

ESTIMACIÓN DEL T_s . EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA

Samuel Pachón, Ingeniero Civil, INGEOMINAS. spachon@ingeomin.gov.co
Samuel Martínez, Ing. Civil, INGEOMINAS. smartine@ingeomin.gov.co
María Luisa Bermúdez, Ing. Civil, M.Sc., INGEOMINAS. mbermu@ingeomin.gov.co
Aníbal Ojeda, Ing. Civil, MPhil, Ph.D., INGEOMINAS. aojeda@ingeomin.gov.co

RESUMEN: Las condiciones locales o efectos de sitio, son de los factores más influyentes en la distribución de los daños en una ciudad durante un sismo, de allí la importancia de adelantar estudios tendientes a determinar el comportamiento dinámico de los suelos y su respuesta cuando están sometidos a cargas dinámicas como son las de un sismo. Dentro de este estudio, se llevó a cabo la determinación de efectos de sitio mediante la utilización de registros de microtrepidaciones o vibraciones ambientales y también con datos sísmicos obtenidos de una red local de acelerógrafos instalada en el área, la información sísmica sirvió de base para calibrar y verificar los resultados obtenidos con las microtrepidaciones. Para el análisis de las microtrepidaciones y los registros sísmicos se utilizó la técnica de Nakamura. Los resultados nos evidencian zonas de comportamiento dinámico distinto con períodos que van desde 0.10 seg. hasta valores del orden de 0.50 seg. Donde los períodos más cortos se presentan sobre la roca y los más largos en los sitios donde el estrato rocoso se empieza a profundizar. En este estudio se presenta el mapa de isoperíodos a partir de microtrepidaciones para el área metropolitana de Bucaramanga (Incluyendo Floridablanca, Piedecuesta y Girón), donde se da una idea de la distribución de los períodos fundamentales del suelo en el área de interés; los mapas obtenidos a partir de microtrepidaciones, pueden ser considerados como una zonificación preliminar de la zona de estudio, que debe ser complementada con estudios geotécnicos y modelaciones más detalladas del comportamiento dinámico de los suelos con el fin de establecer zonas preliminares de respuesta sísmica similar de tal forma que se puedan definir algunas recomendaciones iniciales para el diseño y construcción de edificaciones. Estas recomendaciones dependen fundamentalmente de la respuesta de sitio, que a su vez está ligada a las características geotécnicas y topográficas del mismo.

PALABRAS CLAVES: Microtrepidación, período fundamental (T_s), cociente espectral, espectro de respuesta, isoperíodo.

1. METODOLOGIA Y DATOS.

Instrumentación Sísmica.

En la ciudad de Bucaramanga se han instalado siete estaciones acelerográficas, cuya localización se observa en la Figura 1, repartidas en toda su área metropolitana, las cuales tienen por objeto el registro de sismos en los diferentes tipos de suelo presentes en la ciudad, con el fin de observar efectos de amplificación o atenuación de las ondas sísmicas debido a efectos locales. Esta red funciona desde Julio de 1996 y ha sido operada y mantenida por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC). Actualmente se tienen registros de alrededor de ciento veinte (120) acelerogramas triaxiales, los cuales en su mayoría provienen del Nido Sísmico de Bucaramanga. El primer acelerógrafo instalado por la RNAC en Bucaramanga fue el 26 de Julio de 1995 en la hacienda La Esperanza, propiedad de la CDMB. Durante el año de 1996 se instalaron dos estaciones más, en la Universidad Industrial de Santander (UIS) y en las oficinas de la Unidad Operativa Regional de INGEOMINAS (UOR). La última fase de instalación se llevó a cabo en 1997, año en el cual cuatro acelerógrafos nuevos fueron ubicados y se retiró el acelerógrafo de INGEOMINAS. Esta red funcionó con las seis estaciones hasta Junio de 2001, fecha en la cual fue necesario trasladar los equipos ubicados en CBUC3, CBUC4 y CBUC6, ha otra región del país. En la actualidad la ciudad cuenta con tres acelerógrafos instalados, CBUC1, CBUC5, y CBUIS.

Los acelerógrafos de la Red Local de Bucaramanga son de marca KINEMETRICS, modelos SSA-2MC y ETNA de tres componentes con 16 y 24 bits de resolución, respectivamente. Los acelerógrafos disponen de almacenamiento en tarjetas de memoria PCMCIA de 1 a 5 Mbytes; algunos datos importantes sobre los instrumentos y su ubicación son presentados en la Tabla 1. Todos los sitios escogidos garantizaban el buen funcionamiento y la seguridad de los equipos.

Estación	Código	Modelo	Latitud (°)	Longitud (°)	Geología	Topografía	Observaciones
CDMB	CBUC1	ETNA	7.0695	-73.0716	Roca	Ondulada	En funcionamiento
INGEOMINAS	CBUC2	ETNA	7.0719	-73.0838	Suelo	Plana	Retirado (Julio/97)
PTAR	CBUC3	SSA-MC	7.0652	-73.1298	Suelo	Plana	Retirado (Junio/01)
GIRON	CBUC4	ETNA	7.0618	-73.1660	Suelo	Plana	Retirado (Junio/01)
PIEDECUUESTA	CBUC5	ETNA	6.9972	-73.0659	Suelo	Plana	En funcionamiento
CAÑAVERAL	CBUC6	ETNA	7.0696	-73.1044	Suelo	Plana	Retirado (Junio/01)
UIS	CBUIS	ETNA	7.1407	-73.1185	Suelo	Plana	En funcionamiento

Tabla 1 Características de la Red Local de Acelerógrafos de Bucaramanga

Microtrepidaciones en el área Metropolitana de Bucaramanga.

Las microtrepidaciones son vibraciones de baja amplitud del terreno y están conformadas por ondas internas y superficiales, pueden ser de período largo y corto. Las primeras mayores a 1 seg. y están conformados por ondas superficiales Rayleigh y Love generadas por fuentes naturales, como el viento, olas del mar y variaciones de presión de aire; las segundas son de período menor a 1 seg. y son producidos por fuentes artificiales tales como el tráfico vehicular, actividad de plantas industriales, maquinarias, es decir, básicamente de carácter antrópico.

La zona de estudio considerada, corresponde al área metropolitana de Bucaramanga, la cual comprende la ciudad de Bucaramanga y los municipios de Floridablanca, Piedecuesta y Girón. El trabajo tuvo una duración de seis meses, en los cuales se realizaron dos fases de mediciones en campo, la primera durante Octubre de 2000, tomando 154 sitios para el registro de microtrepidaciones, la segunda fase durante Diciembre de 2000, con el fin de complementar la información previa, tomando datos en 83 sitios adicionales. En total se tomaron registros en 237 sitios distintos, en cada uno de estos sitios se tomaron al menos tres registros de vibración ambiental con una duración alrededor de 20 seg., durante lapsos de tiempo donde los ruidos locales fueran bajos, para que la señal no se viera afectada. La posición geográfica de cada uno de los puntos se obtuvo con medidas de GPS, su localización se muestra en la Figura 1. Para la selección de los sitios se tuvieron en cuenta varios factores: que fuera un suelo representativo de la zona, que no se tuvieran ruidos locales cerca, que estuviera en campo libre, que no pasaran vías de alto flujo vehicular cerca y que estuviera alejado de edificios o arboles altos.

