



Libertad y Orden

INSTITUTO COLOMBIANO DE
GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS



DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE
DAGMA

**INGEOMINAS
SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y
ENTORNO AMBIENTAL**

**ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
DE SANTIAGO DE CALI**

Convenio No.02 de 2002

SUBPROYECTO DE RESPUESTA SÍSMICA

**Informe No.5-1
Evaluación de la Respuesta de Sitio en
Santiago de Cali a partir de
Microtrepidaciones y Sismos**

Bogotá, Diciembre de 2005

República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS



INSTITUTO COLOMBIANO
DE GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS

DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE
DAGMA



JULIAN VILLARRUEL TORO
DIRECTOR GENERAL INGEOMINAS

INES F. CAICEDO HERNANDEZ
DIRECTORA DAGMA

ALBERTO NUÑEZ TELLO, DIRECTOR TECNICO SERVICIO GEOLOGICO, INGEOMINAS
MARTA L. CALVACHE VELASCO, SUBDIRECTORA AMENAZAS GEOLOGICAS, INGEOMINAS
CARLOS E. ALVARADO FLOREZ, JEFE DE PROYECTO, INGEOMINAS

GRUPO TECNICO CONSORCIO SISMICO

ANIBAL OJEDA, LIDER TEMATICO
JORGE PEREZ

GRUPO TECNICO INGEOMINAS

MARIA LUISA BERMUDEZ
FRANKLIN RENGIFO
DARIO LLANOS
ROBERT RENGIFO

Apoyo Técnico: Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, RNAC

EDICION FINAL, INGEOMINAS

ANA I. ALVARADO
JESUS SANDOVAL
ROSA DAZA



TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. METODOLOGÍA.....	2
CAPITULO 2.....	5
TÉCNICA DE ANÁLISIS	5
CAPITULO 3.....	7
RESULTADOS.....	7
CAPITULO 4.....	12
CALIBRACIÓN DE LAS MICROTREPIDACIONES VS. SISMOS	12
CAPITULO 5.....	18
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	18
CAPITULO 6.....	19
BIBLIOGRAFÍA	19



LISTA DE FIGURAS

Figura 2. Esquema metodológico para la evaluación de respuesta de sitio en la ciudad de Santiago de Cali por medio de microtrepidaciones.	6
Figura 3 Espectros normalizados a la aceleración máxima para sismos registrados en las redes RPAC y RAC. En las abscisas se tiene el período (seg) y en las ordenadas la aceleración normalizada	12
Figura 4. Espectros de amplificación por el sismo de Pizarro (Noviembre 15 de 2004) tomando como estación de referencia la ubicada en el Zoológico.	15
Figura 5. Espectros de amplificación por el sismo de Sipí (Octubre 22 de 2005) tomando como estación de referencia la ubicada en la Reforma.	16

Nota: Figura No. 1 anexa

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de la RPAC y la RAC.	3
Tabla 2. Sismos registrados por RPAC y RAC.	4
Tabla 3. Ubicación y períodos de vibración en los sitios de medición de microtrepidaciones - Casco Urbano de Cali.	7
Tabla 4. Períodos dominantes en las estaciones de RPAC y RAC por los sismos de Pizarro y Sipí y por microtrepidaciones.	17

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1.	Registros de Microtrepidaciones.
Anexo 2.	Cocientes Espectrales.
Anexo 3.	Espectros Promedios.
Anexo 4.	Fotografías de instalación RAC y medición de microtremores.



CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Las condiciones o efectos locales de sitio son el factor más influyente en la distribución de daños durante sismos, de allí la importancia de adelantar estudios tendientes a determinar el comportamiento dinámico de los suelos y su respuesta cuando están sometidos a sismos y cargas dinámicas.

La respuesta local de sitio puede ser evaluada por métodos teóricos y/o empíricos. Los primeros permiten un análisis de los distintos parámetros del problema, aunque requieren una descripción detallada de las capas de suelo y/o roca que conforman el subsuelo y de las fuentes que generan los sismos, las cuales en algunos casos pueden ser muy complejas y por lo tanto, dificultan la construcción de un modelo matemático real. Los métodos empíricos se basan en registros de datos sísmicos en el sitio de interés, de tal manera que se puedan determinar amplificaciones relativas y períodos dominantes de vibración. A diferencia del método anterior, no se requiere una descripción detallada de las capas del subsuelo, pero se necesita tener una gran cantidad de registros o información sísmica, lo cual es posible en regiones donde se tenga una alta sismicidad y se cuente con redes de acelerógrafos o equipos de registro sísmico. En el caso de no contar con mucha información sísmica, se debe recurrir al uso de otros métodos. Entre las alternativas para obtener datos sísmicos de una región en particular se encuentran las microtrepidaciones, que son vibraciones ambientales de baja amplitud (no sismos), que contienen información sobre los modos de vibración del suelo. La principal ventaja de las microtrepidaciones es que se pueden obtener muchos registros en un corto periodo de tiempo, además, las técnicas de análisis son sencillas permitiendo que rápidamente se pueda estimar la respuesta dinámica del suelo (Hough y otros, 1992; Lermo y Chávez-García, 1994).

Desde principios de los 90's el uso de microtrepidaciones como herramienta para estimar la respuesta dinámica del suelo se ha intensificado, dado su bajo costo, rapidez y efectividad en comparación a otras técnicas. Los resultados obtenidos en estudios anteriores demuestran que esta técnica arroja buenos resultados en estratos de suelo blando (Ojeda, 1996; Ojeda y Escallón, 2000) y resultados aceptables en suelo rígido (INGEOMINAS, 2001; INGEOMINAS, 2002), donde la evaluación de la respuesta dinámica es más difícil. En general, se catalogan como una herramienta útil dentro de los proyectos de microzonificación sísmica, ya que permiten determinar, con una buena precisión, zonas de distinto comportamiento dinámico (Kanai y Tanaka 1961, Lacave y otros 2003).

Este informe ha sido realizado para el Proyecto de Microzonificación Sísmica de Santiago de Cali (MZSCali) en el marco del Convenio INGEOMINAS - DAGMA, el cual presenta los resultados de la evaluación de la respuesta dinámica local en la ciudad, mediante el uso de información proveniente de registros de microtrepidaciones dado que en la actualidad la información de registros sísmicos para distintos sitios en la ciudad es poca. Los suelos sobre los cuales se encuentra la ciudad de Santiago de Cali están conformados en su gran mayoría por depósitos aluviales, los cuales se derivan de diferentes ríos que corrían y/o corren desde los cerros de los Farallones (límite occidental de la ciudad), hasta el río Cauca (límite oriental de la ciudad). En el extremo occidental de la ciudad se presentan en su gran mayoría suelos rígidos, y en el extremo oriental los suelos están conformados por depósitos aluviales de



804

gran espesor, en otras palabras, los estratos rocosos de la ciudad se profundizan en sentido oeste-este.

A continuación se presenta una breve descripción de la metodología, equipos utilizados para el registro de microtrepidaciones, la técnica utilizada para su análisis y los resultados obtenidos, incluyendo su calibración, la cual se basa en la comparación de los resultados obtenidos, versus los resultados provenientes de sismos registrados en la Red local de Acelerógrafos de Cali (RAC) y la Red de Acelerógrafos Portátil de Cali (RPAC). Para terminar se incluyen, conclusiones y recomendaciones a la luz de los resultados obtenidos, los que permiten complementar los análisis e interpretaciones provenientes de la modelación de la respuesta sísmica local, así como las consideraciones finales para el diseño sismorresistente en diferentes sectores de la ciudad.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es obtener la respuesta de sitio local en la ciudad de Santiago de Cali, por medio del análisis de las mediciones de microtremores.

1.2. METODOLOGÍA

Para el registro de microtrepidaciones se utilizaron sismómetros de banda ancha, de propiedad de INGEOMINAS, tipo Guralp CMG-40T triaxial con respuesta lineal entre 0.03 y 50 Hz, lo que permite el correcto registro de períodos de vibración entre 0.02 y 30 seg. Cada sismómetro se usó con un registrador digital Nanometrics Orion 3S, con digitalización a 24 bits y tasas de muestreo ajustable desde 1 a 1000 muestras/seg, además el sistema cuenta con GPS para determinar con exactitud el momento y la localización geográfica de cada uno de los sitios. Este tipo de instrumentación es el adecuado para medir microtrepidaciones; desafortunadamente la utilización de otros sistemas más sencillos no dan resultados confiables, por lo tanto hoy en día únicamente se recomienda el uso de sensores de banda ancha y registradores de 24 bits para estudios de este tipo (Havskov y Alguacil 2002; Horike 1985).

