

APORTES PARA LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE IBAGUÉ

Andrés José Alfaro Castillo
Andrea Katherine Díaz Granados
Patricia Andrea Escobar Bernal
Lucy Esperanza Martínez Flechas

RESUMEN

La ciudad de Ibagué ha sido denominada la capital musical de Colombia, supera los 350.000 habitantes y está ubicada en la zona centro-oeste de Colombia, entre los valles de los ríos Magdalena y Cauca a 220 kilómetros al suroccidente de Bogotá. Se encuentra en una zona amenazada por eventos sísmicos y volcánicos, las principales fuentes sismogénicas corresponden a los sistemas locales de las Fallas de Ibagué, Buenos Aires y Chapetón-Pericos, que atraviesan el casco urbano de la ciudad; los sistemas de fallas regionales como el de la Palestina, que va a lo largo del valle del río Magdalena, y la sismicidad asociada a los volcanes cercanos: el Nevado del Tolima con 5215 msnm, el trágicamente recordado Nevado del Ruiz con 5300 msnm y el Volcán de tipo Caldérico Machín con 2650 msnm.

La primera aproximación, para la evaluación de la amenaza sísmica local, se realizó mediante interpretación de fotografías aéreas y análisis de información secundaria. Resultado de este análisis se identificaron cuatro zonas en la montaña con diferentes grados de susceptibilidad al deslizamiento y cinco zonas en la parte plana con diferentes grados de capacidad portante.

En la segunda aproximación se recopilaron estudios de suelos que incluyen 274 perforaciones, esta información se procesó, filtró y analizó permitiendo una zonificación geotécnica de la ciudad con datos de campo, que complementa y modifica la caracterización realizada.

Con esta información, que incluye estratigrafía, densidades, resistencia de los materiales y eventualmente velocidades de ondas de corte, se realizó la tercera aproximación al problema estimando las funciones de transferencia del suelo mediante modelación numérica identificando los periodos dominantes y niveles de amplificación. Constituyéndose en un gran aporte para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Ibagué.

CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

Mediante interpretación de fotografías aéreas (Insgeo y Concol, 2000; Jaramillo *et al.*, 2000 y Escobar, 2001) se identificaron cuatro zonas montañosas con diferentes grados de susceptibilidad al deslizamiento. La primera (IM) presenta susceptibilidad baja, está compuesta de rocas duras. La segunda (IIM) presenta una susceptibilidad media-baja, conformada por remanentes de lavas de composición andesítica y basáltica, se aprecian antiguos cuellos volcánicos. La zona IIIM formada por suelos residuales del batolito de Ibagué y una susceptibilidad media-alta y la zona IVM constituida por depósitos coluviales y coluvio-aluviales del piedemonte y con una susceptibilidad alta.

La zona plana esta subdividida en 5 sub-zonas. La **IP** conformada por materiales de depósitos fluvio-volcánicos con buena capacidad portante, abarca la mayor parte de Ibagué, con un grado de susceptibilidad bajo. La sub-zona **IIP** conformada por suelos fluvio-volcánico, originados en el último ciclo del volcán Tolima calificados con susceptibilidad media-baja. La sub-zona **IIIP** conformada por depósitos piroclásticos con capacidad portante media-alta y susceptibilidad media. La sub-zona **IVP** compuesta por sedimentos de origen lagunar con baja plasticidad, calificada con susceptibilidad media-alta. La sub-zona **VP** está constituida por materiales de las llanuras de inundación, con un nivel freático cambiante; y una susceptibilidad alta (ver Figura No.1).

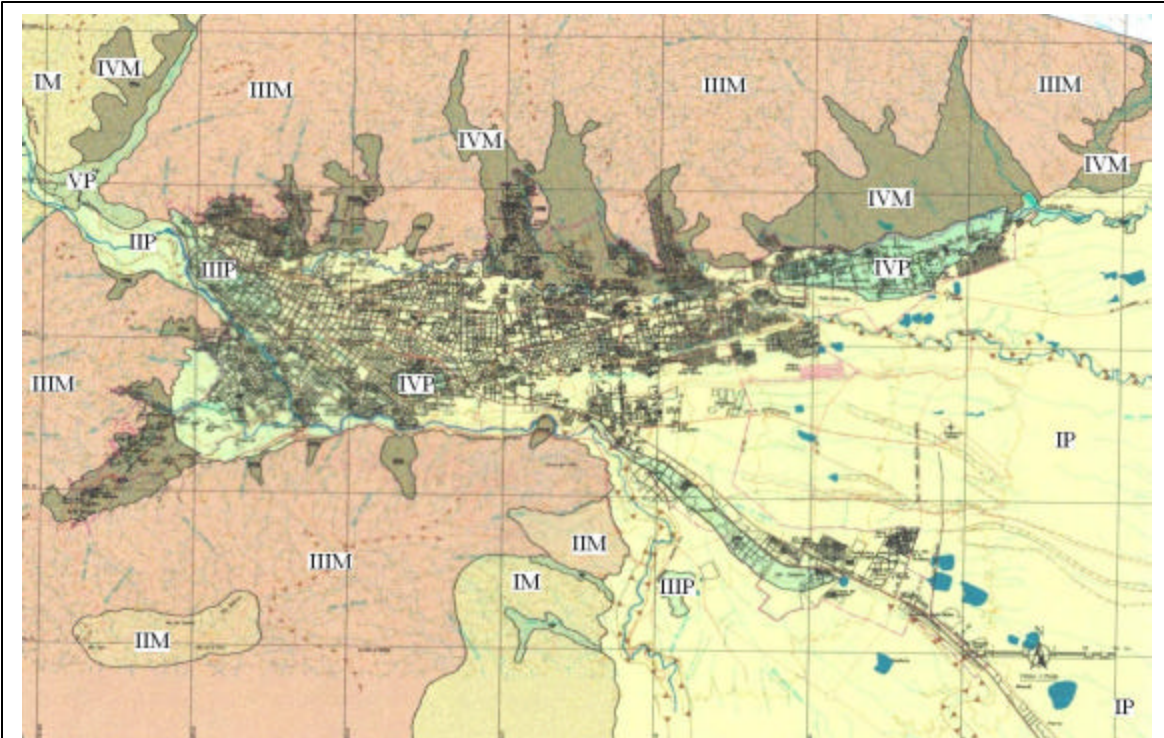


Figura No.1. Caracterización Geotécnica de Ibagué. (Escobar, 2001)

Martínez(2001) complementó la caracterización geotécnica realizada por Insgeo y Concol (2000) y Escobar(2001) a partir del análisis de los 274 sondeos, que se encuentran ubicados en las diferentes zonas geotécnicas descritas Escobar (2001) (ver Tabla No.1 y Tabla No.2). Adicionalmente identificó nueve tipos de suelos presentes en la zona de estudio (ver Tabla No.3), la identificación de éstos tipos de suelos se logró tanto a partir de la observación y análisis de columnas estratigráficas de los suelos, como la descripción de los suelos y los resultados de los ensayos de laboratorio (N del SPT, humedad, resistencia y clasificación del suelo) (Martínez y Alfaro 2001a, 2001b). La ubicación de los diferentes tipos de suelos se observa en la figura No.3.

