

EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO EN DEPÓSITOS VOLCÁNICOS Y SUS IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO SÍSMICO

Luis E. Yamin¹

Bernardo Caicedo²

Erick Solano³

Abstract

The presence of superficial soils of volcanic origin and large man made fills of varying materials, which are supported by more competent soils, is a general characteristic of the Colombian Coffee Growing Region. This paper present results from laboratory tests performed on unaltered samples of volcanic ash soil, the typical ranges of dynamic properties observed and the variation of shear modulus and associated damping with level of strain. It also evaluates the expected dynamic response of representative deposits and presents the results of sensibility analysis of relevant variables. The dynamic response is compared with one of the available accelerographic records for the January 25th, 1999 Armenia Earthquake, and the design spectra is proposed for areas with different characteristics.

1. ESTUDIOS DE MICROZONIFICACION SISMICA

Las tres principales ciudades de la región cafetera colombiana son en su orden Pereira (380000 habitantes), Manizales (370000 habitantes) y Armenia (270000 habitantes). Considerando la alta actividad sísmica que caracteriza la zona, las tres ciudades vienen adelantado desde hace algunos años estudios de microzonificación sísmica que tienen por objetivo estimar la respuesta sísmica esperada en las diferentes zonas características para propósitos de diseño y reforzamiento de estructuras, para la estimación de escenarios futuros de daños y pérdidas para el desarrollo de planes de prevención y atención de emergencias. Ante la escasa información instrumental disponible, se ha utilizado la siguiente metodología general para adelantar los estudios de microzonificación mencionados:

- a) Realización de estudios básicos incluyendo los siguientes: geología regional y local, neotectónica, sismicidad histórica e instrumental, instalación de redes locales de acelerógrafos, caracterización geofísica (gravimetría, refracción sísmica y microtemores), caracterización geotécnica mediante recopilación de estudios previos, geomorfología, topografía y cartografía.
- b) Evaluación de la amenaza sísmica local y definición de sismos de diseño, utilizando como base los estudios previos existentes a nivel nacional [1],[4],[8] y [9] y la información de sismicidad histórica e instrumental existente.
- c) Investigación geotécnica detallada mediante la realización de perforaciones en las diferentes zonas características de la ciudad, ensayos de campo para medición de velocidad de onda y ensayos de laboratorio para caracterización del comportamiento dinámico de los suelos.

¹ Profesor Asociado, Universidad de los andes

² Profesor Asociado, Universidad de los Andes

³ Estudiante de Magíster, Universidad de los Andes

- d) Evaluación de la respuesta dinámica de los diferentes depósitos característicos mediante modelos analíticos unidimensionales.
- e) Evaluación de la respuesta dinámica relacionada con efectos geométricos tales como presencia de zonas de relleno, zonas de taludes y colinas mediante modelos analíticos bidimensionales.
- f) Definición de los espectros de diseño sísmo resistente para cada una de las zonas identificadas como de comportamiento sísmico similar.

Todos estos estudios se encuentran bien avanzados lo cual permite adelantar información importante que sirve de base para establecer los requisitos de diseño de toda la zona cafetera.

2. CARACTERIZACION DEL SUBSUELO DE LA REGION CAFETERA DE COLOMBIA

El eje cafetero está localizado en la vertiente occidental de la cordillera central de Colombia en la cual se encuentran más de 23 volcanes activos identificados de alta actividad en el pasado. Es así como los depósitos superficiales de toda la zona se caracterizan por la presencia de cenizas volcánicas o depósitos de caída piroclástica de espesor variable entre 3 m y 35 m. Estos materiales se depositaron sobre unidades del Terciario y del Cretácico o sobre depósitos más recientes conformados por flujos de escombros, depósitos aluviales o coluviones. También se encuentran a nivel superficial abundantes zonas de rellenos hidráulicos, mecánicos o sanitarios con diferentes geometría y distribuciones de alta heterogeneidad.

