

INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA

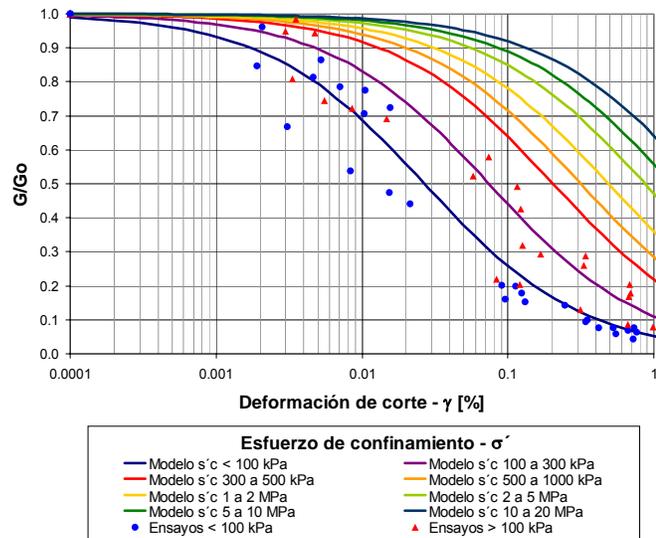
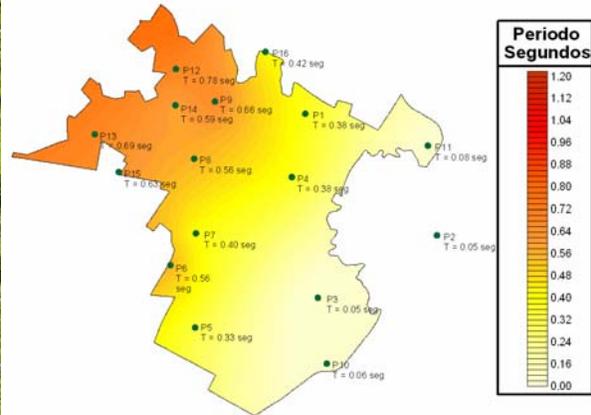


TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA	4-1
4.1 INTRODUCCIÓN	4-1
4.2 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA EXISTENTE	4-2
4.3 INTERPRETACIÓN GEOMORFOLÓGICA	4-10
4.3.1 Municipio de Palmira	4-10
4.3.2 Municipio de Tuluá	4-11
4.3.3 Municipio de Buga	4-11
4.3.4 Cortes interpretados	4-12
4.4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE CAMPO	4-16
4.4.1 Generalidades	4-16
4.4.2 Perforaciones	4-17
4.4.3 Caracterización estratigráfica general	4-21
4.5 ENSAYOS DE CAMPO	4-24
4.5.1 Ensayos de Penetración Estándar	4-24
4.5.2 Ensayos Down Hole	4-26
4.5.3 Ensayos de Presiómetro Cíclico	4-30
4.5.4 Ensayos de refracción sísmica	4-32
4.5.5 Ensayos de Microtrepidaciones	4-38
4.6 INVESTIGACIÓN DE LABORATORIO	4-47
4.6.1 Generalidades	4-47
4.6.2 Resultados de ensayos rutinarios de laboratorio	4-49
4.7 ENSAYOS DINÁMICOS	4-57
4.7.1 Generalidades	4-57
4.7.2 Ensayo triaxial cíclico	4-58
4.7.3 Ensayo de Columna Resonante	4-61
4.7.4 Ensayo de velocidad de onda en laboratorio (Bender Element)	4-62
4.7.5 Caracterización de los parámetros dinámicos de suelos típicos	4-64
4.8 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA COMPORTAMIENTO	4-70
SÍSMICO	4-70
4.8.1 Criterios generales de zonificación	4-70
4.8.2 Zonificación de Palmira	4-71
4.8.3 Zonificación de Tuluá	4-74
4.8.4 Zonificación de Buga	4-76
4.9 ANALISIS DE LICUACION	4-78
4.9.1 Procedimiento	4-78
4.10 BIBLIOGRAFÍA	4-81
ANEXO 4.1 - INFORMACIÓN GEOTECTÓNICA EXISTENTE	
ANEXO 4.2 - PERFILES DE SONDEO. ENSAYOS DE CAMPO	



ANEXO 4.3 - ENSAYOS DE LABORATORIO

ANEXO 4.4 - ANÁLISIS DE LICUACIÓN

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 Ubicación de estudios de suelos, pozos de agua y sondeos - Municipio de Palmira	4-7
Figura 4.2 Ubicación de estudios de suelos, pozos de agua y sondeos - Municipio de Tuluá.....	4-8
Figura 4.3 Ubicación de estudios de suelos, pozos de agua y sondeos - Municipio de Buga	4-9
Figura 4.4 Corte geológico interpretado para el Municipio de Palmira	4-13
Figura 4.5 Corte geológico interpretado para el Municipio de Tuluá	4-14
Figura 4.6 Corte geológico interpretado para el Municipio de Buga.....	4-15
Figura 4.7 Localización perforaciones del Municipio de Palmira	4-19
Figura 4.8 Localización perforaciones del Municipio de Tuluá	4-20
Figura 4.9 Localización perforaciones del Municipio de Buga.....	4-21
Figura 4.10 Espejos de falla limolita de la formación Paila.....	4-23
Figura 4.11 Resumen de resultados de penetración estándar para el municipio de Palmira	4-24
Figura 4.12 Resumen de resultados de penetración estándar para el municipio de Tuluá.....	4-25
Figura 4.13 Resumen de resultados de penetración estándar para el municipio de Buga	4-26
Figura 4.14 Comparación de resultados de penetración estándar	4-26
Figura 4.15 Esquema del ensayo Down Hole.....	4-27
Figura 4.16 Variación de la Velocidad de Onda Cortante – Palmira	4-28
Figura 4.17 Variación de la Velocidad de Onda Cortante – Tuluá.....	4-28
Figura 4.18 Variación de la Velocidad de Onda Cortante – Buga	4-29
Figura 4.19 Correlación entre N y Vs para suelos finos de los municipios.....	4-30
Figura 4.20 Equipos y montaje para el ensayo de presiómetro cíclico.....	4-31
Figura 4.21 Esquema del ensayo de refracción sísmica - Frente de onda, modelo bicapa	4-33
Figura 4.22 Proceso de fabricación de cargas explosivas para ensayo de refracción sísmica.....	4-33
Figura 4.23 Proceso de generación de cargas explosivas	4-34
Figura 4.24 Componentes y montaje para el ensayo de refracción sísmica	4-34
Figura 4.25 Resultados del ensayo de refracción sísmica – Municipio de Palmira.....	4-36
Figura 4.26 Resultados del ensayo de refracción sísmica – Municipio de Tuluá	4-37
Figura 4.27 Resultados del ensayo de refracción sísmica – Municipio de Buga.....	4-38
Figura 4.28 Equipo para registro de microtrepidaciones	4-41
Figura 4.29 Registro de microtrepidaciones en el Parque del Azúcar.....	4-42
Figura 4.30 Función de Transferencia Parque del Azúcar a partir de microtrepidaciones.....	4-42
Figura 4.31 Mapa de isoperíodos dominantes de vibración en Palmira	4-45
Figura 4.32 Mapa de isoperíodos dominantes de vibración en Tuluá	4-45
Figura 4.33 Mapa de isoperíodos dominantes de vibración en Buga.....	4-46
Figura 4.34 Resumen de propiedades índices para el municipio de Palmira.....	4-49
Figura 4.35 Resumen de propiedades índices para el municipio de Tuluá	4-50

Figura 4.36 Resumen de propiedades índices para el municipio de Buga.....	4-50
Figura 4.37 Carta de Plasticidad de suelos finos - Municipio de Palmira	4-51
Figura 4.38 Carta de Plasticidad de suelos finos - Municipio de Tuluá	4-52
Figura 4.39 Carta de Plasticidad de suelos finos - Municipio de Buga.....	4-53
Figura 4.40 Histograma peso específico de los suelos de Palmira	4-53
Figura 4.41 Histograma peso específico de los suelos de Tuluá.....	4-54
Figura 4.42 Histograma peso específico de los suelos de Buga	4-54
Figura 4.43 Humedad – Municipio de Palmira	4-55
Figura 4.44 Humedad – Municipio de Tuluá	4-55
Figura 4.45 Humedad – Municipio de Buga.....	4-56
Figura 4.46 Montaje típico del ensayo triaxial cíclico.....	4-59
Figura 4.47 Resultados Típicos del ensayo Triaxial cíclico	4-60
Figura 4.48 Montaje del ensayo de columna resonante	4-61
Figura 4.49 Resultados típicos del ensayo de columna resonante	4-62
Figura 4.50 Montaje típico para el ensayo de velocidad de onda de corte en laboratorio	4-63
Figura 4.51 Resultados típicos del ensayo de velocidad de onda en laboratorio.....	4-63
Figura 4.52 Curvas de degradación del módulo cortante normalizado con la deformación de cortante. 4-66	
Figura 4.53 Curvas de de variación del amortiguamiento con la deformación de cortante	4-66
Figura 4.54 Modelo hiperbólico no lineal modificado para análisis de respuesta dinámica	4-67
Figura 4.55 Modelo de degradación de la rigidez con la deformación de cortante	4-68
Figura 4.56 Modelo de degradación del amortiguamiento con la deformación de cortante	4-69
Figura 4.57 Análisis de licuación Instituto Raffo Rivera	4-79
Figura 4.58 Análisis de licuación del Instituto Tomas Uribe Uribe	4-79
Figura 4.59 Análisis de licuación de la Federación Nacional de Cafeteros	4-80

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1	Estudio de suelos disponibles en la ciudad de Palmira	4-2
Tabla 4.2	Estudios de suelos disponibles en la ciudad de Tuluá	4-4
Tabla 4.3	Estudio de suelos disponibles en la ciudad de Buga	4-5
Tabla 4.4	Pozos disponibles en cercanías a la ciudad de Palmira	4-5
Tabla 4.5	Pozos disponibles en cercanías a la ciudad de Tuluá	4-6
Tabla 4.6	Pozos disponibles en cercanías a la ciudad de Buga	4-6
Tabla 4.7	Perforaciones ejecutadas en la ciudad de Palmira	4-18
Tabla 4.8	Perforaciones ejecutadas en la ciudad de Tuluá	4-18
Tabla 4.9	Perforaciones ejecutadas en la ciudad de Buga	4-18
Tabla 4.10	Ensayos de Presiómetro Cíclico Palmira	4-31
Tabla 4.11	Registros de microtrepidaciones – Municipio de Palmira	4-43
Tabla 4.12	Registros de microtrepidaciones – Municipio de Tuluá	4-43
Tabla 4.13	Registros de microtrepidaciones – Municipio de Buga	4-44
Tabla 4.14	Ensayos de laboratorio y normas de procedimiento	4-47
Tabla 4.15	Ensayos realizados en perforaciones de Palmira	4-47
Tabla 4.16	Ensayos realizados en perforaciones de Tuluá	4-48
Tabla 4.17	Ensayos realizados en perforaciones Buga	4-48
Tabla 4.18	Zonificación de la ciudad de Palmira	4-72
Tabla 4.19	Porcentajes de arcilla calculados en las diferentes zonas	4-72
Tabla 4.20	Resumen de parámetros de zonificación- Municipio de Palmira	4-73
Tabla 4.21	Zonificación de la ciudad de Tuluá	4-75
Tabla 4.22	Resumen de parámetros de zonificación- Municipio de Tuluá	4-75
Tabla 4.23	Resumen de parámetros de zonificación- Municipio de Buga	4-77

CAPÍTULO 4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA

4.1 INTRODUCCIÓN

Para la caracterización de la respuesta dinámica de un sitio en particular se requieren, como aspectos fundamentales, las características estratigráficas y las propiedades geotécnicas y geofísicas locales. Estos factores son determinantes para la evaluación de la amplificación de aceleraciones en un estrato determinado o las amplificaciones que se produzcan por efectos topográficos o similares. La manera como cada uno de estos factores puede influenciar la respuesta definitiva ha sido objeto de muchos estudios analíticos y experimentales en el pasado reciente.

Si bien el subsuelo de las áreas urbanas de los municipio de Palmira, Tulúa y Buga ha sido estudiado desde hace algún tiempo desde el punto de vista geológico y geotécnico, cabe destacar que el conocimiento de su comportamiento ante cargas cíclicas, y en particular ante cargas dinámicas similares a las generadas por los sismos, es insuficiente para propósitos de microzonificación. La investigación geotécnica llevada a cabo en este estudio, incluyó la investigación de campo y la realización de ensayos de laboratorio, con el fin de mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de estos suelos.

Con los resultados de este estudio se pretende caracterizar, desde el punto de vista de comportamiento dinámico, los suelos típicos dominantes en la zona de estudio, en especial lo relacionado con depósitos superficiales de arcillas, limos, arenas y las combinaciones de estos materiales frecuentes en las capas superiores de la estratigrafía.

En este capítulo se presentan los resultados de la investigación geotécnica y geofísica realizada en el área de estudio, incluyendo los resultados de los ensayos de campo y laboratorio. Se realiza una primera interpretación global de resultados con miras a proponer estratigrafías detalladas en cada una de las perforaciones realizadas. Se proponen modelos de comportamiento dinámico para los suelos dominantes encontrados. Finalmente se plantea un modelo geotécnico característico general el cual permite tener una visión clara de las características y propiedades principales de los depósitos de suelo para efectos de la modelación de la respuesta dinámica que se presenta en el siguiente capítulo de este informe.

4.2 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA EXISTENTE

La información geotécnica existente incluye algunos estudios de suelos de relativa poca profundidad y realizados principalmente para establecer recomendaciones de cimentación de edificaciones o puentes y el registro estratigráfico proveniente de los pozos de agua a grandes profundidades que existen en cercanías a las áreas urbanas de los tres municipios. La información ha sido suministrada directamente por cada uno de los municipios y por la CVC.

Las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3 presentan un listado de los estudios de suelos disponibles en cada uno de los municipios y las profundidades máximas alcanzadas en cada uno de ellos. Por otro lado las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 presentan los pozos de agua ubicados en cercanías al área urbana de cada municipio al igual que las profundidades máximas alcanzadas en cada uno de ellos. La ubicación geográfica de los estudios de suelos al igual que de los pozos de agua existentes se presentan en las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 para cada uno de los municipios, Palmira, Tulúa y Buga respectivamente.

Los registros individuales de todos los pozos investigados en la zona se presentan en el Anexo 4.1.

Tabla 4.1 Estudio de suelos disponibles en la ciudad de Palmira

Proyecto	Dirección	Prof. [m]
Concilio de las asambleas de Dios	Calle 34 No. 22 – 57	5.0
Edificio	Carrera 30 calle 28	6.0
Edificio en Las Mercedes	Calle 55 con diagonal 28	7.0
Ampliación bodegas FLEISCHMANN COLOMBIANA INC.	Calles 34 y 34ª entre carreras 35 y 36	9.3
Edificio	Calle 31 entre carreras 31 y 32	9.0
Diseño de las cimentaciones Britilana	Parcelación Industrial La Dolores en la vía Cali – Palmira	12.0
Harinera del Valle	Carrera 32 No. 18 – 31	8.5
Bodegas y oficinas – Cooperadores Zamorano	Vía Cali – Cerrito calle 69	4.0
Lote El Recreo	Calle 18 No. 27 – 52	5.0
Bloques Multifamiliares	Carrera 29 No. 33 – 55/61	10.0
Edificio Sede COVATRANS LTDA.	Carrera 28 con calle 39	7.0
Edificio de 3 pisos	Calle 40 No. 15 – 40	5.0
COOPDESARROLLO	Carrera 29 con calle 29	3.0
Bodega Ferreandes	Carrera 28 calle 43	6.0
Iglesia Barrio Fátima	Barrio Fátima	5.0
Puente sobre el río Cauca	Paso del comercio	30.0
Bloques La Selva	Carrera 48 entre calles 12B y 13	6.0

Continuación Tabla 4.1 Estudio de suelos disponibles en la ciudad de Palmira

Proyecto	Dirección	Prof. [m]
Condominio Campestre Bloques de Belén	Calle 65 hasta el Zanjón Zamorano	6.0
Silos de la sede de Palmira	Harinera del Valle	20.0
Silos Palmira	Planta de Harinera del Valle	9.5
Penitenciaría Nacional de Palmira	Penitenciaría Nacional de Palmira	6.0
Ampliación talleres de Ferrocarril	Antigua Estación del ferrocarril de Palmira	8.0
Aulas y baterías sanitarias	Institución educativa Cárdenas Centro	6.0
Almacén la 14 - Llano grande		15.0
Urbanización ciudad del campo	Margen derecha del río Cauca a la altura del puente de juanchito	5.0
Lote Barrio las flores	Barrio Las Flores	5.0
Enron power Termovalle I	Zona Franca del Pacífico Project	9.0
Sucromiles	Manzana comprendida entre las calles 3 y 4,	12.0
Nuevas Bodegas	Fleischmann de Colombia	10.0
Edificio	Carrera 28 No. 29 – 32	9.0
Casa Funeraria Los Olivos	Calle 23 carrera 33 ^a	8.0
Caldera No. 7	Manuelita S.A.	7.0
Nueva Planta	Varela S.A.	6.0
Edificio de 3 pisos - Kokorico	Calle 30 con carrera 30	5.0
Manuelita S.A.	Planta de Manuelita S.A.	7.0
Edificio de 6 pisos	Carrera 27 entre calles 29 y 30	8.0
Urbanización Girasoles	Carreras 32 entre calles 11 y 12	8.0
Edificio Planta de semillas básicas	Instituto Colombiano Agropecuario	8.0
Biblioteca Municipal	Calle 3 entre carreras 24 y 25	8.0
Centro de Diagnóstico automotor y terminal de transportes	Carrera 35 entre calles 42 y 47	10.0
Edificio Rack SY8-SY9	Planta Sucromiles	9.5

Tabla 4.2 Estudios de suelos disponibles en la ciudad de Tuluá

Proyecto	Dirección	Prof. [m]
Casa y piscina corregimiento de Nariño	Corregimiento de Nariño, jurisdicción del Municipio de Tuluá	4.0
Urbanización San Luis	Calles 5A y 6A entre cras. 18 y 19	5.0
Urbanización Moralito	Carrera 29 entre calles 12F y 13	5.0
Biblioteca - Universidad Central del Valle	Universidad Central del Valle	5.0
Comfandi - La Victoria	Carrera 35 con calle 29	3.5
Ampliación supermercado centro	Carrera 21 calle 26 y 26 ^a	5.0
Edificación de dos pisos para oficinas	Carrera 22 No. 23 – 28	6.0
Lote	Calle 41 carrera 3B	5.0
Remodelación Estación de servicio El Prado	Carrera 20 No. 25 – 41	6.0
Reforzamiento y remodelación edificio	Carrera 26 No. 26 – 56	4.0
Piscina Semiolímpica Parque "San Pedro Claver"	Diagonal a la carrera 1 con calle 26B	6.0
Ampliación Bodega comercial	Carrera 40 con calle 23	6.0
Ampliación Bodega maderera	Carrera 31 No. 27 – 71	6.0
Urbanización "Caracolí"	Finca "La Holanda", Margen derecho del Río Tuluá, en límites con el barrio "La Inmaculada"	3.5
Puente sobre la Quebrada la Rivera	Quebrada La Rivera	7.0
Puente transversal 12 sobre el Río Morales	Río Morales con Transversal 12	10.0
Nueva sede Banco Ganadero	Carrera 27 No. 26 – 28	4.5
Edificio de 4 pisos	Calle 30 No. 25 – 80	4.0
Sede Centro de estudios contables	Carrera 24A con calle 45	2.0
Edificio de 1 piso	Carrera 27 No. 27 - 25/29	4.0
Brinks de Colombia	Parque industrial y comercial de Tuluá lotes 11, 12 y 13 - Manzana A	5.2
Banco Popular de Tuluá	carrera 25 con calle 28	3.0
Edificación Castiblanco	Carrera 39 calle 26	2.0
Iglesia Pentecostal Unidad de Colombia	Carrera 18 No. 25 – 31	6.0
Edificio Alejandra	Carrera 23 No. 29A – 10	3.5
Centro comercial La Herradura	Carreras 18 a 19 y calles 28 a 30	5.0
Centro comercial Tuluá	Vía Panamericana con calle 37	5.0
Edificio 4 pisos	Carrera 25 A con calle 43	5.0
Urbanización - Bosques de Maracaibo	Terreno aledaño a la zona urbana de Tuluá	2.0
Urbanización Peñaranda		6.6

Tabla 4.3 Estudio de suelos disponibles en la ciudad de Buga

Proyecto	Dirección	Prof. [m]
Servicentro ESSO	Calle 3 sur Carrera 25	3.0
Urbanización Malibu	Calle 16 vía Ferrea	7.0
Edificios Barrio Jorge E. Gaitán	Calle 25 Carrera 12	8.0

Tabla 4.4 Pozos disponibles en cercanías a la ciudad de Palmira

Pozo	Coordenadas		Profundidad (m)
	Norte	Este	
Vp1	1 074 960	894 660	219
Vp2	1 073 250	895 600	209
Vp32	1 082 100	882 270	86
Vp4	1 085 350	884 780	67
Vp5	1 082 690	889 140	106
Vp23	1 076 360	886 350	120
Vp28	1 081 350	885 780	96
Vp87	1 085 120	879 930	85
Vp89	1 085 400	880 650	105
Vp90	1 084 110	880 000	61
Vp94	1 084 100	880 000	96
Vp108	1 076 770	882 430	55
Vp133	1 083 700	877 880	120
Vp135	1 086 920	884 500	96
Vp168	1 087 060	884 500	79
Vp192	1 079 280	884 520	120
Vp195	1 085 910	889 630	93
Vp196	1 089 580	883 580	92
Vp248	1 086 990	887 270	184
Vp249	1 076 500	884 270	121
Vp269	1 088 650	880 000	160
Vp300	1 089 345	882 560	80
Vp336	1 088 100	878 800	139
Vp360	1 087 700	880 530	181
Vp389	1 084 000	882 380	182
Vp480	1 074 840	883 960	121
Vp658	1 085 870	882 490	200
Vp664	1 087 660	887 250	228

Tabla 4.5 Pozos disponibles en cercanías a la ciudad de Tuluá

Pozo	Coordenadas		Profundidad (m)
	Norte	Este	
Vtu3	1093310	942300	82.29
Vtu5	1093080	941300	94.79
Vtu6	1096330	939690	85.04
Vtu7	1091880	945850	93.25
Vtu8	1091350	942820	92.00
Vtu9	1094350	942420	94.07
Vtu23	1093920	943710	41.00
Vtu27	1092680	944100	88.70
Vtu37	1091270	945980	91.44
Vtu43	1093010	947800	35.00
Vtu63	1094080	950740	38.50
Vtu92	1098200	942650	62.48
Vtu93	1097000	942800	100.58
Vtu103	1097650	941860	180.00
Vtu105	1094560	939400	90.00
Vtu106	1096500	940840	210.00
Vtu108	1097550	944750	125.00
Vtu111	1096880	941920	175.00
Vtu113	1096600	944150	178.00
Vtu136	1094420	939840	209.00

Tabla 4.6 Pozos disponibles en cercanías a la ciudad de Buga

Pozo	Coordenadas		Profundidad (m)
	Norte	Este	
Vb107	918700	1086015	57.61
Vb109	918620	1084850	120.00
Vb129	927640	1086120	230.00
Vb153	927330	1087550	226.00

4.3 INTERPRETACIÓN GEOMORFOLÓGICA

La información geológica, geotécnica y morfológica disponible permite adelantar una interpretación geomorfológica básica en cada una de las zonas urbanas de los municipios.

4.3.1 Municipio de Palmira

Los ríos de piedemonte son frecuentemente de tipo trenzado con cauces múltiples entrelazados (Ingeniería y Geotecnia, 1991, Perck y Hanson, Sower,). Usualmente están asociados con abanicos aluviales.

Para el caso de Palmira la estratigrafía características (con base en la información existente) consiste de una sucesión repetitiva, cíclica, de capas alternantes de tipo cohesivo y de tipo granular; se intercalan entre sí repetitivamente estratos de arcilla y estratos de arena, aunque en algunas ocasiones las capas cohesivas son de limo y las granulares son de grava.

Este tipo de estratigrafía es precisamente típica de ríos entrelazados de piedemonte, referencias (Cediel, 1968 y Selley, 1972). Se han encontrado también en ríos como el Ariari y el Upín (Martínez, 1996 y Martínez 1996), los cuales constituyen ejemplos representativos de los típicos ríos trenzados del piedemonte de la cordillera oriental (llanos orientales). Este tipo de ríos han sido estudiados con frecuencia por la ingeniería colombiana para resolver los frecuentes casos de destrucción de puentes que ocurren en los grandes ríos de los Llanos Orientales. Debido a que los ríos trenzados presentan cauces notoriamente inestables dando lugar a la destrucción de puentes, su efecto debe ser estudiado también para cruces subfluviales de oleoductos (Ingeniería y Geotecnia, 1996).

Geomorfológicamente la ciudad de Palmira ocupa una posición de transición entre el piedemonte y la llanura aluvial del río Cauca. A una distancia de 2.0 km hacia el oriente se encuentran ya los grandes abanicos aluviales característicos de todo el borde de la cordillera.

Por lo tanto la estratigrafía encontrada y la posición geomorfológica sugieren que los depósitos aluviales de Palmira se han originado por la acción de ríos trenzados de piedemonte que depositaron su carga sedimentaria al perder velocidad en su llegada a la llanura aluvial. Se trata entonces de ríos de menor tamaño, afluentes del río Cauca, situación que ha sido descrita por Campuzano (1976).

El origen preciso de estos depósitos de todas formas solamente podría determinarse mediante estudios rigurosos de sedimentología y petrografía por fuera del alcance del presente estudio.

Las perforaciones existentes indican la presencia de una capa arcillosa superior, con un espesor que en general no sobrepasa los diez metros. Es muy probable que esta capa corresponda a la llanura de inundación del río Cauca y que se presenta recubriendo los depósitos inferiores de origen torrencial.

Esta configuración es similar a la existente en la ciudad de Bogotá, guardando las proporciones, en la cual las arcillas lacustres recubren el complejo de conos que fue depositado por acción torrencial de los ríos del piedemonte, originando depósitos granulares.

4.3.2 Municipio de Tuluá

Los depósitos superficiales del Municipio de Tuluá y su área urbana están constituidos principalmente por depósitos del cuaternario formados por la acción de abanicos aluviales y de sedimentos aluviales del río Cauca.

Geomorfológicamente la ciudad de Tuluá está ubicada directamente en el piedemonte, en la zona de los grandes abanicos aluviales característicos de todo el borde de la cordillera. Esto genera gran variabilidad punto a punto en las características de los depósitos y variaciones considerables en función de la distancia desde el ápice del abanico.

En dichos depósitos existe predominio de las capas de gravas de diferentes tamaños en matrices limosas y arcillosas, en depósitos localizados. También se presentan varias capas de arena en menor proporción que las gravas. En depósitos localizados se encuentran además cantos de roca con tamaños variables en el orden de los 20 cm con algunos depósitos en bloques de roca de hasta 50 cm.

