

Estimación de los periodos predominantes de los suelos de Aguazul a partir de microtemblores

Estimation of predominant periods of Aguazul soils from microtremors

Carlos Eduardo Mendoza Oliveros*

Resumen

Este estudio se realizó en el municipio de Aguazul, Colombia, en el año 2006, con el fin de estimar los periodos predominantes de los suelos de la parte urbana y sus zonas de expansión. Inicialmente se recurrió a la recopilación de información disponible en el municipio y necesaria para el estudio. Sobre planos se diseñó la localización para la toma de respuestas configurando una malla de puntos, sobre los cuales se procedió a la toma de datos en campo. En cada uno de los puntos de intersección de la malla trazada se tomaron datos de vibraciones intrínsecas ambientales del suelo con un acelerógrafo. En total se procesaron 375 registros que abarcan un área de aproximadamente 30 km². Cada uno de los registros se procesó siguiendo la técnica de Nakamura para determinar los periodos predominantes de los diferentes sectores. Adicionalmente, se realizó una recopilación de la información geotécnica disponible sobre estudios de suelos en Aguazul en la fecha, logrando clasificar los depósitos en cuatro tipos de acuerdo a la respuesta esperada.

Los periodos determinados están en el rango de 0,02 s a 0,40 s, lo que demuestra la rigidez y homogeneidad de los depósitos del sector. De acuerdo con los resultados, el municipio se divide en dos zonas dinámicas. Para la delimitación de los sectores se utilizaron técnicas de interpolación avanzadas, con las cuales se dibujó el mapa de Isoperiodos de Aguazul y se infirieron los efectos locales. Como resultado de este proceso se observa que la Resonancia es el principal problema detectado

Abstract

This study was done in the city of Aguazul - Colombia in 2006, in order to estimate the predominant periods of the urban soil and expansion areas. Initially, drew on the review of information necessary for the study available on the municipality. On maps was designed location for data capture making a grid of points on which proceeded to the field data capture. In each of the points of the grid were captured environment intrinsic vibrations soil with accelerograph machine. In total, 375 records were processed covering an area of approximately 30 km². Each of records was processed following the Nakamura's technique, to find the predominant periods of the different deposits. In addition, there was a review of geotechnical information available about soil studies in Aguazul on the date, classifying into four types the deposits according to the expected response.

Determined periods were 0.02 s to 0.40 s range, which shows the stiffness and homogeneity of soil deposits. According to the results, city was divided into two dynamic zones. Aguazul Isoperiod Map was drawn using advanced interpolation techniques to delimitate sectors and local effects were inferred. As a result of this process shows that the resonance is the main problem identified for the urban area and could appear before a strong seismic event.

Key words: Aguazul, Local Effects, microtremors, Seismic microzonation, Nakamura, Predominant Periods, Earthquakes, interpolation techniques.

*Ingeniero Civil Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos Universidad Santo Tomás, Magíster en Ingeniería Área: Civil - Geotecnia Universidad de Los Andes, Ingeniero División Geotecnia - Departamento de Presas INGETEC S.A. Correo electrónico: carlosmendoza@ingetec.com.co

para la zona urbana y que podría presentarse ante un evento sísmico fuerte.

Palabras Clave: Aguazul, Efectos Locales, Microtemblores, Microzonificación Sísmica, Nakamura, Periodos Predominantes, Sismos, Técnicas de Interpolación.

I. INTRODUCCIÓN

De acuerdo al estudio de amenaza sísmica desarrollado para el país, se puede enmarcar al municipio de Aguazul en una zona de amenaza sísmica alta, ubicada sobre el gran sistema de fallamiento activo de la Cordillera Oriental (Guaicáramo), el cual ha originado gran cantidad de terremotos por su continua actividad tectónica, como el sismo de Tauramena en 1995. El objetivo fundamental de este trabajo fue el encontrar los periodos predominantes de los depósitos de suelo del casco urbano, para establecer las características geodinámicas de los suelos del sector sirviendo como herramienta para el ordenamiento territorial.