La Figura 1 presenta una sección típica tomado de la referencia 3, correspondiente a un corte en dirección Norte - Sur en la zona central de la ciudad de Pereira. Se evidencian los depósitos de cenizas superficiales en casi toda la zona y la presencia de los conglomerados en profundidad de diferentes características en cuanto

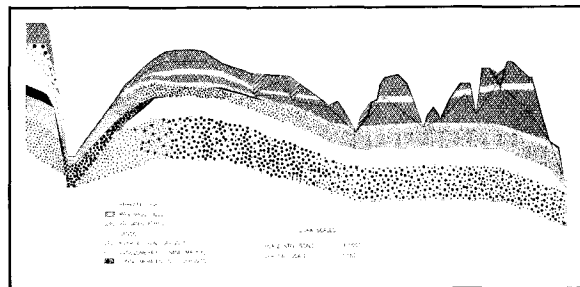


Figura 1. Sección típica en Pereira

a granulometría y propiedades de la matriz. También se evidencian las zonas de rellenos antrópicos en antiguos cauces o quebradas. Finalmente se aprecia como en zonas de mayor pendiente, en cercanías a las rondas de los ríos, el espesor de las cenizas disminuye, desapareciendo en las zonas de pendientes abruptas y en los cauces mismos de los ríos.

3. CARACTERIZACION GEOTECNICA DEL SUBSUELO PARA LA RESPUESTA DINAMICA

El subsuelo característico, para las zonas de mayor espesor de cenizas (del orden de 30 a 35 m) puede caracterizarse como se muestra en la Figura 2. Se presenta un perfil típico de cenizas depositadas sobre conglomerados. Para las cenizas se encuentran índices de plasticidad variando entre 0 y 110%, con humedades naturales entre 10 y 200%. Las densidades húmedas medidas están entre 1.2 y 2.0 Ton/m³. Los rangos de velocidades de ondas de cortante están entre 80 y 250 m/s y la resistencia a la compresión simple (q_u) basadas en compresiones confinadas del orden de 0.1 a 3 kg/cm².

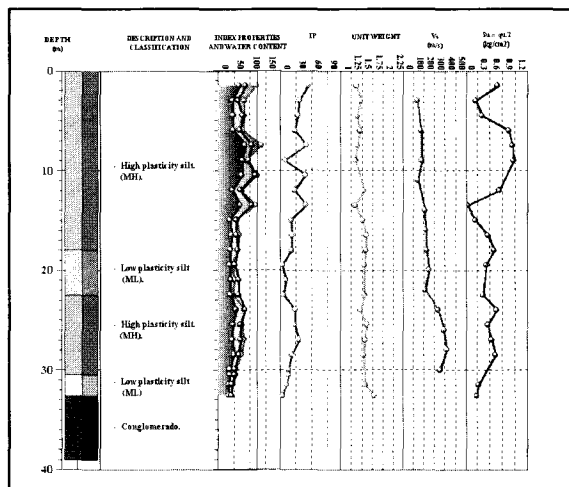


Figura 2. Perfil típico del subsuelo

Las cenizas volcánicas, de acuerdo con la clasificación unificada de suelos, clasifican como limos y arcillas de alta compresibilidad (MH y CH). Estos suelos presentan una cementación apreciable. En efecto, a pesar de que el mecanismo de deposición es eólica, presentan relaciones de sobreconsolidación que varían entre 3.0 y 7.0, además presentan altas relaciones de vacíos que varían entre 1.0 y 4.5%. Dada la alta relación de va-

cíos, las cenizas volcánicas pueden sufrir colapso cuando se someten a esfuerzos de corte cíclicos.

La alta variabilidad de las propiedades de las cenizas se evidencia en la Figura 3 en la cual se han agrupado los resultados de más de 735 estudios geotécnicos realizados en la zona (referencia 2), en relación con propiedades geotécnicas básicas de las cenizas. Se presenta la agrupación de resultados, límite plástico, índice

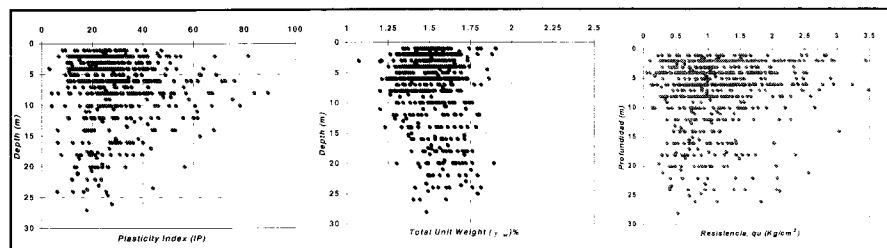


Figura 3. Alta variabilidad de las propiedades de las cenizas

de plasticidad, resistencia a la compresión simple (q_u) y peso unitario húmedo variando con la profundidad.