Los depósitos presentan altas variaciones con la distancia, encontrándose en general predominio de suelos finos a mayores distancias de la zona de piedemonte. A distancias considerables del orden de los 2 km o más, puede evidenciarse la presencia de depósitos de sedimentos del río Cauca.

4.3.3 Municipio de Buga

De acuerdo con la geología regional disponible para el departamento del Valle del Cauca (Ingeominas- 1985, escala 1:250.000), los terrenos de la ciudad de Buga están constituidos predominantemente por conos aluviales. Hacia el borde oriental de la ciudad afloran también rocas sedimentarias del Terciario.

En depósitos de abanico aluvial es frecuente la presencia de materiales muy gruesos (bloques, canto, etc.) originados en el arrastre aluvial, sin embargo también es muy importante la ocurrencia de arcillas que fueron depositadas por avalanchas y coladas de barro. Estos fenómenos pueden explicar la abundancia de arcillas en Buga, así:

- La frecuente presencia de avalanchas y flujos de lodo y barro, en asociación con abanicos aluviales, se indica por ejemplo en las referencias bibliográficas
- Igualmente en la porción encañonada del río Cauca (departamento de Antioquia cerca a Amagá, Heliconia, Pascuita), la referencia 3 indica la presencia de una cantidad de flujos de lodo y aluviales originados en los cauces afluentes del río Cauca, su abundancia es tan importante que del 25 al 50% de la superficie puede estar recubierta por este tipo de depósitos. Algunos de estos han sido datados con una edad de 730.000 años.
- Para el departamento del Valle del Cauca, la referencia 1 presenta un estudio realizado para la CVC, en escala 1:50.000, en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile al sur de la ciudad de Palmira. Dicho estudio identificó la ocurrencia de flujos de detritos y lodos en las dos cuencas evaluadas. Para el río Fraile se identificaron un total de 22 eventos de este tipo y para el río Bolo 15 eventos. Estas cifras dan una buena idea de la gran

importancia que pueden llegar a tener estos flujos en el desarrollo geomorfológico del piedemonte de la cordillera central (cuenca del río Cauca). El artículo menciona la utilización de métodos de datación, únicamente estima que los depósitos son de posible edad Holocénica.

La Geología regional indica que el subsuelo de Buga está constituido por conos aluviales, con abundancia de capas arcillosas de espesores importantes, entre los 14 y 25 m (ver sondeos No.1, 2, 6 y 8). En el sondeo No. 6 el estrato de arcilla está directamente sobre roca (limolita de la formación Paila), lo cual es consistente con la posición geográfica de dicho sondeo localizado hacia el borde oriental de la ciudad, en el cual ya aflora la roca.

Se infiere entonces, a partir de la abundancia de arcillas, que la ocurrencia de avalanchas y flujos de lodos seguramente debió influir de una manera muy importante en la construcción del abanico aluvial de la ciudad de Buga. Dentro de la masa arcillosa se encuentran también intercalaciones de capas de grava, con espesores que varían entre 1.0 y 5.5 m. Dado que el depósito es de origen aluvial, estas capas de grava se interpretan como pequeños cauces antiguos (paleocanales) que dieron origen a depósitos de canal.

En los sondeos No. 2, 3, y 4, en lugar de las arcillas ya mencionadas predomina un material muy grueso con abundancia de lodos y bloques de roca. Los espesores importantes que presentan estas acumulaciones de material grueso corresponden ya a cauces mayores principales que usualmente concentran gran parte del material grueso de canal. Uno de estos cauces mayores pudo haber correspondido al propio río Buga, en una antigua posición en caso de que éste río hubiera presentado divulgación (usual en cualquier río); esta posibilidad se deduce teniendo en cuenta que los sondeos No. 2 y 4 se encuentra localizados relativamente cerca al cauce actual del río Buga.

4.3.4 Cortes interpretados

A partir de la información presentada se elaboran unos cortes geológicos interpretados que presentan la visión general de la estratigrafía a gran escala. Estos cortes tienen como objetivo lograr una visualización general de la conformación estratigráfica del valle del río Cauca, especialmente en la ubicación de los municipios. Estos cortes proporcionan la información básica para desarrollar los modelos de análisis de respuesta dinámica en los diferentes puntos de estudio dentro del área urbana y de expansión de los municipios.

En las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se presentan los cortes geológicos interpretados, los cuales se complementan posteriormente con la estratigrafía local en cada punto de estudio para conformar los modelos de análisis que se presentan en el Capítulo siguiente.

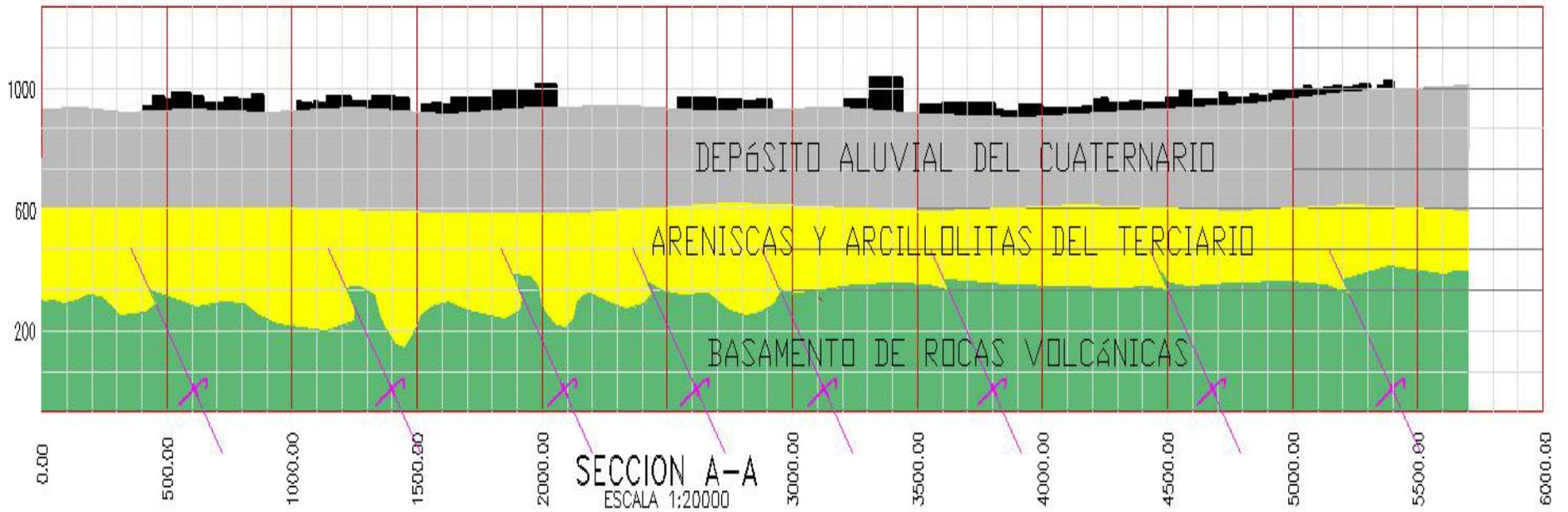


Figura 4.4 Corte geológico interpretado para el Municipio de Palmira

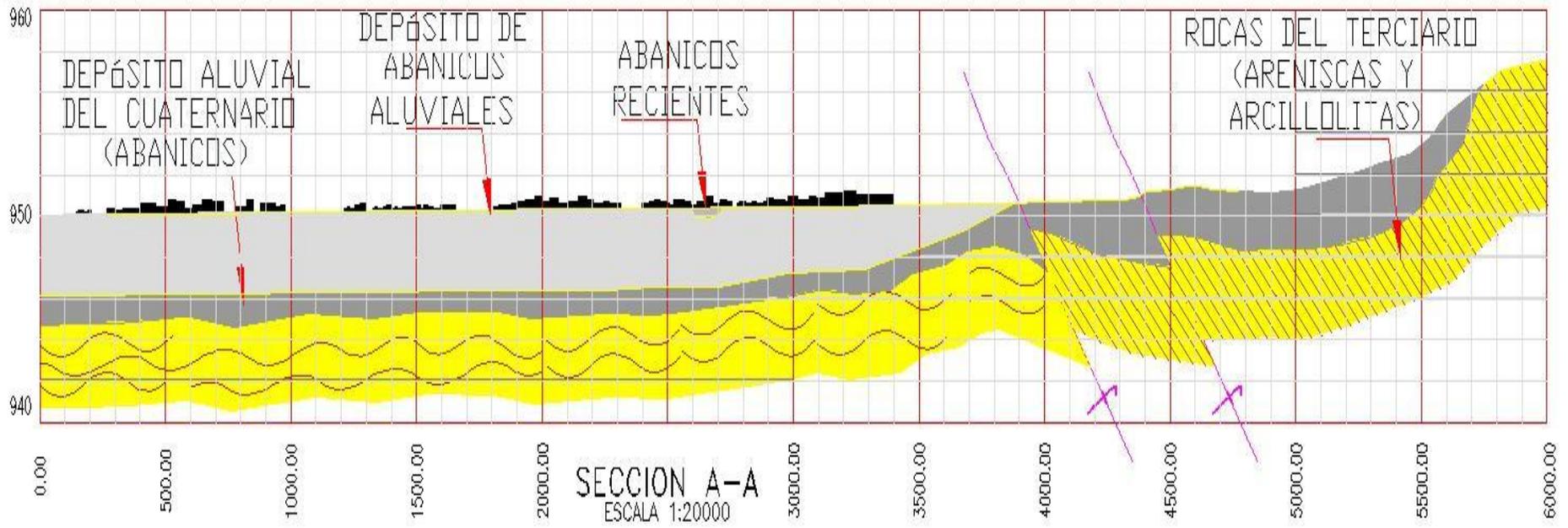


Figura 4.5 Corte geológico interpretado para el Municipio de Tuluá

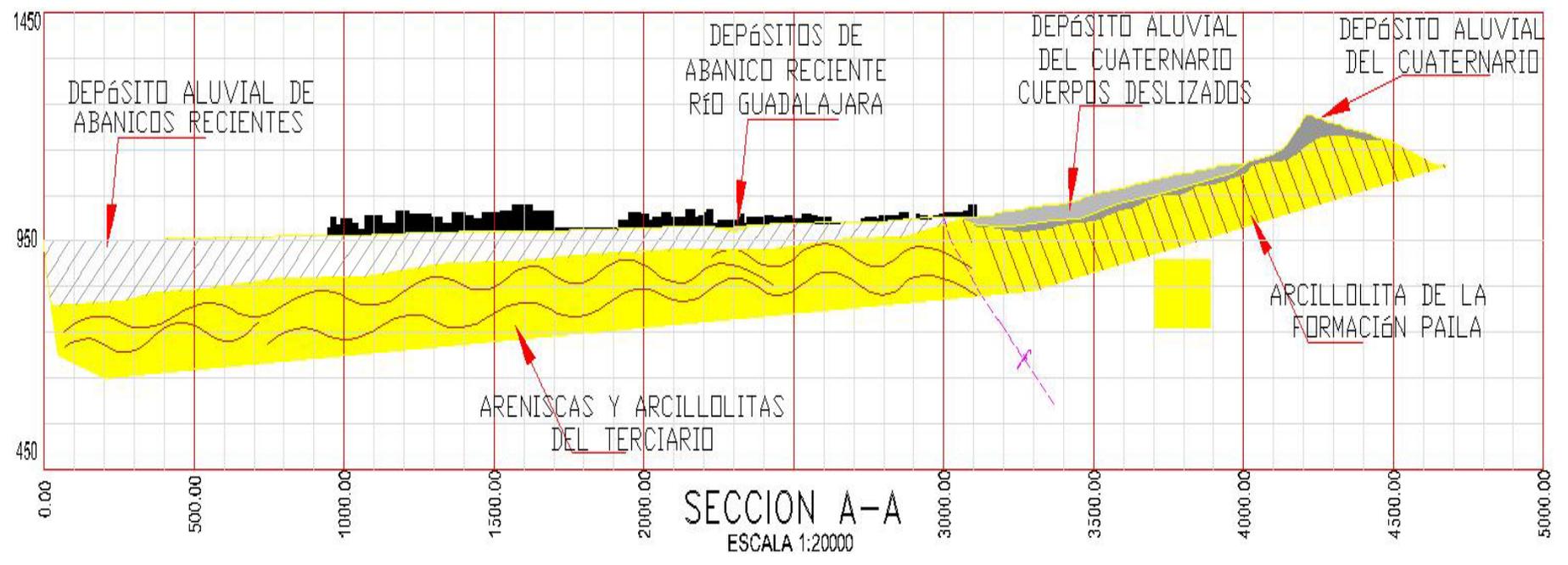


Figura 4.6 Corte geológico interpretado para el Municipio de Buga

4.4 INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA DE CAMPO

4.4.1 Generalidades

La investigación de campo consistió en la ejecución de perforaciones y la realización de ensayos in situ tanto geotécnicos como geofísicos en diferentes zonas de cada una de las ciudades del proyecto. El objetivo de estas investigaciones fue obtener información directa de las características físicas, mecánicas y dinámicas del subsuelo del área de estudio y lograr la recuperación de muestras alteradas e inalteradas de suelo para la realización de ensayos de laboratorio, en especial los requeridos para determinar el comportamiento dinámico del suelo (ensayo triaxial cíclico, ensayo de columna resonante y ensayo de velocidad de onda de corte "Bender Element").

Para la ejecución de las perforaciones se utilizó el procedimiento normalizado de perforación, con taladros rotatorios de alta capacidad Longyear 34 y 38, dotados de bomba de lodos y herramienta apropiada para tomar y recuperar las muestras. Algunas de las perforaciones se llevaron hasta los 70 m con el fin de penetrar una profundidad suficiente en las capas de depósitos aluviales más profundos.

Los resultados de estas perforaciones en forma conjunta con la información existente principalmente proveniente de los pozos de agua profundos ubicados en cercanías a los municipios estudiados, sirvieron de base para obtener parámetros que permiten caracterizar desde el punto de vista geotécnico los suelos en profundidad. En cada una de las perforaciones se llevó un registro de la variación de la posición del nivel freático durante el tiempo de ejecución de la perforación.

La recuperación de las muestras se hizo mediante la extracción de tubos de pared delgada de 2" y 3", y ensayo paralelo de penetración estándar. En muchos casos las características del suelo impidieron la toma de muestras inalteradas por lo cual se tomaron muestras alteradas para efectos de caracterización general y clasificación. El muestreo se realizó prácticamente cada metro de profundidad para los primeros 10 metros y cada 2 m para profundidades superiores tratando de identificar los cambios importantes en la estratigrafía. En los estratos de suelo no cohesivos o en los suelos duros se realizó el ensayo de penetración estándar con cuchara partida recuperando muestras alteradas para su clasificación.

Las muestras se extrajeron, marcaron, parafinaron y empaclaron en tubos de PVC para su envío a los laboratorios de la Universidad de los Andes, de tal forma que no sufrieran daños o alteraciones durante el transporte. Las muestras de suelos granulares fueron empaçadas en bolsas plásticas debidamente selladas para conservar la humedad natural del material. Se utilizaron cajas con protección entre muestras de material compresible para absorber posibles golpes durante el proceso de transporte. Una vez recibidas las muestras en los laboratorios del CIMOC de la Universidad de los Andes se almacenaron en el cuarto húmedo, hasta el momento del ensayo.

Para efectos de poder realizar ensayos de velocidad de onda de corte en el sitio tipo Down Hole, cada una de las perforaciones fue revestida con tubería de PVC (ϕ externo= 2 ½") en toda su longitud. El espacio entre la tubería de PVC y el depósito de suelo se relleno con lechada de suelo-cemento, con el fin de lograr que la tubería de PVC se encuentre en contacto

con los suelos que conforma el depósito y evitar posibles movimientos de la tubería durante la ejecución de dicho ensayo.

Los ensayos in situ realizados consistieron en el ensayo de penetración estándar, del cual se obtiene información sobre las características de resistencia del material, ensayos down hole para determinar la velocidad de la onda S y ensayos con presiómetro cíclico para medir el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo en profundidad. Adicionalmente se adelantaron ensayos de refracción sísmica en sectores ubicados en cercanías al perímetro del área urbana por encontrarse allí la disponibilidad de terrenos requeridos para este tipo de ensayos y medición de vibraciones ambientales para determinar patrones generales de comportamiento dinámico y períodos predominantes de vibración.

Para efectos de una clasificación general de tipos de suelo de acuerdo con el sistema de perforación requerido se consideraran cuatro diferentes tipos de suelo, los cuales están definidos de la siguiente manera:

- Suelos Finos: corresponden a suelos predominantemente limosos, arcillosos y/o arenosos los cuales podrán contener alguna fracción menor de gravillas pequeñas.
- Conglomerados: se trata de suelos en los cuales predominan gravas de cualquier dureza y arenas y que en menor proporción pueden contener arcillas y limos. Presentan ausencia de bloques de roca, ó los que están presentes se encuentran muy meteorizados.
- Aluvión Grueso: en este tipo de suelo hay abundancia de bloques de roca de gran dureza, sanos y sin meteorizar; estos bloques están incluidos dentro de una matriz de naturaleza variada. En el aluvión grueso se obtienen los menores rendimientos de perforación.
- Roca: se adopta la definición geológica de roca, para diferenciarla de los depósitos no consolidados anteriormente descritos; la roca se presenta “in situ” (sin transporte) tal como es el caso de rocas sedimentarias o volcánicas.

4.4.2 Perforaciones

Se realizaron un total de nueve perforaciones en el Municipio de Palmira, siete en el Municipio de Tuluá y ocho en el Municipio de Buga. En las Tablas 4.7, 4.8 y 4.9 se presentan las perforaciones realizadas en cada uno de los municipios incluyendo su ubicación geográfica, la profundidad y la Figura en la cual se encuentra la estratigrafía interpretada. En el Municipio de Palmira se realizaron algunos apiques para efectos de caracterizar los conglomerados mediante la toma de muestras alteradas para efectos de caracterización y clasificación y para el registro de velocidades de ondas. Los registros de campo de las perforaciones y apiques se presentan en el Anexo 4.2 Con * se indican los sitios en los cuales se instalaron los acelerógrafos (ver capítulo 10)

Tabla 4.7 Perforaciones ejecutadas en la ciudad de Palmira

No.	NOMBRE	LOCALIZACIÓN		PROFUNDIDAD [m]
		X	Y	
1	Estadio Rivera	1 085 075.33	881 792.67	12.50
2	Batallón Codazzi	1 087 573.01	881 529.38	13.00
3	Sena Palmira	1 885 825.45	882 929.99	12.45
4	Universidad Nacional del Valle	1 086 343.78	880 752.15	50.00
5	Centro Palmira	1 085 943.00	881 680.12	39.45
6	Instituto Raffo Rivera *	1 086 716.33	882 994.76	50.00
7	Parque Los Mangos *	1 086 368.63	885 217.91	30.00
8	Parque del Azúcar	1 084 838.00	883 352.99	70.00
9	Finca San Pablo	1 087 583.50	883 553.48	20.00

Tabla 4.8 Perforaciones ejecutadas en la ciudad de Tuluá

No.	NOMBRE	LOCALIZACIÓN		PROFUNDIDAD [m]
		X	Y	
1	Aeropuerto Regional Farfan	1 094 923.94	944 695.50	30.17
2	Matadero *	1 098 855.80	944 595.00	22.05
3	Clínica de Tuluá	1 099 049.71	943 358.76	21.05
4	Universidad Central del Valle	1 097 606.14	941 033.50	15.00
5	Estadio 12 de Octubre	1 097 353.36	942 403.79	23.80
6	Instituto Uribe Uribe	1 097 760.62	943 590.94	35.00
7	Polideportivo del Norte	1 096 809.95	945 687.60	10.10

Tabla 4.9 Perforaciones ejecutadas en la ciudad de Buga

No.	NOMBRE	LOCALIZACIÓN		PROFUNDIDAD [m]
		X	Y	
1	Instituto Técnico Agrícola *	1 087 477.00	924 594.00	50.00
2	Federación Nal. de Cafeteros *	1 085 136.00	923 185.00	41.00
3	Escuela Teodoro Valenzuela	1 086 597.00	923 980.00	8.35
4	Colegio Absalon Fernández	1 086 220.00	923 173.00	15.10
5	Acelerografo Aguas Buga *	1 086 643.00	920 895.00	7.00
6	C.V.C Piscicultura	1 087 924.00	922 060.00	19.70
7	Liceo Los Andes (exp. sur)	1 088 081.00	922 359.00	7.00
8	Universidad Antonio Nariño (exp. norte)	1 088 289.00	922 101.00	21.00
9	zona de tanques Aguas Buga	1 087 924.00	925 964.00	14.00

Nota.: * sitios con instalación de acelerógrafos

La localización de las perforaciones se muestra en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 para cada uno de los municipios.

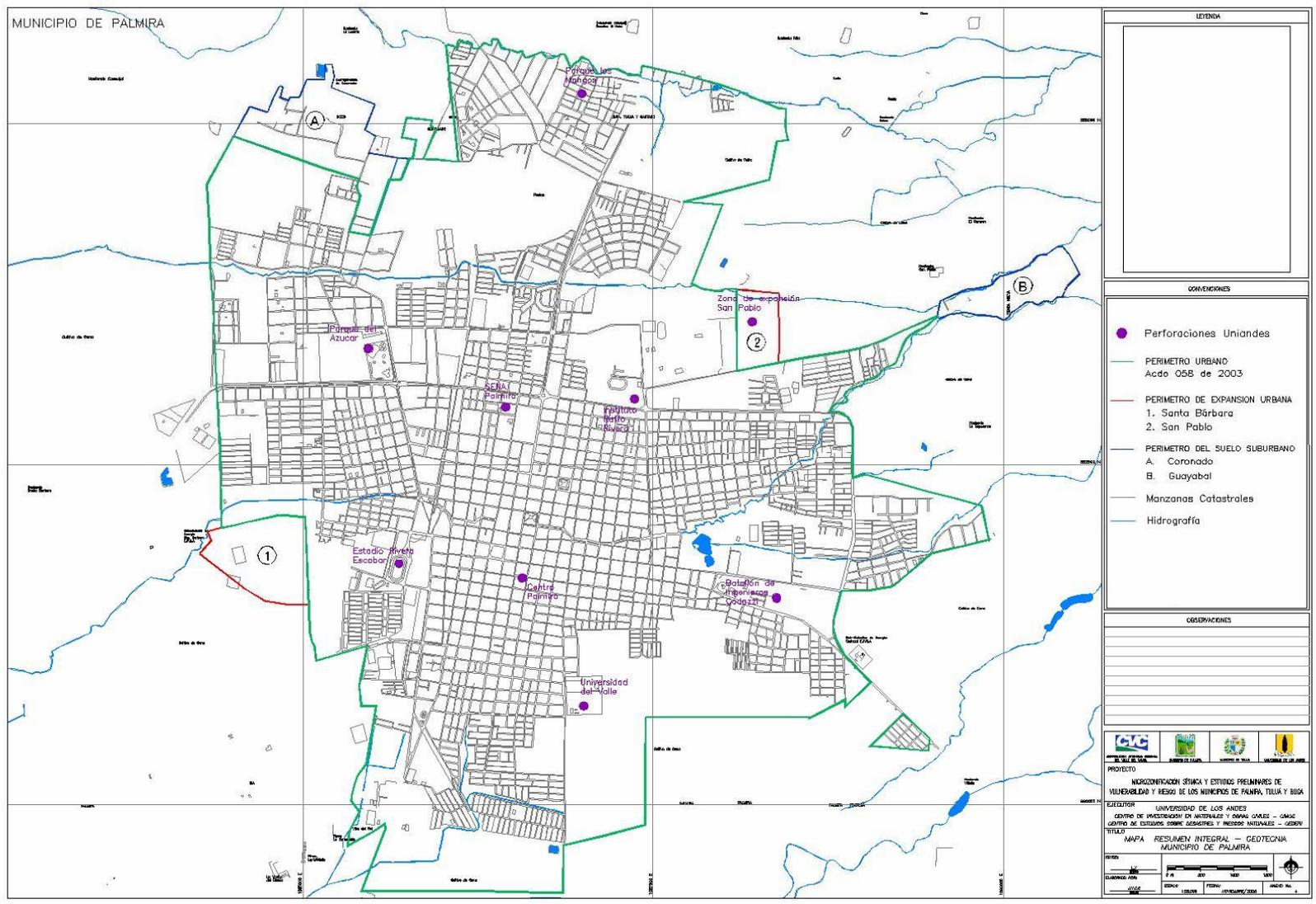


Figura 4.8 Localización perforaciones del Municipio de Tuluá

4.4.3.1 Municipio de Palmira

La estratigrafía superficial del municipio de Palmira corresponde con el relleno cuaternario de depósitos de materiales aluviales desarrollados por antiguos cauces del río Cauca de composición heterogénea de limos orgánicos, arcillas, arenas y gravas de diferentes tamaños.

Un perfil generalizado de los materiales aluviales indica inicialmente la presencia de un suelo limo arcilloso con un espesor variable entre 4.0 m y 12.5 m. A mayores profundidades se encuentra una sucesión de capas de arcillas, arenas de grano fino a grueso, arena con grava y gravas gruesas intercaladas y de espesores variables. Esta estratigrafía típica se profundiza hasta 430 m aproximadamente, de acuerdo con perforaciones realizadas por ECOPETROL y por la compañía TRINITY GAS COLOMBIA INC.

Según la información disponible (líneas sísmicas de ECOPETROL y otras interpretaciones geológicas) bajo este depósito aluvial se encuentran las rocas sedimentarias del Terciario, tales como Arcillolitas, Areniscas, Conglomerados cementados y algunas Calizas. Debajo de estas últimas aparece un basamento de rocas ígneas volcánicas como diabasa y basaltos.

4.4.3.2 Municipio de Tulúa

La estratigrafía del Municipio de Tulúa está formada por sedimentos aluviales que se extienden desde el piedemonte de la Cordillera Central hasta el borde del Valle del Cauca en la desembocadura del río Tulúa. Hacia el costado oriental del municipio se presenta una serie de pequeñas elevaciones formadas por materiales torrenciales del abanico aluvial donde las gravas gruesas y cantos predominan sobre los materiales finos.

Los sedimentos aluviales están compuestos por proporciones variables de limos orgánicos, arcillas, arenas gravas y cantos donde se distinguen tres niveles más o menos claros, en el siguiente orden:

En el primer nivel se encuentra un suelo orgánico limo-arcilloso con un espesor variable entre 1 y 23.0 m, a continuación y como segundo nivel se pudo observar un conjunto de materiales constituido por gravas finas a gruesas, cantos rodados y bloques de roca volcánica en matriz de arena, con algunas intercalaciones de arcilla y limo, con un espesor variable entre 130 y 170 m; por debajo de los materiales gruesos y como tercer nivel, se encuentra una serie de capas intercaladas de arcillas y arenas con grava que puede llegar hasta 440 m de profundidad de acuerdo con perforaciones realizadas por ECOPETROL.