La medición de las microtrepidaciones se realizó durante tres campañas, las cuales se desarrollaron entre finales de 2003 y el primer semestre de 2004. Durante las campañas se registraron microtrepidaciones en 75, 35 y 47 sitios respectivamente, en total se completaron 157 sitios distribuidos uniformemente dentro del área urbana de la ciudad de Santiago de Cali (**Figura 1**). Para cada una de las mediciones, el registrador fue configurado a una tasa de 50 muestras/seg. En cada uno de los sitios se tomó un registro de 45 minutos de duración, del cual, los primeros 15 minutos se utilizaban para estabilizar el registrador de la estación Orion 3S y el sismómetro, y los 30 minutos restantes se utilizaron como registro de microtrepidaciones. El sismómetro se instaló directamente sobre terreno firme, luego se orientó de tal manera que la componente transversal positiva del sensor apuntara hacia el norte, y finalmente el sensor se niveló. Dado que las mediciones de microtrepidaciones no deben ser afectadas directamente por fuentes locales cercanas, como el tráfico vehicular o peatonal, plantas industriales y similares (Lermo y Chávez-García, 1994), fue necesario realizar las mediciones en momentos que la influencia de ruido local fuera mínima (Irikura y Kawanaka, 1980; Aki 1957).



Adicional a las mediciones de microtrepidaciones en la ciudad de Santiago de Cali, se incorporaron para el análisis los resultados previamente obtenidos en el sector de Navarro (INGEOMINAS, 2003), además fueron complementados con la información de sismos registrados por la RPAC y la RAC. Cabe anotar que la RPAC fue instalada por INGEOMINAS desde principios de 2003, la cual consta de cuatro estaciones ETNA KINEMATRICS con sensores FBA, ésta ha sido rotada por diferentes sitios de la ciudad con el objetivo de maximizar su cubrimiento. A principios del 2004 se logro instalar la RAC, la cual cuenta con doce estaciones (equipos ETNA KINEMATRICS) distribuidos de manera estratégica en la ciudad. Ambas redes han logrado registrar varios sismos pequeños, incluyendo el pasado Sismo de Pizarro del 15 de noviembre de 2004, el cual es considerado como movimiento fuerte (INGEOMINAS, 2004). En la **Tabla 1** se presenta la ubicación de las estaciones acelerográficas de la Red local de Acelerógrafos de Cali y de las estaciones acelerográficas de la Red Portátil de Acelerógrafos, apreciándose en la **Figura 1** la distribución de tales estaciones dentro de la ciudad. La **Tabla 2** presenta las principales características de los sismos registrados en la RPAC y la RAC. Esta información es clave para poder calibrar los resultados del análisis de microtrepidaciones.

Tabla 1. Ubicación de las estaciones de la RPAC y la RAC.

Red Portátil de Acelerógrafos de Cali - RPAC			
ID	Longitud	Latitud	Ubicación de la Estación
CAL1	-76,5174	3,4937	Bomberos Norte
CAL2	-76,5400	3,4639	Colegio San Luis Gonzaga
CAL3	-76,5806	3,3967	Planta la Reforma
CAL4	-76,4719	3,3802	Navarro - Finca Japoneses
CAL5	-76,5192	3,4751	Vivero del Norte DAGMA
CAL6	-76,5651	3,4512	Zoologico
CAL7	-76,5233	3,3561	Universidad Autonoma
CAL8	-76,5326	3,3512	Universidad Javeriana

Red de Acelerógrafos Permanente de Cali - RAC			
ID	Longitud	Latitud	Ubicación de la Estación
RAC01	-76,5396	3,3348	Parque Las garzas
RAC02	-76,5298	3,3727	Ingeominas
RAC03	-76,5527	3,4089	Seminario Teológico Bautista
RAC04	-76,5806	3,3967	Planta La Reforma
RAC05	-76,5496	3,4325	Hospital Universitario
RAC06	-76,5355	3,4227	Canchas Panamericanas
RAC07	-76,5402	3,4671	Ecoparque Bataclán
RAC08	-76,4965	3,4662	Tránsito Salomía
RAC09	-76,5174	3,4937	Bomberos Norte
RAC10	-76,4830	3,4493	Planta Puerto Mallarino
RAC11	-76,4719	3,3802	Navarro
RAC12	-76,5156	3,4308	Centro de Salud Luis H. Garces



CAPITULO 2

TÉCNICA DE ANÁLISIS

Las microtrepidaciones son vibraciones de baja amplitud del terreno, conformadas por ondas internas y superficiales. Estas ondas pueden ser de período largo y período corto; las primeras con período mayor a 1.0 seg conformadas por ondas superficiales Rayleigh y Love generadas por fuentes naturales como el viento, las olas y variaciones de presión de aire (Sakajiri, 1982; Horike, 1985); las segundas con período menor a 1.0 seg producidas por fuentes de ruido artificial como el tráfico vehicular, plantas industriales y maquinaria, es decir, de carácter antrópico (Aki, 1957; Omote et al., 1973; Irikura y Kawanaka, 1980; Sato et al., 1991; Hough et al., 1992).

Para el procesamiento y análisis de los registros de microtrepidaciones se siguieron varios pasos, como se muestra en la **Figura 2**, así: primero, de cada uno de los registros de 45 minutos se seleccionaron 20 ventanas de 180 seg de duración; segundo, a cada ventana se le hizo una corrección de línea base; tercero, las ventanas fueron filtradas con un filtro digital Butterworth pasabanda de 0.05 a 20 Hz, especialmente diseñado para el sensor de banda ancha; cuarto, se calcularon las Transformadas Rápidas de Fourier (FFT) para las tres componentes del movimiento de cada ventana. Finalmente se procedió a calcular los cocientes espectrales Horizontales sobre Vertical (H/V) equivalentes para las ondas superficiales Rayleigh y Love por separado, como lo recomiendan los estudios de Tokimatsu y Miyadera (1992) y Tokimatsu (1995) de la siguiente forma:

$$\left(\frac{H}{V}\right)_{Rayleigh} = \left(\frac{[S_{NS} * S_{EW}]^{1/2}}{S_{VERT}}\right)$$

$$\left(\frac{H}{V}\right)_{Love} = \left(\frac{[S_{NS}^2 + S_{EW}^2]^{1/2}}{S_{VERT}}\right)$$

Donde S_{NS} y S_{EW} son los espectros de Fourier de las dos componentes ortogonales del movimiento horizontal (Norte-Sur y Este-Oeste) respectivamente, y S_{VERT} es el espectro de Fourier del movimiento vertical. Una vez se calcularon los cocientes espectrales para cada ventana, estos fueron promediados. Con los promedios de los cocientes espectrales H/V equivalentes para las ondas superficiales Rayleigh y Love en el dominio de la frecuencia, y por observación directa de los espectros obtenidos, se determinó la frecuencia natural de vibración para cada sitio.

En los Anexos 1, 2 y 3 se presentan de manera detallada los registros y espectros obtenidos en cada una de los sitios donde se registraron microtrepidaciones. El Anexo 1 presenta de manera completa los 45 minutos del registro, en señal de Tiempo vs. Amplitud; en el Anexo 2 se presentan los espectros H/V equivalentes para ondas Rayleigh y Love para cada una de las ventanas en consideración, en total se presentan 20 ventanas, para cada gráfico el espectro de color rojo es el $(H/V)_{\text{Love E-W}}$, el espectro de color azul es el $(H/V)_{\text{Love N-S}}$, el espectro de color negro es el $(H/V)_{\text{Rayleigh E-W}}$ y el espectro de color verde es el $(H/V)_{\text{Rayleigh N-S}}$; en el Anexo 3 se presentan los espectros promedio obtenidos para las 20 ventanas consideradas, teniendo en cuenta que el espectro de color rojo es el promedio para $(H/V)_{\text{Love E-W}}$, el espectro de color azul es el promedio para $(H/V)_{\text{Love N-S}}$, el espectro de color negro es el promedio para $(H/V)_{\text{Rayleigh E-W}}$ y el espectro de color verde es el promedio para $(H/V)_{\text{Rayleigh N-S}}$.