La caracterización del comportamiento dinámico de las cenizas se estudia mediante la realización de ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas. Se realizaron ensayos triaxiales cíclicos (norma ASTM D5311-92), ensayos de columna resonante (norma ASTM D4015-92) y ensayos de velocidad de onda sobre muestras inalteradas confinadas en cámaras triaxiales ("Bender Element", norma ASTM D2845-95). Los resultados de los ensayos realizados indican de nuevo una alta variabilidad en el comportamiento dinámico de las cenizas. La Figura 4 presenta los rangos de comportamiento típico observados en relación

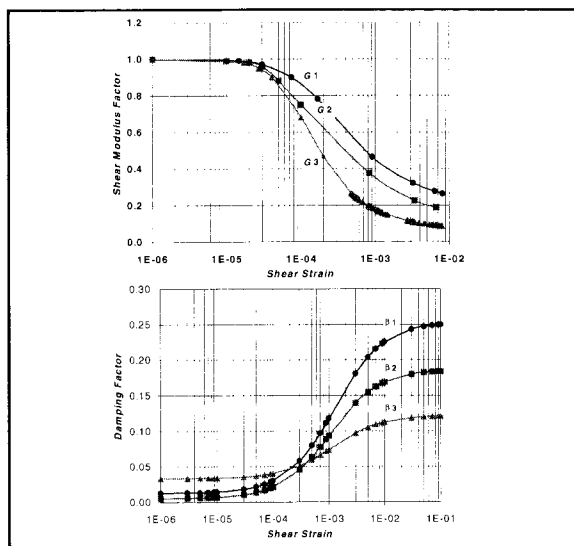


Figura 4. Parámetros dinámicos para cenizas volcánicas

con la degradación de la rigidez al cortante y con el amortiguamiento en función de la deformación de corte.

El módulo de rigidez al corte máximo se estima con base en mediciones en campo de velocidades de onda de cortante en ensayos Cross Hole (norma ASTM D4428M-91). La Figura 5 resume los valores típicos obtenidos. Las velocidades de onda de cortante varían para estos depósitos entre 80 y 250 m/s. La Figura 6 presenta la correlación entre el módulo de rigidez al cortante máximo y la profundidad. Se establecen dos correlaciones correspondientes al valor medio más y menos una desviación estándar. También se midieron algunas velocidades de onda de cortante puntuales en los depósitos de conglomerados más profundos encontrándose velocidades de onda entre 800 y 900 m/s.

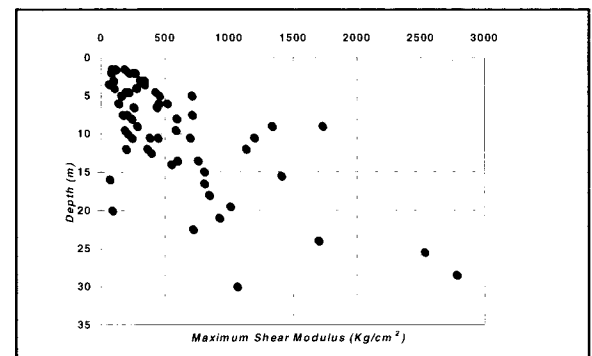


Figura 5. Módulo cortante máximo vs Profundidad

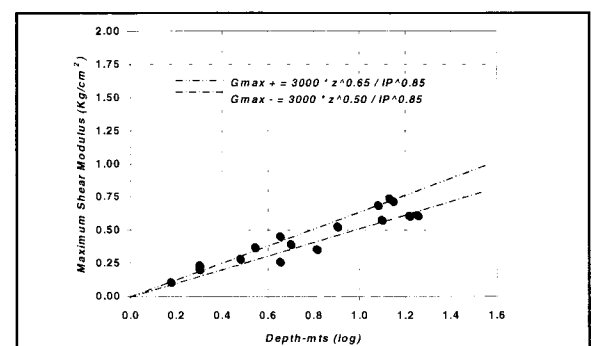


Figura 6. Profundidad vs Módulo cortante máximo

Finalmente se realizaron algunos ensayos de corte simple cíclicos. La Figura 7 presenta uno de los resultados típicos encontrados.