Tal como ocurre en Palmira los sedimentos aluviales de Tulúa también descansarían en profundidad sobre rocas sedimentarias del terciario relacionadas con la formación La Paila que aflora en superficie hacia el oriente del municipio. Debajo de las rocas sedimentarias debe aparecer el basamento volcánico-intrusivo tipo gabro similar a los que afloran en la cordillera central.

4.4.3.3 Municipio de Buga

La zona de Buga también se ubica en el flanco occidental de la cordillera central, algunas urbanizaciones del oriente están emplazadas en el piedemonte de la cordillera.

La estratigrafía del municipio de Buga está conformada por abanicos recientes depositados por el río Guadalajara, aluvión compuesto por bloques de roca ígnea derivadas del batolito de Buga, y fragmentos de anfibolitas y gravas provenientes de la desintegración del macizo ofiolítico de Ginebra, en matriz arenosa con pocos finos. El abanico de Buga aumenta paulatinamente su espesor hasta alcanzar 150 m aproximadamente en el costado occidental.

La formación Paila aflora al oriente de la ciudad en el piedemonte de la cordillera central, como se pudo observar en las perforaciones ejecutadas en las instalaciones de la CVC, donde se recuperaron núcleos de limolitas alteradas seguidas por areniscas de grano fino gris oscuro. Hacia los 20 m de profundidad se recuperó un núcleo de arcillolita gris oscura muy laminada, con rasgos muy notorios de espejos de falla correspondientes al sector de brecha de falla en este sitio como se muestra en la figura 4.10.



Figura 4.10 Espejos de falla limolita de la formación Paila

4.5 ENSAYOS DE CAMPO

Dentro de los ensayos de campo se incluyen ensayos de penetración estándar realizados con el avance de las perforaciones, ensayos de Down Hole para medición de velocidades de onda de corte en profundidad, ensayos de presiómetro cíclico, ensayos de refracción sísmica y ensayos de microtrepidaciones. A continuación se describe la metodología utilizada en la realización de cada uno de estos ensayos y los resultados obtenidos para cada uno de los municipios. Los resultados individuales de los diferentes ensayos de campo se incluyen en el Anexo 4.2.

4.5.1 Ensayos de Penetración Estándar

El ensayo de penetración estándar fue realizado en cada una de las perforaciones y en lo posible cada metro. Este ensayo fue realizado tanto en suelos granulares como en suelos con altos contenidos de finos. Los resultados de los ensayos se muestran conjuntamente con los resultados de otros ensayos de campo y laboratorio, en las columnas estratigráficas presentadas anteriormente.

Se han agrupado todos los resultados de mediciones de penetración estándar para cada uno de los municipios, calculando los valores medios en cada una de las profundidades y rangos de variación con $+y -$ una desviación estándar en cada profundidad.

Para el municipio de Palmira se observa un valor de la resistencia a la penetración estándar N promedio de 15 golpes por pie en los primeros 5 m y de 40 hasta los 10 m. A partir de los 10 m y hasta la profundidad máxima explorada (70 m) se evidencia un incremento de éste, obteniendo valores de 55 golpes por pie en promedio. El valor más alto se presenta a los 15 m de profundidad con un valor promedio de 70. La Figura 4.11 presenta la distribución promedio en profundidad de los valores de N resultantes de los ensayos realizados.

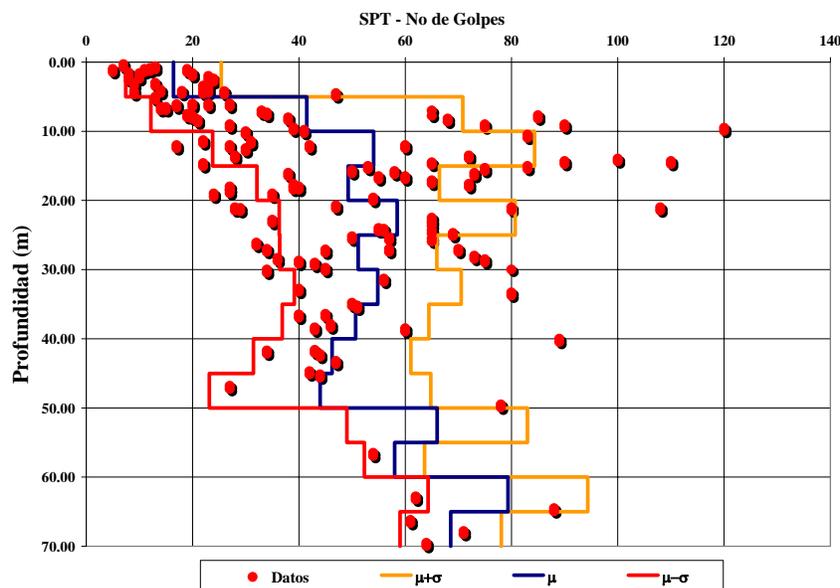


Figura 4.11 Resumen de resultados de penetración estándar para el municipio de Palmira

Por otro lado para el municipio de Tuluá la resistencia a la penetración estándar hasta 5.0 m de profundidad muestra un valor promedio de 70 golpes por pie, presentando un aumento a 35 golpes por pie hasta 10 m de profundidad, desde donde muestra un comportamiento más o menos estable de 60 golpes por pie hasta los 35 m de profundidad. Se observa una disminución hacia los 20 m de 40 golpes por pie. La Figura 4.12 resume los resultados para el municipio de Tuluá.

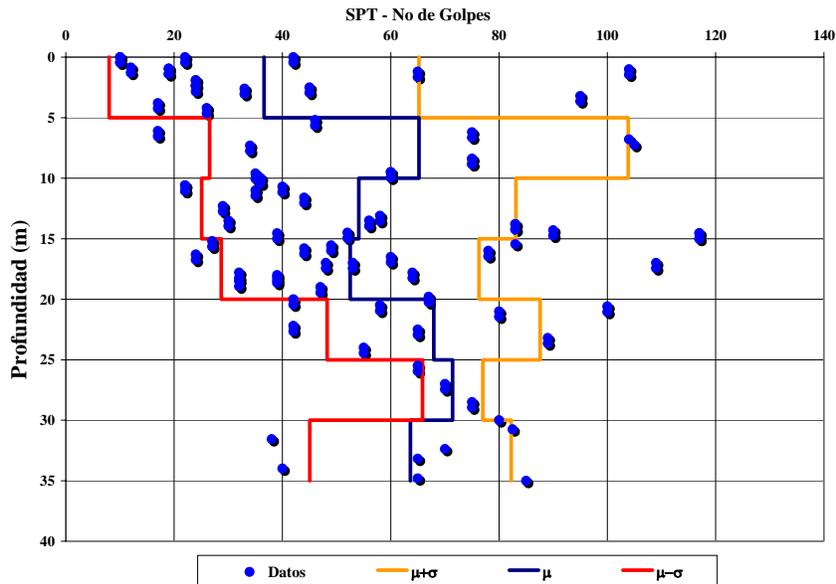


Figura 4.12 Resumen de resultados de penetración estándar para el municipio de Tuluá

La resistencia a la penetración Estándar en el municipio de Buga mostró valores entre 20 y 50 golpes hasta 5 metros de profundidad, presentando un aumento en el rango de datos entre 20 y 80 golpes por pie hasta 10 m de profundidad, desde donde muestra un comportamiento más o menos estable entre 50 y 60 golpes por pie hasta los 30 m de profundidad. Desde los 30 a 35 m profundidad máxima perforada se observó una resistencia de 80 golpes por pie en promedio. En la figura 4.13 se muestran los valores de N con la profundidad para el municipio de Buga.

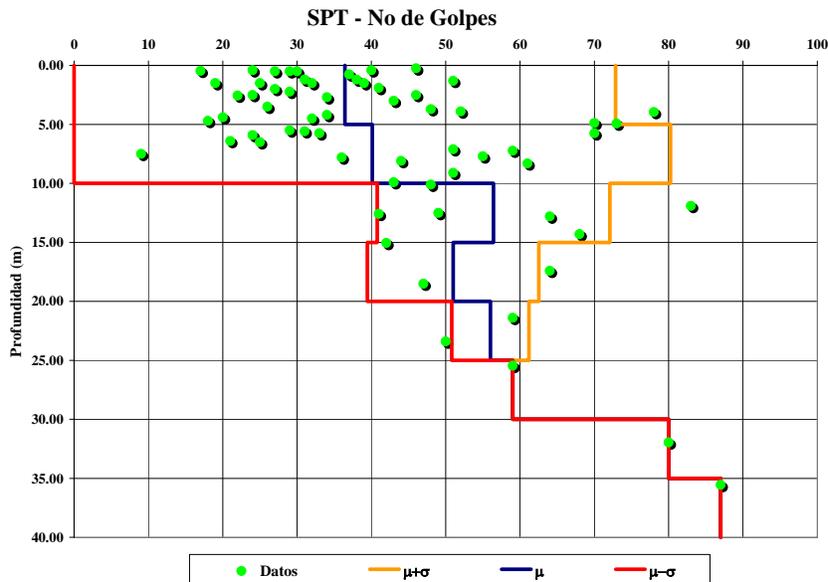


Figura 4.13 Resumen de resultados de penetración estándar para el municipio de Buga

Por otro lado y para efectos comparativos se han graficado todos los valores disponibles de los tres municipios en una sola figura. Los resultados indican que en promedio en los depósitos superficiales los suelos de menor capacidad están en el municipio de Palmira. La Figura 4.14 presenta esta comparación.

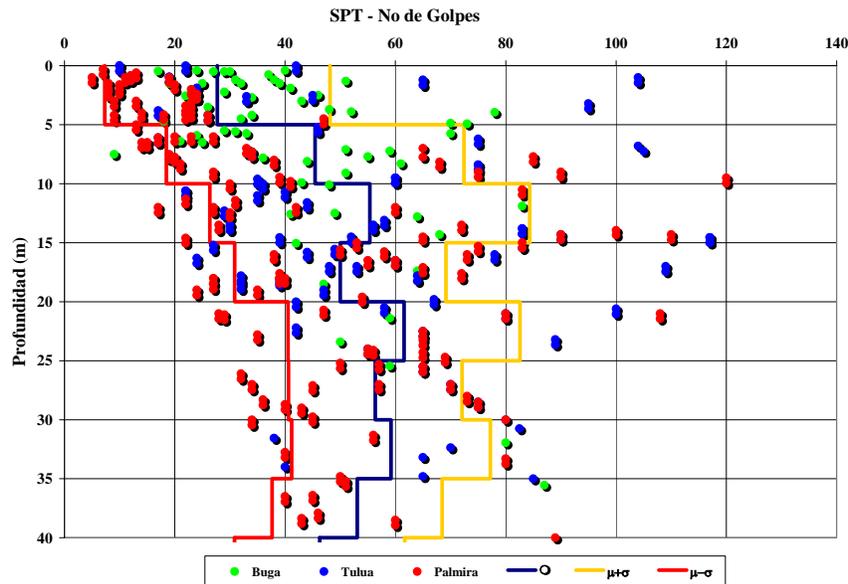


Figura 4.14 Comparación de resultados de penetración estándar

4.5.2 Ensayos Down Hole

El ensayo "down-hole" o está enfocado fundamentalmente a detectar la velocidad de propagación de las ondas S (vibración de las partículas en la dirección horizontal) en su trayectoria vertical a través de una masa de suelo. El ensayo consiste en generar ondas S mediante una fuente de energía reversible que produzca un efecto de cizalla horizontal en la superficie del terreno y registrar la llegada del impacto a lo largo de un sondeo situado a una distancia prudencial del foco emisor ver Figura 4.15. Al estar la fuente de energía cerca del sondeo receptor, las ondas que interesa detectar se propagarán en una dirección muy próxima a la vertical por lo que es lícito suponer una trayectoria directa desde el foco emisor a los receptores para calcular la velocidad de propagación de las ondas. El sistema de generación de ondas S está conformado por un sistema de platinas semienterradas en el suelo y un sistema de golpe con martillo tipo péndulo para generar la máxima transferencia posible de energía. El mecanismo debe permitir la generación de esfuerzos cortantes horizontales cuando se golpea en dicha dirección. El paquete ondulatorio así generado está conformado fundamentalmente por ondas SH. El procedimiento consiste en golpear horizontalmente en la platina y recibir las ondas en el geófono multiaxial colocado a profundidades variables dentro del sondeo. Una observación cuidadosa de la pantalla del equipo registrador, permite detectar la inversión de polaridad cuando se aplican golpes inversos, lo cual es la demostración que se trata de ondas S.

Terminada la labor de campo, se genera una gráfica de distancia-tiempo en la cual, las pendientes corresponden a las velocidades promedio de las ondas S en función de la profundidad. La Figura 4.15 presenta un esquema del montaje para la realización de los ensayos Down Hole. En el presenta caso para las mediciones se utilizó un equipo del tipo Geometrics modelo Smartseis de 12 canales, con sensores y dispositivos específicos para adelantar este tipo de ensayos.

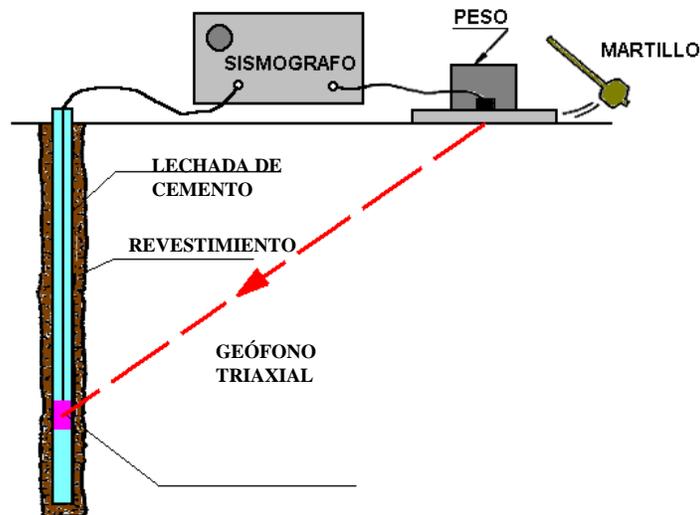


Figura 4.15 Esquema del ensayo Down Hole

Se adelantaron ensayos Down Hole en las perforaciones ejecutadas en el proyecto. Los resultados individuales de estos ensayos se presentan en el Anexo 4.2. En las columnas estratigráficas de cada perforación se incluyen los resultados de este ensayo en forma simultánea con los resultados de otros ensayos de campo y de laboratorio.

Por otro lado en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18 se presentan los valores medidos de velocidad de onda agrupados por municipios. Se incluye en cada una de las figuras los valores medios y los valores correspondientes a + y - una desviación estándar de la velocidad de onda de corte para cada profundidad.

4.5.2.1 Municipio de Palmira

En el municipio de Palmira las velocidades de onda de los estratos más superficiales (menos de 5 m presentan valores relativamente bajos, 175 m/s en promedio. Entre 5 y 10 m se presenta una velocidad de corte de 220 m/s. Para mayores profundidades los valores de velocidad de onda de cortante suben hasta valores en el orden de los 280 a 360 m/s.

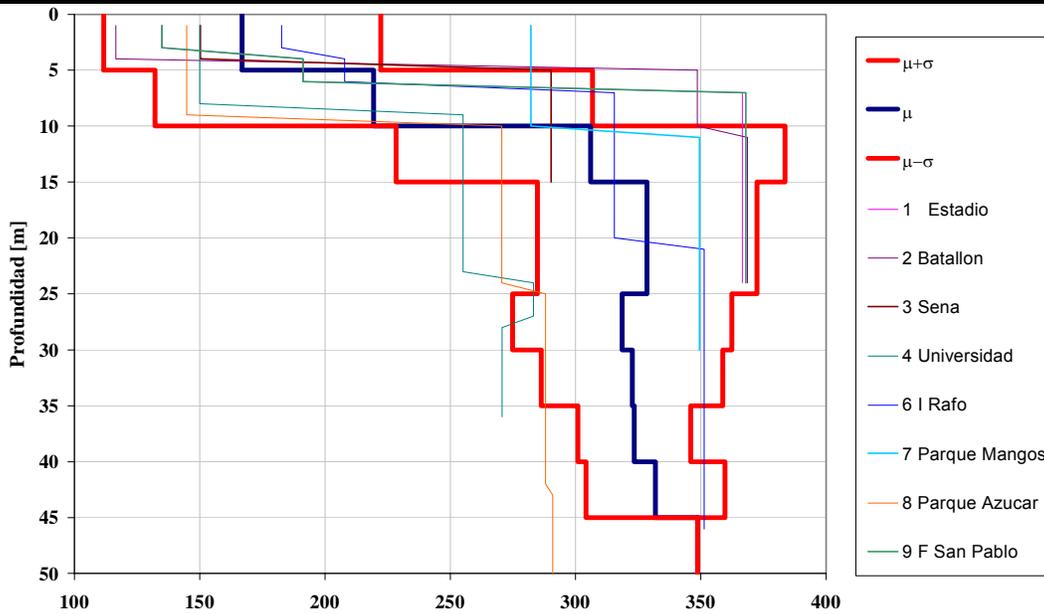


Figura 4.16 Variación de la Velocidad de Onda Cortante – Palmira

4.5.2.2 Municipio de Tuluá

En el municipio de Tuluá las velocidades de onda de los estratos más superficiales (menos de 6 m presentan valores relativamente bajos variando entre 170 y 230 m/s. Desde 6 m en adelante los valores de velocidad de onda de cortante presentan valores entre 260 a 350 m/s aumentando con la profundidad.

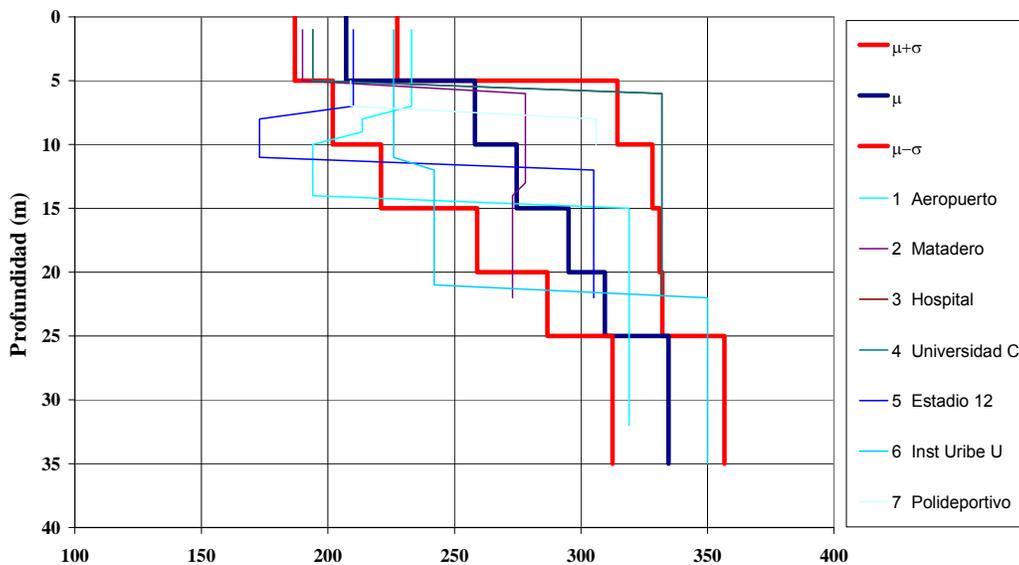


Figura 4.17 Variación de la Velocidad de Onda Cortante – Tuluá

4.5.2.3 Municipio de Buga

En el municipio de Buga las velocidades de onda de los estratos más superficiales (menos de 5 m presentan valores muy variables entre 100 y 450 m/s. Entre 5 y 15 m se presenta una velocidad de corte de 325 m/s en promedio. Para mayores profundidades los valores de velocidad de onda de cortante suben hasta valores en el orden de los 280 a 460 m/s, presentando las mayores velocidades hacia el sector donde se encuentran las instalaciones de la CVC y de la Federación Nacional de Cafeteros.

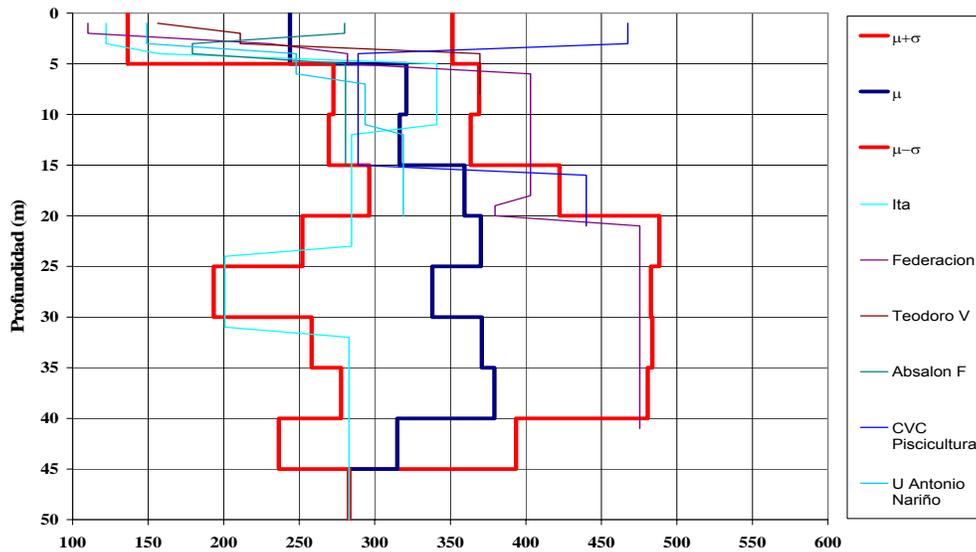


Figura 4.18 Variación de la Velocidad de Onda Cortante – Buga

4.5.2.4 Correlación N.vs.Vs

Con base en los resultados encontrados en las mediciones de Vs, se intenta una correlación general entre valores del ensayo de penetración estándar, N, y los valores de Vs resultantes.

La Figura 4.19 presenta el resultado general de esta correlación, la cual puede utilizarse para estimar valores de Vs a partir del gran registro de valores de N disponibles en la zona.

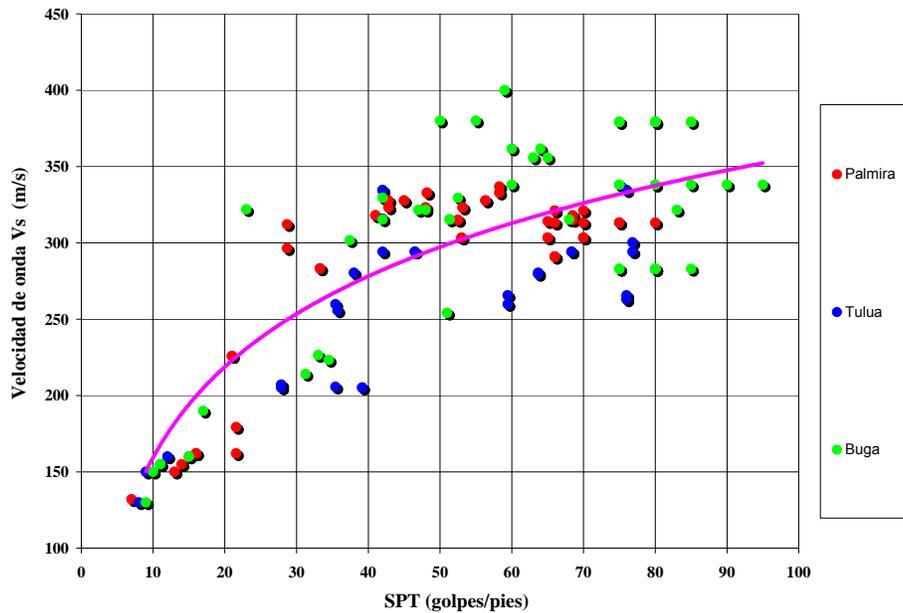


Figura 4.19 Correlación entre N y Vs para suelos finos de los municipios

4.5.3 Ensayos de Presiómetro Cíclico

Adicionalmente a lo anterior se adelantaron una serie de ensayos de presiómetro cíclico. Este ensayo tiene por objetivo realizar mediciones del comportamiento esfuerzo deformación del suelo en la profundidad utilizando para el efecto perforaciones existentes o específicamente realizadas para tal efecto. El ensayo consiste en introducir una sonda flexible a la profundidad deseada someterla a presión interna midiendo simultáneamente la presión aplicada con el volumen de agua introducido a la misma. Utilizando el cambio de volumen de la sonda al variar la presión se puede calcular la deformación radial unitaria de la pared de la sonda que corresponde a la deformación radial del suelo. Luego de realizar correcciones a la presión medida debido a la cabeza de agua presente en el ensayo y correcciones al volumen medido debido a las propiedades de la sonda (las cuales se obtienen mediante relaciones básicas que se encuentran en la bibliografía consultada) se obtienen las curvas típicas esfuerzo-deformación del material a partir de lo cual se puede determinar valores de módulos para diferentes niveles de deformación del suelo y estimativos de la capacidad de amortiguamiento del suelo, de nuevo para diferentes niveles de deformación.

El ensayo solo puede realizarse para suelos finos ya que en la medida que el suelo tenga partículas gruesas se presentan concentraciones de esfuerzos y daños en la membrana de aplicación de la presión. Considerando los tipos de suelos encontrados en los tres municipios estudiados, solo se adelantaron ensayos en el municipio de Palmira.

En la Figura 4.20 se presenta una fotografía del aparato y del montaje utilizado para estos ensayos. En la Tabla 4.10 se resumen los sondeos y puntos específicos donde se adelantaron ensayos de presiómetro cíclico. En el Anexo 4.2 se incluyen los resultados individuales de cada uno de los ensayos realizados. Los resultados principales de estos ensayos se conjugan con los modelos de comportamiento dinámico de los diferentes tipos de suelos estudiados.

