EVALUACIÓN DE ZONAS CON POSIBLE AMPLIFICACIÓN TOPOGRÁFICA Y SUSCEPTIBLES A DESLIZAMIENTOS DEBIDO A UN SISMO EN IBAGUÉ-COLOMBIA

Juliette Beltrán[1], William Castiblanco[1], Andrés Alfaro[2]

[1] *Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá, Colombia)*
[2] *CIEES (Bogotá, Colombia)*

RESUMEN

Este artículo presenta la evaluación de las zonas susceptibles a presentar fenómenos de remoción en masa y las zonas con posible amplificación de la señal sísmica, debido a la topografía del terreno, ante la ocurrencia de un evento sísmico, utilizando un Sistema de Información Geográfico (SIG), para la ciudad de Ibagué. Los datos de entrada en el SIG fueron la topografía, la geología, la geomorfología, la descripción de suelos en superficie y en profundidad. Los resultados son indicativos, por lo cual es necesario refinar los análisis teniendo en cuenta variables hidrometeorológicas y antrópicas, entre otras.

Palabras Clave: Ibagué, Colombia, Sismos, Deslizamientos, Amplificación Topográfica, SIG.

TOPOGRAPHIC AMPLIFICATION AND LANDSLIDES HAZARD ASSESSMENT DUE TO AN EARTHQUAKE IN IBAGUE-COLOMBIA

ABSTRACT

This paper presents the assessment of associated effects due to earthquakes, like landslides and topographic amplification of ground motion, for the city of Ibagué, using a Geographic Information System (GIS). Input data for the GIS system included: Topography, Geology, Geomorphology, and Surface Soil Description resulting in two maps: a) zones of potential landslides and b) zones of potential topographic amplification. It is advisable to improve the assessment by taking into account hydro meteorological and anthropogenic issues.

Key Words: Ibagué, Colombia, Earthquakes, Landslides, Topographic Amplification, GIS.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Ibagué, a 212 km al Oeste de Bogotá, está en una zona sísmicamente activa con la presencia de varias fallas geológicas, como son Chapetón-Pericos, Buenos Aires e Ibagué, que atraviesan la ciudad. Adicionalmente, por encontrarse en la cordillera central de los Andes Colombianos, dicha ciudad está situada cerca de varios volcanes en actividad como el Tolima y el Machín. A lo largo de su historia, la ciudad de Ibagué ha sido afectada por varios sismos, entre los que se destacan el del 12 de marzo de 1595; el del 1 de enero de 1825, el del 20 de diciembre de 1961, con una magnitud Ms de 6.8, y el del 25 de enero de 1999, con magnitud ML de 6.2, que causaron daños materiales y víctimas (Ramírez, 1975; Franco-Idarraga y Pineda, 1999). Los mecanismos focales de los terremotos con magnitudes mayores a 5.5 se muestran en la figura 1.

En la ciudad de Ibagué se han presentado deslizamientos y desprendimientos en los bordes de los escarpes del río Combeima y de las quebradas Chipalo, La Pioja, San Antonio, La Volcana, El Tejar, Canal del Centenario y parte de la quebrada El Jordán. Hay información de eventos en el área urbana de la ciudad de Ibagué, como el ocurrido en el río Combeima que sufrió un represamiento debido a un deslizamiento de rocas en el cauce del río (El Tiempo, 6/03/1993). Otros casos son: un deslizamiento el 23/09/99 que causó 3 muertos, 2 heridos, 47 damnificados, 6 viviendas destruidas y 15 averiadas; y el

Recibido: 29/01/06 Revisado: 10/03/06 Aceptado: 03/07/06

17/06/2000 con 50 familias damnificadas por desbordamientos y deslizamientos en la cuenca del río Cocora (IDEAM, 2000).