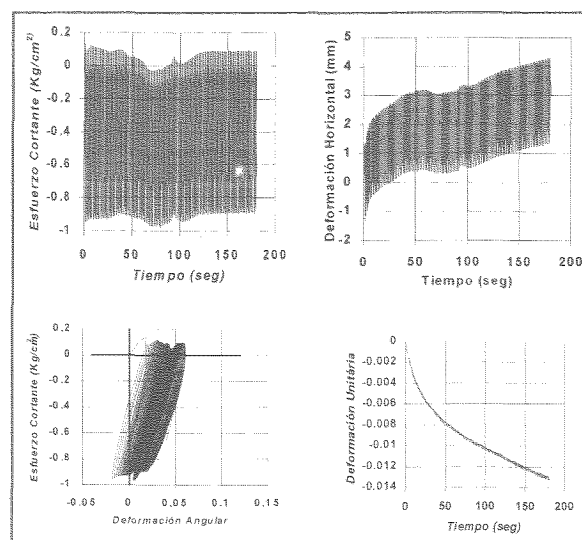


Figura 7. Ensayo de corte simple cíclico

Los estudios realizados utilizando el aparato de corte simple cíclico muestran que el colapso puede producir deformaciones verticales unitarias hasta del orden del 1%. Dado que, para que se presente el colapso, se debe superar la resistencia dada por la cementación, se observa que para una misma relación entre el esfuerzo de corte cíclico y el esfuerzo axial y para un número de ciclos de carga dado, los valores de deformación axial aumentan a medida que aumenta la relación entre el esfuerzo cortante y el esfuerzo de preconsolidación.

4. CARACTERIZACION DE LA RESPUESTA SISMICA

La caracterización de la respuesta sísmica de depósitos típicos de cenizas se evalúa analíticamente mediante modelos unidimensionales de respuesta no lineal equivalente. Para el efecto se utiliza el programa de computador SHAKE-91 [7].

Debido a la alta variabilidad en las propiedades y parámetros del suelo, se estudia la sensibilidad en la respuesta sísmica ante las variaciones esperadas en los diferentes parámetros.

Para el análisis de respuesta sísmica se selecciona un perfil típico con una profundidad de 30 m, densidad media del depósito de 15 KN/m³, módulo de rigidez caracterizado mediante la ecuación de G_{max} - de la

Figura 6, y curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento correspondientes a las curvas G₂ y β₂ de la Figura 4. El conglomerado se define con una densidad de 17 KN/m³ y una velocidad de onda de corte de 1000 m/s. La señal de entrada de referencia a nivel de conglomerado corresponde a un sismo sintético con foco en la zona de Benioff a unos 100 km de profundidad y unos 20 km de distancia horizontal. La aceleración máxima del sismo a nivel del conglomerado tiene una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años que corresponde a un período de retorno promedio de 475 años.

Se presentan los resultados de análisis de sensibilidad a las diferentes variables. Para el efecto se mantienen los anteriores parámetros de referencia y se varía únicamente el parámetro que se indica a continuación. En primer lugar se estudia la variación para diferentes señales de entrada correspondientes a sismos originados en fuentes sísmogénicas diferentes. Se definen dos sismos alternativos sintéticos correspondiente a una fuente cercana superficial con aceleración máxima del orden de 0.35 g (basada en los registros del sismo de Armenia de enero 25 de 1999, ver referencia 5) y otro correspondiente a una fuente lejana (zona de subducción o similar) con una aceleración máxima de 0.10 g. La Figura 8 presenta las tres señales hipotéticas.

La Figura 9 presenta los espectros de respuesta en superficie para las tres señales para un amortiguamiento con respecto al crítico del 5 %.

