

Determinación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de Tunja y Sogamoso usando microtemblores*

Solid deposits predominant periods´ determination. using microtremors in Tunja and Sogamoso

Orlando Rincón Arango**

RESUMEN

En el estudio fueron evaluados los periodos de los depósitos de suelo mediante la relación H/V, técnica de Nakamura aplicada a registros de microtemblores; los registros fueron realizados en puntos del área urbana para las ciudades de Tunja y Sogamoso (Boyacá, Colombia); se incluyó el análisis de estabilidad horaria en suelo y roca para los sitios de instalación de estaciones acelerográficas, se elaboró un mapa de isoperiodos y se establecieron zonas de respuesta dinámica similar, comparando los resultados con las zonificaciones previas realizadas y los accidentes topográficos. Además, se analizó la variabilidad de los registros ante la presencia de tubificación subsuperficial, fenómeno habitual en la ciudad de Tunja, debido a los avanzados procesos de erosión de los depósitos, que ha desestabilizado diversas construcciones. Los resultados obtenidos se usaron para determinar los sitios donde sería necesario instrumentar, y se trazaron pautas para el proceso de zonificación definitivo de las ciudades, en la siguiente etapa del proyecto de microzonificación.

Palabras clave: Microtemblor, Microtrepidación, Nakamura, Isoperiodos, Microzonificación.

ABSTRACT

A soil deposit periods´ evaluation was made by means of the Nakamura technical relationship H/V, applied to micro-tremors registrations. The registrations were carried out in some Tunja and Sogamoso urban areas´ points, including the analysis of stability timing in soil and rock on the places acceleragraphic stations installations´ places. With that data, an isoperiods map was elaborated and established similar dynamic response areas, comparing the results with the previous zoning and the topographical accidents. Also there was a registration variability analysis, in front of sub-superficial tubing presence, common phenomenon in the city of Tunja due to the deposits erosion advanced processes, which has destabilized several constructions. The results obtained were used to determine the places where serious intervention was needed and rules were set up for the cities definitive zoning process, within the micro-zoning project´s following stage.

Key words: Micro-tremor, Microvibration, Nakamura, Isoperiods, Micro-zoning.

* Ponencia presentada en el Primer Seminario de Ingeniería Sísmica - UPTC, 2005.

** Magíster Geotecnia Universidad Nacional de Colombia, c. e.: orincon@unal.edu.co

INTRODUCCIÓN

El estudio se realizó dentro la fase inicial del proyecto de *Microzonificación sísmica del corredor industrial de Boyacá*, que desarrolla la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia desde 1999, como una herramienta para completar el ordenamiento territorial de las principales ciudades del departamento. El proyecto surgió como necesidad ante la escasa información existente en el departamento y la poca conciencia sísmica de sus gobernantes; su objetivo primordial es cuantificar el riesgo sísmico en el corredor industrial de Boyacá, zona geográfica donde se encuentran ubicadas las cuatro principales ciudades del departamento y donde están instaladas las industrias e infraestructura más importantes para la región.

En esta etapa del proyecto, y en este estudio en particular, se pretendió determinar los efectos de sitio a nivel preliminar para la zona urbana de la ciudad de Tunja y Sogamoso; la utilización de metodologías alternativas, unida al conocimiento de las condiciones geológicas, topográficas y a la asignación de parámetros estáticos determinados en el desarrollo del proyecto, nos generó resultados bastante confiables. Ante la necesidad de conocer, con los escasos recursos financieros disponibles, los efectos de sitio y la respuesta dinámica de los diversos depósitos de suelo presentes en las áreas urbanas –proceso que tiene altos costos–, se optó en la fase preliminar por usar técnicas alternativas de bajo costo, que fueran de fácil implementación y que proporcionaran información sobre la respuesta de los depósitos identificados en etapas anteriores, para orientar el proceso de Microzonificación de una forma acertada y óptima.

Se analizaron diversas alternativas, y, teniendo como limitante la escasa información instrumental histórica en el departamento y los pocos equipos, se decidió encaminar la investigación hacia estudios de vibración

ambiental, utilizando microtrepidaciones o microtemblores, por su facilidad, por acomodarse a las necesidades y por ofrecer resultados con el mismo nivel de eficiencia que los métodos pasivos para realizar estimativos de la respuesta local. La metodología escogida fue la propuesta por Nakamura [1] en 1989, en la que se realiza el cálculo de las relaciones espectrales entre las componentes horizontales del movimiento con respecto a las componentes verticales de un mismo lugar, empleando Microtrepidaciones (ruido sísmico ambiental de bajo periodo) o Microsismos (periodos mayores de 2 segundos), lo que hace esta técnica más económica y de mayor rendimiento; además, tiene la ventaja de que se puede utilizar en zonas sin registros previos y de que requiere de un solo equipo, a diferencia de las otras metodologías.