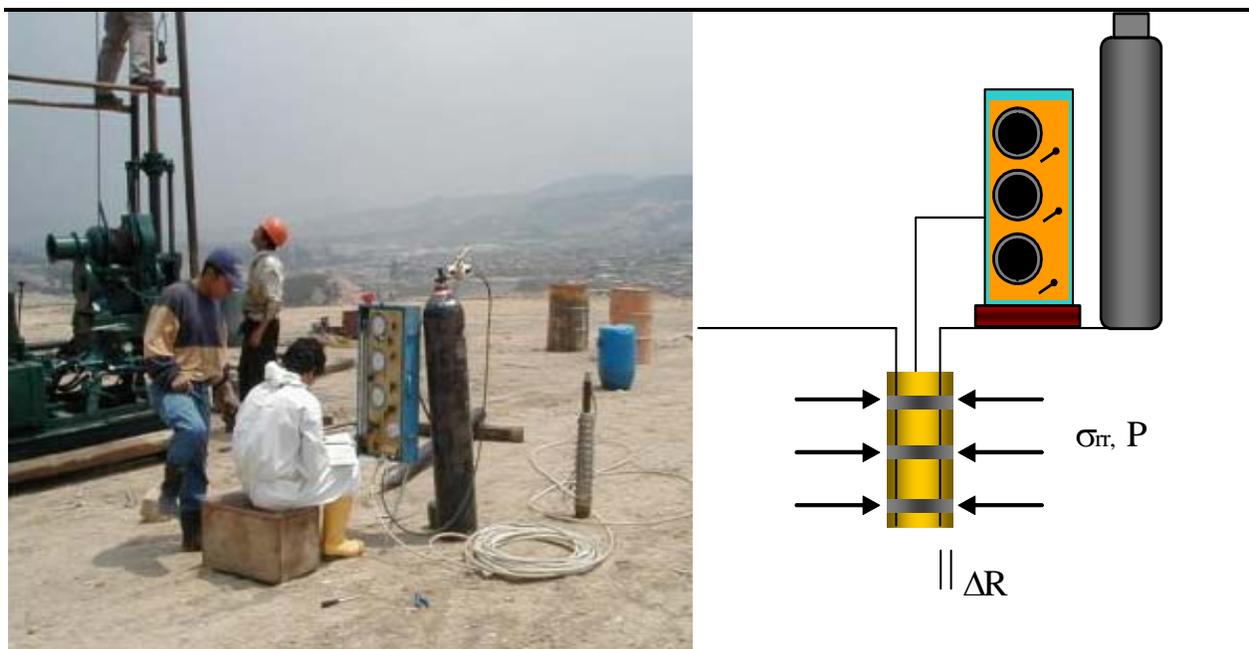


Figura 4.20 Equipos y montaje para el ensayo de presiómetro cíclico

Tabla 4.10 Ensayos de Presiómetro Cíclico Palmira

No.	NOMBRE	PROFUNDIDAD (m)
1	Universidad del Valle	2.3
2	Universidad del Valle	4.5
3	Universidad del Valle	6.0
4	Universidad del Valle	8.4
5	Universidad del Valle	38.5
6	Centro Palmira	3.0
7	Centro Palmira	4.7
8	Centro Palmira	6.6
9	Centro Palmira	8.3
10	Centro Palmira	16.0
11	Centro Palmira	19.0
12	Instituto Raffo	2.0
13	Instituto Raffo	4.0
14	Instituto Raffo	6.0

En el Anexo 4.2 se resumen los resultados individuales obtenidos con el ensayo de presiómetro cíclico. Los resultados se presentan únicamente en términos de la degradación del módulo de cortante con la deformación angular. En el presente caso los resultados de amortiguamiento en función de la deformación angular presentan altas variaciones y solo se incluyen en el Anexo 4.2. Más adelante en el capítulo se conjugan estos resultados con los demás resultados de ensayos cíclicos realizados.

4.5.4 Ensayos de refracción sísmica

Los métodos de refracción sísmica hacen parte de los métodos geofísicos de investigación indirecta que fueron desarrollados principalmente por la industria de hidrocarburos. En la actualidad los métodos geofísicos están ampliamente difundidos para diferentes aplicaciones tales como la investigación del subsuelo, la búsqueda de agua subterránea, el análisis del comportamiento dinámico de suelos y estructuras y otros.

Los esfuerzos liberados súbitamente por una perturbación ya sea por pequeñas cargas explosivas o perturbaciones mecánicas generan en el medio la propagación de ondas internas y superficiales, las cuales modifican el estado energético local del medio y sus partículas.

La propagación de un proceso ondulatorio dentro de los sólidos, se realiza mediante el concepto del frente de onda, el cual corresponde a una superficie tridimensional que se desarrolla dentro del medio transmisor. En cada sitio del medio afectado por la perturbación se genera un intercambio de energía, lo cual induce deformaciones y almacenamiento de energía cinética. Por otro lado la fricción intergranular en las partículas de suelo genera calor y ruido lo cual lleva a la disipación de la energía.

4.5.4.1 Conceptos básicos

El método utiliza fundamentalmente la llamada ley de Snell, tomada de la óptica geométrica práctica mediante la cual se demuestra que cuando un rayo generado encuentra un cambio de rigidez en el medio en el cual se transporta, sufre un cambio de dirección (refracción). La ley de Snell relaciona la geometría del medio y sus propiedades físicas a través de la velocidad ondulatoria. Cuando hay cambio de dirección, hay cambio de velocidad.

La Figura 4.21 presenta para un modelo bicapa, las posiciones sucesivas del frente de ondas longitudinales generado mediante impacto o explosión en la superficie del terreno cuando la velocidad de propagación es mayor en el estrato inferior que en el superior. El rayo directo viaja horizontalmente por la parte superior de la primera capa a una velocidad V_1 y el rayo refractado sigue la trayectoria ABCD definida por el ángulo de refracción crítica $\theta_c = \text{arc sen } V_1/V_2$. De esta fórmula se desprende que es necesario que $V_2 > V_1$ para que exista dicho ángulo, se pueda producir el fenómeno de refracción crítica y las primeras llegadas detectadas en la superficie del terreno contengan información sobre las características y profundidad a las que se encuentra el segundo estrato. Esta es una de las mayores limitaciones que presenta esta técnica a la hora de caracterizar un sistema multicapa, pues exige que aumente continuamente la rigidez de los estratos con la profundidad. No obstante, en muchos casos en los que se trata de determinar el espesor de zonas alteradas de un macizo rocoso o la profundidad a la que se encuentra la roca por debajo de un relleno cuaternario, este método puede constituir la técnica ideal para adelantar una investigación indirecta del subsuelo.

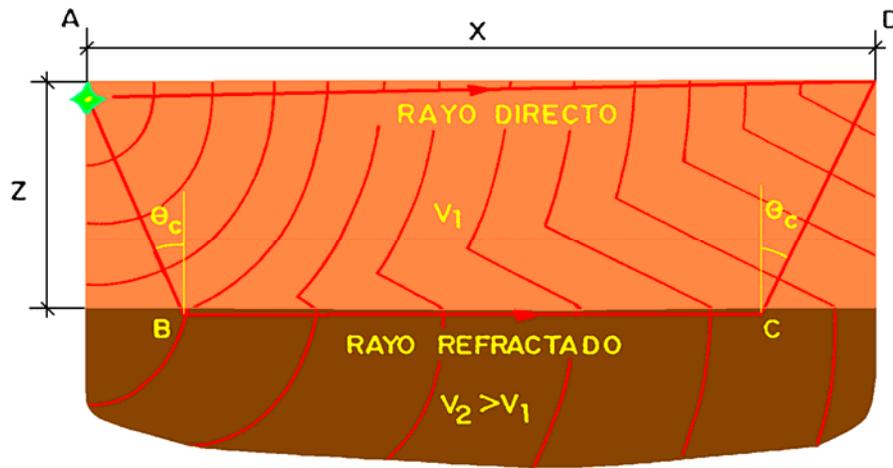


Figura 4.21 Esquema del ensayo de refracción sísmica - Frente de onda, modelo bicapa

4.5.4.2 Fuente de perturbación

La fuente de perturbación depende de la longitud de las líneas y del terreno que se va a ensayar. Se puede usar desde un martillo que golpea una platina de hierro, una carga de algún explosivo o un fusil neumático. Para efectos del ensayo se usó un explosivo químico, diferente a la dinamita, cuya denominación corresponde a una reducción al clorato con aceleración de aluminio y antimonio. El explosivo se elaboró en el sitio de trabajo, empleando elementos químicos de libre venta y transporte, por lo cual no se usó ningún tipo de escolta militar. Las condiciones de seguridad del explosivo preparado son similares a los de la dinamita excepto por su respuesta a la combustión. El accionamiento del explosivo es eléctrico, empleando unos fulminantes elaborados manualmente. Las fotografías de la Figura 4.22 ilustran el proceso.



Figura 4.22 Proceso de fabricación de cargas explosivas para ensayo de refracción sísmica



Figura 4.23 Proceso de generación de cargas explosivas

4.5.4.3 Equipo

El equipo usado para las mediciones corresponde a un sismógrafo de marca Geometrics modelo SmartSeis de 12 canales. Como fuente de energía se utilizó una batería de 12 voltios. El equipo incluye además un total de doce geófonos verticales y un cable sísmico de 110 m de longitud y los dispositivos para adelantar ensayos de tipo Down Hole. Las fotografías de la Figura 4.24 ilustran los componentes y el montaje para adelantar los ensayos.



Figura 4.24 Componentes y montaje para el ensayo de refracción sísmica

4.5.4.4 Procedimiento de campo

Después de ubicado el sitio de ensayo, se determina la posición de la línea de geófonos y se entierran a las distancias especificadas (usualmente 10 m); se procede a tender el cable sísmico dejando una separación de 10 m entre toma y toma; se conectan los geófonos al cable y se conecta el cable al sismógrafo; también se conecta el cable del Stard al sismógrafo y a los fulminantes empleados para el accionamiento de la voladura.

Al producirse la perturbación, el cable de la fuente perturbadora impone el tiempo cero al sismógrafo, y las ondas viajan por el terreno generándose procesos de refracción y reflexión, de manera que las ondas refractadas llegan a cada uno de los geófonos en tiempos diferentes. Los tiempos y las formas de las ondas de llegada se graban en el equipo para su posterior procesamiento e interpretación.

4.5.4.5 Resultados

En las Figuras 4.25, 4.26 y 4.27 se resumen los resultados obtenidos del ensayo para cada uno de los municipios. En total se realizaron tres (3) líneas de refracción en el municipio de Palmira, tres (3) en el municipio de Tuluá y tres (3) en el municipio de Buga.

Las mediciones realizadas permiten obtener los siguientes resultados generales:

Municipio de Palmira

- En el Municipio de Palmira se identificaron dos refractores con un cambio importante y homogéneo entre los cuatro y seis metros de profundidad
- El estrato superficial (entre 4 y 6 m) se caracteriza por una velocidad de onda de compresión V_p entre 320 y 520 m/s. La zona mas blanda corresponde al sector donde está ubicado el estadio Rivera donde se encontró un relleno de material arcilloso y orgánico; la zona mas dura corresponde al parque del Azucar donde se encontró un relleno de arcilla y arena.
- El segundo refractor muestra una velocidad del orden de 1.400 m/s que corresponde a esos depósitos aluviales con mezclas de gravas, arenas y arcillas intercaladas, muy homogéneo.

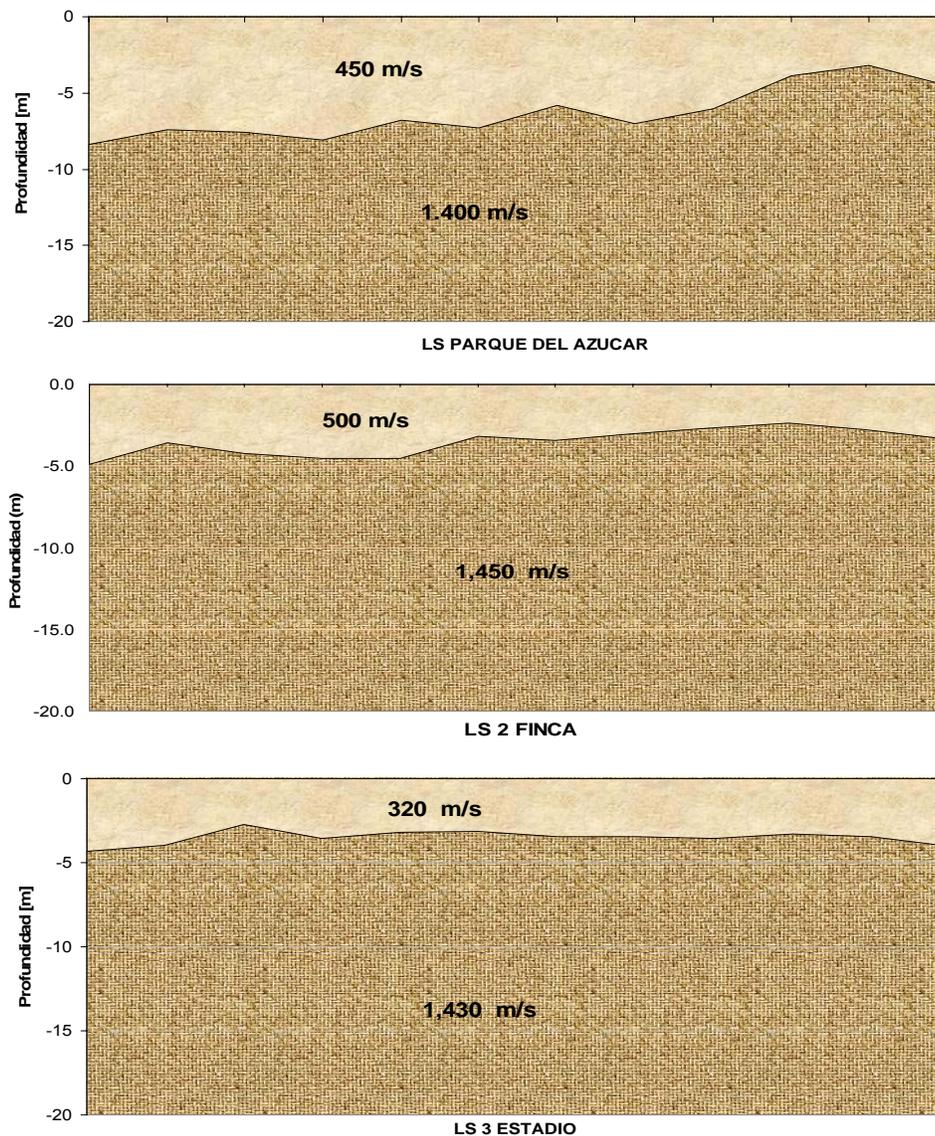


Figura 4.25 Resultados del ensayo de refracción sísmica – Municipio de Palmira

Municipio de Tuluá

- El Municipio de Tuluá se caracteriza por materiales mas duros o compactos con menos intercalaciones de suelos blando, igualmente se pudo identificar dos velocidades con un cambio importante
- El primer refractor se caracteriza por una velocidad de onda V_p entre 680 a 800 m/s tiene profundidades variables entre 4 y 12 m, que corresponde a los rellenos de limos con arenas y gravas intercaladas observadas en las perforaciones ejecutadas.
- El segundo estrato tiene una velocidad de onda de compresión entre 1.400 y 1.900 m/s que corresponde a los materiales aluviales que se observaron en las perforaciones.

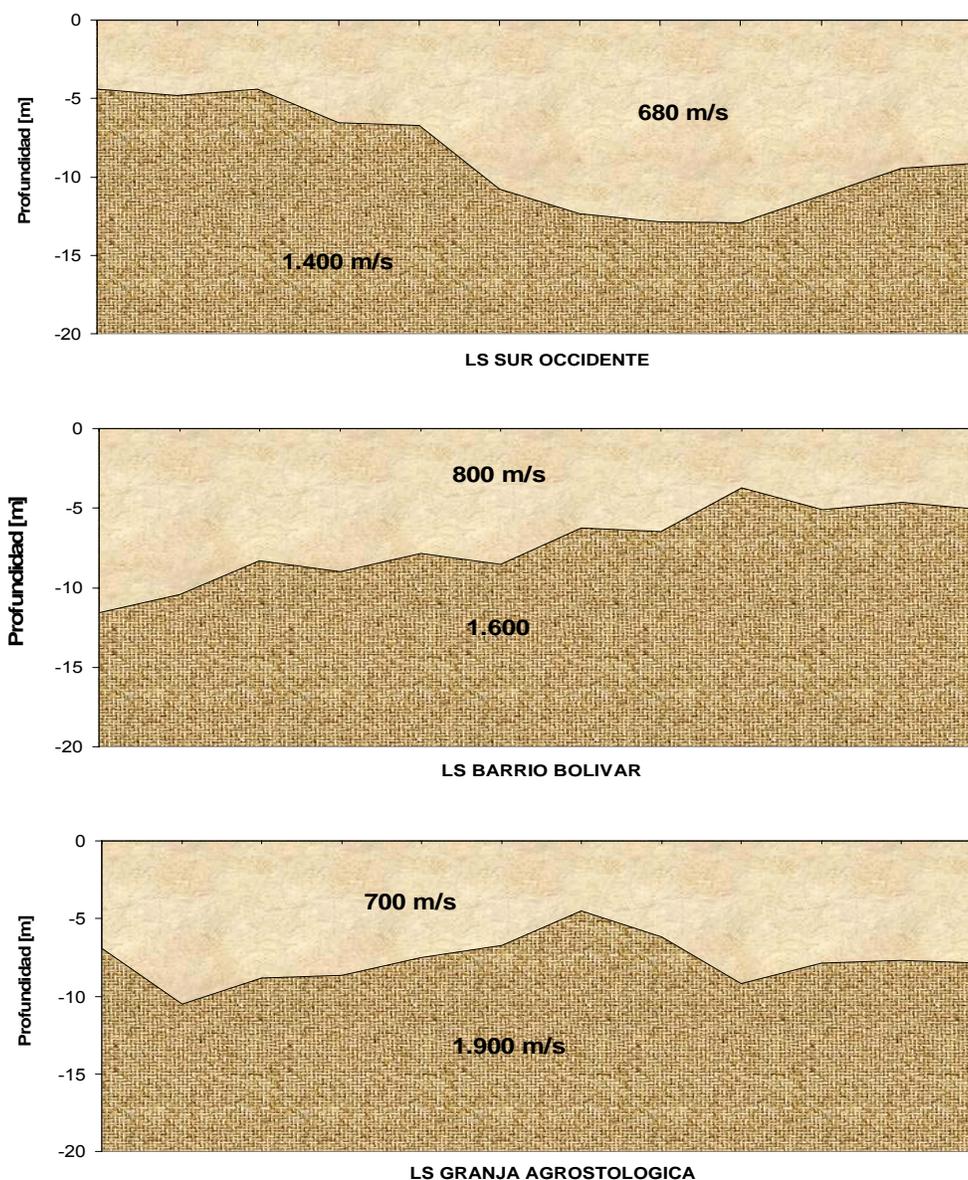


Figura 4.26 Resultados del ensayo de refracción sísmica – Municipio de Tuluá

Municipio de Buga

- En el Municipio de Buga se identificaron dos refractores en las líneas del Idema y el Parque el Vergel, mientras que la línea realizada en la Universidad Antonio Nariño se identificaron tres estratos.
- El estrato superficial tiene una velocidad de 300 m/s (entre 4 y 5 m de espesor), y solo se detectó en el sector de la Universidad Antonio Nariño donde la superficie está conformada por un suelo muy blando.
- El segundo refractor del orden de 600 y 700 m/s corresponde a un suelo fino y seco con intercalaciones de grava y arena.
- El último refractor identificado está entre 1.600 y 2.000 m/s correspondiendo éste último a la velocidad de la roca dada la ubicación de la línea (Parque el Vergel).

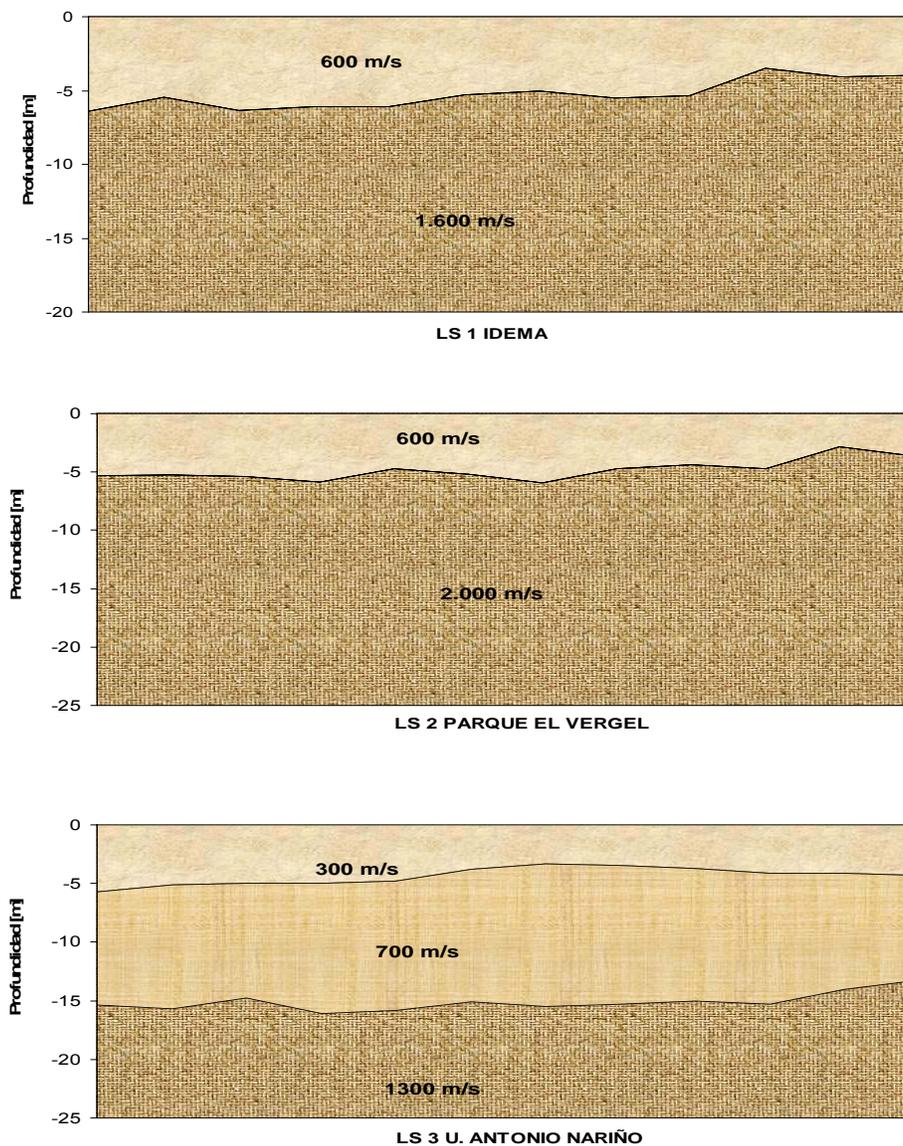


Figura 4.27 Resultados del ensayo de refracción sísmica – Municipio de Buga

4.5.5 Ensayos de Microtrepidaciones

4.5.5.1 Introducción

El método de las microtrepidaciones consiste en el registro de aceleraciones o velocidades ambientales, llamadas también microtremores o microtrepidaciones, directamente en el suelo a nivel de la superficie del terreno y determinar a partir de este registro el espectro de amplitudes de Fourier el cual, en el rango adecuado de frecuencias, contiene información sobre las frecuencias dominantes de la vibración registrada. Esta frecuencia dominante puede estar asociada a la frecuencia del modo fundamental de vibración del depósito o de alguno de los modos superiores. Una vez determinadas las frecuencias dominantes de vibración, la información se puede utilizar para dibujar mapas que indican una caracterización general de la respuesta dinámica (en forma relativa entre zonas) y valores característicos de los períodos de vibración del depósito, lo cual con información geométrica complementaria, se puede utilizar

para establecer indirectamente velocidades de onda en bajos niveles de deformación angular de los estratos superficiales.

Existen una gran cantidad de técnicas que utilizan microtemblores para determinar variables características del medio. De todas las metodologías disponibles la que tiene mayor aceptación es el método de Nakamura (1989) debido principalmente a su fácil implementación tanto en trabajo de campo como en el procesamiento de los registros.

La instrumentación necesaria para la realización de los ensayos consiste en un velocímetro o acelerómetro triaxial con el cual se registran microtemblores en superficie. El método de Nakamura consiste en determinar los espectros de Fourier de las componentes horizontal (H) y vertical (V), para luego realizar la división H/V (Función de transferencia entre las componente horizontal y vertical). Según Nakamura las frecuencias dominantes obtenidas en la división de espectros (picos en la función de transferencia) concuerdan con ensayos de laboratorio, el análisis de terremotos y modelación numérica. Sin embargo de tenerse precaución al analizar e interpretar los resultados ya que en algunos casos el método puede no arrojar resultados adecuados.

4.5.5.2 Método de Nakamura

El método propuesto por Nakamura (1989), para estimar la función de transferencia aproximada de las capas superficiales de suelo supone que el ruido de los microtemblores está compuesto por varios tipos de ondas. El método considera que las componentes horizontal y vertical de los microtemblores registrados en roca son similares. Dichos microtemblores son amplificados por las capas de suelo blando que se encuentran sobre el basamento rocoso. Se considera además que los microtemblores horizontales se amplifican debido a multireflexiones de onda S, en tanto los microtemblores verticales lo hacen por onda P.

La función de transferencia S_T de los estratos superficiales se define de la siguiente forma:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (1)$$

Donde S_{HS} y S_{HB} son los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en superficie y el incidente, registrado a nivel del basamento rocoso.

Una de las suposiciones básicas del método de Nakamura se fundamente en que el movimiento vertical no se amplifica por las capas de suelo, lo cual se cumple siempre y cuando la influencia de las ondas de Rayleigh sea mínima.

Definiendo E_S como la función de transferencia de las ondas verticales, es decir la relación entre los espectros de Fourier de ondas verticales en superficie, S_{VS} , y el espectro de Fourier de ondas verticales a nivel de la roca base, S_{VB} , entonces se tiene que,

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (2)$$

Cuando el efecto de las ondas de Rayleigh es mínimo, se puede considerar que $E_S \approx 1$, y si el efecto de las ondas de Rayleigh es apreciable se tendrá que $E_S > 1$.

También se puede suponer en forma aproximada que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal. De acuerdo con esto se define la variable S_{TT} como:

$$S_{TT} = S_T / E_S \quad (3)$$

Es decir la relación entre la función de transferencia de las componentes horizontales de las ondas S y la función de transferencia de las componentes verticales, entre superficie y roca. Esta relación tiene la ventaja que es más confiable puesto que elimina, al menos parcialmente, los efectos de las ondas de Rayleigh.

Con base en lo anterior se tiene que:

$$S_{TT} = R_S / R_B \quad (4)$$

En donde

$$R_S = S_{HS} / S_{VS} \quad (5)$$

$$R_B = S_{HB} / S_{VB} \quad (6)$$

R_S y R_B obtenidas dividiendo el espectro horizontal entre el espectro vertical para temblores en superficie y en el basamento rocoso. Se ha encontrado en un gran número de mediciones que R_B está cerca de la unidad para un rango relativamente amplio de frecuencias para registros tomados en roca. Esto implica que para el basamento rocoso la propagación es la misma en todas las direcciones. Por lo anterior si $R_B \approx 1$

Entonces, $S_{TT} = R_S$

Esto significa que la función de transferencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir únicamente del movimiento en superficie, dividiendo el espectro de Fourier de la componente horizontal del movimiento en superficie por el espectro de Fourier de la componente vertical también en superficie. En otras palabras el movimiento vertical en la superficie retiene las características del movimiento horizontal en el basamento rocoso.

4.5.5.3 Mediciones realizadas

En las ciudades de Palmira, Tuluá y Buga se realizaron mediciones de vibraciones ambientales distribuidas en el perímetro urbano de cada uno de los municipios.

Para el registro de las vibraciones se utilizó un equipo conformado por tres sensores de alta resolución, los cuales permiten medir la aceleración para las tres direcciones principales. Estos

sensores se conectan a un sistema de adquisición de datos con una velocidad de barrido comprendida en un rango de frecuencias entre 0.1 y 100 Hz y una aceleración máxima de 0.5 g.