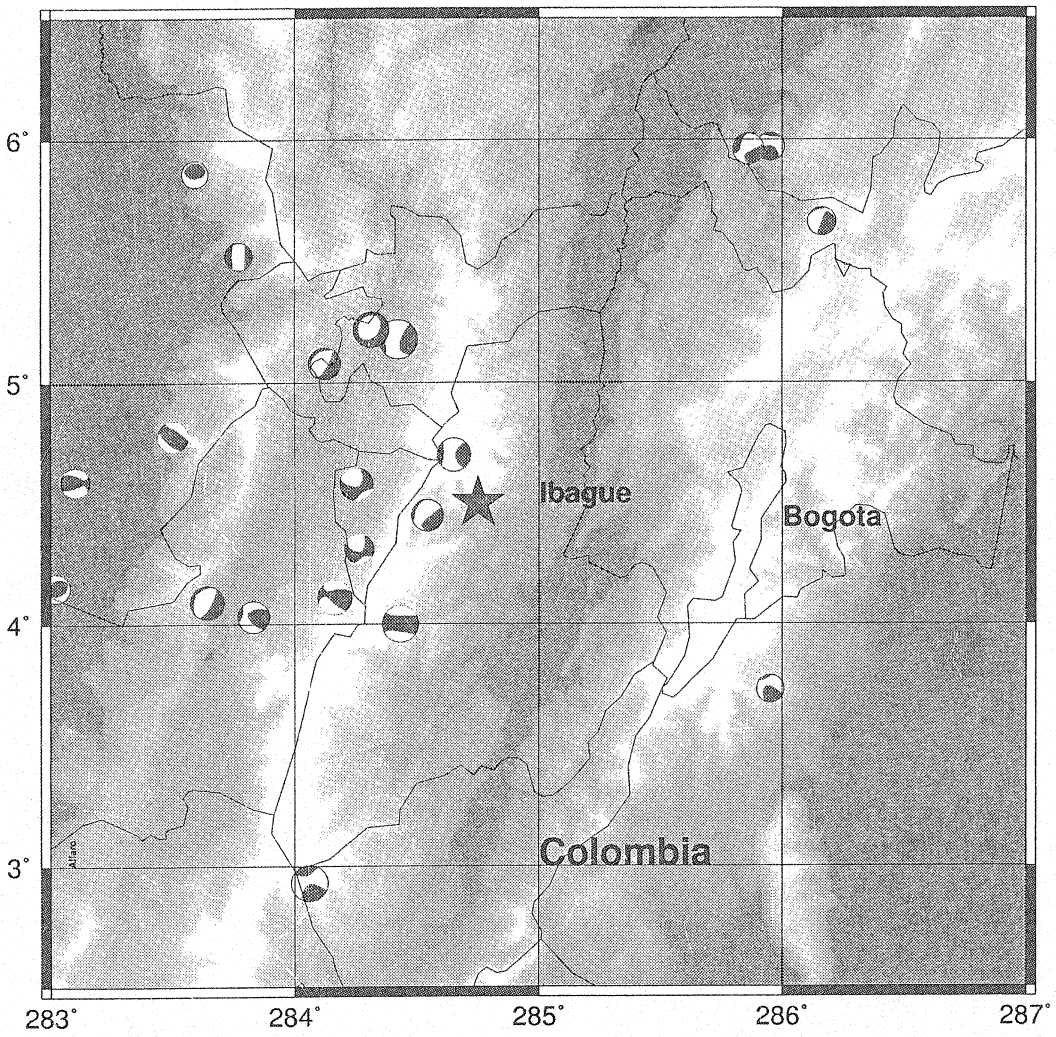

Figura 1. Mecanismos Focales de terremotos con magnitudes mayores a 5.5 de 1976 – 2005 (Fuente de Datos Proyecto CMT: Harvard (2005)).

