Dificultades en la evaluación de la amenaza sísmica de Ibagué debido a la escasez de datos

Mario César Romero López* / Andrés José Alfaro Castillo*

Fecha de envío: 21 de marzo de 2009
Fecha de aceptación: 1 de julio de 2009

Resumen

El presente trabajo contiene una evaluación probabilística de la amenaza sísmica para la ciudad de Ibagué. En primer lugar, se tomó un área de 34.800 km² en la cual se revisan las fallas potencialmente activas (cuaternarias) y, a continuación, se analizó la sismicidad histórica e instrumental utilizando como magnitud de corte Ms > 4,0. Posteriormente, se buscó el intervalo en el cual la ocurrencia de los sismos se ajustara a un proceso de Poisson, para luego utilizar diferentes ecuaciones de atenuación y así estimar el valor de la aceleración del terreno en función de diferentes periodos de retorno. Para 475 años se estimaron aceleraciones entre 275 y 380 gales; se hicieron anotaciones con respecto a las evaluaciones determinísticas y, finalmente, una reflexión sobre la posibilidad que la falla de Ibagué se caracterise por generar sismos lentos, callados o silenciosos.

Palabras clave: amenaza sísmica, incertidumbre, sismos lentos, sismos callados, sismos silenciosos.

Difficulties on Seismic Hazard Assessment for Ibagué because scarcity of data

Abstract

The present paper contains a Probabilistic Seismic Hazard Analysis for the city of Ibagué. A 34.800 km² area was taken, where the potentially active faults (quaternary ones) are reviewed, and the historic and the instrumental seismicity were analyzed with a cut off magnitude of Ms > 4,0. Subsequently, where the time interval in which the occurrence of earthquakes conform to a Poisson process, to then use different attenuation equations that allow determining the peak ground acceleration in function of several return periods. For a return period of 475 years, accelerations between 275 and 380 gals were estimated. It is commented about deterministic approaches and a final remark about the possibility that Ibagué fault could produce slow, quiet or silent earthquakes.

Keywords: seismic hazard, uncertainties, slow earthquakes. quiet earthquakes, silent earthquakes.

* Ingeniero Civil. Universidad de La Salle. Estudiante Maestría IC Universidad de Los Andes. Correo electrónico: ingmcrl@gmail.com

** Ingeniero civil Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Sismología Internacional Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Tsukuba-Japón. Máster en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Universidad Politécnico de Cataluña. Barcelona. España. Jefe Sección Geofísica Ingetec S.A. y profesor Ingeniería Civil Universidad de La Salle. Correo electrónico: andresalfaro@ingetec.com.co; aalfaro@unisalle.edu.co

Introducción

La ciudad de Ibagué, capital del departamento del Tolima, se encuentra ubicada en la zona centro-occidental de Colombia a 1.285 msnm, entre los valles de los ríos Magdalena y Cauca a 213 km de Bogotá y a 103 km de Armenia. Posee una población de 498.401 habitantes, según el último censo, en un área municipal de 1.498 km^2 (Dane, 2005).

Las principales fuentes sismogénicas corresponden a los sistemas locales de las fallas de Ibagué, Buenos Aires y Chapetón-Pericos, además de las fallas cuaternarias presentes alrededor de la zona de estudio: Montenegro, Armenia, Paraíso, Córdoba-Navarco, Mulato-Getudo, Honda, Alto del Trigo y Bituima (parte del sistema de falla Salinas), Servitá-Santa María, Viani, Usme, Cucuana, Toro, Argelia, Garrapatas, y el sistema de falla del Romeral (zona de cizalla Dolores-Guayaquil) (Paris *et ál.,* 2000).

Estudios recientes para la evaluación de la amenaza sísmica regional y local y sus efectos asociados se pueden encontrar en Escobar (2001), Martínez (2001), Díaz-Granados (2001), Alfaro *et ál.* (2001), Beltrán y Castiblanco (2002), Beltrán *et ál.* (2006) y Romero (2007).