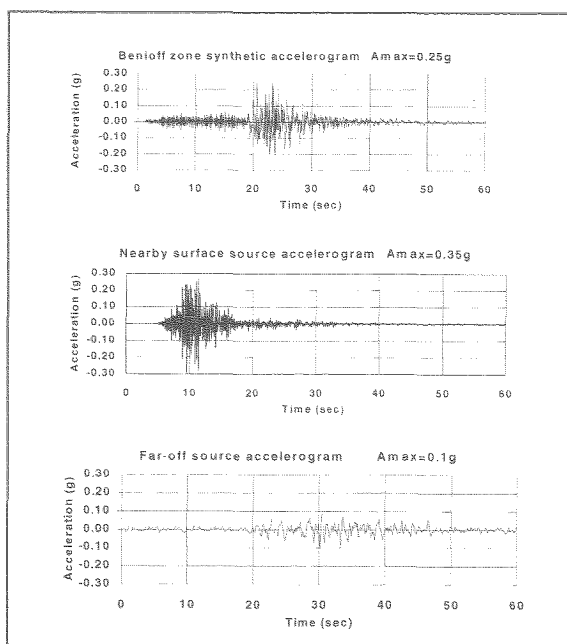


Figura 8. Acelerogramas hipotéticos

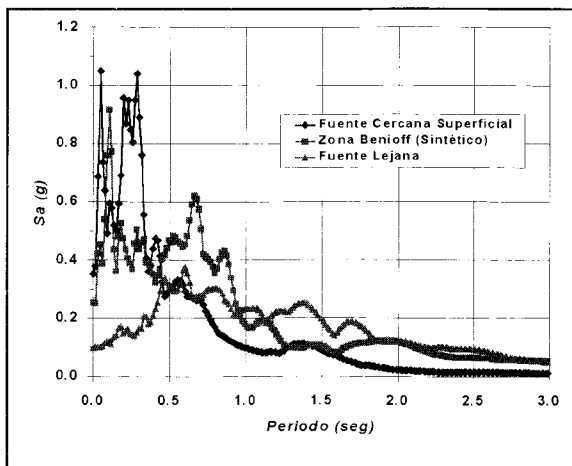


Figura 9. Espectros de respuesta para los acelerogramas hipotéticos

La sensibilidad a la velocidad de onda del conglomerado se presenta en la Figura 10. El efecto de la forma de las curvas de degradación de rigidez y de amortiguamiento se presenta en la Figura 11. La incidencia del módulo de rigidez al cortante en la respuesta se indica en la Figura 12. Finalmente la Figura 13 presenta la variación que se obtiene en los resultados para diferentes profundidades del depósito de cenizas sobre los conglomerados.

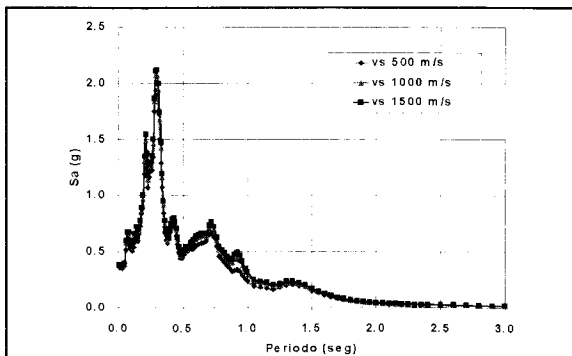


Figura 10. Espectros de respuesta para diferentes velocidades de onda del conglomerado.

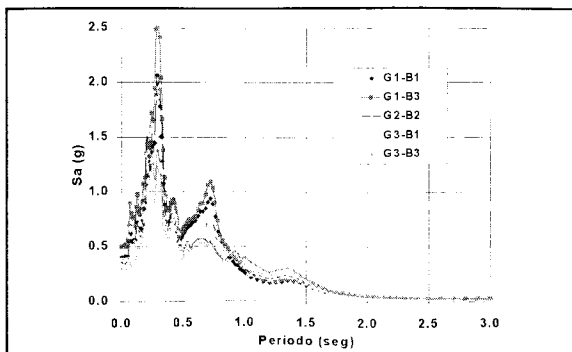


Figura 11. Espectros para diferentes parámetros dinámicos del suelo

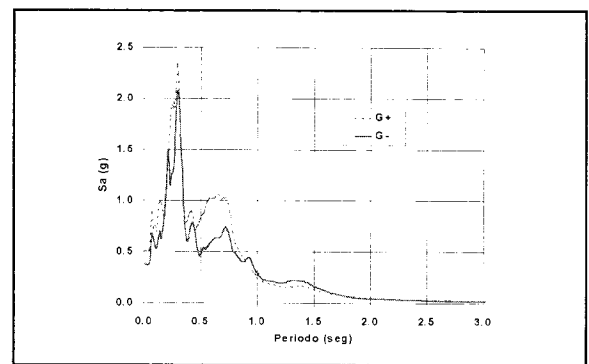


Figura 12. Espectros de respuesta para diferentes curvas de $G_{máx}$

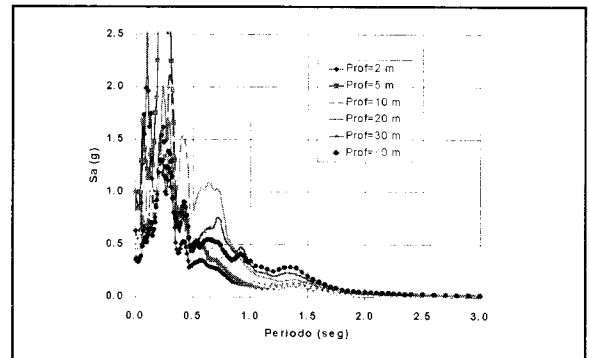


Figura 13. Espectros de respuesta para diferentes espesores de suelos blandos

5. ESPECTROS DE DISEÑO RECOMENDADOS

La microzonificación sísmica de la zona se adelanta caracterizando las variables que más afectan la respuesta dinámica en superficie. En primer lugar está la profundidad de los depósitos de cenizas que es la variable geométrica principal. El espesor de los depósitos define zonas con diferente comportamiento sísmico.