Tabla No.1. Zonificación geotécnica zona montañosa de Ibagué

SUB-ZONA	DESCRIPCIÓN (Escobar, 2001)	DESCRIPCIÓN CON DATOS DE CAMPO (Martínez, 2001)
IM – Rocas Duras	Anfibolitas, neises anfibólicos y mármoles.	
IIM – Remanentes de Lavas de Composición Andesítica y Basáltica	Se conservan geoformas que indican la existencia de antiguos cuellos volcánicos. Evidencias de una red de drenaje característica.	
IIIM – Suelos Residuales del Batolito de Ibaqué	Arenas limosas mal gradadas (SM) y limos orgánicos (ML) de baja resistencia al corte. Materiales susceptibles a la erosión; es común la profundización de caminos y formación de surcos. El espesor de suelo sobre la roca meteorizada puede ser mayor de 10 m en algunos sitios.	
IVM – Depósitos de Piedemonte (Coluviales y Coluvio-Aluviales)	Arenas y limos con gravas muy descompuestos. Sobre las llanuras de inundación se observan materiales con gravas de tamaño bloque.	Presencia de limos baja plasticidad (ML) con IP de 8 a 18% (Figura No.2d), arcillas de baja plasticidad (CL) con IP de 7 a 17%, arenas (SM, SC) y gravas pobremente gradadas, en la superficie presenta una capa de suelo orgánico de hasta 0,4m. La resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 0,5 y 0,8 Kg/cm ² hasta una profundidad de 3,5m, y de 0,8 a 2,3 Kg/cm ² hasta una profundidad de 8,0m. Los valores de N del ensayo de penetración estándar varían de 10 golpes/pie a 0,5m de profundidad y 40 golpes/pie a 8,0m de profundidad. El porcentaje de humedad disminuye con la profundidad de un 40% a un 25%.

Tabla No.2. Zonificación geotécnica zona plana de Ibagué

SUB-ZONA	DESCRIPCIÓN (Escobar, 2001)	DESCRIPCIÓN CON DATOS DE CAMPO (Martínez, 2001)
IP – Depósitos Fluvio-Volcánicos	<p>Son depósitos heterogéneos y heterométricos; se observan fragmentos angulares y subangulares de hasta 2 m de tamaño. La matriz, presente en proporción de 20 a 50 %, se compone de limos inorgánicos (ML), arenas limosas (SM), arenas arcillosas (SC) y algo de arenas con gravas (SP). Ocasionalmente, se presentan lentes de arcillas inorgánicas de alta plasticidad (CH). Poseen ligera cementación y buena capacidad portante. La superficie es suavemente ondulada, con inclinación al Este del 2 % al 3 %; y tiene una cubierta meteorizada de 1 a 2 m. La profundidad de estos materiales es mayor a 150 m.</p>	<p>Son depósitos heterogéneos y heterométricos; se observan fragmentos angulares y subangulares de hasta 2 m de tamaño. Se encuentra presencia de arcillas de alta y baja plasticidad (CH, CL) con IP de 5 a 40% (Figura No.2a), las arcilla de alta plasticidad con espesor hasta de 6m y las de baja plasticidad con espesor de 1m aproximadamente; limos de alta y baja plasticidad (MH, ML) con IP de 5 a 37%, los limos de alta plasticidad se presentan en estratos entre 2,0m y 5,0m, arenas limosas, arcillosas y con gravas (SM, SC, SP) y gravas pobremente gradadas en matriz limo-arenosa (GP, GM). La resistencia a la compresión confinada (q_u) varía entre 0,5 y 8,0 Kg/cm². El valor de N del ensayo de penetración estándar se encuentra entre 5 y 50 golpes/pie. En algunas zonas se encuentra presencia de roca ligeramente meteorizada a 2,0m de profundidad. El porcentaje de humedad en esta zona oscila entre 40 y 15%. En algunas zonas se encuentra presencia de nivel freático a profundidades que oscilan entre 1,5 y 3,0m. La superficie es suavemente ondulada, con inclinación al Este del 2 % al 3 %; y tiene una cubierta meteorizada de 1 a 2 m. La profundidad de estos materiales es mayor a 150 m.</p>
IIP – Depósitos Fluvio-Volcánicos del último ciclo de vulcanismo del volcán del Tolima	<p>Estos depósitos se sitúan a lado y lado del curso del río Combeima, entre 6 y 40 m de altura. Son gravas en matriz areno-limosa, moderadamente consolidadas. Esta zona es importante pues corresponde a la zona de amenaza potencial por flujo de escombros y lodo de origen volcánico.</p>	<p>Estos depósitos se sitúan a lado y lado del curso del río Combeima, entre 6 y 40 m de altura. Hay presencia de limos de baja plasticidad (ML) con IP de 14 a 17%, arcillas de baja plasticidad (CL) con IP de 10 a 16%, arenas (SM, SC) y gravas pobremente gradadas en matriz limo-arcillosa. La resistencia a la compresión confinada oscila entre 1,0 Kg/cm² y 2 Kg/cm². El porcentaje de humedad oscila entre 30 y 40%.</p>