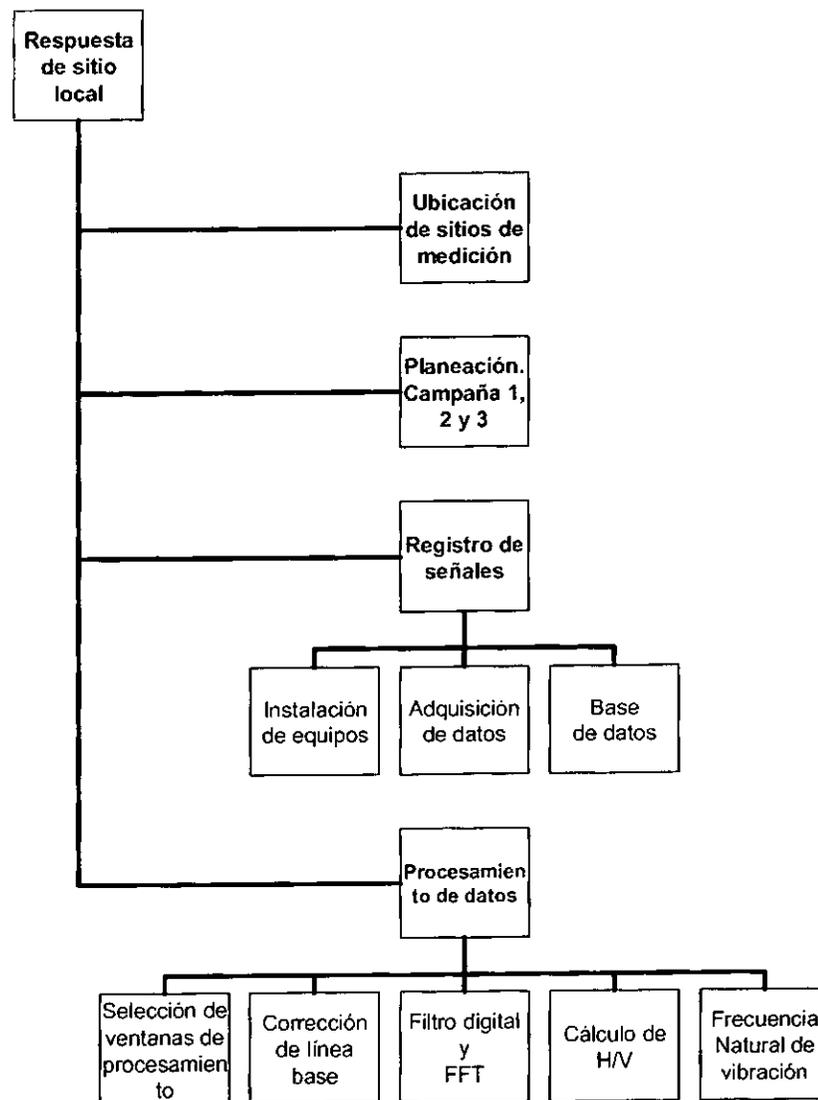


Figura 2. Esquema metodológico para la evaluación de respuesta de sitio en la ciudad de Santiago de Cali por medio de microtrepidaciones.



CAPITULO 3

RESULTADOS

Los resultados se presentan a través de los cocientes espectrales H/V y de los espectros promedios calculados para las ondas superficiales Rayleigh y Love de la manera descrita en el numeral anterior. En el Anexo 1 se presentan los registros de microtrepidaciones (Tiempo vs. Amplitud) obtenidos para cada uno de los sitios, el Anexo 2 presenta los cocientes espectrales obtenidos para las veinte ventanas consideradas para el mismo sitio, y el Anexo 3 presenta el espectro promedio de todas las ventanas. En los Anexos 2 y 3 los cocientes espectrales para ondas Rayleigh y para ondas Love son presentados en un mismo gráfico. Los espectros están en escala Log-Log donde las abscisas representan la frecuencia de 0.1 a 10 Hz y las ordenadas representan la amplificación desde 0.1 a 100 veces. Los resultados obtenidos para cada sitio son resumidos en la Tabla 3, donde se presenta la descripción de cada sitio, las coordenadas geográficas obtenidas con mediciones de GPS y el periodo predominante del sitio, el cual resulta del análisis de microtrepidaciones. En general se observa que los periodos predominantes varían entre 0.1 y 2.5 seg, lo cual indica que la ciudad de Santiago de Cali durante la ocurrencia de un evento sísmico va a tener un comportamiento heterogéneo, y que las condiciones de sitio de cada lugar en particular, van a jugar un papel muy influyente en la respuesta sísmica de la ciudad.

El Mapa MZSC - RS1 presenta líneas de isoperíodos para la ciudad, obtenidas de los periodos predominantes para cada sitio (**Tabla 3**), en el cual se observa claramente que los periodos cortos ($T < 0.5$ seg) están en la parte occidental, y los periodos aumentan en dirección occidente-oriente, alcanzando hasta los 2.0 seg en la zona más oriental de la misma. Estos resultados tienen mucho sentido si se tiene en consideración que el periodo predominante de un estrato de suelo, depende principalmente de la velocidad de las ondas de corte V_s ($T \propto 1/V_s$) y de la profundidad del estrato h ($T \propto h$), entonces, para la parte occidental de la ciudad se tiene la presencia de los estratos de suelo más duros, en promedio con más altas velocidades V_s (ver informe No.5, Subproyecto de Geotecnia, Proyecto MZSCali, 2005) y los estratos rocosos están más cercanos a la superficie, en ese sentido los periodos tienden a ser cortos, en el caso opuesto, sobre la parte oriental de la ciudad se presenta una situación muy diferente, pues, los estratos de suelo tienen en promedio velocidades V_s más bajas y los estratos rocosos están más profundos, situación que induce a periodos más largos.

Tabla 3. Ubicación y periodos de vibración en los sitios de medición de microtrepidaciones - Casco Urbano de Cali.

ID	Longitud	Latitud	Tp (seg)	Ubicación de la Estación
M1	-76,5196	3,4738	1,60	Vivero Municipal
M2	-76,4986	3,4986	2,00	Parque Floralia
M3	-76,5400	3,4639	0,20	Colegio San Luis Gonzaga
M4	-76,5359	3,4778	0,20	Santa Monica de Chipichape
M5	-76,5366	3,4894	0,20	Menga
M6	-76,5272	3,5010	0,60	Menga



Continuación Tabla 3. Ubicación y períodos de vibración en los sitios de medición de microtrepidaciones - Casco Urbano de Cali.

ID	Longitud	Latitud	Tp (seg)	Ubicación de la Estación
M7	-76,5232	3,4955	1,10	Parque del Amor
M8	-76,5085	3,4902	2,00	Los Alamos
M9	-76,5333	3,4855	0,25	La Campiña
M10	-76,5198	3,4993	1,70	Zona Industrial Norte
M11	-76,5174	3,4937	2,00	Bomberos Norte
M12	-76,5039	3,4694	2,00	Sena Salomia
M13	-76,4957	3,5082	2,00	Floralia Zoologico
M14	-76,4910	3,4888	1,80	Alcazares EMCALI
M15	-76,4814	3,4729	1,60	PTAR
M16	-76,5479	3,4615	0,35	Parte baja de las tres cruces
M17	-76,5589	3,4638	0,20	Escuela Interamericana de Bomberos
M18	-76,5619	3,4571	0,25	Terron colorado
M19	-76,5445	3,4575	0,20	Normandia
M20	-76,5546	3,4502	0,20	Bellavista
M21	-76,5756	3,4300	0,25	La Reforma Pelabolsillo
M22	-76,5321	3,4638	0,90	Versalles Calle 20N 4N-56
M23	-76,5496	3,4325	1,00	Hospital Departamental del Valle
M24	-76,5402	3,4265	1,50	Unidad Deportiva Panamericana
M25	-76,5527	3,4089	1,20	Seminario Teologico
M26	-76,5298	3,3727	1,00	INGEOMINAS
M27	-76,5324	3,3898	0,80	Parque del Valle del Lili
M28	-76,5240	3,4202	2,00	Barrio la Independencia - Colegio Parroquial San Pedro
M29	-76,4830	3,4493	1,70	Puerto Mallarino
M30	-76,4815	3,4576	1,70	Alfonso Lopez, Calle 81 con 7
M31	-76,4856	3,4419	1,50	Ecoparque Pizamos - Marroquin II
M32	-76,4833	3,4279	1,40	Marroquin II
M33	-76,4894	3,4144	1,40	Hospital Isaias Duarte Cancino - Mojica 2
M34	-76,5158	3,4314	2,00	Hospital Luis H. Garces
M35	-76,5382	3,4305	1,20	Champanate
M36	-76,5416	3,4430	0,40	Club Noel
M37	-76,5324	3,4435	0,80	Colegio Antonio Jose Camacho
M38	-76,5554	3,4188	0,90	Colegio Distrital Eustaquio Palacios
M39	-76,5469	3,4487	0,20	Acueducto Municipal
M40	-76,5253	3,4517	1,00	Barrio Obrero
M41	-76,5234	3,3567	0,80	Universidad Autonoma de Occidente
M42	-76,5284	3,4398	1,00	Colegio Distrital General Alfredo Vasquez
M43	-76,4880	3,4932	1,80	Barrio Cali Mio - Puente Paso del Comercio
M44	-76,5024	3,4082	1,50	Parque del Vallao
M45	-76,5068	3,3974	1,50	Morichal A, Kr. 45A con 57A
M46	-76,5059	3,4229	2,00	Unidad Recreativa el Diamante
M47	-76,5232	3,4074	1,30	Polideportivo Maria Isabel Urrutia
M48	-76,5365	3,3456	0,50	Universidad Javeriana
M49	-76,5189	3,3692	0,90	Melendez - Cancha de Polo
M50	-76,5229	3,3989	1,30	Ciudad 2000



Continuación Tabla 3. Ubicación y períodos de vibración en los sitios de medición de microtrepidaciones - Casco Urbano de Cali.

