

Evaluación de efectos sísmicos asociados mediante la utilización de SIG en Ibagué-Colombia¹

Juliette Andrea Beltrán Torres* / William Mauricio Castiblanco Suescún** / Andrés José Alfaro Castillo***

RESUMEN

Este artículo presenta una evaluación sencilla y general de 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 Geográfica (SIG) para la ciudad de Ibagué. Los datos de entrada fueron la topografía, la geología, la geomorfología y 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.

ASSESSMENT OF INDUCED SEISMIC EFFECTS USING GIS IN IBAGUE - COLOMBIA

ABSTRACT

This paper presents the most simple and general assessment of susceptible zones to present mass mucking phenomena and zones with possible amplification of seismic signals due to the soil topography, when a seismic event occurs, using the Geographical Information System (GIS) for the city of Ibagué. Input data were: Topography, Geology, Geomorphology, and Surface and deep Soil Description. Results are important; therefore it is necessary to refine the analysis by taking into account hydrometeorological and anthropic variables.

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

¹ Esta investigación fue realizada en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi y la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

* Arquitecta Universidad América, Bogotá, Colombia. Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Universidad Francisco José de Caldas, Bogotá

** Ingeniero Civil Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Universidad Francisco José de Caldas, Bogotá.

*** Ingeniero Civil Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Magíster en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural, Universidad Politécnica de Cataluña. Especialista en Sismología, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Tsuka, Japón.

Correo electrónico: alfaro@ciees.org

Fecha de recepción: diciembre 1 de 2005.

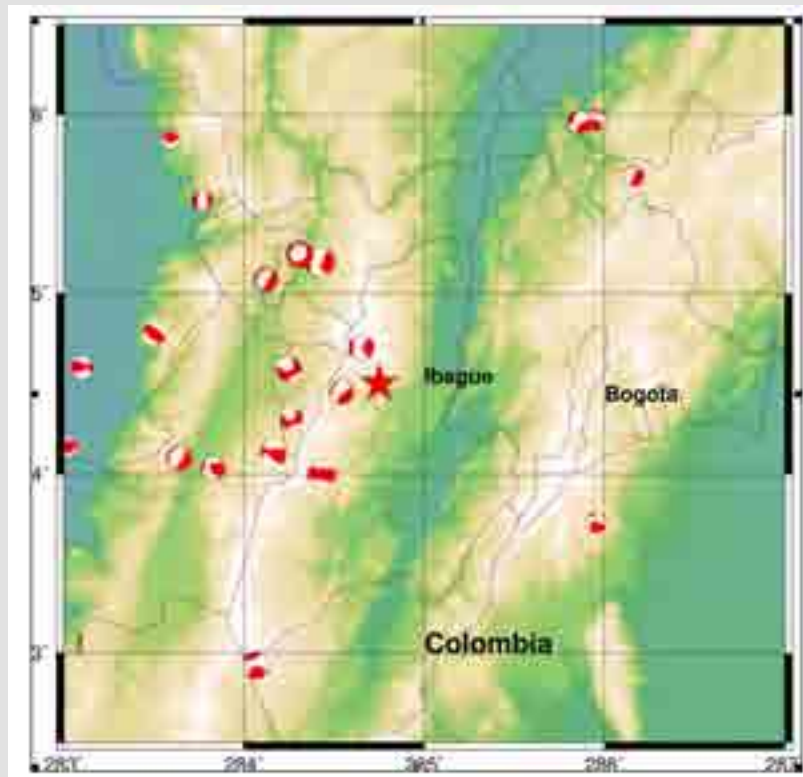
Fecha de aprobación: marzo 1 de 2006.

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, las cuales atraviesan la ciudad. Adicionalmente, por encontrarse en la cordillera central de los Andes colombianos, está situada cerca de varios volcanes en actividad como el Tolima y el Machín. La ciudad de Ibagué ha sido afectada por varios sismos, entre los que se destacan el del 12 de marzo de 1595; el 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 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, 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 de septiembre de 1999 que causó 3 muertos, 2 heridos, 47 damnificados, 6 viviendas destruidas y 15 averiadas; y el 17 de junio de 2000 con 50 familias damnificadas por desbordamientos y deslizamientos en la cuenca del río Cocorá (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 para la ciudad de Ibagué se ha realizado a partir del análisis de información existente, generando nueva información cartográfica, que incluye zonas de potencial generación de fenómenos de remoción en masa y zonas de posible amplificación de la señal sísmica. 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 Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten el almacenamiento y la utilización de información de un sitio específico; en el caso de la ciudad de Ibagué, el Instituto Geofísico, la Universidad Javeriana y la compañía Consultoría Colombiana (2000) generaron mapas en escala 1:25.000 de geología, geomorfología, geotecnia y zonificación morfodinámica, los cuales fueron elaborados 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 periodos dominantes de los suelos y las amplificaciones asociadas (Alfaro *et al.*, 2001). Este artículo presenta la evaluación de efectos sísmicos asociados 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); se considera un estudio de primer nivel, es decir, el más elemental; sin embargo, la información obtenida invita a continuar los estudios y a profundizar en los alcances.