II. GENERALIDADES

A. Generalidades del municipio de Aguazul

El municipio de Aguazul, departamento de Casanare, fue fundado en 1950 sobre el piedemonte llanero, tiene una población de 35.267 habitantes (proyección al año 2013); con una altura de 290 msnm y una temperatura de 27°C. El municipio posee un área total de 1330 Km², de los cuales 9 Km² corresponden al casco urbano [1]. De acuerdo con la NSR-10, Aguazul se enmarca en una zona de amenaza sísmica alta, con un coeficiente de aceleración espectral $A_a = 0.30$ [2]. El municipio tiene reservas petrolíferas y de gas en sus pozos de Cusiana y Cupiagua que abastecen la demanda nacional e internacional. Así mismo, su economía también se basa en la agricultura, especialmente en el arroz, el comercio, la ganadería y el turismo.



Figura 1. Localización de Aguazul

Fuente: Alcaldía de Aguazul [1]

B. Definiciones Básicas

1) **Microtemblor, Microrepidación o Microtremor.** Vibraciones del terreno de baja amplitud conformados por ondas internas y ondas superficiales. Tienen un periodo entre 0.01 y 2,00 s y son producidos por fuentes artificiales [3].

2) **Periodo Predominante.** Periodo de vibración correspondiente al máximo valor del espectro de amplitud; es el modo fundamental de vibración del depósito [3].

3) **Técnica de Nakamura.** Técnica para análisis de microtemblores. Supone que el cociente espectral entre las componentes horizontal y vertical de los microtemblores (relación H/V) es una aproximación de la función de transferencia de los suelos [4].

C. Revisión bibliográfica de los microtemblores

La primera investigación registrada la realizó Bertelli (1872), estudiando movimientos espontáneos de un péndulo en Florencia Italia, en el cual descubre que los pequeños movimientos de su péndulo se debían a movimientos sísmicos fuertes alejados del sitio o a cambios en la presión atmosférica. Omori (1908) define los microtemblores como vibraciones cortas con un promedio de 0,3 s, los cuales son básicamente de origen antrópico.

A pesar de varias investigaciones sobre las microrepidaciones realizadas entre los años de 1930 a 1960, se puede considerar a partir de Kagami et al. (1982) y Nakamura (1989) como el inicio moderno del estudio de los microtemblores. Kagami et al. (1982) trataron de obtener relaciones espectrales de microtemblores entre una estación arbitraria en sedimento y una estación de referencia en roca, por medio de mediciones simultáneas. Por su parte, Nakamura (1989) propone su técnica, que básicamente consiste en la relación espectral de microtemblores entre sus componentes horizontal y vertical. Es una propuesta audaz para la época que genera gran controversia, logrando despertar en la década de 1990 - 2000 el interés a nivel mundial acerca del estudio de microtemblores, respaldando (Field y Jacob, 1993; Lermo & Chávez-García, 1994; Dravinski et al., 1996) o criticando su teoría (Seo; 1994, Lachet & Bard, 1994; Sarria, 1996; Mucciarelli, 1996; Konno & Omhachi, 1996, 1998).

Nakamura (2000) explica la técnica más ampliamente y la demuestra teóricamente. Además introduce nuevos términos como el índice K. Maruyama (2000) muestra la buena correlación entre mediciones de microtemblores y de sismos fuertes y predice o intuye la magnitud de los sismos a partir del espectro de los microtemblores. Acevedo et al. (2000) hacen un análisis comparativo de la evaluación de la función de transferencia usando diferentes técnicas. Noguchi & Nishida (2002) analiza microtemblores mediante las técnicas H/V y por correlaciones auto espaciales (SPAC) para determinar la estructura del suelo en Tottori. Olszewska & Lasocki (2004) muestran la aplicación de la técnica H/V para estimar la amplificación local causada por movimientos sísmicos inducidos. Vallianatos (2004) combina la técnica H/V con tomografías de suelos para estimar la amenaza sísmica en monumentos históricos en Grecia. Nakamura (2004) aparece nuevamente con un artículo en el que examina la relación existente entre la relación H/V de un movimiento fuerte y la relación H/V encontrada de un microtemblor, en la que muestra la influencia de las ondas Rayleigh en la similitud o diferencia entre estos