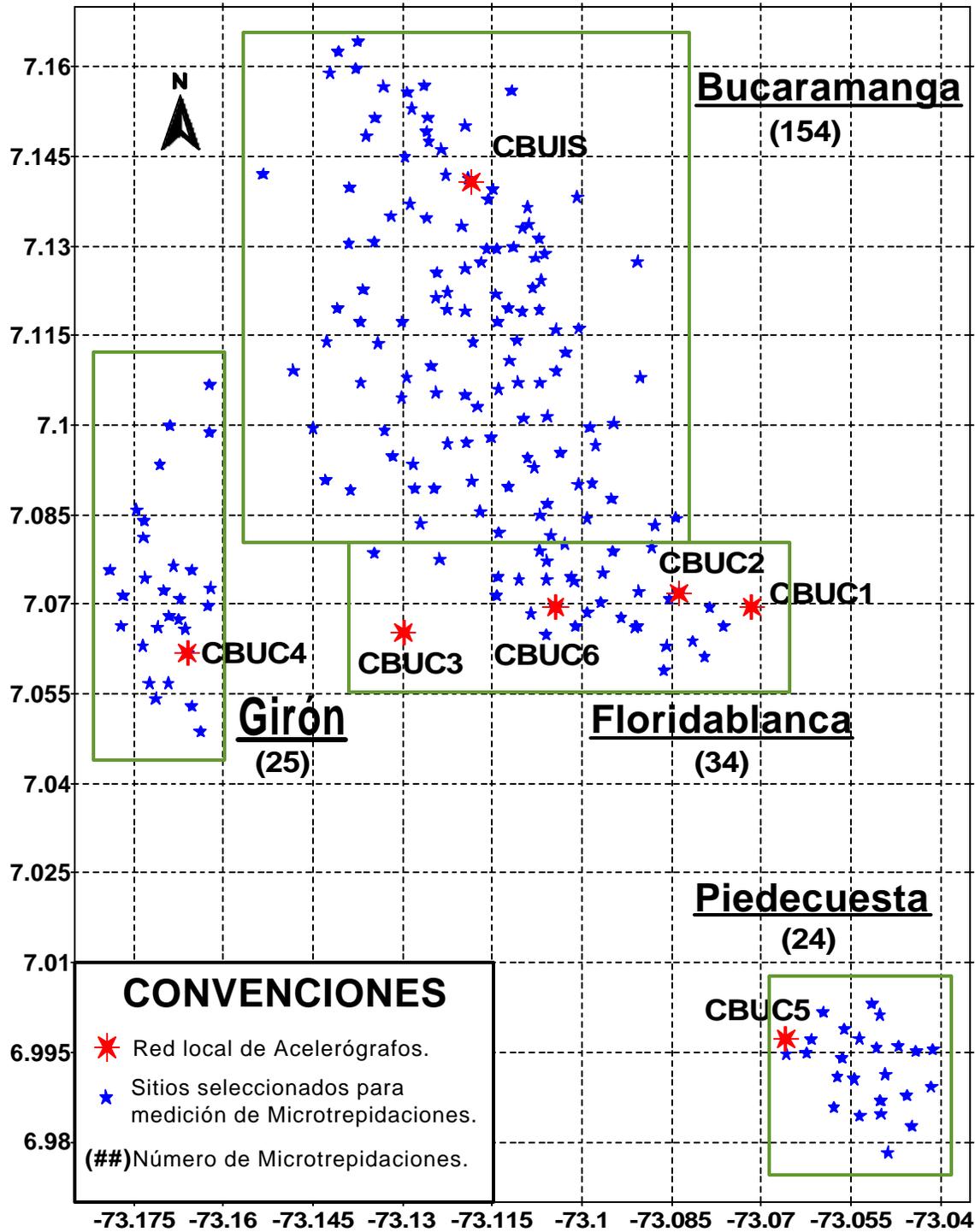


Figura 1 Localización de la Red local de Acelerógrafos de Bucaramanga y de los puntos donde se realizaron mediciones para el estudio de vibración ambiental (Microtrepidaciones).

El equipo utilizado para registrar las microtrepidaciones fue un acelerógrafo Kinemetrics, Modelo ETNA con tres sensores FBA triaxiales ortogonales con rango dinámico de 108 dB y 24 bits de resolución. La frecuencia de muestreo utilizada fue de 200 muestras por segundo, (frecuencia de Nyquist 100 Hz). La respuesta lineal de los sensores va desde DC hasta 80 Hz. El mecanismo de disparo se configuró de forma manual, activado por un computador portátil.

Técnica utilizada en el Análisis de Microtrepidaciones.

Para el análisis de microtrepidaciones, se utilizó el cálculo de las relaciones espectrales entre la componente horizontal y vertical del movimiento en un mismo sitio o técnica de Nakamura.

Técnica de Nakamura

Nakamura (1989), propuso que las microtrepidaciones podían evaluar los efectos de sitio simplemente evaluando la relación o cociente espectral entre las componentes horizontales y verticales del movimiento registrado en el mismo sitio. El método asume que :

Las microtrepidaciones consisten de ondas Rayleigh, propagándose en una capa que está encima de un espacio infinito.

El movimiento es totalmente debido a fuentes locales y todas las fuentes profundas son despreciadas.

Las fuentes locales no afectan el movimiento de las microtrepidaciones en la base del estrato de suelo.

Considerando un estimador de los efectos de sitio de interés, estarían dados por :

$$S_E = H_s(w) / H_b(w) \quad (1)$$

donde S_E representa el espectro de los efectos de sitio, $H_s(w)$ es el espectro de la onda horizontal en superficie y $H_b(w)$ es el espectro de la onda horizontal en la base del movimiento.

Puesto que las ondas internas de las microtrepidaciones contienen ondas de superficie es necesario corregirlas removiendo los efectos de ondas superficiales. Nakamura asume que el efecto de las ondas Rayleigh (A_S), está incluido en el espectro de ondas verticales superficiales (V_S) y no en la base del movimiento (V_b) y consecuentemente este puede ser definido como:

$$A_S(w) = V_s(w) / V_b(w) \quad (2)$$

Removiendo el efecto de ondas Rayleigh, el espectro de sitio modificado queda definido por:

$$S_M(w) = S_E(w) / A_S(w) = (H_s/V_s) / (H_b/V_b) \quad (3)$$

Nakamura demostró experimentalmente, usando registros de borehole y microtrepidaciones que:

$$H_b(w) / V_b(w) \approx 1 \quad (4)$$

De lo anterior queda que:

$$S_M(w) \approx H_s(w) / V_s(w) = N_S(w) \quad (5)$$

De esta manera, Nakamura concluyó que la relación o cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del movimiento en un mismo sitio puede ser usada como un estimativo de los efectos de sitio para ondas internas. La técnica de Nakamura es muy atractiva, ya que elimina los efectos de fuente, patrón de radiación, directividad y camino que se presentan en los sismos. Sin embargo, la validez de la técnica de Nakamura no ha sido aun bien establecida, especialmente en estratos de suelos blandos muy profundos.

Lermo y Chávez-García (1994), modelaron las microtrepidaciones como ondas Rayleigh propagándose a través de una capa sobre un semiespacio infinito, la técnica de Nakamura fue evaluada en este modelo y los resultados mostraron que las hipótesis de Nakamura es consistente con la propagación de ondas Rayleigh.

Lachet y Bard (1995), investigaron la aplicabilidad tanto numérica como teórica de la técnica de Nakamura, considerando registros en una estación sujeta a fuentes de ruido aleatorio. Ellos concluyeron, que la técnica de Nakamura puede ser usada para determinar la frecuencia fundamental de resonancia del estrato de suelo blando, pero falla al predecir la amplificación de las ondas en superficie. Además, ellos mostraron que la frecuencia fundamental de resonancia del estrato obtenida con la técnica de Nakamura, usando simulaciones de ruido ambiental es independiente de la fuente de excitación, dependiente de la relación de Poisson's y controlada por la curva de polarización de las ondas Rayleigh.

Yamanaka (1996), investigó la aplicabilidad de la técnica de Nakamura en microsismos de la región de Kanto Plain, Japón. Él encontró que el espectro obtenido con la técnica de Nakamura es estable con el

tiempo. Los resultados obtenidos en sismos y microtrepidaciones con la técnica de Nakamura para ondas Rayleigh son consistentes y que la técnica de Nakamura, puede ser utilizada para determinar la estructura de la sub - superficie.

Dravinski (1996), mostró que para modelos bi y tri dimensionales de valles aluviales, la técnica de Nakamura utilizada para diferentes ondas incidentes, es buena para predecir la frecuencia fundamental de resonancia del estrato, pero no determina la frecuencia de resonancia más alta. Concluye que el error en la técnica de Nakamura, incrementa para sitios cerca al centro del valle y también falla al predecir la amplificación del sitio.

Sismicidad de la Red Local de Bucaramanga.

Los acelerógrafos de Bucaramanga han registrado aproximadamente (120) ciento veinte eventos sísmicos, los cuales han sido publicados en los Boletines de Movimiento Fuerte. En su mayoría los registros pertenecen a sismos ocurridos en el Nido sísmico de Bucaramanga, el cual presenta una actividad frecuente. Aproximadamente el 60% de los sismos registrados por la Red Sismológica Nacional de Colombia – RSNC – provienen de esta fuente sísmica.