El sistema está conformado también por tres amplificadores y filtros correspondientes a los tres sensores anteriores que permiten establecer amplificaciones de 10, 100 o 1000 y filtros por encima de los 450 Hz y de los 100 Hz. Dicho sistema transmite la información a un computador portátil para ser analizada y procesada posteriormente. La Figura 4.28 presenta fotografías de los diferentes componentes del equipo.



Figura 4.28 Equipo para registro de microtrepidaciones

Las mediciones se realizaron con un filtro de frecuencias de 100 Hz con el fin de detectar todo el contenido frecuencial de interés para las vibraciones ambientales. Los rangos de amplificación seleccionados son variables dependiendo de la amplitud máxima en cada sector, desde 100 volt/g hasta 1000 volt/g para mayores distancias.

Las mediciones se realizaron a diferentes horas del día, la mayoría de los cuales se tomaron entre las 4 de la tarde y la 1 de la mañana, tratando de evitar la ocurrencia de ruido cercano al sensor, por ejemplo debido al paso de un vehículo. En cada punto de medición se tomaron en promedio tres registros de 60 segundos de duración, con velocidades de muestreo de 200 muestras por segundo (200 Hz). De estos registros se seleccionaron sectores más representativos con lo cual se pudieron establecer los períodos predominantes de vibración en cada sector de los municipios.

4.5.5.4 Resultados

La 4.29 presenta un registro típico para el sitio Parque del Azucar en Palmira. Se presenta un sector de las vibraciones seleccionado de bajo ruido y se dan las señales en dirección horizontal y en dirección vertical. La figura muestra así mismo los espectros de amplitudes de Fourier resultantes para cada una de las señales registradas.

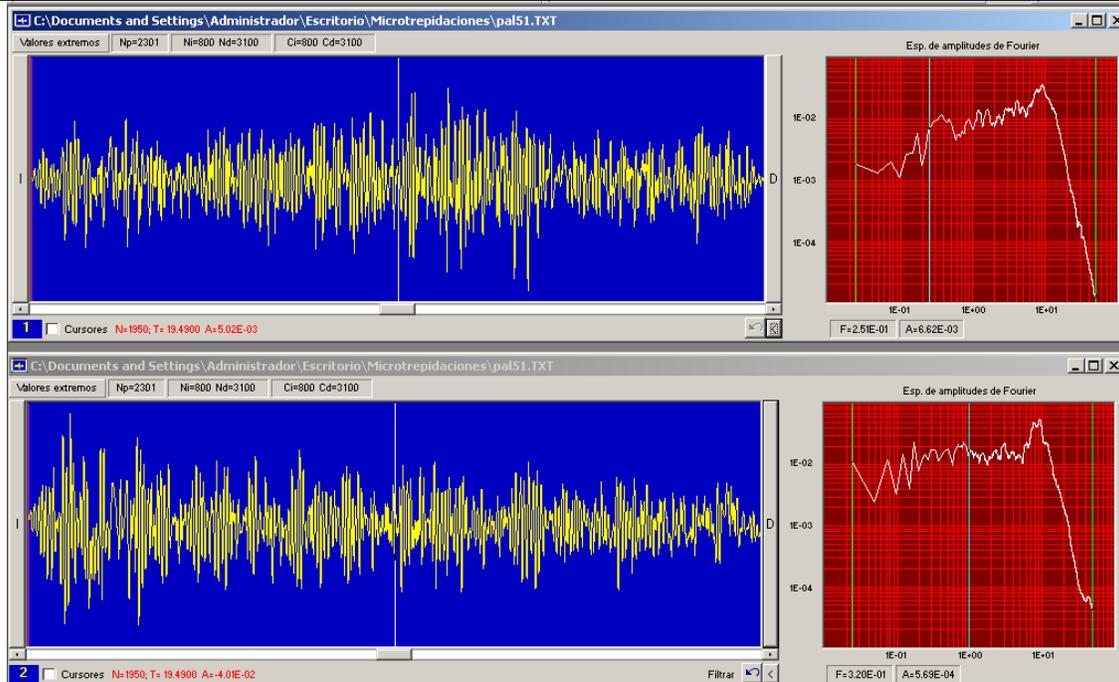


Figura 4.29 Registro de microtrepidaciones en el Parque del Azúcar

Con base en los espectros de Fourier obtenidos se calcula la función de amplificación correspondiente mediante la división del espectro de Fourier en superficie en dirección horizontal y el espectro de Fourier de la componente vertical en superficie. La Figura 4.30 presenta el resultado de la aplicación del método de Nakamura a los anteriores registros, la cual debe incluir información importante sobre la función de transferencia de la componente horizontal de las ondas de cortante.

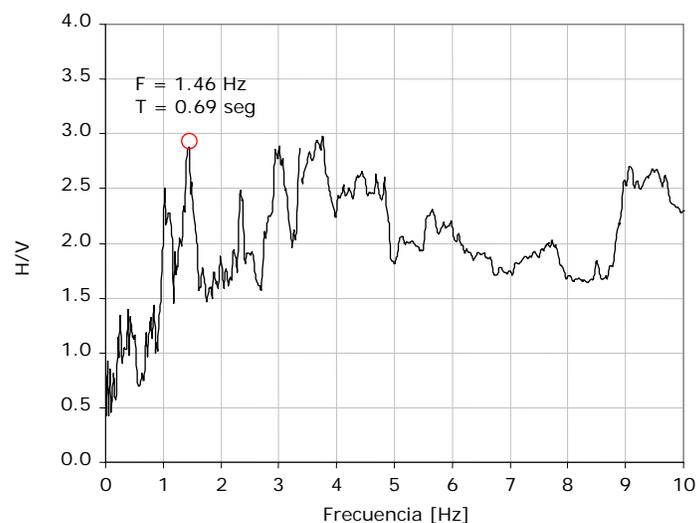


Figura 4.30 Función de Transferencia Parque del Azúcar a partir de microtrepidaciones

Se realizaron mediciones en el perímetro urbano de los diferentes municipios. En las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se resumen las mediciones seleccionadas, indicando la ubicación, un valor medio de la amplitud máxima, y la frecuencia y el período de vibración dominantes identificados.

Tabla 4.11 Registros de microtrepidaciones – Municipio de Palmira

Número	Nombre/Dirección	Frecuencia [Hz]	Periodo [seg]
1	Universidad del Valles	0.88	1.14
2	SENA	0.68	1.46
3	Parque Azúcar	0.78	1.28
4	Factoría	0.78	1.28
5	Amor	0.68	1.46
6	Calle 31 Kra 13	0.68	1.46
7	Calle 42 Kra 9	0.78	1.28
8	Calle 32 Kra 23	0.78	1.28
9	Calle 31 Kra 1e	1.17	0.85
10	Calle 32 Kra 1e	1.07	0.93
11	Calle 30 Kra 29	0.78	1.28
12	Ferrocarril	0.78	1.28
13	Calle 17 Kra 28	0.78	1.28
14	Estadio	0.68	1.46
15	Canchas	0.68	1.46
16	Calle 31a Kra 1a	1.17	0.85
17	Calle 31 Kra 2a	0.78	1.28
18	Calle 32a Kra 29	0.68	1.46
19	Calle 32 Kra 31 a	0.78	1.28
20	Calle 32 Kra 33	0.78	1.28
21	Calle 37 Kra 34	0.78	1.28
22	Calle 42 Kra 13	0.78	1.28
23	Calle 42 Kra 18	0.68	1.46
24	Calle 42 Kra 28	0.68	1.46

Tabla 4.12 Registros de microtrepidaciones – Municipio de Tuluá

Número	Nombre/Dirección	Frecuencia (Hz)	Periodo (seg)
1	Matadero	2.63	0.38
2	Cerro del Picacho (roca)	20.00	0.05
3	Urbanización al Sur Oriente de Tuluá	20.00	0.05
4	Cll 21 - Cra 25	2.63	0.38
5	Barrio Nuevo Príncipe	3.03	0.33
6	IDEMA	1.79	0.56
7	Parque Sajonia	2.50	0.40
8	Cra 20 - Cll 23	1.79	0.56
9	Cra 20 - Cll 23	1.52	0.66
10	Vereda Cienegueta	18.18	0.06
11	Puesto de Salud Santa Cruz	12.50	0.08
12	Barrio Independencia Cra 9 -	1.28	0.78

	CII 6		
13	Barrio Nuevo Farfán	1.45	0.69
14	CII 15 Cra 12	1.69	0.59
16	Barrio la Ceiba	1.59	0.63
17	Parcelación al norte de Tuluá	2.38	0.42
18	Barrio Céspedes	1.41	0.71
19	Escuela Mercantil Carrera 20 calle 13	1.26	0.79
20	Subestación	1.31	0.76
21	Calle 41 carrera 33	1.71	0.58
22	Calle 43 carrera 30	1.44	0.69
23	Parque Calle 40 Carrera 24	1.36	0.74
24	Terminal de transporte	1.85	0.54
25	Calle 23 carrera 6	1.20	0.83
26	Calle 41 carrera 33	1.71	0.58
27	Calle 3B carrera 22	1.76	0.57

Tabla 4.13 Registros de microtrepidaciones – Municipio de Buga

Número	Nombre/Dirección	Frecuencia (Hz)	Periodo (seg)
1	ITA	2.05	0.49
2	Parque Calle 20 Cra 18	1.71	0.58
3	U. Antonio Nariño	1.44	0.69
4	Parque Cra 18 calle 2	2.42	0.41
5	Carrera 11 calle 1	1.88	0.53
6	Parque Calle 12 carrera 2	2.20	0.45
7	Parque Carrera 17 calle 9	1.88	0.53
8	Parque Carrera 9 calle 13	1.93	0.52
9	Parque Calle 9 Carrera 8	2.18	0.46
10	Parque calle 22 carrera13	1.86	0.54
11	Calle 30 carrera 15	2.29	0.44
12	CVC	6.78	0.15
13	Almacafe	4.38	0.23
14	Finca San Antonio	1.92	0.52
15	Calle 3A carrera 22A	1.99	0.50
16	Parador de Buga	1.99	0.50
17	Calle 11 sur carrera 14	2.15	0.47
18	Calle 10 sur carrera 7	1.99	0.50
19	Calle 2 sur Carrera 12	1.99	0.50

Finalmente se presentan los mapas de isoperíodos dominantes estimado a partir de los resultados de las mediciones realizadas. Las Figuras 4.31, 4.32 y 4.33 presentan los mapas finales propuestos de isoperíodos a partir de microtrepidaciones para los municipios de Palmira, Tuluá y Buga, respectivamente.

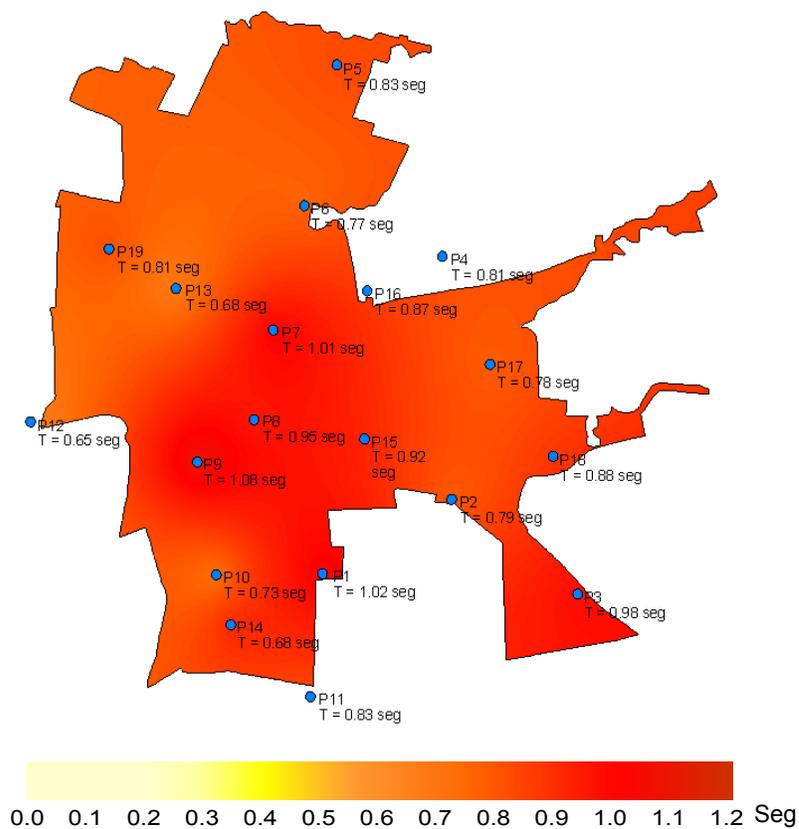


Figura 4.31 Mapa de isoperíodos dominantes de vibración en Palmira

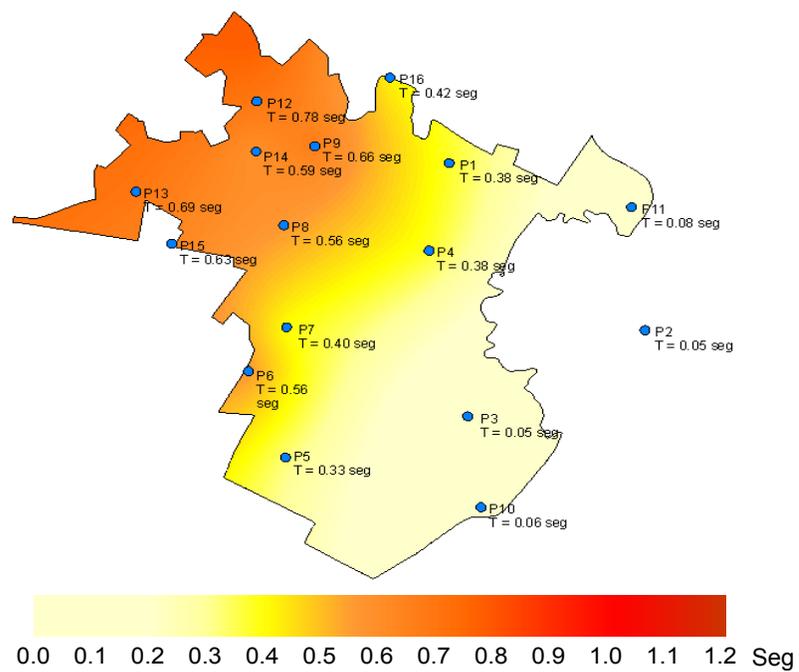


Figura 4.32 Mapa de isoperíodos dominantes de vibración en Tuluá

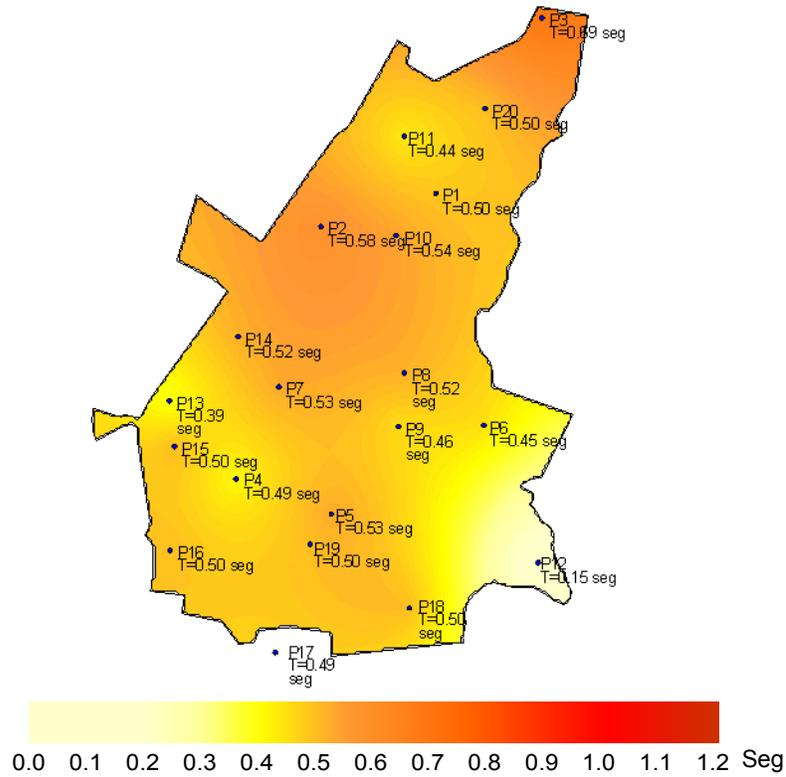


Figura 4.33 Mapa de isoperíodos dominantes de vibración en Buga

4.6 INVESTIGACIÓN DE LABORATORIO

4.6.1 Generalidades

Con las muestras alteradas e inalteradas recuperadas en las perforaciones ejecutadas, se adelantó un programa de ensayos de laboratorio el cual incluyó tanto ensayos rutinarios como especiales. Los ensayos especiales hacen referencia básicamente a los ensayos de laboratorio realizados para determinar el comportamiento dinámico del suelo. La Tabla 4.14 presenta un resumen de los ensayos de laboratorio realizados, indicando la norma ASTM [5.3] utilizada para su realización.

Tabla 4.14 Ensayos de laboratorio y normas de procedimiento

No.	Ensayo	Norma
1	Humedad Natural	D2216-92
2	Límites de Atterberg	D4318-95 ^a
3	Compresión Simple	D2166-91
4	Consolidación Unidimensional	D2435-96
5	Triaxial Cíclico	D5311-92
6	Columna Resonante	D4015-92
7	Bender Element	---
8	Gravedad Específica	D854-92
9	Granulometría	D854-92

Por su parte las Tablas 4.15, 4.16 y 4.17 presentan el número y el tipo de ensayos realizados para cada una de las perforaciones en cada uno de los municipios. Todos los resultados de los ensayos individuales realizados se presentan en el Anexo 4.3

Tabla 4.15 Ensayos realizados en perforaciones de Palmira

PERFORACIÓN	ENSAYOS DE LABORATORIO								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Estadio Rivera	3	2	3	1	-	-	-	-	3
Batallón Codazzi	1	1	1	1	-	-	-	-	1
Sena Palmira	3	3	1	-	-	-	-	-	3
Universidad Nacional del Valle	17	15	9	2	1	1	1	8	20
Centro Palmira	8	8	4	-	1	-	-	-	7
Instituto Raffo Rivera	14	15	1	-	-	-	-	2	15
Parque Los Mangos	11	9	6	1	1	1	1	4	9
Parque del Azúcar	25	25	5		1	1	1	4	25
Finca San Pablo	7	7	2	1	1	1	1	7	9
TOTALES	89	85	32	6	5	4	4	25	92

Tabla 4.16 Ensayos realizados en perforaciones de Tuluá

PERFORACIÓN	ENSAYOS DE LABORATORIO								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aeropuerto Regional Farfan	48	46	10	14	1	1	1	14	48
Matadero	11	18	7	4	1	1	1	4	11
Hospital de Tuluá	9	10	2	-	-	-	-	-	9
Universidad Central del Valle	6	12	6	-	-	-	-	-	6
Estadio 12 de Octubre	9	22	6	-	-	-	-	-	9
Instituto Uribe Uribe	27	55	26	4	1	1	1	4	27
Polideportivo	11	9	6	1	1	1	1		
TOTALES	110	163	57	18	4	4	4	22	110

Tabla 4.17 Ensayos realizados en perforaciones Buga

PERFORACIÓN	ENSAYOS DE LABORATORIO								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Instituto Técnico Agrícola	18	18	3		1	1	1	2	16
Federación Nacional de Cafeteros	14	14	2	2	2	2	2	2	14
Escuela Teodoro Valenzuela	4	4	2						10
Colegio Absalon Fernandez	2	2							5
CVC Piscicultura	14	14	2			1	1	1	12
Instituto Los Andes (exp sur)	5	5	2						12
U Antonio Nariño (exp norte)	14	13	1		1	1	1	1	14
TOTALES	69	68	12	2	4	5	5	6	83

La información obtenida de los ensayos de laboratorio conforma la base de datos geotécnica desarrollada en el presente proyecto. Para cada una de las perforaciones se grafican las columnas estratigráficas conjuntamente con los resultados más importantes obtenidos tanto de los ensayos de campo como de laboratorio.

Las columnas estratigráficas interpretadas, correspondientes a todas las perforaciones ejecutadas durante el presente proyecto incluyen los espesores de los estratos encontrados, el tipo de suelo que conforma estos estratos –de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos USCS– y la posición del nivel freático en cada una de estas perforaciones. En columnas paralelas se grafican, en función de la profundidad, los resultados

de ensayos de humedad natural, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, índice de liquidez, peso unitario del suelo, penetración estándar, velocidad de onda de cortante y resistencia a la compresión simple cuando hay datos disponibles. En las mismas figuras se indican las profundidades a las cuales se realizan ensayos especiales tales como triaxiales cíclicos, columnas resonantes, velocidad de onda en el laboratorio o presiómetro cíclico. Las columnas estratigráficas se incluyen al final del capítulo en el Anexo 4.3.

4.6.2 Resultados de ensayos rutinarios de laboratorio

En este numeral se describe la metodología utilizada en los diferentes ensayos de laboratorio realizados sobre muestras alteradas e inalteradas recuperadas y transportadas hasta los laboratorios del CIMOC de la Universidad de los Andes de Bogotá. Se presentan también los resultados básicos de los ensayos y la interpretación preliminar con base en la cual se establecen las columnas estratigráficas definitivas en cada una de las perforaciones.

4.6.2.1 Propiedades índices

Las propiedades índices incluyen los límites de Atterberg, al igual que la humedad natural y parámetros como el índice de plasticidad y el índice de liquidez.

Los límites de Atterberg se determinaron mediante los procedimientos rutinarios de laboratorio (norma ASTM D4318) [5.3] con los suelos previamente secados al aire.

Los resultados de límite líquido, límite plástico, humedad natural, índice de plasticidad e índice de liquidez se grafican de manera agrupada para cada uno de los municipios. Las Figuras 4.34, 4.34 y 4.35 resumen los resultados para cada uno de los municipios. Cada figura presenta los diferentes parámetros variando con la profundidad. Se indican para cada profundidad los valores medios y los valores con más y menos una desviación estándar. A pesar que las graficas se presentan sin discontinuidades con la profundidad debe considerarse que éstas se refieren únicamente a la fracción de suelos finos cohesivos que se presentan de manera errática y variable en los depósitos.

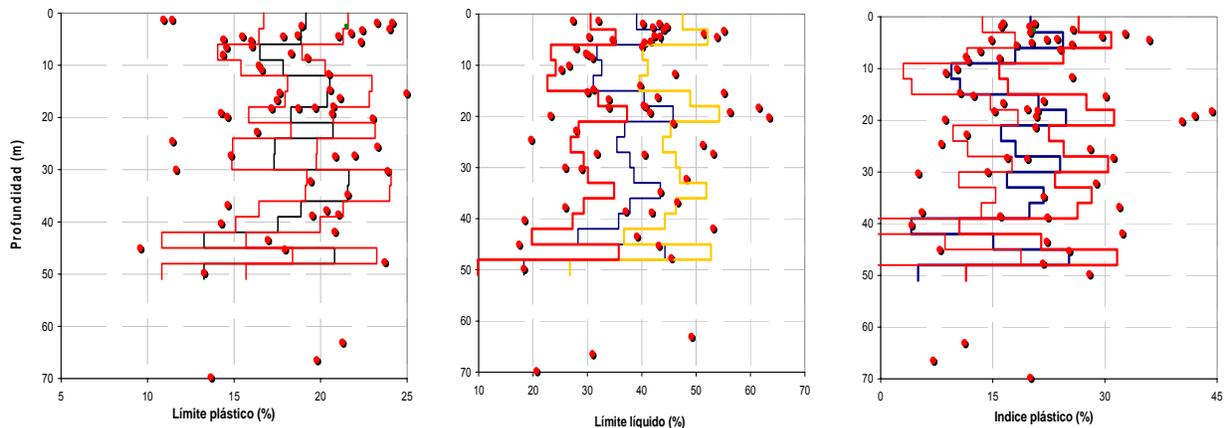


Figura 4.34 Resumen de propiedades índices para el municipio de Palmira

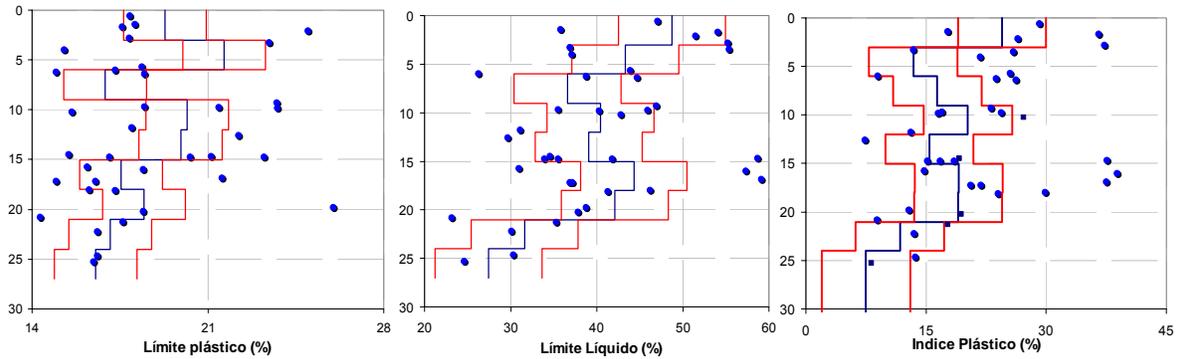


Figura 4.35 Resumen de propiedades índices para el municipio de Tuluá

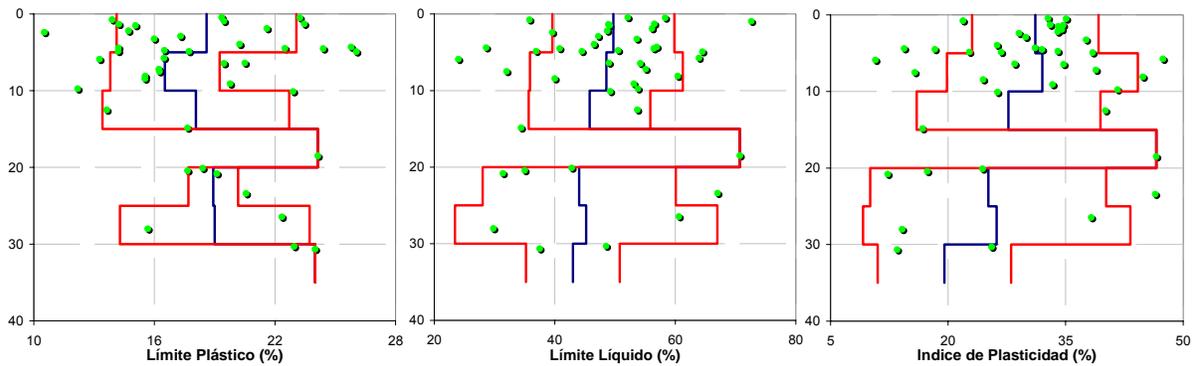


Figura 4.36 Resumen de propiedades índices para el municipio de Buga

Los resultados obtenidos para cada uno de los municipios permiten establecer las siguientes consideraciones con respecto a las propiedades índices de los fracciones de suelos finos de la estratificación en cada municipio:

4.6.2.2 Municipio de Palmira

El depósito de materiales limo arcillosos encontrados en la superficie del subsuelo de Palmira y hasta 5 metros de profundidad en promedio, mostró un valor de límite líquido de 40 % en promedio. Debajo de este estrato, en las capas de material fino intercaladas dentro del depósito mostraron un valor fluctuante del límite líquido entre 28 y 45 %. Los índices de plasticidad alcanzaron en la mayoría de los ensayos valores entre 10 y 25% hasta profundidades de 60 m, con un leve aumento hacia los 20 m de profundidad.