En la actualidad, a pesar de los problemas comprobados y relacionados con el origen e interpretación de los microtemblores y un uso proporcionalmente mayor de movimientos sísmicos fuertes para evaluaciones de efectos de sitio, se han convertido en una herramienta básica que complementa dichas investigaciones por costos y rapidez.

D. La experiencia Colombiana en el estudio de microtemblores.

La utilización de microtemblores empieza a verse en Colombia desde la década de 1990-2000, aunque anteriormente varios ingenieros colombianos como Ramírez, Alfaro, Acevedo y Sarria, entre otros, han aportado a nivel nacional e internacional en este tema. La NSR-98 en su título B ordenó realizar estudios de microzonificación Sísmica a las ciudades capitales de departamento y mayores de cien mil habitantes en amenaza sísmica intermedia y alta; justamente dentro de este marco es que se desarrolla la utilización de los microtemblores en el país. La experiencia nacional se centra en ciudades como Bogotá (Ojeda&Yamin, 1996), Armenia (Bermúdez, 1999), Tunja (Paez y Rincón, 2000), Sogamoso (Gutierrez y Ruge, 2002) y del INGEOMINAS en Pereira, Villavicencio, Bucaramanga y Cali, así

como se ha avanzado en dichos estudios en Medellín, Neiva, Pasto, Manizales y Popayán.

III. METODOLOGÍA UTILIZADA

A. Recolección de la Información Existente

En el presente estudio se obtuvo información general del municipio de Aguazul, estudios de geología, geomorfología y tectónica de la región. En el presente trabajo se usó la escala 1:5000, la cual da una mayor precisión en el manejo cartográfico. Dicha información fue integrada y analizada en Sistemas de Información Geográfica SIG.

B. Selección de los Puntos de Registro

Sobre la información y mapas recopilados se trazó una malla de puntos de 300 x 300 m. La malla se ubicó de tal manera que la mayoría de los puntos queden en áreas libres y sobre suelo natural. En la malla se densificaron los puntos en el casco urbano del municipio y en la zona en la que convergen la zona llana y la de piedemonte. Además se tomaron puntos en zonas alejadas del municipio.

Luego de obtener los puntos preseleccionados se hizo una inspección visual en terreno de los puntos, con el fin de descartar puntos donde sea muy difícil el acceso o que resulten irrelevantes. Se evitaron puntos sobre las redes de acueducto, alcantarillado y gas, o que quedaran cerca de laderas de pendiente muy fuerte. Se seleccionaron 117 puntos que abarcan más de 30 Km².

C. Parámetros de Muestreo

- Tasa de muestreo de 100 muestras por segundo (mps).
- Toma de muestreos de tres registros de 180 segundos en cada punto.
- Pre-evento y post-evento de 0 segundos.

D. Equipo

Se usó un acelerógrafo Altus ETNA Kinematics conectado a un computador portátil. Para la ubicación exacta sobre los puntos seleccionados y de la norte magnética se usó un GPS.