Tabla No.2. Zonificación geotécnica zona plana de Ibagué

SUB-ZONA	DESCRIPCIÓN (Escobar, 2001)	DESCRIPCIÓN CON DATOS DE CAMPO (Martínez, 2001)
IIP - Depósitos Piroclásticos	Suelos volcánicos derivados de caídas de cenizas y lapilli, moderadamente compactos. Consta de limos y arcillas de baja plasticidad (ML, CL), arenas limosas y arcillosas (SM, SC) y ocasionalmente, limos y arcillas de alta plasticidad. La capacidad portante es media a alta. La superficie es suavemente ondulada, con inclinación de 1° a 3° al Este. El espesor máximo de materiales en esta zona es de 6 m a 8 m.	Son suelos volcánicos derivados de caídas de cenizas y lapilli, moderadamente compactos Hay presencia de limos de baja plasticidad (ML) con IP de 2 a 18% (Figura No.2b), arcillas de baja plasticidad (CL) con IP de 12 a 26%, arenas limosas y arcillosas (SM, SC) y gravas pobremente gradadas (GP). En algunas zonas se encuentra presencia de roca ligeramente meteorizada a una profundidad de 11m. La resistencia a la compresión confinada oscila entre 0,30 Kg/cm ² y 3,0 Kg/cm ² . Los valores de N del ensayo de penetración estándar varían entre 5 golpes/pie y 50 golpes/pie. El porcentaje de humedad varía entre 40 y 10%. En algunas zonas hay presencia de nivel freático a 9.4m de profundidad. La capacidad portante es media a alta. La superficie es suavemente ondulada, con inclinación de 1° a 3° al Este.
IVP – Sedimentos de Origen Lagunar	Son suelos de naturaleza cohesiva, limos orgánicos de baja plasticidad (OL) o arcillas de alta plasticidad (OH) y arenas arcillosas de baja plasticidad (SC). En su conjunto se trata de materiales de baja permeabilidad. Son depósitos de poca extensión y un espesor de aproximadamente 5 m. Existen dos depósitos: uno en el estadio Murillo Toro y otro sobre la vía a El Salado.	Presencia de limos de baja plasticidad (ML) con IP de 9 a 18% (Figura No.2c), arcillas de baja plasticidad (CL) con IP de 5 a 23%, arenas (SM, SC) y gravas pobremente gradadas (GP), en la superficie presenta una capa de suelo orgánico de hasta 0,4m. La resistencia a la compresión confinada oscila entre 0,5 Kg/cm ² y 2,3 Kg/cm ² . En algunas zonas hay presencia de nivel freático a 3.0m de profundidad.

Tabla No.3. Grupos de suelos de Ibagué (Convención Figura No.3) (Martínez, 2001)

TIPO DE SUELO	DESCRIPCIÓN
1	Presencia de gravas desde el nivel 0.0m, son materiales con IP entre 13 y 17%. La resistencia a la compresión inconfiada es de 10,0 Kg/cm ² . La humedad es del 15% a 1m de profundidad. En este grupo se encuentra el 3.6% de los estudios de suelos analizados
2	Presencia de arena con intercalaciones de finos hasta 2,0m de 2m hacia abajo hay presencia de grava y/o conglomerado, son materiales con IP entre 8% y 29 % . La resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 0,7 y 1,9 Kg/cm ² . Los valores de N del ensayo de penetración estándar varían de 20 golpes/pie a 4m de profundidad y 40 golpes/pie a 10,0m de profundidad. En este grupo se encuentra el 12,7% de los estudios de suelos analizados.
3	Presencia de arena y finos hasta 4,5m de 4,5m hacia abajo hay presencia de grava y/o conglomerado, son materiales con IP entre 9% y 38% . La humedad disminuye con la profundidad de 40% y 10%. En algunos estudios de suelos se encontró presencia de nivel freático a 2,0m, 3,0m y 3,4m de profundidad. En este grupo se encuentra el 12,7% de los estudios de suelos analizados
4	Presencia de arena hasta una profundidad de 7,2 de 7,2m hacia abajo hay presencia de grava y/o conglomerado, son materiales con IP entre % y % . La resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 0,5 y 2,0 Kg/cm ² . Los valores de N del ensayo de penetración estándar varían de 30 golpes/pie a 2m de profundidad y 50 golpes/pie a 3,0m de profundidad. El valor de humedad oscila entre 40 y 20%. En los estudios de suelos se encontró presencia de nivel freático a 1,0 y 2,6m de profundidad. En este grupo se encuentra el 3,6% de los estudios de suelos analizados
5	Presencia de arena hasta 3m de profundidad, son materiales con IP muy bajos. El valor de N de 20 golpes/pie a 2,5m. La humedad oscila entre 30 y 10%. En este grupo se encuentra el 10,9% de los estudios de suelos analizados
6	Presencia de suelo fino hasta una profundidad de 2,8m de 2,8m hacia abajo hay presencia de arena, son materiales con IP entre 5% y 35 % . La resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 1,0 y 3,0 Kg/cm ² . Los valores de N del ensayo de penetración estándar varían de 5 y 15 golpes/pie a 2m de profundidad y 50 golpes/pie a 4,0m de profundidad. El valor de humedad oscila entre 40 y 15%. En este grupo se encuentra el 16,4% de los estudios de suelos analizados.
7	Presencia de suelo fino hasta una profundidad de 5,7m de 5,7m hacia abajo hay presencia de arena, son materiales con IP entre 2% y 29 % . La resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 0,5 y 3,0 Kg/cm ² . Los valores de N del ensayo de penetración estándar son de 15 golpes/pie a 2m de profundidad, 20 golpes/pie a 4,0m de profundidad, 35 golpes/pie a 6m de profundidad y varía entre 40 y 50 golpes/pie después de 10m de profundidad. El valor de humedad oscila entre 40 y 10%.En este grupo se encuentra el 10,9% de los estudios de suelos analizados
8	Presencia de suelo fino hasta una profundidad de 5,0m, son materiales con IP entre 10% y 40 % . La resistencia a la compresión inconfiada oscila entre 1,0 y 2,0 Kg/cm ² . Los valores de N del ensayo de penetración estándar varía entre 10 y 30 golpes/pie a 2m de profundidad. El valor de humedad oscila entre 40 y 20%. Hay presencia de nivel freático a 1,0m, 2,0m, 2,4m y 2,7m de profundidad. En este grupo se encuentra el mayor porcentaje de los estudios de suelos analizados 21,8%.
9	Presencia de suelo orgánico hasta una profundidad de 1,7m, de 1,7m a 4,5m de profundidad hay presencia de material fino, de 4,5m hacia abajo se encuentra arena, son materiales con IP entre 10% y 30 % . El valor de humedad oscila entre 50 y 30%. Presencia de nivel freático a 3,0m de profundidad. En este grupo se encuentra el 7,3% de los estudios de suelos analizados.