El sismo más destacado de los registrados en Bucaramanga ocurrió en Betulia (Santander) el 8 de Noviembre de 1999 con una magnitud de $ML = 6.5$, el cual disparó toda la red de la ciudad y se tuvieron aceleraciones pico máximas superiores a los 10 Gales. La sismicidad registrada y algunas de sus características son presentadas en la Tabla 2.

Espectros de Respuesta de sismos registrados en Bucaramanga.

Con el fin de observar el comportamiento dinámico de los diferentes suelos de la ciudad se analizaron los espectros de respuesta para un oscilador simple de un grado de libertad. En las Figuras 2 a 8 se muestran los espectros para los sismos más representativos registrados en cada estación. Las estaciones CBUC1 y CBUIS muestran dos sismos en cada figura, el sismo del Nido de Bucaramanga registrado el 1 de Enero de 1997 con $ML = 6.2$ y el sismo de Betulia (Santander) del 08 de Noviembre de 1999 con $ML = 6.5$. Para la estación CBUC2 se uso el registro del sismo del 7 de Marzo de 1997 del Nido de Bucaramanga con magnitud $ML = 5.9$; en el resto de estaciones se uso el sismo de Betulia antes mencionado.

En los Espectros de Respuesta podemos apreciar que las mayores aceleraciones espectrales, para el sismo de Betulia se encuentran en las estaciones CBUC3 y CBUC5. También podemos ver que los períodos dominantes son bajos, menores a 1.0 segundo, para todas las estaciones.

No.	Epicentro del Sismo	Fecha	Magnitud	Profundidad	Lat.	Long.	Estación	Aceleración Máxima (Gales)			Dist. Hipoc.
		dd-mm-aa	(mL)	(Km)	Epic.	Epic.		E-W	VERT.	NS	
1	Risaralda (Cald.)	19-Nov-95	6.6	110	5.11	-75.71	CBUC1	3.200	2.100	3.700	384.374
2	Nido de B/manca (Sant.)	12-Nov-95	5.3	145	7.04	-73.27	CBUC1	2.700	1.800	2.900	147.017
3	Nido de B/manca (Sant.)	08-Ene-96	5.7	150	6.75	-73.13	CBUC1	3.700	1.900	3.500	155.156
4	El Carmen (Sant.)	02-Sep-96	2.5	110	6.65	-73.49	CBUC1	10.100	5.600	10.900	129.941
5	Nido de B/manca (Sant.)	12-Oct-96	5.3	150	6.83	-73.13	CBUC1	1.600	0.500	1.000	153.169
6	Nido de B/manca (Sant.)	12-Oct-96	5.3	150	6.83	-73.13	CBUC2	3.500	2.300	3.900	153.920
7	Nido de B/manca (Sant.)	12-Dic-96	5.4	160	6.74	-73.18	CBUIS	2.878	1.717	2.501	166.240
8	Nido de B/manca (Sant.)	01-Ene-97	6.2	160	6.81	-73.10	CBUC1	5.707	3.364	7.367	163.273
9	Nido de B/manca (Sant.)	01-Ene-97	6.2	160	6.81	-73.10	CBUIS	13.160	11.750	12.140	164.151
10	Curití (Sant.)	01-Feb-97	4	Superficial	6.57	-73.05	CBUIS	2.357	2.089	2.164	63.691
11	Nido de B/manca (Sant.)	07-Mar-97	5.9	150	6.78	-73.29	CBUC1	2.711	4.346	2.968	156.260
12	Nido de B/manca (Sant.)	07-Mar-97	5.9	150	6.78	-73.29	CBUC2	5.366	10.630	7.038	156.525
13	Aquazul (Casa.)	10-Mar-97	5.5	Superficial	5.17	-72.57	CBUC1	0.376	0.187	0.502	221.248
14	Nido de B/manca (Sant.)	02-May-97	4	160	6.86	-72.99	CBUC1	1.056	0.295	0.632	162.393
15	Nido de B/manca (Sant.)	11-May-97	5.9	160	6.80	-73.09	CBUC1	0.387	0.685	0.388	163.469
16	Nido de B/manca (Sant.)	11-May-97	5.9	160	6.80	-73.09	CBUC2	3.878	2.633	5.242	164.414
17	Nido de B/manca (Sant.)	11-May-97	5.9	160	6.80	-73.09	CBUIS	8.651	6.122	7.138	164.414
18	Nido de B/manca (Sant.)	11-Jun-97	6.1	160	6.83	-72.97	CBUC2	2.424	2.047	3.364	164.403
19	Nido de B/manca (Sant.)	11-Jun-97	6.1	160	6.83	-72.97	CBUC1	3.265	1.246	2.243	163.095
20	Nido de B/manca (Sant.)	11-Jun-97	6.1	160	6.83	-72.97	CBUIS	5.467	4.846	5.127	164.403
21	Nido de B/manca (Sant.)	11-Jun-97	6.2	170	6.85	-73.05	CBUC1	2.708	1.318	2.585	172.258
22	Nido de B/manca (Sant.)	11-Jun-97	6.2	170	6.85	-73.05	CBUC2	4.002	2.902	5.007	173.155
23	Nido de B/manca (Sant.)	11-Jun-97	6.2	170	6.85	-73.05	CBUIS	8.629	4.414	8.112	173.155
24	Nido de B/manca (Sant.)	24-Jun-97	5.5	160	6.81	-73.03	CBUC2	2.583	1.687	2.256	164.388
25	Nido de B/manca (Sant.)	24-Jun-97	5.5	160	6.81	-73.03	CBUC1	1.088	2.035	1.072	163.246
26	Nido de B/manca (Sant.)	24-Jun-97	5.5	160	6.81	-73.03	CBUIS	4.904	10.870	5.382	164.388
27	Nido de B/manca (Sant.)	24-Jun-97	5.5	160	6.86	-73.04	CBUC2	2.223	2.281	2.636	163.182
28	Nido de B/manca (Sant.)	24-Jun-97	5.5	160	6.86	-73.04	CBUIS	5.864	3.096	4.679	163.182
29	Génova (Quind.)	02-Sep-97	6.8	230	3.96	-75.87	CBUC1	2.492	1.274	1.821	521.638
30	Génova (Quind.)	02-Sep-97	6.8	230	3.96	-75.87	CBUC2	3.141	2.189	5.015	521.334
31	Génova (Quind.)	02-Sep-97	6.8	230	3.96	-75.87	CBUIS	5.221	2.702	4.826	521.334
32	Nido de B/manca (Sant.)	16-Oct-97	5.3	170	6.15	-73.04	CBUC1	1.032	0.378	0.807	200.117
33	Génova (Quind.)	11-Dic-97	6.6	220	4.00	-75.95	CBUC1	0.897	0.476	0.746	519.764
34	Génova (Quind.)	11-Dic-97	6.6	220	4.00	-75.95	CBUC4	1.915	0.886	1.509	519.325
35	Génova (Quind.)	11-Dic-97	6.6	220	4.00	-75.95	CBUIS	2.693	1.757	3.127	519.325
36	Génova (Quind.)	11-Dic-97	6.6	220	4.00	-75.95	CBUC3	3.199	1.777	2.461	519.325
37	Nido de B/manca (Sant.)	18-Ene-98	5	150	6.84	-73.13	CBUC1	0.680	0.232	0.739	152.949
38	Nido de B/manca (Sant.)	20-Ene-98	5.3	160	6.82	-73.00	CBUC1	0.769	0.318	9.713	163.127
39	Nido de B/manca (Sant.)	13-Feb-98	3.5	160	6.85	-73.18	CBUC1	0.398	0.251	0.672	162.934
40	Nido de B/manca (Sant.)	04-Mar-98	4.3	150	6.38	-73.38	CBUC4	2.762	0.662	1.204	174.685
41	Nido de B/manca (Sant.)	04-Mar-98	4.3	Superficial	6.38	-73.38	CBUIS	5.118	1.692	3.727	174.685
42	Landázuri (Sant.)	06-Mar-98	5.4	Superficial	6.30	-73.90	CBUC6	4.155	1.497	4.340	98.000
43	Landázuri (Sant.)	06-Mar-98	5.4	Superficial	6.30	-73.90	CBUC1	4.043	2.152	4.708	123.000
44	Landázuri (Sant.)	06-Mar-98	5.4	Superficial	6.30	-73.90	CBUIS	3.705	2.943	3.278	128.000
45	Landázuri (Sant.)	06-Mar-98	5.4	Superficial	6.30	-73.90	CBUC4	2.762	0.662	1.204	127.997
46	Cimitarra (Sant.)	08-Mar-98	5.5	Superficial	6.27	-73.89	CBUC1	1.012	0.550	0.109	130.000
47	Cimitarra (Sant.)	08-Mar-98	5.5	Superficial	6.27	-73.89	CBUC4	1.893	1.071	1.893	130.000
48	Nido de B/manca (Sant.)	09-Mar-98	5.35	160	6.85	-73.18	CBUC1	3.705	2.943	3.278	162.934
49	Nido de B/manca (Sant.)	10-Mar-98	4.9	155	6.87	-73.18	CBUC1	1.010	0.397	0.842	157.652
50	Nido de B/manca (Sant.)	10-Mar-98	4.9	155	6.87	-73.18	CBUC4	1.984	0.853	1.964	158.062