1. GENERALIDADES

Las microtrepidaciones empezaron a ser estudiadas a principios del siglo xx en el Japón, por Omori, en 1908, quien observó que la vibración natural del suelo no era producida por un sismo, ni alguna oscilación pulsatoria causada por una fuente local establecida. Mediante la experimentación, Omori concluyó que la vibración natural era producto de la acción de fenómenos naturales como el viento, las olas del mar y las vibraciones antropogénicas, entre las que están el tránsito vehicular y la vibración producida por diferentes maquinarias.

Hacia los años cincuenta se realizaron en Japón numerosas publicaciones sobre medidas de microtemblores; además se trabajaron proyectos de microzonificación sísmica, en los cuales se compararon las distribuciones de frecuencia obtenidas en movimientos fuertes y microtrepidaciones, obtenidas en un mismo sitio, hallándose una buena similitud. A partir del registro sistemático de microtemblores en miles de sitios, Kanai y Tanaka encontraron que los microtemblores eran útiles para inferir propiedades del suelo y contribuir a las normas

de diseño sismorresistente [2]. Hacia los años sesenta, se realizaron diversos estudios, como el de Aki, quien consideró las microtrepidaciones como ondas estocásticas y dispersas de superficie, y el de Kanai, en 1966, quien concluyó que las microtrepidaciones se generaban por las múltiples reflexiones de las ondas de cortante en los estratos de subsuelo y que los espectros de las fuentes de microtemblores o de las ondas incidentes a las capas del subsuelo son blancos en términos del desplazamiento; además, Allam realizó un análisis de las microtrepidaciones, tratándolas como ondas de corte en un estado estable de los modos fundamentales de ondas Love y Rayleigh, sugiriendo que esta interpretación se puede realizar si las características entre subsuelo y basamento están muy diferenciadas [3].

En 1989 Nakamura propuso que mediante las microtrepidaciones se podían evaluar los efectos de sitio, cuantificando la relación o cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical registradas en el mismo lugar, asumiendo que consisten de ondas Rayleigh propagándose en un estrato que está sobre una capa de semiespacio infinito.

Lermo y Chávez-García [4], en 1994, revisaron la aplicabilidad de los registros de microtemblores en suelos blandos, comparando tres técnicas: la de amplitudes espectrales, la de estación de referencia y la de relaciones espectrales entre las componentes horizontal y vertical de un mismo lugar, aplicándolas en diferentes ciudades de México. Los mejores resultados se obtuvieron con la técnica de Nakamura y se demostró su correlación con los resultados de sismos, concluyendo que la técnica de Nakamura compensa los efectos de la fuente; además modelaron las microtrepidaciones como ondas Rayleigh, propagándose en un semiespacio infinito, comprobando que las suposiciones de Nakamura eran consistentes con la modelación existente para la propagación de ondas Rayleigh.

Dravinski, Ding y Wen [5], en 1996, estudiaron la relación espectral H/V para valles profundos, considerando valles semicirculares y semiesféricos, y demostraron que para los modelos bidimensionales y tridimensionales la técnica de Nakamura predice bien la frecuencia fundamental y que el error de la estimación se puede presentar para las estaciones del centro del valle. En el mismo año, Yamanaka encontró que el espectro obtenido por la técnica de Nakamura es estable en el tiempo y que esta técnica puede ser usada para determinar la estructura de subsuperficie o perfil estratigráfico.

D. Bindi et al., en 1997, aplicaron la técnica de los radios o relación espectral H/V a registros de microtrepidaciones y de sismos, analizándolos desde dos puntos de vista: usando la ventana de Hanning y el algoritmo de Landweber, con el objeto de determinar las inestabilidades numéricas que afectan la relación espectral H/V, y concluyeron, en primer lugar, que el nivel de amplificación obtenido por el método de Nakamura es generalmente más bajo que los obtenidos por datos de sismos; además, no observaron diferencias relevantes entre los factores de amplificación de las componentes NS y EW; en segundo lugar, determinaron que para los análisis de microtrepidaciones la ventana de Hanning provee una mejor forma del pico cercano a la frecuencia predominante.

