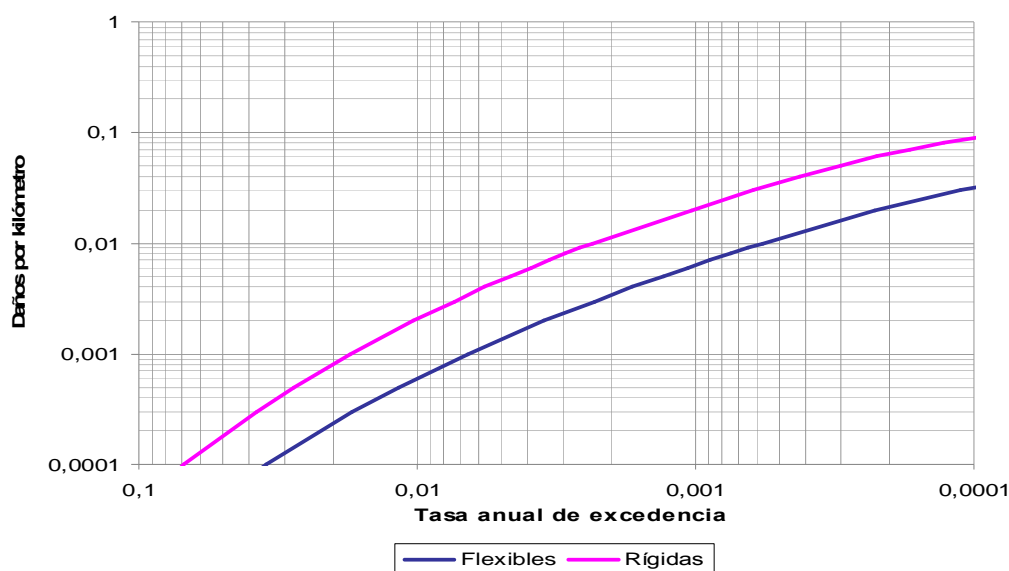


**Figura 10.32 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Copacabana**

**Tabla 10.29 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Copacabana para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,09	0,02	0,00	48	8	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,12	0,21	0,02	595	113	11	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	1,76	0,34	0,03	935	180	18	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	2,63	0,51	0,05	1 397	271	29	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	3,29	0,64	0,07	1 746	339	38	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	3,94	0,77	0,09	2 091	409	47	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.33 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Copacabana. Igualmente, en la Tabla 10.30 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



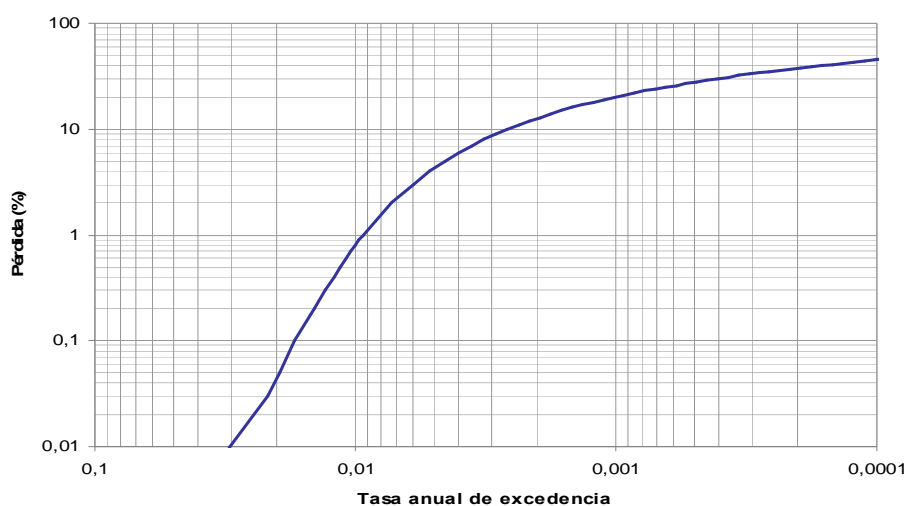
**Figura 10.33 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Copacabana**

**Tabla 10.30 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Copacabana en periodos de exposición de 50 y 100 años**

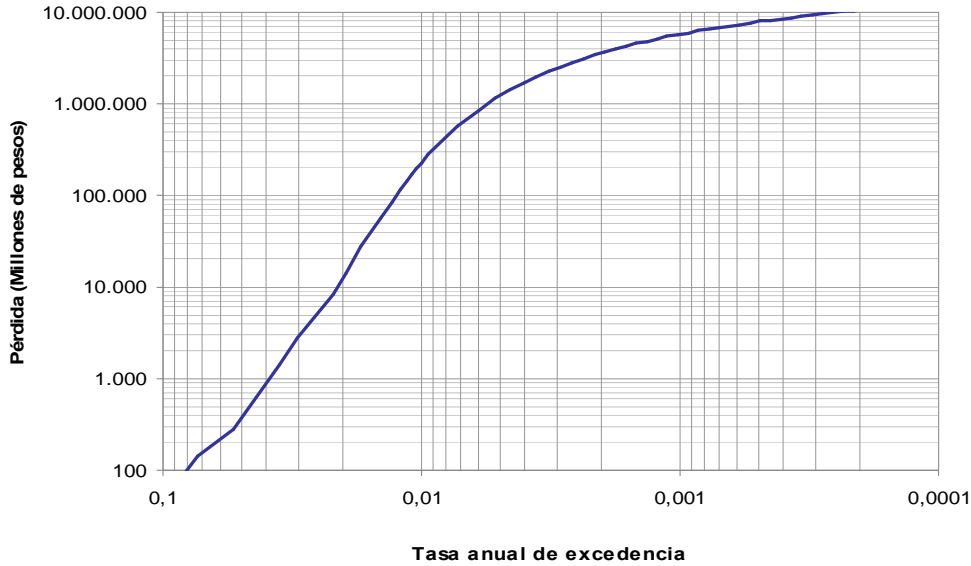
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0021	0,0007	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0125	0,0035	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0209	0,0063	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0417	0,0150	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0642	0,0223	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0892	0,0321	0,5	1,0

#### 10.4.6 Envigado

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.34 y 10.35 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Envigado, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.31 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.34 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Envigado**

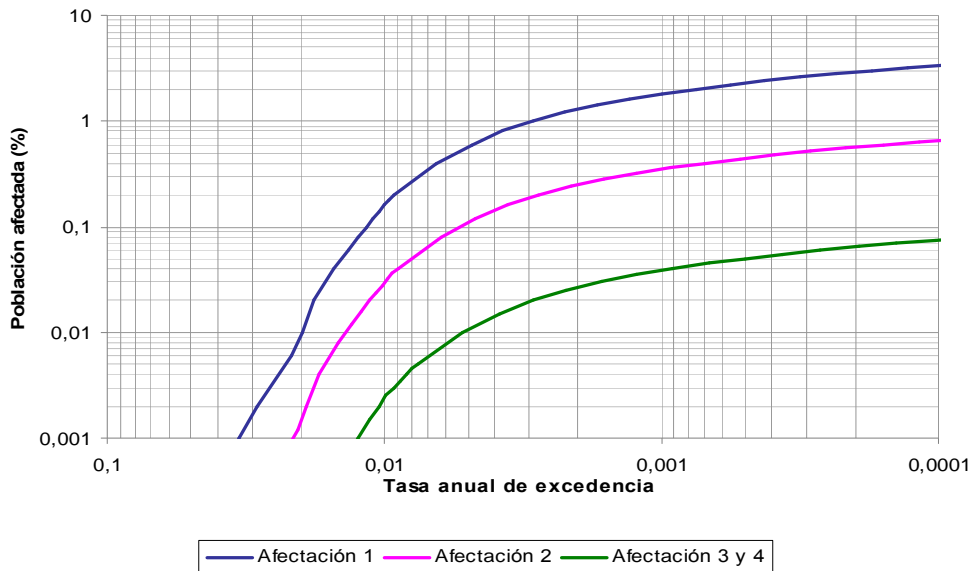


**Figura 10.35 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Envigado**

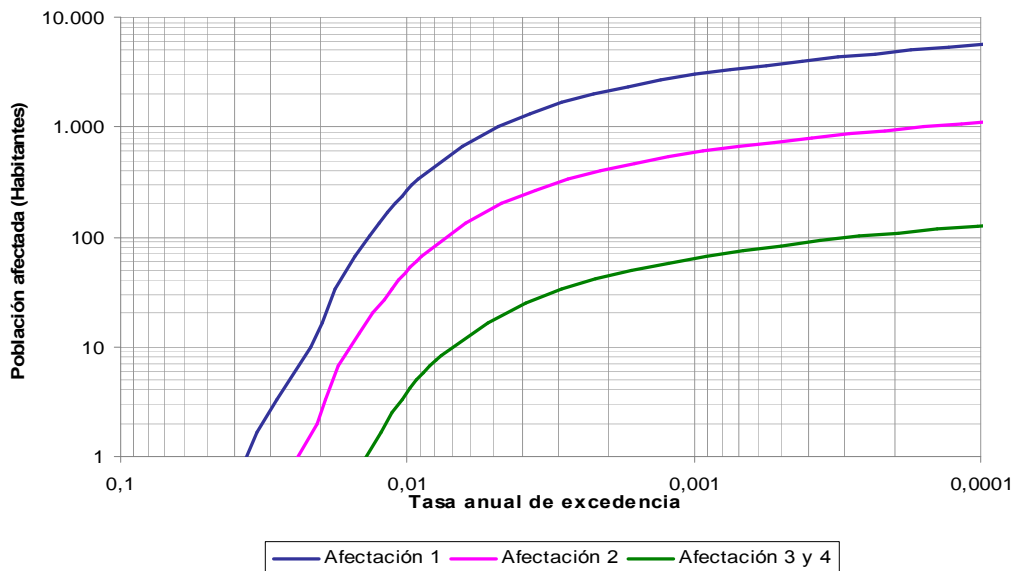
**Tabla 10.31 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Envigado para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,82	231 714	39,5	63,4
2,0E-03	500	12,75	3 615 976	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	20,21	5 734 588	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	30,22	8 574 855	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	37,71	10 698 733	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	45,11	12 798 935	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.36 y 10.37 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Envigado, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.32 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.36 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Envigado**

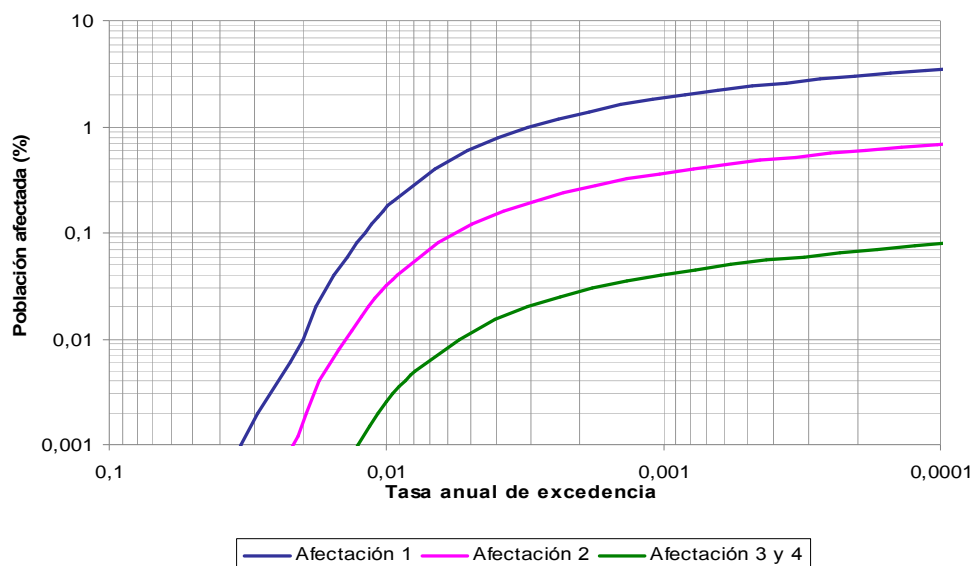


**Figura 10.37 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Envigado**

**Tabla 10.32 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Envigado para periodos de exposición de 50 y 100 años**

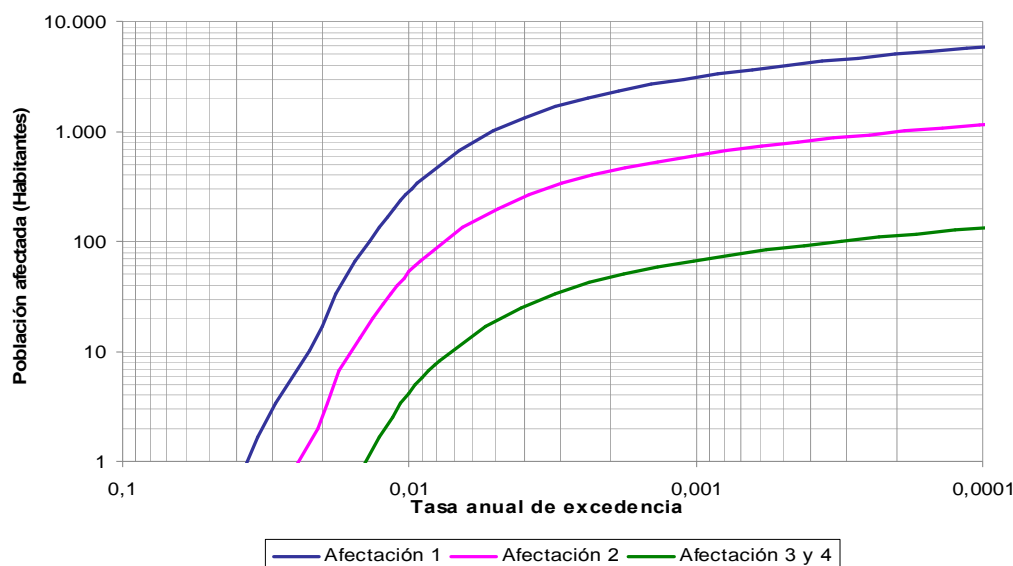
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,16	0,03	0,00	269	50	4	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,29	0,25	0,03	2 148	416	45	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	1,79	0,35	0,04	2 992	584	64	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	2,44	0,48	0,05	4 071	795	89	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	2,92	0,57	0,06	4 861	951	108	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	3,37	0,66	0,08	5 627	1 105	126	0,5	1,0

En la Figuras 10.38 y 10.39 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Envigado, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.33 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.38 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Envigado**



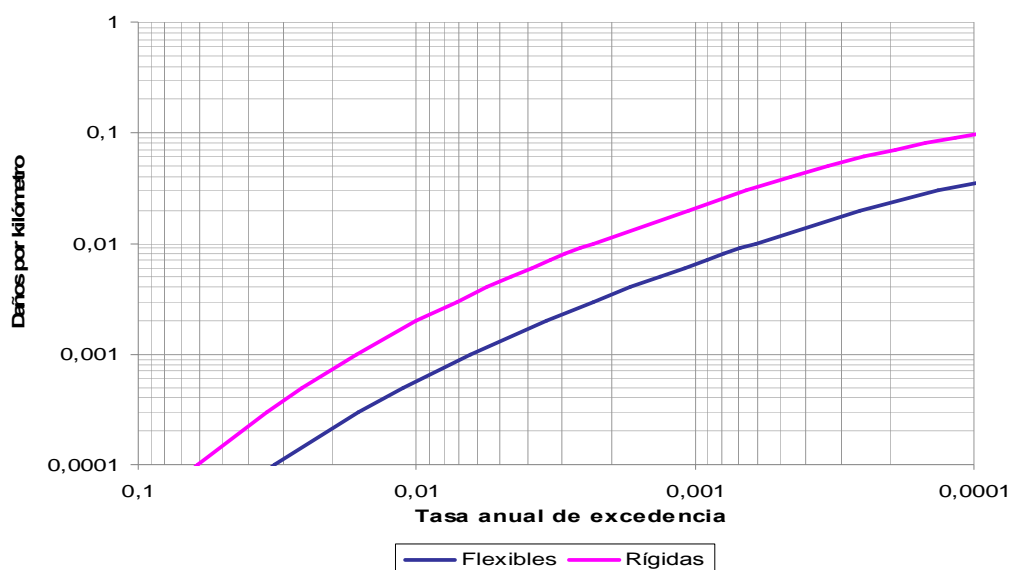


**Figura 10.39 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Envigado**

**Tabla 10.33 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Envigado para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,17	0,03	0,00	288	53	4	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,35	0,26	0,03	2 249	437	47	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	1,88	0,37	0,04	3 129	609	67	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	2,54	0,50	0,06	4 230	828	93	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	3,01	0,59	0,07	5 026	986	113	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	3,49	0,68	0,08	5 823	1 142	131	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.40 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Envigado. Igualmente, en la Tabla 10.34 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.40 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Envigado**

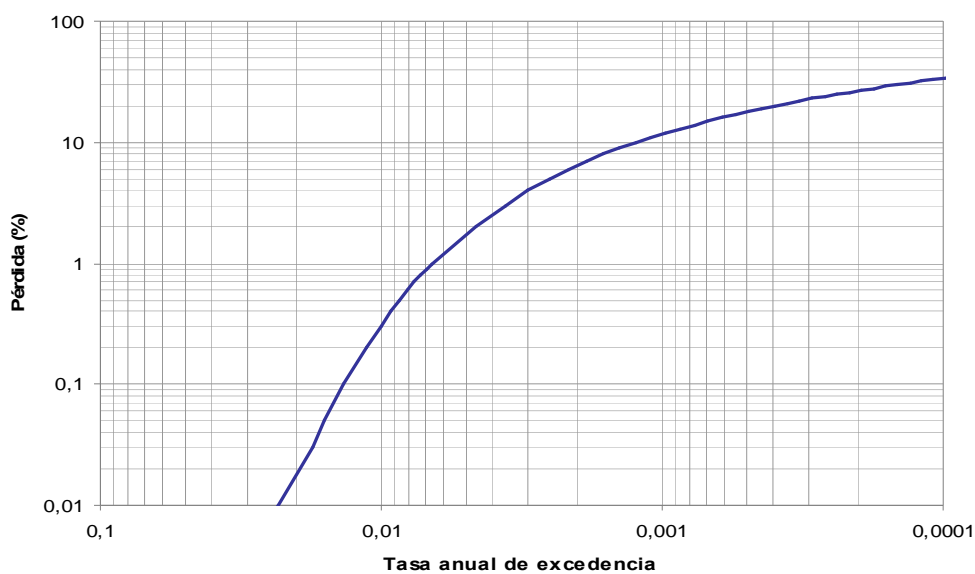
**Tabla 10.34 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Envigado en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0020	0,0006	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0125	0,0035	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0216	0,0065	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0442	0,0159	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0686	0,0246	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0965	0,0357	0,5	1,0

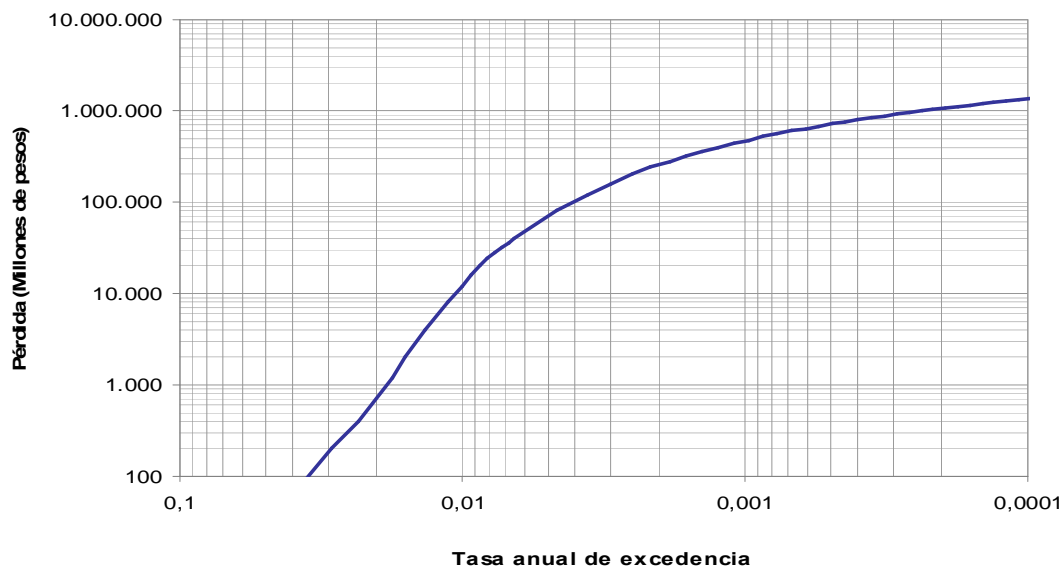
#### 10.4.7 Girardota

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.41 y 10.42 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Girardota, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.35 se

muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.41 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Girardota**

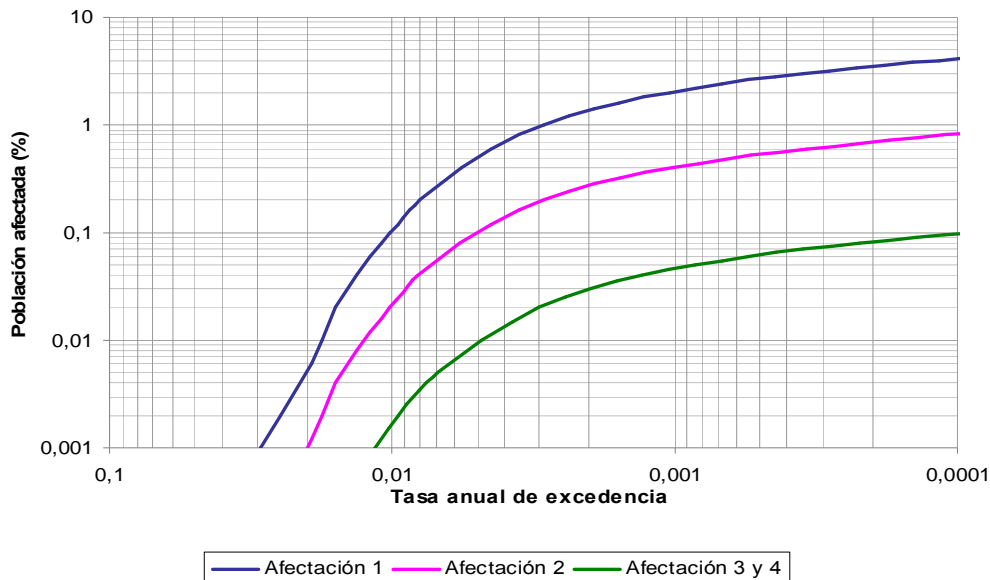


**Figura 10.42 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Girardota**

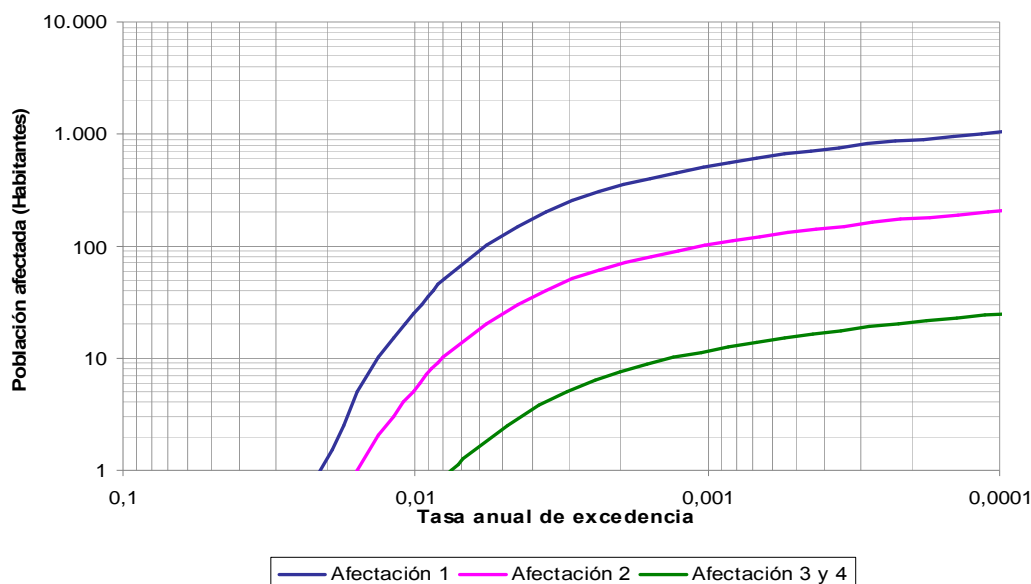
**Tabla 10.35 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Girardota para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,30	12 198	39,5	63,4
2,0E-03	500	6,51	260 810	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	11,77	471 294	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	19,94	798 519	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	26,73	1 070 459	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	33,76	1 351 875	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.43 y 10.44 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Girardota, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.36 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.43 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Girardota**