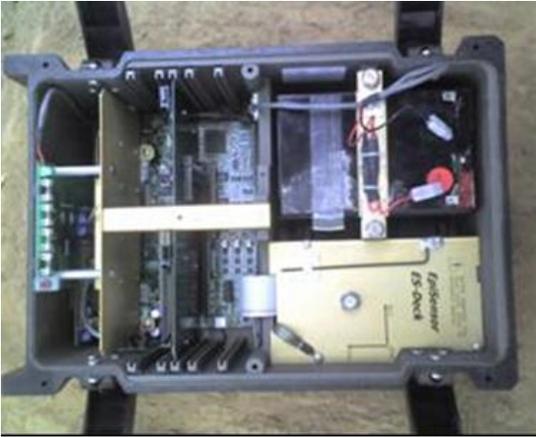


Figura 2. Acelerógrafo altus ETNA Kinematics

E. Toma de los Registros en Campo

Con el programa Quick Talk integrado con el acelerógrafo se manejó el muestreo de datos y modificación de parámetros de muestreo desde el computador. Una vez seleccionado el punto a registrar, se ubicó mediante GPS, descapotando el suelo. Se colocó el acelerógrafo de tal manera que el panel frontal enfrente la norte magnética y se nivela. Para evitar muestreos erróneos ocasionados por los cambios de temperatura, al acelerógrafo se colocó una cubierta de icopor. Una vez ubicado el acelerógrafo se maneja desde el computador portátil, en el cual se realizan manualmente los disparos o registros, controlando el tiempo de duración del evento.

F. Procesamiento de la Información

La información obtenida en formato .EVT, la cual se puede ver inicialmente desde el Quick Look, se transformó a formato ASCII mediante el programa KW2ASC. El análisis se realizó en códigos de programación para el procesamiento de datos mediante la técnica de Nakamura; puntualmente para el presente trabajo se utilizó el código creado por Páez y Rincón [5]. Durante este procesamiento se usaron los siguientes parámetros:

- Longitud de la subventana de 20 segundos, sugerido por Nakamura [4]; con ese valor la FFT trabaja con 2048 puntos.
- Porcentaje de traslape del 50%.
- Procesamiento con los parámetros de muestreo definidos (Véase literal 2.3).
- Corrección de la línea base a cada subventana, filtrado pasabanda con la ventana de Hanning, aplicación de la

FFT y del espectro de Nakamura, suavizado mediante el método de la campana Gaussiana y promedio de estos, desviación estándar e intervalo de confianza del 95% mediante la prueba T-Student.

IV. RESULTADOS

A. Estabilidad de suelo

Busca establecer la variación del nivel de amplificación de ruido que pueden presentar los registros dependiendo de la hora del día en el que se tomen. Esta prueba también busca corroborar la aplicación de la técnica de Nakamura en el sitio y detectar interferencias en la señal, entre otros. La prueba consiste en la toma de datos durante 24 horas continuas en un mismo sitio, tomando un muestreo cada hora.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede determinar que existe un nivel bajo de meteorización de los depósitos de suelo. De igual manera no se observan fuentes puntuales de excitación o que puedan interferir ampliamente en el resultado de la señal. El bajo nivel de amplificación de las ondas indica que el suelo posee alta rigidez.

B. Registros en campo

Después de la prueba de estabilidad se procedió a muestrear los puntos seleccionados. Para la determinación del periodo predominante se tuvo en cuenta el promedio de los 9 periodos pico registrados para cada punto, tomando este dato promediado si los periodos eran muy similares; también se tomó el periodo más crítico si existía cierta variabilidad en los datos encontrados, es decir, se tomó el registro con menor frecuencia.

C. Mapa de isoperiodos

Se manejó una grilla para la elaboración del mapa de 227 por 284 puntos, lo que da una cantidad total de 64468 puntos que cubren un área aproximada de 30Km². Para la elaboración de los mapas preliminares se manejaron los programas ArcView GIS 9.1, Variowin y Surfer 8. Las técnicas manejadas fueron: Spline, Inverso de la Distancia IDW, Mínima Curvatura, Función Radial, Shepard's, Vecino más Cercano, Regresión Polinomial, Triangulación, Local Polinomial, Kriging Ordinario y Kriging Universal. Para la elección del mejor mapa se tuvo en cuenta el de mejor ajuste a los datos, el de

menor varianza, menor error en la presentación visual y en el manejo estadístico de los datos y el de menor residual de los valores. El Kriging Universal dio una mejor presentación visual de mapa y curvas de isoperiodos más reales y acordes con los valores de los muestreos. Los residuales obtenidos fueron en promedio de $-1 \cdot 10^{-4}$ y varianzas espaciales en un rango entre 0 y 0.008, altamente inferiores a los de los otros métodos, los cuales dieron en promedio residuales de $-3E-4$ a $-6E-4$ y varianzas hasta de 0.33.