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, 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. Por otro lado, los efectos geométricos se refieren a la manera como el suelo puede modificar los diferentes tipos de ondas generados por un evento sísmico, de acuerdo con la orientación o el ángulo de incidencia de las ondas con relación al estrato de suelo.

De igual forma, la presencia de valles, 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 se presenta en zonas convexas y la deamplificación en zonas cóncavas.

De acuerdo con Kramer (1996) los efectos de las irregularidades topográficas en el movimiento del terreno pueden ser importantes. Tal vez uno de los ejemplos más conocidos de posible amplificación topográfica es el registro acelerométrico registrado en el estribo de la Presa de Pacoima en el sur de California. La aceleración horizontal pico (PGA) fue aproximadamente de 1,25 g en cada una de las direcciones perpendiculares para el sismo de 1971 de San Fernando con una ML de 6.4. El valor es significativamente grande para un evento de esa magnitud.

El acelerógrafo estaba localizado en la cresta en la parte angosta cerca de la roca (Trifunac y Hudson, 1971). Investigaciones posteriores atribuyeron la amplificación a efectos topográficos en la cresta.

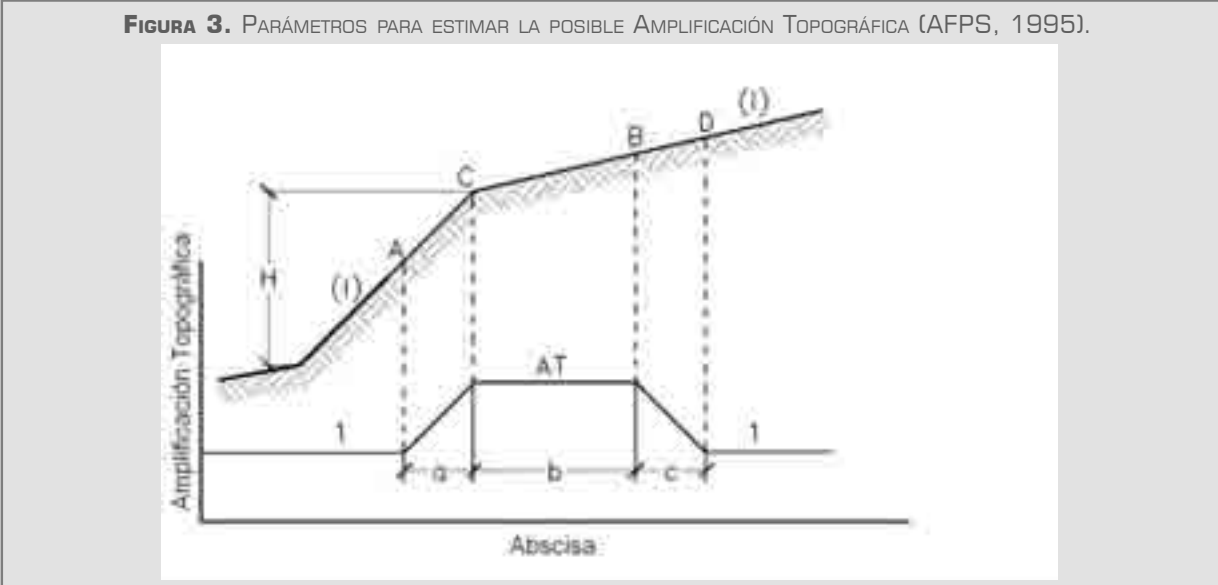
Los efectos topográficos causados por irregularidades simples pueden ser estimados por soluciones exactas a problemas idealizados (Aki, 1988). Para una cuña triangular infinita sujeta a la propagación de ondas SH verticales (movimiento de la partícula paralelo a su eje), los desplazamientos son amplificados por un factor $2\pi/\phi$, donde ϕ es el ángulo del vértice de la cuña (Figura 2). Esta aproximación puede ser utilizada en ciertos casos para estimar los

efectos topográficos. De otro lado los autores han considerado diferentes geometrías y campos de ondas (Geli *et al.*, 1988; Sánchez-Sesma, 1990; Faccioli, 1991). Existen además diversos ejemplos instrumentales de la amplificación topográfica en varias partes del mundo (Jibson, 1987; Finn, 1991; Sánchez-Sesma y Campillo, 1993); como también de efectos de amplificación debido al incremento de daño debido al cambio de topografía (Guacaneme, 2000, 2006).