ID	Longitud	Latitud	Tp (seg)	Ubicación de la Estación
M51	-76,5496	3,3525	0,30	Universidad San Buenaventura
M52	-76,5126	3,4662	1,60	Colegio Republica de Israel
M53	-76,5091	3,3769	1,30	Melendez - Cerca de Navarro
M54	-76,5542	3,3894	0,30	Batallon Napoles
M55	-76,5161	3,4718	1,70	Colegio Jose antonio Galan - Barrio Popular
M56	-76,5186	3,4534	1,30	Instituto Educativo Jose Manuel Saavedra Galinda - Barrio Industrial
M57	-76,5110	3,4495	1,40	Las Americas Polideportivo
M58	-76,4979	3,4510	1,70	Jardin Infantil - La Base
M59	-76,5575	3,3914	0,30	Prados del Sur
M60	-76,5604	3,3861	0,25	Colegio Santa Teresa de Jesus Fe y Alegria - Alto de Napoles
M61	-76,5231	3,3801	1,40	Caney - Calle 42 con Kra. 91
M62	-76,5661	3,3673	0,20	Centro de Salud - Buitrera
M63	-76,5578	3,3593	0,20	La Riverita
M64	-76,5514	3,4031	1,10	El Refugio - Calle 3C con 69
M65	-76,5000	3,4807	2,00	Chiminangos
M66	-76,4902	3,4691	2,00	Brisas del Guavito
M67	-76,4958	3,4341	1,80	Pondaje
M68	-76,5544	3,4157	1,10	Coliseo
M69	-76,5483	3,4155	1,50	Club Tequendama
M70	-76,5344	3,4099	2,00	Polideportivo 1ro de Mayo
M71	-76,5264	3,4170	2,00	San Judas
M72	-76,5299	3,4180	2,00	Escuela Republica de Costa Rica
M73	-76,5424	3,3976	1,00	Club Los Panchos
M74	-76,5150	3,4264	2,00	Parque Infantil San Carlos
M75	-76,5806	3,3967	0,25	La Reforma
M76	-76,5099	3,4784	1,80	Barrio Olaya Herrera
M77	-76,5034	3,4841	1,80	Barrio Calima - Colegio Nuestra Señora de Fatima
M78	-76,5052	3,4957	2,00	Detrás del Diario El Pais
M79	-76,5402	3,4671	0,20	Bataclan
M80	-76,5651	3,4512	0,20	Enfermeria Zoologico
M81	-76,5215	3,4775	1,50	Barrio Vipasa
M82	-76,4965	3,4662	2,00	Transito Salomia
M83	-76,5249	3,4566	1,00	Barrio San Nicolas
M84	-76,5396	3,3348	1,00	Parque Las Garzas
M85	-76,5076	3,4574	1,60	Parque de la Caña
M86	-76,4879	3,4541	1,70	Barrio Las Ceibas
M87	-76,4883	3,4714	2,00	Barrio La Rivera
M88	-76,4854	3,4748	1,80	Barrio La Rivera II
M89	-76,5474	3,4183	1,50	Barrio Tequendama
M90	-76,5368	3,4180	2,00	Barrio PasoAncho
M91	-76,5334	3,4025	1,50	Barrio 1ro de Mayo
M92	-76,5335	3,4166	2,00	Estación de Policia del Barrio el Guaval
M93	-76,5361	3,3820	0,80	Barrio el Ingenio II



Continuación Tabla 3. Ubicación y períodos de vibración en los sitios de medición de microtrepidaciones - Casco Urbano de Cali.

ID	Longitud	Latitud	Tp (seg)	Ubicación de la Estación
M94	-76,4991	3,4326	1,80	Barrio el Sardinal
M95	-76,5252	3,4324	1,20	Barrio Santa Helena
M96	-76,5119	3,4130	2,00	Polideportivo Marino Rngifo Salcedo
M97	-76,5115	3,4062	1,50	Cra. 43A # Calle 46
M98	-76,4963	3,4197	1,60	Centro de Desarrollo Comunitario UNICAP - Poblado 1
M99	-76,5518	3,3721	0,25	Alto Melendez
M100	-76,5344	3,3648	0,30	Barrio Ciudad Jardín
M101	-76,5280	3,3635	0,50	Barrio Cañas Gordas
M102	-76,5146	3,3484	1,50	Club Deportivo Bavaria
M103	-76,5225	3,3730	1,30	Makro - Sur de Cali
M104	-76,5204	3,4306	2,00	Barrio San Cristobal
M105	-76,5225	3,3868	1,00	Parque Cofandi del Valle de Lili
M106	-76,5134	3,3869	1,40	Urbanización El Caney
M107	-76,5440	3,3896	0,50	Barrio Capri - Cra. 76a con Calle 6
M108	-76,5406	3,3759	0,70	Barrio La Playa
M109	-76,5274	3,3493	0,70	Ancianato - Via a Jamundi
M110	-76,5427	3,3651	0,30	Club Campestre - Caballeria
M111	-76,5553	3,4389	0,30	Los Cristales
M112	-76,5575	3,4305	0,40	Siloe- Barrio Belén
M113	-76,5610	3,4315	0,40	Siloe- San Martín
M114	-76,5712	3,4164	0,25	Escuela Carabineros
M115	-76,5633	3,4139	0,40	Barrio la Luisa
M116	-76,5605	3,4050	0,50	Finca los Jinetes
M117	-76,5632	3,3988	0,30	Pesebrera los Caballeros
M118	-76,5272	3,4705	1,10	ISS Av Vasquez Cobo
M119	-76,5273	3,4775	1,10	Av 4N con calle 36a N
M120	-76,5262	3,4879	0,70	Barrio La Flora
M121	-76,5224	3,4834	1,00	Barrio Vipasa
M122	-76,5042	3,5061	1,80	Zona Industrial Bomba ESSO
M123	-76,5118	3,5014	1,50	Zona Industrial Coordinadora
M124	-76,5310	3,4970	0,60	Urbanizacion Menga Finca
M125	-76,5370	3,4704	0,30	Barrio Santa Monica
M126	-76,5107	3,4444	1,40	Barrio Santa fe
M127	-76,5067	3,4306	1,70	Barrio 12 de Octubre
M128	-76,4755	3,4286	1,40	Barrio Puerta del Sol
M129	-76,4663	3,4283	1,40	Dcpaz central telefónica
M130	-76,4670	3,4381	1,60	Cll 99b Cra 20
M131	-76,4802	3,4180	1,50	Barrio Orquideas
M132	-76,4942	3,4263	1,70	Barrio Los Comuneros II
M133	-76,5060	3,4140	1,70	Barrio Antonio Nariño
M134	-76,5360	3,4580	0,50	Parque CAM
M135	-76,4911	3,4965	2,00	Barrio Comfenalco
M136	-76,4975	3,4880	2,00	TCC Calima
M137	-76,5047	3,4763	2,00	Barrio Palmeras



83

Continuación Tabla 3. Ubicación y períodos de vibración en los sitios de medición de microtrepidaciones - Casco Urbano de Cali.

ID	Longitud	Latitud	Tp (seg)	Ubicación de la Estación
M138	-76,4836	3,4829	1,80	Barrio Petecuy II
M139	-76,4852	3,4680	1,80	Hospital Juakin Paz Borrero
M140	-76,4880	3,4532	1,70	Barrio 7 de Agosto
M141	-76,4926	3,4448	1,70	Barrio Pulpiano Lloreda
M142	-76,5099	3,4057	1,50	Ciudad Cordoba junta Acción
M143	-76,5150	3,3973	1,40	Ciudad Cordoba
M144	-76,5556	3,4058	1,00	Barrio Puente Palma
M145	-76,5599	3,3960	0,50	Barrio el Refugio
M146	-76,5643	3,3889	0,25	Alto Napoles
M147	-76,5421	3,4019	1,30	Barrio Santa Anita
M148	-76,5300	3,4255	2,00	Barrio Alhambra
M149	-76,5365	3,3954	0,90	Barrio la Herreria
M150	-76,5360	3,3750	0,80	Univalle unicentro
M151	-76,5254	3,3444	1,00	Via puerto tejada
M152	-76,5320	3,3421	0,70	Centro de Patinaje Luz Mery Tristan
M153	-76,5200	3,4570	1,20	Bodegas del Ferrocarril
M154	-76,5370	3,4490	0,50	Colegio Santa Librada
M155	-76,5475	3,3805	0,30	Colegio HH Dominicos
M156	-76,5373	3,3574	0,30	Barrio Ciudad Jardín
M157	-76,5478	3,3410	0,30	Parcelación la María

CAPITULO 4

CALIBRACIÓN DE LAS MICROTREPIDACIONES Vs. SISMOS

Con el ánimo de validar los resultados obtenidos con las microtrepidaciones, se calcularon los valores de períodos dominantes de vibración de las estaciones acelerográficas en Santiago de Cali de las redes RPAC y RAC, usando la información de sismos registrados. Para el análisis de los registros acelerográficos se procedió en primera instancia al cálculo de todos los espectros de respuesta con un 5% de amortiguamiento, para luego calcular los espectros normalizados a la aceleración máxima, los cuales se presentan en la **Figura 3** para cada estación. Además, en las **Figuras 4 y 5** se presentan los espectros de amplificación por los sismos de Pizarro (Noviembre 15 de 2004) y Sipí (Octubre 22 de 2005), teniendo como estación de referencia el Zoológico y la Reforma respectivamente.