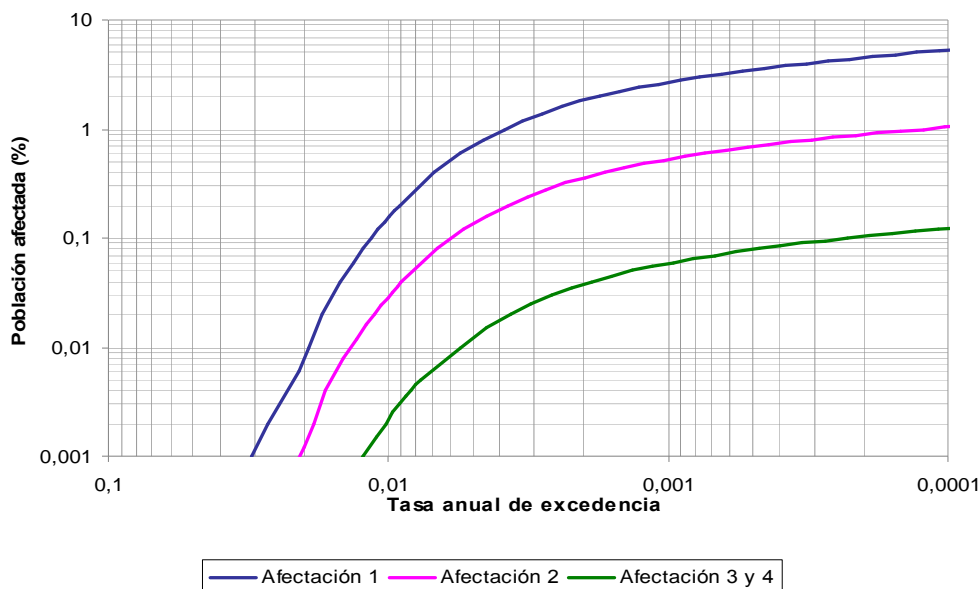


**Figura 10.44 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Girardota**

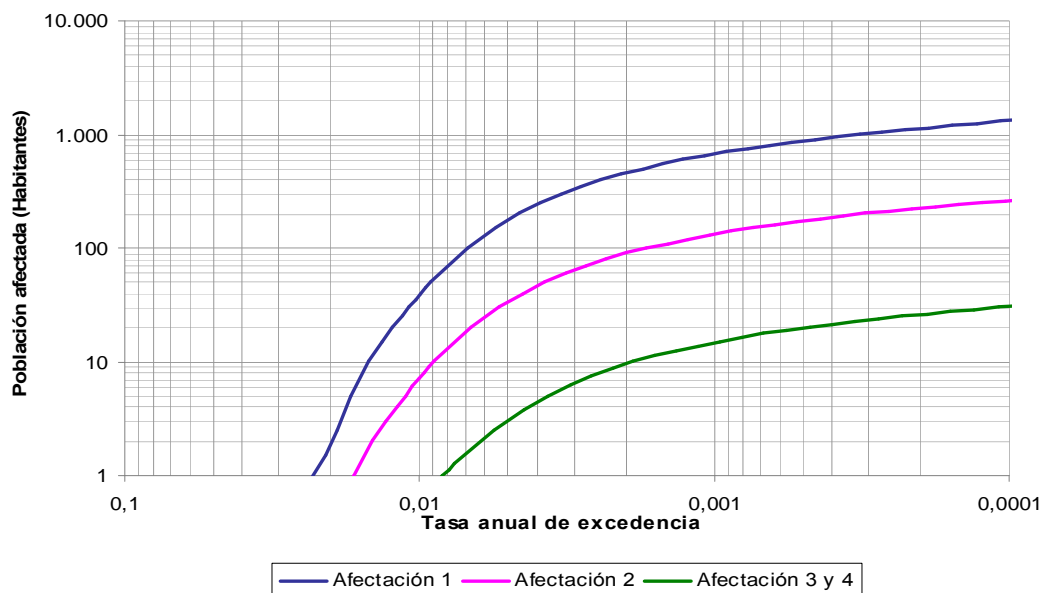
**Tabla 10.36 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Girardota para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,10	0,02	0,00	26	5	0	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,37	0,27	0,03	345	69	7	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	2,04	0,40	0,05	514	102	12	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	2,89	0,57	0,07	729	144	17	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	3,52	0,70	0,08	886	175	21	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	4,13	0,82	0,10	1 041	206	25	0,5	1,0

En la Figuras 10.45 y 10.46 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Girardota, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.37 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.45 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Girardota**

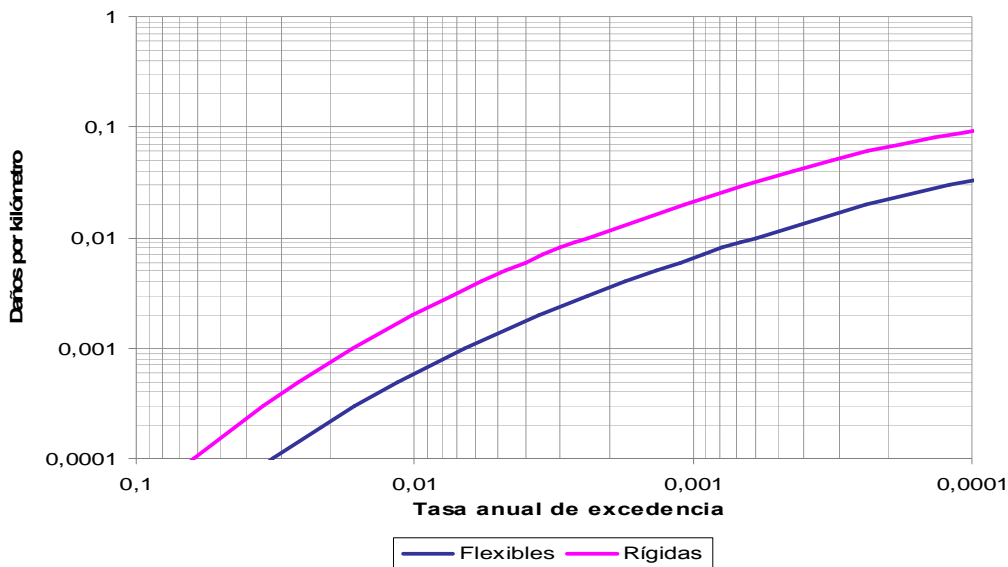


**Figura 10.46 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Girardota**

**Tabla 10.37 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Girardota para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,16	0,03	0,00	39	7	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,84	0,36	0,04	463	90	10	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	2,69	0,53	0,06	678	133	15	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	3,76	0,74	0,08	946	187	21	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	4,53	0,90	0,10	1 141	226	26	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	5,28	1,04	0,12	1 329	263	31	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.47 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Girardota. Igualmente, en la Tabla 10.38 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



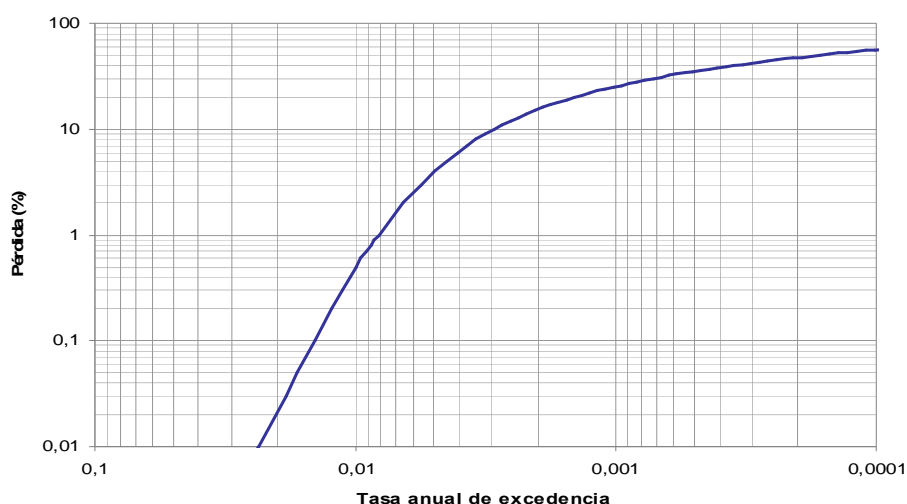
**Figura 10.47 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Girardota**

**Tabla 10.38 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Girardota en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0021	0,0007	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0131	0,0036	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0218	0,0066	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0433	0,0156	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0664	0,0234	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0922	0,0337	0,5	1,0

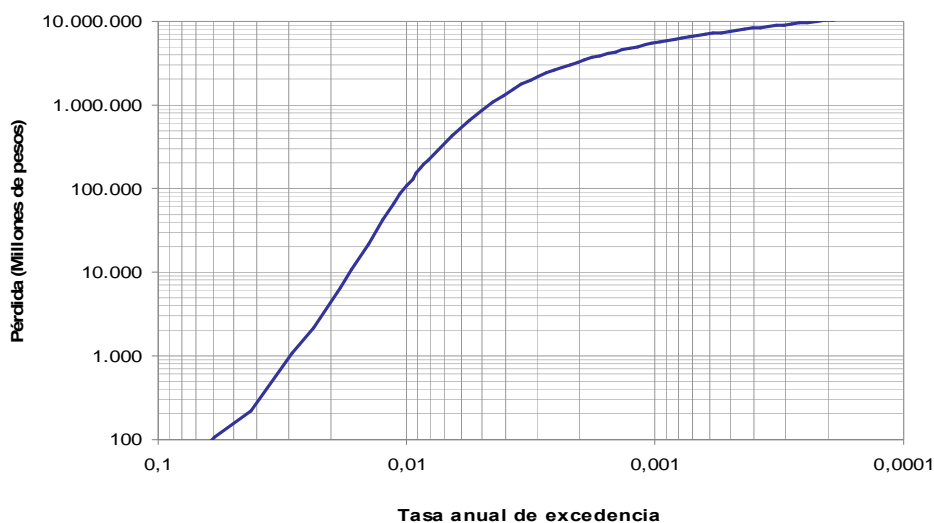
#### 10.4.8 Itagüí

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.48 y 10.49 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Barbosa, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.39 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.48 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Itagüí**



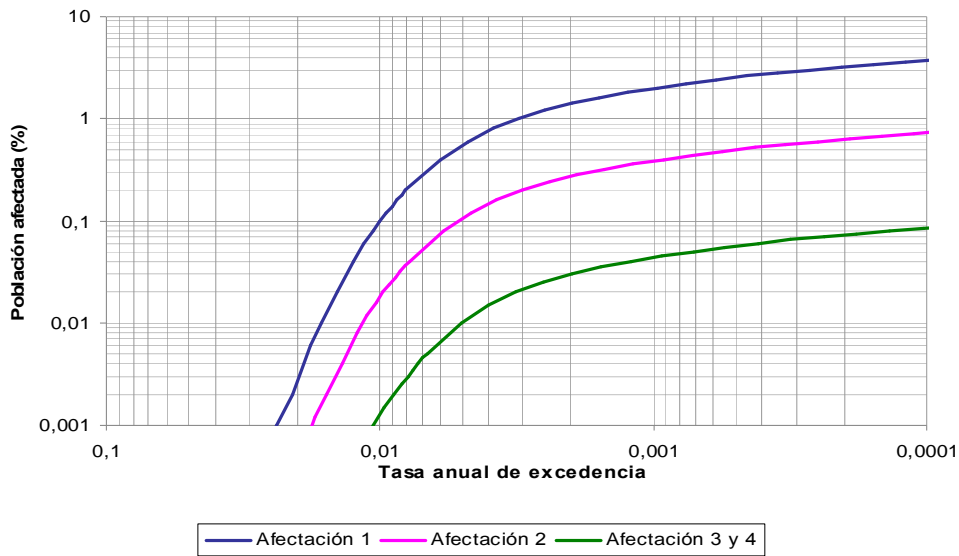


**Figura 10.49 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Itagüí**

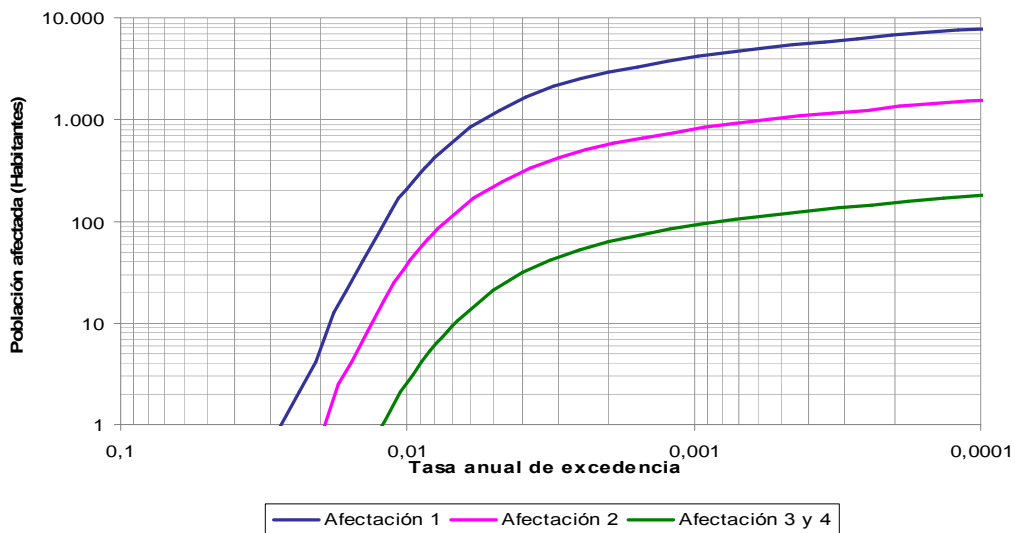
**Tabla 10.39 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Itagüí para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,50	107 269	39,5	63,4
2,0E-03	500	15,39	3 332 714	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	25,35	5 491 063	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	38,27	8 288 041	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	47,51	10 289 409	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	56,17	12 164 879	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.50 y 10.51 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Itagüí, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.40 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.50 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Itagüí**

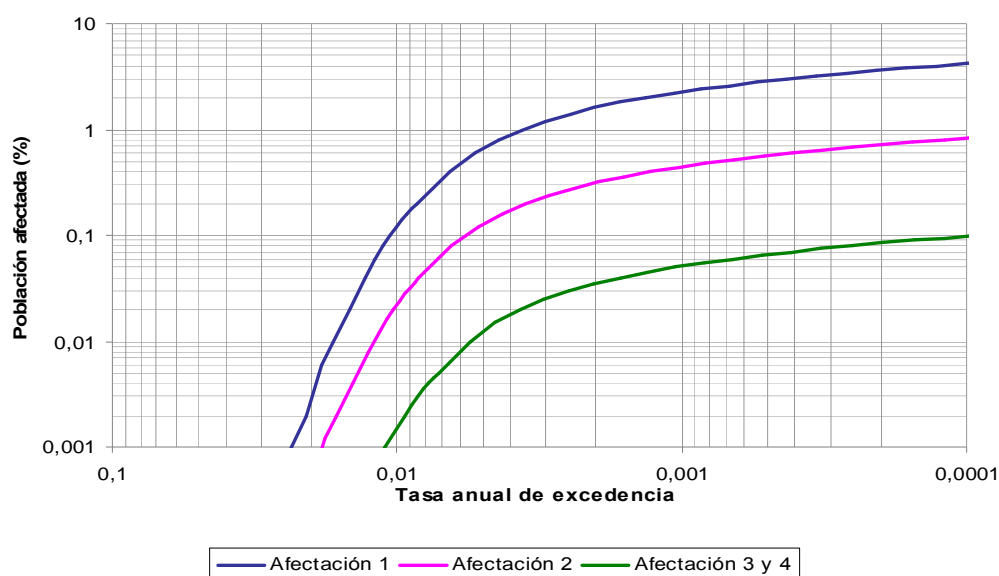


**Figura 10.51 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Itagüí**

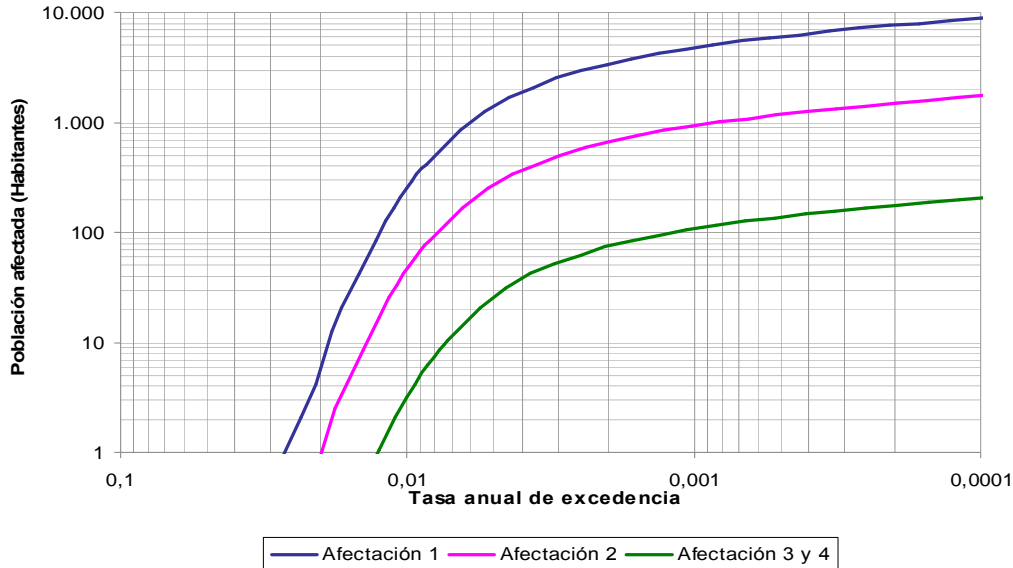
**Tabla 10.40 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Itagüí para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,10	0,02	0,00	212	39	3	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,39	0,27	0,03	2 921	571	62	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	1,98	0,39	0,04	4 146	813	92	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	2,70	0,53	0,06	5 665	1 111	127	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	3,22	0,63	0,07	6 753	1 328	154	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	3,74	0,74	0,09	7 833	1 542	179	0,5	1,0

En la Figuras 10.52 y 10.53 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Itagüí, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.41 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.52 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Itagüí**

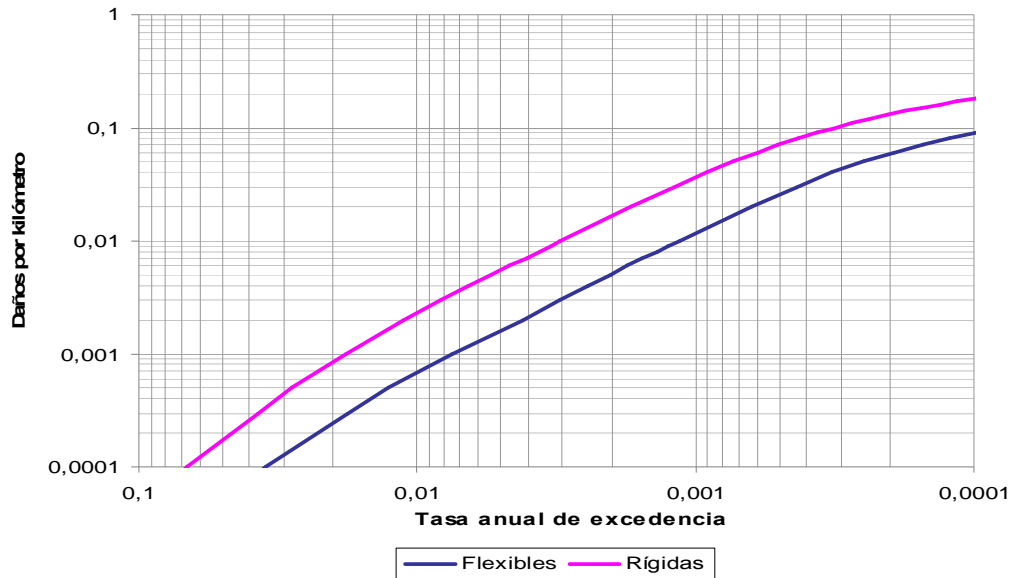


**Figura 10.53 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Itagüí**

**Tabla 10.41 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Itagüí para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,12	0,02	0,00	257	47	3	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,61	0,32	0,04	3 381	662	74	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	2,27	0,45	0,05	4 749	932	107	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	3,06	0,60	0,07	6 420	1 264	148	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	3,64	0,72	0,08	7 622	1 503	177	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	4,20	0,83	0,10	8 790	1 739	206	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.54 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Itagüí. Igualmente, en la Tabla 10.42 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.54 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Itagüí**

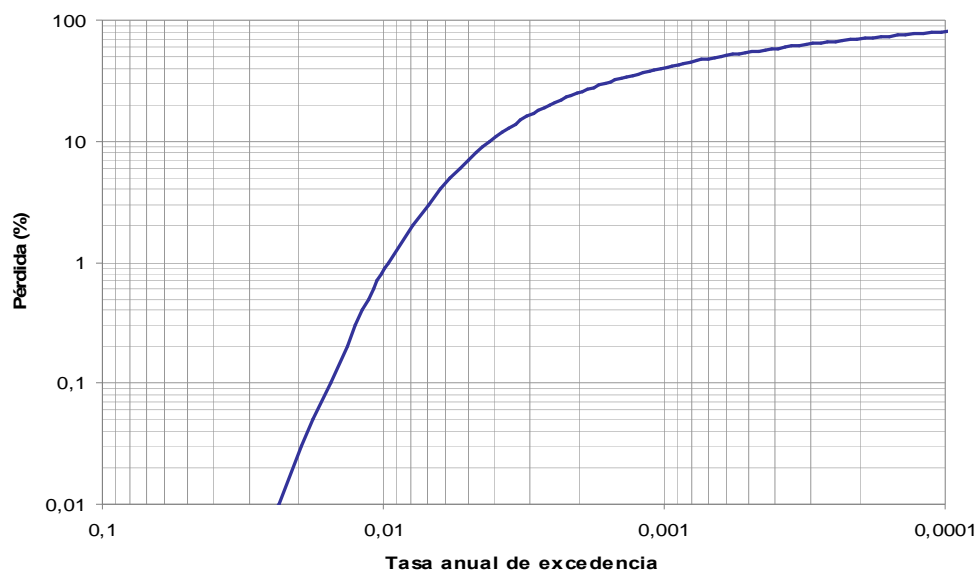
**Tabla 10.42 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Itagüí en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0024	0,0008	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0179	0,0051	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0368	0,0128	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0845	0,0330	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,1315	0,0587	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,1791	0,0889	0,5	1,0

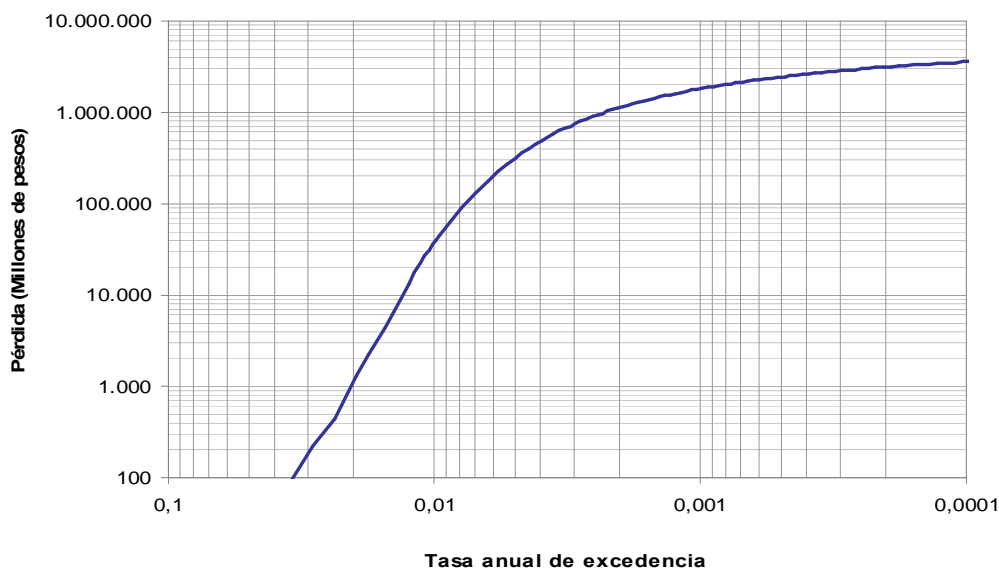
#### 10.4.9 La Estrella

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.55 y 10.56 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de La Estrella, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.43 se

muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.55 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de La Estrella**