La evaluación de efectos sísmicos asociados identificados en este caso como las zonas susceptibles a presentar fenómenos de remoción en masa y de las zonas con posible amplificación de la señal sísmica para la ciudad de Ibagué se ha realizado a partir del análisis de información existente, generando nueva información cartográfica, que incluye ambos fenómenos. La información generada puede ser de utilidad para el planeamiento y desarrollo de la ciudad, y para la prevención de desastres de tipo sísmico y de origen antrópico. Los mapas de la ciudad de Ibagué utilizados en el SIG fueron elaborados por el Instituto Geofísico y la compañía Consultoría Colombiana S.A. (2000). Estos mapas incluyen Geología, Geomorfología, Geotecnia y Zonificación Morfodinámica, los cuales fueron elaborados en escala 1:25.000 a partir de análisis de información secundaria (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC 1967a, 1967b,1989,1991,1993; Instituto Colombiano de Geología y Minería-Ingeominas, 1974, 1992; Murcia y Vergara,1986; Núñez, 1996; Vergara y Cárdenas, 1999; DANE, 2000). Estos estudios fueron complementados por Martínez (2001) quien analizó 274 perforaciones. Con dicha información de campo Díaz-Granados (2001) estimó 108 funciones de transferencia de los suelos de Ibagué, evaluando los períodos dominantes de los suelos y las amplificaciones asociadas (Alfaro *et al.*, 2001).

Este artículo presenta la evaluación de los efectos sísmicos asociados antes indicados para la ciudad de Ibagué, mediante la utilización de un SIG; de acuerdo con los lineamientos de la *Association Française du Génie Parasismique* AFPS (1995) y del *Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering* (1999). Dicha evaluación se considera un estudio de primer grado, es decir, el más elemental; sin embargo la información obtenida invita a continuar los estudios y a profundizar en los alcances.

2. ESTIMACIÓN DE LA AMPLIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA SEÑAL SÍSMICA

Los efectos sísmicos locales pueden dividirse en general en dos grupos: los debidos a los materiales constituyentes y los debidos a efectos geométricos. Los primeros corresponden a la modificación de la señal sísmica debido a los tipos de suelo, mientras que los segundos se refieran a la orientación o el ángulo de incidencia de las ondas con relación al estrato de suelo. Con relación a los efectos de materiales, para la ciudad de Ibagué se evaluaron las funciones de transferencia en 108 puntos (Alfaro et al., 2001), presentándose periodos dominantes del terreno en periodos cercanos a los de las estructuras existentes en la ciudad. Tal como se ha indicado previamente, en este trabajo evalúan los efectos geométricos para dicha ciudad.

La presencia de valle, cañones, colinas y demás características topográficas tienen una influencia en la propagación de los campos de ondas incidentes. Los efectos sísmicos locales asociados a la geometría se originan cuando las dimensiones de las irregularidades topográficas coinciden con las longitudes de onda del movimiento y producen amplificaciones en laderas y en montañas. La amplificación de las señales se presenta en zonas convexas y la reducción en zonas cóncavas.

La estimación de la posible amplificación topográfica, se evaluó a partir de un perfil de características de las zonas de baja pendiente, como se ve en la figura 2 (Association Française du Génie Parasismique - AFPS, 1995). La metodología simplificada de la AFPS (1995) busca determinar cambios bruscos en la topografía del terreno, identificando las convexidades que pueden causar amplificación de la señal sísmica debido a la geometría del terreno.

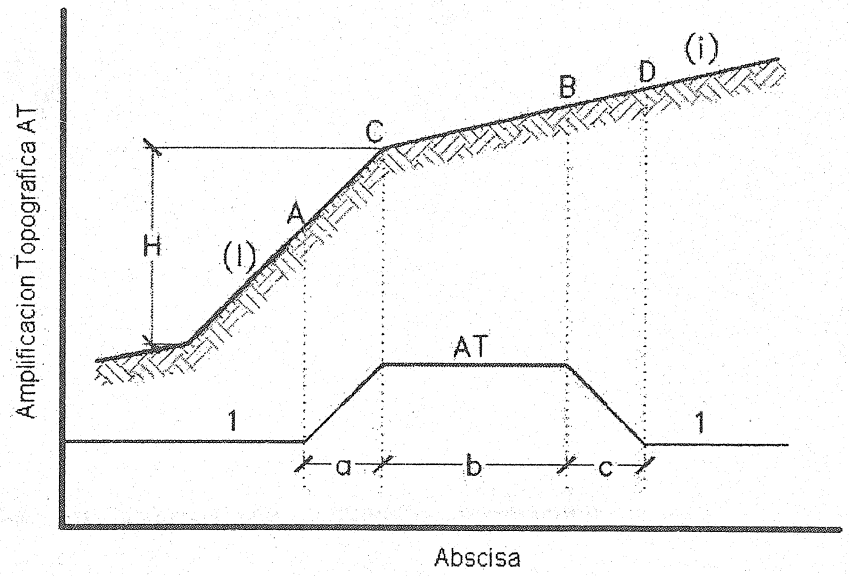

Figura 2. Parámetros para estimar la posible Amplificación Topográfica (AFPS, 1995).