En el mapa definitivo se observan periodos que van desde los 0 s hasta los 0.4s, acorde con los isoperiodos obtenidos que están en el rango de 0.02 s hasta los 0.36 s, tal y como se puede notar en la figura 4.

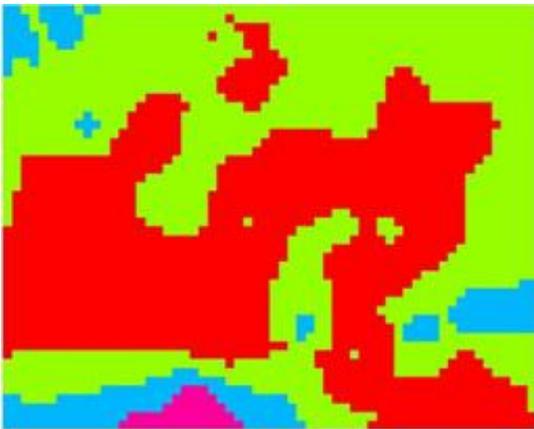


Figura 3. Variograma Kriging Universal

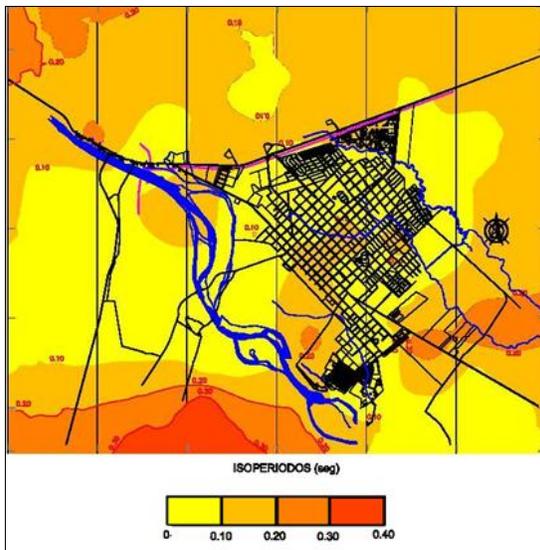


Figura 4. Mapa de Isoperiodos de Aguazul

D. Análisis realizados

Los depósitos de suelos del municipio de Aguazul se caracterizan dinámicamente por ser estratos homogéneos y rígidos, situación reflejada en el mapa de isoperiodos, en el cual el rango de isoperiodos va desde 0.02 s hasta 0.40 s. Los bajos valores de periodos se pueden explicar por los depósitos existentes en la zona, compuestos por su mayoría por gravas y arcillas duras; estas al recibir las ondas sísmicas amortiguan en un nivel bajo o casi nulo.

En su gran mayoría la zona de estudio presenta periodos predominantes desde los 0 hasta los 0.2 s, situación reflejada en la figura 2; hacia la parte sur y este de la zona de estudio los periodos aumentan progresivamente, situación típica de los suelos de piedemonte.

El área de estudio se puede dividir entonces por dos familias o zonas de similar comportamiento dinámico, las cuales son las siguientes:

1) Zona 1: propio de la zona llana de piedemonte, el cual consta de depósitos coluviales y aluviales recientes. Se caracteriza por presentar periodos entre 0 s y 0.1 s; con un promedio en su gran mayoría de 0.05s. Esta zona se caracteriza por presentar amplitudes muy bajas en los espectros, del orden de 1 a 4, tal y como se puede observar en la figura 5.