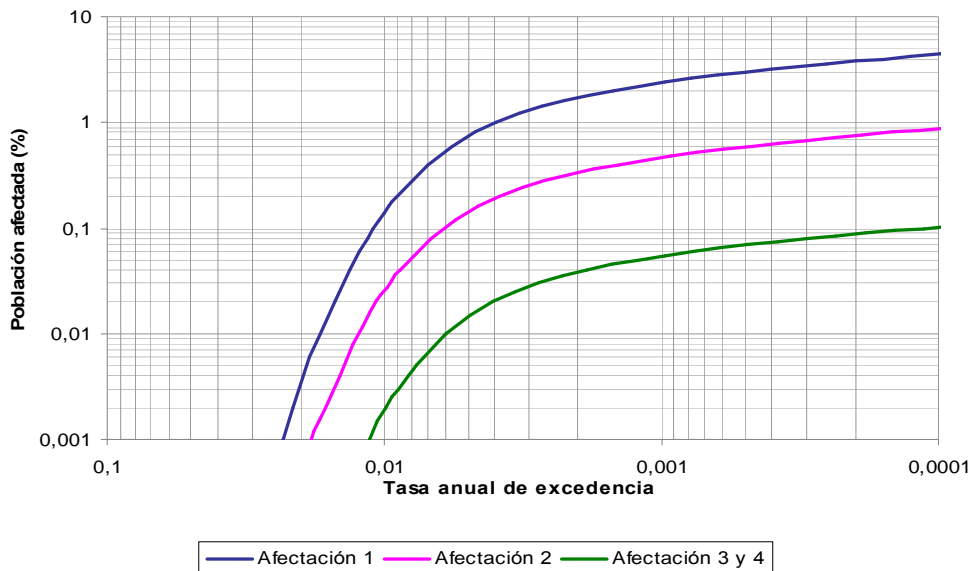


**Figura 10.56 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de La Estrella**

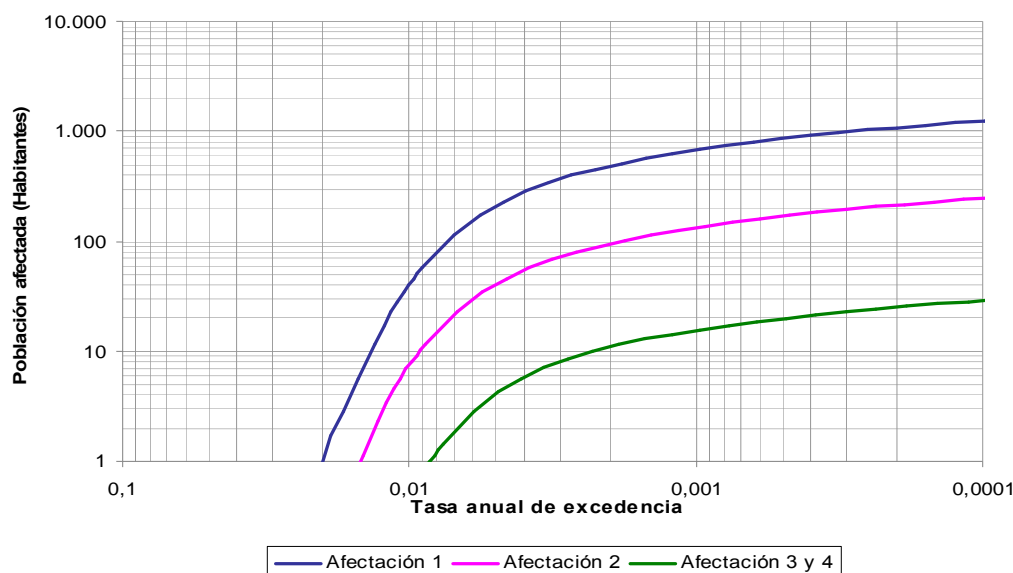
**Tabla 10.43 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de La Estrella para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,85	37 986	39,5	63,4
2,0E-03	500	25,43	1 130 584	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	40,58	1 803 670	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	58,62	2 605 536	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	70,39	3 129 156	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	80,45	3 576 105	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.57 y 10.58 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de La Estrella, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.44 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.57 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de La Estrella**



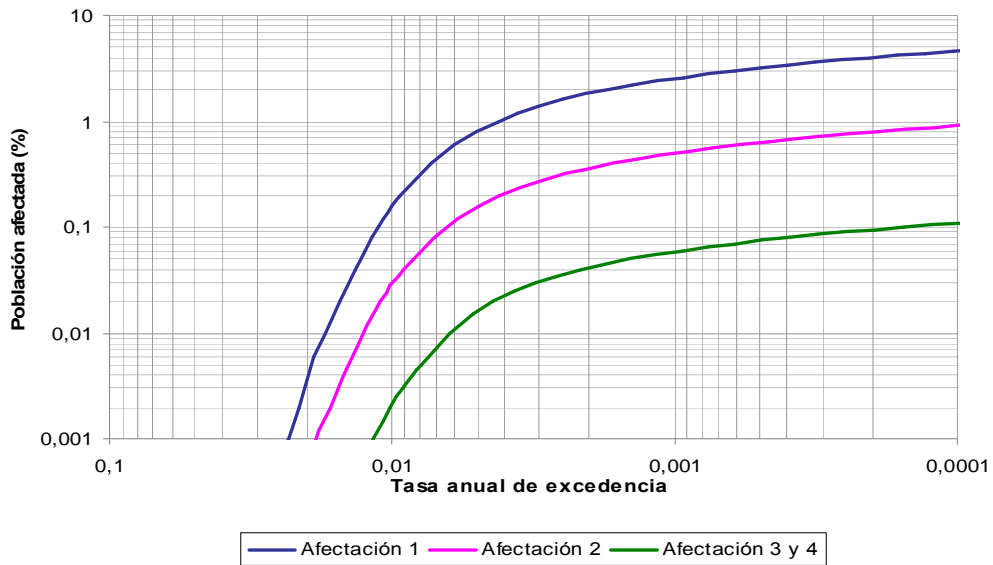
**Figura 10.58 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de La Estrella**

**Tabla 10.44 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de La Estrella para periodos de exposición de 50 y 100 años**

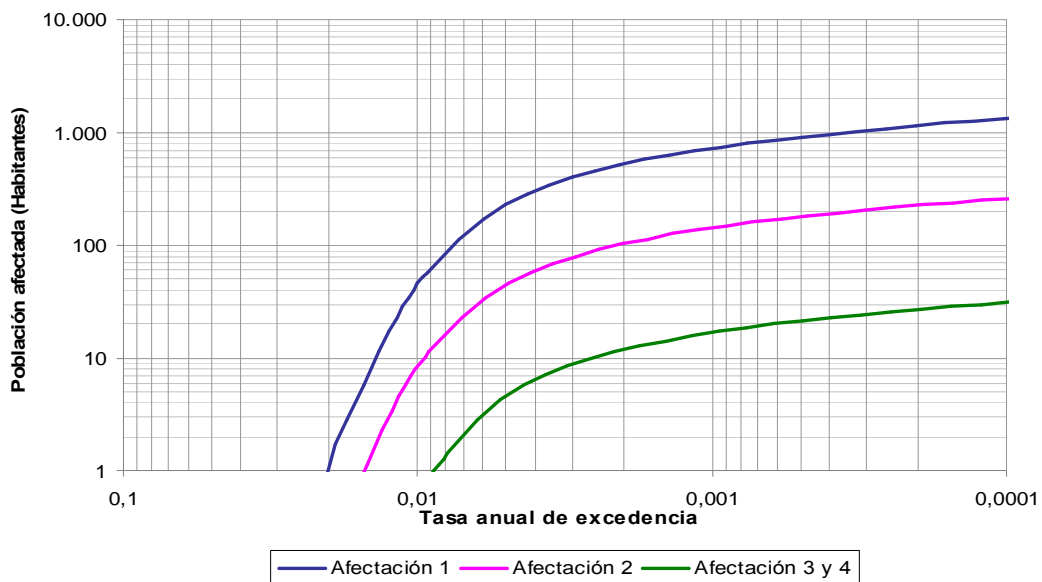
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,14	0,03	0,00	41	8	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,71	0,34	0,04	488	96	11	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	2,38	0,47	0,05	678	133	16	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	3,20	0,63	0,07	913	180	21	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	3,80	0,75	0,09	1 085	214	25	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	4,39	0,87	0,10	1 254	248	29	0,5	1,0

En la Figuras 10.59 y 10.60 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de La Estrella, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.45 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.





**Figura 10.59 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de La Estrella**

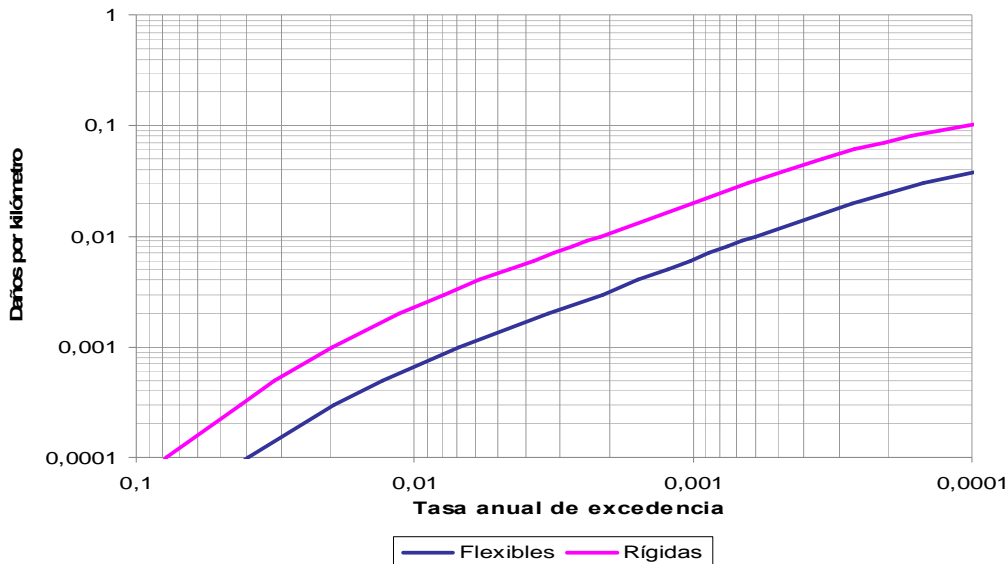


**Figura 10.60 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de La Estrella**

**Tabla 10.45 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de La Estrella para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,16	0,03	0,00	45	8	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,84	0,36	0,04	525	103	12	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	2,54	0,50	0,06	725	143	17	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	3,39	0,67	0,08	969	191	23	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	4,02	0,79	0,09	1 146	226	27	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	4,63	0,91	0,11	1 320	261	31	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.61 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de La Estrella. Igualmente, en la Tabla 10.46 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



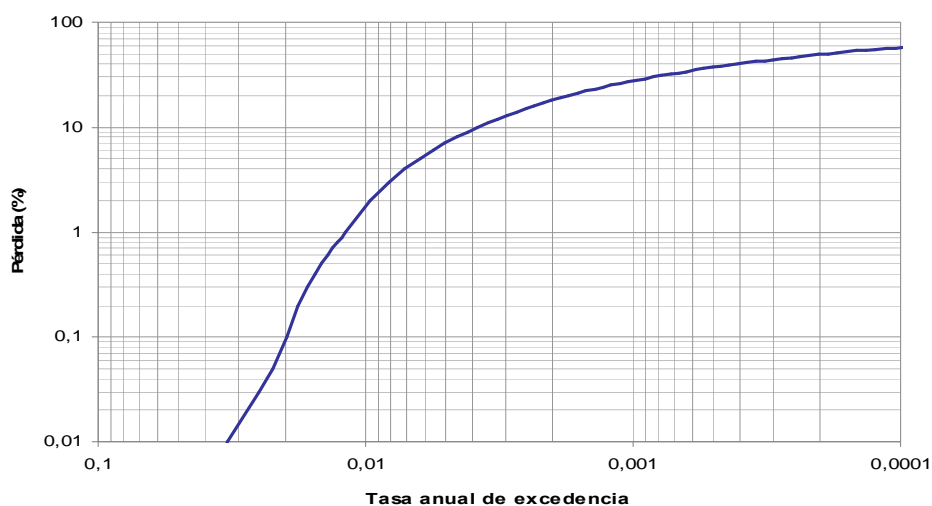
**Figura 10.61 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de La Estrella**

**Tabla 10.46 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de La Estrella en periodos de exposición de 50 y 100 años**

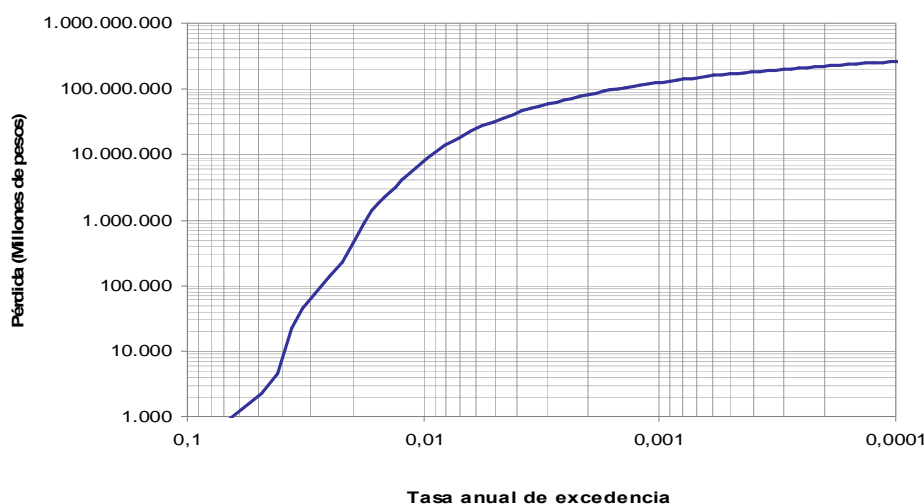
Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0024	0,0008	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0112	0,0032	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0202	0,0062	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0448	0,0160	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0714	0,0258	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,1017	0,0381	0,5	1,0

#### 10.4.10 Medellín

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.62 y 10.63 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Medellín, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.47 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.62 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Medellín**

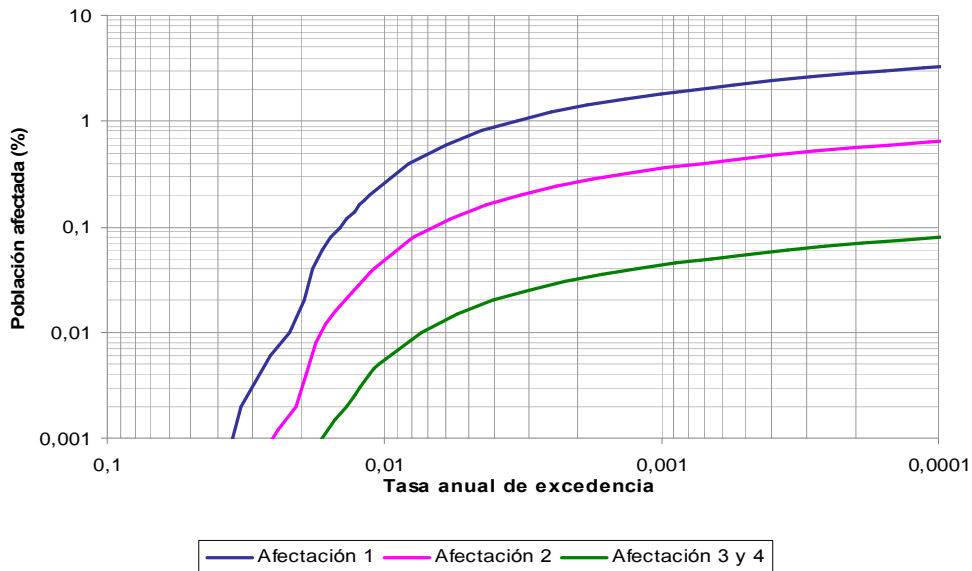


**Figura 10.63 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Medellín**

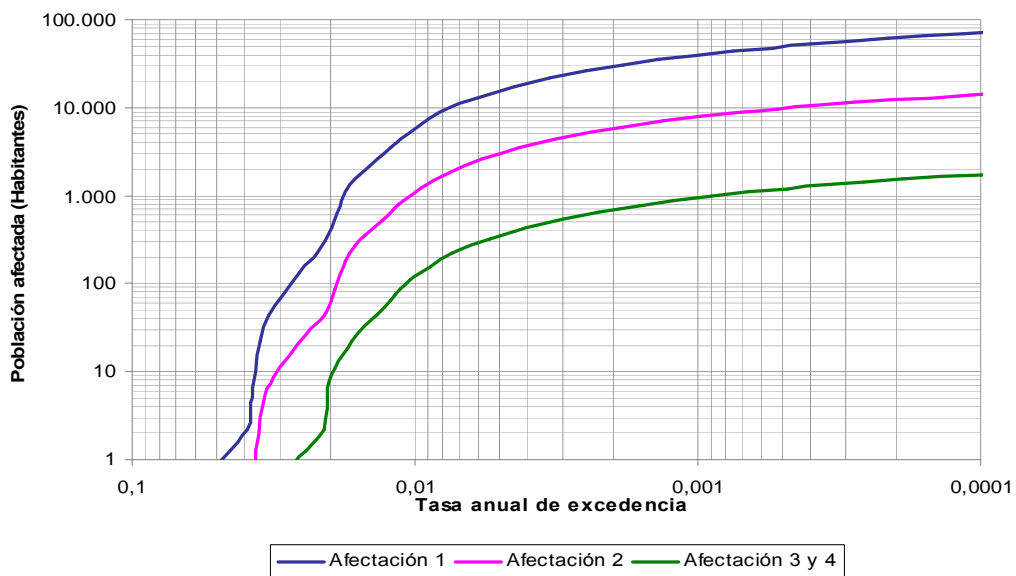
**Tabla 10.47 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Medellín para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	1,82	8 291 541	39,5	63,4
2,0E-03	500	18,07	82 159 339	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	27,57	125 359 650	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	40,13	182 477 542	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	49,15	223 484 916	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	57,50	261 445 794	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.64 y 10.65 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Medellín, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.48 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.64 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Medellín**

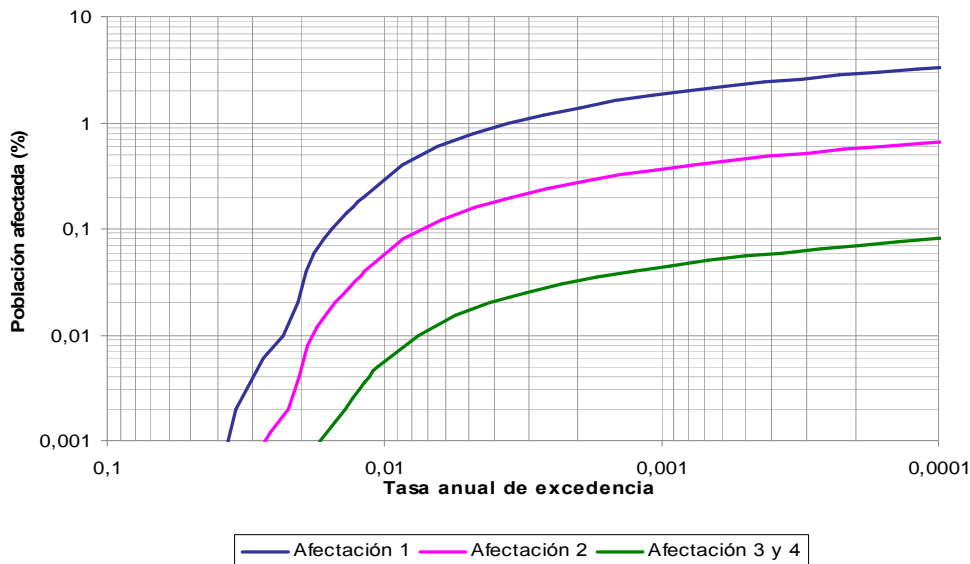


**Figura 10.65 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Medellín**

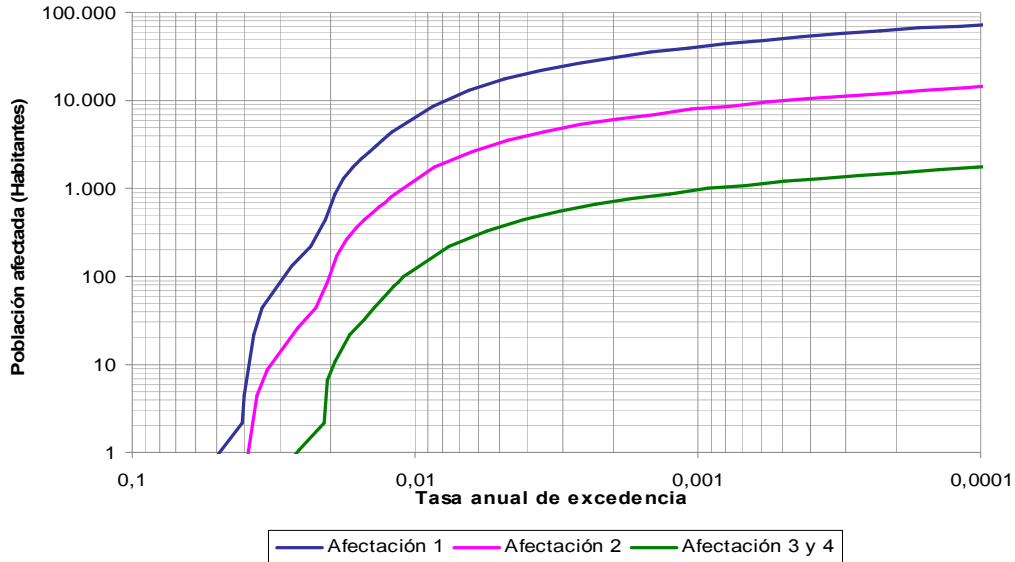
**Tabla 10.48 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Medellín para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,28	0,05	0,01	6 182	1 141	126	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,35	0,27	0,03	29 559	5 806	700	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	1,81	0,36	0,04	39 529	7 800	950	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	2,40	0,48	0,06	52 512	10 402	1.273	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	2,85	0,56	0,07	62 289	12 334	1.513	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	3,29	0,65	0,08	71 902	14 270	1.751	0,5	1,0

En la Figuras 10.66 y 10.67 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Medellín, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.49 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.66 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Medellín**