FIGURA 2. CARACTERIZACIÓN DE IRREGULARIDADES TOPOGRÁFICAS SIMPLES: (A) NOTACIÓN PARA LA CUÑA TRIANGULAR; (B) APROXIMACIÓN DE LA SUPERFICIE REAL (LÍNEA CONTINUA) COMO VALLE Y CRESTA A CUÑAS (FACCIOLI, 1991).

En esta investigación, 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 3, (*Association Française du Génie Parasismique*, 1995). La meto-

dología 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.



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

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

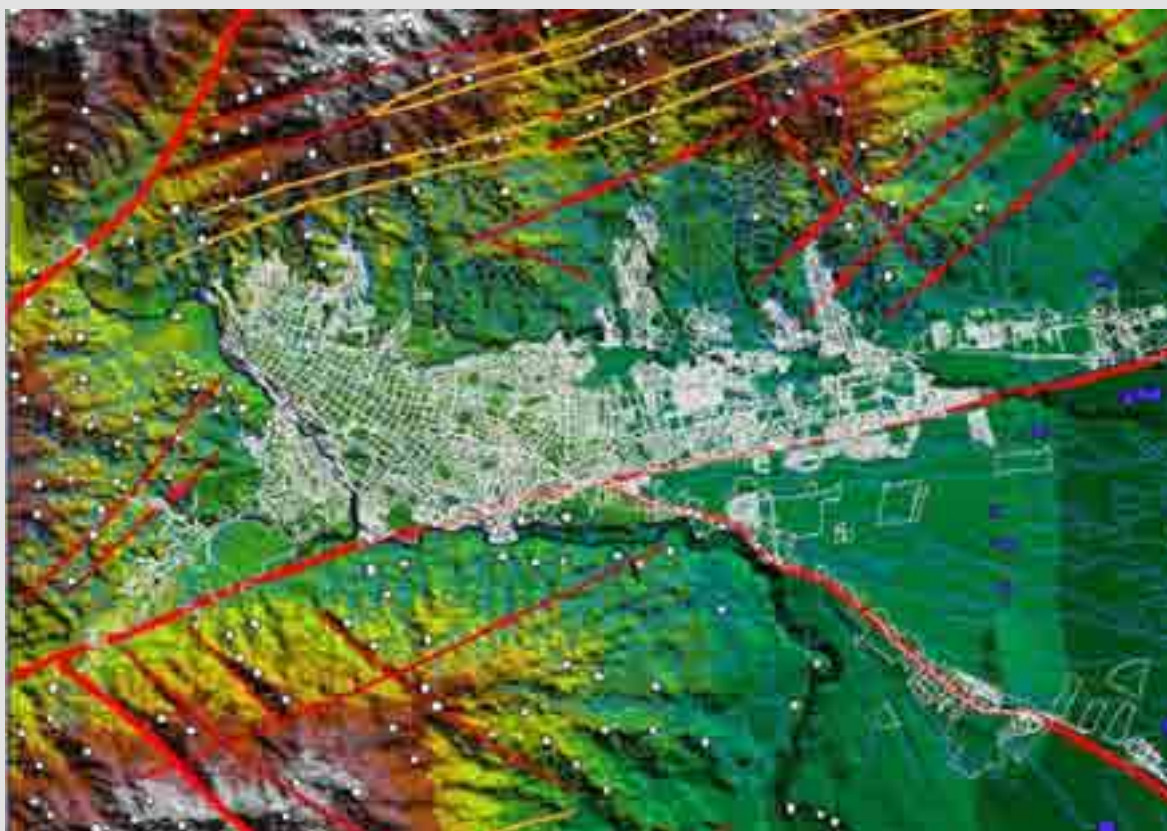
La recomendación francesa limita el valor de la amplificación topográfica (AT) a 140%; el valor de dicha amplificación se estima que se presentará desde el cambio de pendiente hasta una longitud mínima b , la cual será de $20I$ o $(H+10)/4$.