FIGURA 2a. CARTA DE PLASTICIDAD ZONA IP

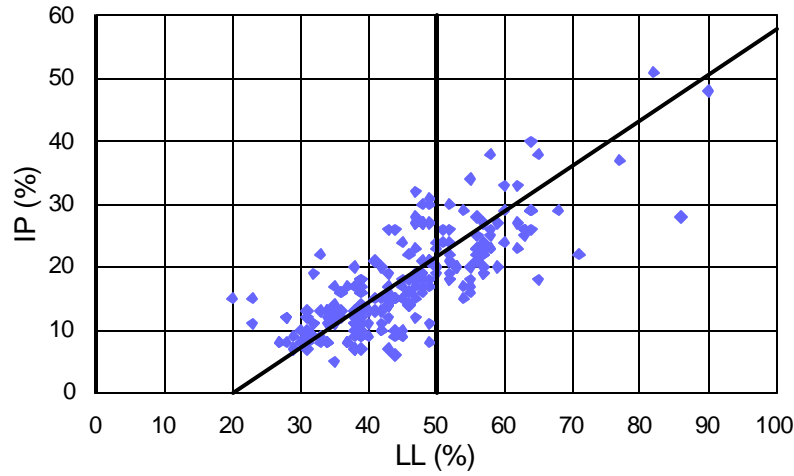


FIGURA 2b. CARTA DE PLASTICIDAD ZONA IIIP

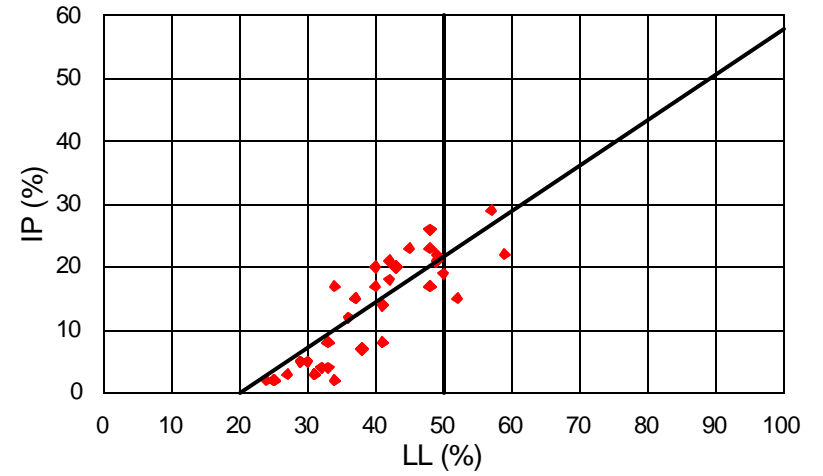


FIGURA 2c. CARTA DE PLASTICIDAD ZONA IVP

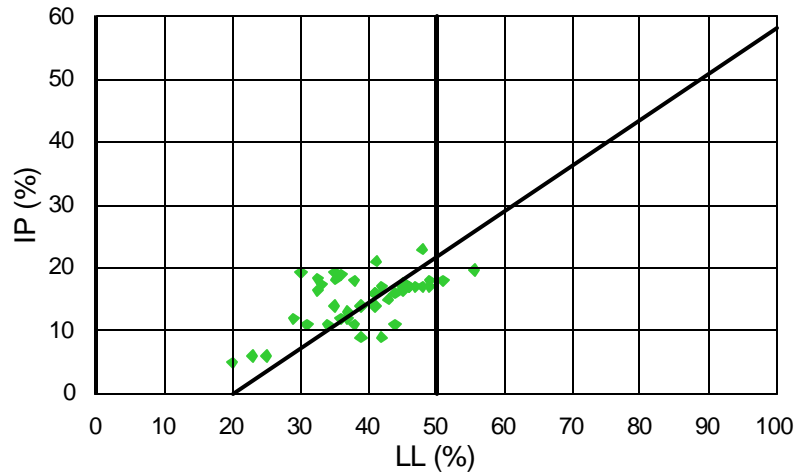


FIGURA 2d. CARTA DE PLASTICIDAD ZONA IVM

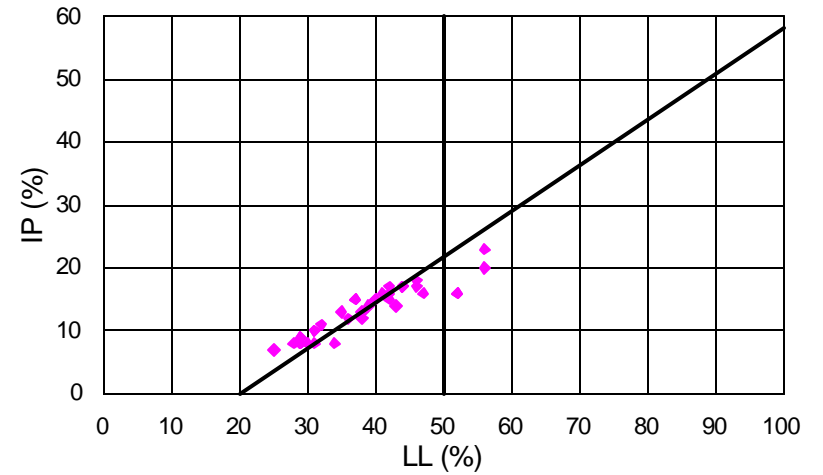


Figura No.2. Cartas de Plasticidad de los materiales IP, IIIP, IVP, IVM (Martínez, 2001)

MODELACIÓN NUMÉRICA

De los 274 sondeos disponibles Díaz-Granados(2001) seleccionó 108 que contaban con la información más completa de características mecánicas para realizar modelación numérica de efectos locales mediante simulación unidimensional lineal equivalente (EduPro Civil Systems, 1999). La estimación de la velocidad de ondas de corte se realizó mediante las correlaciones de Ohta y Goto (1978), esta se estimó en función del resultado del ensayo de penetración estándar normalizado al 60% de la energía N_{60} Decourt (1989). Las curvas de variación del módulo de corte y de amortiguamiento se estimaron según el modelo de Vucetic & Dobry (1991).

Para la selección de la señal de entrada se utilizaron cinco acelerogramas acordes al nivel de amenaza esperado para la zona en estudio. Los eventos sísmicos son aleatorios por lo que se requiere de un análisis de tipo estadístico, en el estudio se han utilizado 5 registros con magnitudes cercanas a la de la amenaza para Ibagué escalados al 20% de la gravedad. Los sismos utilizados en el análisis se presentan en la Tabla No.4.

Tabla No.4. Sismos utilizados en el análisis y sus características (Diaz-Granados, 2001)

Sismo	Fecha	Magnitud	PGA (%g)	Distancia Epicentral (km)
Yerba	1989/10/17 (Sismo de Loma Prieta)	7.0	0.07	95.4
El Centro	1940/05/18 (Sismo del Imperial Valley)	7.0	0.34	12.0
Petrolia	1992/04/25 (Sismo Cape Mendocino)	7.0	0.33	24.0
Topanga	1994/01/17 (Sismo de Nortdridge)	6.7	0.33	14.9
Taft	1952/07/21 (Sismo de Kern County)	7.4	0.19	42.0

El análisis en el dominio de la frecuencia, indica que los sismos de El Centro y Taft poseen amplios contenidos frecuenciales de 0.1 Hz a 10.0 Hz. En tanto que el sismo de Loma Prieta registrado en Yerba Buena posee contenidos frecuenciales bastante más estrechos.

De acuerdo con los estudios de Alfaro-Arias (2001) y Alfaro-Arias y Alfaro (2001), quienes analizaron los contenidos frecuenciales de cuatro fuentes sismogénicas colombianas a saber: Nido de Bucaramanga, Sistema de fallas de Atrato, sistema de fallas Romeral y el sistema de Fallas de Guaicáramo, se sabe que los contenidos frecuenciales están entre 0.03 Hz y 8.9 Hz, por lo tanto el registro de El Centro como el de Taft son representativos. La utilización de estos cinco registros busca simular el proceso estocástico de los sismos. Ejemplos de las funciones de transferencia estimadas se observan en las figuras 4, 5 y 6.