El coeficiente de Amplificación Topográfica (AT) se determina convencionalmente a lo largo de la pendiente utilizando la ecuación 1.

$$AT = 1 + 0.8\,(I - i - 0.4) \qquad (1)$$

La recomendación francesa limita el valor de la Amplificación Topográfica (AT) a 140%; el valor de dicha amplificación se estima que se presentara desde el cambio de pendiente hasta una longitud mínima b, la cual será de 20*I* o (H +10)/4.

Donde *I* e *i* son respectivamente los gradientes de los taludes inferior y superior. Se estima que el factor de amplificación topográfica decrece el talud inferior hasta volverse 1 en una distancia a = H/3 y en el talud superior en una distancia *c* = H/4.

Con la información de la topografía del terreno, mediante la utilización del SIG, es posible determinar rápidamente las pendientes del terreno y los gradientes topográficos. Aquellas zonas con un cambio brusco de la topografía, que generen convexidades y cuyo AT sea mayor que 1, se catalogan como zonas susceptibles a presentar amplificación topográfica. La figura 3 muestra en círculos blancos las zonas identificadas como susceptibles a presentar amplificación topográfica.

Figura 3. Mapa de Zonas con Posible Amplificación Topográfica de la Señal Sísmica (círculos blancos) en Ibagué- Colombia(Beltrán y Castiblanco, 2001) (Sin Escala).

3. ZONAS SUSCEPTIBLES A LA GENERACIÓN DE FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA

La evaluación de la susceptibilidad de terrenos a la generación de fenómenos de Remoción en masa, la cual incluye deslizamientos y caída de rocas, entre otros, se realizó mediante el método de la analogía (AFPS, 1995), es decir, se hizo un inventario de las zonas que han presentado fenómenos de remoción en masa, lo cual incluyó la geología y la geomorfología (Jaramillo *et al.*, 2000), luego, utilizando el SIG se realizó una estimación de las pendientes originales del terreno, antes de presentarse los fenómenos de remoción en masa (Beltrán y Castiblanco, 2001). Con la información de geología, geomorfología, geotecnia y pendientes, se asumió que las zonas que tuvieran los mismos materiales y las

mismas o mayores pendientes, serían potencialmente susceptibles a presentar fenómenos de remoción en masa (AFPS, 1995). Sin embargo, es importante tener en cuenta que hay factores adicionales a evaluar: aspectos hidrometeorológicos, aspectos antrópicos, como pueden ser construcciones o el manejo de aguas lluvias y de aguas residuales, entre otros, además de las aceleraciones pico esperadas y la duración del sismo entre otros.

El alcance de este estudio y la información disponible permitió realizar esta aproximación gruesa, a pesar de no disponer en la ciudad de Ibagué de correlaciones entre magnitudes de eventos sísmicos y volúmenes de fenómenos de remoción en masa generados por estos, esta información parece no estar disponible para ninguna región de Colombia.

Tomando como base la cartografía en escala 1:25.000 generada por los estudios de Instituto Geofísico y Consultoría Colombiana (2000) y Escobar (2001) se generó un Modelo de Red Irregular Triangular en ARCINFO Workstation (ESRI, 1998) del área en estudio, con curvas de nivel cada 25 metros, con el cual se evaluaron los gradientes topográficos (Beltrán y Castiblanco, 2001).

En la Figura 4 se observan zonas susceptibles de presentar fenómenos de remoción en masa, estas zonas correspondes a abanicos coluvio-aluviales *Qcd*, correspondientes a las quebradas Lavapatas, Chipalito, El Cucal, Los Cristales, San Antonio, Ambalá, Las Balsas, Las Panelas, La Arenosa, La Tusa, San Roque, Paujil, Chembe, Chembecito, Moreno y La Helena.