Donde I e i son respectivamente los gradientes de los taludes inferior y superior. Se estima que el fac-

tor de amplificación topográfica decrece en 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, a continuación se determinan los gradientes topográficos y 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 (Figura 4).

FIGURA 4. MAPA DE ZONAS CON POSIBLE AMPLIFICACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA SEÑAL SÍSMICA (CÍRCULOS BLANCOS) EN IBAGUÉ- COLOMBIA (BELTRÁN Y CASTIBLANCO, 2001) (SIN ESCALA, LAS LÍNEAS INDICAN FALLAMIENTOS).



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, el 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 zonas que tengan los mismos materiales y las mismas o mayores pendientes, son 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 y antrópicos, como pueden ser construcciones o el manejo de aguas lluvias y de aguas residuales, 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 simple: no se dispone 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 Insgo y Concol (2000) y Escobar (2001) se generó un modelo de red irregular triangular en ARC/INFO 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 5 se observan zonas susceptibles de presentar fenómenos de remoción en masa, estas zonas corresponden a Abanicos Coluvio Aluviales (*Qcd*), correspondientes a las quebradas Lavapatatas, 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.

Las áreas estimadas susceptibles a sufrir fenómenos de remoción en masa son coherentes con antecedentes históricos en otras partes del mundo 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 2000 Km², para magnitudes de 7.5 hasta 20.000 Km².

DISCUSIÓN

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 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 se realicen estudios de mayor alcance para conocer el riesgo sísmico de la ciudad y evitar una posible tragedia anunciada.

En este estudio, los SIG han sido utilizados para generar mapas de zonas susceptibles a presentar fenómenos de remoción en masa y zonas de potencial de amplificación de la señal sísmica por la topografía de la ciudad de Ibagué en escala 1:50.000.

En lo referente a zonas con posible amplificación topográfica de la señal sísmica, éstas 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 Q_{cd} , correspondientes a las quebradas Lavapatatas, 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. 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: éstos últimos de más difícil evaluación; las áreas estimadas son coherentes con antecedentes de deslizamientos debido a eventos sísmicos en otras partes del mundo. Los mapas generados son un aporte en la prevención de desastres, al suministrar información para la estimación de amenazas naturales.

FIGURA 5. MAPA DE ZONAS CON POSIBLE PRESENCIA DE FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA (MODIFICADO DE BELTRÁN Y CASTIBLANCO, 2001) (SIN ESCALA).



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 (Figura 1) corresponden al proyecto *CMT* (Dziewonski *et al.*, 1981; Dziewonski y Woodhouse, 1983; Woodhouse y Dziewonski, 1984). La Figura 1 fue desarrollada utilizando Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel y Smith, 2004).

BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. «Local site effects on strong ground motion» *Proc. Earthq. Eng. Soil. Dyn. II – Recent Advances in Ground Motion Evaluation*, ASCE, Geotechnical Special Publication 20, (1988): 103-155.
- Alfaro, A.; Martínez, L.; Díaz-Granados, K.; Escobar, P. «Aportes para la Microzonificación Sísmica de Ibagué.» *Red Sismológica Regional Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima 6 1*, Manizales. (2001): 32-37.
- Association Française du Génie Parasismique - AFPS. *Guidelines for Seismic Microzonation Studies*. Paris: Delegation of Major Risks of the French Ministry of the Environment., 1995.
- Beltrán, J. y Castiblanco, W. *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para la Estimación de Amenazas Naturales en Ibagué y su incidencia en el Plan de Ordenamiento Territorial*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2001.
- Departamento Nacional de Estadística - DANE. *Base Cartográfica de Ibagué*. Formato Digital. Bogotá, 2000.
- Díaz-Granados, A. *Modelación Numérica de Efectos Locales en Ibagué*. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá, 2001.
- Dziewonski, A. y Woodhouse J. «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 (1983): 3247-3271.
- - -. «Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity.» *J. Geophys Res.* 86, (1981): 2825-2852.
- El Tiempo [6/03/1993] «Se represó el Combeima». Bogotá, Colombia.
- Escobar, P. *Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué*. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado. Bogotá, 2001.
- ESRI. *ArcInfo Workstation, Copyright © ESRI*. Estados Unidos de América, 1998.
- Faccioli, E. «Seismic Amplification in the presence of geological and topographic irregularities». *Missouri: Proc. 2nd Inter. Conf. Recent Advances Geotechnical Earthq. Eng. Soil Dyn. 2*, (1991): 1779-1797.
- Finn, W. «Geotechnical engineering aspects of microzonation» *Proc. 4th Internat. Conf. Microzonation 1*, Earthquake Engineering Research Institute, Stanford University, Palo Alto, California, (1991): 199-259.
- Franco-Idarraga, L. y Pineda, P. «Efectos del Sismo del 25 de Enero de 1999 en el Departamento del Tolima» Bogotá: *Red Sismológica del Eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima*. Ingeominas, 1999.
- Geli, L.; Bard, P. y Julien B. «The effect of Topography on Earthquake Ground Motion: A review and new results». *Bull. Seism. Soc. Am.* 78 1, (1988): 42-63.
- Guacaneme J. *Microzonificación Sísmica Preliminar de la Ciudad de Tunja*. Trabajo de Grado. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2000.
- - -. Zonificación de suelos en superficie de la ciudad de Tunja, Colombia. *Épsilon 6* (2006): 29-44.
- Harvard. <<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/>> [2005].
- IDEAM. *Movimientos en masa dañinos ocurridos en Colombia durante el Fenómeno Frío del Pacífico (La Niña) 1999-2000*. Bogotá, 2000.