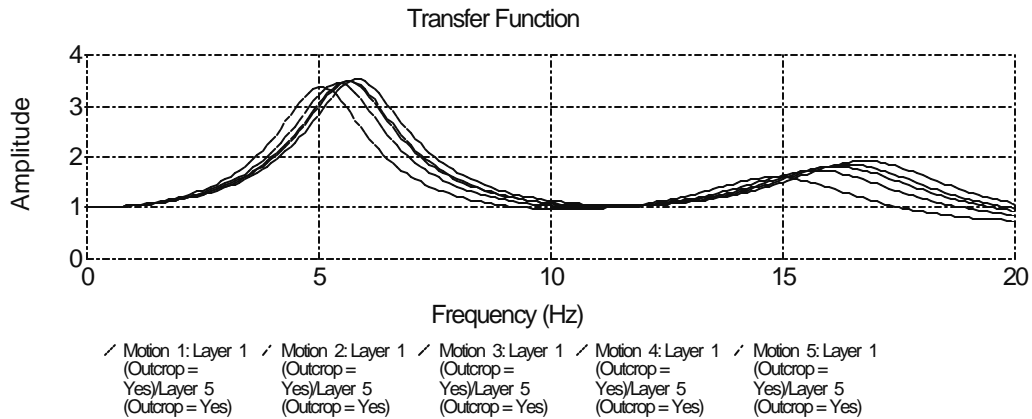


Figura 4: Funciones de Transferencia Estimada. (Díaz-Granados, 2001). Estudio No. 38, San José de Calambeo. Coordenadas: 871950 – 984175. Capa Orgánica hasta 1.4m, limos y arcillas hasta 2.2 sobre arenas limo arcillosas (Martínez, 2001).

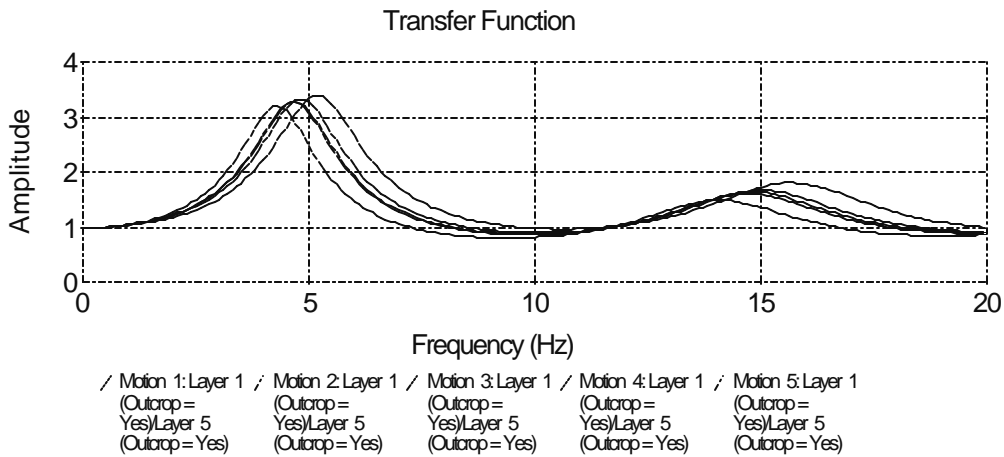


Figura 5: Funciones de Transferencia Estimada. (Díaz-Granados, 2001). Estudio No. 04, cra. 7° No. 12-54. Coordenadas: 871125N – 983500E. Zona geotécnica IIIP (Martínez, 2001).

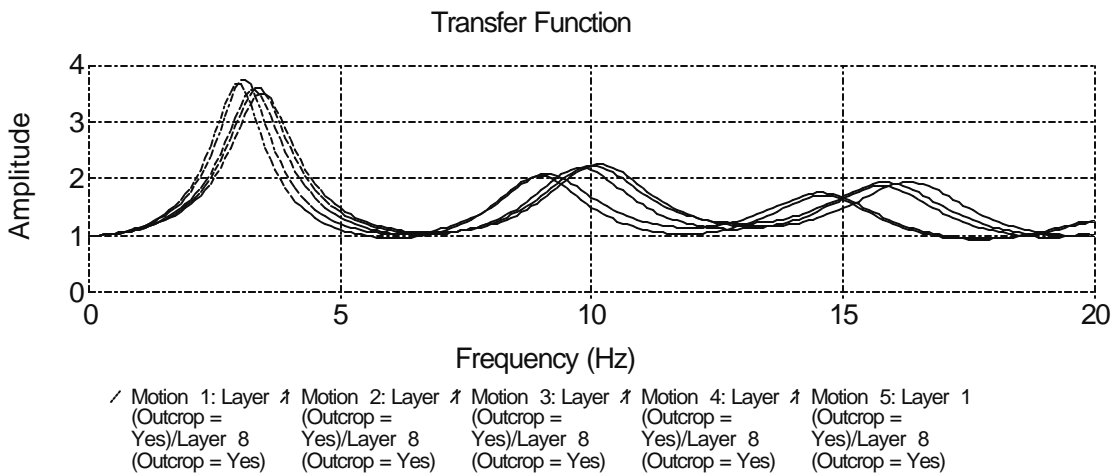


Figura 6: Funciones de Transferencia Estimada. (Díaz-Granados, 2001). Estudio No. 07, sondeo No. 4. Cra. 6° con Calle 36. Coordenadas: 873500N – 982700E. Zona geotécnica IP (Martínez, 2001).

Existe incertidumbre con respecto a la ubicación del basamento rocoso con el fin de observar la incidencia de la posición de este en los períodos y niveles de amplificación se realizó un análisis de sensibilidad de la variación de la respuesta con la profundidad del basamento rocoso, ya que las perforaciones son someras alcanzando una profundidad máxima de 12.50 m. La sensibilidad se realizó hasta una profundidad de roca de 20 m. La variación de los períodos dominantes se puede observar en la Tabla No.5.