Tabla 2 Sismicidad Registrada en la Red Local de Bucaramanga

No.	Epicentro del Sismo	Fecha dd-mm-aa	Magnitud (mL)	Profundidad (Km)	Lat. Epic.	Long. Epic.	Estación	Aceleración Máxima (Gales)			Dist. Hipoc. (Km.)
								E-W	VERT.	N-S	
51	Nido de B/manca (Sant.)	10-Mar-98	4.90	155	6.87	-73.18	CBUIS	2.220	2.277	2.140	158.062
52	Nido de B/manca (Sant.)	30-Mar-98	5.70	150	6.75	-73.18	CBUC1	0.777	0.487	0.911	156.000
53	Nido de B/manca (Sant.)	30-Mar-98	5.70	150	6.75	-73.18	CBUC4	2.314	1.317	2.711	156.000
54	Nido de B/manca (Sant.)	30-Abr-98	5.05	160	6.80	-73.10	CBUC1	0.818	0.387	0.107	163.489
55	Nido de B/manca (Sant.)	30-Abr-98	5.05	160	6.80	-73.10	CBUIS	1.399	0.783	1.060	164.394
56	Nido de B/manca (Sant.)	06-Mav-98	5.60	160	6.48	-73.08	CBUC1	1.161	0.369	0.874	174.187
57	Betulia (Sant.)	25-Mav-98	5.60	150	6.88	-73.19	CBUC1	1.636	1.086	1.701	152.658
58	Nido de B/manca (Sant.)	20-Ago-98	5.10	170	6.81	-73.08	CBUC1	0.889	0.334	0.759	173.035
59	Nido de B/manca (Sant.)	08-Oct-98	4.85	150	6.72	-73.09	CBUC1	0.508	0.263	0.629	155.853
60	Nido de B/manca (Sant.)	26-Oct-98	5.60	160	6.81	-73.13	CBUC1	3.091	1.112	2.185	165.000
61	Nido de B/manca (Sant.)	26-Oct-98	5.60	160	6.81	-73.13	CBUC6	5.986	3.737	6.205	165.000
62	Nido de B/manca (Sant.)	26-Oct-98	5.60	160	6.81	-73.13	CBUIS	5.986	3.737	6.205	164.000
63	Nido de B/manca (Sant.)	04-Dic-98	5.55	160	6.75	-73.09	CBUC1	1.719	0.643	1.134	164.683
64	Nido de B/manca (Sant.)	04-Dic-98	5.55	160	6.75	-73.09	CBUIS	3.603	1.791	4.628	165.768
65	Nido de B/manca (Sant.)	10-Dic-98	5.45	160	6.70	-73.10	CBUIS	1.914	1.624	2.122	167.292
66	Nido de B/manca (Sant.)	10-Dic-98	5.45	160	6.70	-73.10	CBUC1	0.867	0.336	0.748	166.106
67	Nido de B/manca (Sant.)	14-Ene-99	5.50	160	6.75	-73.13	CBUC1	1.140	0.691	0.928	164.026
68	Nido de B/manca (Sant.)	14-Ene-99	5.50	160	6.75	-73.13	CBUIS	2.130	2.042	2.178	165.799
69	Nido de B/manca (Sant.)	27-Ene-99	5.40	150	6.81	-73.18	CBUC5	2.013	1.316	2.474	151.968
70	Nido de B/manca (Sant.)	27-Ene-99	5.40	150	6.81	-73.18	CBUC1	1.210	0.480	1.262	153.225
71	Nido de B/manca (Sant.)	27-Ene-99	5.40	150	6.81	-73.18	CBUIS	2.841	1.892	3.049	154.593
72	Nido de B/manca (Sant.)	27-Feb-99	5.25	180	8.64	-73.02	CBUC1	0.981	0.252	0.685	181.891
73	Bosconia (Cesar)	18-Mar-99	6.10	100	10.07	-73.60	CBUC1	0.610	0.317	0.641	353.240
74	Nido de B/manca (Sant.)	14-Abr-99	6.10	170	6.82	-73.14	CBUC1	1.827	0.922	2.005	172.417
75	Nido de B/manca (Sant.)	14-Abr-99	6.10	170	6.82	-73.14	CBUC6	2.473	0.811	2.037	172.296
76	Nido de B/manca (Sant.)	14-Abr-99	6.10	170	6.82	-73.14	CBUIS	6.980	3.259	5.387	173.717
77	Nido de B/manca (Sant.)	19-Abr-99	5.30	160	6.79	-73.15	CBUC1	2.202	0.835	1.142	163.224
78	Nido de B/manca (Sant.)	19-Abr-99	5.30	160	6.79	-73.15	CBUIS	3.637	2.002	3.395	164.721
79	Nido de B/manca (Sant.)	20-Abr-99	4.90	160	6.83	-73.02	CBUC1	0.537	0.318	0.682	162.303
80	Nido de B/manca (Sant.)	17-Mav-99	5.20	160	6.83	-73.12	CBUC1	0.954	0.285	0.582	162.291
81	Nido de B/manca (Sant.)	17-Mav-99	5.20	160	6.83	-73.12	CBUC5	2.647	1.223	2.430	161.189
82	Nido de B/manca (Sant.)	17-Jul-99	5.30	155	6.78	-73.15	CBUC1	1.586	0.518	1.343	158.548
83	Nido de B/manca (Sant.)	17-Jul-99	5.30	155	6.78	-73.15	CBUC4	2.317	1.514	2.604	158.146
84	Nido de B/manca (Sant.)	17-Jul-99	5.30	155	6.78	-73.15	CBUIS	2.408	1.676	2.217	160.144
85	Sátiva Sur (Bova.)	17-Jul-99	5.60	Superficial	6.10	-72.74	CBUC1	2.746	1.332	2.690	113.940
86	Sátiva Sur (Bova.)	17-Jul-99	5.60	Superficial	6.10	-72.74	CBUIS	8.657	5.090	8.079	123.142
87	Sátiva Sur (Bova.)	17-Jul-99	5.60	Superficial	6.10	-72.74	CBUC4	5.194	4.688	5.966	116.973
88	Encino (Sant.)	17-Jul-99	1.80	Superficial	6.06	-73.18	CBUC3	10.920	4.048	8.677	111.918
89	Encino (Sant.)	17-Jul-99	1.70	Superficial	6.10	-73.24	CBUC5	2.013	1.315	2.470	101.630
90	Villanueva (Sant.)	26-Oct-99	5.30	160	6.72	-73.18	CBUC1	0.713	0.361	0.827	165.093
91	Villanueva (Sant.)	26-Oct-99	5.30	160	6.72	-73.18	CBUC5	4.633	1.854	4.244	163.435
92	Villanueva (Sant.)	26-Oct-99	5.30	160	6.72	-73.18	CBUIS	3.347	1.937	2.888	166.839
93	Nido de B/manca (Sant.)	02-Nov-99	4.80	160	6.70	-73.25	CBUC1	0.757	0.208	0.463	166.379
94	Nido de B/manca (Sant.)	02-Nov-99	4.80	160	6.70	-73.25	CBUC5	2.534	1.103	2.494	164.655
95	Betulia (Sant.)	08-Nov-99	6.50	160	6.92	-73.18	CBUC1	4.891	2.014	5.451	161.312
96	Betulia (Sant.)	08-Nov-99	6.50	160	6.92	-73.18	CBUC5	15.280	12.430	19.650	160.732
97	Betulia (Sant.)	08-Nov-99	6.50	160	6.92	-73.18	CBUC3	10.890	5.096	10.610	160.909
98	Betulia (Sant.)	08-Nov-99	6.50	160	6.92	-73.18	CBUC6	4.351	2.121	4.608	161.082
99	Betulia (Sant.)	08-Nov-99	6.50	160	6.92	-73.18	CBUC4	12.040	4.774	10.760	160.783
100	Betulia (Sant.)	08-Nov-99	6.50	160	6.92	-73.18	CBUIS	10.560	5.970	11.380	162.016