Los límites de Atterberg se ubican por encima de la línea A de la Carta de Plasticidad de Casagrande, con lo cual la mayoría de los suelos clasifican como CL o CH (ver Figura 4.37).

La correlación entre el índice de plasticidad de los suelos y el límite líquido arroja la siguiente relación:

$$IP = 0.67 * (w_L - 9.36)$$

De los anteriores resultados se puede concluir que la fracción fina del depósito está conformada principalmente por suelos arcillo-limosos y arenosos de plasticidad variable entre baja y alta.

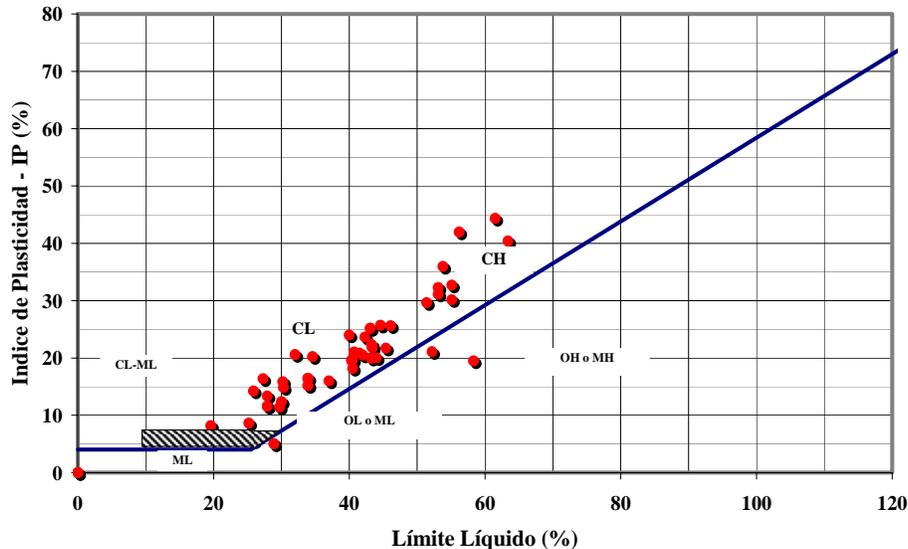


Figura 4.37 Carta de Plasticidad de suelos finos - Municipio de Palmira

4.6.2.3 Municipio de Tuluá

En el subsuelo de Tuluá la presencia de materiales finos es más escasa que en Palmira, sin embargo se encuentra una capa superficial de suelo, que presenta valor promedio de límite líquido de 30%. Posterior a esta capa se encuentra un material granular con un bajo contenido de finos que presentaron un límite líquido entre 15 y 30%. Los índices de plasticidad alcanzaron en la mayoría de los ensayos valores entre 10 y 40% disminuyendo notoriamente con la profundidad.

Los límites de Atterberg se ubican en general por encima de la línea A de la Carta de Plasticidad de Casagrande, con lo cual la mayoría de los suelos clasifican como CL o CH (ver Figura 4.38). La correlación entre el índice de plasticidad de los suelos y el límite líquido arroja la siguiente relación:

$$IP = 0.6 * (w_L - 3.81)$$

De los anteriores resultados se puede concluir que la fracción fina del depósito está conformada principalmente por suelos arcillo-limosos de plasticidad variable entre baja y media.

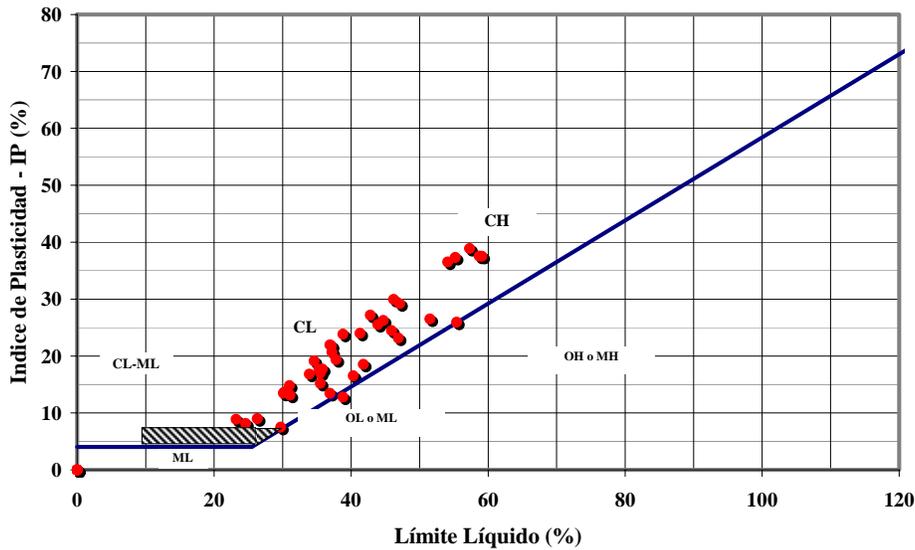


Figura 4.38 Carta de Plasticidad de suelos finos - Municipio de Tuluá

4.6.2.4 Municipio de Buga

El depósito de materiales arcillosos encontrados en la superficie del subsuelo de Palmira y hasta 10 metros de profundidad en promedio, mostró un valor promedio de límite líquido de 50 %. Debajo de este estrato, en las capas de material fino intercaladas dentro del depósito mostraron un valor fluctuante del límite líquido entre 45 y 50 %. Los índices de plasticidad alcanzaron en la mayoría un promedio de 35% hasta profundidades de 40 m, con una leve disminución hacia los 30 m de profundidad.

Igual que en los municipios de Tuluá y Palmira los límites de Atterberg se ubican por encima de la línea A de la Carta de Plasticidad de Casagrande, con lo cual la mayoría de los suelos clasifican como CL o CH (ver Figura 4.39).

La correlación entre el índice de plasticidad de los suelos y el límite líquido arroja la siguiente relación:

$$IP = 0.85 * (w_L - 13.15)$$

De los anteriores resultados se puede concluir que la fracción fina del depósito está conformada principalmente por suelos arcillo-limosos y arenosos de plasticidad variable entre media y alta.

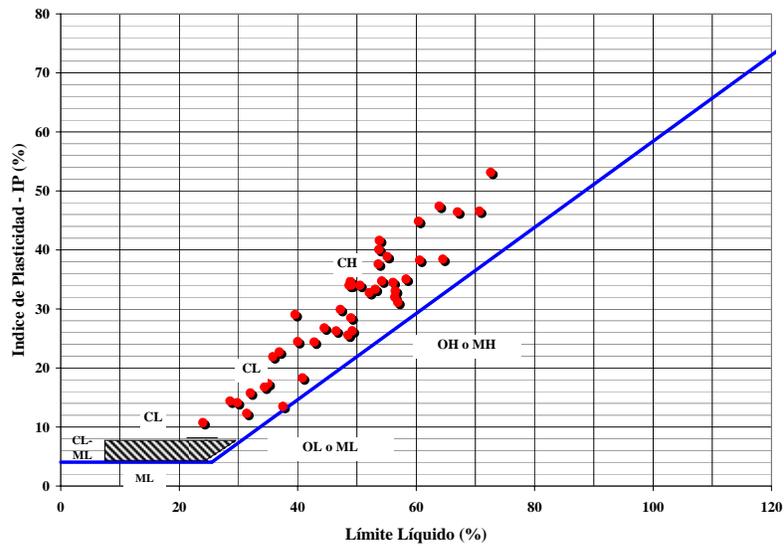


Figura 4.39 Carta de Plasticidad de suelos finos - Municipio de Buga

4.6.2.5 Peso Específico

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

El peso específico de los sólidos de los minerales arcillosos oscila alrededor de 2.7. Para los suelos estudiados esta característica física oscila alrededor de 1.7. En las Figuras 4.40, 4.41, 4.42 se presentan los resultados de la medida del peso específico para todos los suelos estudiados en cada uno de los municipios, con lo cual se observa que la mayoría de resultados se encuentran en el rango comprendido entre 1.8 y 2.5.

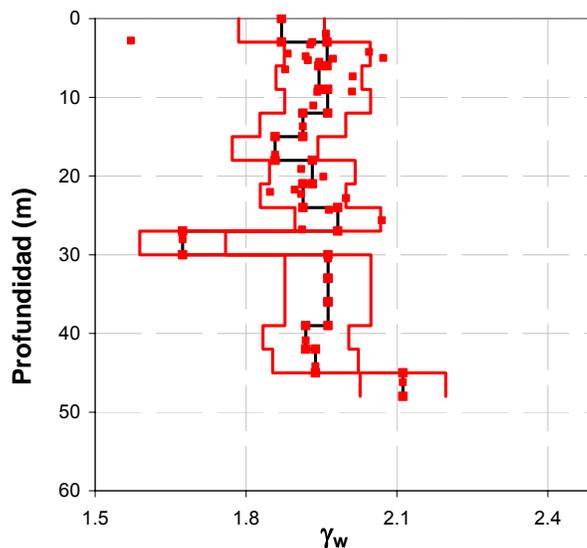


Figura 4.40 Histograma peso específico de los suelos de Palmira

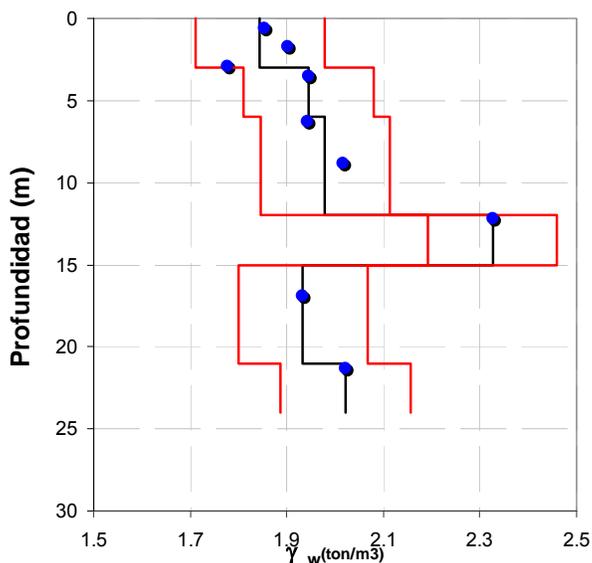


Figura 4.41 Histograma peso específico de los suelos de Tuluá

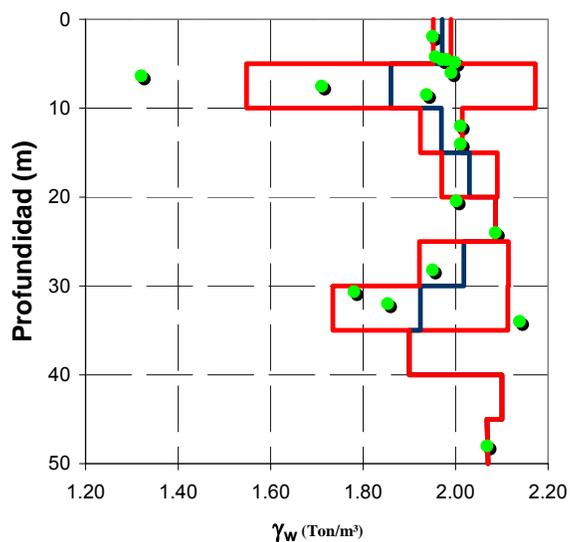


Figura 4.42 Histograma peso específico de los suelos de Buga

En las Figuras 4.43, 4.44 y 4.45 se presentan los valores promedio más y menos una desviación estándar de la humedad natural con la profundidad.

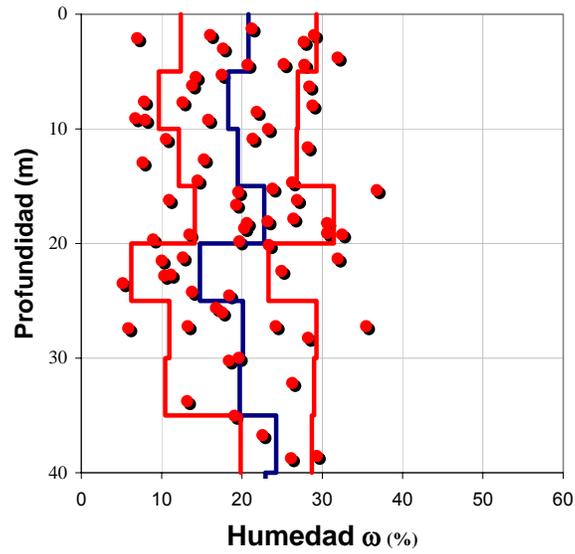


Figura 4.43 Humedad – Municipio de Palmira

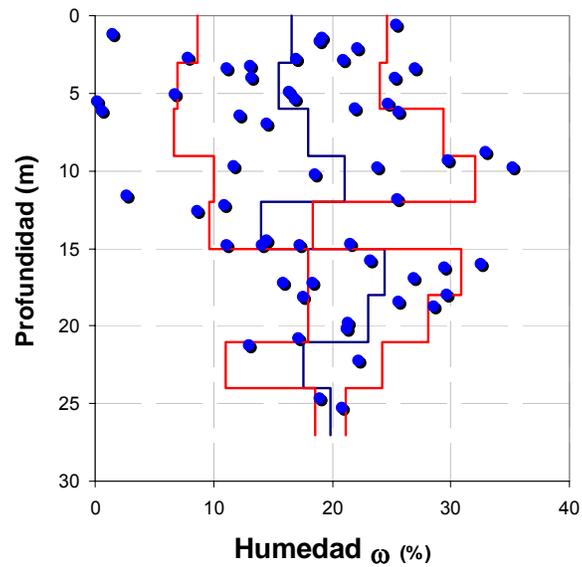


Figura 4.44 Humedad – Municipio de Tuluá

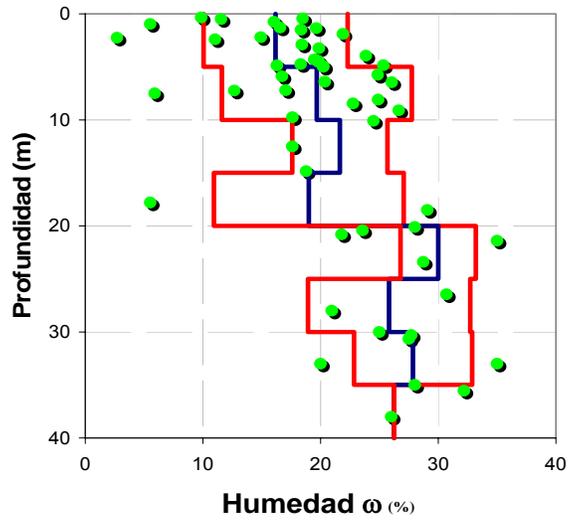


Figura 4.45 Humedad – Municipio de Buga

Como puede verse de las figuras anteriores, la humedad natural de los suelos de la zona de estudio presenta una dispersión importante, con valores que varían generalmente entre el 5 y el 35%.

4.7 ENSAYOS DINÁMICOS

4.7.1 Generalidades

Además de los ensayos de caracterización estáticos presentados en el numeral anterior la caracterización geotécnica realizada en el presente proyecto lo siguiente:

(a) Determinar los parámetros de comportamiento geomecánico de los suelos en las zonas de estudio con el fin de proporcionar los datos necesarios para la modelación ante eventos sísmicos.

(b) Definir un modelo del comportamiento dinámico de los suelos de la zona que permita considerar las variables relevantes en la determinación de parámetros dinámicos como son el módulo de corte dinámico y el coeficiente de amortiguamiento para todo el rango de deformaciones unitarias de corte.

Es importante anotar que el subsuelo del Valle del Cauca presenta una gran heterogeneidad de depósitos de origen aluvial con suelos de alta complejidad desde el punto de vista de la investigación en laboratorio. En efecto, estos suelos presentan altas variaciones en sus propiedades físicas y mecánicas en unos pocos centímetros debido a las características mismas de su formación. Además presenta grandes dificultades tanto para el muestreo como para el montaje de muestras para la realización de los ensayos.

El problema de medir las características del comportamiento dinámico de los suelos es uno de los aspectos fundamentales de la dinámica de suelos que demuestra toda su utilidad en los trabajos de microzonificación sísmica de ciudades. Cabe anotar que los modelos sofisticados de cálculo numérico no son de ninguna utilidad si los parámetros que intervienen en ellos son incorrectos o no se ajustan al comportamiento real de los suelos.

Al igual que en las otras ramas de la mecánica de suelos clásica, en el caso de la dinámica de suelos se han desarrollado paralelamente metodologías de estudio en laboratorio sobre muestras inalteradas y metodologías de estudio in situ. En ningún caso estas metodologías son excluyentes; por el contrario ellas son fuertemente complementarias y la una no debería utilizarse sin la otra. Las ventajas y desventajas de cada una de estas metodologías son bien conocidas y deben analizarse con rigor para decidir sobre el dominio de validez de cada una de ellas.

En el estudio del comportamiento del suelo sometido a cargas cíclicas se puede distinguir el comportamiento del suelo a la ruptura y antes de la ruptura. No todos los ensayos permiten llevar el suelo a la ruptura; actualmente solo se puede aplicar grandes deformaciones mediante algunos ensayos de laboratorio. Los ensayos de campo normalmente permiten caracterizar el comportamiento del suelo en los rangos de pequeñas deformaciones aunque ensayos como el presiómetro cíclico sirve para rangos altos de deformaciones.

En el presente estudio se combinaron los dos tipos de técnicas: ensayos de laboratorio como triaxiales cíclicos, ensayos con elementos piezoeléctricos para encontrar la velocidad de la onda de cortante en el laboratorio y ensayos de columna resonante, combinados con ensayos in situ tales como el ensayo down hole y el presiómetro cíclico.

Para estudiar el comportamiento de los suelos principalmente en lo referente a la curva de degradación del módulo de cortante en función de la deformación angular, se realizaron diferentes tipos de ensayos sobre los suelos finos predominantes en las estratigrafías de los municipios estudiados. El número y tipo de ensayos realizados se resume en las Tablas 4.15, 4.16 y 4.17 para cada uno de los municipios. A continuación se resumen las metodologías utilizadas en la realización de cada uno de los ensayos y los resultados encontrados. Los resultados de todos los ensayos realizados se incluyen en el Anexo 4.3

4.7.2 Ensayo triaxial cíclico

La técnica del ensayo triaxial cíclico fue desarrollada por Seed & Lee [5.5] y es actualmente una de las técnicas de laboratorio más desarrolladas, en particular para el estudio de las características de los suelos sometidos a cargas cíclicas y para estudiar sus características de deformabilidad. El aparato no difiere en gran medida del aparato triaxial estático; sin embargo es necesario realizar algunas adaptaciones para aumentar la precisión de las medidas, en particular a bajas deformaciones. Algunas de estas adaptaciones son: necesidad de colocar el sensor de fuerza al interior de la cámara para evitar los problemas de fricción entre el pistón y la cámara; necesidad de realizar las medidas de deformación directamente sobre la muestra en el tercio central con el fin de evitar las deformaciones parásitas en el pistón de carga y en el cabezal de la muestra; aplicación de cargas dinámicas, entre otras. Estas adaptaciones presentan con frecuencia problemas tecnológicos difíciles de resolver. No obstante, el aparato triaxial cíclico conserva toda su versatilidad y todas las ventajas que se deben esperar de un aparato de laboratorio: buena definición de los esfuerzos, posibilidad de saturación de las muestras, posibilidad de consolidación isotrópica o anisotrópica, medida de la presión intersticial, etc.

La metodología tradicional para la realización de este ensayo consiste en consolidar la muestra isotrópicamente; enseguida se cierra la válvula de drenaje y se aplica una deformación o un desviador $\sigma_d / 2$ disminuyendo simultáneamente la presión de confinamiento en un valor equivalente al incremento de esfuerzo axial. Esto asegura que el esfuerzo normal a un plano, inclinado 45 grados con respecto al eje de la muestra, permanezca constante y el esfuerzo cortante varíe entre $+\sigma_d/2$ y $-\sigma_d/2$. De esta forma se asegura que el estado de esfuerzos en este plano es similar al que se produce durante un sismo en un plano horizontal de un estrato de suelo. Puesto que el control de la presión de confinamiento es una tarea delicada, el ensayo usualmente se realiza con confinamiento constante. Si la muestra está saturada y el ensayo se realiza sin drenaje (volumen constante), esta técnica conduce a resultados similares a los que se obtienen variando la presión de confinamiento (Seed y Lee [5.5]).

Los ensayos triaxiales se realizan aplicando una sollicitación cíclica a alguna variable predeterminada (fuerza, deformación, esfuerzo). El ensayo se puede realizar entonces con fuerza controlada, deformación controlada o esfuerzo controlado.

En el caso de ensayos destinados a la medida de las características de deformabilidad, las pruebas se realizan con deformación controlada. El módulo E se obtiene como la relación entre el esfuerzo y la deformación axial ϵ . Con base en estos resultados se obtiene el módulo de cortante G (módulo secante) y la deformación de cortante γ correspondiente:

$$G = \frac{E}{[2(1 + \nu)]} \quad (7)$$

$$\gamma = \varepsilon(1 + \nu) \quad (8)$$

En la práctica, la muestra está saturada y la relación de poisson ν es igual a 0.5.

El porcentaje de amortiguamiento con respecto al crítico se puede obtener a partir del desfase entre el esfuerzo y la deformación o calculando el área de la curva bajo el ciclo de histéresis.

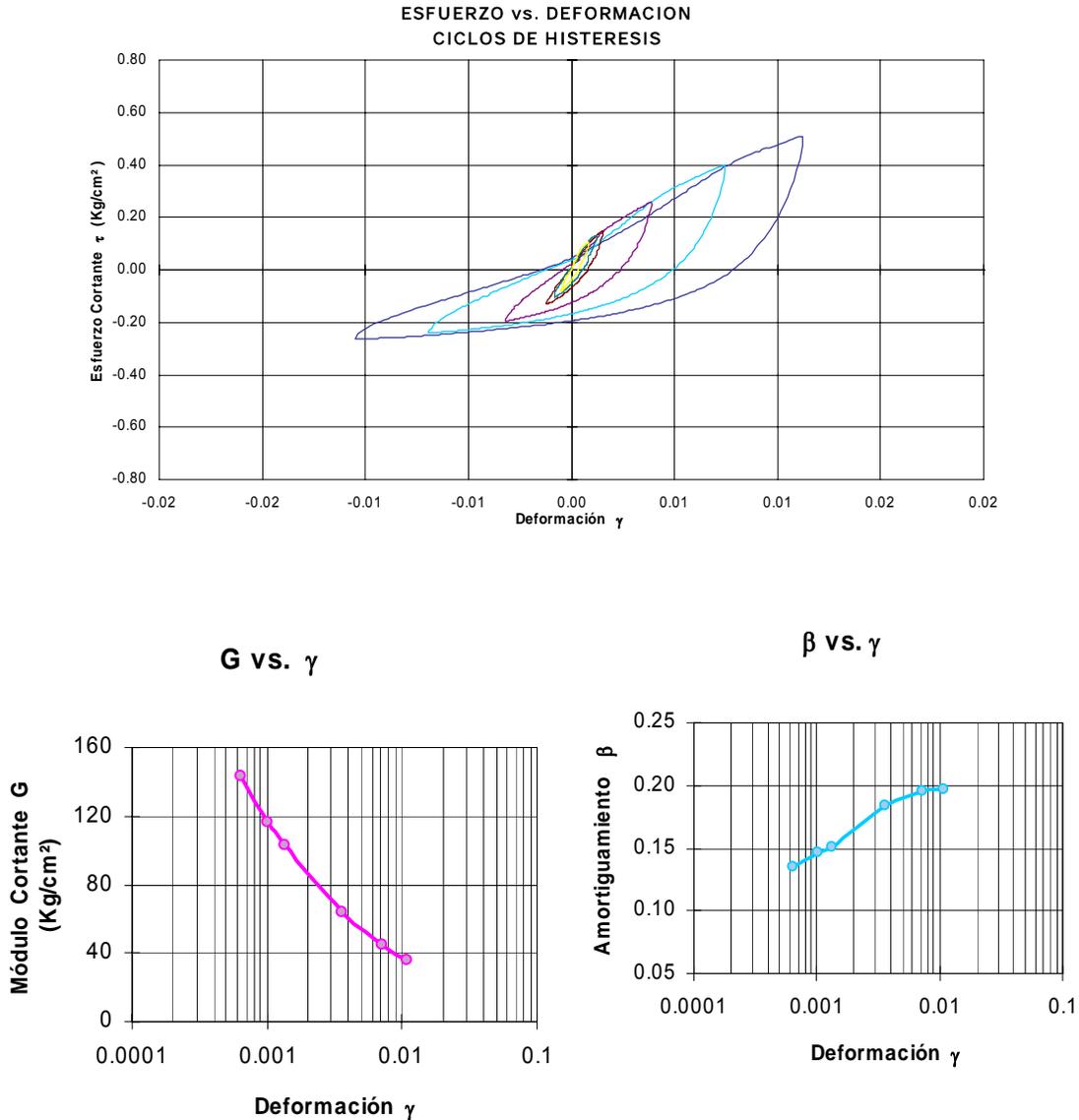
Puesto que la amplificación local durante un sismo depende de la curva de degradación del módulo de cortante en función de la deformación angular, los ensayos triaxiales cíclicos para el estudio del comportamiento de los suelos en los municipios del Valle del Cauca se realizaron con deformación controlada. Como primera medida se aplicó a la muestra un esfuerzo de confinamiento σ_3 isotrópico correspondiente a la profundidad de la muestra; enseguida se realizaron 13 ciclos de deformaciones angulares desde 10^{-3} hasta 0.015 manteniendo el drenaje cerrado. El equipo utilizado para este ensayo consta de 4 sensores eléctricos que toman en tiempo real los datos de deformación, esfuerzo y presión de poros en el transcurso del ensayo.

En la Figura 4.46 se presenta el montaje típico del ensayo triaxial cíclico. En la fotografía se aprecia la cámara en la cual se coloca la muestra para su confinamiento, al igual que toda la instrumentación requerida para el control y toma de datos automático durante el ensayo. Toda la información recuperada durante el ensayo se transmite al computador para su posterior procesamiento.



Figura 4.46 Montaje típico del ensayo triaxial cíclico

En la Figura 4.47 se presentan los resultados típicos de un ensayo triaxial cíclico. Los resultados del ensayo incluyen una curva con los ciclos de histéresis de esfuerzo cortante τ contra deformación angular γ , la curva de degradación del módulo cortante G contra la deformación angular γ y la curva de amortiguamiento contra deformación angular γ .