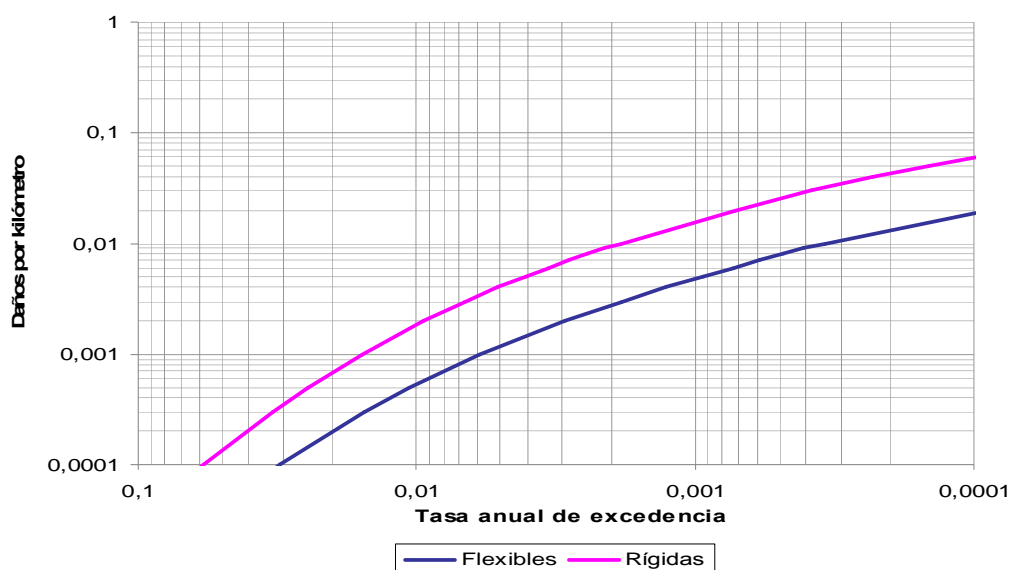


**Figura 10.67 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Medellín**

**Tabla 10.49 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Medellín para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,32	0,06	0,01	7 025	1 351	131	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,40	0,28	0,03	30 535	6 030	711	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	1,86	0,37	0,04	40 664	8 026	961	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	2,45	0,48	0,06	53 531	10 586	1 284	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	2,89	0,57	0,07	63 131	12 509	1 521	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	3,32	0,66	0,08	72 575	14 406	1 759	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.68 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Medellín. Igualmente, en la Tabla 10.50 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.68 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Medellín**

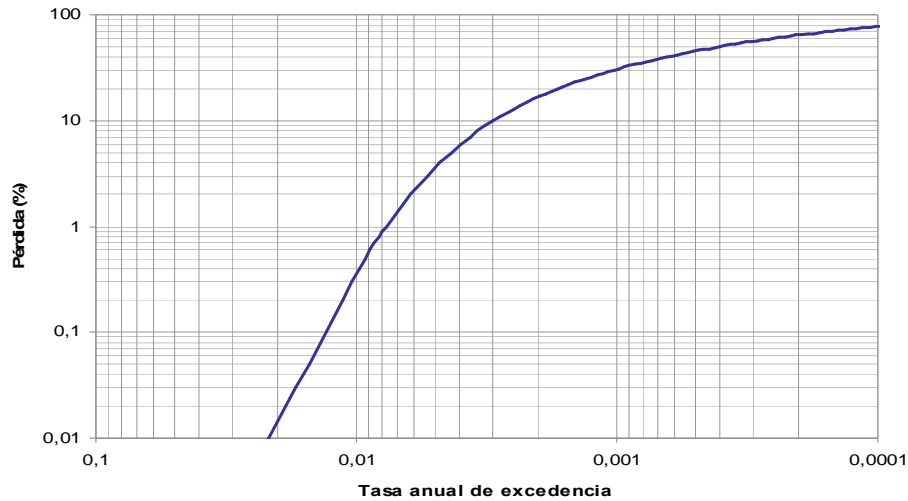
**Tabla 10.50 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Medellín en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0019	0,0006	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0094	0,0028	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0175	0,0048	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0295	0,0091	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0436	0,0157	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0587	0,0196	0,5	1,0

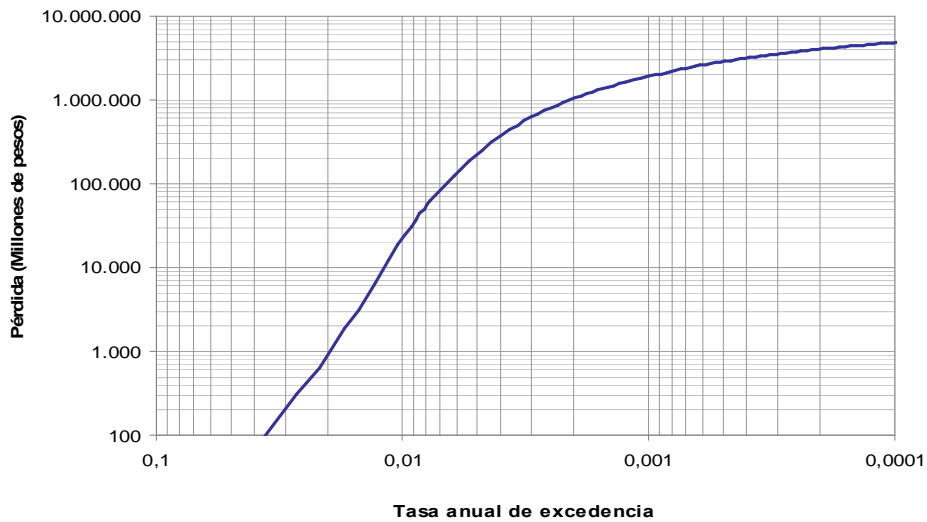
#### 10.4.11 Sabaneta

- **Edificaciones.** En la Figuras 10.69 y 10.70 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de las edificaciones del municipio de Sabaneta, tanto en porcentaje de las pérdidas como en millones de pesos del año 2007. Igualmente, en la Tabla 10.51 se muestra el significado de los resultados de la curva de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.





**Figura 10.69 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las edificaciones del municipio de Sabaneta**

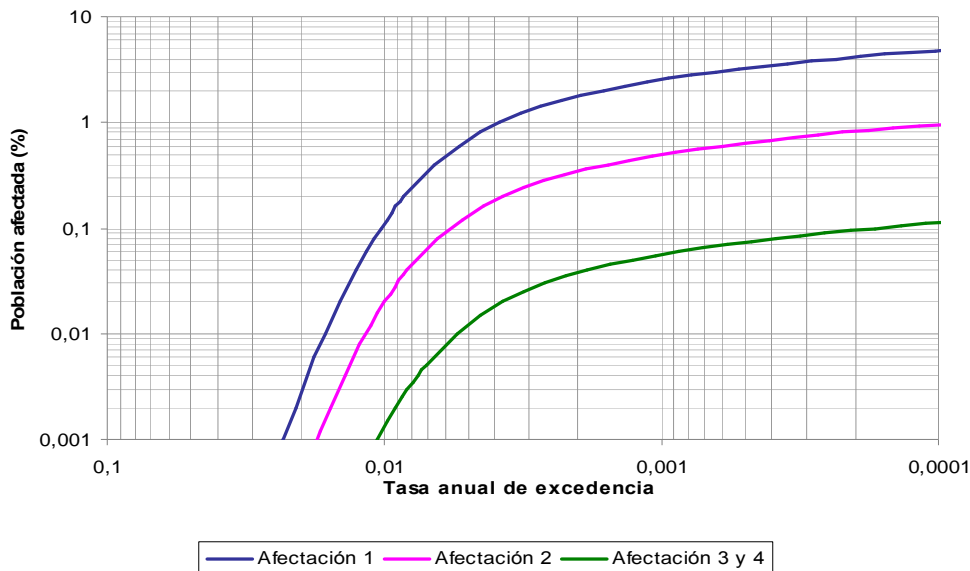


**Figura 10.70 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en millones de pesos para las edificaciones del municipio de Sabaneta**

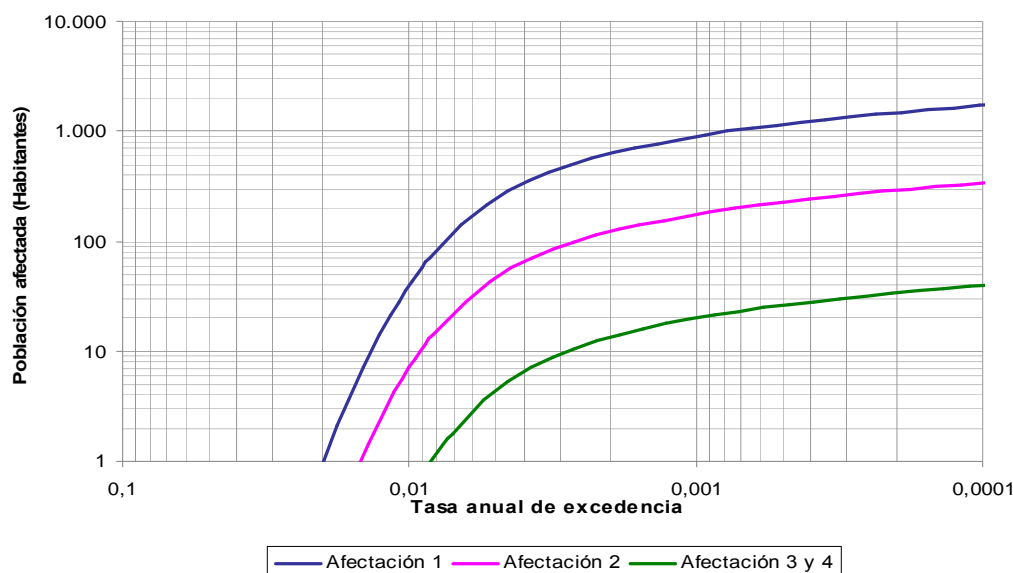
**Tabla 10.51 Probabilidad de excedencia de pérdidas en las edificaciones del municipio de Sabaneta para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%)	Pérdida (Millones de pesos)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,36	22 362	39,5	63,4
2,0E-03	500	16,88	1 055 752	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	30,62	1 915 085	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	50,22	3 140 803	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	64,50	4 034 056	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	77,22	4 829 124	0,5	1,0

- **Pérdidas humanas.** En la Figuras 10.71 y 10.72 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas del día para el municipio de Sabaneta, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.52 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.71 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Sabaneta**

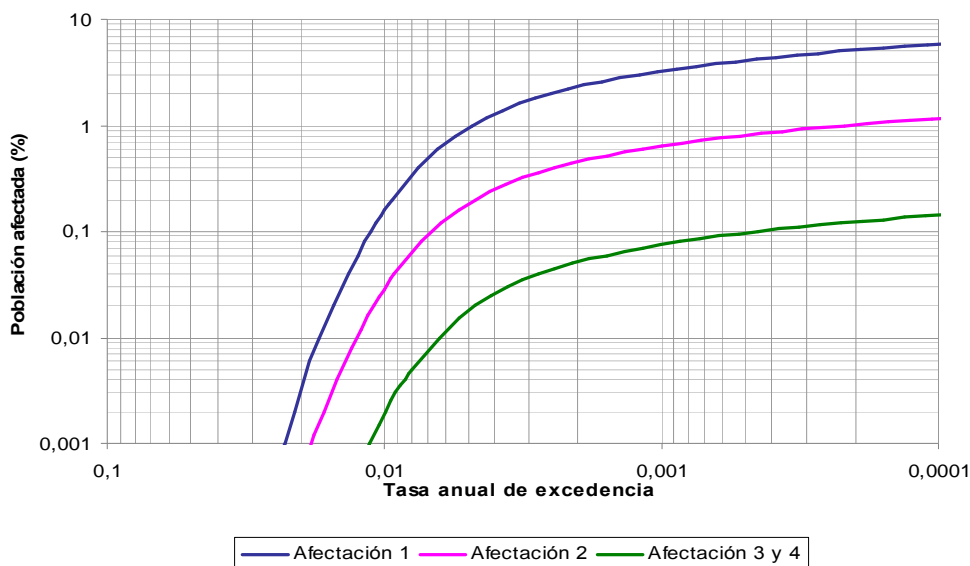


**Figura 10.72 Pérdida Máxima Probable por sismo en el día expresada en número de habitantes para el municipio de Sabaneta**

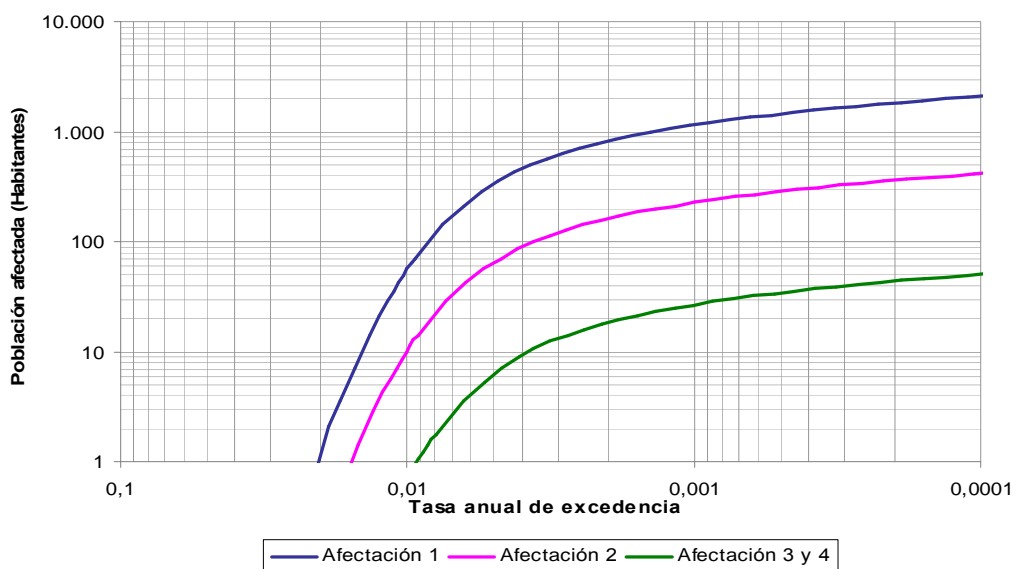
**Tabla 10.52 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en el día a los habitantes del municipio de Sabaneta para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,11	0,02	0,00	40	7	0	39,5	63,4
2,0E-03	500	1,77	0,35	0,04	629	123	13	9,5	18,1
1,0E-03	1 000	2,54	0,50	0,06	901	177	20	4,9	9,5
4,0E-04	2 500	3,48	0,68	0,08	1 236	243	28	2,0	3,9
2,0E-04	5 000	4,16	0,82	0,10	1 478	291	34	1,0	2,0
1,0E-04	10 000	4,82	0,95	0,11	1 713	338	40	0,5	1,0

En la Figuras 10.73 y 10.74 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable de la afectación a las personas en horas de la noche para el municipio de Sabaneta, tanto en porcentaje de personas afectadas como en habitantes. Igualmente, en la Tabla 10.53 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.73 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en porcentaje para los habitantes del municipio de Sabaneta**

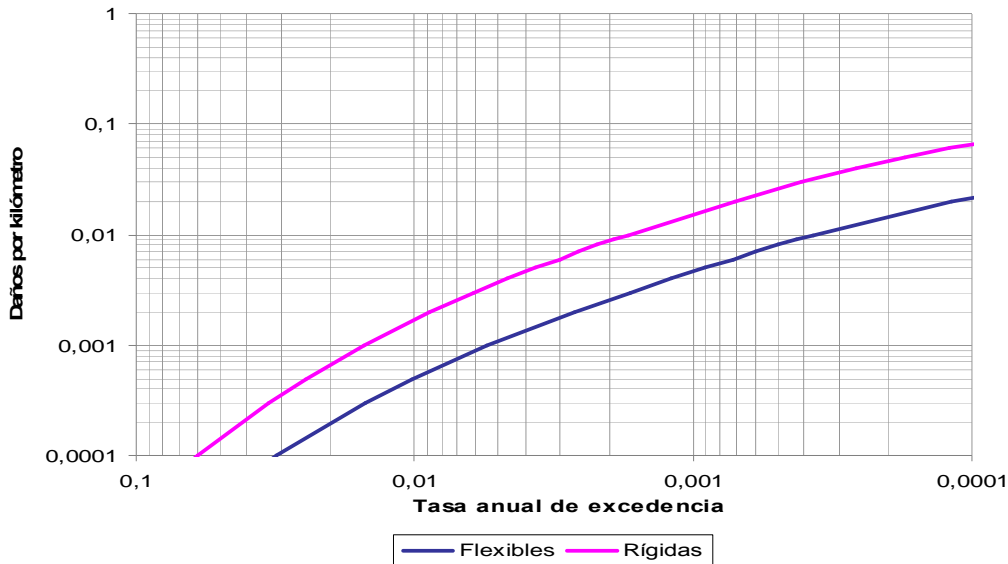


**Figura 10.74 Pérdida Máxima Probable por sismo en la noche expresada en número de habitantes para el municipio de Barbosa**

**Tabla 10.53 Probabilidad de excedencia de los diferentes niveles de afectación en la noche a los habitantes del municipio de Sabaneta para periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Pérdida (%) para los nivel de afectación:			Pérdida (Número de habitantes) para los nivel de afectación:			Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
		1	2	3 - 4	1	2	3 - 4	50 años	100 años
1,0E-02	100	0,16	0,03	0,00	57	10	1	39,5	63,4
2,0E-03	500	2,33	0,46	0,05	826	162	18	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	3,25	0,64	0,08	1 153	227	27	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	4,36	0,86	0,10	1 548	306	37	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	5,15	1,02	0,12	1 830	362	44	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	5,91	1,17	0,14	2 100	417	51	0,5	1,0

- **Líneas Vitales.** En la Figura 10.75 se presentan la curva de Pérdida Máxima Probable para los daños en las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Sabaneta. Igualmente, en la Tabla 10.54 se muestra el significado de los resultados de las curvas de PML, en términos de probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición.



**Figura 10.75 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles y rígidas del municipio de Sabaneta**

**Tabla 10.54 Probabilidad de excedencia de las pérdidas para las tuberías rígidas y flexibles del municipio de Sabaneta en periodos de exposición de 50 y 100 años**

Tasa anual de excedencia	Período de retorno (Años)	Tubería rígida (Número de daños por Kilómetro)	Tubería flexible (Número de daños por Kilómetro)	Probabilidad de excedencia de pérdidas (%) en un periodo de exposición de:	
				50 años	100 años
1,0E-02	100	0,0018	0,0005	39,5	63,4
2,0E-03	500	0,0087	0,0027	9,5	18,1
1,0E-03	1.000	0,0171	0,0047	4,9	9,5
4,0E-04	2.500	0,0304	0,0095	2,0	3,9
2,0E-04	5.000	0,0471	0,0168	1,0	2,0
1,0E-04	10.000	0,0657	0,0225	0,5	1,0

## 10.5 ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS TOTALES

En los numerales anteriores se mostraron las pérdidas totales de los riesgos individuales, es decir, edificaciones, personas, y líneas vitales. El ejercicio siguiente sería el de combinar, de alguna manera racional, esos resultados para obtener un mapa de pérdidas totales. No obstante, hay que hacer claridad que para el desarrollo de este estudio no se contó con la información relacionada con la localización y tipo de tuberías de los sistemas de acueducto, alcantarillado y gas, por lo que no es factible incorporar estos resultados dentro de un solo mapa de pérdidas totales, ya que no se dispone de toda la información que se requeriría. En consecuencia, el mapa de pérdidas totales incluye sólo la información relacionada con la pérdida en edificaciones y con la afectación a personas, tal como se describe a continuación.

Para la estimación de las pérdidas debidas a afectaciones a las personas se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- Todos los cálculos se hicieron sobre el nivel de afectación nocturna en los niveles 1, 2, 3 y 4.
- Para la estimación del estrato en cada unos de los polígonos en el municipio de Medellín, se hizo un cruce entre los polígonos y los estratos.
- Para los demás municipios, excepto el caso de Girardota y Envigado (en donde no se tienen datos) se hizo un promedio ponderado entre la distribución porcentual de cada estrato (no se tiene mapa), por lo tanto se utilizó un estrato “promedio”.
- Para la determinación del valor dejado de devengar, se tomó el reporte de ingresos mensuales por estrato para el municipio de Medellín. Para los demás municipios no se tuvieron datos, y por lo tanto se consideran iguales.

- El costo de hospitalización y entierro se consideró el mismo para todos los niveles de estrato y para todos los municipios.

La estimación de pérdidas anuales totales se realizó a partir de la suma de las pérdidas promedio de las estructuras y las pérdidas promedio por afectación de personas, en los cuatro niveles, durante un año. Dichas pérdidas son expresadas en Pesos/m<sup>2</sup> de área construida.

El costo de las estructuras se determinó con base a precios de mercado del metro cuadrado de área construida, en función del sistema estructural y del estrato de la edificación.

El “costo” de afectación sobre personas se determinó en función del nivel de afectación. Para los niveles de afectación 1, 2 y 3 se tuvo en cuenta los costos de no producción laboral y costo de hospitalización, durante 5, 30 y 90 días respectivamente. Para el nivel 4 el periodo de no producción laboral se estimó en 15 184 días (esperanza de vida – edad promedio).

Para la determinación del costo de no producción laboral se hizo el producto entre el número de días no laborados y el ingreso promedio diario *per capita* para cada estrato. El ingreso promedio mensual que se consideró se presenta en la Tabla 10.55.

**Tabla 10.55 Ingreso promedio mensual considerado**

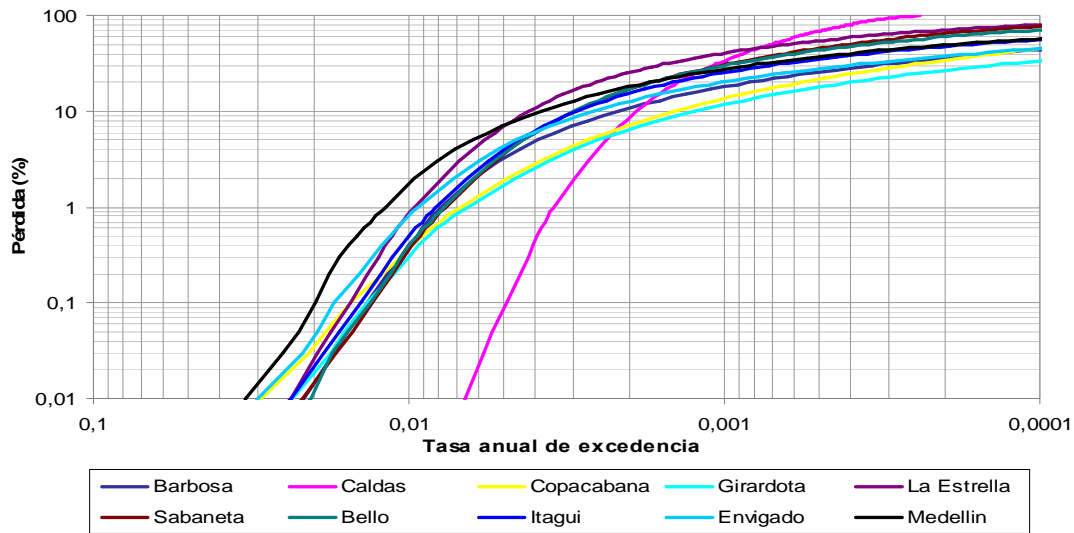
Estrato	Ingreso/mes
1	\$ 291,860
2	\$ 354,259
3	\$ 465,550
4	\$ 705,778
5	\$ 1,098,668
6	\$ 2,017,120

Los costos de hospitalización se estimaron es \$250.000 diarios, mientras que el costo del entierro se estimó en \$630.000. El número de personas en cada zona se estimó a partir de las densidades poblacionales en cada municipio, de acuerdo a los datos suministrados por el DANE.

## 10.6 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 10.6.1 Pérdidas en Edificaciones

Las curvas de pérdidas en edificaciones (Figura 10.75) en general siguen la misma tendencia en todas las ciudades excepto para el municipio de Caldas en el que se aprecia una curva muy empinada, clásica de edificaciones muy frágiles como las de mampostería no reforzada. Para este municipio, pérdidas del 0,01% sólo se presentan con periodos de retorno promedios de 150 años, mientras que para los demás municipios estas pérdidas se presentan con periodos de retorno entre 30 y 50 años; mucho más frecuentes. No obstante lo anterior, para este municipio se presentan pérdidas casi totales con periodos de retorno del orden de 4 000 años, mientras que para este mismo periodo de retorno las pérdidas porcentuales en las demás ciudades van desde el 24% para Girardota, hasta el 65% para La Estrella.



**Figura 10.76 Pérdida Máxima Probable por sismo expresada en porcentaje para las estructuras en todos los municipios del área metropolitana**

Este resultado tiene parte de su explicación en el hecho de que la gran mayoría de las edificaciones de Caldas, de mampostería no reforzada de un solo nivel, tienen una gran resistencia inicial, antes de que empiecen los daños, pero una vez esta resistencia es sobrepasada, los daños crecen rápidamente a medida que aumenta la intensidad del movimiento.