Tabla 2 (Continuación) Sismicidad Registrada en la Red Local de Bucaramanga

No.	Epicentro del Sismo	Fecha dd-mm-aa	Magnitud (mL)	Profundidad (Km)	Lat. Epic.	Long. Epic.	Estación	Aceleración Máxima (Gales)			Dist. Hipoc. (Km.)
								E-W	VERT.	N-S	
101	Nido de B/manca (Sant.)	05-Dic-99	4.70	160	6.65	-73.05	CBUC5	2.242	1.252	2.496	164.602
102	Nido de B/manca (Sant.)	12-Dic-99	5.55	160	6.82	-72.97	CBUC1	1.710	0.483	1.516	162.780
103	Nido de B/manca (Sant.)	12-Dic-99	5.55	160	6.82	-72.97	CBUC5	6.593	2.610	6.172	161.561
104	Nido de B/manca (Sant.)	12-Dic-99	5.55	160	6.82	-72.97	CBUIS	2.197	1.360	2.172	164.756
105	Nido de B/manca (Sant.)	12-Dic-99	5.55	160	6.82	-72.97	CBUC4	2.131	0.966	1.650	163.701
106	Nido de B/manca (Sant.)	07-Ene-00	2.70	150	6.81	-72.99	CBUIS	15.900	10.860	11.320	155.102
107	Gámbita (Sant.)	17-Ene-00	5.90	Superficial	6.64	-73.02	CBUC1	1.147	1.032	1.192	126.315
108	Nido de B/manca (Sant.)	05-Feb-00	6.00	160	6.77	-73.21	CBUC4	8.494	6.373	10.660	163.330
109	Nido de B/manca (Sant.)	20-Feb-00	5.20	163	6.79	-73.03	CBUC1	2.487	2.020	4.533	164.152
110	Nido de B/manca (Sant.)	24-Mar-00	3.20	156	6.79	-73.00	CBUC1	0.594	0.200	0.685	166.156
111	El Bagre (Ant.)	28-Mar-00	5.30	Superficial	7.72	-74.59	CBUC1	0.906	0.277	0.589	159.133
112	Jordán (Sant.)	05-Abr-00	5.60	163	6.74	-73.10	CBUC1	1.500	0.455	1.036	178.591
113	Nido de B/manca (Sant.)	25-Jul-00	5.40	150	6.92	-72.79	CBUC5	2.594	1.139	2.651	170.462
114	Puerto Berrio (Ant.)	04-Ago-00	3.90	Superficial	6.46	-74.32	CBUC1	3.743	1.190	2.704	167.097
115	Nido de B/manca (Sant.)	16-Ago-00	5.40	170	6.83	-73.03	CBUC1	0.525	0.343	0.677	166.703
116	Nido de B/manca (Sant.)	16-Ago-00	5.40	170	6.83	-73.03	CBUC5	3.564	1.810	3.224	171.060
117	Nido de B/manca (Sant.)	12-Sep-00	5.90	160	6.76	-73.18	CBUC1	0.509	0.207	0.774	154.484
118	Nido de B/manca (Sant.)	12-Sep-00	5.90	160	6.76	-73.18	CBUC5	25.370	9.573	23.460	162.655
119	Cimitarra (Sant.)	18-Nov-00	2.40	Superficial	6.06	-74.13	CBUC1	0.860	0.373	0.528	172.136
120	Nido de B/manca (Sant.)	24-Nov-00	5.70	160	6.79	-73.02	CBUC1	6.016	1.766	3.580	164.103

Tabla 2 (Continuación) Sismicidad Registrada en la Red Local de Bucaramanga

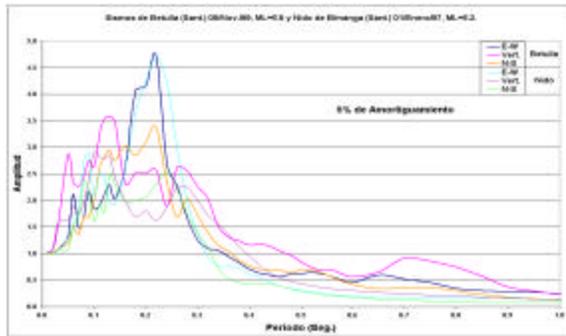


Figura 2 Espectro Normalizado para la Estación CBUC1 Estación CBUC2

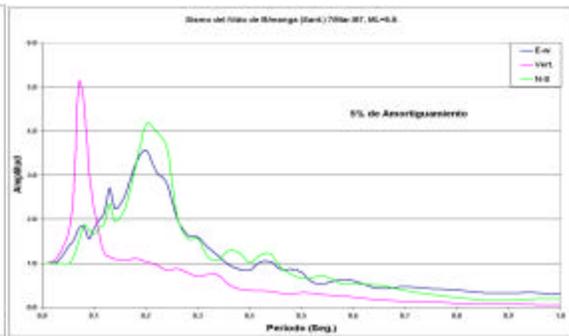


Figura 3 Espectro Normalizado para la Estación CBUC1

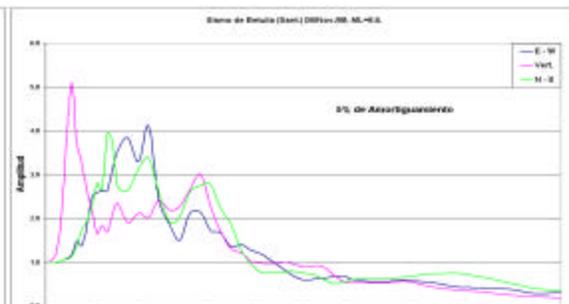
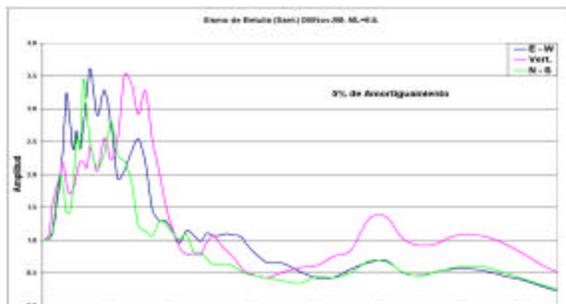


Figura 4 Espectro Normalizado para la Estación CBUC3
Estación CBUC4

Figura 5 Espectro Normalizado para la Estación CBUC3

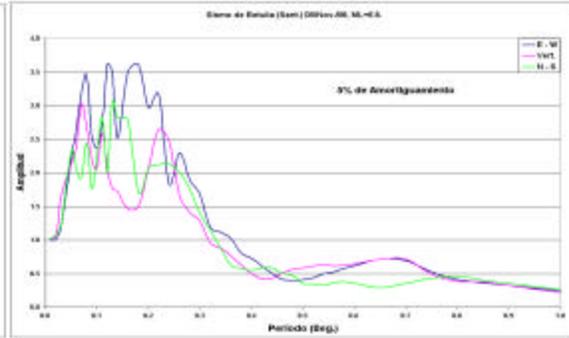
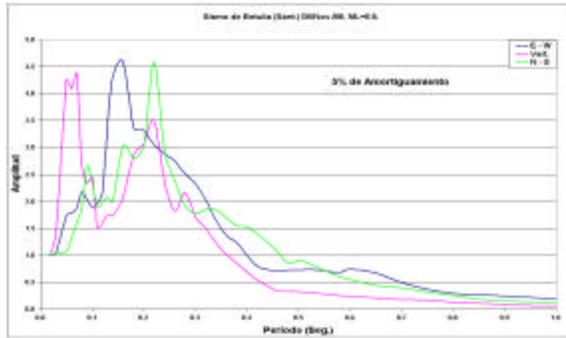


Figura 6 Espectro Normalizado para la Estación CBUC5
Estación CBUC6

Figura 7 Espectro Normalizado para la Estación CBUC6

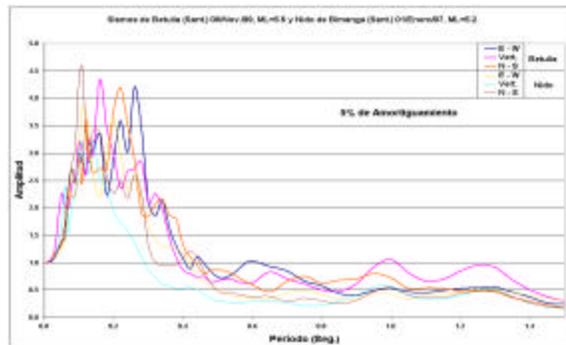


Figura 8 Espectro Normalizado para la Estación CBUIS

2. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

2.1. Microtrepidaciones.

Para el análisis se utilizó la técnica de Nakamura. Primero se separaron las tres componentes de cada uno de los registros luego se les calculó la corrección de línea base y finalmente se calculó el cociente espectral que corresponde al espectro de Nakamura, individualmente para las E-W/Vert. y las N-S/Vert. Ejemplos de los resultados obtenidos para las estaciones CBUC1 y CBUC2 se presentan en las Figuras 9 y 10.