Tabla No. 5. Variación de los períodos dominantes con la profundidad del basamento (Díaz-Granados, 2001)

							h = 12.5 m		h = 15 m		h = 20 m	
SONDEO	x	Y	h (m)	A	f ₁ (seg ⁻¹)	T ₁ (seg)	A	T ₂ (seg)	A	T ₃ (seg)	A	T ₄ (seg)
1	870710	983300	8.10	2.9	5.10	0.20	2.2	0.42	2.1	0.58	1.9	0.92
2	870700	983290	6.30	2.8	7.78	0.13	2.0	0.37	1.9	0.53	1.9	0.85
3	870000	984000	7.00	3.5	3.67	0.27	2.6	0.88	2.7	0.92	2.6	1.32
4	870010	984000	12.00	3.1	2.05	0.49	2.1	0.50	2.1	0.68	2.1	0.80
5	871250	983125	12.50	3.3	3.23	0.31			2.5	0.65	2.6	0.70
6	876610	983400	10.50	4.0	2.70	0.37	3.5	0.84	3.7	0.84	3.7	1.02
7	876100	982150	7.00	3.0	3.50	0.29	2.0	0.95	2.1	1.14	2.2	1.41
8	871940	984165	4.30	3.9	6.73	0.15	2.0	0.95	2.1	1.14	2.2	1.41

También se puede observar que si el basamento rocoso se encuentra a una profundidad entre 10 m y 12.50 m los períodos dominantes coinciden con los períodos de las estructuras convencionales de la ciudad causando problemas de resonancia, con la amplificación dinámica de la señal sísmica.

Adicionalmente con el fin de tener estimativos de control se realizó el cálculo del período dominante mediante (1) para así poder compararlo con el período dominante medido en el primer pico de amplificación de las funciones de transferencia encontradas mediante la aplicación de la modelación numérica.

$$T = \frac{4h}{V_s^*} \quad (1)$$

La Tabla No.6 presenta el análisis comparativo entre la modelación numérica 1D lineal equivalente y el resultado aplicando la ecuación de transmisión de onda.

Tabla No.6. Períodos dominantes obtenidos mediante fórmula y modelación numérica (Díaz-Granados, 2001).

SONDEO	x	y	h (m)	r _{prom} (kN/m ³)	V _s * (m/s)	Tc(seg)	Ac	A	T(seg)
1	870710	983300	8.10	19	145	0.22	4.24	2.92	0.20
2	870700	983290	6.30	20	159	0.16	3.60	2.75	0.13
3	870700	983300	5.60	21	172	0.13	3.27	3.07	0.12
4	870010	984000	12.00	18	184	0.26	3.46	3.07	0.49
5	870000	984000	7.00	20	156	0.18	3.75	3.45	0.27

Tabla No.6. Períodos dominantes obtenidos mediante fórmula y modelación numérica (Díaz -Granados, 2001).

SONDEO	x	y	h (m)	r_{prom} (kN/m ³)	V_s^* (m/s)	Tc(seg)	Ac	A	T(seg)
6	870000	983990	7.50	19	188	0.16	3.17	2.39	0.16
7	871250	983115	12.00	19	241	0.20	2.50	3.82	0.35
8	871250	983125	12.50	20	150	0.33	3.77	3.26	0.31
9	871260	983125	9.50	20	212	0.18	2.77	3.07	0.19
10	871125	983500	5.00	20	129	0.16	4.49	3.74	0.16
11	873400	981500	5.00	19	141	0.14	4.41	4.54	0.13
12	873400	981490	4.30	19	125	0.14	4.92	5.11	0.12
13	873410	981490	4.40	18	143	0.12	4.59	4.07	0.11
14	873410	981500	5.50	19	147	0.15	4.16	4.01	0.09
15	873700	983390	9.50	17	148	0.26	4.56	3.71	0.25
16	873700	983400	9.50	18	154	0.25	4.11	3.26	0.23
17	873710	983400	8.50	18	161	0.21	4.00	3.67	0.18
18	873500	982700	10.00	20	195	0.21	2.92	2.62	0.33
19	873490	982690	9.30	20	151	0.25	3.80	3.20	0.19
20	873490	982700	9.00	19	180	0.20	3.40	3.26	0.18
21	873500	982690	8.95	19	168	0.21	3.67	3.22	0.17
22	877010	983200	3.80	18	143	0.11	4.40	3.30	0.19
23	876990	983210	4.90	21	161	0.12	3.49	3.19	0.13
24	877000	983200	4.40	18	136	0.13	4.69	4.00	0.13
25	876990	983190	3.60	19	120	0.12	5.05	5.56	0.13
26	877000	983190	4.30	19	136	0.13	4.36	3.56	0.12
27	877010	983190	3.60	19	132	0.11	4.72	4.17	0.11
28	877010	983210	4.10	20	152	0.11	3.85	3.22	0.10
29	876990	983200	3.70	18	147	0.10	4.29	3.74	0.10
30	877000	983210	4.20	18	170	0.10	3.72	3.30	0.09
31	876610	983400	10.50	19	167	0.25	3.56	3.97	0.37
32	876600	983400	7.50	20	180	0.17	3.22	3.27	0.16
33	875990	982310	5.00	22	139	0.14	3.81	4.49	0.15
34	876010	982310	5.00	23	150	0.13	3.33	4.16	0.14
35	876000	982300	5.00	23	150	0.13	3.40	3.26	0.13
36	875990	982300	5.00	20	178	0.11	3.25	3.19	0.11
37	876000	982310	5.00	23	165	0.12	3.04	3.56	0.10
38	876010	982300	5.00	21	169	0.12	3.19	3.19	0.09
39	880000	983900	2.00	18	112	0.07	5.62	4.54	0.07
41	880010	983900	2.00	18	129	0.06	4.88	4.04	0.06
42	874590	983390	4.80	18	154	0.12	4.09	3.45	0.14
43	874590	983410	3.40	18	158	0.09	3.98	3.52	0.09
44	874610	983410	2.90	18	150	0.08	4.21	3.71	0.08
45	875300	984000	3.50	20	157	0.09	3.72	3.37	0.09
46	875310	984000	3.50	20	157	0.09	3.72	3.69	0.09
47	875600	981400	3.00	21	116	0.10	4.65	3.82	0.11
48	875610	981400	3.00	18	116	0.10	5.61	4.50	0.11