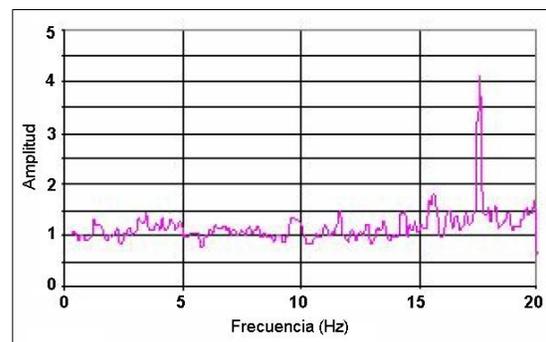


Figura 5. Gráficas de Relaciones espectrales típicas para la zona 1

2) Zona 2: correspondiente a la zona de montaña. Mecánicamente la zona se caracteriza por tener depósitos arcillosos de alta rigidez, propios de los Suelos Residuales, con algunos afloramientos de la Formación San Fernando y por los estratos rocosos de la Formación Diablo. Se caracteriza por presentar periodos entre los 0.1 y los 0.2 s. Este rango de periodos se puede asociar con los

depósitos coluviales y de arcillas duras que predominan en este sector. Las amplitudes de esta zona son bajas aunque en la zona de piedemonte son altas; con valores entre 2 y 8 y en algunos registros con valores hasta de 15. Estos valores de amplitud y la forma de las gráficas en la cual hay una considerable energía bajo la curva en el sitio donde se encuentra el periodo predominante son parecidos a las características de suelos de coluviones, propios de esta zona. (Figura 6).

E. Análisis de posibles efectos locales

1) **Efecto de resonancia.** Es un efecto que podría presentarse en la Zona 1, en el sector del casco urbano de Aguazul. De acuerdo con los resultados obtenidos, los suelos del casco urbano del municipio se caracterizan por tener periodos predominantes hasta de 0.10 s; más del 90 por ciento de las edificaciones de Aguazul son casas de un piso, las cuales por teoría tienen un periodo de estructura en promedio de 0.10 s. La igualdad de estos dos valores podría provocar la resonancia en caso de presentarse un sismo fuerte.

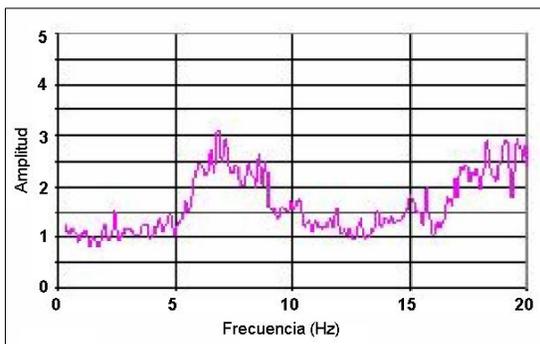
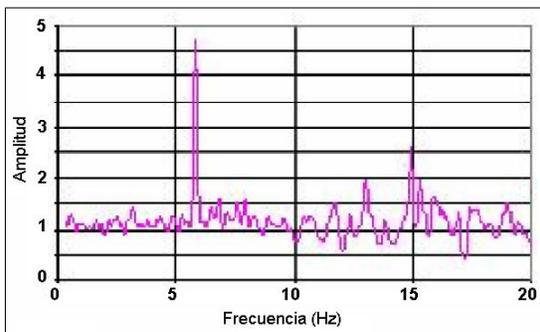


Figura 6. a) Gráfica típica zona 2 b) Gráfica típica zona de coluviones

2) **Tectónica regional.** La tectónica de Aguazul es intensa, representada por fallas activas como la de Guaicáramo y que se encuentran muy cerca del municipio. Aunque se catalogó en la NSR-98 como zona de Amenaza Sísmica Intermedia, los

estudios de sismicidad realizados en el sector arrojaron valores altos en comparación con los mostrados en la NSR98 para este lugar; posteriormente, en la NSR-10 se actualizó el municipio a amenaza sísmica alta.

3) **Sistema constructivo inapropiado.** Las construcciones de Aguazul en un gran porcentaje tienen la característica de ser construidas en Mampostería no reforzada. Este sistema constructivo es poco sísmo resistente, no tiene un sistema estructural definido que asegure su estabilidad y está prohibido por la NSR98 para zonas de Amenaza Sísmica Alta.