Nota : Resultados del ensayo triaxial cíclico del Sondeo No.4 a una profundidad de 6.45 m en el municipio de Palmira

Figura 4.47 Resultados Típicos del ensayo Triaxial cíclico

4.7.3 Ensayo de Columna Resonante

El principio de este ensayo consiste en aplicar una vibración forzada a una muestra de suelo y ajustar la frecuencia de excitación hasta llegar a la resonancia de la muestra. La vibración aplicada puede ser longitudinal, transversal o de torsión. Las vibraciones transversales se aplican generalmente con la ayuda de mesas vibratorias y las vibraciones longitudinales o de torsión mediante aparatos de columna resonante.

En los aparatos de columna resonante la sollicitación se aplica por medio de bobinas eléctricas colocadas en un campo de imanes permanentes. La frecuencia de la corriente eléctrica alterna se ajusta de tal manera que la muestra de suelo llegue a la frecuencia de resonancia (1 modo). La suspensión brusca de la excitación permite un retorno al equilibrio en vibración libre, lo cual posibilita la medición del amortiguamiento del suelo. El conocimiento de la frecuencia de resonancia de la muestra y del modo asociado (generalmente el primero) permite calcular el módulo de cortante del suelo.

El ensayo de columna resonante presenta las mismas ventajas que el triaxial cíclico: control del drenaje, medida de la presión intersticial, posibilidad de aplicar una amplia gama de esfuerzos estáticos, etc. Este ensayo permite medir las características de los suelos para amplitudes de deformación comprendidas entre aproximadamente 10^{-6} y 10^{-5} cuando se trata de ensayos de torsión y menores deformaciones en el caso de ensayos en compresión.

En la Figura 4.47 se presenta el montaje típico del ensayo de columna resonante. En la fotografía se aprecia la cámara en la cual se coloca la muestra para su confinamiento, al igual que las bobinas eléctricas que generan la excitación. Por otra lado están las unidades de control y excitación de las muestras al igual que la unidad de adquisición de datos que permitirá la transmisión de los mismos al computador para su posterior procesamiento.



Figura 4.48 Montaje del ensayo de columna resonante

En la Figura 4.49 se muestra un ejemplo de los resultados que se obtienen en el ensayo de columna resonante. Los principales parámetros que se miden durante el ensayo son: amplitud de la vibración en función de la frecuencia para diferentes energías de excitación de las bobinas y curva de decaimiento de la vibración una vez se interrumpe la excitación. Cada energía de excitación corresponde a un nivel de deformación, de esta forma al encontrar la frecuencia de resonancia para cada excitación se obtiene el módulo de cortante G para un nivel de deformación dado. Del mismo modo al interrumpir la excitación se puede calcular el amortiguamiento a partir de la curva de decaimiento de la vibración para cada nivel de deformación.

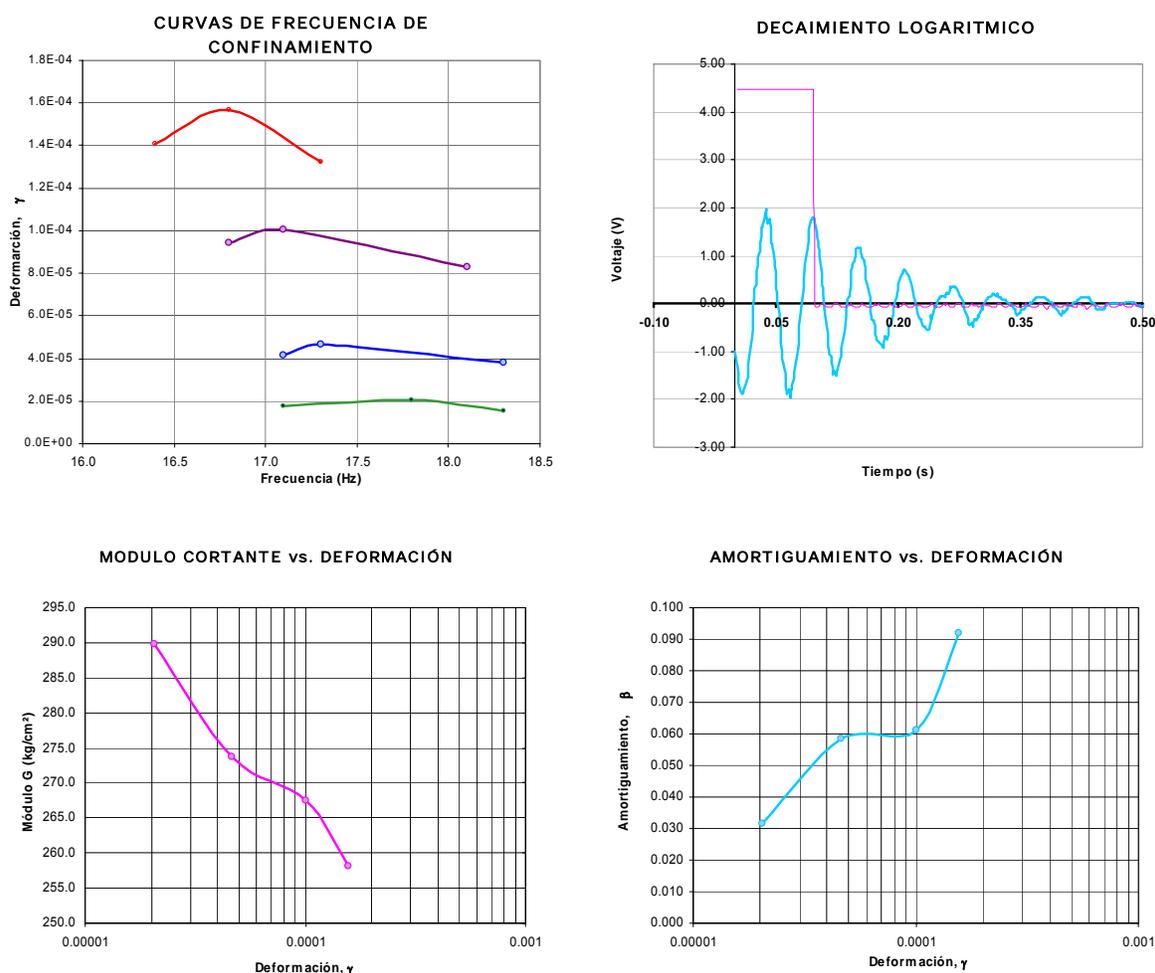


Figura 4.49 Resultados típicos del ensayo de columna resonante

4.7.4 Ensayo de velocidad de onda en laboratorio (Bender Element)

La medida de la velocidad de onda de cortante en laboratorio es posible utilizando una metodología similar a la desarrollada por el Instituto Geotécnico Noruego. En este ensayo se coloca un excitador y un receptor piezoeléctricos en los extremos de la muestra; el excitador y el receptor se colocan de tal manera que deformen en flexión una pequeña lámina que se encuentra empotrada en la muestra. La deformación de las láminas asegura que la onda que se aplica al suelo es una onda de cortante. De esta forma es posible determinar la velocidad de la

onda de manera directa, midiendo el tiempo transcurrido entre el disparo y la recepción de la onda de cortante, conociendo la longitud de la muestra.

En la fotografía que se muestra en la Figura 4.50 se presenta el montaje típico para adelantar el ensayo de velocidad de onda de cortante en el laboratorio.

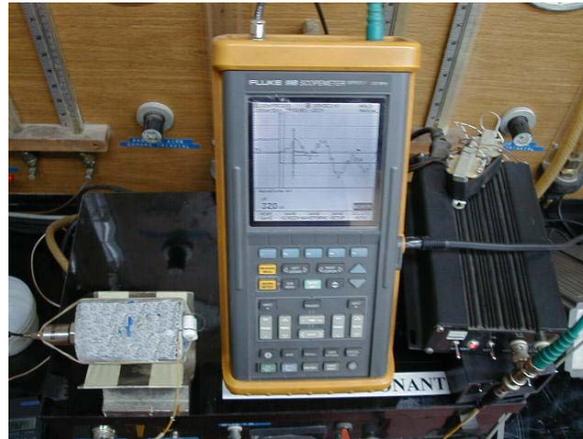


Figura 4.50 Montaje típico para el ensayo de velocidad de onda de corte en laboratorio

La Figura 4.51 presenta los resultados de un ensayo típico de velocidad de onda en laboratorio en una de las muestras del proyecto.

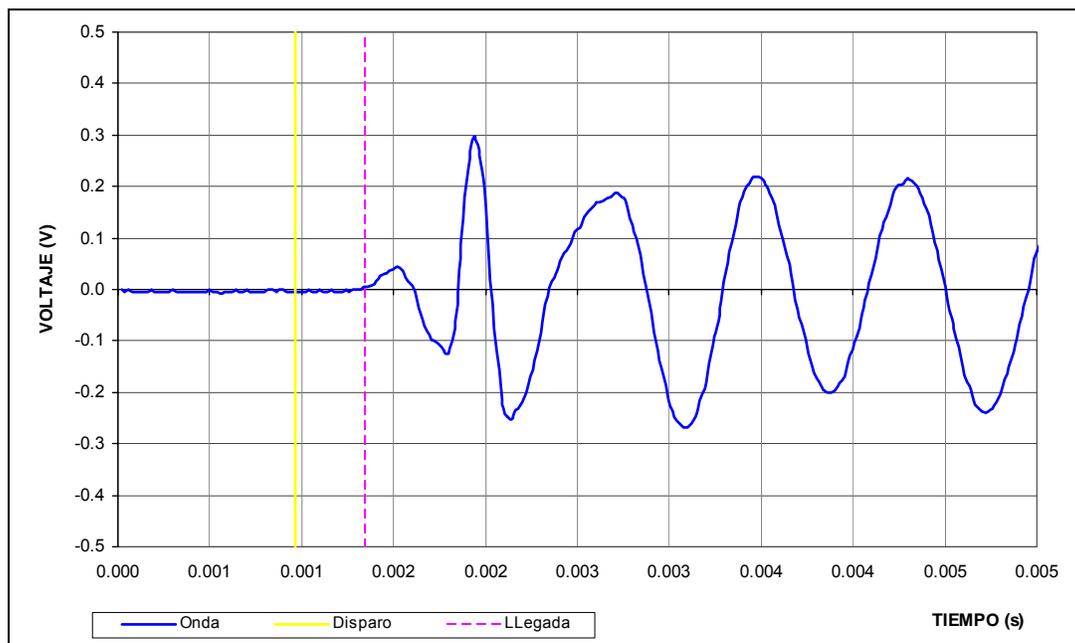


Figura 4.51 Resultados típicos del ensayo de velocidad de onda en laboratorio

4.7.5 Caracterización de los parámetros dinámicos de suelos típicos

La caracterización de los parámetros dinámicos de los suelos típicos de la zona de estudio en cada uno de los municipios exige, al menos, lo siguiente:

- Caracterización del módulo dinámico de cortante máximo lo cual se puede calcular a partir de la velocidad de onda de cortante y la densidad del estrato, o a partir de las mediciones directas de módulo en los diferentes ensayos realizados, para el rango de pequeñas deformaciones.
- Caracterización de la curva de degradación de rigidez con la deformación de cortante.
- Caracterización de la curva de capacidad de amortiguamiento con la deformación de cortante.

Con base en la caracterización que se presenta en los siguientes numerales y tomando la estratigrafía definida en cada sector se pueden entonces estimar los parámetros que resultan más adecuados para el análisis dinámico de cada zona.

4.7.5.1 Módulo Cortante Máximo, $G_{máx}$

Para el presente caso el valor del módulo cortante máximo, $G_{máx}$, se determina a partir de las mediciones de velocidad de onda para bajas deformaciones. Se cuentan con resultados de los ensayos de Down Hole y de velocidad de onda de cortante en el laboratorio.

Para la determinación de los módulos cortantes máximos, $G_{máx}$, en cada uno de los sondeos se utiliza la velocidad de onda de cortante obtenida a partir del ensayo Down Hole. En este caso se utilizan la ecuación de la teoría de la elasticidad para medios continuos:

$$G_{\max} = \rho V_s^2 \quad (9)$$

En la cual ρ es el peso unitario del suelo húmedo y V_s es la velocidad de onda de corte.

Esta ecuación puede aplicarse naturalmente en los sondeos hasta la profundidad en la que se realizó la exploración con el ensayo Down Hole. Para profundidades mayores se pueden utilizar ecuaciones para estimar el valor de $G_{máx}$ a partir de relaciones más generales que tengan en cuenta el efecto de la profundidad y más específicamente de la presión de confinamiento del suelo. Una de las expresiones más utilizadas para suelos con características similares a los estudiados (conglomerados o suelos con una presencia importante de arenas ó gravas, como los que se encontraron en la ciudades de Palmira, Tuluá y Palmira para las máximas profundidades estudiadas mediante el desarrollo de sondeos) es la expresión propuesta por Seed et. al., según la cual:

$$G_{\max} = K_2 (\sigma'_m)^{0.5} \quad (10)$$

En donde :

σ'_m : Esfuerzo promedio efectivo
 K_2 : Factor que depende de la densidad relativa del material

Con base en esta estimación en profundidad se puede entonces tener estimativos de la velocidad de onda de corte en las capas más profundas. La ecuación a utilizar en este caso se deduce de la ecuación:

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (11)$$

Por otro lado para cada uno de los ensayos dinámicos realizados se determina una velocidad de onda de cortante con base en el ensayo de laboratorio. Estos valores se combinan de acuerdo con lo que se explica en el siguiente numeral para determinar las curvas de degradación del módulo cortante con la deformación unitaria de corte.

4.7.5.2 Degradación del módulo de Cortante y variación del amortiguamiento

Usualmente la curva de variación del módulo de cortante en función de la deformación angular se representa en forma normalizada con respecto al $G_{m\acute{a}x}$. Según lo reportado en la literatura, para muchos suelos la forma de la curva de degradación del módulo con la deformación de cortante γ , representado en la curva $G/G_{m\acute{a}x}$ contra γ , depende del índice de plasticidad. Sin embargo para los suelos estudiados, este tipo de relación no es evidente principalmente debido a que este índice no presenta una variación muy significativa a pesar que se encuentran suelos similares a grandes profundidades (200 a 400 m o más). De acuerdo con esto deben seleccionarse parámetros de sensibilidad diferentes a los comúnmente utilizados en este tipo de modelos.

El procedimiento para graficar la curva completa de degradación del módulo de rigidez normalizado contra deformación de cortante es el siguiente:

- Con base en los resultados de los ensayos de laboratorio practicados sobre muestras inalteradas de suelo - ensayos triaxiales cíclicos (norma ASTM D5311-92), se grafican los valores resultantes de módulo de rigidez al corte G y amortiguamiento β para las altas deformaciones de corte γ normalmente medidos en este ensayo.
- Simultáneamente a lo anterior se grafican en la misma curva los resultados equivalentes para el ensayo de columna resonante (norma ASTM D4015-92), los cuales proporcionan la concavidad de las curvas G vs γ y β vs γ ; este ensayo proporciona información generalmente en un rango intermedio de deformaciones unitarias de corte.
- Finalmente se utiliza el ensayos de velocidad de onda de corte de laboratorio (norma ASTM D2845-95) para definir el valor de módulo de rigidez máximo al corte $G_{m\acute{a}x}$.
- Una vez se consolidan todos los resultados en una misma curva se obtiene una correlación general entre todos los puntos y se normaliza el eje vertical con respecto a $G_{m\acute{a}x}$. De esta manera se obtienen las curvas de $G/G_{m\acute{a}x}$ contra γ .

En las Figuras 4.52 y 4.53 se resumen los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados. La Figura 4.52 corresponde a las curvas de degradación del módulo mientras que la Figura 4.53 corresponde al amortiguamiento en función de la deformación de cortante. Se han graficado los puntos y no las correlaciones para efectos de ver tanto las tendencias generales al igual que la variabilidad en el comportamiento.

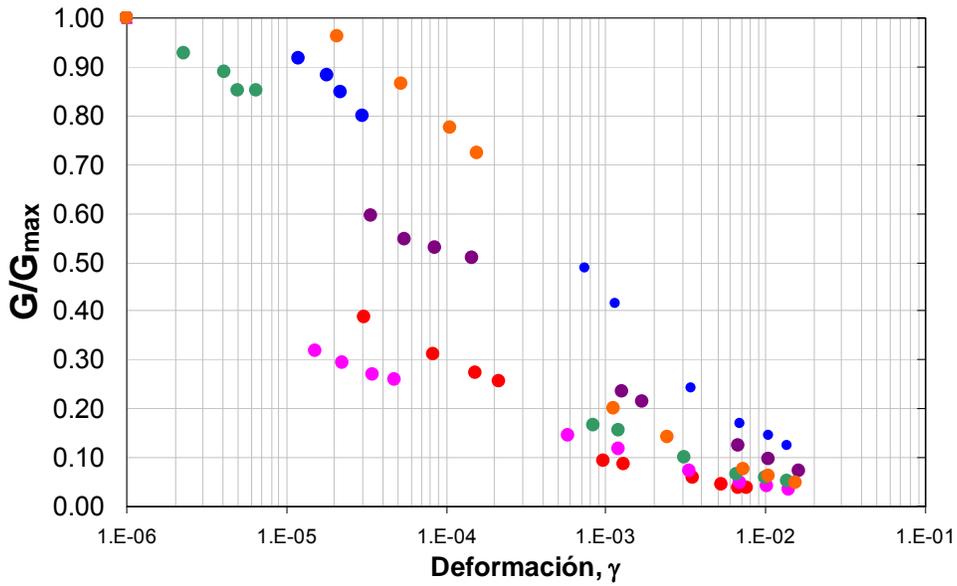


Figura 4.52 Curvas de degradación del módulo cortante normalizado con la deformación de cortante

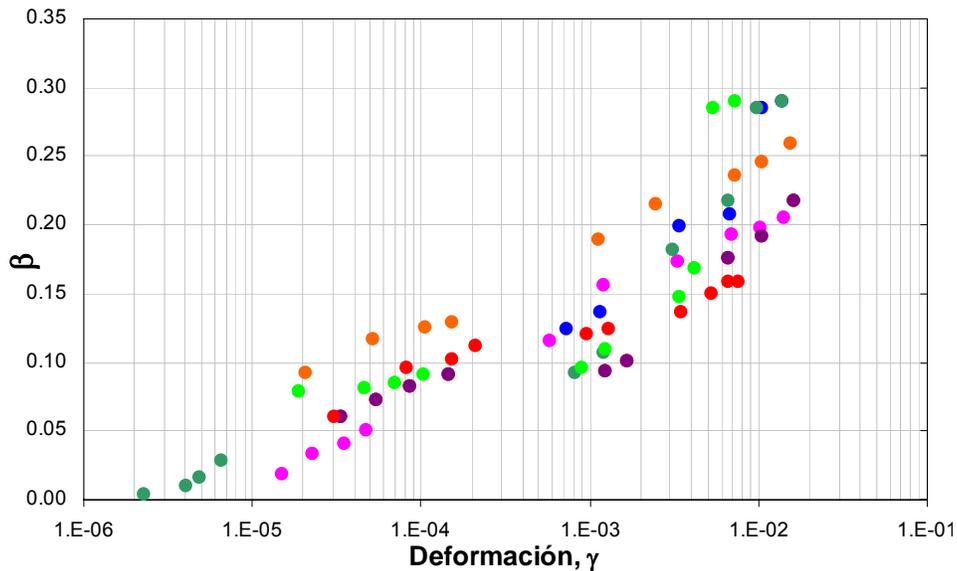


Figura 4.53 Curvas de de variación del amortiguamiento con la deformación de cortante

4.7.5.3 Modelo de degradación del módulo de cortante y variación del amortiguamiento

Para representar el modelo no lineal de los suelos se propone el uso de un modelo hiperbólico, el cual está representado por la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{G_{mo}}{\tau_{mo}} \gamma \right)^s} = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (12)$$

En la cual τ es el esfuerzo cortante, γ es la deformación unitaria de corte, G_{mo} es el módulo de corte inicial, τ_{mo} es el esfuerzo cortante a una deformación aproximada de 1% y $\gamma_r = \tau_{mo}/G_{max}$ es la deformación de corte de referencia la cual es un valor constante para cada material y β y s son dos parámetros que sirven para ajustar la forma de la curva para ajustarla a resultados de ensayos disponibles (Para las curvas de degradación de rigidez se utilizan las constante propuestas por Hashash & Park, 1.4 y 0.8 correspondientemente).

En la Figura 4.53 se presenta la curva esqueleto típica de acuerdo con este modelo y las variables principales.

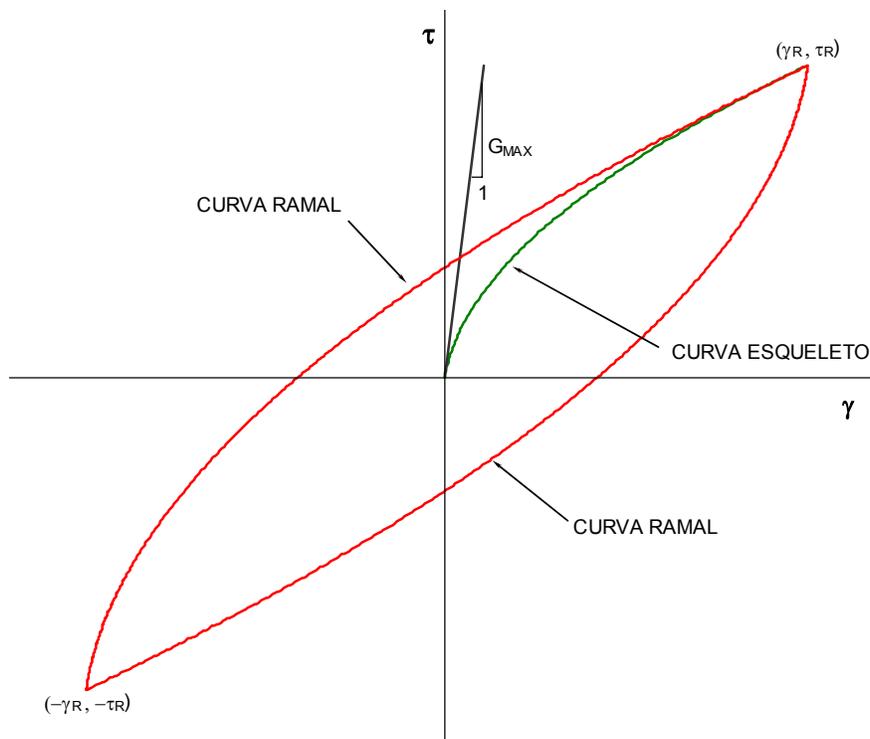


Figura 4.54 Modelo hiperbólico no lineal modificado para análisis de respuesta dinámica

De acuerdo con la referencia [Hashash & Park, 2001], a pesar de que γ_r se considera una constante del material, se puede plantear una nueva formulación que permita capturar la influencia de la presión de confinamiento en la degradación del módulo y en el coeficiente de amortiguamiento de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\gamma_r = a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_{ref}} \right)^b \quad (13)$$

En la cual los parámetros a y b son para ajustar la forma de las curvas y σ_{ref} es una presión de referencia de 0.18 MPa.

Utilizando las ecuaciones anteriores se han graficado las curvas de degradación del módulo de corte y del coeficiente de amortiguamiento para diferentes valores esfuerzo efectivo que representaría el comportamiento esperado del suelo a grandes profundidades. En particular se han graficado curvas para los rangos de presiones en que se realizaron ensayos de laboratorio y las mismas se acompañan con los puntos correspondientes de dichos ensayos con el mismo color de cada curva. Para los valores superiores de esfuerzos de efectivos de confinamiento no se tienen disponibles resultados de ensayos de laboratorio. Se realizan cambios en las curvas de amortiguamiento para presiones de confinamiento bajas (< 300 kPa) para asegurar una mejor concordancia entre los resultados de los ensayos de laboratorio y las curvas correspondientes.

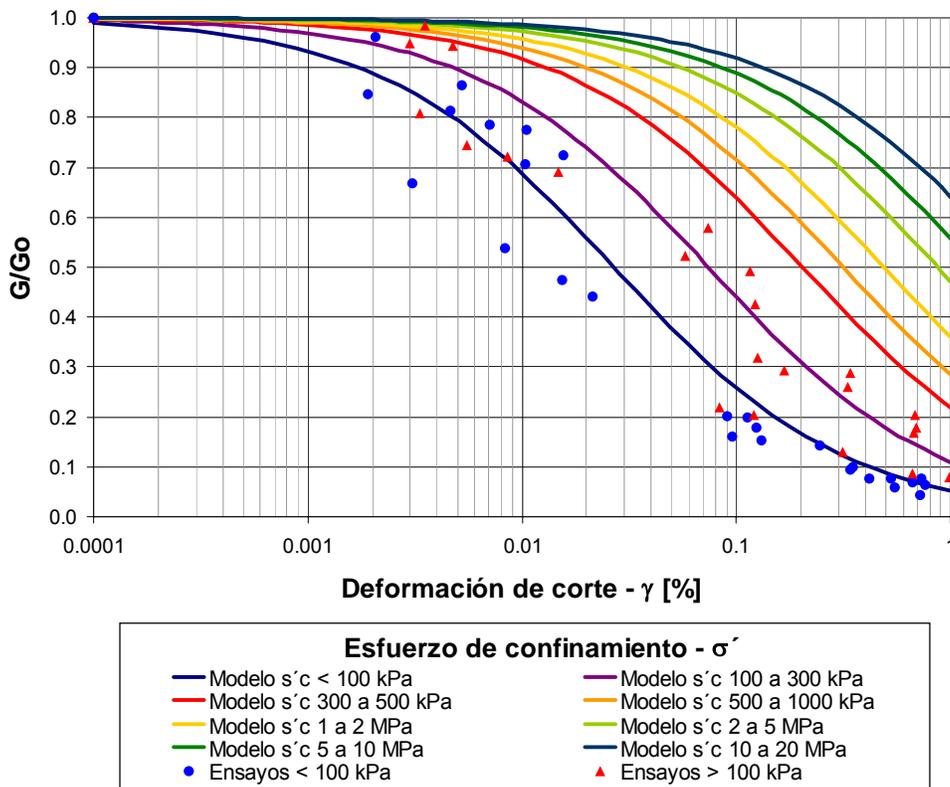


Figura 4.55 Modelo de degradación de la rigidez con la deformación de cortante

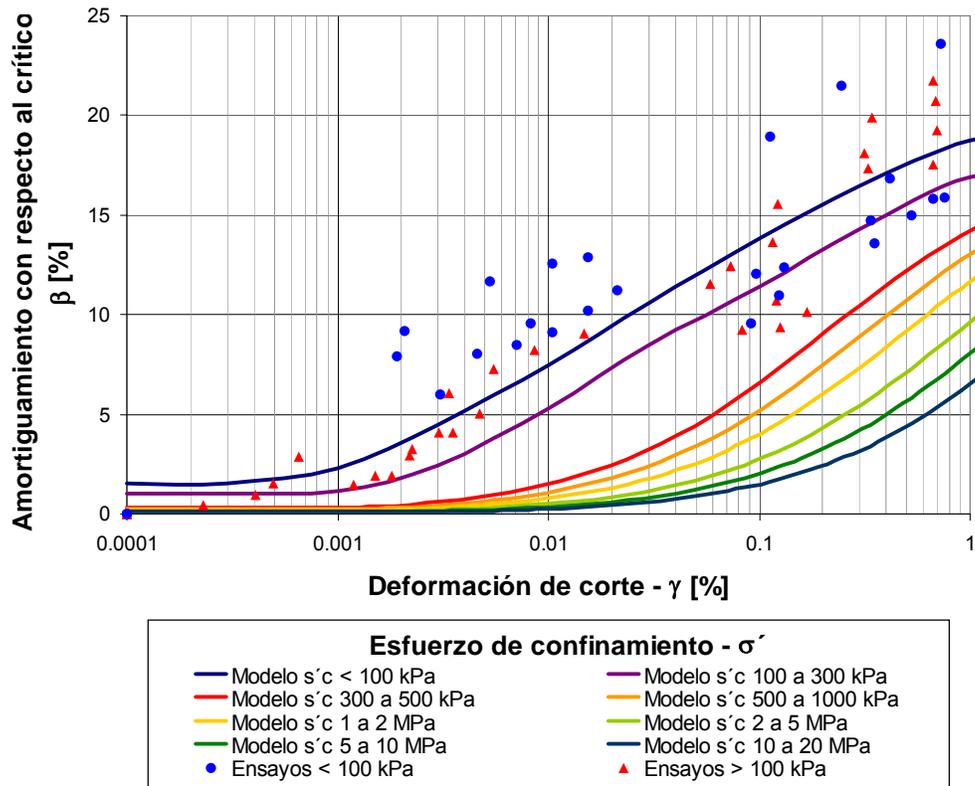


Figura 4.56 Modelo de degradación del amortiguamiento con la deformación de cortante

Este modelo de comportamiento que resume la degradación de la rigidez del suelo y la variación del coeficiente de amortiguamiento con la deformación unitaria de cortante se implementa en el capítulo siguiente para adelantar la modelación de la respuesta dinámica de los suelos en los diferentes sondeos realizados.