**Tabla No.6. Períodos dominantes obtenidos mediante fórmula y modelación numérica
(Díaz -Granados, 2001).**

SONDEO	x	y	h (m)	r_{prom} (kN/m ³)	Vs* (m/s)	Tc(seg)	Ac	A	T(seg)
49	876100	982150	7.00	21	138	0.20	3.92	3.00	0.29
50	876110	982150	6.50	20	137	0.19	4.13	3.56	0.18
51	876100	982140	4.50	12	127	0.14	7.73	7.04	0.15
52	881610	984090	2.00	18	110	0.07	5.95	4.45	0.14
53	881590	984100	2.00	18	112	0.07	5.67	4.82	0.08
54	881600	984100	1.80	18	104	0.07	6.07	5.56	0.07
55	881600	984110	1.90	18	114	0.07	5.61	4.64	0.07
56	881610	984110	1.90	18	114	0.07	5.61	4.64	0.07
57	881590	984110	1.90	18	109	0.07	5.86	4.50	0.07
58	881590	984090	1.80	18	112	0.06	5.71	4.54	0.07
59	881610	984100	1.80	18	112	0.06	5.65	4.40	0.07
60	881600	984090	1.80	18	112	0.06	5.71	4.50	0.07
61	871950	984165	5.20	18	129	0.16	5.04	3.71	0.18
62	871960	984165	4.60	18	127	0.15	5.14	4.21	0.15
63	871950	984175	4.70	18	125	0.15	5.21	3.97	0.15
64	871940	984165	4.30	18	125	0.14	5.22	3.93	0.15
65	871940	984175	4.80	18	124	0.15	5.25	3.82	0.14
66	871960	984175	4.20	18	120	0.14	5.42	4.35	0.13
67	879010	984180	4.00	17	102	0.16	6.73	4.68	0.16
68	879020	984170	4.00	17	102	0.16	6.72	4.64	0.16
69	879010	984170	4.00	17	130	0.12	5.29	3.86	0.16
70	879000	984170	4.00	17	104	0.15	6.55	3.89	0.16
71	879020	984180	4.00	17	102	0.16	6.70	3.97	0.16
72	878990	984180	4.00	17	102	0.16	6.73	3.97	0.16
73	878990	984170	4.00	17	104	0.15	6.60	3.93	0.15
74	879000	984180	3.50	17	100	0.14	6.83	4.26	0.14
75	878990	984160	2.50	17	94	0.11	7.31	5.22	0.11
76	879020	984160	2.50	17	93	0.11	7.28	4.21	0.11
77	879000	984150	2.20	17	91	0.10	7.45	5.28	0.10
78	879010	984160	2.00	17	90	0.09	7.63	5.45	0.09
79	878990	984150	2.00	17	90	0.09	7.55	4.40	0.09
80	879000	984160	2.00	17	90	0.09	7.60	4.50	0.09
81	870300	981500	4.20	17	132	0.13	5.15	4.12	0.15
82	870310	981500	4.20	17	134	0.13	5.06	3.93	0.14
83	873840	982190	3.70	18	132	0.11	4.86	5.17	0.12
84	873850	982190	3.70	19	152	0.10	4.02	3.63	0.10
85	873860	982200	3.70	18	153	0.10	4.15	4.32	0.09
86	873850	982200	3.50	18	146	0.10	4.40	4.78	0.08
87	873840	982200	3.60	19	178	0.08	3.41	3.19	0.08
88	873860	982190	3.60	19	176	0.08	3.41	3.30	0.07
89	873800	983300	3.55	16	150	0.09	4.90	4.78	0.10
90	873810	983290	2.40	18	138	0.07	4.73	3.63	0.07
91	873810	983290	2.00	19	127	0.06	4.78	3.93	0.06

Tabla No.6. Períodos dominantes obtenidos mediante fórmula y modelación numérica (Díaz-Granados, 2001).

SONDEO	x	y	h (m)	r_{prom} (kN/m ³)	Vs* (m/s)	Tc(seg)	Ac	A	T(seg)
92	873800	983300	1.95	20	164	0.05	3.50	3.07	0.05
93	892000	970790	9.00	20	179	0.20	3.31	3.22	0.25
94	891990	970810	8.50	20	180	0.19	3.29	3.37	0.13
95	892020	970810	10.00	20	184	0.22	3.21	3.07	0.29
96	892000	970800	10.00	20	191	0.21	3.10	3.19	0.28
97	891990	970800	10.00	20	167	0.24	3.55	3.15	0.23
98	892010	970810	5.00	20	168	0.12	3.53	3.11	0.28
99	892010	970800	9.50	20	175	0.22	3.38	3.19	0.27
100	891990	970790	8.00	20	174	0.18	3.41	3.07	0.30
101	892010	970790	10.00	20	184	0.22	3.22	3.30	0.19
102	892020	970800	8.80	20	179	0.20	3.30	3.14	0.23
103	892020	970790	8.00	20	177	0.18	3.35	3.26	0.19
104	892000	970810	8.00	20	183	0.18	3.24	3.56	0.18
105	892020	970790	3.00	20	566	0.02	1.05	3.52	0.16
106	879050	979140	8.00	14	164	0.20	5.02	3.26	0.28
107	879060	979150	7.00	10	162	0.17	7.25	3.22	0.23
108	879050	979150	7.00	10	168	0.17	7.02	3.22	0.22

Los períodos dominantes encontrados están en el rango de 0.0 a 0.6 segundos de la siguiente manera: 15.6% entre 0-0.1s; el 40.4% entre 0.1-0.2s; el 22.0% entre 0.2-0.3s, el 8.3% entre 0.3-0.4s, el 6.4% entre 0.4-0.5 y el 7.3% entre 0.5-0.6s. Estos períodos corresponden a estructuras convencionales de mampostería y concreto reforzado menores a 20 plantas, es decir, correspondiendo con la tipología de la construcción en Ibagué.

En cuanto a los niveles de amplificación asociados el 99.1% corresponde a posible amplificación, distribuyéndose de la siguiente manera: entre 1 y 2 veces el 0.9%, entre 2 y 3 veces el 33.9%; entre 3-4 veces el 45.0% y entre 4 y 6 veces el 20.2%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del análisis realizado a las columnas estratigráficas, se llegó a las siguientes conclusiones:

- A nivel general, analizados los resultados obtenidos por Escobar (2001) e identificados los diferentes tipos de suelo de la ciudad de Ibagué, se observa que los resultados de las exploraciones del subsuelo corroboran las descripciones inicialmente planteadas.
- La zonificación geotécnica presentada por Escobar (2001), abarca áreas muy grandes para cada zona, por lo tanto, la descripción de cada una de éstas comprende varios tipos de materiales. La descripción con la información geotécnica de las zonas IVM, IP, IIP, IIIP y IVP complementó la realizada por Escobar (2001).
- En la zona IP se presentan toda clase de materiales finos y gruesos, se encontró en algunas zonas presencia de roca ligeramente meteorizada a una profundidad de 2m. En la zona IIIP hay presencia de roca ligeramente meteorizada a 11m de profundidad.

- Se observó que los suelos de la ciudad de Ibagué son muy heterogéneos ya que presentan una variación compleja. Sin embargo, se observa que cerca al ápice del abanico fluviovolcánico, en la zona occidental, predomina el suelo grueso (arena) y a medida que se aleja de éste se pierde la concentración de suelos granulares y aparecen suelos finos.
- El nivel freático se encontró entre 1,2 y 3,5m en algunos sectores de la zona IP. Particularmente en la zona que se identificó como arenosa, zona central del abanico fluviovolcánico de Ibagué, lo que podría llevar a que se presente una probable licuación.
- En todas las zonas analizadas a excepción de la zona IP, no se encuentra presencia de materiales de alta plasticidad, generalmente se encuentran materiales de baja plasticidad, arenas y gravas pobremente gradadas.
- Eventualmente, podría extenderse hacia el occidente la zona IVP (Escobar, 2001), ubicada en el nororiente de la ciudad y conformada por suelos finos, debido a la presencia de suelos finos en sectores cercanos a ésta.
- Adicionalmente al trabajo de Escobar (2001), fue posible identificar terrazas aluviales correspondientes a los ríos Combeima y Alvarado.
- La caracterización geotécnica realizada en esta investigación es una base importante para realizar la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Ibagué.
- De acuerdo con la de la guía para los estudios de Microzonificación Sísmica desarrollada por la *Association Francaise du Genie Parasismique- AFPS* (1995), donde se determinó una escala de trabajos entre A, B y C, donde:

NIVEL A: Se basa en la recopilación e interpretación de la información disponible.