En las demás ciudades las pérdidas se inician en aceleraciones muy bajas, con periodos de retorno igualmente bajos, debido a la presencia de edificaciones de mampostería no reforzada de varios niveles, y principalmente a la presencia de edificaciones de pórticos de concreto reforzado rellenos de muros de mampostería, que presentan daños cuantiosos en los elementos no estructurales a aceleraciones bajas y relativamente frecuentes. Estas mismas edificaciones, mantienen su integridad con daños menores en los elementos estructurales para intensidades muy altas, lo que explica la ocurrencia de pérdidas menores con altos periodos de retorno.

Las diferencias entre las pérdidas que se presentan en las diferentes ciudades con periodos de retorno altos, del orden de 10 000 años, se deben en parte a la relación que se presenta en cada ciudad entre las edificaciones de concreto reforzado rellenas con muros de mampostería, y las edificaciones de mampostería no reforzada.

Al hacer estas interpretaciones es importante tener en cuenta que la amenaza sísmica es mucho mayor en los municipios del sur del valle como Caldas que en los municipios del norte del valle, lo que contribuye a que el riesgo en el municipio de Caldas se vea incrementado por este hecho.

Para periodos de retorno del orden de 10 000 años, las pérdidas materiales directas en la ciudad de Medellín ascenderían a cerca de 200 billones de pesos (10 billones de dólares), cerca del 50% del valor estimado de la infraestructura actual de la ciudad.

De todo lo anterior es claro que para disminuir las pérdidas materiales debidas a sismos son necesarias varias acciones: Es necesario retrasar la aparición de pérdidas debidas a elementos no estructurales en edificaciones aporricadas de concreto reforzado. De los resultados es claro que una alta proporción de las pequeñas pérdidas pero muy frecuentes se deben a este fenómeno. Adicionalmente, es muy importante intervenir las edificaciones de mampostería no reforzada de más de dos niveles, que ocasionan pérdidas para intensidades muy bajas y muy frecuentes. Por último, es importante dotar de gran ductilidad a las edificaciones para retrasar hasta intensidades muy altas y poco frecuentes del movimiento la pérdida total de las edificaciones.

A manera de resumen y ejemplo, en la Tabla 10.56 se presentan los daños en estructuras para cada uno de los municipios objeto es este estudio, y para los períodos de retorno de 10 y 500 años.

**Tabla 10.56 Daños en estructuras en todos los municipios para períodos de retorno de 10 y 500 años**

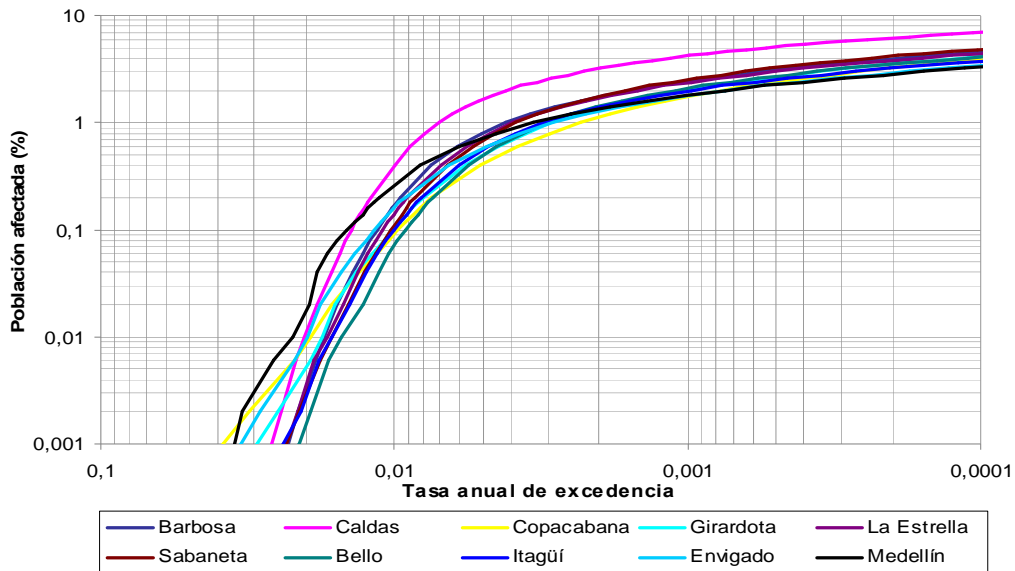
Municipio	10 años	500 años
Barbosa	0,40%	11%
Bello	0,40%	17%
Caldas	< 0,01%	8,5%

**Tabla 10.56 Daños en estructuras en todos los municipios para períodos de retorno de 10 y 500 años (Cont)**

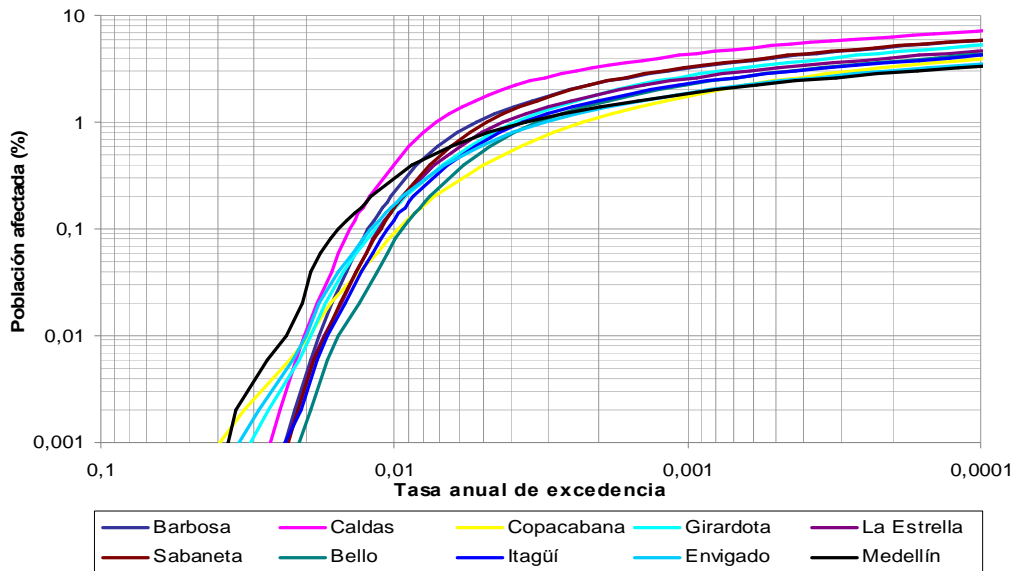
Copacabana	0,35%	7,0%
Envigado	0,80%	13%
Itagüí	0,50%	15%
Girardota	0,30%	6,5%
La Estrella	0,85%	27%
Medellín	1,80%	18%
Sabaneta	0,35%	17%

### 10.6.2 Afectación a Personas

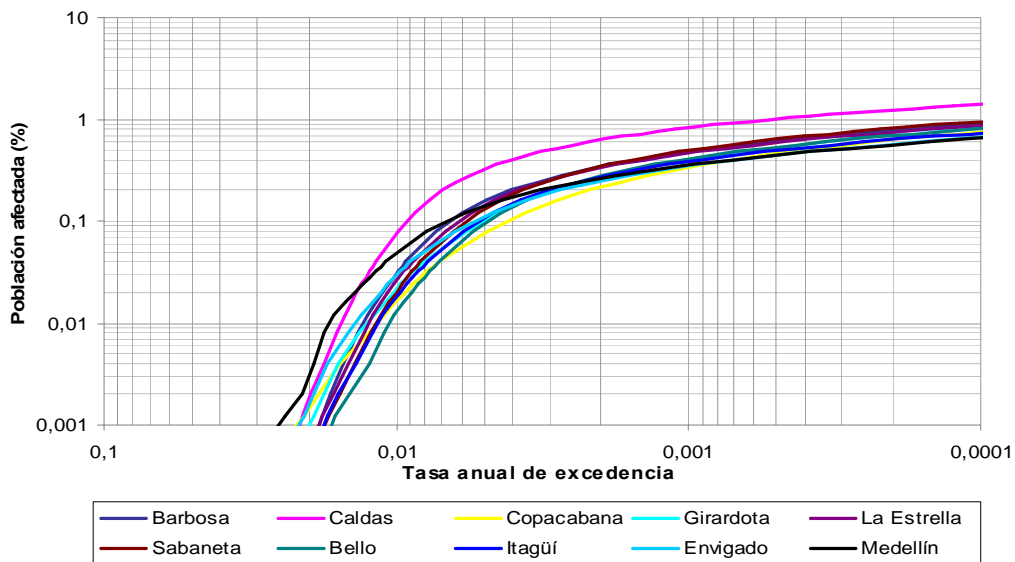
La afectación a personas en cualquiera de los tres niveles mantienen valores porcentuales muy semejantes en todas las ciudades excepto en el municipio de Caldas, que muestra valores más altos. La razón de este comportamiento es que las afectaciones a las personas dependen directamente de los daños a las edificaciones, y estos últimos ya se mencionó que porcentualmente son mayores para el municipio de Caldas (ver Figuras 10.77 a 10.82).



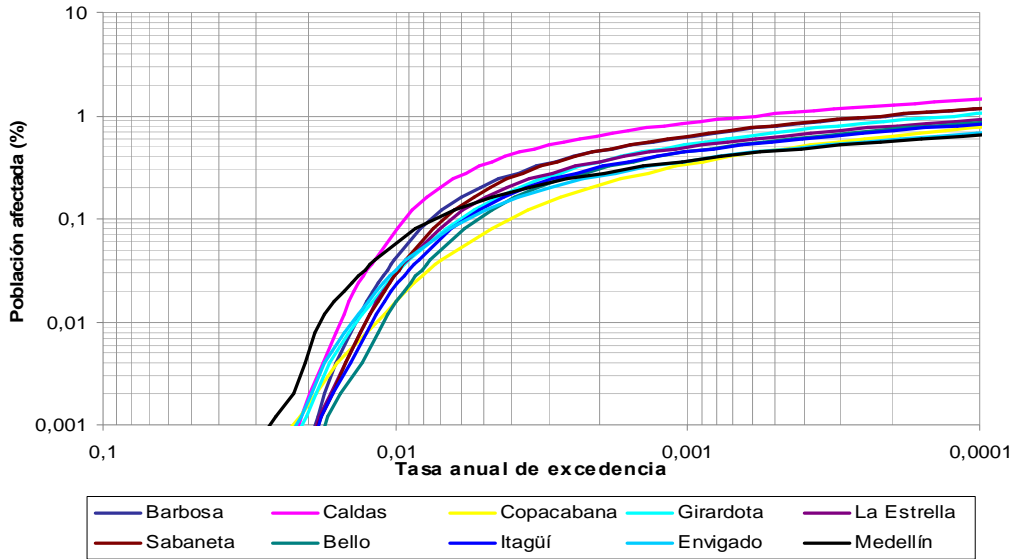
**Figura 10.77 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 1 en el día expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios**



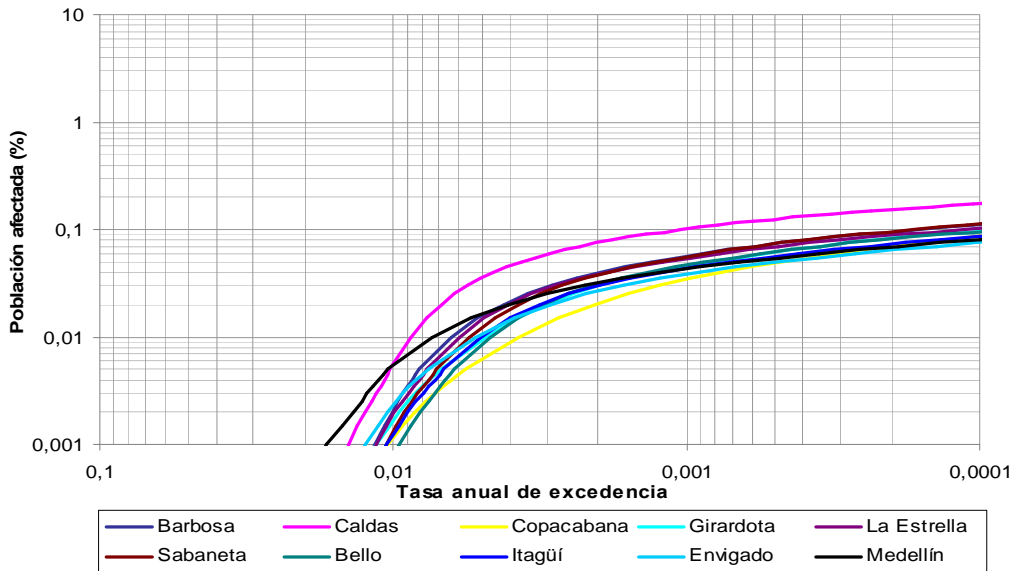
**Figura 10.78 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 1 en la noche expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios**



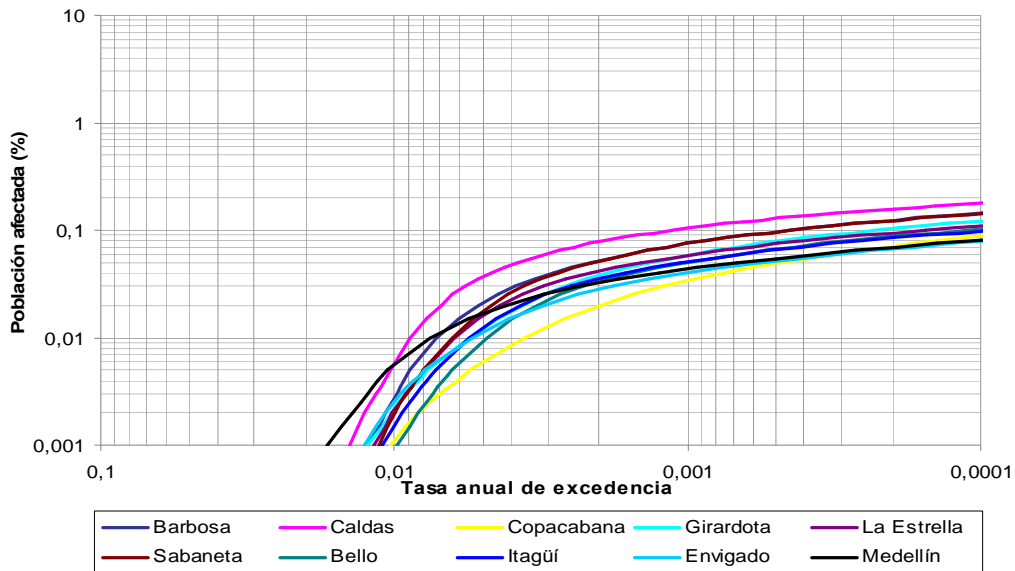
**Figura 10.79 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 2 en el día expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios**



**Figura 10.80 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 2 en la noche expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios**



**Figura 10.81 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 3-4 en el día expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios**



**Figura 10.82 Pérdida Máxima Probable por sismo para la afectación 3-4 en la noche expresada en porcentaje para los habitantes de todos municipios**

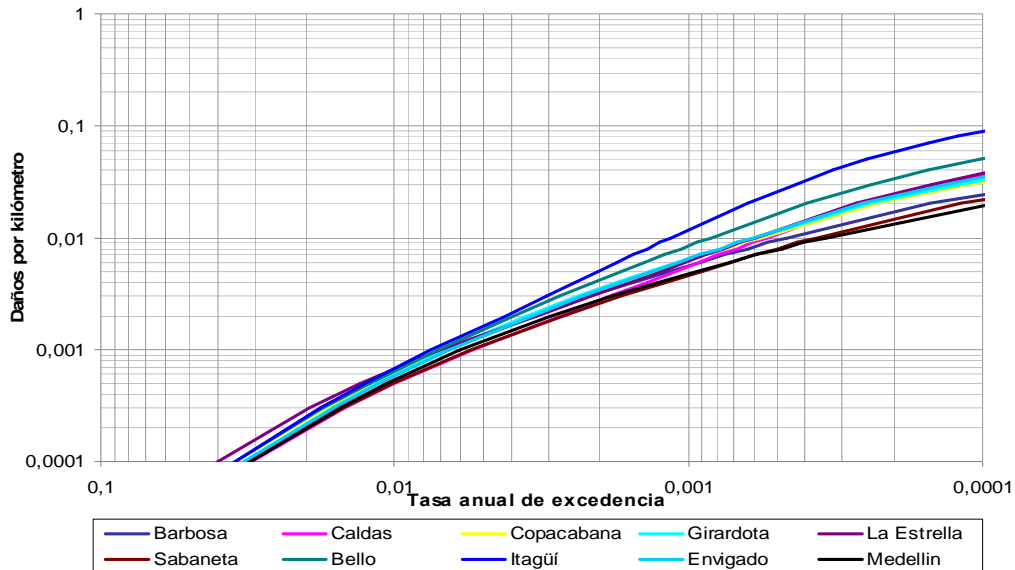
La afectación de nivel 1, heridos menores, comienza a aparecer con periodos de retorno entre 25 y 50 años. El nivel de afectación 2, heridos que requieren hospitalización, comienza a presentarse con periodos de retorno entre 40 y 60 años, y finalmente, los niveles de afectación 3 y 4, heridos muy graves y muertos, comienza a presentarse con periodos de retorno entre 60 y 100 años.

A partir de las Figuras 10.77 a 10.82 se puede apreciar que para periodos de retorno muy altos, de aproximadamente 10.000 años, los porcentajes promedio de afectación a personas en el nivel 1 es del 4%, en el nivel 2 del 1% y en los niveles 3 y 4 del 0.1%. Para la ciudad de Medellín, con el mayor número de habitantes, lo anterior significa que con periodos de retorno del orden de 10.000 años, los muertos en la ciudad de hoy pueden ascender a 1.800, los heridos de gravedad media pero que requieren hospitalización a 15.000, y finalmente, los heridos con heridas menores a 70.000.

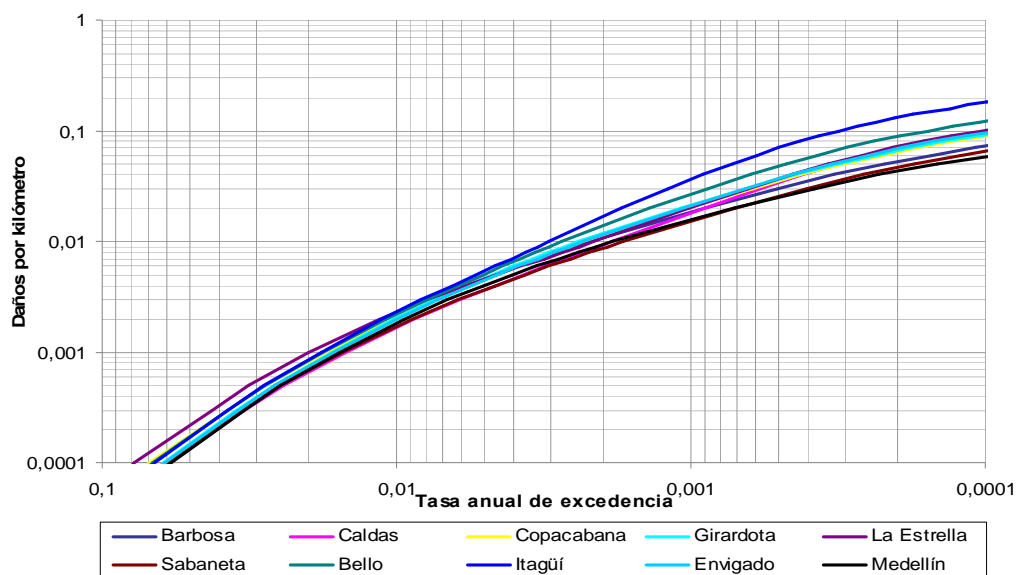
La diferencia entre las afectaciones a las personas si los eventos sísmicos ocurren durante el día o durante la noche es irrelevante. Las afectaciones a personas son ligeramente mayores si los sismos ocurren durante la noche. Esta pequeña diferencia se debe a la mayor vulnerabilidad de las edificaciones de uso residencial en comparación con las de uso comercial e industrial. Estas últimas, menos vulnerables, tienen su máxima ocupación durante el día, dando como resultado un riesgo menor si los eventos sísmicos ocurren durante el día.

### 10.6.3 Pérdidas en Tuberías

En cuanto al riesgo de las conducciones (Figuras 10.83 y 10.84), sensibles a la velocidad del movimiento del terreno más que a las aceleraciones que son las que afectan a las edificaciones, es muy semejante en todas las ciudades del valle. Este hecho se debe a que la atenuación de la velocidad es menos sensible a la distancia a la fuente sismogénica que la aceleración, resultando en una amenaza por velocidad más uniforme en todo el valle. Por otro lado, se está suponiendo que los tipos de tuberías existentes en todos los municipios, responsables de la vulnerabilidad, son semejantes, hecho este que contribuye adicionalmente a la uniformidad encontrada en el riesgo de daño a las tuberías en los diferentes municipios.



**Figura 10.83 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías flexibles todos los municipios**



**Figura 10.84 Pérdida Máxima Probable por sismo para las tuberías rígidas todos los municipios**

Como era de esperarse, el daño en las tuberías rígidas es mucho mayor que en las tuberías flexibles. En promedio puede decirse que los daños a las tuberías rígidas son aproximadamente tres veces mayores a los que se presentan en las tuberías flexibles. En estas últimas tuberías, con periodos de retorno de 1.000 años se presenta un daño cada 300 kilómetros, mientras que en las tuberías rígidas y con este mismo periodo de retorno se presenta un daño cada 100 kilómetros de tuberías.

## 11. CONCLUSIONES

El presente capítulo contiene las principales conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este estudio. Dado lo extenso del proyecto y los múltiples temas estudiados, se presentan las conclusiones de manera separada, para mayor facilidad de análisis y comprensión.

Finalmente, se presentan las recomendaciones con respecto a la aplicación de los resultados acá obtenidos y sobre los planes de acción que se considera deben realizarse.

### 11.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Para el desarrollo del presente estudio, en el que se involucró gran cantidad de información que representa las características del suelo dentro del Valle de Aburrá, se emplearon herramientas propias de los SIG para el manejo, procesamiento, análisis y publicación de la información geoespacial con que se contó en las diferentes actividades.

Se realizó la revisión e integración de las diferentes fuentes de información cartográfica y temática, así mismo se creó un modelo estratigráfico del suelo para las zonas urbanas y de expansión de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Copacabana, Girardota, Barbosa y Envigado.

Se elaboró un modelo digital de terreno del área del Valle de Aburrá, sobre el cual se elaboraron planos de geología, geomorfología y perfiles estratigráficos de las zonas urbanas de los diferentes municipios, los cuales sirvieron para el desarrollo de la microzonificación y además representan una valiosa herramienta para el manejo de esta información para cada uno de los municipios asentados en el valle.

Para realizar la microzonificación sísmica detallada de los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Copacabana, Girardota, Barbosa y Envigado fue necesario crear un modelo estratigráfico que permitiera obtener información detallada del tipo de suelo en cada una de las zonas urbanas y de expansión, es decir, las áreas donde se realizaría la zonificación sísmica dentro de los municipios. Los municipios de Medellín, Itagüí y Bello, no hicieron parte del modelo estratigráfico desarrollado en el presente estudio, ya que éste se había realizado en la microzonificación sísmica detallada de los años 1999 y 2002.



## 11.2 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

El Valle de Aburrá se localiza hacia la parte norte de la cordillera Central de Colombia; corresponde a una depresión topográfica alargada que puede ser dividida en dos tramos, el primero de ellos se localiza hacia el sur y centro, y va desde el municipio de Caldas hasta Bello en dirección aproximada norte – sur, la cual presenta una curvatura en cercanías de Sabaneta y Envigado. El segundo tramo presenta dirección noreste y va desde el municipio de Bello hasta finalizar en Barbosa.