4.8 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA COMPORTAMIENTO SÍSMICO

Con base en toda la información disponible se pueden establecer unos criterios claros de zonificación desde el punto de vista geotécnico pero orientada a establecer el mapa de microzonificación sísmica. A continuación se presentan los criterios utilizados para establecer comportamientos característicos diferentes para los tres municipios en estudio.

4.8.1 Criterios generales de zonificación

Con el fin de establecer las características generales de comportamiento sísmico de un sector determinado dentro de cada uno de los municipios en estudio, o simplemente para mejorar la calidad de la delimitación de la conformación de zonas de comportamiento sísmico similar, se proponen tres criterios alternativos los cuales dependen del tipo y calidad de información disponible.

4.8.1.1 Zonificación con base en período de vibración a partir de microtrepidaciones

El método de microtrepidaciones como se explicó anteriormente conforma una excelente herramienta de bajo costo para la determinación de zonificaciones preliminares, específicamente para identificar diferencias globales en el comportamiento sísmico esperado de sectores de la zona de estudio. Los mapas generales de isoperíodos a partir de microtrepidaciones que se presentan en las Figuras 4.30, 4.31 y 4.32 para cada uno de los municipios conforman la base principal para la microzonificación de las área de estudio.

4.8.1.2 Zonificación con base en período de vibración aproximado

Para efectos de cálculos aproximados se propone la evaluación del período de vibración predominante a partir de la siguiente fórmula de cálculo:

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad (14)$$

En la cual H es el espesor promedio de suelos blandos superficiales y V_s es la velocidad de onda de cortante promedio en este depósito superficial.

4.8.1.3 Zonificación con base en el contenido de material arcilloso en el depósito

Otro criterio que puede utilizarse para verificación de la zonificación propuesta, se puede obtener a partir de las columnas estratigráficas de pozos de agua subterránea (proporcionados por la CVC) o en general de cualquier tipo de perforación existente en la cual se cuente al menos con información estratigráfica en profundidad. Para el caso de la zona de estudio se evidencian en general terrenos constituidos por capas alternadas y repetitivas de arcillas, arenas y gravas.

En cada pozo se puede entonces calcular la longitud total de capas de arcilla con respecto a la longitud del pozo, expresando el resultado en porcentaje, de la siguiente manera, se debe tener una profundidad de exploración de al menos 30m.

$$\% \text{Arcilla} = \frac{\sum e_{ci}}{L_p} \times 100 \quad (15)$$

En la cual:

$$L_p = \sum e_{ci} \pm \sum e_{si} \pm \sum e_{gi} \quad (16)$$

e_{ci} = Espesor individual capa de arcilla

e_{si} = Espesor individual capa de arena

e_{gi} = Espesor individual capa de grava

Los anteriores criterios de zonificación se aplican al caso de los municipios en estudio.

4.8.2 Zonificación de Palmira

La información relevante disponible para establecer criterios de zonificación en la ciudad de Palmira es la siguiente:

- Mapa geológico
- Mapa de isoperíodos generado a partir de microtrepidaciones
- Datos de velocidad de onda de cortante (ensayos Down Hole)
- Columnas estratigráficas de los pozos profundos de agua subterránea de la CVC, con información a profundidades que varían entre 60 y 180 m.
- Perforaciones realizadas durante el presente estudio de Microzonificación.

El mapa de isoperíodos predominantes de vibración generado a partir de las mediciones de microtrepidaciones por sí mismo representa ya una primera imagen bastante fidedigna de las diferentes zonas del terreno, teniendo en cuenta que los períodos predominantes de vibración dependen de la velocidad de onda de corte y de la profundidad de los estratos blandos superficiales, es decir de las características de masa y rigidez de estos depósitos.

Las tendencias que se observan del mapa de isoperíodos se verifican además con las tendencias en los datos de velocidad de onda y estratigrafía. Para efectos del análisis, la zona urbana del municipio de Palmira se ha subdividido en tres grandes zonas dependiendo del rango de períodos de vibración predominantes, según la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Zonificación de la ciudad de Palmira

Zona	Distribución Geográfica	Período de Vibración Ambiental [seg]
I	Zona Central y Suroriental de la ciudad	0.65 - 0.79
II	Corresponde a la periferia de la gran parte de la ciudad, a excepción de la franja suroccidental	0.79 - 0.93
III	Se presenta en la franja suroccidental y bordea además el resto de la zona central	0.93 - 1.08

Para la zona III, correspondiente a la de mayores períodos de vibración, se obtienen los valores más bajos de velocidad de onda de cortante, entre 256 y 284 m/s, lo cual es consistente ya que el período de vibración varía en relación inversa a la velocidad de onda. Para las zonas I y II correspondientes a las zonas de períodos de vibración más bajos, las velocidades de onda son consistentemente más altas tal como puede comprobarse en los sondeos de cada una de las zonas.

El porcentaje de arcilla se calculó en los pozos de cada una de las tres zonas previamente identificadas (Zonas I, II y III) hasta una profundidad de 210 m, obteniendo los resultados indicados en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Porcentajes de arcilla calculados en las diferentes zonas

Zona	Porcentaje de arcilla
I	13 a 26
II	35 a 49
III	65 a 68

Como tendencia general se aprecia entonces que el período de vibración aumenta a medida que el porcentaje de arcilla aumenta también; esta variación es totalmente lógica dado que el terreno en su conjunto tendrá menor rigidez en la medida en que posea mayores espesores de arcilla dentro del conjunto.

En la Tabla 4.20 se presenta un resumen de los parámetros de zonificación propuestos aplicado a la zona estudiada.

Tabla 4.20 Resumen de parámetros de zonificación- Municipio de Palmira

ZONA	Distribución Geográfica	T _{registrado} (seg)	V _s , superficial (m/s)	T _{calculado} (seg)	Porcentaje de arcilla	Perforaciones Características
I	Centro y Suroriente	0.93 - 1.08	256-284	3.5 - 3.7	65 - 68	Centro Palmira
II	Periferia de la ciudad, a excepción de la franja suroccidental	0.79 - 0.93	306-369	3.2 - 3.4	35 - 49	Finca San pablo Parque Los Mangos Parque del Azúcar Universidad del Valle
III	Franja suroccidental y borde de la zona central	0.65 - 0.79	306-369	3.0 - 3.3	13 - 26	Batallón Codazzi

La franja de períodos de vibración mas bajos (Zona I) puede explicarse por la presencia de un mayor contenido de gravas y arenas, la cual hace que el depósito presente en general una mayor rigidez y por lo tanto un menor período de vibración.

La historia precisa de los cauces presentes en la ciudad no ha sido estudiada en el presente trabajo, el zanjón Mirrinao se observó seco en la época de los estudios y el río Palmira está enmascarado.

No se descarta que antiguamente estos cauces pudieran jugar algún papel en la sedimentación de los depósitos. Su configuración antigua no se conoce dado que hoy en día discurren ya sobre depósitos de llanura de inundación.

De todas formas llama la atención observar que la Zona I está localizada coincidentemente con la posición del río Palmira y del zanjón Mirrinao, en caso de que estos dos cauces hubieran sido más activos en épocas anteriores, pudieron haber depositado en material granular en canales.

Por otro lado, en los ríos trezados es frecuente encontrar una zona amplia de sedimentación adyacente al canal principal [referencia 4.16], la cual se colmata de sedimentos en las épocas de creciente torrencial. Incluso es factible que un río trezado presente un comportamiento meándrico en épocas de invierno [referencia 4.14]. Estas dos formas de comportamiento podrían explicar la mayor acumulación de capas arcillosas (Zona III) que se observa hacia el sur de la franja granular (probable relleno del canal principal). El mayor contenido arcilloso en esta zona está confirmado también por los pozos de la CVC. También es factible que estos materiales arcillosos, algunos de los cuales contienen gravas, provengan de flujos de barro que con frecuencia se presentan en los depósitos de piedemonte.

El resto de la ciudad se localiza en la zona de períodos intermedios (Zona II), correspondiente a depósitos de constitución granular-cohesivo. Los diferentes zanjones y acequias de la ciudad posiblemente sean vestigios de cauces que aportaron estos sedimentos. Igualmente es posible que existan cauces antiguos aún no identificados.

Por último cabe resaltar que hacia el Noroccidente de la ciudad se identifica una capa arcillosa de mayor espesor (sondeos No. 7 y No. 8) que en el resto de la ciudad. Además, a partir de los 50 m de profundidad, se encuentra una capa cohesiva (sondeo 8) de limo y arcilla con un espesor de 20 m, el cual es anómalo dentro del comportamiento general observado de espesores típicos. Esto puede indicar una mayor influencia de la llanura de inundación del río Cauca sobre sedimentación de los depósitos, más concentrada en esta franja de la ciudad debido a su lejanía del piedemonte.

4.8.3 Zonificación de Tuluá

La información relevante disponible para establecer criterios de zonificación en la ciudad de Tuluá es la siguiente:

- Mapa geológico
- Mapa de isoperíodos generado a partir de microtrepidaciones
- Datos de velocidad de onda de cortante (ensayos Down Hole)
- Columnas estratigráficas de los pozos profundos de agua subterránea de la CVC, con información a profundidades que varían entre 60 y 170 m.
- Perforaciones realizadas durante el presente estudio de Microzonificación.

El mapa de isoperíodos predominantes de vibración generado a partir de las mediciones de microtrepidaciones por sí mismo representa, al igual que en el caso de Palmira, una zonificación geotécnica orientada hacia el comportamiento sísmico de los suelos.

En el presente caso se identifica una tendencia general que puede resumirse de la siguiente manera:

- Los períodos de vibración a partir de microtrepidaciones aumentan progresivamente en la dirección de oriente a occidente de manera aproximadamente uniforme en toda el área urbana.
- Los períodos de vibración a partir de microtrepidaciones varían desde valores muy bajos en la zona de los cerros (períodos inferiores a 0.3 seg) hasta valores del orden de 0.78 seg hacia el occidente del municipio.
- Las franjas de igual período de vibración presentan una orientación general con rumbo hacia el noroeste, aproximadamente N 30°W.

Las tendencias que se observan del mapa de isoperíodos se verifican además con las tendencias en los datos de velocidad de onda y estratigrafía, según los criterios explicados anteriormente. Para efectos del análisis, la zona urbana del municipio de Tuluá se ha subdividido en tres grandes zonas dependiendo del rango de períodos de vibración predominantes, según la Tabla 4.21.

Tabla 4.21 Zonificación de la ciudad de Tuluá

Zona	Distribución Geográfica	Período de Vibración Ambiental [seg]
I	Zona oriental hacia el piedemonte	Menos de 0.3 seg
II	Franja intermedia de unos 3 km que se extiende con rumbo aproximado N 30°E por el centro de la ciudad	Entre 0.3 y 0.6 seg
III	Franja occidental de la ciudad	Mayores de 0.6 seg

Para cada una de las zonas identificadas, se analizan los demás criterios propuestos anteriormente para definición de zonas. En la Tabla 4.22 se presenta un resumen de los parámetros de zonificación propuestos aplicado a la zona estudiada.

Tabla 4.22 Resumen de parámetros de zonificación- Municipio de Tuluá.

ZONA	Distribución Geográfica	T _{registrado} (seg)	V _{s,superficial} (m/s)	T _{calculado} (seg)	Porcentaje de arcilla	Perforaciones Características
I	Zona oriental hacia el piedemonte	< 0.3	306-369	0.9 -1.0	13 - 26	Matadero Clínica de Tuluá Universidad Central del Valle
II	Franja intermedia se extiende con rumbo aproximado N 30°E por el centro de la ciudad	0.3 - 0.6	306-369	1.0 - 1.4	35 - 49	Estadio 12 de Octubre Inst. Tomás Uribe
III	Franja occidental de la ciudad	> 0.6	256-284	1.4 - 1.6	65 - 68	Aeropuerto Regional Farfán Polideportivo del Norte

En el extremo oriental de la ciudad, el mapa geológico identifica dos ápices de abanicos aluviales cuya localización corresponde respectivamente a los ríos Tuluá y Morales (incluyendo la quebrada El Ahorcado). Estos dos cauces presentan rumbos predominantes del orden de N40°W y N60°W respectivamente.

Las tendencias que presentan estos abanicos aluviales y que coinciden con tendencias generales observadas son las siguientes:

- El tamaño de partículas de los sedimentos disminuye progresivamente en la dirección de transporte de los mismos. La disminución del tamaño de partículas ocurre en distancias relativamente cortas, con rangos de distancias entre 2 y 10 kilómetros. De esta manera

se puede encontrar material granular grueso (gravas o incluso bloques) en el ápice y a distancias de 2 kilómetros aguas abajo se pueden encontrar lodos y arena fina.

- Los depósitos están constituidos por capas alternantes con ínter estratificaciones de grava y arena o de arena y limo. Las capas presentan en general una leve inclinación hacia aguas abajo.
- Hacia la base del depósito predominan los materiales de tamaño fino como lodos y arena fina.

4.8.4 Zonificación de Buga

La información relevante disponible para establecer criterios de zonificación en la ciudad de Buga es la siguiente:

- Mapa geológico
- Mapa de isoperíodos generado a partir de microtrepidaciones
- Datos de velocidad de onda de cortante (ensayos Down Hole)
- Columnas estratigráficas de los pozos profundos de agua subterránea de la CVC, con información a profundidades que varían entre 60 y 125m.
- Perforaciones realizadas durante el presente estudio de Microzonificación.

La distribución de los periodos de vibración dentro de la ciudad presenta buena concordancia con las características geológicas que ya se han descrito para la ciudad, tal como se explica a continuación:

La mayor parte de la ciudad presenta unos periodos de vibración comprendidos en el rango de 0.44 segundos a 0.58 segundos (excepcionalmente 0.69); este rango coincide bien con la abundancia de capas arcillosas (avalanchas y flujos de lodos) dado que las arcillas que se han encontrado son rígidas, presentando así periodos menores que los de arcillas blandas cuyo periodo es usualmente igual o mayor a 1.0 seg. Además las intercalaciones de grava (paleocauces) también contribuyen a la reducción de los periodos de vibración. La rigidez de las capas de arcilla no tiene aún una explicación geológica confiable, dado que el presente proyecto no incluyó estudios de datación; únicamente conociendo la historia geológica completa se podrían entender los fenómenos que dieron lugar a la rigidización de estas arcillas.

La variación de periodos del centro hacia la periferia seguramente tiene relación con variaciones en el contenido de arcilla cuando se depositaron los flujos de lodos, es interesante observar que la zona central de periodos más altos (0.50 y 0.58) presenta una forma similar a un flujo de lodos.

Ya hacia los bordes sur oriental y sur occidental del perímetro urbano se presentan dos franjas con período de vibración mas bajo.

El borde sur oriental corresponde a los afloramiento de rocas del terciario, con un período de 0.15 seg. El bode sur occidental corresponde a los depósitos granulares identificados en los sondeos No.2 y 4, con periodo de 0.23 seg.

Tabla 4.23 Resumen de parámetros de zonificación- Municipio de Buga.

ZONA	Distribución Geográfica	T _{registrado} (seg)	V _{s,superficial} (m/s)	T _{calculado} (seg)	Porcentaje de arcilla	Perforaciones Características
I	Zona oriental hacia el piedemonte	0.15	288-470	0.4 - 0.5	50 – 59 %	CVC acelerógrafo Acelerógrafo Aguas Buga Zona de Tanques Aguas Buga
II	Zona suroccidental y zona central con excepción de una franja pequeña franja oriental	0.39 - 0.53	140-369	0.8 - 1.0	57 – 69	Escuela Teodoro Valenzuela Liceo Los Andes Colegio Absalon Fernandez Universidad Antonio Nariño
III	Franja oriental y zona central de la ciudad	0.53	140-369	1.0 - 1.4	69 – 72	ITA

4.9 ANALISIS DE LICUACION

La licuación es un proceso que afecta los suelos granulares y saturados ante la ocurrencia de cargas cíclicas, produciendo una gran pérdida de rigidez en los suelos, lo que se traduce en un gran nivel de deformaciones, causando daños no solo a las edificaciones sino también a vías y obras de infraestructura general.

Resulta entonces importante evaluar la resistencia de los suelos de Palmira, Tuluá y Buga a la licuación, para lo cual se usa el procedimiento simplificado adoptado por las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-98).

La licuación no ocurre de manera aleatoria, requiere ciertos ambientes geológicos e hidrológicos, esta ocurre principalmente en depósitos recientes de arena y limo con altos niveles freáticos. Los mas susceptibles están constituidos por los depósitos del Holoceno (con una edad inferior a los 10.000 años) [Coronado, Villafañe 2003]

4.9.1 Procedimiento

Como ya se mencionó se ha usado el procedimiento Simplificado adoptado por el NSR-98, el cual requiere calcular dos variables sísmicas, la primera corresponde a la excitación sísmica de la capa de suelo, en términos de la relación de esfuerzos cíclicos τ_{pro}/σ_{vo} y la segunda a la capacidad de la capa de suelo para resistir la licuación en términos de la relación de la resistencia cíclica, mediante la ecuación 17 recomendada por Seed e Idriss (1971) [normas NSR-98 ecuación H.5-14]

$$\frac{\tau_{pro}}{\sigma_{vo}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_{vo}} r_d \quad (17)$$

Donde a_{max} corresponde a la aceleración máxima que se espera en el lugar según las leyes de atenuación y para el caso del presente análisis se trabajo con un a_{max} de 0.20 g, g es la aceleración de la gravedad, σ_{vo} es el esfuerzo vertical total y σ'_{vo} es el esfuerzo vertical efectivo; y r_d es el factor de reducción de esfuerzos que depende de la profundidad y del perfil de suelo.

Se ha calculado la resistencia a la licuación de los suelos con los perfiles de todas las perforaciones realizadas en cada uno de los municipios cuyos resultados se presentan en el Anexo 4.4

En el municipio de Palmira registra niveles freáticos por encima de los 5.0 m, pero aún así la posibilidad de licuación es remota dada la compactación de los materiales y al contenido de suelos cohesivos intercalados entre las arenas con grava que conforman el subsuelo de Palmira. La Figura 4.57 ilustra los esfuerzos actuantes máximos estimados y las resistencias para un sondeo representativo de la ciudad

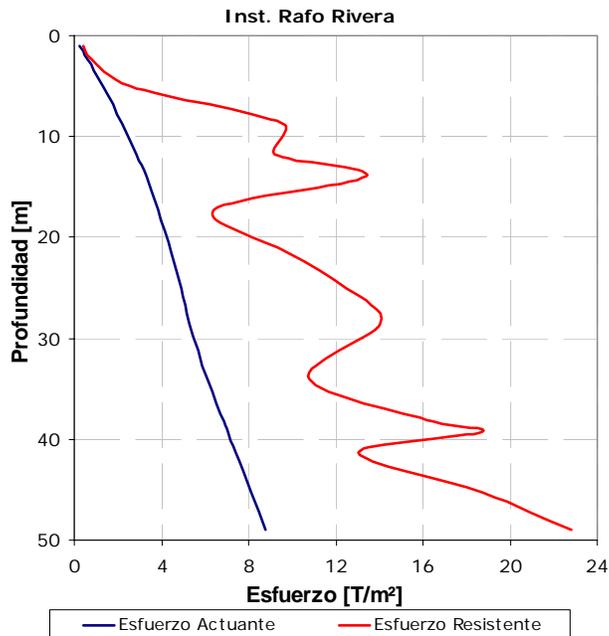


Figura 4.57 Análisis de licuación Instituto Rafo Rivera

En el Municipio de Tuluá los riesgos de licuación son menores que en el Municipio de Palmira, dado que los niveles freáticos se encuentran muy por debajo, que los anteriores, se puede observar uno de los casos críticos el Instituto Tomás Uribe Uribe, que registra un nivel freático está en 2.50m. En la figura 4.58 se presentan los resultados correspondientes, donde se puede observar que los esfuerzos actuantes están muy por debajo de los esfuerzos resistentes.

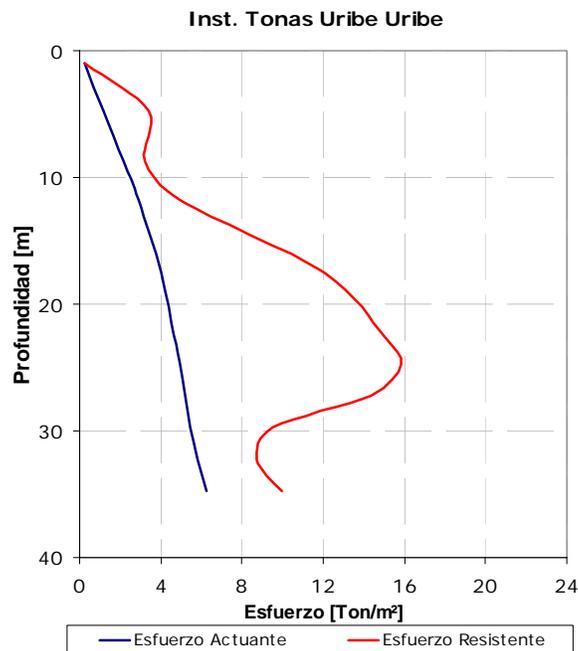


Figura 4.58 Análisis de licuación del Instituto Tomas Uribe Uribe

Por Municipio de Buga, como se ha descrito antes se encuentran grandes intercalaciones de arcillas de una consistencia muy rígida, lo que disminuyó aún mas el riesgo de licuación en dichos suelos. Por otro lado en el municipio de Buga los niveles freáticos están por debajo de los 10 m con excepción del sondeo realizado en la Federación Nacional de Cafeteros donde se registró en 6.40 m. La Figura 4.59 presenta los resultados de los análisis de dicho sondeo, obteniéndose igualmente unos esfuerzos resistentes mucho mayores a los actuantes ante una carga cíclica con una aceleración máxima de 0.2 g.

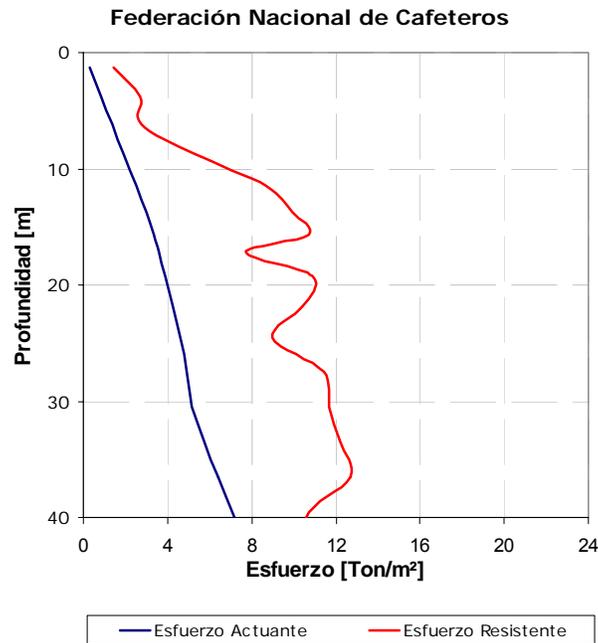


Figura 4.59 Análisis de licuación de la Federación Nacional de Cafeteros

4.10 BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, A. 1997 Estimación de Periodos Predominantes de suelos en Barcelona a partir de Microtremors. M. Sc Thesis, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España. Informe ICC No. GS091-97.

ASTM American Society of Testing Materials. 1994. 1994 Annual Book of ASTM Standards. Vols. 04.08 – 04.09. Soils and Rocks. Philadelphia, Pa, USA.

Biarez, 1994. Elementary Mechanics of Soils Behavior”. Editorial Balkema.

Castro , E., Vargas, G & Moreno, M. 1998. Zonificación de amenazas por procesos de remoción en masa en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile, Valle del Cauca. VII Congreso Colombiano de Geotécnica (SCG), Bogotá, Octubre 1998.

Hicher, 1991. Cours de Réologie des Sols, Ecole central de París

Ingeominas & Universidad de los Andes, 1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fé de Bogotá.

Ingeominas. 1999. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999). Informe Técnico - Científico.

Lermo L. & Chávez-García 1994. Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?. Bull. Of the Seism. Soc. Am., 84, 1350-1364.

Moreno, H. & Martinez, E. 1996. Estudio Geomorfológico y soluciones propuestas para la protección de Restrepo y el Puente sobre el río Upin. VI Congreso Colombiano de Geotécnica (SCG), Bucaramanga, Octubre 1996.

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of surface using microtremor on the ground surface. Quaterly Repor of Railway Tech. Inst., 30, 25-33.

Page, W. & James, M. 1981. Landslides and mudflows major contributors to landscape in northwest Colombia. Revista CIAF Vol. 6 (1-3), 1981.

Rust, B. & Kuster, E. Coarse alluvial Deposits. Department of Geology, University of Ottawa.

Sarría, A. 1996. Métodos Geofísicos con aplicaciones a la Ingeniería Civil.

Seed, H.B & Lee , K.L. 1966. Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 92 (SMG), 105-134.

Selley, R. 1969. Medios Sedimentarios Antiguos. Editorial Blume.

Terzaghi & Peck, 1967. Soil Mechanics.