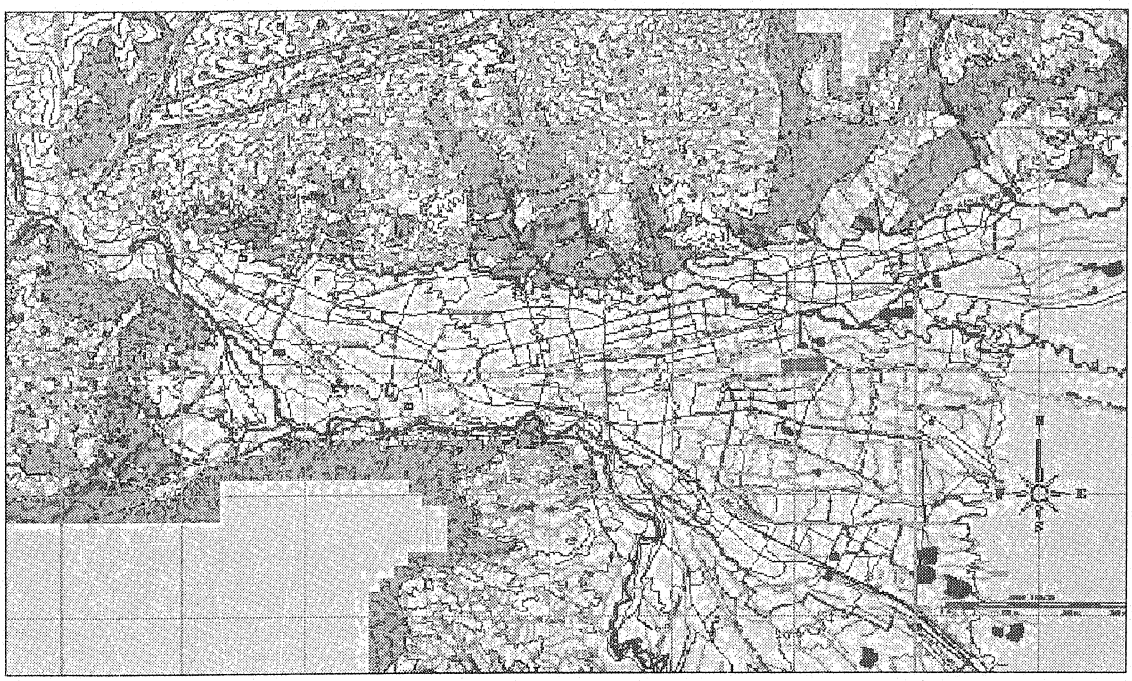

Figura 4 Mapa de Zonas con Posible Presencia de Fenómenos de Remoción en Masa (Modificado de Beltrán y Castiblanco, 2001) (Sin Escala).

Las áreas estimadas susceptibles a sufrir fenómenos de remoción en masa son coherentes con antecedentes históricos reportados por Keefer(1984): para sismos con Magnitudes de 5.5 las áreas afectadas han alcanzado 200 km2; para Magnitudes de 6.5 las áreas han sido de hasta 2.000 km2, para Magnitudes de 7.5 hasta 20.000 km2.

4. CONCLUSIONES

La ciudad de Ibagué se encuentra en un área afectada por fallas activas, entre estas se encuentran las fallas de Palestina, Martinica, Chapetón-Pericos, Buenos Aires e Ibagué, estas dos últimas atraviesan

el casco urbano de la ciudad. Ibagué es una ciudad pujante en pleno desarrollo, la zona ha sido afectada por eventos sísmicos y volcánicos, a lo que hay que sumar inundaciones y fenómenos de remoción en masa. A pesar de los antecedentes históricos y de múltiples estudios acerca de la geología de la zona, es necesario que las autoridades locales realicen estudios de mayor alcance para conoce el Riesgo Sísmico de la ciudad y evitar un desastre, como el realizado recientemente por Ingeominas (2004) acerca de la Paleosismologia de la Falla de Ibagué y su potencial poder destructivo.