Del análisis de las **Figuras 4 y 5** se obtienen los períodos predominantes para cada estación, los cuales se presentan en la **Tabla 4**, la cual incluye además los períodos obtenidos del análisis de microtrepidaciones; de cierta manera se comprende que los resultados obtenidos por ambas metodologías usando diferentes tipos de datos son similares.

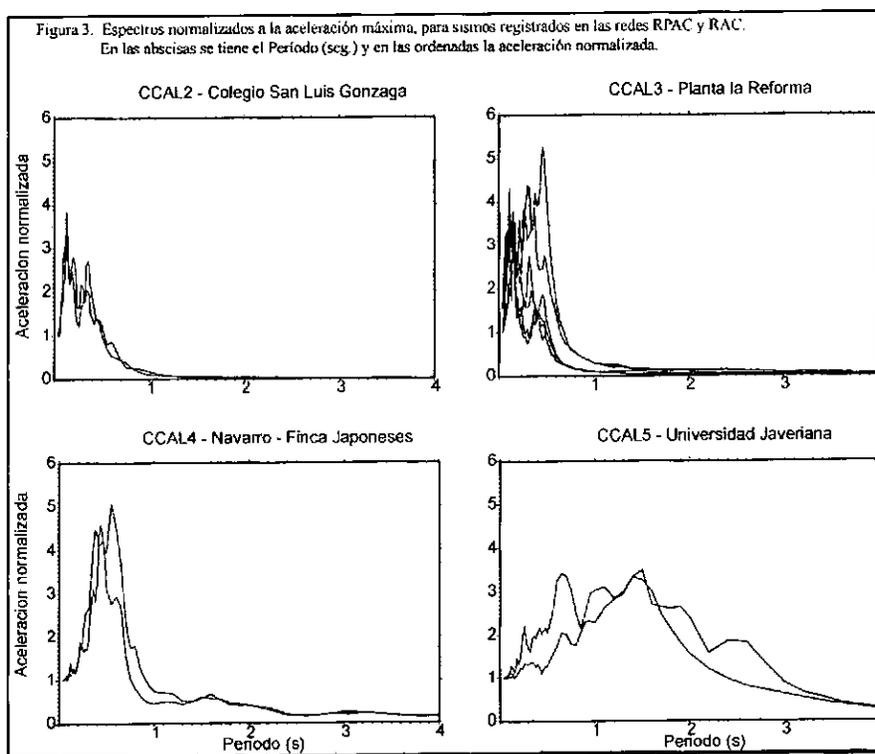


Figura 3 Espectros normalizados a la aceleración máxima para sismos registrados en las redes RPAC y RAC. En las abscisas se tiene el período (seg) y en las ordenadas la aceleración normalizada

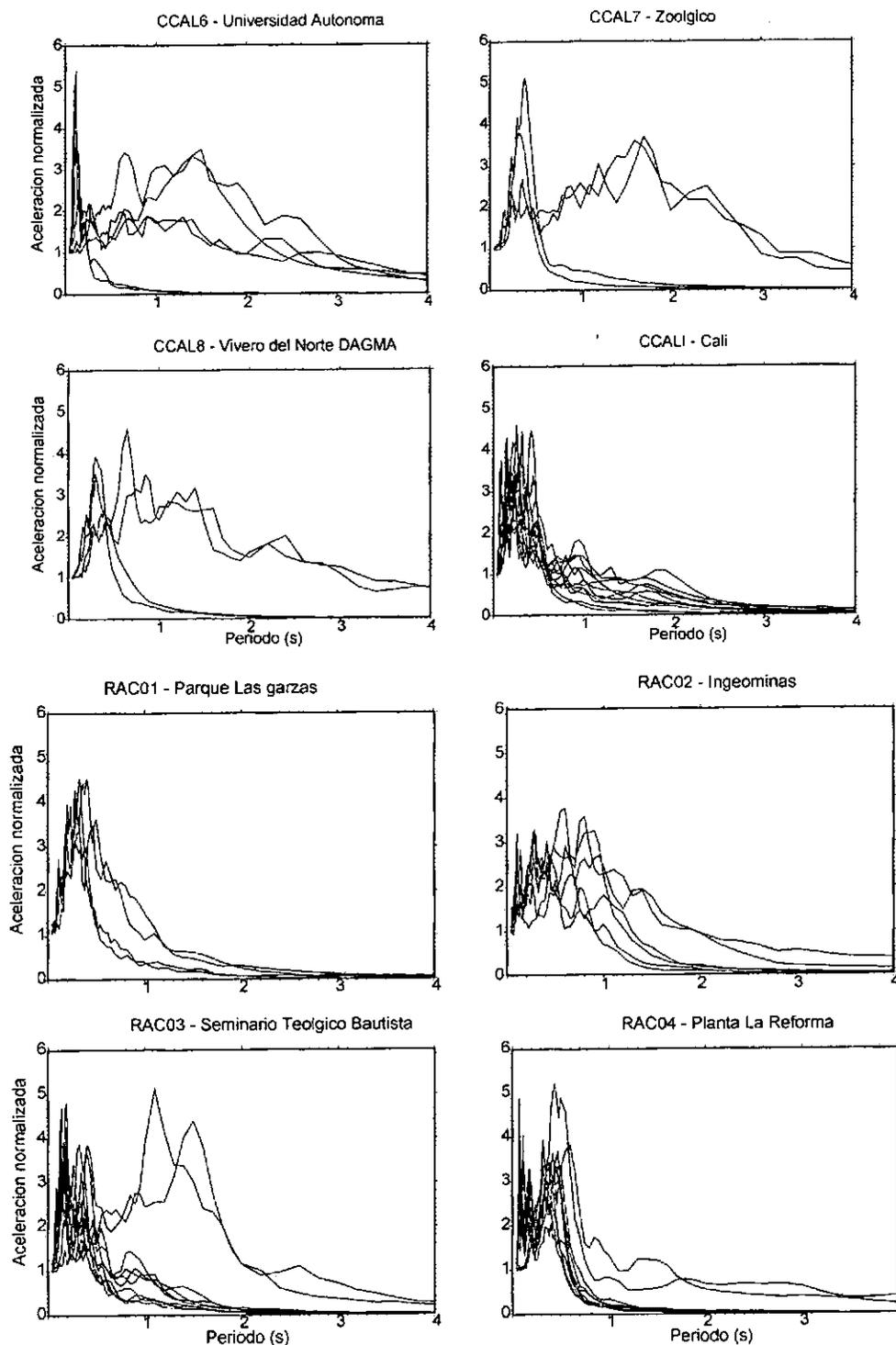


Figura 3 (continuación). Espectros normalizados a la aceleración máxima para sismos registrados en las redes RPAC y RAC. En las abscisas se tiene el período (seg) y en las ordenadas la aceleración normalizada