Ibagué se encuentra en un contexto geológico, geotécnico y tectónico que genera condiciones de sismicidad alta, en la cual se destaca la presencia de dos fallas geológicas activas que atraviesan el casco urbano. A partir de la inspección de fotografías satelitales y revisión de la información existente, se puede identificar que en dirección W-E se extiende la falla Ibagué, con escarpes que evidencian su movimiento dextrolateral. En dirección S-E se extiende la falla de Buenos Aires que interseca la falla de Ibagué, con indicios de actividad después de la depositación del abanico fluvio-volcánico de Ibagué, el cual cubre un área de aproximadamente 650 km^2, con una longitud de 40 km sobre su eje longitudinal.

Adicionalmente –a partir de las conclusiones obtenidas por Martínez (2001)– se conoce que los suelos de Ibagué son heterogéneos, ya que presentan una variación compleja. Cercano al ápice del abanico fluvio-volcánico, en la zona occidental, predomina suelo grueso (arena) y a medida que se aleja de éste se pierde la concentración de suelos granulares y aparecen suelos finos. De igual modo, en las zonas montañosas se generan amplificaciones de los movimientos sísmicos que dependen de las características topográficas y geotécnicas locales. Los eventos asociados a movimientos sísmicos son fallas de taludes, avalanchas o similares; en lugares con depósitos de suelo relativamente blandos, predomina la posibilidad de resonancia entre el depósito y la señal de entrada, cuyo resultado son grandes amplificaciones del movimiento. Este efecto se registra especialmente en rangos específicos de contenidos frecuenciales que dependen de las mismas características del depósito y del movimiento de entrada (AFPS, 1995).

Al agrupar las condiciones anteriormente mencionadas se observa que habitantes e infraestructura de bienes y servicios en Ibagué son susceptibles de sufrir las consecuencias de eventos sísmicos, lo cual hace importante la evaluación de la amenaza sísmica regional para esta ciudad.

Se han realizado numerosos estudios para Ibagué; por ejemplo, Houten y Travis (1968) desarrollaron un trabajo de la geología de los depósitos cenozoicos del valle superior del Magdalena; Ramírez (1968) adelantó un estudio de los volcanes del territorio colombiano, en el que se encuentra un importante aporte a los eventos en la cordillera central, donde se encuentra la ciudad. Barrero (1969) presentó la Petrografía del Stock de Payandé y metamorfitas. Feininger (1970) estudió el sistema de fallas de Palestina; Wellman (1970) estudió la petrología y estratigrafía del grupo Honda. Asimismo, existen algunas investigaciones acerca del desarrollo geomorfológico de la región de Ibagué-Girardot (Soeters, 1976). En

1978 Núñez elaboró un estudio acerca de la petrogénesis del batolito de Ibagué; en tanto que Cediel *et ál.* (1980) desarrollaron la definición estratigráfica del triásico en Colombia, formaciones Luisa, Payandé y Saldaña. La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS, 1984) y AIS *et ál.* (1996) adelantaron estudios de amenaza sísmica para todo el país, asignando a fuentes sismogénicas para la ciudad de Ibagué un porcentaje de amenaza sísmica distribuido de la siguiente manera: falla de Ibagué 47,1%, Romeral con 23,6%, Benioff con un 20,2%, el sistema frontal de la cordillera oriental 5,6%, el sistema de Palestina con 2,7% y la falla del Magdalena con 0,7%.

En 1983 –con la Unidad de Geología y Geomorfología y el Centro Interamericano de Fotointerpretación– González *et ál.* desarrollaron el proyecto de las áreas al suroriente de Ibagué; Guevara en 1985 realizó un estudio fotogramétrico y estratigráfico de una zona localizada el sur de Payandé. Acosta y Ramírez (1985) estudiaron la geomorfología general del abanico de Ibagué, el marco geológico, la sedimentología, la geología estructural y sus modelos de desarrollo. Macia *et ál.* (1985) analizaron la presencia de hidrocarburos en el valle superior del Magdalena; Thouret *et ál.* (1985) estudiaron los aspectos volcánicos estructurales y el reciente dinamismo eruptivo de los volcanes Cerro Bravo y Nevado del Tolima de la cordillera central de Colombia.