En este estudio los Sistemas de Información Geográfica han sido utilizados para generar mapas de Zonas Susceptibles a presentar Fenómenos de Remoción en masa y Zonas de Potencial Amplificación de la señal sísmica por topografía de la ciudad de Ibagué en escala 1:50.000.

En lo referente a zonas con posible amplificación topográfica de la señal sísmica, estas se encuentran principalmente en la periferia del área urbanizada, corresponde al gobierno de la ciudad velar porque las zonas urbanizables eviten ubicarse en las zonas potencialmente peligrosas.

Algunas zonas susceptibles a fenómenos de remoción en masa coinciden con abanicos coluvio-aluviales *Qcd*, correspondientes a las quebradas Lavapatas, Chipalito, El Cucal, Los Cristales, San Antonio, Ambala, Las Balsas, Las Panelas, La Arenosa, La Tusa, San Roque, Paujil, Chembe, Chembecito, Moreno y La Helena. Si bien estas zonas poseen las tres condicionantes determinantes, como son: antecedentes, pendientes y tipo de material, es necesario depurar las mismas teniendo en cuenta otros aspectos: los hidrometeorológicos y los antrópicos; estos últimos de más difícil evaluación. Las áreas estimadas son coherentes con antecedentes de deslizamientos debido a eventos sísmicos. Los mapas generados son un aporte en la prevención de desastres, al suministrar información para la estimación de amenazas naturales.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Ingeniera Luz Mery Gómez y al Geólogo Alberto Cristancho Pérez, Profesores de la Especialización en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por sus valiosos aportes y a los dos revisores anónimos que permitieron mejorar el manuscrito inicial. Los datos de Harvard corresponden al proyecto *CMT* (Dziewonski *et al.,* 1981; Dziewonski y Woodhouse, 1983; Woodhouse y Dziewonski, 1984). La Figura 1 fue desarrollada utilizando *GMT* (Wessel y Smith, 2004).

6. REFERENCIAS

1. Alfaro A., L. Martínez, A. Díaz-Granados y P. Escobar. (2001) Aportes para la Microzonificación Sísmica de Ibagué. *Red Sismológica Regional Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima* Vol. 6 No 1, Manizales. pp. 32-37.

2. Association Française du Génie Parasismique-AFPS (1995). Guidelines for Seismic Microzonation Studies. Delegation of Major Risks of the French Ministry of the Environment. Paris. 44 p.

3. Beltrán, J. y W. Castiblanco (2001) Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para la Estimación de Amenazas Naturales en Ibagué y su incidencia en el Plan de Ordenamiento Territorial. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá.

4. Beltrán, J., W. Castiblanco, A. Alfaro (2006) Evaluación de efectos sísmicos asociados mediante la utilización de SIG en Ibagué-Colombia. Revista Épsilon No 6: 52-61 / Enero - junio de 2006.

5. Departamento Nacional de Estadística - DANE. (2000) Base Cartográfica de Ibagué. Formato Digital. Bogotá.

6. Díaz-Granados, A. (2001) Modelación Numérica de Efectos Locales en Ibagué. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá

7. Dziewonski, A.M. and J.H. Woodhouse, An experiment in the systematic study of global seismicity: centroid-moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981, *J. Geophys. Res.*, 88: 3247-3271, 1983.

8. Dziewonski, A.M., T.-A. Chou and J.H. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86: 2825-2852, 1981.

9. El Tiempo (6/03/1993) "Se represó el Combeima". Bogotá. Colombia.

10. Escobar, P. (2001) Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué". Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá

11. ESRI. (1998) ArcInfo Workstation, Copyright © ESRI. Estados Unidos de América

12. Franco-Idarraga L.B. y P. Pineda (1999) Efectos del Sismo del 25 de Enero de 1999 en el Departamento del Tolima. *Red Sismológica del Eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima.* Ingeominas. Bogotá.