Geológicamente el área metropolitana comprende el Valle de Aburrá y los altiplanos que lo rodean, donde afloran variadas unidades litodémicas que incluyen rocas de diferente edad, origen y composición. En relación con las edades, estas van desde rocas paleozoicas hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición se tienen rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas, gabros y basaltos; rocas volcanosedimentarias y los depósitos de origen aluvial y de vertiente, además de los llenos de origen antrópico. En consecuencia, el marco geológico del Valle de Aburrá es bastante complejo, considerando la presencia de varios terrenos alóctonos acrecionados y la fuerte influencia de los sistemas de fallas de Cauca y Romeral, además de sistemas menores asociados.

Las principales formaciones, en diferentes grados de meteorización y fracturamiento que se encontraron en el Valle de Aburrá corresponden al grupo Caldas (Anfibolitas del Alto de Minas, Esquistos de Caldas y Anfibolitas Granatíferas de Caldas), Grupo El Retiro (Anfibolitas de Medellín, Esquistos Anfibólicos de Baldías, Migmatitas de Puente Peláez y Gneis de La Ceja), Esquistos del Complejo Cajamarca, Intrusivo Triásico (Stock de Amagá y Gneis de Palmitas), la Milonita de la Iguaña del Intrusivo Jurásico, Complejo Ofiolítico de Romeral (Gabros de Romeral y Peridotita de Romeral), Complejo Ofiolítico de Aburrá (Metabasitas del Picacho, Dunitas de Medellín y Gneis Milonítico de Sajonia), Complejo Quebradagrande (Miembro Volcanosedimentario y Miembro Volcánico), Intrusivos Cretáceos (Batolito Antioqueño, Stock de Las Estancias, Stock de Media Luna, Batolito de Ovejas, Stock de Altavista, Stock de San Diego y Gabros de Copacabana), Depósitos de Vertiente (Depósitos de Deslizamiento y diferentes Depósitos de flujos de escombros y/o lodos), Depósitos aluviales (Depósitos Aluviales y Depósitos Aluviotorrenciales) y Depósitos Antrópicos).

Debido a su localización Colombia presenta una actividad sísmica importante generada por un complejo marco geodinámico de convergencia de las placas: Nazca, Caribe y Sur América, y dos micro placas: Panamá y el Bloque Andino. En este marco tectónico se sitúa el Valle de Aburrá, localizado sobre la Micro Placa del Bloque Andino en el extremo norte de la cordillera Central. Acorde con el contexto estructural, el Valle de Aburrá está clasificado como un área de amenaza sísmica intermedia, afectado durante su historia

por sismos de intensidad baja o media, provenientes fundamentalmente de las sismofuentes de Murindó, el Viejo Caldas, el Nido de Bucaramanga y el sistema de Fallas Romeral, el cual cruza el suroccidente del valle. Aunque es importante aclarar que dentro de los sismos que han afectado el Valle de Aburrá, provenientes del sistema de Fallas de Romeral, estos han ocurrido en el sector conocido como el eje cafetero.

El ambiente tectónico complejo, producto de la convergencia de placas, genera una estructura cortical con un sistema de fallas regionales. Estas estructuras, en el departamento de Antioquia, están enmarcadas dentro de dos grandes sistemas de fallas aproximadamente paralelas entre sí, donde el primer sistema lo conforman la zona de fallas Palestina y el segundo sistema corresponde a Cauca-Romeral.

Al sur del Valle de Aburrá se han reportado un gran número de fallas regionales y lineamientos con dos direcciones predominantes: NS a NNW al oeste del río Aburrá y una tendencia NW al este del mismo. Se destacan trazas de las fallas San Jerónimo, Minas y Santa Isabel. Al norte del valle existe otro sistema de fallas regionales con dirección NW donde sobresalen las fallas Don Matías y Rodas. El sistema de fallas con dirección NE donde las principales trazas son La Chapa y Santa Elena.

El sistema de fallas NS A NNW está conformado por estructuras de fallas que influyen tanto la dirección de las fajas de rocas metamórficas y las direcciones de foliación, como la disposición de la faja de rocas ultra básicas representadas por la Dunita de Medellín. Las principales rocas que afectan son los esquistos de Caldas y Esquistos de Cajamarca en los municipios de Caldas, La Estrella, Sabaneta y en los corregimientos de Palmitas y Santa Elena; las Anfibolitas de Medellín que constituyen un cuerpo de forma irregular, de dirección N-S; las Migmatitas de Puente Peláez; el Gneis de La Ceja cuyo cuerpo principal tiene dirección predominante norte-sur; el Gneis Milonítico de Sajonia y el Complejo Quebradagrande, unidad limitada por el Sistema de Fallas de Romeral, con su traza principal la falla San Jerónimo con una tendencia N a NNW .

El sistema de fallas NE se pueden agrupar en dos clases o sistemas: fallas formadas en un dominio de deformación dúctil y fallas formadas en dominio de fracturamiento frágil, las cuales afectan principalmente las Anfibolitas de Medellín y las Migmatitas de Puente Peláez y el Gneis de Sajonia.

El sistema de fallas y lineamientos NW en la zona de estudio y el sistema de dirección NW afectan principalmente el Batolito Antioqueño. Corresponde a lineamientos, fallas y fajas delgadas de rocas metamórficas incluidas dentro del Batolito como remanentes con tendencia general N25° a 60°W y los Esquistos de Cajamarca, que en los municipios de Barbosa y Girardota, se encuentra como un paquete de dirección N-W, en medio del Batolito Antioqueño y limitado de éste por fallas de igual dirección.

El Valle de Aburrá ocupa un valle intramontano profundo y relativamente estrecho que corta un sistema de superficies de erosión o altiplanos de edad Terciario Medio,

ubicados a alturas sobre el nivel del mar que oscilan entre 2 200 y 3 200 m, los cuales conforman el rasgo morfológico más sobresaliente del norte de la Cordillera Central colombiana. El valle tiene un ancho máximo desde el borde de los altiplanos que lo flanquean, de 10 km y una profundidad de 1 000 a 1 200 m según el altiplano que se utilice para la medición.

De acuerdo con el sistema cartográfico propuesto por Flórez (2003), el Valle de Aburrá y sus alrededores, que constituyen el objeto de este estudio, queda incluido en el sistema morfogénico de montaña media, subsistema superficies de aplanamiento residuales sin cobertura volcánica.

De acuerdo con este esquema de cartografía el Valle de Aburrá corresponde a un “cañón” entallado entre el sistema de altiplanos o superficies de erosión. La jurisdicción administrativa del Valle de Aburrá queda comprendida, de acuerdo con el estudio mencionado, en tres de las grandes unidades de relieve a saber: Superficies de erosión o altiplanos, escarpes regionales y cañones. La zona del corregimiento de San Sebastián de Palmitas, del municipio de Medellín, hace parte de la vertiente oriental del gran cañón del río Cauca (frentes erosivos).

En el Valle de Aburrá se reconocen las siguientes unidades de relieve: Altiplanos o superficies de erosión en zona rural de los municipios de Bello, Medellín, Envigado, Girardota, Copacabana y Barbosa; y Cañones que es la unidad de relieve principal, comprendida por el valle de Aburrá en su totalidad. Al occidente, en jurisdicción de Medellín se encuentra un pequeño segmento perteneciente a la parte alta del gran cañón del Cauca (frente erosivo); al sur en el municipio de Caldas se alcanza a cartografiar un sector más relacionado con la cuenca del río Amagá que con el de Aburrá.

### 11.3 NEOTECTÓNICA

Como parte de los estudios se realizaron investigaciones enfocadas a identificar evidencias o indicios de actividad neotectónica de las fallas que se encuentran en los alrededores y al interior del Valle de Aburrá. A diferencia de estudios anteriores se hizo énfasis en las fallas localizadas al oriente del Valle de Aburrá y algunas zonas al occidente del Valle que no habían sido estudiadas con anterioridad.

Al oriente se estudiaron los sectores de Sector Caravanchel – Presa La Fe, probablemente afectado por el sistema de fallas La Honda, la quebrada las Palmas que presenta algunas anomalías a lo largo de su perfil longitudinal, el sector de la vereda la Hondita, cerca de su desembocadura a la quebrada La Mosca y el sector de Guarne al sur del cruce de la quebrada La Mosca con la Autopista Medellín – Bogotá y el sector El Tablazo.

Como resultado de estos estudios detallados se puede afirmar que se tienen cuatro sitios con indicios de actividad neotectónica sin que sea muy clara la interpretación de cuál es la estructura que está generando estos indicios.

Si se considera que la falla Acuarela cruza el Valle de Aburrá, en inmediaciones de Bello, y que se tienen evidencias de afectación tectónica en Bello en el barrio Santa Ana en donde afecta cenizas volcánicas y probablemente en los últimos 10 000 años, y que se encontraron evidencias de afectación tectónica en Llano de Ovejas con diaclasas que afectan un paleosuelo y el suelo actual, se propone suponer que se tiene un fallamiento ocurrido recientemente, en los últimos 10 000 años. Con estas consideraciones el grado de actividad propuesto es de bajo a moderado para la denominada falla Sajonia.

Se requieren estudios más detallados para caracterizar las diferentes fallas reportadas en la zona. La cartografía de Ingeominas sugiere que es más importante la falla Acuarela que la falla Honda, igualmente la anomalía del perfil longitudinal a lo largo de la quebrada Las Palmas sugiere que en este sector hay anomalías recientes.

Hacia el portal occidental del Túnel de Occidente se aprecia un sitio que ha sido interpretado como una superficie de falla, que presenta un contacto neto entre materiales diferentes y en la parte alta se observa como el suelo está afectado por esta estructura. La falla tiene una disposición estructural N15°W/75°W y coincide con una de las trazas de la falla San Jerónimo. El desplazamiento acumulado estimado es de 1,5 m tomando como referencia el techo del depósito que se encuentra en ambos lados de la falla. Teniendo en cuenta la longitud de falla, este segmento de la falla San Jerónimo coincide con lo que WCC (1979) denominó falla Sopetrán, estos autores la describen como una estructura de 29 km de longitud, con disposición estructural NS-N10°W/70°E-30°W y con evidencias de desplazamiento en el Cuaternario Tardío entre la quebrada Mirandita y La Sopetrana (en inmediaciones de Sopetrán).

Así mismo, se analizaron otros sectores como la quebrada La Cabaña en San Antonio de Prado, la vertiente derecha quebrada Doña María, en el sector Ebéjico – Sevilla, al occidente del Valle de Aburrá, la quebrada la Clara o quebrada Seca, un sector de la quebrada la García, en inmediaciones de la población de San Félix, al NW del Valle de Aburrá y finalmente un sector de la quebrada Pucuná, en inmediaciones de Sevilla, al NW del Valle de Aburrá.

Como resultado de estos estudios se asignó a las fallas del Occidente una actividad de media a baja con sismos máximos esperados con magnitudes del orden de 6,5 Ms.

#### 11.4 AMENAZA SÍSMICA

Se realizó un estudio de amenaza sísmica muy detallado en términos de tasas de excedencia de aceleraciones espectrales para un rango de periodos estructurales entre

0,0 s y 2,0 s. Para cubrir los periodos estructurales altos, importantes para las grandes obras de ingeniería, se realizó un estudio de amenaza sobre las ordenadas del espectro de desplazamientos para un rango de periodos estructurales entre 0,15 s y 10,0 s.

Estos resultados en términos de tasas de excedencia hasta valores tan bajos como 0,0001, correspondiente a periodos de retorno promedio de 10 000 años, y en un amplio rango de periodos estructurales, de 0,0 s hasta 10,0 s, permitirá la adopción en un futuro de normas sísmicas basadas en diseño por desempeño para varios estados límite de servicio, asociado cada uno a diferentes probabilidades de excedencia en una ventana de tiempo. Si como todo indica, la nueva norma sismorresistente del país tome esta dirección, entonces los resultados de este estudio podrán usarse directamente para especificar los espectros de diseño para cada una de las ciudades del Valle de Aburrá, para diferentes probabilidades de excedencia y para periodos estructurales desde 0,0 s hasta 10,0 s.

Los resultados de este estudio indican que la amenaza sísmica del Valle de Aburrá es un poco mayor a la que se considera en la actual norma sismorresistente NSR-98. En la norma, la aceleración máxima en el basamento rocoso con un periodo de retorno promedio de 475 años es de 0,20 g. Este estudio indica que esta aceleración para el municipio de Caldas, la más alta, es de aproximadamente 0,24g, para Medellín es de 0,22g, y para Barbosa, la más baja, es de 0,18g.

En términos de desplazamientos máximos del terreno, los resultados de este estudio indican que con periodos de retorno promedios de 475 años se presentan desplazamientos máximos del terreno iguales a 23 cm para el municipio de Caldas, el más alto, de 22 cm para Medellín, y de 20 cm para Barbosa, el más bajo. Este resultado refleja la posición relativa de los municipios con las sismofuentes, de forma que los municipios del sur tienen una mayor actividad debido a su proximidad al sistema Romeral – Cauca; mientras que los del norte se alejan de este sistema.

En términos generales, este estudio muestra una variación importante en la amenaza sísmica entre los diferentes municipios, hecho que debe tenerse en cuenta en el diseño de obras de infraestructura en la región, además de mostrar un incremento del orden de 40% en su valor absoluto en comparación con lo que propone la norma sismorresistente actual.

Sin lugar a dudas, este incremento se debe al cambio en el modelo de liberación de energía en las fuentes sismogénicas. Tradicionalmente se había considerado un modelo exponencial truncado para la tasa de excedencia de magnitudes en las fuentes, que conduce a una función de densidad de probabilidades de las magnitudes de tipo exponencial truncado, es decir, que las probabilidades de las magnitudes, entre la mínima y la máxima, decrece aproximadamente de manera exponencial.

En años recientes este modelo exponencial ha sido fuertemente cuestionado con base en datos más precisos de algunas zonas sísmológicas alrededor del mundo y además con base en ensayos a escala en el laboratorio del proceso de ruptura de la corteza terrestre. Estos datos y estos ensayos indican que aparte de las pequeñas magnitudes que efectivamente parece que ocurren con una distribución de probabilidades exponencial, las altas magnitudes tienden a concentrarse en un rango muy estrecho de magnitudes muy cercano a la máxima que puede liberar la fuente. En otras palabras, cuando la energía acumulada es mucha, ésta, con probabilidades muy altas, más altas de lo que se creía antes, tiende a liberarse en magnitudes muy cercanas a la máxima.

Este cambio en la distribución de las probabilidades de ocurrencia en el rango de las magnitudes grandes, zona en la que en el país tenemos de escasa a nula información, hace que, aun manteniendo la misma tasa de ocurrencia de eventos en las fuentes, su distribución preferentemente en magnitudes cercanas a la máxima, aumente la amenaza sísmica estimada.

Aunque en el país se tienen pocos datos para confirmar el modelo de liberación de magnitudes utilizado, los datos reportados de zonas sismotectónicamente similares, además de resultados experimentales y resultados de algunos modelos teóricos de propagación de rupturas en rocas, hacen que los resultados que aquí se presentan sean más creíbles que los que se obtuvieron en estudios anteriores basados en modelos exponenciales de liberación de magnitudes en las fuentes.

Por último, con relación a la amenaza, para todos los efectos legales se debe considerar que todos los municipios del Valle de Aburrá están en zona de amenaza sísmica Intermedia.

## **11.5 CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA**

Para efectuar el análisis de propiedades estáticas y dinámicas se agruparon los materiales explorados por origen, en el caso de suelos residuales y en el caso de suelos transportados por su procedencia.

Con el objetivo de conocer las condiciones geológicas y geotécnicas de los diferentes perfiles de suelos presentes en los municipios a zonificar se ejecutó una campaña de exploración en la cual se ejecutaron 36 perforaciones profundas, adicionales a las realizadas durante los estudios de la microzonificación del año 2002.

La localización de las perforaciones se realizó de forma concertada con las autoridades de cada uno de los municipios y teniendo en cuenta la definición de las zonas urbanas y las áreas de expansión urbana con base en su Plan de Ordenamiento Territorial vigente (POT).

En las perforaciones ejecutadas se realizaron ensayos de penetración estándar, se tomaron muestras alteradas para ejecutar ensayos de clasificación y muestras inalteradas para ejecutar ensayos para caracterizar el comportamiento de los suelos en condiciones estáticas y dinámicas. Se realizaron ensayos para medir la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos y ensayos dinámicos sobre las muestras inalteradas considerando las condiciones naturales del contenido de agua, con lo cual se pudieron definir la variación del módulo de rigidez y la fracción del amortiguamiento crítico con el nivel de deformación para cada uno de los suelos estudiados. Por otra parte, en cada una de las perforaciones ejecutadas se realizaron ensayos geofísicos tipo Down-hole para medir la velocidad máxima de propagación de las ondas de corte y de compresión en los suelos.

Se realizaron análisis de la variación de las propiedades índices y de las propiedades de resistencia para cada una de las clasificaciones en que se dividieron los presentes en el Valle de Aburrá, considerando su origen en el caso de suelos residuales y su procedencia en el caso de los suelos transportados. En general, es claro el incremento de la resistencia a la penetración estándar con la profundidad tal como se pudo observar en los suelos residuales de neis y de diorita; mientras que en las propiedades índice no se aprecia una tendencia clara con la profundidad. En los suelos residuales derivados de anfibolita y gabro se observa que a partir de 10 m se tienen valores de resistencia a la penetración estándar superiores a 20 golpes. En los suelos residuales derivados de la cuarzodiorita del Batolito Antioqueño, a partir de 4 m el  $N_{SPT}$  es superior a 20 golpes. En los suelos transportados como es de esperarse, se presentan mayores variaciones: en algunos casos como en los depósitos aluviales finos y gruesos se puede obtener superficialmente rechazo u obtener valores de resistencia a la penetración estándar muy bajos inclusive a 15 m de profundidad.

Los suelos residuales se clasifican desde limos de baja compresibilidad hasta suelos de alta compresibilidad. Los suelos más plásticos corresponden a los suelos residuales de migmatitas y dunitas, mientras que en los suelos residuales de esquistos, granodiorita y diorita presentan menores plasticidades. Los otros suelos presentan plasticidad media. En los suelos transportados la variación es mucho más amplia.

En cuanto a la humedad, la mayor parte de los suelos residuales presentan humedades medias en un intervalo entre el 25% y el 35%, en general con tendencia a disminuir con la profundidad con excepción de de los suelos residuales de dunita y de diorita. Dado el hecho de que el suelo residual de las dunitas es más fino el intervalo de humedades en estos suelos presenta una humedad del orden de 56%. Por el contrario, los suelos residuales de rocas ígneas como la cuarzodiorita, el gabro y la diorita presentan granos de mayor tamaño y los valores de humedad promedio son más bajos, del orden de 22%.

Los suelos transportados finos presentan en general suelos más finos que los residuales por lo tanto las humedades son mayores, del orden de 40%; estos materiales presentan valores máximos por encima del 100%, inclusive en los depósitos aluviales

finos se presentaron valores superiores a 300%. Para estos materiales se obtuvo la mayor desviación estándar (35%).

Los valores de límite líquido se encuentran en un intervalo cerrado (40% a 55%), por fuera de este intervalo y con valores excepcionalmente altos están los suelos residuales de dunita con un promedio de 66% para un número de datos de 38 y con valores máximos por encima de 100% como sucede con los suelos transportados. Al comparar las humedades naturales con sus respectivos límites de plasticidad se puede concluir que los suelos presentan una humedad media, por lo tanto la consistencia de los suelos es en general media.

El índice de plasticidad para suelos residuales se encuentra en general entre 10% y 15%, exceptuando nuevamente los suelos residuales derivados de dunita cuyo valor medio es 23%. Los índices de plasticidad de depósitos y flujos están entre 15% y 23%, para este parámetro se obtuvieron las menores desviaciones (en general por debajo de 10%). Con estos valores se puede concluir que la plasticidad de los suelos es media a baja, es decir suelos que son susceptibles a sufrir erosión y que pueden cambiar de condiciones ante pequeños cambios en el contenido de agua.

Para evaluar las propiedades dinámicas del suelo se ejecutaron ensayos geofísicos en campo: Down-Hole, microsísmicos en laboratorio: Bender Element y ensayos dinámicos en laboratorio: Columna Resonante y Triaxial Cíclico.

Con base en los resultados de los ensayos dinámicos de campo y laboratorio se definieron las curvas de degradación del Módulo de Rigidez y Amortiguamiento. Para el ajuste se partió de modelos como los propuestos por Romo, o de aproximaciones utilizando las ecuaciones de Fredlung y Xing propuestas para simular la curva característica de suelos no saturados, y la modificación propuesta por Otálvaro al modelo propuesto por Hardin y Drnevich, en el cual se define un nivel de deformación donde empieza la pérdida de la estructura y el suelo comienza un comportamiento inelástico, y que se asimila a la deformación crítica planteado por Otálvaro y Betancur.

La variación en la composición de los materiales se refleja en los ajustes realizados para las curvas de degradación del módulo de rigidez y de la fracción de amortiguamiento crítico, de forma que los ajustes obtenidos para los suelos residuales presentan una banda mucho más estrecha que la que presentan los suelos provenientes de los depósitos de vertiente o los suelos aluviales. Como se ha venido observando desde proyectos anteriores es notorio el efecto del origen del suelo en la forma de las curvas de degradación.

Se obtuvieron ajustes para los suelos predominantes presentes en las áreas urbanas y áreas de expansión de cada uno de los municipios que conforman el Valle de Aburrá, las cuales pueden ser utilizadas para la evaluación de la respuesta del suelo ante sollicitaciones sísmicas de forma razonable, siempre y cuando los suelos involucrados



sean clasificados de acuerdo con su origen y procedencia, tal como se planteó en este estudio.

La velocidad de propagación de las ondas de corte representa un parámetro fundamental para la evaluación de la respuesta dinámica de un estrato de suelo sometido a una excitación sísmica. Como uno de los resultados de este estudio se encontraron una serie de correlaciones para estimar de forma razonable la variación de la velocidad de propagación de los suelos más representativos de los presentes en el Valle de Aburrá, con la profundidad y algunas propiedades índices como la resistencia a la penetración estándar. Al igual que las curvas de degradación, estas correlaciones pueden ser empleadas para la evaluación de la amenaza sísmica de futuros proyectos o en etapas iniciales de estudios detallados.

## 11.6 MICROZONIFICACIÓN

En este estudio de microzonificación se evaluó la respuesta sísmica de los perfiles de suelo presentes en los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado.

La metodología para la evaluación de la respuesta sísmica de los suelos para cada uno de los municipios incluyó los siguientes aspectos: Determinación de las señales excitadoras, a partir del espectro obtenido del análisis probabilístico de la amenaza sísmica a nivel de roca. Determinación de las variables para la caracterización del suelo, incluyendo su variación y las incertidumbres asociadas a la evaluación de cada una de ellas. Cálculo de la respuesta dinámica considerando las incertidumbres asociadas e interpretación de los resultados.

Para calcular la respuesta sísmica se emplearon tres sismos que representan diferentes escenarios en cuanto al origen del sismo esperado y cuyos espectros de respuesta cubren diferentes zonas de los espectros de amenaza uniforme para 475 años y 9 años (3 sismos por cada espectro de amenaza). Para la selección de los acelerogramas se partió de registros de sismos reales con características similares en cuanto a mecanismo de falla, distancia al epicentro y magnitud de los sismos esperados. Se trabajaron registros nacionales y registros obtenidos de bases de datos internacionales.

Para definir los parámetros geométricos, físicos y dinámicos de los perfiles de suelo evaluados en cada uno de los municipios se consideró la incertidumbre relacionada con la determinación y desconocimiento de los parámetros. En primer lugar se tuvieron en cuenta las posibles variaciones en la distribución y los espesores de los perfiles que se presentan en cada sitio, y en segundo lugar se consideraron las variaciones de las propiedades estáticas y dinámicas de los materiales de cada uno de los estratos que componen los perfiles.

En total se consideraron para cada sitio analizado 30 casos de variación de las variables involucradas y con ello se produjeron 30 respuestas asociadas a cada sismo de excitación. Con las respuestas en superficie y la señal de excitación (roca) se obtuvieron, para cada uno de los casos seleccionados, las relaciones espectrales, *RRS* (Ratio Response Spectra). Con este análisis se obtuvieron 90 posibles relaciones espectrales para cada sitio evaluado. De esta forma los espectros obtenidos para cada sitio tienen un cubrimiento importante de los diferentes escenarios sísmicos a los cuales está expuesto el sector.