En la Figura 9 se puede apreciar un pico cercano a los 0.13 segundos, el cual se escogió como período predominante en este sitio, lo cual coincide bien con el material que se encuentra de la zona, roca sana. Por otro lado la Figura 10 nos muestra un dato tomado en la estación de CBUC2, la cual se encuentra sobre un suelo rígido de la meseta de Bucaramanga, allí podemos apreciar con claridad un pico en el período de 0.12 segundos.

Este procedimiento se realizó en cada uno de los 237 sitios escogidos, donde se tomaron microtrepidaciones y a cada uno de estos se les leyó el período predominante, con estos datos se dibujó el mapa de isoperíodos para la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana. No en todos los casos, de las mediciones que se realizaron, se apreció un único pico predominante, por lo cual en algunos casos, recurrimos a la calibración de los datos obtenidos con registros de temblores y refracción sísmica.

2.2. Comparación contra Sismos

Con el fin de establecer una comparación de los períodos predominantes obtenidos a partir de microtrepidaciones y los obtenidos a partir de registros sísmicos en cada estación, se calcularon los cocientes espectrales de algunos registros de sismos registrados por la red local de acelerógrafos instalada por el INGEOMINAS en Bucaramanga desde 1997, como ejemplos se presentan los resultados en las estaciones CBUC4 y CBUIS en las Figuras 11 y 12.

Para cada uno de estos registros se obtuvieron los cocientes espectrales con base en la técnica de Nakamura. Observamos que la técnica de Nakamura en algunos casos nos permite una estimación del período dominante del sitio y en general los resultados están acordes con los obtenidos a partir de microtrepidaciones.

Cabe anotar que la técnica Nakamura, fue desarrollada especialmente para vibraciones de baja amplitud y se basa en el concepto, en que estas bajas amplitudes no excita el depósito de suelo en forma vertical. Por eso al obtener los cocientes espectrales con los sismos los resultados no son tan claros, pero si se ven picos en los cuales esta respondiendo el suelo.

Sin duda esta comparación de la técnica Nakamura, con datos de microtrepidaciones y sismos reales, registrados en la zona de estudio, nos indica un rango de valores entre el cual el período predominante del suelo se encuentra.

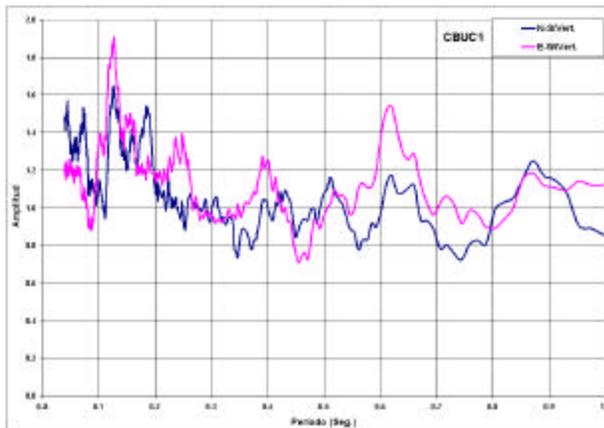


Figura 9 Cociente Espectral en CBUC1.
CBUC2.

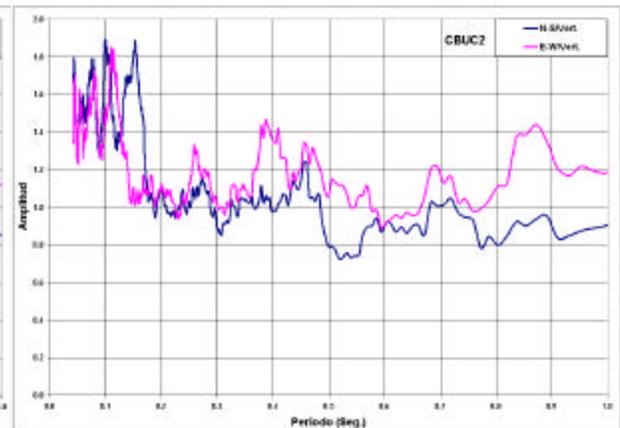


Figura 10 Cociente Espectral en

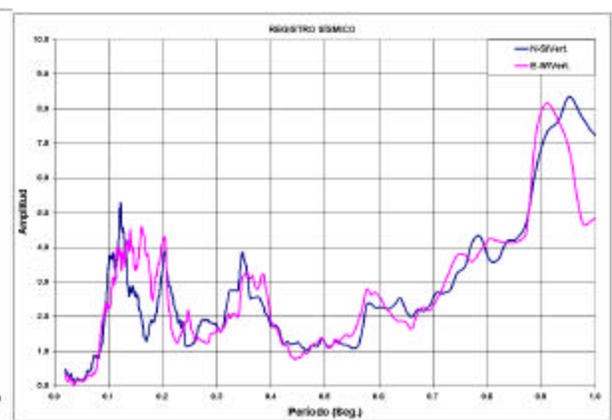
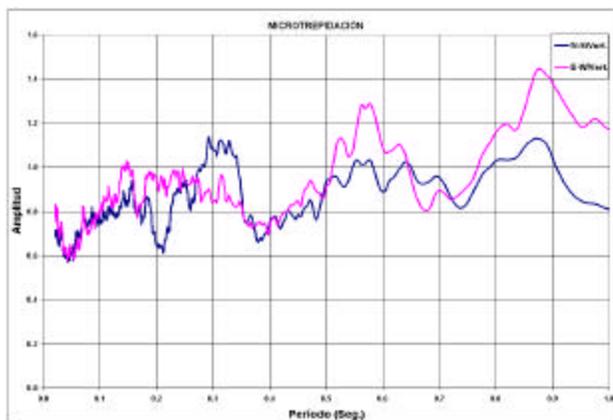


Figura 11 Comparación de la Técnica de Nakamura entre Microtrepidaciones y Sismos (8/Nov/99). Estación CBUC4.

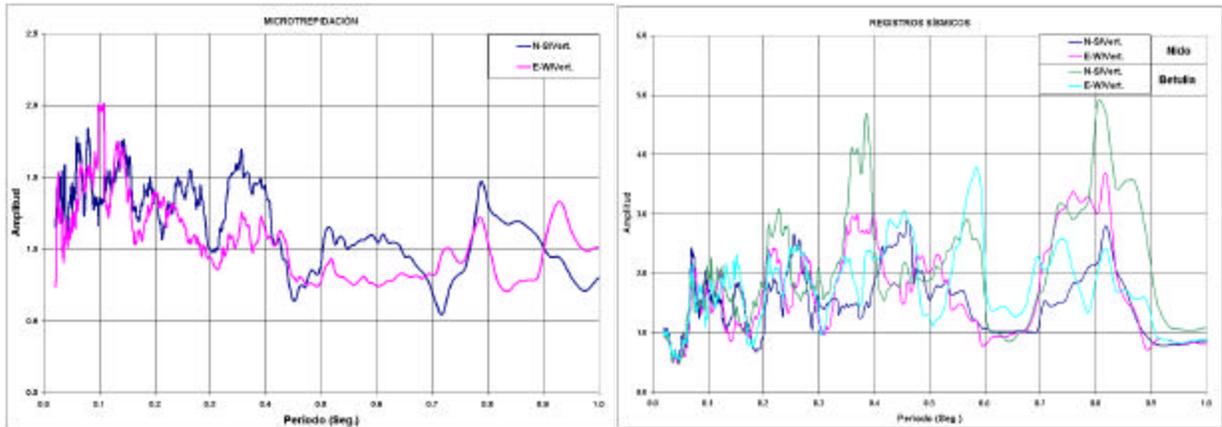


Figura 12 Comparación de la Técnica de Nakamura entre Microtrepidaciones y Sismos (1/Ene/97-8/Nov/99). Estación CBUIS