4) **Relleno del terreno.** Por la inspección hecha en campo y por los perfiles estratigráficos en la zona, se puede inferir que muchas veces estos no son bien compactados y además los materiales seleccionados muchas veces no son los adecuados, teniendo algunas veces en su composición materiales antrópicos, materia orgánica y desechos. La presencia de rellenos de este tipo aumenta de forma considerable el peligro de colapso de edificaciones cimentadas sobre estos, ya que los rellenos blandos amplifican la onda sísmica.

5) **Licucción de terreno.** Aunque es poco, los altos picos que se obtuvieron en sectores aledaños al río Unete unido a las características de los depósitos de suelos en este sector podrían inferir fenómenos de licuación.

6) **Movimiento de terreno y deslizamientos.** Durante la inspección en campo se pudo detectar visualmente movimiento del terreno, representado por inclinación de postes, hundimientos en edificaciones y falla de cimentaciones entre otros. Aunque no es un problema asociado con la actividad sísmica, la llegada de un temblor podría acelerar el movimiento y falla de construcciones.

V. CONCLUSIONES

La zonificación preliminar realizada, a pesar de contar con pocos estudios de suelos, es un buen estimativo inicial de las características geomecánicas del sector. La forma de depositación encontrada en la parte norte del municipio coincide con el proceso de formación de coluviones, producto del desprendimiento de detritos y suelos residuales propios de las formaciones que afloran en la zona montañosa del sector. Además se encontró que la forma de depositación de los suelos aluviales característicos

de la zona se debe al proceso de formación de un cono de deyección o abanico fluvial, altamente razonable por las geoformas de la zona.

Dinámicamente los depósitos de suelos del municipio de Aguazul se caracterizan por ser muy rígidos y muy homogéneos, situación reflejada en los periodos encontrados en estos. Se observa un aumento gradual de los periodos a medida que se aleja de la zona de cordillera y se adentra a la zona de planicie, ya que se produce el cambio gradual de estratos rígidos – periodos bajos a estratos blandos – periodos altos. Por su parte los espectros encontrados de las relaciones H/V encontrados para los depósitos del sector se caracterizan por no presentar un pico acentuado y amplitudes bajas en las que no es fácil determinar el periodo predominante. En general se observa la similitud de las características mecánicas y dinámicas de los suelos en el municipio; sin embargo en algunas zonas estas no coinciden, por lo que las características mecánicas en estos sitios pueden cambiar de la generalización hecha para estos.

Como parte de los análisis realizados, el mayor problema asociado a la llegada de un sismo fuerte en el municipio es el efecto de Resonancia, ya que los periodos del suelo en el casco urbano coinciden con los periodos de todas las estructuras del municipio, por lo que el efecto de sincronización de los periodos es muy posible que se dé con un terremoto. Sumado a lo anterior, este problema se puede acentuar por el gran porcentaje de construcciones no sismo resistentes edificadas en el municipio y del cual se desconoce su comportamiento dinámico ante un sismo fuerte.

REFERENCIAS

[1] Municipio de Aguazul, Oficina de Planeación, Esquema de Ordenamiento Territorial EOT. Aguazul. 1999.

[2] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente- NSR-98 (Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998), AIS, Títulos A y H, Bogotá D.C., 1998.

[3] A. Alfaro, Estimación de Períodos Predominantes de los Suelos de Barcelona a partir de Microtremors, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 1997, Informe ICC No. GS091-97

[4] Y. Nakamura, “A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface”, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 30 No. 1, pp. 25-33. ISSN 033-9008, Feb. 1989.

[5] A. Paez y O. Rincón, Estimación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de la ciudad de Tunja a partir de microtrepidaciones y diseño de la red de acelerógrafos de Boyacá etapa 1. Proyecto de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2000.