En 1986 Murcia y Vergara realizaron una investigación acerca de los riesgos potenciales para Ibagué; posteriormente Diederix *et ál.* (1987) desarrollaron un estudio de neotectónica sobre la falla de Ibagué para determinar la tasa de desplazamiento y su grado de actividad en el sector Ibagué-Piedras. Vergara (1989a, 1989b) investigó las fallas de Ibagué, Chapetón, Cucuana y la geología del área, en un estudio sobre la actividad neotectónica de la falla de Ibagué.

Mora y Talavera (1991) realizaron un estudio fotogeológico de un área al sur de Ibagué en el que se muestra la geología de la región. Posteriormente, Moreno y Vergara (1992) adelantaron un estudio geológico-geotécnico de la cuenca del río Combeima. En ese mismo año, Ingeominas desarrolla una investigación de la zona urbana de Ibagué desde el punto de vista geológico y geotécnico, en el cual especifican sitios donde las características del terreno no son recomendables para la continuación del desarrollo o la construcción.

En zonas aledañas a Ibagué, Mojica y Franco (1992) realizaron estudios sobre la estructura y evolución tectónica del valle medio y superior del Magdalena. Además se cuenta con el plano geológico del departamento del Tolima (Ingeominas, 1992). Un plano geológico del departamento del Tolima, elaborado en 1996, fue publicado por Ingeominas en el cual aparecen las modificaciones y actualizaciones realizadas al marco geológico de la zona de interés del presente estudio.

Vergara y Cárdenas en 1999 presentan un estudio de la neotectónica del departamento del Tolima en el cual hacen especial énfasis en la falla de Cucuana. Jaramillo *et ál.* (2000) recopilaron y analizaron la información existente y generaron un modelo geológico para la ciudad de Ibagué. Luego, Martínez (2001) elaboró la caracterización geotécnica de la ciudad; Escobar (2001) realizó la microzonificación sísmica preliminar de Ibagué, estudio en el que se generó un modelo geotécnico a partir del modelo geológico, resultado del análisis de la información existente; Díaz-Granados (2001) evaluó las funciones de transferencia de los suelos de las perforaciones analizadas por Martínez (2001); Beltrán y Castiblanco (2001) realizaron una evaluación de los eventos sísmicos asociados mediante la utilización del SIG en Ibagué. Los resultados fueron presentados en dos artículos de Alfaro *et ál.* (2001) y Beltrán *et ál.* (2006). Finalmente, Ingeominas (Montes *et ál.*, 2004) elaboraron el trabajo denominado Paleosismología de la falla de Ibagué, en el que se estimó una magnitud máxima de sismo característico de Ms 7,0+/-0,1 para la fa-

lla con un tiempo de retorno de aproximadamente 1.300 años.

Eventos sísmicos previos

Para efectos de este trabajo se consultaron los catálogos de Ramírez (1975), USGS (2009) e ISC (2009); el catálogo del Servicio Geológico de Estados Unidos, USGS (2009), incluye los datos del proyecto Sisra (Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina) realizado por el Ceresis, para el periodo comprendido entre 1595 y 1980. Para el lapso entre 1980 y 2009, los datos corresponden al PDE (*Preliminary Determinations of Epicenters*) que tiene en cuenta la información de diversas agencias.

En los catálogos sísmicos del Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos en la Región Andina (SISRA) se encuentran 71 eventos entre los años de 1595 y 1981 con mb 4,0 en el área de estudio. En el catálogo del PDE se encuentran 87 eventos entre 1973 a 1999 (mb 4,0) con ausencia de eventos (mb 4,0) en 1978, 1981-82, 1984, 1987, 1996 y 2006. Existen eventos de intensidad estimada de 6,0 o superior en la escala de Mercalli modificada, como los ocurridos el 12 de marzo de 1595, 16 de junio de 1805, 1 de enero de 1825 con Ms = 4,0 –temblor de tierra descrito como violento que hizo evacuar a muchos habitantes de sus casas en las ciudades de Ibagué y Honda (Ramírez, 1975), 9 de diciembre de 1829, 27 de octubre de 1935, 10 de abril de 1950, 20 de diciembre de 1961 –con reporte de muertos y daños materiales (Sisra, 2007). Los eventos de 1595 y 1845 fueron asociados a la actividad volcánica en la zona, este último atribuido al volcán del Ruiz, en el que se produjo un flujo de lahares que llegó hasta el río Magdalena causando gran destrucción a su paso (Ramírez, 1975).