En este estudio de microzonificación se caracterizó estadísticamente, a través de su esperanza y su desviación, la función de amplificación del depósito de suelo, estimada como la razón entre los espectros de respuesta en el basamento rocoso y en la superficie del suelo. Por tratarse del cociente entre espectros de respuesta, la incertidumbre en la función de transferencia se debe no sólo a la incertidumbre en los parámetros mecánicos que caracterizan el perfil del suelo sino a la aleatoriedad del movimiento en el basamento rocoso.

Es importante anotar que la función de amplificación estimada considera la respuesta no lineal del suelo en función de la intensidad del movimiento en el basamento rocoso.

Finalmente, se estimaron, con base en las tasas de excedencia de aceleraciones espectrales en el basamento rocoso, resultantes del estudio de amenaza sísmica, y la función de amplificación considerando de manera rigurosa su incertidumbre, las tasas de excedencia de aceleraciones en la superficie del suelo. Este procedimiento es novedoso no sólo por la metodología empleada para llevarlo a cabo sino por la consideración rigurosa de la incertidumbre en la función de amplificación en la estimación de las tasas de excedencia de aceleraciones espectrales en la superficie del suelo.

Los análisis de los espectros obtenidos en cada uno de los perfiles más representativos de cada uno de los municipios reflejan la heterogeneidad de los materiales que se presentan en cada sector; de forma que en los suelos residuales la banda de variación de los espectros es mucho más estrecha que en los perfiles en donde predominan los materiales transportados como los diferentes tipos de depósitos de vertiente, y los depósitos de origen aluvial.

En general, los espectros de los municipios hacia el sur del valle presentan espectros más altos que los de los municipios del norte, lo cual refleja las diferencias en la amenaza sísmica que se presenta en la zona.

Prácticamente todos los espectros están por encima de los recomendados en el método obligatorio de la Norma Sismo Resistente (NSR-98) vigente. Este es un comportamiento que se ha venido observando desde microzonificaciones anteriores. Se espera que en

la actual revisión de la norma se puedan exigir espectros con aceleraciones espectrales mayores que reflejen los resultados que se obtuvieron en este estudio.

Es destacable anotar también, que los espectros de respuesta de amenaza uniforme en superficie, y debido al procedimiento utilizado, no requieren de suavizados; se presentan tal y como resultan del proceso de estimación. No requieren suavizados ya que provienen de descripciones estadísticas de las aceleraciones en el basamento rocoso a través de sus tasas de excedencia, y de funciones de amplificación del depósito de suelo descritas también estadísticamente a través de su esperanza y desviación.

Para mantener la estimación de espectros de respuesta en la superficie del suelo sin ningún proceso promediador u homogenizador, se decidió no promediar espectros de respuesta en superficie para crear las microzonas sísmicas, y dejar entonces la estimación de espectros aproximadamente para cada predio de las ciudades en lo que se ha llamado nanozonificación.

Es importante dejar claro que no es que se tenga certidumbre total sobre los perfiles de suelo en cada predio de las ciudades, pero se consideró preferible aproximar sobre los perfiles de suelo con base en tendencias razonables de las formaciones geotécnicas superficiales, a estimar sólo un espectro por microzona en donde se tenga alguna certeza del perfil de suelo, o a promediar los espectros de respuesta resultantes sobre una microzona declarada como tal con base en argumentos no muy claros ni convincentes; nunca ha sido claro el criterio para declarar una zona geográfica como una microzona sísmica.

Por tratarse de espectros de amenaza uniforme en los que cada ordenada espectral se estima independientemente, los espectros de diseño resultantes no siguen una función matemática como ha sido tradicional. En vez de esto, se definen numéricamente a través de las ordenadas espectrales para un cierto número de periodos estructurales. Aunque suaves, son caprichosos y reflejan las propiedades mecánicas de cada perfil de suelo, incluyendo sus incertidumbres y no linealidades.

Aunque se alcanzan a ver muy diversos tipos de formas, que reflejan la heterogeneidad de los suelos del Valle de Aburrá, si se comparan con los espectros de diseño tradicionales de las normas, sobresalen algunos rasgos que merecen comentario.

Por lo general, las aceleraciones máximas en superficie son bastante mayores a las máximas aceleraciones sobre roca. El factor promedio entre estas aceleraciones es del orden de 2,0, con lo que resultan aceleraciones máximas en superficie del orden de 0,4g.

Para el espectro de respuesta en superficie con un periodo de retorno promedio de 475 años, para el que las intensidades son lo suficientemente grandes para que el suelo incurra en el intervalo de comportamiento no lineal y genere grandes

amortiguamientos, el factor promedio que relaciona las aceleraciones máximas con la respuesta espectral máxima es del orden de 2,5. Esto hace que sean usuales aceleraciones espectrales del orden de 1,0g.

Por lo general, los periodos estructurales para los que se presentan las máximas ordenadas espectrales están entre 0,2 s para perfiles de suelo muy competentes y van a lo sumo hasta 0,6 s, para depósitos de suelo más blandos.

Las caídas del espectro de respuesta a partir de la aceleración espectral máxima suelen ser mucho más pronunciadas que lo predicho por una función inversa con el periodo estructural. Esto es más cierto para los depósitos blandos de suelo que para los depósitos aluviales del río Medellín o las quebradas. Aproximadamente partir de 1,0 s, la caída del espectro sí se asemeja a una función inversa con el periodo estructural, confirmándose el hecho de que para ondas de periodos mucho más altos que los fundamentales de los depósitos, el suelo transmite casi sin modificación los movimientos del basamento rocoso, y en este la caída de los espectros de respuesta se asemeja mucho a una función inversa con el periodo estructural a partir de la aceleración espectral máxima.

Las generalidades descritas son hechos que a la luz del conocimiento que hoy se tiene del fenómeno, son perfectamente explicables y deberían como efectivamente ocurre, reflejarse en las formas de los espectros de respuesta en superficie. Todo esto es resultado no sólo de más y mejor información, sino de la forma racional y coherente que se utilizó para procesar esa información.

## 11.7 RED ACELEROGRÁFICA

Como parte de este proyecto se instalaron nueve estaciones acelerográficas que junto con la estación de Itagüí, instalada con anterioridad, conforman las diez estaciones de la llamada Red Acelerográfica del Valle de Aburrá, RAVA.

Los equipos acelerográficos instalados en este proyecto son acelerógrafos CUSP-3C de tres canales que registran digitalmente en tres direcciones ortogonales. Estos equipos son fabricados por la firma Canterbury Seismic Instruments de Christchurch, Nueva Zelanda.

Entre sus características más destacables se encuentran: operan con niveles de ruido promedio (RMS) inferiores a 70  $\mu$ g, muy inferiores a las aceleraciones mínimas de interés en ingeniería sísmica, que son del orden de 500  $\mu$ g. El nivel máximo de registro de los sensores es de 3g, suficiente para una aplicación en ingeniería sísmica; es muy improbable que en campo libre se lleguen a registrar aceleraciones máximas superiores a 3g.

La tarjeta de conversión análogo-digital de este acelerógrafo es de 24 bits, que genera un rango dinámico de 108 db, es decir, que la resolución y la aceleración mínima registrada por el acelerógrafo es de 50  $\mu$ g, semejante al nivel de ruido de los sensores y muy inferior a las aceleraciones mínimas de interés en ingeniería sísmica.

El acelerógrafo CUSP-3C se comunica con el usuario a través del protocolo TCP-IP que es el mismo que se utiliza en Internet. Lo anterior significa que si el acelerógrafo está conectado a la red de Internet, éste se podrá operar y consultar desde cualquier parte del mundo a través de su dirección IP. Cuando el equipo no está conectado a la red, el equipo se puede operar y consultar desde cualquier computador portátil a través del puerto estándar de Ethernet y haciendo uso de cualquier navegador de que disponga el computador portátil.

Por último, es importante mencionar que el acelerógrafo CUSP-3C tiene incorporado un GPS que constantemente está consultando el sistema satelital de posicionamiento global, para corregir las coordenadas de ubicación del equipo, y lo más importante, corregir la señal de tiempo del reloj interno del equipo. Este procedimiento garantiza desviaciones respecto al tiempo UTC menores a 400  $\mu$ s, es decir, que con equipos independientes e instalados en dos sitios distantes, pueden hacerse cálculos de los tiempos entre llegadas de las fases de un evento sísmico.

Respecto a la RAVA, como complemento de la Red Acelerográfica de Medellín, RAM, es importante indicar que con las nuevas estaciones en roca del Ancón Sur en el municipio de la Estrella y de la central hidroeléctrica La Tasajera en Girardota, se podrán medir las posibles variaciones en los movimientos del basamento rocoso dentro del Valle de Aburrá y debidos a eventos lejanos.

Es importante destacar que algunos de los nuevos equipos de la RAVA registrarán las amplificaciones y demás efectos locales en depósitos de suelo y perfiles estratigráficos no instrumentados con la RAM, como por ejemplo los de los suelos residuales del Batolito Antioqueño en los municipios del norte del Valle.

Debido a la precisión en los relojes de los nuevos equipos, menores a 400  $\mu$ s, en el futuro se podrá intentar seguir la propagación de las ondas sísmicas en el valle, en especial la de las ondas superficiales. Estos detalles nos permitirán entender cada vez mejor el fenómeno sísmico que afecta el valle.

Desde el punto de vista operativo, es importante mencionar la posibilidad de consultar y operar estas nuevas estaciones a través de la Internet, permitiendo a muy corto plazo su operación remota desde cualquier parte del mundo. Simplemente habrá que dotar las estaciones de un receptor de señal inalámbrica de Internet, que muy pronto estará disponible a lo largo y ancho del Valle.

Al momento de escribir estas conclusiones ya en la RAVA se habían registrado cuatro eventos sísmicos. El primero ocurrido el 17 de febrero de 2008 y registrado en las estaciones de Girardota y Barbosa con aceleraciones máximas horizontales de 1,5 gales. El segundo evento ocurrió el 25 de marzo de este año y sólo se registró en la estación de Barbosa con una aceleración máxima horizontal de 1,4 gales. El tercer evento ocurrió el 9 de mayo y se registró en las estaciones de La Estrella y Barbosa con aceleraciones máximas promedio de 2,5 gales. El cuarto y más importante evento fue el llamado sismo de Quetame ocurrido en la cordillera oriental el pasado 24 de mayo, que se registró en seis estaciones: Caldas, el Ancón Sur, Sabaneta, Itagüí, Copacabana y Barbosa, con aceleraciones horizontales máximas entre 0,5 gales en roca y 2,4 gales en suelos blandos.

La información suministrada por estos registros ya empieza a proporcionar información que permitirá ajustar en el futuro, junto con información de otros eventos, las funciones de amplificación propuestas para los diferentes perfiles estratigráficos, que tienen un efecto muy importante en las formas y valores de los espectros de respuesta en superficie usados para diseño de obras de infraestructura.

## 11.8 VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO

La evaluación de la vulnerabilidad física se hizo en función de las siguientes variables: uso, sistema estructural, sistema de cubierta, edad de la construcción, estrato socioeconómico y pendiente del terreno. Con base en estas variables, de las que se hicieron mapas que muestran su distribución geográfica, se estimaron las propiedades mecánicas de las edificaciones como periodo fundamental de vibración, forma fundamental de vibración y aceleración resistente.

Para describir el riesgo sísmico se decidió estimar para cada ciudad la curva de pérdida máxima probable (*PML*), que no es otra cosa que la tasa de ocurrencia de pérdidas, que describe estadísticamente el proceso de ocurrencia de pérdidas para un conjunto de bienes.

Para estimar la *PML* se hizo uso de la herramienta computacional IE-RISS diseñada para este tipo de estimaciones en el sector de los seguros. En términos generales, el IE-RISS estima la curva de *PML* para un conjunto de bienes partiendo de la tasa de excedencia de magnitudes en las fuentes sismogénicas y pasando por un proceso de conversión de las magnitudes a la aceleración espectral en el basamento rocoso, luego a la aceleración espectral en la superficie del suelo, luego a la respuesta estructural, luego a los daños y finalmente a las pérdidas. En este proceso de conversión se usan en el mismo orden, las ecuaciones de atenuación, las funciones de amplificación del suelo, las funciones de respuesta estructural, las funciones de vulnerabilidad y las funciones de pérdidas. Por lo general, cada una de estas funciones se considera incierta y esta incertidumbre se tiene en cuenta de manera rigurosa en la estimación de

las tasas de excedencia. El proceso descrito es riguroso y sigue secuencialmente la ocurrencia del fenómeno pero esta vez a través de su descripción matemática.

Las pérdidas porcentuales sobre las edificaciones arrojan los siguientes resultados: Las pérdidas con periodos de retorno promedio de 500 años están alrededor del 14%, teniendo Girardota la más baja con el 6% y La Estrella las más altas con el 25%. Las pérdidas con periodos de retorno de 2 500 años están alrededor de 48%, teniendo Girardota la más baja con el 20% y Caldas la más alta con el 80%. Finalmente, las pérdidas con periodos de retorno de 10 000 años están alrededor de 61%, teniendo Girardota la más baja con el 34% y Caldas la más alta con el 99%.

Para tener una idea de la distribución geográfica de las pérdidas, muy importante para la coordinación y programación de actividades que tienen que ver con la atención de las emergencias, se decidió abandonar la propuesta clásica de los escenarios de pérdidas asociados a un evento “muy grande”. Como la definición lo expresa claramente, los escenarios de pérdidas dependen del evento, y como las características de los eventos, los escenarios también pueden cambiar drásticamente. Por ejemplo, para eventos medianos, pero más frecuentes, los escenarios pueden ser radicalmente diferentes a los que se presentan para un “gran” evento, pero podrían ser más útiles los escenarios de los eventos medianos más frecuentes, que el escenario del “gran” evento muy poco frecuente.

Con esta idea en mente, se propuso estimar la distribución geográfica de las pérdidas promedio anual, *PPA*. La *PPA* cuantifica cuanto debe perderse anualmente de cada edificación para que en un tiempo muy largo, teóricamente infinito, la suma de las *PPA* sobre todos esos años sea igual a las pérdidas totales estimadas para esa edificación. Claramente, en la *PPA* se incluyen todos los eventos: los muy frecuentes pero pequeños y los grandes poco frecuentes. La distribución geográfica de las *PPA* ilustraría el escenario de pérdidas “promedio”.

Para evaluar el grado de afectación directa que ocasiona el fenómeno sísmico a las personas, se estimaron, con un procedimiento enteramente igual al descrito para estimar pérdidas en edificaciones, las tasas de excedencia de número de personas con determinado grado de afectación, que corresponden a las curvas de *PML* de afectación a personas.

Los grados seleccionados para describir el daño a las personas son los descritos en el programa HAZUS, desarrollado por la Agencia Federal de Manejo de Emergencias, FEMA (Federal Emergency Management Agency, 1999): grado 1, heridos que requieren asistencia médica básica; grado 2, heridos que requieren hospitalización; grado 3, heridos muy graves; y grado 4, muertos.

En la estimación de las curvas de *PML* de afectación a personas se usaron igualmente las curvas de vulnerabilidad del HAZUS, que relacionan el grado de daño a la edificación con el porcentaje de afectados en cada grado de afectación descrito.

Las estimaciones de afectación a personas se hicieron bajo dos hipótesis: que los eventos sísmicos ocurren durante el día y que ocurren durante la noche. Cada una de estas hipótesis significa una distribución diferente de la población en las edificaciones. Por ejemplo, durante la noche las edificaciones de uso residencial estarán con un alto grado de ocupación mientras que las edificaciones de uso comercial, industrial, institucional y educativo tendrán un grado de ocupación menor. Estos resultados reflejan por ejemplo si es más alto el riesgo por la noche debido a que las edificaciones residenciales están ubicadas en sitios más peligrosos desde el punto de vista sísmico, o son más vulnerables por su configuración arquitectónica o por su edad, etc.

Los grados de afectación porcentuales a las personas se estiman en: el porcentaje de heridos leves con periodos de retorno de 500 años es en promedio de 1,6% si los sismos ocurren durante el día, y de 1,9% si los sismos ocurren durante la noche. Los porcentajes de heridos hospitalizables para el mismo periodo de retorno son de 0,32% durante el día y 0,36% durante la noche. Los porcentajes de heridos graves o muertos, para el mismo periodo de retorno son de 0,03% durante el día y 0,04% durante la noche.

Los porcentajes de heridos leves con periodos de retorno de 2 500 años son en promedio de 3,1% durante el día, y de 3,5% durante la noche. Los porcentajes de heridos hospitalizables para el mismo periodo de retorno son de 0,62% durante el día y 0,69% durante la noche. Los porcentajes de heridos graves o muertos, para el mismo periodo de retorno son de 0,07% durante el día y 0,08% durante la noche.

Por último, los porcentajes de heridos leves con periodos de retorno de 10 000 años son en promedio de 4,3% durante el día, y de 4,8% durante la noche. Los porcentajes de heridos hospitalizables para el mismo periodo de retorno son de 0,86% durante el día y 0,96% durante la noche. Los porcentajes de heridos graves o muertos, para el mismo periodo de retorno son de 0,10% durante el día y 0,12% durante la noche.

Finalmente, se estimaron las tasas de excedencia de daños en las conducciones. Para esto, y debido a que no se tiene información sobre la distribución geográfica de las redes de conducciones, se estimaron los daños/kilómetro que ocurrirían en cada sitio, usando las funciones de vulnerabilidad del programa HAZUS, que relaciona los daños a las conducciones en función de la velocidad máxima horizontal en el depósito de suelo. Se alimentó entonces el programa IE-RISS con ecuaciones de atenuación sobre la velocidad máxima horizontal, se estimaron funciones de amplificación del suelo sobre la velocidad máxima y por último, haciendo uso del procedimiento ya descrito, se estimaron las tasas de excedencia de daños en las conducciones.



Las pérdidas sobre las conducciones arrojan los siguientes resultados: con periodos de retorno promedio de 500 años, en promedio se presenta un daño cada 82 km para las tuberías rígidas y cada 286 km para las tuberías flexibles. Con periodos de retorno de 2 500 años, en promedio se presenta un daño cada 22 km para las tuberías rígidas y cada 62 km para las tuberías flexibles. Por último, con periodos de retorno de 10 000 años, en promedio se presenta un daño cada 10 km para las tuberías rígidas y cada 26 km para las tuberías flexibles.

## 11.9 RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos durante la ejecución del presente estudio, y teniendo en cuenta las conclusiones más relevantes del mismo, se plantean las siguientes recomendaciones:

- Adelantar los trámites legales respectivos que permitan incluir de manera oficial los resultados de los capítulos de amenaza sísmica y microzonificación en los Planes de Ordenamiento Territorial de cada municipio.
- Teniendo en cuenta que el estudio de amenaza sísmica para Medellín se llevó a cabo hace casi una década, que los estudios de Bello e Itagüí se realizaron hace seis años, y que además la metodología utilizada en el presente estudio es mucho más avanzada que la utilizada en aquellos, se recomienda hacer una actualización de la zonificación sísmica de Medellín, Bello e Itagüí, de manera que se tengan estudios y normas con un estado del arte uniforme en todo el Valle de Aburrá.
- Integrar en una sola las redes de la ciudad de Medellín (RAM) y del Área Metropolitana (RAVA) y Envigado, de manera que permita un manejo unificado, con las mismas políticas de mantenimiento y uso.
- Para la evaluación de la amenaza sísmica fue necesario hacer algunas consideraciones para tener en cuenta los indicios de actividad tectónica reciente encontrados en algunos sitios localizados al oriente del Valle de la Aburrá, así como de algunos de ellos localizados hacia el occidente. Es importante que estos estudios continúen de forma que se sigan acopiando pruebas que permitan verificar o descartar la actividad de fallas cercanas al Valle de Aburrá, y de esta manera precisar las consideraciones realizadas en cuanto a la actividad de estas fallas.
- Los ensayos dinámicos se realizaron sobre los suelos con las condiciones originales del contenido natural de agua. Es importante diferenciar el efecto de fenómenos como la succión, que tiene un aporte importante en el comportamiento de suelos no saturados como lo son la gran mayoría de los suelos que fueron detectados en el

valle. Así mismo, se deben continuar las investigaciones destinadas a analizar la relación entre el origen y el grado de meteorización en el valor de la deformación crítica a partir de la cual los suelos cambian de comportamiento.

- Se deben desarrollar estudios orientados a precisar las curvas de vulnerabilidad considerando los materiales y los métodos constructivos realmente utilizados en los municipios que conforman el Valle de Aburrá. Como se pudo observar, la mayoría de las estructuras no cumplen con las normas sismorresistentes y se utilizan distribuciones y métodos constructivos que en principio se juzgan como si no fueran apropiados, pero que pueden tener comportamientos aceptables durante un sismo.
- Con base en los resultados del estudio de riesgo sísmico (*PPA* y *PML*), se recomienda la realización de un estudio que permita elaborar una estrategia de aseguramiento catastrófico masivo para las edificaciones del área metropolitana. Esta estrategia deberá incluir, entre otros, la definición de las políticas de aseguramiento (deducibles, límites asegurados), elaboración de una metodología para la definición de los valores asegurables, formas de financiamiento, políticas de subsidio y mecanismos para el pago de indemnizaciones.

**ESTA HOJA HA SIDO  
INTENCIONALMENTE DEJADA EN  
BLANCO**



## 12. BIBLIOGRAFÍA

Abrahamson, N.A. (2000). State of the practice of seismic hazard evaluation. *Proceedings GeoEng2000 Conference*, Melbourne, Australia.

Abrahamson, N.A., Silva, W. (1997). Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes. *Seismological Research Letters*, Vol. 68.

Akkar, S., Bommer, J. (2007), Empirical Prediction equations for Peak Ground Velocity derived from strong motion records from Europe and the Middle East, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 2, pp. 511–530, April.

Álvarez y Trujillo, (1985). Estudio Geomorfológico y estructural del Valle de Aburrá (Zonas 5 y 6). Tesis de grado Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. p 301.

Álvarez, J. (1983). Geología de la cordillera Central y el occidente Colombiano y petroquímica de los intrusivos granitoides Meso-Cenozoicos. *Boletín Geológico Ingeominas*. Volumen 26(2), p1-175. Bogotá.

Álvarez, J. (1995). Geología del Complejo Ofiolítico de Pácora y Secuencias Relacionadas de Arco de Islas (Complejo Quebradagrande) Colombia. *Bol. Geol. Ingeominas* vol 35 No 1 pp 1-48.

Anderson, J.G. (1997). Nonparametric description of peak acceleration above a subduction thrust, *Seismological Research Letters*, 1(68), 86-94.

Arai, K., Lida, K., Konja, A. (1990). A simple back-analysis in a seismic subsoil context, *Soils and Foundations*. Vol. 30(4): 175-182.

Arango, I., Montoya, L. (1982). Fracturamiento del Batolito Antioqueño y sus relaciones tectónicas e hidroestructurales. Tesis de grado Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. p 171.

Arango, M., Velázquez, A. (1993) Catálogo histórico sísmico para Medellín. Alcaldía de Medellín/PNUD, Edit. Cadena, Medellín.

Arboleda, J., Ordaz, M. (1999) Un mejor uso de los datos estadísticos para la estimación de la sismicidad local. En: Revista Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. N° 53.

Área Metropolitana (2006). Estándares para el manejo de la geoinformación.

Arias, L.A., (1995). El relieve de la zona central de Antioquia: un palimpsesto de eventos tectónicos y climáticos. *Revista Facultad de Ingeniería, Antioquia University*. 10, 9-24.

Aristizábal, E. (2004). Geomorphological evolution of the Aburra Valley, Northern Colombian Andes, and implication for landslide occurrence. Tesis de Maestría, Universidad Shimane. Japón. 163p.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996), INGEOMINAS—Uniandes, Estudio general de la amenaza sísmica en Colombia: INGEOMINAS, Bogotá, 254 p.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS (1998) NSR-98.

Atkinson, G., Boore, D. (2003), Empirical Ground-Motion Relations for Subduction-Zone Earthquakes and their application to Cascadia and Other Regions, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(4), 1703–1729.