Por otro lado, la alta variabilidad de las propiedades mecánicas y de los parámetros dinámicos del suelo, no solo de un lugar a otro de la ciudad, sino en cada uno de los puntos de investigación e incluso dentro de un mismo estrato no permite establecer una caracterización única del depósito en un sitio determinado. Debe tenerse en cuenta que la caracterización mediante ensayos de laboratorio es puntual y por lo tanto la variabilidad de los parámetros dinámicos no puede establecerse fácilmente. Por otro lado los resultados de ensayos de campo sí permiten evaluar la variabilidad dentro de un mismo depósito de suelo.

Se recomienda entonces utilizar un espectro de diseño que involucre en cierta forma la variabilidad de todos

los parámetros estáticos y dinámicos del suelo pero que depende fundamentalmente de la profundidad de los depósitos de cenizas en la zona. La Figura 14 presenta los espectros de diseño recomendados para zonas

con diferentes espesores de depósitos de cenizas (5 m, 10 m, 20 m, 25 m, 35 m). Para un coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico de 5%.

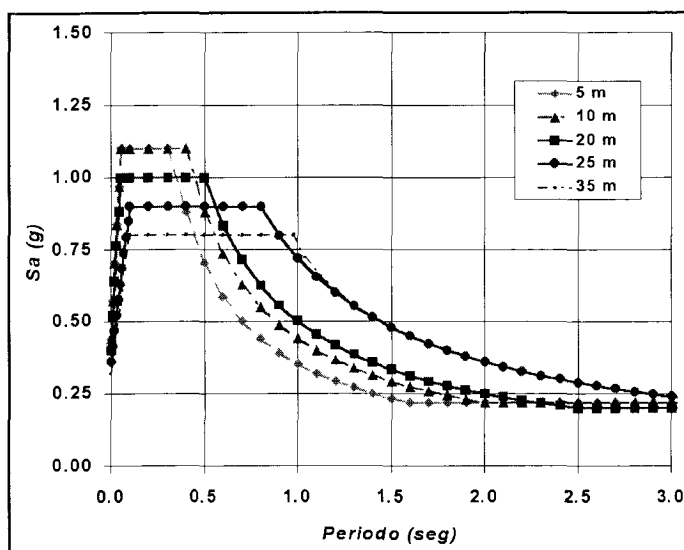


Figura 14. Espectros de diseño recomendados en superficie para diferentes espesores de depósitos de cenizas

6. REFERENCIAS

- [1] AIS (1996), Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Octubre, 254pp.
- [2] CARDER (1999), Exploración geotécnica, Investigación de laboratorio y Microzonificación sísmica de las áreas urbanas y suburbanas de las ciudades de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal. Pereira, Colombia. Abril, 147 pp.
- [3] CARDER (1996), Proyecto para la mitigación del riesgo sísmico de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, Plan de acción ambiental. Pereira, Colombia. Agosto, 84 pp.
- [4] CARDER (1999), Exploración geotécnica, Investigación de laboratorio y Microzonificación sísmica de las áreas urbanas y suburbanas de las ciudades de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal. Pereira, Colombia. Abril, pp 30-37.
- [5] CARDER (1999), Red local de acelerógrafos de la ciudad de Pereira. Pereira. Enero.
- [6] Hudson, M., Idriss, I. and Beikae, M. (1994), QUAD-4M: A computer program evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base. Davis: University of California. May, 68pp.
- [7] Idriss, I., and Sun, J. (1992), SHAKE-91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Davis: University of California. Noviembre, 35pp.
- [8] OMPAD (1998), Estudios de amenaza sísmica y evaluación sismogeotécnica preliminar para la zonificación sísmica de Manizales. Manizales, Colombia. Marzo, pp39-65.
- [9] OPES (1996), Proyecto Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. Santa Fe de Bogotá, Colombia. Noviembre, pp57-63.