En el catálogo de terremotos se hace alusión a un fuerte temblor sentido desde Ecuador hasta Venezuela el 26 de febrero de 1800 (Milne, 1906). Asimismo, se reportaron eventos sísmicos el 19 de noviembre de 1814 desde Popayán hasta Bogotá (Caballero, 1902); en el periodo comprendido entre el 31 de diciembre de 1824 y el 1 de enero de 1825 se sintieron movimientos telúricos precedidos de temblores durante dos meses, sentidos también en Honda (Hamilton, 1955).

De otra parte, Vergara y V. (1898) reseñan en los días 16 y 17 de noviembre de 1827, un incidente sísmico que derribó los cerros de Grifo y Paramillo, represó dos meses el río Suaza y originó la destrucción de más de 800.000 árboles de cacao, no restablecidos después. Tabor (1938), posterior a la ocurrencia del sismo del 4 de febrero a las 9h. 24m. 30s., realizó algunas anotaciones de los efectos de éste sobre la infraestructura en general de la ciudad de Ibagué. El 20 de diciembre de 1961 ocurrió uno de los más grandes terremotos sentidos en el área abarcada para este estudio con una magnitud de 6,8 Ms, con una profundidad de 176 km; este sismo tuvo una intensidad epicentral de 8,0 en la escala de Mercalli modificada y fueron afectados diversos municipios, principalmente los ubicados sobre la cordillera central de Colombia.

Luego, el 23 de noviembre de 1990 se presentó un evento sísmico cuyo mecanismo focal se puede observar en la figura 6; registrado en los catálogos del USGS, este sismo ubicado a 145 km de profundidad con una magnitud 5,7 mb, corresponde a un fallamiento inverso con un pequeño componente de falla de rumbo. El 25 de enero de 1999, a las 13:19 hora local (18:19 GMT.), ocurrió un sismo con magnitud local (ML) de 6,2, cuyo epicentro se localizó en inmediaciones del municipio de Córdoba (departamento del Quindío) y su hipocentro a 20 km de profundidad, generando importantes daños y víctimas (Méndez y Jaramillo, 1999). En la figura 1 se muestran los mecanismos focales de sismos con magnitud mayor a 5,5 Ms en zonas aledañas a Ibagué.

En Ibagué asimismo se presentaron daños en edificaciones, que afectaron 23 instituciones y 20 viviendas, incluidos daños parciales a totales, en cuanto a mampostería, acabados y estructuras. Se presentaron además problemas en las líneas vitales como colapso de algunos puntos de la red de distribución de agua potable, infiltraciones en tramos de alcantarillado, pérdida parcial del fluido eléctrico e inestabilidad de varios taludes ubicados en los bordes de escarpes y en las vías de comunicación (Franco-Idarraga y Pineda, 1999).

La falla de Ibagué y la posibilidad de generar sismos lentos, callados y silenciosos

Siguiendo a Yeats *et ál.* (1996), cuando se piensa en una fuente sísmica, se piensa en una grieta que se propaga a través de la corteza a una velocidad cercana a la velocidad de las ondas de corte, la cual generalmente es de varios kilómetros por segundo. La ruptura de la falla es repentina, acompañada de una sacudida violenta del suelo.

No obstante, ¿qué pasa, por ejemplo, con eventos paulatinos del terreno (tipo *creep*) en las fallas de San Andrés, Hayward y Calaveras en California, en las que la propagación a lo largo de la falla ocurre a tasas menores a un metro por segundo, y el desplazamiento es de milímetros por año? (Yeats *et ál*. (1996)).

En efecto, estas consideraciones también hacen parte de las continuas deformaciones de la Tierra, pues se trata de eventos de deformación inelástica en la corteza dúctil. Las deformaciones de la Tierra ocurren a tasas que difieren en forma amplia, desde rupturas rápidas que repentinamente liberan la energía de deformación elástica almacenada (sismos típicos) hasta sismos lentos (velocidades de cientos de metros por segundo), sismos silenciosos (velocidades de decenas de metros por segundo), sismos paulatinos (*creep*) y, finalmente, episodios de migración de deformaciones con velocidades de centímetros o milímetros por segundo.