Alfaro, Navarro, Sánchez y Pujades, en 1997, determinaron, mediante mediciones realizadas para la microzonificación sísmica de Barcelona, que la fiabilidad del resultado no depende de la hora en que se realice la medición y que las fuentes puntuales identificadas, como el paso de un peatón o un auto en las cercanías, no afectan el resultado final.

Hacia el año 2000, Nakamura, ante las expectativas que se generaron alrededor de la técnica introducida por él en 1989 y ante las constantes críticas por no haber una explicación teórica de esta, presenta una explicación de la

técnica y hace su demostración; además, hace referencia a sus trabajos realizados en la década anterior, como el de estimación de índices de vulnerabilidad de la estructura del suelo con microtrepidaciones, introduciendo el índice K.

En Colombia, las microtrepidaciones han sido utilizadas en ciudades como Bogotá, por Ojeda y Yamín[6] en 1995. Estos evaluaron los periodos dominantes de vibración en suelo blando y encontraron que las microtrepidaciones alcanzaban a excitar el tercer modo de vibración de los suelos, mientras los sismos alcanzaban al segundo modo. Aunque no determinaron con exactitud los periodos dominantes de vibración, sí mostraron distintos tipos de comportamiento dinámico de los suelos. Integrando las microtrepidaciones con estudios gravimétricos, se logró determinar con gran confiabilidad la profundidad de los estratos de suelo blando.

En Pereira, Dos Quebradas y Santa Rosa de Cabal, Ingeominas (Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química) realizó el estudio de evaluación de efectos de sitio, en el que las microtrepidaciones mostraron resultados claros cuando se utilizó la técnica de Nakamura para la evaluación de periodo dominante; los periodos obtenidos con microtrepidaciones demostraron ser semejantes a los calculados con movimientos fuertes y débiles.

En Armenia (1999), Ingeominas, con el fin de determinar los periodos predominantes del suelo, realizó el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad valiéndose de microtrepidaciones, con resultados acordes con los obtenidos en registros sísmicos en la ciudad.

2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS REGIONALES Y LOCALES

Marco geológico regional

Las formaciones que afloran en el área del corredor industrial de Boyacá son de edad

paleozoica superior hasta holoceno y son todas de origen sedimentario, excepto algunos afloramientos, de poca extensión, de rocas volcánicas. Las formaciones paleozoicas constituidas de argilitas rojizas, limolitas y areniscas finas se observan solamente en el sector nororiental, entre las ciudades de Duitama y Sogamoso.

El valle Tunja-Sogamoso y parte de las laderas bajas están cubiertos por depósitos posorogénicos, separados unos de otros por discordancias erosivas que permiten ordenarlos cronológicamente. Son materiales provenientes de la erosión de la cordillera y acumulados en las depresiones de la región a partir del Terciario superior hasta nuestros días. La importancia del estudio de estos sedimentos radica en que reflejan la evolución geomorfológica regional, por lo cual pueden conservar la evidencia de la ocurrencia de eventos naturales pasados, muchos relacionados con la actividad de las fallas.

Estructuralmente, la región del corredor industrial de Boyacá está limitada por dos fallas importantes: la de Boyacá, por el noroeste, y la de Soapaga, por el sureste, y presenta fallas menores como las de Cómbita, Tunja, Chivatá, Siachoque y otras, todas paralelas y con buzamiento similar a las principales. En el sector correspondiente al valle de Sogamoso-Iza, ubicado al oriente de la falla de Soapaga, la estructura geológica es algo diferente, con fallas inversas longitudinales paralelas a las principales, pero contrarias en buzamiento, indicando una génesis distinta a las del sistema general. En definitiva, por las características morfoestructurales de la región, el corredor industrial Tunja-Sogamoso se ubica en una escama localizada inmediatamente al oriente de la gran lámina tectónica, de acuerdo con el clásico modelo estructural de cordillera. En la ciudad de Tunja predominan rocas sedimentarias: Formación Guaduas (Ktg), Formación Cacho (Tc), Formación Bogotá (Tb), Formación Tilatá (Tst), Depósito lacustre (Qd),

Depósito aluvial (Qal), Depósitos fluviolacustres (Qac), Depósitos coluviales (Qc).