2.3. Mapa de isoperíodos.

Utilizando los períodos obtenidos a partir del análisis espectral de los registros de microtrepidaciones, se desarrollaron las Figuras 13, 14, 15 y 16 que muestran las curvas de isoperíodos para diferentes rangos de períodos, según la ciudad, mostrando un comportamiento que está entre un mínimo de 0.1 segundo y los máximos en Bucaramanga de 0.5 segundos. Para el cálculo de las curvas de isoperíodos se utilizaron varios métodos estadísticos de interpolación, entre los métodos utilizados están Distancia Inversa, Kriging, Mínima Curvatura, Punto Vecino más cercano, Función Radial, Triangulación, Shepard's y Regresión Polinomial. El que presentó una mejor correlación con los demás rasgos fue el KRIGING, por lo cual fue el escogido para esta aproximación.

En las Figuras se dibujan los contornos de igual período, para Bucaramanga en la Figura 13, Girón y Piedecuesta en las Figuras 14 y 15 respectivamente y finalmente Floridablanca en la Figura 16. Se presenta cada ciudad por separado debido a la lejanía entre los puntos, ya que no es muy acertado correlacionar valores que no sean vecinos. Lo mismo sucede para los datos tomados sobre el valle del río de Oro, los cuales se han dejado con su valor, pero sin asignarle un contorno de igual período.

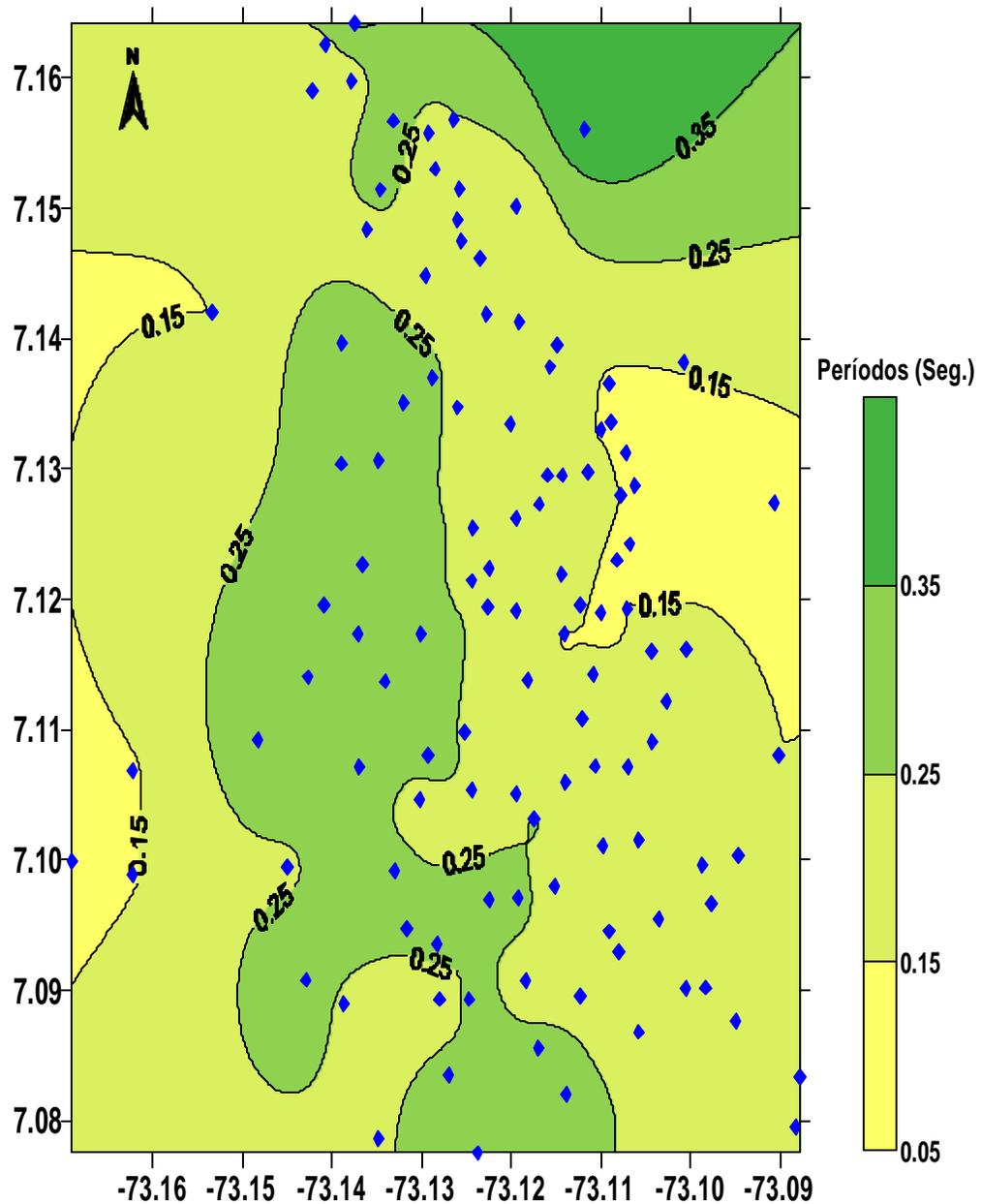


Figura 13 Distribución de períodos fundamentales en Bucaramanga y localización de las microtrepidaciones.