De acuerdo con Yeats *et ál.* (1996), los sismos lentos son como los bajos de la orquesta sinfónica de los sismos. Éstos incluyen episodios de propagación de ruptura de alta velocidad los cuales producen un sismograma común de ondas internas de alta frecuencia. Sin embargo, los sismos lentos toman un tiempo inusualmente largo de ruptura en comparación con sismos comunes, cuyas magnitudes de momento son similares. Así, fallas oceánicas de transformación han producido varios sismos lentos como el 6 de junio de 1960 en Chile, cuya ruptura tardó cerca de una hora para generar una serie de pequeños eventos.

Según Yeats *et ál.* (1996), si los sismos lentos son los bajos de la sinfonía sísmica, los sismos silenciosos son el equivalente a la música por debajo del rango audible. Los sismos silenciosos no están acompañados de eventos con propagación de la ruptura a alta velocidad, y por tanto no generan ondas de alta frecuencia, que son registradas telesísmicamente. Los sismógrafos convencionales no registran estos eventos. Linde y Sacks del Carnegie Institute of Washington han utilizado deformímetros para registrarlos, cuyos aparatos también han servido para documentar eventos de deslizamiento del sistema de falla de San Andrés (10 mm/seg).

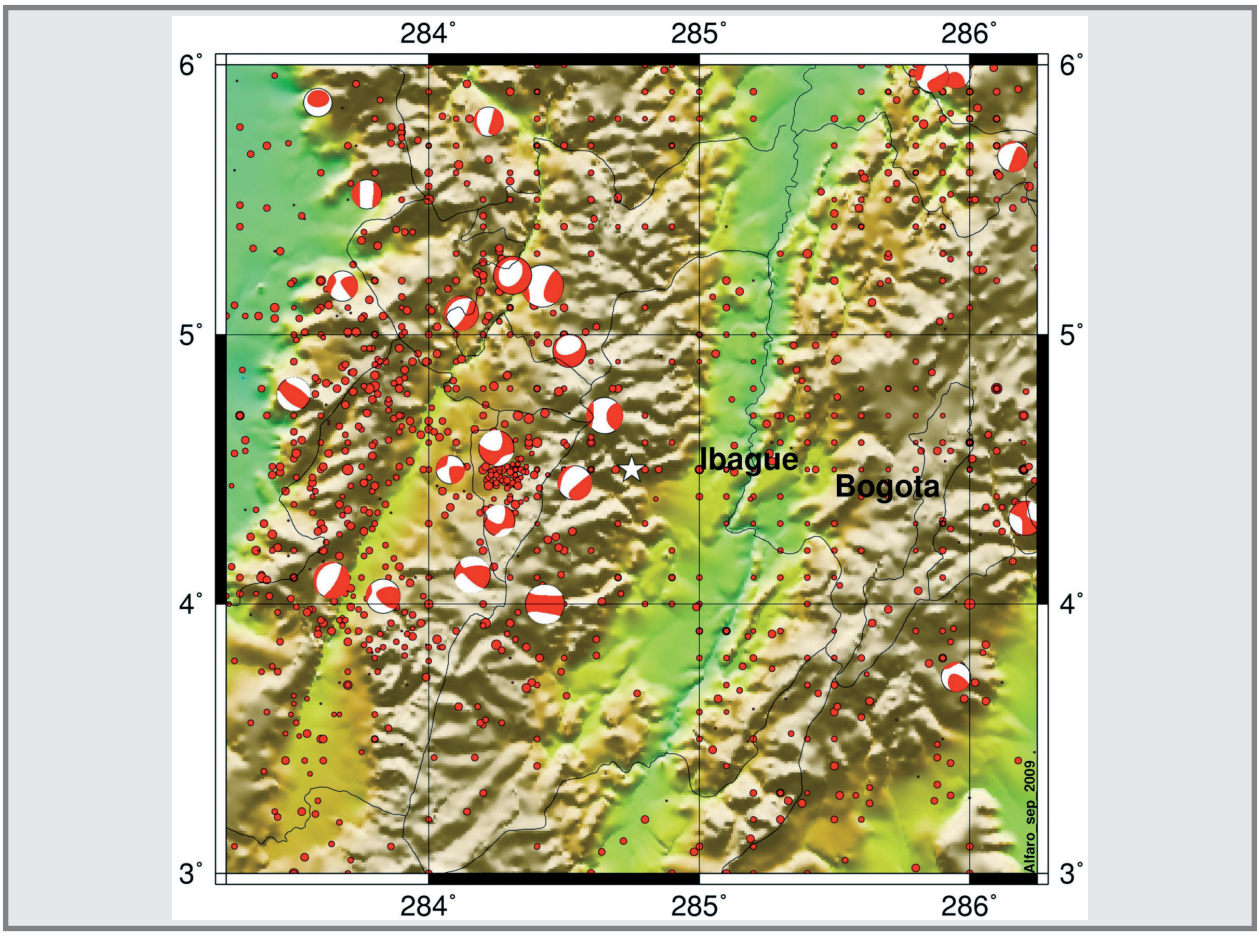
Asimismo, ondas de baja frecuencia (10 m/seg) fueron registradas antes del sismo de Friuli (Italia) de 1976; y sismos silenciosos precedieron el sismo del mar de Japón de 1983 con magnitud 7,7. Esto sugiere que los sismos silenciosos pueden ser precursores de sismos *stick slip*. Experimentos en laboratorio sugieren que los *stick slip* están precedidos por desplazamientos asísmicos con velocidades de propagación entre 20 y 200 m/seg. En campo cercano, los sismos silenciosos pueden ser registrados geodésicamente y con defor-