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

En el desarrollo del registro de las microtrepidaciones, el equipo utilizado fue un acelerógrafo de alto rango dinámico. Para ubicar los lugares donde se realizaron los registros se hizo un recorrido por la ciudad, buscando preferiblemente sitios con suelo natural visible y que fueran de fácil acceso, como lotes, parqueaderos y parques; además, se escogieron puntos alejados de bordes de laderas o taludes, para evitar efectos de borde o topográficos que distorsionaran la señal; de este modo se hizo una preselección de 150 puntos para las ciudades de Tunja y Sogamoso, los cuales se distribuyeron tras analizar planos de la malla urbana de la ciudad, el plano geológico, de pendientes y los planos de zonificación Geotécnica; dicha información se cruzó con una cuadrícula (300 x 300 m), con el objeto de densificar los puntos y de cubrir áreas no contempladas, y por último se realizó un cruce con el plano de estructuras de alcantarillado de las ciudades, para evitar que en los puntos seleccionados se presentaran interferencias en el registro por la presencia de estas estructuras.

Se tomaron tres registros de 180 segundos en cada punto, con el fin de determinar el periodo con una mayor exactitud y analizar presencia

de posibles interferencias, y se compararon. Durante la realización de las mediciones se realizó un control de temperatura, para garantizar que no se alteraran los registros. La longitud de la subventana definida para el análisis fue de 20 segundos. El porcentaje de traslapeo seleccionado entre las subventanas fue del 50%, teniendo como referencia lo propuesto por Lleras[7]; adicionalmente, se procesaron registros variando el porcentaje de traslapeo de 10, 25 y 50% en cada uno y analizando la variabilidad de los resultados, su desviación estándar y el intervalo de confianza del 95% para la prueba estadística; se aplicó la corrección de línea base a cada subventana y se suavizó utilizando la ventana de Hanning; se aplicó la FFT y se realizó un suavizado gaussiano, encontrando los promedios, su desviación estándar y el intervalo de confianza del 95%. Para el procesamiento de la información se desarrolló una aplicación en Visual Basic para aplicaciones.

De acuerdo con la metodología planteada, se realizaron 552 registros de microtrepidaciones en la ciudad de Tunja, incluyéndose en estos los registros del estudio de estabilidad en suelo y en roca (véase figura 1), y 480 en la ciudad de Sogamoso. Se realizaron, además, pruebas de variabilidad de estos por la presencia de tubificación o de conductos enterrados, para cuya detección en la ciudad de Tunja (véase figura 2) se realizaron medidas en una tubificación de carácter natural y comparándolo con registros del mismo tipo de suelo, pero sin presencia de tubificación, a diferentes

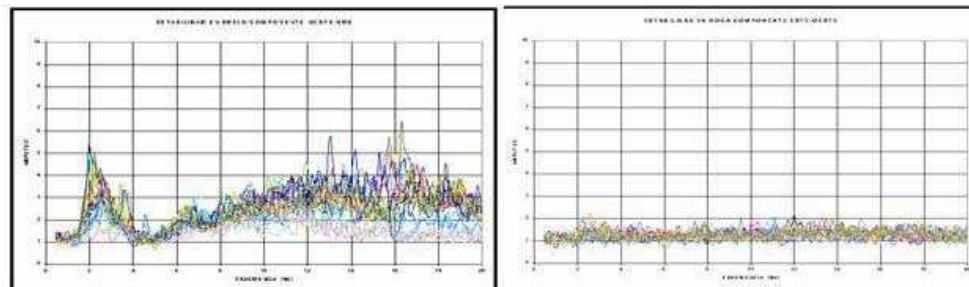


Fig 1. Estabilidad horaria de los registros a) suelo, b) roca.

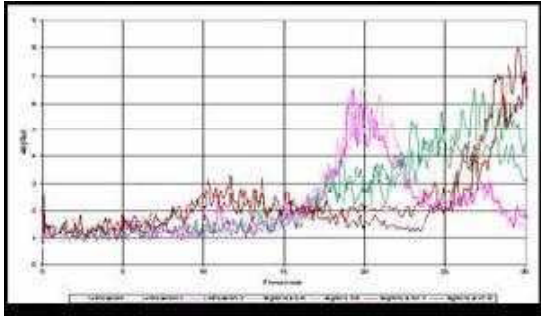


Fig 2. Efecto de la tribificación

distancias, al analizar los registros de los sitios donde hay tubificación se pudo observar que en estos se presenta un pico bien diferenciado a los 20 Hz, que se atenúa al aumentar la distancia de separación con respecto al eje de la tubificación. Es importante hacer énfasis en que, aunque lo observado es claro para realizar una formulación más exacta del fenómeno, sería ideal realizar una experimentación más rigurosa del fenómeno.