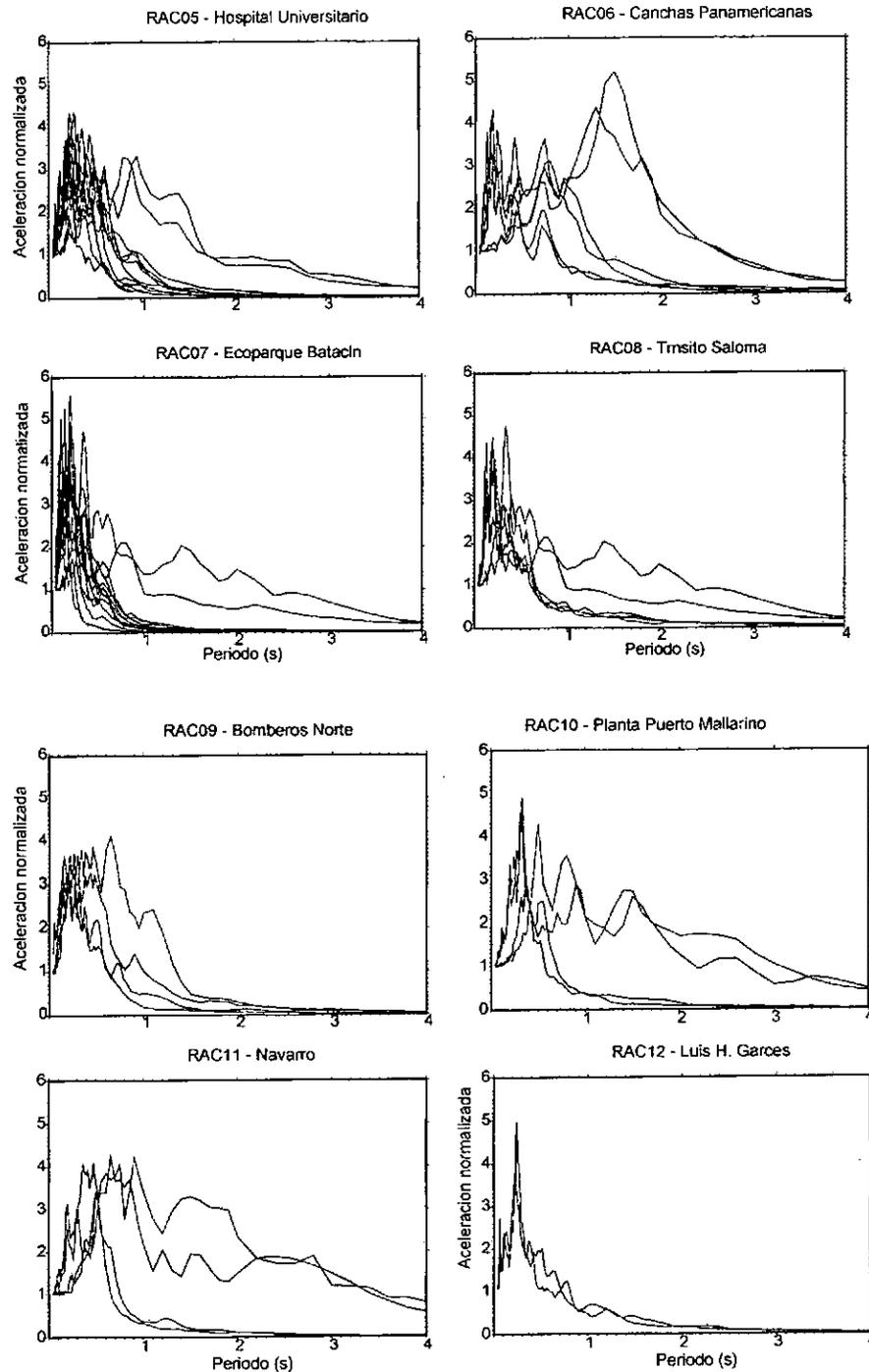


Figura 3 (continuación). Espectros normalizados a la aceleración máxima para sismos registrados en las redes RPAC y RAC. En las abscisas se tiene el período (seg) y en las ordenadas la aceleración normalizada

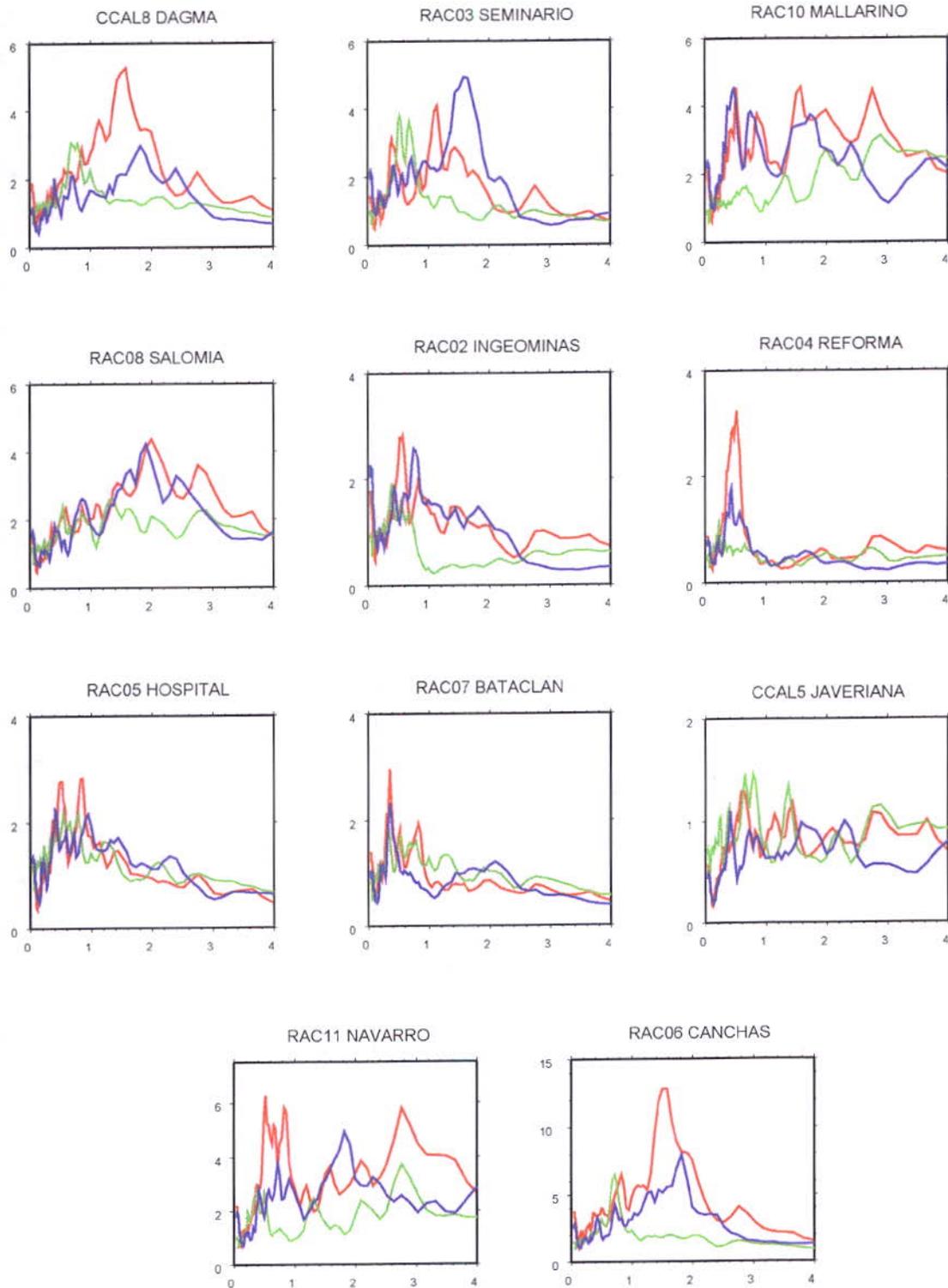


Figura 4. Espectros de amplificación por el sismo de Pizarro (Noviembre 15 de 2004) tomando como estación de referencia la ubicada en el Zoológico.