mímetros; es necesario usar sismógrafos digitales de banda ancha para registrar ondas de baja frecuencia.

Para estos efectos, oscilaciones libres de la Tierra fueron registradas 1.500 veces en un periodo de diez años, generadas por sismos ordinarios muy grandes. Sin embargo, en algunos casos, el sismo que las genera no parece ser suficientemente grande para producir oscilaciones libres. Beroza y Jordan (1990) sugieren que las oscilaciones libres pueden ser disparadas por sismos lentos. Por ejemplo, 164 de los 1.500 episodios de las oscilaciones libres no estuvieron acompañados de ningún registro sísmico. Beroza y Jordan (1990) asimismo atribuyen estos episodios de oscilaciones libres a sismos callados, los cuales son más rápidos que los sismos silenciosos, los cuales producen ondas tenues de baja frecuencia. Estos sismos de ultra baja frecuencia pueden liberar energía sísmica suficiente para hacer vibrar al planeta, a pesar del hecho que ellos no producen ondas sísmicas dañinas de alta velocidad.

A partir de las investigaciones de Alfaro *et ál.* (2000, 2001), Escobar (2001), Díaz-Granados (2001), Martínez (2001), Beltrán y Castiblanco (2001), Beltrán *et ál.* (2006) y Romero (2007), Romero y Alfaro (2009), Van Hissenhoven (2000) había planteado la posibilidad que la falla de Ibagué también generara sismos lentos, callados o silenciosos, es decir, las deformaciones son tan lentas que no generan ondas destructivas.

Figura 1. Epicentros y mecanismos focales de sismos con magnitudes mayores a 5,5 de 1976-2009.



Fuente: Elaboración de los autores.

Determinación de la curva de amenaza sísmica probabilística

Para efectos de este trabajo se realizó una revisión de los catálogos del USGS, para los sismos presentados en un área rectangular de 40.000 km^2, con centro en las coordenadas 4,4 N y 75,2 W, correspondientes al centro de la ciudad de Ibagué, para un periodo comprendido entre 1595 y 2009. Sin embargo, debido a que la distribución espacial es heterogénea, ésta se redujo a 34.800 km^2, para tener una distribución tipo Poisson.