Para determinar los modos de vibración fundamentales, se analizaron por separado y en conjunto los registros tomados en cada uno de los puntos, teniendo en cuenta los factores

que pudieran afectar los resultados de cada sitio, realizándose un mapa de valor de periodos puntual; debido a la gran densidad de estos, se facilita más su utilización de esta forma. Sin embargo, y para efectos de comparación y de analizar si el comportamiento gobernante del fenómeno coincide con las direcciones de continuidad de los depósitos, para realizar un análisis de correlación espacial de continuidad y los efectos que se presentan sobre la variable, se calcularon los semivariogramas para direcciones NS, N30E, N45E, N60E, EW (véase figuras 3) y se compararon con los modelos teóricos de estos, encontrando la mejor correlación con el modelo esférico del cual se obtuvo la ecuación (1) de semivariograma.

$$\gamma(h) \{ 0.009 + 0.01824 \text{esf} \{ h \} \} \quad (1)$$

Con lo anterior se elaboró una superficie de variograma (véase figura 4) y se observó una anisotropía de la variable en la dirección N45S; de acuerdo con esto se procedió a realizar el mapa de isoperiodos, utilizando el método kriging (véase figuras 5 y 6); posteriormente se realizó un análisis zonal por características similares, para poder definir claramente los depósitos.

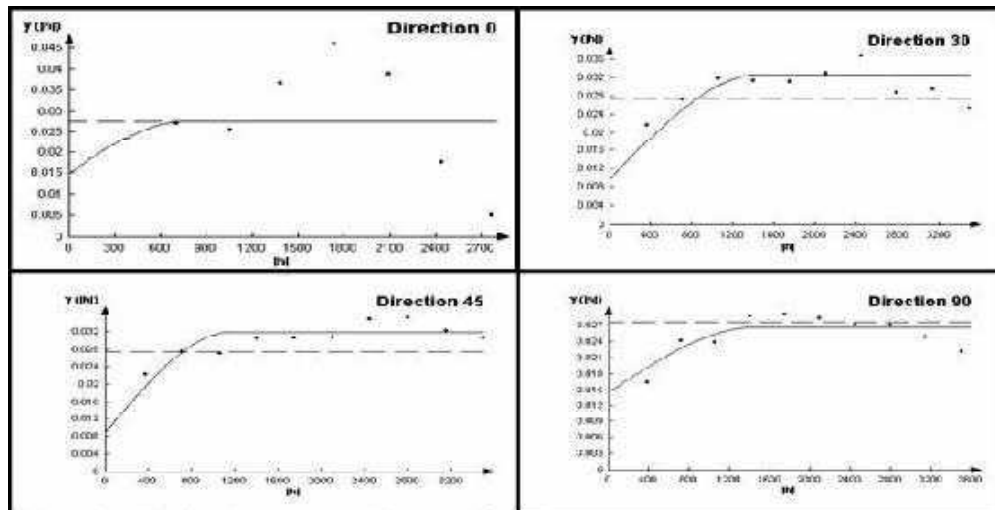


Figura 3. Semivariogramas para diferentes direcciones.

Fig 3. Semi para diferentes direcciones.