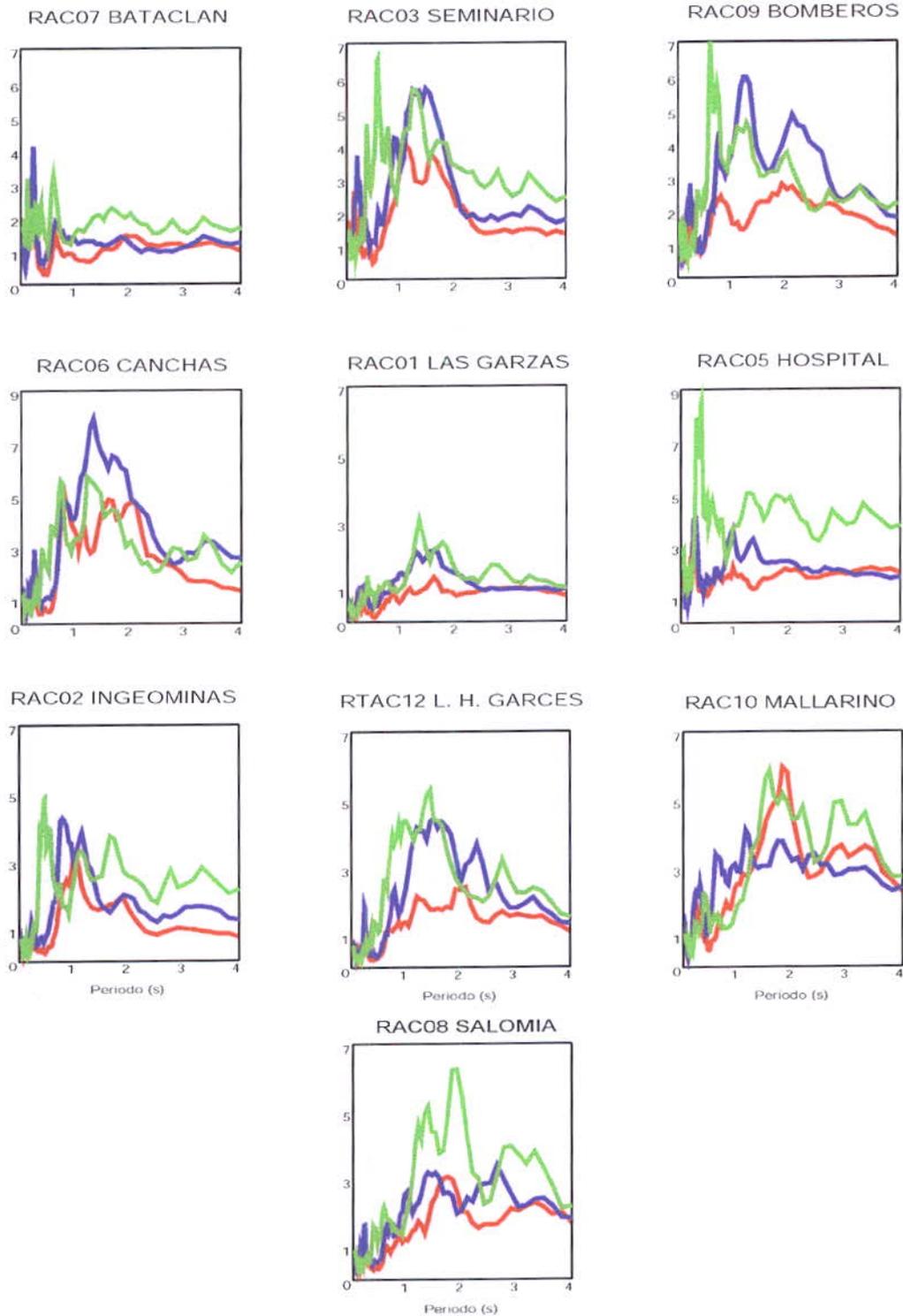


Figura 5. Espectros de amplificación por el sismo de Sipí (Octubre 22 de 2005) tomando como estación de referencia la ubicada en la Reforma.



Tabla 4. Períodos dominantes en las estaciones de RPAC y RAC por los sismos de Pizarro y Sipí y por microtrepidaciones.

Redes de Acelerógrafos de Cali - RAC y RPAC			
ID	Ubicación de la Estación	Período (seg) predominante por Sismo Pizarro/Sipí	Período (seg) predominante por microtrepidaciones
RAC02	Ingeominas	1.0 / 1.0	1,0
RAC03	Seminario Teológico Bautista	1.2 / 1.3	1,0
RAC04	Planta La Reforma	0,3	0,3
RAC05	Hospital Universitario	1.0 / 1.0	0,7
RAC06	Canchas Panamericanas	1.5 / 1.6	1,5
RAC07	Ecoparque Bataclán	0.3 / 0.2	0,1
RAC08	Tránsito Salomía	2.0 / 2.0	1,7
RAC10	Planta Puerto Mallarino	2.0 / 2.0	1,7
RAC11	Navarro	2.0 / 2.3	1,7
CAL5	Vivero del Norte DAGMA	1,7	2,0
CAL7	Universidad Autónoma	0,8	1,4
CAL8	Universidad Javeriana	0,5	0,6



CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Sobre la confiabilidad de las mediciones y resultados de microtrepidaciones se pueden resaltar dos aspectos: el primero está relacionado con el hecho que las mediciones se realizaron con el equipo adecuado, esto es muy importante, ya que los resultados dependen en gran medida de la calidad e idoneidad de los equipos utilizados para las mediciones, incluso ésta es más importante que la técnica de análisis misma. Estudios realizados en el pasado demuestran de manera muy clara y contundente, que solamente el uso de sensores de banda ancha, con digitalizadores de banda ancha y muy alta resolución (24 bits), permiten obtener un correcto y confiable registro de microtrepidaciones, incluso las mediciones realizadas inicialmente para el sector de Navarro, donde se compararon mediciones con sensores de periodo corto y sensores de banda ancha, demostraron que las mediciones con banda ancha son más estables y presentan resultados más claros. El uso del sensor de banda ancha es más apropiado, pues los períodos largos (mayores a 1 seg.) se registran con más confiabilidad (Havskov y Alguacil, 2002).

El segundo aspecto a resaltar esta relacionado con la calibración de los resultados obtenidos, con la ocurrencia del sismo de Pizarro y los registros acelerográficos obtenidos en la ciudad de Santiago de Cali, fue posible estimar los espectros de amplificación y las funciones de transferencia para diferentes zonas de la ciudad (INGEOMINAS, 2004), de esta manera fue posible comparar los periodos predominantes de los suelos obtenidos por mediciones de microtrepidaciones, y por movimiento fuerte durante un sismo. Este tipo de comparaciones son determinantes en el momento de validar estudios de microtrepidaciones (Ojeda y otros, 2002). Los resultados obtenidos demuestran claramente que la ciudad de Santiago de Cali tiene una respuesta sísmica heterogénea, y las condiciones locales juegan un papel determinante para los posibles efectos que pueden causar futuros sismos en la ciudad.

Los períodos de vibración obtenidos con microtrepidaciones indican que la respuesta fundamental de los suelos está dominada por periodos entre 0.1 y 2.0 seg. Estos resultados son confiables gracias al apropiado uso de sensores de banda ancha para las mediciones. Los resultados están en acuerdo con las condiciones geotécnicas, geológicas y geofísicas de la ciudad.

Los resultados obtenidos con las microtrepidaciones fueron comparados con los obtenidos con registros de movimiento fuerte en la RPAC y la RAC, como resultado se concluye que las microtrepidaciones determinaron de manera muy precisa y confiable los periodos de vibración de los suelos de la ciudad. Por lo anterior, el mapa de isoperíodos presentado es una herramienta útil y muy precisa para la microzonificación sísmica de la ciudad.

Los resultados obtenidos en este estudio son de vital importancia para la microzonificación sísmica de la ciudad, pues, ayudarán a determinar con mejor precisión el espectro de diseño correspondiente para cada zona de la ciudad identificada.



CAPITULO 6

BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. (1957). Space and time spectra of stationary stochastic waves with special referent to microtremors. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokio Univ. 35, 415-417.
- Havskov, J. and G. Alguacil (2002). Version Preliminary. Instrumentation in Earthquake Seismology.
- Horike, M. (1985). Inversion of phase velocity of long period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized areas. J. Phys. Earth. 33, 59-96.
- Hough, S.E., L. Seeber, A. Rovelli, L. Malagnini, A. DeCesare, G. Selveggi and A. Lerner-Lam (1992). Ambient noise and weak-motion excitation of sediment resonances: results from the Tiber valley, Italy. Bull. Seism. Soc. Am. 82, 1186-1205.
- INGEOMINAS (2001). Zonificación sismogeotécnica indicativa del área metropolitana de Bucaramanga.
- INGEOMINAS (2002). Zonificación sismogeotécnica indicativa de la Ciudad de Villavicencio.
- INGEOMINAS (2004). El Sismo de Pizarro del 15 de Noviembre de 2004: Parámetros de la Fuente, Movimiento Fuerte y Daños. Bogotá.
- Irikura, K. and T. Kawanaka (1980). Characteristics of microtremors of ground with discontinuous underground structure. Bull. Disas. Prev. Inst. Kyoto Univ. 30-3, 81-96.
- Kanai, K. y T. Tanaka (1961). On microtremors. VIII, Bull. Earthquake. Res. Ints., Tokyo Univ., 39, 97-114.
- Lacave, C., P-Y, Bard and M.G. Koller (2003). Microzonation: techniques and examples. Web Site: www.ndk.ethz.ch
- Lermo, J. y F. J. Chávez-García (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1350-1364.
- Ojeda, A. (1996). Períodos de vibración dominantes en suelos de Santafé de Bogotá a partir de microtrepidaciones. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes.
- Ojeda, A. y J. Escallon (2000). Comparison between different techniques for evaluation of predominant periods using strong ground motion records and microtremors in Pereira Colombia. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 20, 137-143.
- Ojeda, A., Martines, S., Bermúdez, M., y K. Atakan (2002). The new accelerograph network for Santafé De Bogotá, Colombia and implications for microzonation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22, 791-797.