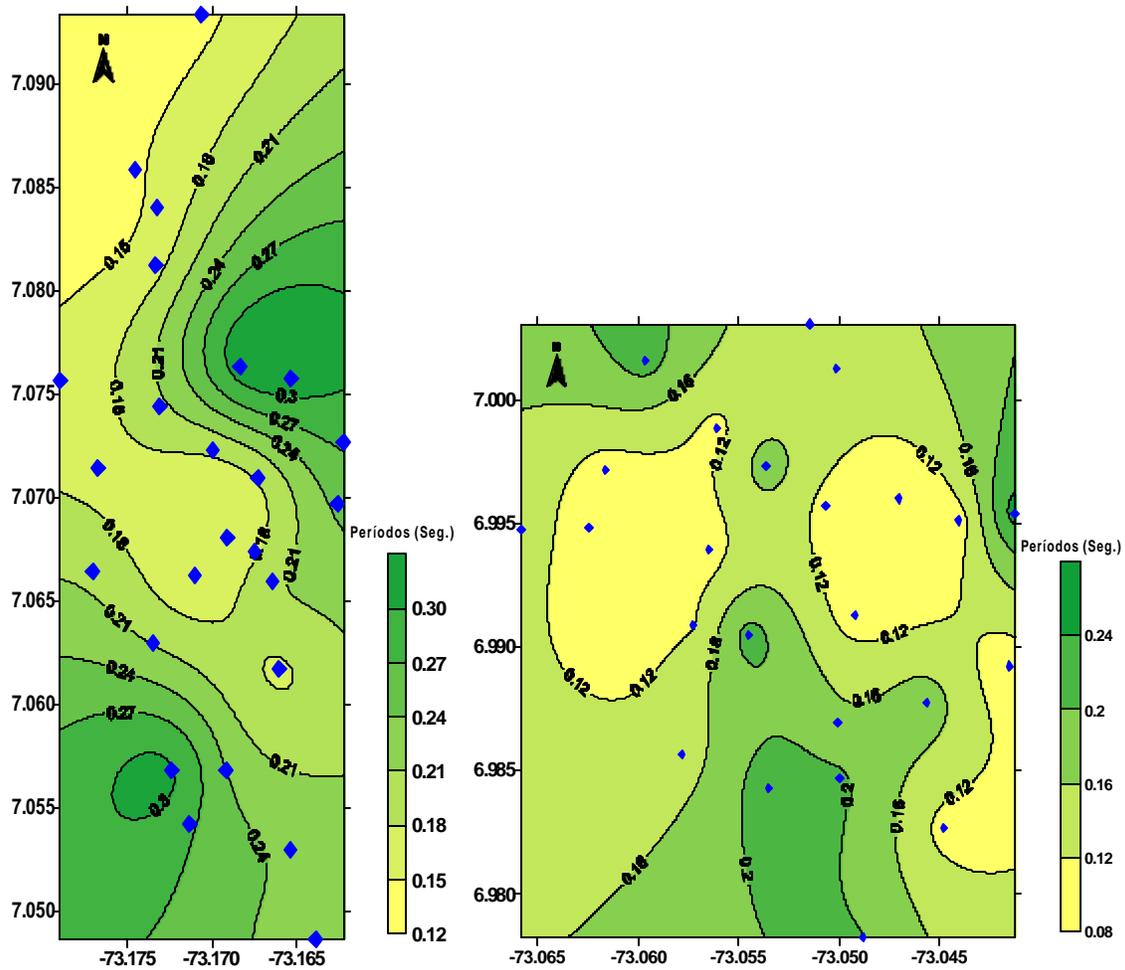
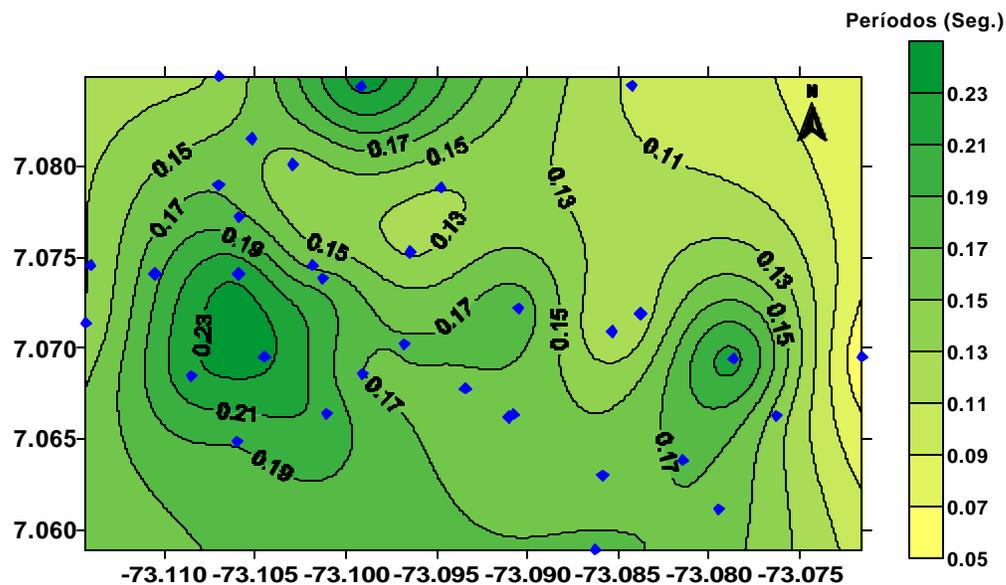


Figura 14 Distribución de períodos fundamentales en Girón y localización de las microtrepidaciones.
Figura 15 Distribución de períodos fundamentales en Piedecuesta y localización de las microtrepidaciones.
Figura 16 Distribución de períodos fundamentales en Floridablanca y localización de las microtrepidaciones.



3. CONCLUSIONES.

- La Red Local de Acelerógrafos de Bucaramanga, es una herramienta invaluable en el estudio del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad y es efectiva para el monitoreo constante de la actividad sísmica que pueda afectar la ciudad.
- Las microtrepidaciones mostraron resultados claros, cuando se utilizó la técnica de Nakamura para la evaluación del período dominante. Los períodos obtenidos con microtrepidaciones mostraron ser semejantes a los calculados con sismos como se nota en las Figuras 11 y 12.
- Utilizando la técnica de microtrepidaciones los períodos obtenidos en el Área Metropolitana de Bucaramanga están en el rango de 0.10 seg. hasta un poco mayores de 0.35 seg., resultados que están acordes con los períodos obtenidos en registros de sismos en la ciudad.
- Al comparar los resultados presentados en este estudio, con los obtenidos en otras ciudades del país, es fácil apreciar que la variación en los períodos es muy baja, lo cual nos puede indicar que los suelos presentan una tendencia a ser homogéneos.
- El número de puntos tomados en las microtrepidaciones y la ubicación de estos es la adecuada para un estudio de esta escala, si se desean realizar estudios a una escala mayor o puntuales es recomendable densificar las microtrepidaciones alrededor del sitio de interés.
- Los mapas obtenidos a partir de microtrepidaciones, pueden ser considerados como una zonificación preliminar del área de estudio, que debe ser complementada con estudios geotécnicos y modelaciones más detalladas del comportamiento dinámico de los suelos.
- La buena correlación existente entre los períodos obtenidos a partir de microtrepidaciones y los obtenidos a partir de registros sísmicos, se puede atribuir a las pocas profundidades (máximo 50 metros) del estrato de suelo presente en el área de estudio y a la efectividad de la técnica de Nakamura en estratos con dicha característica.

REFERENCIAS.

- Bermúdez, M.L. (1999). Microtrepidaciones en la ciudad de Armenia. Memorias del *Primer Seminario Internacional de Riesgo Sísmico. Armenia (Quindío)* Septiembre 16,17 y 18.
- Borcherdt, R.D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bull. Seism. Soc. Am.* 60, 29-61.
- Chávez-García, F. J. y J. Cuenca (1998). Site effects and microzonation in Acapulco. *Earthquake Spectra* 14, 75-93.
- Chavez-García, F., Bard, P., Y., Site Effects in Mexico City eight years after the September 1985 Michoacan Earthquake, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13 (1994) 229-247, 1994.
- Dravinski, M., Ding, G., Wen K., Analysis of Spectral Ratios for Estimating Ground Motion in Deep Basins, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 3, pp 646-654, June, 1996.
- Field, E. H. y K. H. Jacobs (1993). The theoretical response of sedimentary layers to ambient seismic noise. *Geoph. Res. Lett.* 20, 2925-2928.
- Kato, K., K. Aki y M. Takemura (1995). Site amplification from coda waves: validation and application to S-waves site response. *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 467-477.
- Lachet, C., Bard, P., Theoretical Investigations on the Nakamura's Technique, *Proceedings: Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, April 2-7, 1995, Volume II, St. Louis, Missouri.
- Lermo, J. Chávez-García, J., Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 5, pp 1350-1364, October, 1994.
- Lermo, J., Chávez-García, F., Site Effect Evaluation at Mexico City: Dominant Period and Relative Amplification from Strong motion and Microtremor Record, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13 (1994) 413-423, 1994.
- Lermo, J. y F. J. Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.* 83, 1574-1593.
- Lermo, J. y F. J. Chávez-García (1994). Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from motion and microtremor records. *Soil Dyn. and Earthq. Engrg* 13, 413-423.
- Mucciarelli, M. (1998). Reliability and Applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach. *J. Earthq. Engrg.* 2, No. 4, 625-638.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *QRT of RTR1* 30, No. 1, February.

Ojeda A, *Períodos de Vibración Dominantes a partir de Microtrepidaciones*. Tesis de Magister en Ingeniería Civil. 1995, *Universidad de los Andes*

Ojeda A, Evaluación de efectos de sitio para la microzonificación sísmica de Pereira, *IX Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería en Colombia*, SCI, 1997, Bogotá, Colombia.

Ojeda A., Yamin L., *Períodos de Vibración Dominantes en suelos de Santafé de Bogotá a partir de Microtrepidaciones*, *Memo de Investigación Universidad de los Andes*, Abril de 1996, Santafé de Bogotá, Colombia.

Ojeda A. Escallón J. Campos A., *Evaluation of Dominant Periods from Strong Ground Motion Records and Microtremors in Pereira, Colombia*, *Sixth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, en revisión. Seattle Washington.

Su, F. y K. Aki (1995). Site amplification factors in central and southern California determined from coda waves. *Bull.Seism.Soc.Am.* 85, 452-466.

Su, F., K. Aki, T. Teng, S. Koyanagi y K. Mayeda (1992). The relation between site amplification factor and surficial geology in central California. *Bull.Seism.Soc.Am.* 82, 580-602.

Vargas, C.A. (1999). *Atenuación de ondas coda en la región central de los Andes de Colombia (Eje Cafetero)*. Tesis de Master, Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural, *Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona*.