Proceso estacionario de Poisson en el tiempo

Para desarrollar de una manera adecuada el procedimiento propuesto por Hanks y Cornell (1994), se requiere que los sismos se encuentren uniformemente distribuidos en el tiempo. Por tal motivo, a partir del análisis del número de sismos con magnitud Ms ≥ 4,0, se tiene que el periodo de tiempo en el cual la distribución temporal de los sismos se aproxima a un proceso de Poisson va de 1961 a 2009 (tabla 1).

Estimación de la aceleración del terreno

En este estudio los criterios para seleccionar las ecuaciones de atenuación de la aceleración del terreno con la distancia, fueron los siguientes: aquellas ecuaciones que utilizan Ms, ya que el catálogo sísmico se unificó así. En segundo lugar, para su desarrollo se debió utilizar un número representativo de datos. Finalmente, que respondiera a sismos por fallas geológicas, antes que a zonas de subducción. De las 197 ecuaciones recopiladas por Douglas (2001, 2002), se seleccionaron las de Patwardhan *et ál.* (1978), Fukushima *et ál.* (1988) & Fukushima & Tanaka (1990), Ambraseys & Bommer (1991), Sarma & Srbulov (1996, 1998), Ambraseys & Douglas (2000) y Smit *et ál.* (2000) de acuerdo con los criterios anteriores.

Tabla 1. Número de sismos con magnitud mayor a 4,0 Ms.

Siglo XVI	Siglo XIX		Siglo XX		Siglo XXI	
	1800-1809	1	1900-1909	0	2000-2009	12
	1810-1819	0	1910-1919	0		
	1820-1829	4	1920-1929	0		
	1830-1839	0	1930-1939	1		
	1840-1849	1	1940-1949	2		
	1850-1859	0	1950-1959	3		
	1860-1869	0	1960-1969	9		
	1870-1879	1	1970-1979	14		
	1880-1889	0	1980-1989	6		
	1890-1899	0	1990-1999	10		
1	**7**		**45**		**7**	
			Total		**66**	

Fuente: Elaboración de los autores.