- Instituto Colombiano de Geología y Minería - Ingeominas. *Mapa geológico del Departamento del Tolima. Escala 1:250.000*. Bogotá, 1974.
- - -. *Estudio geológico, geotécnico y aptitud urbanística de la ciudad de Ibagué*. Ibagué, 1992.
- Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana. *Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué. Informe Técnico*. Bogotá, 2000.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC. *Plancha 244-II-D, Escala 1:25 000*. Bogotá, 1967a.
- - -. *Plancha 244-IV-B, Escala 1:25 000*. Bogotá, 1967b.
- - -. *Plano Urbano de Ibagué, Escala 1:10 000*. Bogotá, 1989.
- - -. *Fotografías aéreas 112 – 115 y 165 - 169 del Vuelo C-2465*. Bogotá, 1991.
- - -. *Plano Urbano de Ibagué, Escala 1:10 000*. Bogotá, 1993.
- Jaramillo, M.; Escobar, P. y Ramos, M. «Marco tectónico y Amenaza Sísmica de Ibagué.» *Memorias VIII Cong. Col. Geotecnia*. Bogotá, 2000.
- Jibson, R. «Summary of Research on the effects of topographic amplification of earthquake shaking on slope stability». *Open File Report 87-268, U.S. Geological Survey, Menlo Park, California*, 1987.
- Keefer, D. «Landslides Caused by Earthquakes». *Geologic Soc. Am. Bull* 95 2. (1984): 406-421.
- Martínez, L. *Caracterización Geotécnica de Ibagué*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de Grado, 2001.
- Murcia, A. y Vergara, H. «Riesgos Geológicos Potenciales en la Ciudad de Ibagué, Departamento del Tolima, Colombia» *CIAF 11 Tomo II*, (1986): 1-3.
- Núñez, A. *Mapa geológico del Departamento del Tolima. Geología, recursos geológicos y amenazas geológicas*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía, Ingeominas, 1996.
- Ramírez, J. *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi-IGAC, 1975.
- Sánchez-Sesma, F. «Elementary solutions for response of a wedge-shaped médium to incident SH and SV waves» *Bull. Seism. Soc. Am.* 80. (1990): 737-742.
- - -. Campillo, M. «Topographic Effects of P, SV and Rayleigh waves.» *Tectonophysics* 218 1-3. (1993): 113-125.
- Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, ISSMGE *Manual for zonation on Seismic Geotechnical Hazards*. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society, 1999.
- Trifunac, M.; Hudson, D. «Analysis of the Pacoima Dam accelerograms – San Fernando earthquake of 1971». *Bull. Seism. Soc. Am.* 61 5. (1971): 1393-1411.
- Vergara, H. y Cárdenas, J. «Neotectónica del Departamento del Tolima con énfasis en la Falla del Cucuana». *Red Sismológica Regional del Eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima* 2. (1999): 24-27.
- Wessel, P. y Smith, W. «The Generic Mapping Tools Version 4». *Technical Reference and Cookbook* [2004]. <<http://gmt.soest.hawaii.edu/>>
- Woodhouse, J. y Dziewonski, A. «Mapping the upper mantle: three dimensional modelling of Earth structure by inversion of seismic waveforms». *J. Geophys. Res.* 89 (1984): 5953-5986.