[6] J. Acevedo, y S. Peralta. Función de Transferencia del Sub suelo a partir de microtemblores minimizando el ruido, Trabajo de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., 2000.

[7] A. Alfaro, “Estimación de Efectos Locales con Movimientos Sísmicos y Microtemblores”. Memorias Seminario Análisis de Registros Sísmicos Pontificia Universidad Javeriana, Instituto Geofísico, (Bogotá D.C.), Febrero 23 a 26, 2000.

[8] M. Bermudez et al., “Uso de las microtrepidaciones para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos”, Primer Simposio Colombiano de Sismología. "Avance de la Sismología Colombiana en los últimos 20 años" (Bogotá D.C.), Octubre 9 al 11 de 2002.

[9] 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, Vol. 86, No. 3, pp. 646-654, June 1996.

[10] E. Field, S. Hough and K. Jacob, “Using Microtremors to Assess Potential Earthquake Site Response: a Case Study in Flushing Meadows, New York City”. Bulletin of Seismological Society of America. Vol. 80, No 6, pp.1460-1480, December 1990.

[11] C. Gutiérrez y J. Ruge, Estimación de los periodos predominantes de los depósitos de suelo de la ciudad de Sogamoso a partir de microtemblores e identificación de los sitios donde se ubicará la red acelerográfica municipal, Proyecto de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, 2002.

- [12] H. Kagami, et al., "Observation of 1 to 5 second microtremors and their application to earthquake engineering. Part II. Evaluation of site effect upon seismic wave amplification due to extremely deep soil deposits", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72-3, pp. 987-998, 1982.
- [13] K. Konno and T. Ohmachi, "Ground Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor", *Bulletin of Seismological Society of America*. Vol. 88, No 1, pp. 228-24, February 1998.
- [14] C. Lachet, and P. Bard, "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique". *Journal Physics of the Earth*, Vol. 42, pp. 377-397, 1994.
- [15] J. Lermo, and F. Chávez-García, "Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 83, No. 5, pp. 1574 -1594, October 1993.
- [16] Y. Maruyama, F. Yamazaki and T. Hamada, "Microtremor measurements for the estimation of seismic motion along expressways". *International Conference On Seismic Zonation*, Vol. 2, pp. 1361-1366, 2000.
- [17] M. Mucciarelli et al. "Refining Nakamura's technique: processing techniques and innovative instrumentation". *European seismological commission, XXV general assembly*. 1996.
- [18] Y. Nakamura. "Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications". *XII World Conference of Engineering Earthquake*, 2000.
- [19] _____, T. Sato and J. Saita, "Evaluation of the Amplification Characteristics of Subsurface using Microtremor and Strong Motion- the Studies at Mexico City". Paper No. 862 in *13th World Conference on Earthquake Engineering*. (Vancouver, B.C., Canada), August 1-6, 2004.
- [20] T. Noguchi T and R. Nishida, "Determination of subsurface structure of Tottori plain using microtremors and gravity anomaly" *Journal of Natural Disasters Science*, Vol. 24, pp.1-13, 2002.
- [21] A. Ojeda, *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 D.C., 1996.
- [22] D. Olszewska and S. Lasocki, "Application of the horizontal to vertical spectral ratio technique for estimating the site characteristics of ground motion caused by mining induced events", *Acta Geophysica Polonica*, vol. 52, No. 3, pp.301 – 318, 2004.
- [23] A. Sarria, *Ingeniería Sísmica*. Bogotá D.C: Ediciones Uniandes, 1995.
- [24] K. Seo, K., "On the applicability of microtremors to engineering purpose: Preliminary report of the joint ESG research on microtremors after the Kushiro-oki (Hokkaido, Japan) earthquake", *Proc. 10th European Conference on Earthquake Engineering*, vol. 4, pp. 2643-2648, april 2004.
- [25] F. Vallianatos, *HVSR and electrical tomography for seismic response estimation: an example from a cultural heritage site in Greece*. *Proc. of the European Seismological Commission*. 2004.

a.