NIVEL B: Aporta resultados más fiables que los del nivel A. En este nivel se llevan a cabo campañas específicas de perforación, trincheras, muestreo geológico, etc.

NIVEL C: Se llevan a cabo en áreas donde se requiere una identificación muy detallada. Implica campañas específicas y cálculos detallados.

Se tiene que terminado el nivel A (Escobar, 2001), con esta investigación se estaría dando inicio al nivel intermedio, B, encontrando resultados más fiables a partir de la recopilación de los diferentes estudios de suelos realizados en la ciudad.

- Los períodos dominantes encontrados están en el rango de 0.0 a 0.6 segundos de la siguiente manera: 15.6% entre 0-0.1s; el 40.4% entre 0.1-0.2s; el 22.0% entre 0.2-0.3s, el 8.3% entre 0.3-0.4s, el 6.4% entre 0.4-0.5 y el 7.3% entre 0.5-0.6s. En cuanto a los niveles de amplificación asociados el 99.1% corresponde a posible amplificación, distribuyéndose de la siguiente manera: entre 1 y 2 veces el 0.9%, entre 2 y 3 veces el 33.9%; entre 3-4 veces el 45.0% y entre 4 y 6 veces el 20.2%. De tal forma que el panorama no es nada alentador, ya que aunque los suelos de la ciudad de Ibagué presentan buena capacidad portante, bajos

asentamientos y poca presencia de nivel freático, los períodos dominantes coinciden con los de las construcciones existentes y las amplificaciones estimadas son importantes.

- De los resultados de la sensibilidad se concluye que los períodos dominantes a una profundidad de roca entre 10 y 12.50 m coinciden con los de las estructuras convencionales de la ciudad generando potenciales problemas de resonancia, con la amplificación de la señal sísmica. Las funciones de transferencia permiten estimar que la amplificación del suelo varía entre 2.4 y 7.0 veces.

A partir de los resultados obtenidos en ésta investigación, se llegó a las siguientes recomendaciones:

- Se debe acceder a más estudios de suelos de la ciudad de Ibagué que permitan obtener un conocimiento más cercano del comportamiento mecánico y dinámico de los suelos para lograr una caracterización geotécnica más completa, por tal razón es necesario realizar exploraciones del subsuelo a una profundidad mayor a 12m.
- Se deben realizar estudios de Prospección Geofísica con el fin de determinar la posición del basamento rocoso y las velocidades de corte de los materiales del subsuelo. Adicionalmente se deben extraer muestras para la realización de ensayos dinámicos con el fin de determinar las curvas de degradación del módulo de cortante y del amortiguamiento.
- Es importante realizar un análisis de susceptibilidad a la licuación ya que los suelos de la zona central de Ibagué, en su mayoría, son arenosos y en algunas zonas están bajo el nivel del agua.
- En la zona montañosa debe llevarse a cabo un análisis de susceptibilidad al deslizamiento.
- Para complementar el nivel B de la guía para los estudios de Microzonificación Sísmica desarrollada por la *Association Francaise du Genie Parasismique- AFPS* (1995), es necesario realizar campañas de perforación y recuperación de muestras para realizar ensayos de laboratorio y de este modo tener acceso a más información geotécnica.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Ingeniero Hugo Albarello Bahamon, Curador Urbano de Ibagué, por permitir el acceso a los estudios de suelos para la realización de la caracterización geotécnica con datos de campo. A la Geóloga Marcela Jaramillo por sus múltiples comentarios, al Dr. Ing. Guillermo Pabón por revisar los Trabajos de Grado de Patricia Escobar, Andrea Díaz y Lucy Martínez.

REFERENCIAS

- Alfaro-Arias, C. (2001) "Caracterización en el dominio de la frecuencia de sismos colombianos" Trabajo de Grado. Instituto Geofísico. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Alfaro-Arias, C Y A. Alfaro (2001) "Caracterización en el dominio de la frecuencia de sismos colombianos registrados en la estación BOCO" *Memorias I Congreso Internacional y XII Congreso Nacional Estudiantes Ingeniería Civil, ANEIC 2001.*
- AFPS-Association Francaise du Genie Parasismique, (1995). Guidelines for Seismic Microzonation Studies. Delegation of Major Risks of the French Ministry of the Environment. París. 44 pp.
- Décourt, L (1989). "The Standard Penetration Test, State of the Art Report. "
- Díaz-Granados, A. (2001) Modelación Numérica de Efectos Locales en Ibagué. Pontificia Universidad Javeriana. Instituto Geofísico. Facultad de Ingeniería. Trabajo de Grado. Bogotá
- Edupro Civil Systems, Inc EduShake Versión 1.10. (1999). Redmond.
- Escobar, P. (2001)"Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué". Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Instituto Geofísico. Facultad de Ingeniería. Bogotá
- Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana (2000) "Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué". Informe Técnico. Bogotá.
- Jaramillo, M., P. Escobar, y M. Ramos (2000). Marco tectónico y Amenaza Sísmica de Ibagué. *Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotécnia.* Bogotá.
- Martínez, L.E., (2001) "Caracterización Geotécnica de Ibagué". Pontificia Universidad Javeriana. Proyecto de Grado. Instituto Geofísico. Facultad de Ingeniería. Bogotá.
- Martínez, L.E. y A. Alfaro, (2001a) Avances en la Microzonificación Sísmica de Ibagué con datos de campo. *Memorias I Congreso Internacional y XII Nacional de Estudiantes de Ing. Civil.* ANEIC 2001. Bucaramanga.
- Martínez, L.E. y A. Alfaro,(2001b) Avances en la Microzonificación Sísmica de Ibagué-Colombia con datos de campo. *Memorias II Congreso Iberoamericano Ing. Sísmica.* Madrid.
- Ohta, Y. y N. Goto (1978) Empirical Shear Wave Velocity Equations In Terms of Characteristics Soil Indexes. *Earthq. Eng. Struc. Dyn.*, 6, 167-187.
- Vucetic, M. Y R. Dobry, (1991) Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, *Journal Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol 117, No. 1, Paper No. 25418.