Auvinet, G., Juárez, M., Méndez, E. (2005). Avances en la caracterización geotécnica del subsuelo de la cuenca de México. Coloquio Conmemorativo: La ingeniería geotécnica a 20 años de “El Sismo”. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Beresnev, I. A., Wen, K.L. (1996). Nonlinear soil response - a reality? *Bulletin of the Seismological Society of America* 86, 1964-1978.

Bernardini A, Gori R, Modena C (1990). “An application of coupled analytical models and experiential knowledge for seismic vulnerability analyses of masonry buildings”. In A. Koridze (ed) *Engineering Aspects of Earthquake Phenomena*, Vol. 3: 161-180. Oxon: Omega Scientific.

Betancur, G. (2006). Caracterización dinámica de los suelos residuales del Stock de Altavista. Tesis de Maestría en Ingeniería – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. 123 p.

Bohórquez, O.P., González, L., Jaramillo, C.M. (2001). Estudio neotectónico multidisciplinario, caso de estudio: Falla Villa María Termal: En Memorias VIII Congreso Colombiano de Geología, en Cdroom.

Boore, D.M. et al. (1997). Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seismological Research Letters*, Vol. 68.

Botero, G. (1963). Contribución al Conocimiento de la Geología de la Zona Central de Antioquia. *Anales de la Facultad de Minas*, No 57.

Boussignault, (1825). Sur l'existence d'iode dans léqu de une saline de la Province d'Antioquia. Annales de Chemie et Physique. Volumen 30. P 91-96. París.

Burbank, D.W., Anderson, R.S., (2001). Tectonic Geomorphology. Blackwell Science. First Edition. Massachusetts U.S.A. 1-274.

Calvi GM (1997). "Un Metodo agli Spostamenti per la Valutazione della Vulnerabilità di Classi di Edifici". L'Ingegneria Sismica in Italia, Atti VIII Convegno Nazionale ANIDIS, Taormina.

Calvi GM (1999). "A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings". Journal on Earthquake Engineering 3(3): 411-438.

Cardona A., O.D. (2001). "Estimación Holística del Riesgo Sísmico Utilizando Sistemas Dinámicos Complejos". Tesis Doctoral. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports, Departament de Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Universitat Politècnica de Catalunya. (in Spanish).

Cardona A., O.D., Hurtado, J.E. (1990). "Propuesta Metodológica para los Análisis de Vulnerabilidad". Informe de Consultoría Proyecto UNDRR/ACDI/ONAD para la Mitigación de Riesgos en Colombia. Inédito. Santiago de Cali. (in Spanish).

Cardona A., O.D., Yamín, L.E. (1997). "Seismic Microzonation and Estimation of Earthquake Loss Scenarios: Integrated Risk Mitigation Project of Bogotá, Colombia". Earthquake Spectra, 13(4), pp795-814.

Case, J.E., Duran, L.G., Lopez, A., Moore, W.R., (1971). Tectonic investigations in western Colombia and Eastern Panama. Geological Society of America Bulletin 82, 2685-2712.

Chavarría Lanzas, D A, Gómez Pizano, D. (2001). "Estudio Piloto de Vulnerabilidad Sísmica en Viviendas de 1 y 2 Pisos del Barrio Cuarto de Legua en el Cono Cañaveralejo". Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

CIAF (1971). Elementos geológicos y geomorfológicos. Centro Interamericano de Fotointerpretación. IGAC. 64p. Bogotá.

Cluff et al. (1981). Quaternary activity on the Romeral and Cauca faults, Northwestern Colombia. Revista Cíaf Centro Interamericano de Fotointerpretación. Bogotá: , v.6, n.1-3, p.115 - 116.

CORANTIOQUIA (2002) Cartografía geomorfológica. Mapa geomorfológico a escala 1:100 000 y Memoria explicativa de mapas y usos del suelo.

Cornell, A.C. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 58, 1583-1606.

Correa, A. M., Martens, et al., (2005). Subdivisión de las metamórfitas básicas de los alrededores de Medellín. Cordillera Central de Colombia. Boletín de Ciencias de La Tierra.

Correa, A. M., Martens, U., (2000). Caracterización Geológica de las Anfibolitas en los Alrededores de Medellín. Tesis de grado Facultad de Minas. pp 57-59, 169-170.

Correa, A.M., Martens, U., Restrepo, J.J., Ordóñez O., (2006). Subdivisión de las Metamorfitas Básicas de los Alrededores de Medellín, Cordillera Central de Colombia. Revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol 29 No 112.

Correa, F.J. (2005). "Identificación de parámetros dinámicos por medio de un sistema neuro-genético". Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería. UNAM.

Correa, F.J., Romo, M. y García, S. (2006). "Aspectos para la incorporación de las Tecnologías de la Información en aplicaciones geotécnicas". Reunión Mexicana de Mecánica de Suelo, Morelia 2006.

Crouse C, (1991). Ground motion attenuation equations for earthquakes on the Cascadia subduction zone, *Earthquake Spectra*, 7, 210-236.

D'Ayala D., Speranza E (2002). "An integrated procedure for the assessment of seismic vulnerability of historic buildings". Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London. Paper No.561.

Dearman, W.R., (1991), Engineering Geological Mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, U.K.

Dolce M, Kappos A, Zuccaro G, Coburn AW (1994). "State of the Art Report of W.G. 3-Seismic Risk and Vulnerability". Proceedings of the 10th European Conference on Earthquake Engineering, Wien.

Echeverría, L. M., (1973). Zonación de las Rocas Metamórficas del Valle de Aburrá y sus Alrededores. Tesis de grado Facultad de Minas. pp 26.

Estrada, B.; Lalinde, C.; Cañola, E.; Rendón, P.; Ríos, C.; Ruíz, M.; (2005). Morfología tectónica y segmentación de fallas al occidente de Medellín". En : : CD Memorias X Congreso Colombiano de Geología, Julio 2005, ISBN 958-701-557-6.



Estrada, Carmona, J. (2003). Caracterización geológica de las rocas metamórficas en los alrededores de la cuchilla Las Peñas. Universidad Nacional. Facultad de Minas, Medellín. Tesis. 91p.:

Estrada, GM. y JD Jaramillo, (2002). IE-RISS: *A Modeling system to manage risk and disasters associated to earthquake*, 7th US National Conference on Earthquake Engineering, Boston.

Feininger, T. y Botero, G., (1982). The Antioquian Batholith, Colombia. Pub. Esp. Ingeominas, 12:1-50. Bogotá.

FEMA (1999). "HAZUS 1999. Earthquake Loss Estimation Methodology. Technical Manual". Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

Flórez *et al.* (1996). Método Cualitativo para la determinación de los niveles de amenaza por movimientos en masa en la ciudad de Medellín: Ladera occidental. Medellín. D.A.P.M. 75p.

Fredlund, D.G. y Xing, A., (1994) Equations for the soil – water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, 31, p. 521 – 532.

Gallego, M., Ordaz, M., (2000). Estimación del riesgo sísmico en la República de Colombia. México D.F. 2000. Tesis de grado (Master en Estructuras). Universidad Nacional Autónoma de México. Área de estructuras.

García S.R., Botero E. and Romo M., (2003), Chaotic Analysis and Neural Modeling of Seismic Time Series, International Conference on Adaptive Modeling and Simulation ADMOS 2003, N.-E Wiberg and P. Díez, Eds, CIMNE, Barcelona.

García, S., Romo, M., Correa, F., Ortega, M. and Mayoral, J. (2006). "Chaotic Analysis of seismic time series". 100th Anniversary Earthquake Conference. San Francisco 1906.

Giraldo, M., Sánchez, D., (2004). Cartografía Geológica del Contacto del Cuerpo Sur de La Dunita de Medellín con sus Rocas Asociadas, Escala 11:10 000. Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas, Medellín. pp

GNDT (1993). "Rischio sismico di edifici pubblici-Parte I Aspetti metodologici". Consiglio Nazionale delle Ricerche - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.

González G, Alvaro J. (1999). Estimativos de Parámetros Efectivos de Resistencia con el SPT. X Jornadas Geotécnicas de Ingeniería Colombiana, Bogotá.

González H., (1980). Geología de las planchas 167 (Sonsón) y 187 (Salamina). Boletín Geológico Volumen 23, No. 1. Ingeominas.

González H., (2002). Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia: Neis de La Iguaña Cordillera Central, Departamento de Antioquia. Comisión Estratigráfica de Ingeominas. pp 21

González H., (2002). Catálogo de las Unidades Litoestratigráficas de Colombia: Neis del Alto de Minas (La Miel) Cordillera Central, Departamento de Antioquia. Comisión Estratigráfica de Ingeominas. pp 23.

Grosse, E., (1926). Mapa geológico de la parte occidental de la cordillera central entre el río Arma y Sacaoyal. Escala 1:50000. El Terciario Carbonífero de Antioquia. Berlín.

Grüntal G (1998). "European macroseismic scale 1998". Chaiers dur Centre Européen du Géodynamique et de Séismologie, Volume 15, Luxembourg.

Grupo de Sismología de Medellín. GSM. (1999). Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín. Sistema Municipal para la Prevención y Atención de Desastres, Alcaldía de Medellín.

Grupo de Sismología de Medellín. GSM. (2002). Microzonificación sísmica de los municipios del Valle de Aburrá y definición de zonas de riesgo por movimientos en masa e inundaciones en el Valle de Aburrá. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Guzmán, J.; Franco, G.; y Ochoa, M.; (1998). Informe Final Evaluación Neotectónica. Proyecto para la Mitigación del Riesgo Sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal: Pereira, Carder, 148 p.

Hardin, B. O. y Drnevich, V. P. (1972). Shear modulus and damping in soils: Measurement and parameter effects. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 98 (SM6), p. 603-624.

Heidebrecht, A.C., and Stafford Smith, B. (1973), *Approximate analysis of tall wall-frame structures*, Journal of structural Division ASCE, 99(2), pp. 199 – 221.

Hermelín y Rendón (2007). Entorno Natural de 17 ciudades de Colombia. Capitulo Medellín. EAFIT. ISBN: 978-958-8281-70-4. 344p.

Hincapie, J.O. (1998). Un modelo de convergencia de placas para el noroccidente Suramericano con base en datos sísmológicos. Universidad Nacional, Sede Medellín. Tesis de Grado. 1994.

Huang J. and Turcotte D.L., (1990), Are Earthquakes an Example of Deterministic Chaos?, Geophys.Res.Lett.,17, 223-226.

IGAC, (1997). Estudio de Evaluación Neotectónica en la Zona de Influencia de los Proyectos de las Empresas Públicas de Medellín. Contrato No 9/DJ-1650/169. Informe Final Vol. I. G/96-T46-T122-T-31. Santa Fé de Bogotá, 282 P.

INGEOMINAS, (1996). Mapa geológico generalizado del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. Ingeominas. Medellín.

INGEOMINAS, (2001). Mapa Geológico del departamento de Antioquia, escala 1:400.000, memoria explicativa. Ingeominas 241p

INGEOMINAS, (2005). Mapa Geológico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1:50.000, memoria explicativa. Ingeominas 314p

INGEOMINAS; (1994). Evaluación Sismotectónica de los Proyectos Hidroeléctricos Penderisco Murrí. Informe Final para Empresas Públicas de Medellín, Contrato 3142-G, Medellín, 55p.

INGEOMINAS; (1999). Informe Técnico Científico del Terremoto del Quindío.

INGEOMINAS; (2007). Memorias Plancha 147 (inédito)

INGEOMINAS; Universidad de los Andes; (1997). Microzonificación Sísmica de Bogotá: Estudio para la UPES y la Dirección Nacional de Prevención y Atención de desastres, 130p.

Integral S.A.; (1998). Estudio de Evaluación de la Presa Santa Rita, Actualización del Estudio de Sismología, Informe Final: Informe para Empresas Públicas de Medellín, 45p., más anexos.

Integral S.A.; Sedic S. A.; (1998). Proyecto Hidroeléctrico Nechí. Sismología. Informe Final. Evaluación de la Amenaza Sísmica: Informe para Empresas Públicas de Medellín, 130 p.

Integral, (1982). Aprovechamiento Múltiple del Río Grande. Estudio Geológico y Evaluación Preliminar del Riesgo Sísmico. Medellín, 68 p.

Integral, (2000). Conexión Túnel Aburrá Oriente, Informe Final: Informe para Conexión Túnel Aburrá Oriente S.A., sin paginación.

Ishihara, K. (1996). "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics". Calrendon Press, Oxford, pp: 1-39, ISBN:0198562241.

Jaramillo, et al., (1971). Serpentinitas que afloran en la parte oriental del valle de Medellín y sus minerales asociados. Universidad Nacional. Facultad de Minas, Medellín. P 71.

Jaramillo, J.D. (1996). "PERCAL versión 4.0 Programa para Cálculo de pérdidas por sismo y GRAPER versión 4.0, Programa para graficación de pérdidas por sismo". Simposio Latinoamericano de vulnerabilidad sísmica, Universidad Autónoma Metropolitana, México, septiembre. (In Spanish).

Jaramillo, J.D. (2006). "Influence of the uncertainty in the soil-rock spectral ratios in the definition of uniform hazard spectra at surface level". Journal of earthquake engineering ISSN 1363-2469. vol. 10, nro.4, pp. 527-532.

Kramer, S.L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 653 pp.

Lalinde, C. P.; (2004). Evidencias Paleosísmicas en la Región Pereira Armenia, Colombia (Tesis Msc): Universidad Eafit, 188 p., más anexos (inédita, en proceso de defensa y publicación).

Lang K (2002). "Seismic vulnerability of existing buildings". Institute of Structural Engineering (IBK), ETH Zurich, Report No. 273, vdf Hochschulverlag, Zurich.

López M., (2006). Análisis de deformación tectónica en el piedemonte de las cordilleras Central y Occidental Valle del Cauca, Colombia – Contribuciones paleosísmicas tesis Msc, Universidad Eafit, Medellín, 113 p. más anexos.

López, (1991). Morfogénesis y amenaza en la cuenca de la quebrada El Hato, Bello. Tesis de grado Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Loudon, T.V., (2000), "Geoscience after IT, a view of the present and future impact of information technology on geoscience", Vol. 17: Computer method in geosciences, Pergamon, Oxford.

Maya, M y Escobar., (1985). Estudio de las rocas metamórficas entre el Ancón Sur y la quebrada La Miel, Caldas - Antioquia. Tesis de grado Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Maya, M., González, H., (1995). Unidades Litodémicas de la Cordillera Central de Colombia. Bol. Geol. Ingeominas vol 35 No 2-3. pp 43-57.

McGuire, R.K. (1976). Fortran computer program for seismic risk analysis. *US Geological Survey Open-File Report*, 76-67.

McGuire, R.K. (1993). Computations of Seismic Hazard. *Annali di Geofisica* 36, No.3-4, 181-200.

Mejía Villegas S.A.; Asesorías e Interventorías LTDA (AEI); (1997). Aprovechamiento Cuenca Río Buey, Central Hidroeléctrica El Guaico, Estudio de Factibilidad Técnica, Económica y Ambiental, Segunda Etapa, contrato No 9/DJV-550/144. Informe Final, Anexo 9, Sismología, CARB-Gu-F/95-T06-T31, 32p. Informe para EEPP, 32 p.

Mejía, M., (1984). Geología y Geoquímica de las Planchas 130 (Santa Fe de Antioquia) y 146. (Medellín Occidental). Ingeominas. Informe 1950. 376 p. Medellín.

Mesa, M. I.; y Lalinde, C. P.; (2000). Actividad de las Fallas del Sistema Cauca: Estudios realizados en el proyecto hidroeléctrico Pescadero Ituango. En *Revista Sismológica Regional del Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima*, No 5, SIN 0123-9074, p. 28-32.

Mesa, M. I.; y Lalinde, C. P.; (2001). Actividad de la Falla Espíritu Santo: *Revista Horizontes Naturales de la facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Caldas*, No 4, p. 31-40.

Miranda, E. (1999). Approximate Seismic Lateral Deformation Demands in Multistory Buildings. *Journal of Structural Engineering*, April. 417-425.

Miranda, E. (2000). Inelastic Displacement Ratios for Structures on Firm Sites. *Journal of Structural Engineering*, October. 1150-1159.

Montes, N.; Osorio, J.; Velandia, F.; Acosta, J.; Núñez, A.; (2005b). Caracterización Sismogénica de la Falla Ibagué, Colombia. En: *Cd Memorias X Congreso Colombiano de Geología*. ISBN 958-701-557-6

Montes, N.; Velandia, F.; Osorio, J.; Audemard, F.; Diederix, H.; (2005). Interpretación Morfotectónica de la Falla Ibagué para su Caracterización Paleosismológica. *Boletín de Geología*, Vol. 27, No 44, Enero Junio de 2005, pp.95-114

Morales, M., Tamayo, L., Camacol, Salazar, S., Loaiza, E. (2004). *Demanda de Vivienda en el Valle de Aburrá*. Universidad de Medellín.

Morales, J. A.; Mesa, M. I.; (2003). Evidencias de neotectónica en la Falla Cauca Oeste, sector Puente de Occidente (Santa Fe de Antioquia): En *Memorias IX Congreso Colombiano de Geología*, p 130.

Ordaz M., Arboleda J. y Singh S.J. (1995) A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America.*, (85) 1635-1647.

Ordóñez *et al.* (2005). Subdivisión de las metamorfitas básicas de los alrededores de Medellín – Cordillera Central de Colombia {Subdivision of the basic metamorphites of the Medellin surroundings-Colombia Central Cordillera}. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales {Journal of the Colombian Academy of Exact, Physics and Natural Sciences}, 29(112): 325-344. ISSN 0370-3908.

Ortiz, E.A., (2002). Evaluation of Neotectonic Activity of the Cauca-Romeral Fault System near western, Medellín, Colombia. MSc Thesis, Shimane University. Japan

Ospina T., (1911). Reseña Geológica de Antioquia. Imprenta La Organización. 128. Medellín.

Otálvaro, I. F. (2005). Caracterización de la Respuesta Dinámica del Sitio del Gabro de Medellín. Tesis de Maestría Ingeniería Civil – Geotecnia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 101 p.

Page, W., D.; (1986). Seismic Geology and Seismicity of Northwestern Colombia: Reporte para Integral Ltda, ISA y Woodward Clyde Consultants, 156 p. más anexos.

Page, W.D., James, M.E., (1981). The antiquity of the erosion surfaces and Late Cenozoic deposits near Medellín, Colombia: Implication to tectonic and erosion rates. Revista CIAF. 6 (1-3), 421-454.

Panza, G. (2006). Deterministic methods in seismic hazard analysis; General problems in seismic hazard assessment. Presentado en: Workshop on the Conduct of Seismic hazard Analyses for Critical Facilities, Trieste, Italia.

París, G.; Machette, M.N.; Dart, R. L.; y Haller K.M.; (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions: Open File Report 00-0284, USGS, 66 p., más mapa.

Patiño, J., Noreña, J, A., (1984). Estudio de las Rocas Metamórficas en la Parte Sur del Municipio de Caldas, Antioquia. Tesis de grado Facultad de Minas. pp.

PNUD. (1994). “Estudio de la Amenaza, Zonificación, Análisis y Vulnerabilidad Sísmica de Medellín”. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Proyecto COL88/010, Municipio de Medellín, Universidad EAFIT. (in Spanish).

Ramírez, J. E. (1975); Historia de los Terremotos en Colombia. Documentación Geográfica, Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 250p.

Rendón G., D. (1999). Cartografía y Caracterización de las Unidades Geológicas de la Zona Urbana de Medellín. Medellín, Tesis Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 113 p.

Rendón, D. A.; (2003). Tectonic and Sedimentary Evolution of the Upper Aburrá Valley, Northern Colombian Andes (Tesis Msc): Shimane University, Matsue, Japón, 201 p.

Rendón, *et al.* (2006). Modelo Cronoestratigráfico para el emplazamiento de los depósitos de vertiente en el Valle de Aburrá. Boletín de Ciencias de la Tierra. No. 18.

Rengers, N., Hack, R., Huisman, M., Slob, S. and Zigterman, W., (2002), "Information technology applied to engineering geology". Engineering Geology for Developing Countries – Proc. Of 9th congress of International Association for Engineering Geology and Environment. J.L. van Rooy and C.A. Jermy ed. Durban, South Africa, 16-20 sept.

Restrepo et al. (2008, en prensa). Ar-Ar ages of amphibolites from the Central Cordillera of Colombia and their implications for tectonostratigraphic terrane evolution in the northwestern Andes. VI South American Symposium on Isotope Geology. Argentina.

Restrepo, J. J., Toussaint, J. F., (1984). Unidades Litológicas de Los Alrededores de Medellín en: Memorias de la I Conferencia Sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. pp 1-26.

Restrepo-Vélez LF (2004). "Seismic Risk of Unreinforced Masonry Buildings". PhD Thesis, ROSE School – University of Pavia. October.

Restrepo-Vélez, L.F., Bommer, J. (2002). An exploration of the nature of the scatter in ground-motion prediction equations and the implications for seismic hazard assessment. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol 7, Special Issue 1, 171-199.

Risk Engineering (1997). EZ-FRISK Version 4.0.

Romo, M. P. and García, S. R. (2003). "Neurofuzzy mapping of CPT values into soil dynamic properties". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Volume 23, Issue 6, August 2003, Pages 473-482.

Safak, E. (1997). "Models and methods to characterize site amplification from a pair records". *Earthquake Spectra*, vol. 13 (1). February

Schmidt, V., Moya, A., Boschini, I., Climent, A., Rojas, W. (2005), Microzonificación Sísmica de San José de Costa Rica. Primera Edición, Editorial de la Universidad de Costa Rica.

Schnabel, P. B., Lysmer, J. y Seed H. B. (1972). "SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites". Report No. EERC 72-12, EERC, University of California, Berkeley, 88 p

Sheibe, R., (1919). Geología del sur de Antioquia. Compilación estudios oficiales geológicos en Colombia. Tomo I (1993). p 97 - 167. Bogotá.

Sierra y Zapata., (1989). Petrografía de las rocas metamórficas situadas al suroeste del municipio de Barbosa - Antioquia. Tesis de Grado Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Singh S, Mena E, Castro R and Carmona C, (1987). Empirical prediction of ground motion in Mexico City from coastal earthquakes, Bull. Seism. Soc. Am., 77, 1862-1867.

Singh S, Ordaz M, Rodríguez M, Quaas R, Mena V, Ottaviani M, Anderson J and Almora D, (1989). Analysis of near-source strong motion recordings along the Mexican subduction zone, Bull. Seism. Soc. Am., 79, 1697-1717.

Toro y Velázquez, (1984). Estudio geomorfológico y estructural del Valle de Aburra, comprendido entre el municipio de Caldas y las quebradas La Iguañá y Santa Elena, zonas 2 y 3 de 6. Tesis de grado Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Toro, Gloria, (2007). Comunicación oral.

Toussaint, J. F., Restrepo, J. J., (1974). Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia - Colombia, Publicación especial Geología No. 6. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. p24

Toussaint, J.F., Restrepo, J.J., (1984). Fallamientos superpuestos del sistema Cauca Romeral (S.L.) en los alrededores de Medellín (flanco noroccidental de la Cordillera Central de Colombia). Mem. 1st conf. geologic hazards in the Aburrá Valley. 1, 1-26.

Wells, D; y Coopersmith, K.; (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. En: Bulletin of Seismological Society of America, V. 84, p. 974-1002

Whitman RV (1973). "Damage Probability Matrices for Prototype Buildings", MIT, Dept. of Civil Engineering, Research Report R73-57, Cambridge, Massachusetts.

Woodward and Clyde Consultants; (1979). Preliminary Seismic Hazard Study, Cañafisto dam sites, Cauca River Hydroelectric Project, Colombia: Reporte para Integral Ltda e ISA, 173 p. más figures

Woodward and Clyde Consultants; (1980). Preliminary Seismic Hazard Study, Ituango Project, Colombia: Reporte para Integral Ltda e ISA, 152 p. más anexos y figuras.



---

Woodward and Clyde Consultants; (1983). Initial Seismic hazard evaluation Río Porce Project Colombia. Prepared for Empresas Públicas de Medellín and ASCOL LTDA. P36.

Youngs R, Chiou S, Silva W, and Humphrey J, (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. Seismological Research Letters, (68) 1, 58-75.