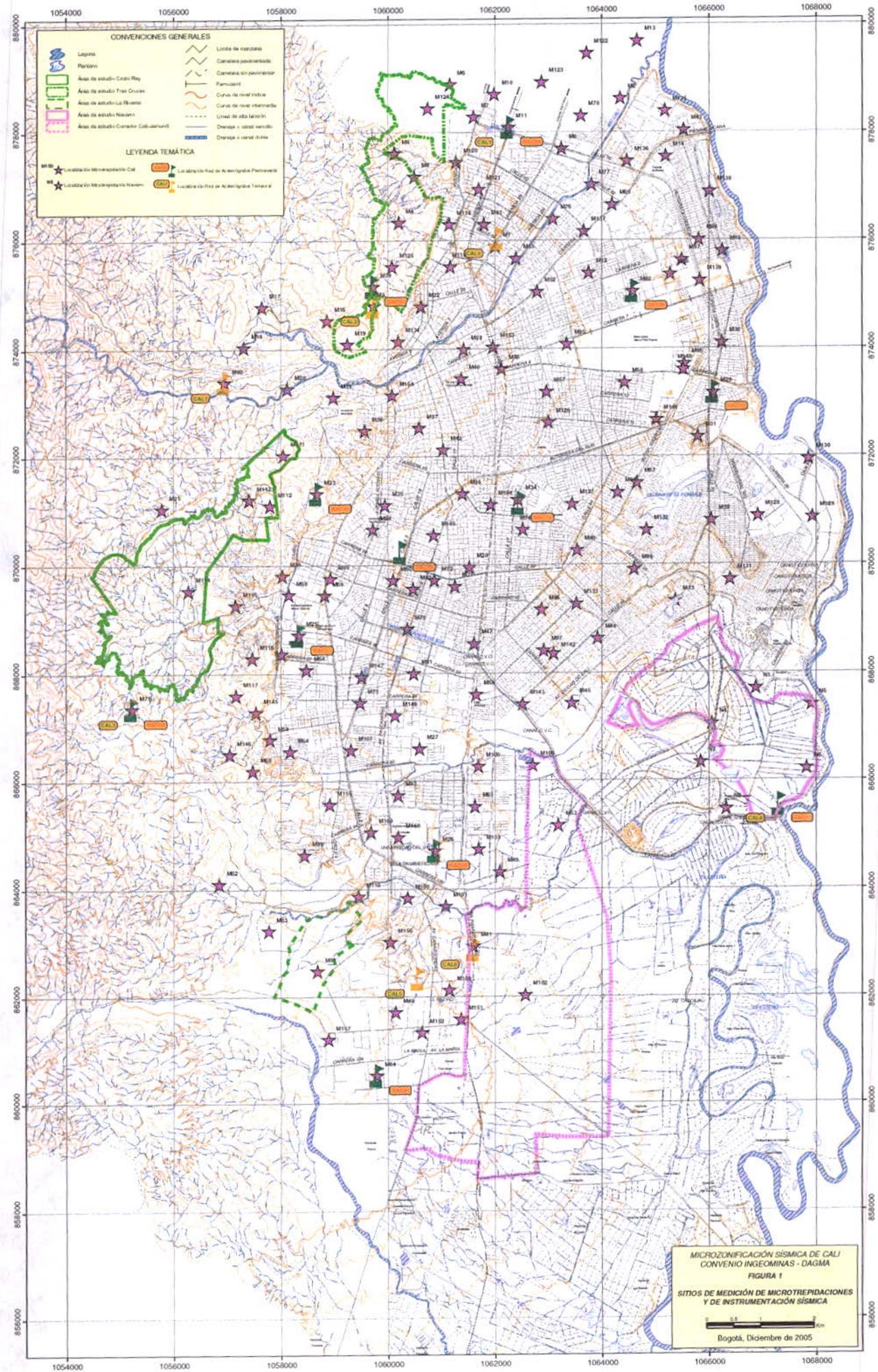
Omote, S., N. Nakajima and N. Kobayashi (1973). Some considerations for the relation between microtremors and underground structure. Bull. Int. Inst. Seism. Earthquake Eng. 11, 9-19.

Sakajiri, S. (1982). Experimental study on fundamental characteristics of long period microtremors. Bull. H. I. T. 2, 112-154.

Sato, T., H. Kawase, M. Matsui and S. Kataoki (1991). Array measurement of high frequency microtremors for underground structure estimation. Proc. 4th Int. Conf. on Seismic Zonation Stanford, California. Vol II, 409-415.

Tokimatsu, K., Y. Miyadera (1992). Characteristics of Rayleigh waves in microtremors and their relation to underground structures. J. Struct. Const. Engng., AIJ, No. 511, 69-75.

Tokimatsu K. (1995). Geotechnical site characterization using surface waves. Proc. 1st Int. Conf. on Earthq. Geotech. Engng. Vol 3, 1333-1368.



CONVENIONES GENERALES

- Laguna
- Parque
- Área de estudio Cacho Rey
- Área de estudio Tres Cruces
- Área de estudio Naviero
- Área de estudio Comendador Caballero
- Límite de microzona
- Carretera pavimentada
- Carretera sin pavimentar
- Pavimental
- Curva de nivel trazo
- Curva de nivel existente
- Línea de alta tensión
- Drenaje a canal abierto
- Drenaje a canal dicteo

LEYENDA TEMÁTICA

- M1-M150: Localización de Microestaciones CSM
- M1-M150: Localización de Estación de Aceleración Paramétrica
- M1-M150: Localización de Estación de Aceleración Temporal

MICROZONIFICACIÓN SISMICA DE CALI
CONVENIO INGEOMINAS - DAGMA
FIGURA 1
SITIOS DE MEDICIÓN DE MICROTREPIDACIONES
Y DE INSTRUMENTACIÓN SISMICA

Bogotá, Diciembre de 2005

884

ANEXO 1

REGISTROS DE MICROTREPIDACIONES.

ARCHIVO DIGITAL

ANEXO 2

COCIENTES ESPECTRALES.

ARCHIVO DIGITAL

886

ANEXO 3

**ESPECTROS PROMEDIOS.
ARCHIVO DIGITAL**

ANEXO 4

FOTOGRAFÍAS DE INSTALACIÓN Y MEDICIÓN DE MICROTREMORES EN SANTIAGO DE CALI

Foto 1. Instalación de equipos de la Red de Acelerógrafos de Cali y medición de Microtrepidaciones en la estación Ecoparque Bataclán. En la imagen se muestran un acelerógrafo Etna (Kinematics) para registro de movimiento fuerte (caja oscura), y además el equipo para la medición de microtremores, el cual se componen de un sistema de digitalización y almacenamiento de datos Orion (caja amarilla) y un sismómetro de banda ancha (al fondo).





Foto 2. Instalación de los equipos de medición de Microtremores en la estación de Ecoparque Bataclán en la ciudad de Cali.

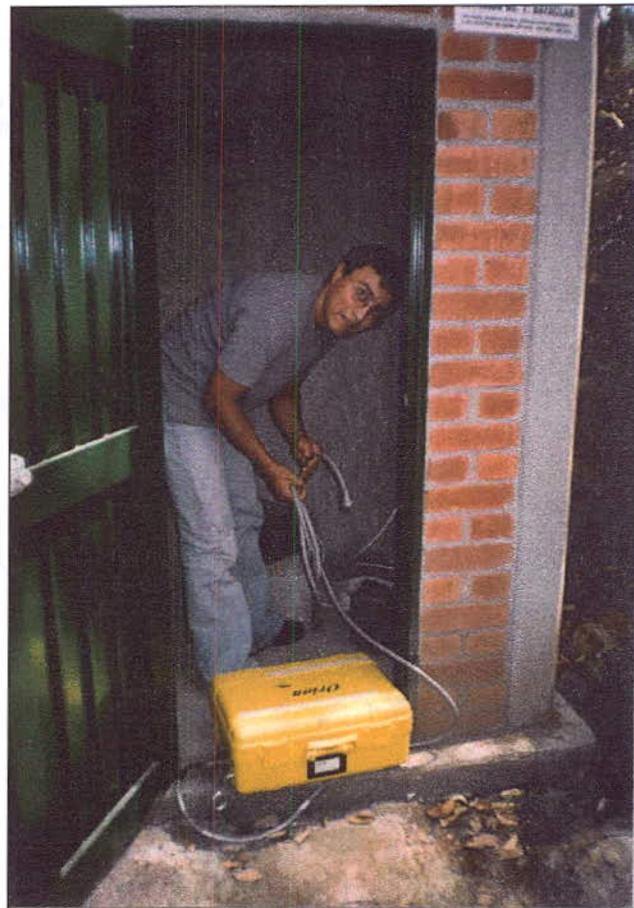




Foto 3. Detalle de los equipos utilizados en la medición de microtremores en la Estación Luis H. Garcés (RAC). En la imagen se observa el sistema de digitalización y almacenamiento Orion y el sismómetro de banda ancha Guralp CMG-40T, con el cual se registraron los microtremores.





Foto 4. Instalación y configuración de la estación acelerográfica Zoológico, perteneciente a Red Portátil de Acelerógrafos de Cali (RPAC – INGEOMINAS). En la imagen se observa personal especializado de INGEOMINAS configurando el acelerógrafo SSA-2 (Kinometrics).