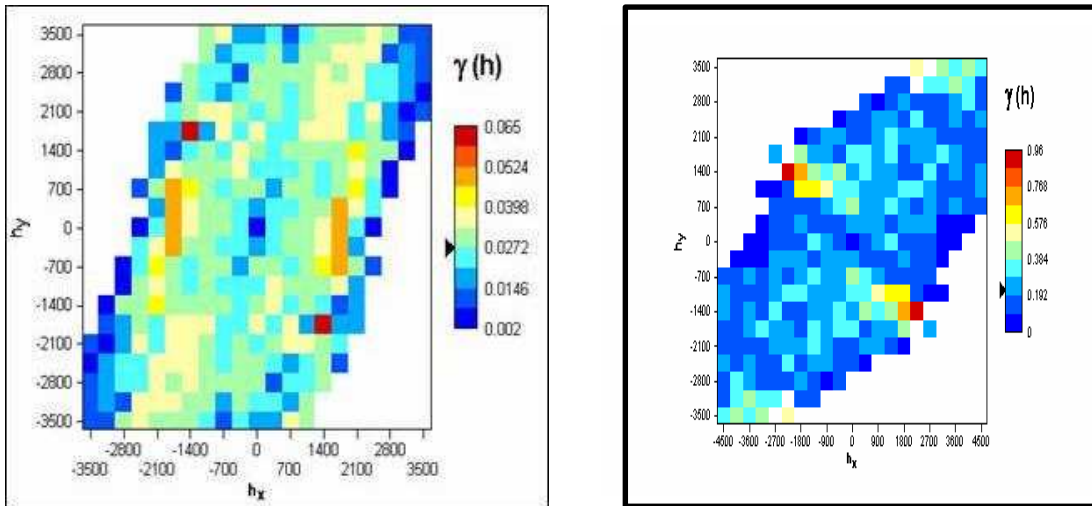


Figura 4. Superficie de variograma a) Tunja, b) Sogamoso.

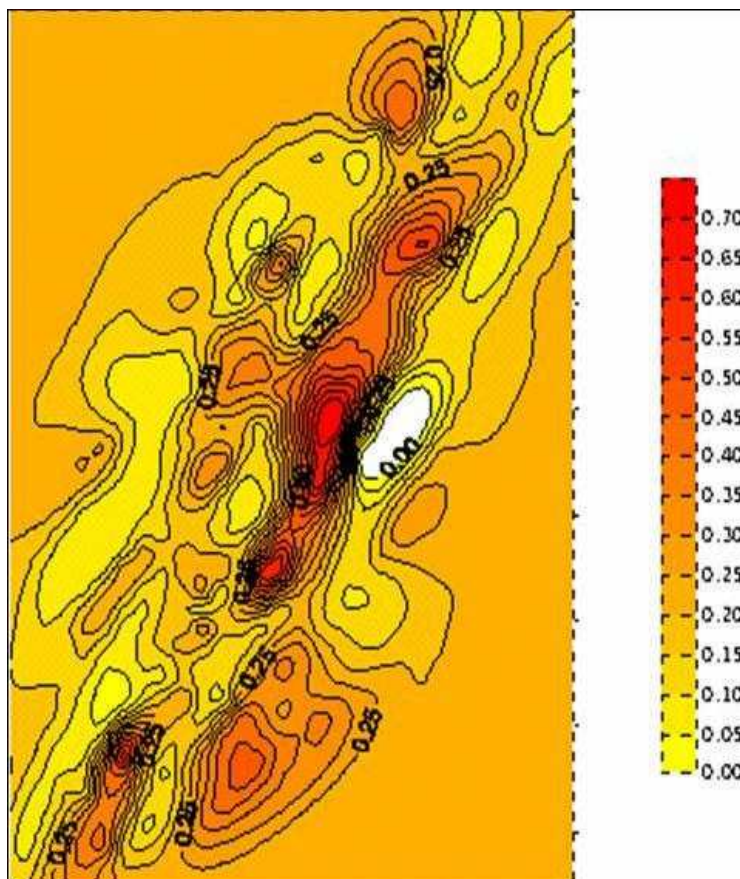


Fig 5. Mapa de Isoperiodos ciudad de Tunja.

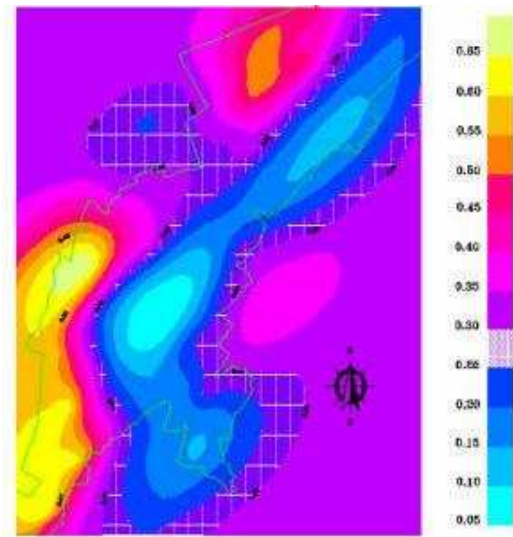


Figura 6. Mapa de Isoperiodos Ciudad de Sogamoso.

4. COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

- Se observó que la disposición de los depósitos ejerce un control sobre la variable periodo.
- Al analizar los valores obtenidos en los valles los periodos determinados se encuentran en el rango en el que pueden afectar las edificaciones típicas del sector.
- Se detectó que ante la presencia de una tubificación subsuperficial se presenta un contraste a los 20 Hz, que se desvanece con la distancia.
- Se determinaron los puntos por instrumentar mediante la instalación de estaciones acelerográficas.
- Se determinó la eficacia de la técnica para definir zonas de respuesta dinámica similar.
- Se encontraron zonas con efectos locales importantes.

– La presencia de rellenos de origen antrópico constituye un factor de riesgo importante; en zonas como El Consuelo han colapsado sin eventos construcciones desarrolladas sobre rellenos.

5. AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Manuel Roberto Villarraga, a la ingeniera María Luisa Bermúdez, al geólogo Óscar García, al ingeniero Sergio Castellanos y a todo el que de una u otra forma contribuyó a la realización de los proyectos.

6. REFERENCIAS

- [1] Y. Nakamura: «A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface», *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1): 25-33, february 1989.
- [2] A. Alfaro, J. Canas, V. Giraldo, L. Pujades: «Estimación de efectos locales con movimientos sísmicos y microtemblores». En: *Memorias Seminario Análisis de Registros Sísmicos*, Pontificia Universidad Javeriana, Instituto Geofísico, febrero 23 al 26 de 2000. Bogotá. 59 pp.
- [3] A. Alfaro, O. V. Pavlenko, L. G. Pujades: «Análisis multiespectral a microtemblores en Barcelona». En: *X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia*, Bogotá, 1999.
- [4] J. Lermo S., S. J. Cuenca, F. Chávez-García: *Estudio de prospección, sismología y vibración ambiental a lo largo de las líneas de conducción del sistema Cutzamala*. Informe del Instituto de Ingeniería UNAM para la Comisión Nacional del Agua, CNA, proyecto 2562, México, junio de 1993 . 39 pp.
- [5] M. Dravinski, G. Ding and K. Wen: «Analysis of Spectral Ratios for Estimating Ground Motion in Deep Basins». *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(3): 646-654, June 1996.

- [6] A. E. Ojeda Carriazo: «Periodos de vibración dominantes en suelos de Santafé de Bogotá a partir de microtrepidaciones». Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 1996. 39 pp.
- [7] J. N. Lleras Villaveces: *Metodología simplificada para el análisis e interpretación de vibraciones ambientales*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 1995, 102 pp.
- LERMO, Javier y Francisco Chávez-García: «Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios With Only One Station». *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5): 1574 -1594, October 1993.
- _____ y Francisco Chavez-Garcia, «Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?» *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(5): 1350-1364, October 1994.
- NAKAMURA, Yutaka. «Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications». *XII World Conference Engineering Earthquake 2000*.

7. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, AIS. *Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente -NSR-98 (Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998)*, AIS, Bogotá, Colombia, Títulos A y H, 1998.

COLINDRES, Rafael. *Dinámica de suelos y estructuras*, 2° edición, Mexico: LIMUSA Grupo Noriega Editores, 1993.

GARCÍA, Luis Enrique: *Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico*, Bogotá: Editorial Universidad de los Andes, 1998.

HAMMING, R. W.: *Digital Filters*. Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey, U.S.A. 1977.

HWEI P, Hsu: *Análisis de Fourier*, Fondo Educativo Interamericano S.A. Colombia, 1973.

SARRIA, Alberto: *Ingeniería sísmica*, 2° edición, Bogotá: ECOE Ediciones y Ediciones Uniandes, 1995, 569 pp.

_____ *Métodos geofísicos aplicados a la ingeniería civil*, Bogotá: ECOE Ediciones y Ediciones Uniandes, 1996, pp. 1-71.

SCI –Sociedad Colombiana de Ingenieros–: *IX Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia*, Bogotá, Colombia, 1997, pp. 528-553.

_____ y AIS –Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica–. *XII Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia*, Bogotá, Colombia, septiembre 10-13 de 1997. pp. 43-70, 116-185, 198-219.

_____ y ACIES –Asociación Colombiana de Ingenieros Estructurales– *XIII Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia*, Bogotá, Colombia, septiembre 30 y octubre 1 y 2 de 1999, pp. 125-137, 152-167, 333-365.

Fecha de recepción: 26 de septiembre de 2005

Fecha de aprobación: 2 de diciembre de 2005