13. Harvard (2005) http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/

14. IDEAM (2000) Movimientos en masa dañinos ocurridos en Colombia durante el Fenómeno Frío del Pacífico (La Niña) 1999-2000. Bogotá.

15. Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas. (1974). Mapa geológico del Departamento del Tolima. Escala 1:250.000. Bogotá.

16. Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas. (1992) Estudio Geológico – Geotécnico y aptitud urbanística de la ciudad de Ibagué. 78 p. Ibagué.

17. Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas. (2004) Paleosismología de la Falla de Ibagué. Informe Técnico. Bogotá.

18. Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A. (2000) Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué. Informe Técnico. Bogotá. 95 pag.

19. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (1967a) Plancha 244-II-D, Escala 1:25 000. Bogotá.

20. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (1967b) Plancha 244-IV-B, Escala 1:25 000. Bogotá.

21. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (1989) Plano Urbano de Ibagué, Escala 1:10 000. Bogotá.

22. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (1991). Fotografías aéreas 112 – 115 y 165 - 169 del Vuelo C-2465.

23. Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. (1993). Plano Urbano de Ibagué, Escala 1:10 000. Bogotá.

24. Jaramillo, M., P. Escobar, y M. Ramos (2000). Marco tectónico y Amenaza Sísmica de Ibagué. *Memorias VIII Cong. Col. Geotecnia.* Bogotá.

25. Keefer, D.K. (1984) Landslides Caused by Earthquakes. *Geologic Soc. Am. Bull.* Vol 95, No. 2. pp 406-421.

26. Martínez, L. (2001) Caracterización Geotécnica de Ibagué. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá.

27. Murcia, A. y H. Vergara, (1986). Riesgos Geológicos Potenciales en la Ciudad de Ibagué, Departamento del Tolima, Colombia, *Revista CIAF*, Vol. 11, Tomo II, (1-3).

28. Núñez, A. (1996). Mapa geológico del Departamento del Tolima. Geología, Recursos Geológicos y amenazas Geológicas. Ministerio de Minas y Energía. Ingeominas. Bogotá.

29. Ramírez, J.E. (1975) Historia de los terremotos en Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC. Bogotá. 285 pag.

30. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE (1999) Manual for zonation on Seismic Geotechnical Hazards. The Japanese Geotechnical Society. Tokyo. 209 pag.

31. Vergara, H. y J. Cárdenas (1999). Neotectónica del Departamento del Tolima con énfasis en la Falla del Cucuana. *Red Sismológica Regional del Eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima.* (2). pp 24-27.

32. Wessel P. y W. Smith (2004). The Generic Mapping Tools Version 4. Technical Reference and Cookbook. http://gmt.soest.hawaii.edu/

33. Woodhouse, J.H. and A.M. Dziewonski, Mapping the upper mantle: three dimensional modelling of Earth structure by inversion of seismic waveforms, *J. Geophys. Res.*, 89: 5953-5986, 1984.

INSTITUTO DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA

BOLETIN TECNICO 2006 AÑO 44 N°3

SUMARIO

Pág.

Efecto del Roce Lateral en la Respuesta Volumétrica de Muestras de Suelo Sometidas a Ensayos Edométricos.
por D. Marcial, Y. J. Cui y P. Delage 1

Evaluación de Zonas con Posible Amplificación Topográfica y Susceptibles a Deslizamientos Debido a un Sismo en Ibagué – Colombia.
por J. Beltrán, W. Castiblanco y A. Alfaro 9

Comportamiento Físico – Mecánico de Hormigones Reciclados Elaborados con Canto Rodado.
por C. Zega, V. Taus y A. Di Maio 17

Cálculo de la Matriz de Rigidez por Integración Analítica de un Elemento Finito Cuadrilátero Subparamétrico de Ocho Nodos
por L.Videla N., T. Baloa M., D.V. Griffiths y M. Cerrolaza. 27

Índice acumulado de artículos publicados en el Boletín Técnico IMME Volumnen 44 43

Eventos Nacionales e Internacionales 54

Instituto de Materiales y Modelos Estructurales 55

Servicios Técnicos que ofrece el IMME 58

Programas de financiamiento del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico 68