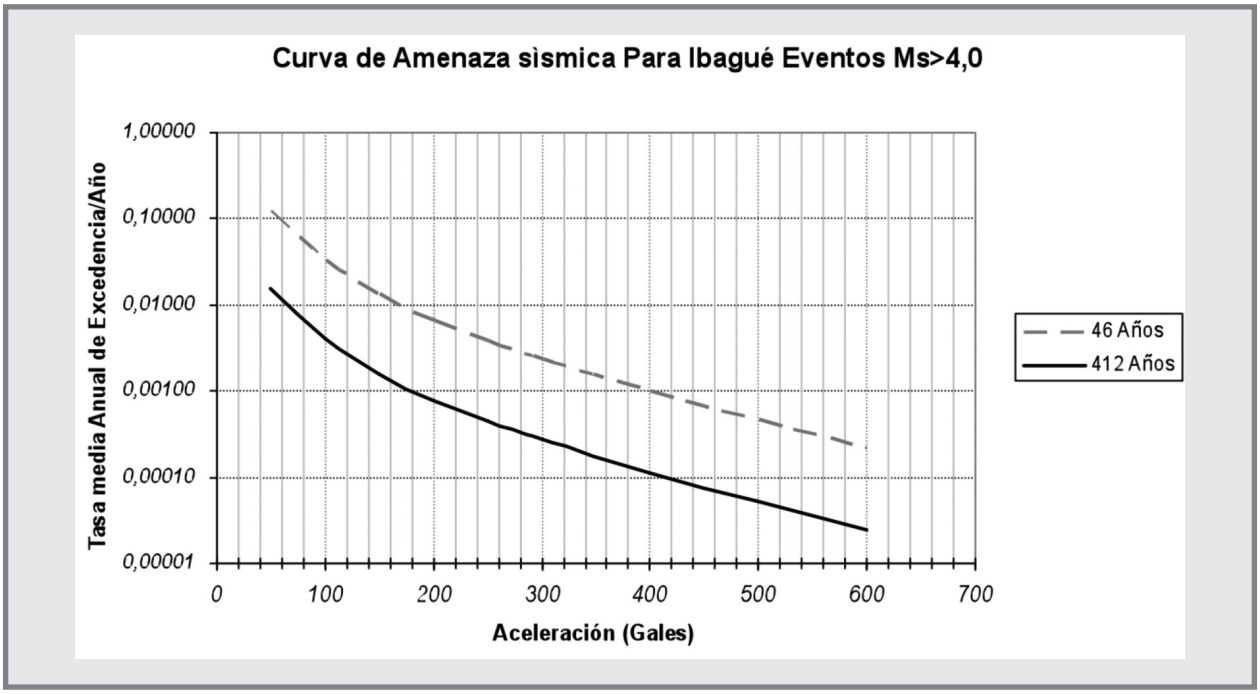
Curva de amenaza sísmica

Al combinar la tasa media anual de ocurrencia de sismo por magnitud con la relación de área para cada combinación de aceleración y magnitud, se puede determinar una ocurrencia anual media del movimiento del terreno en el sitio. En efecto, el total de la tasa media anual de ocurrencia del movimiento sísmico mayor que una aceleración $\boldsymbol{a}$ dada corresponde a la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes. La figura 2 presenta la curva utilizando la atenuación de Sarma y Srbulov (1998).

Aceleraciones pico para 475, 1.000 y 2.000 años

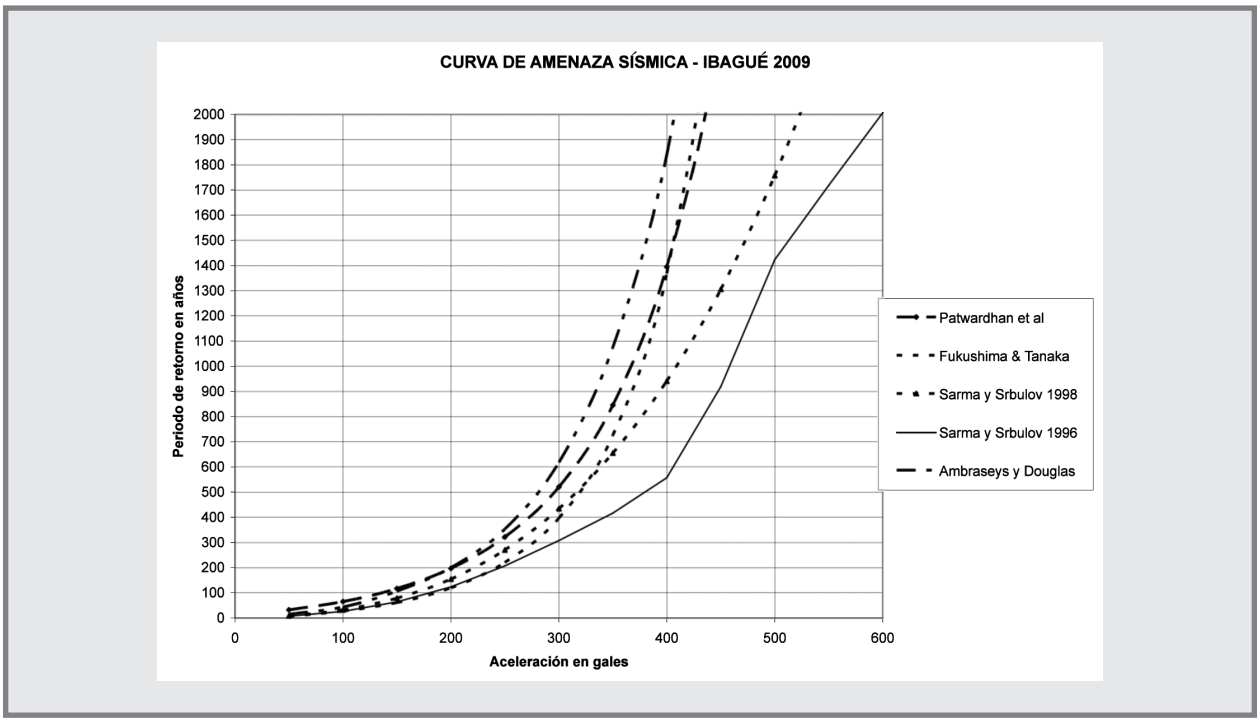
La figura 3 muestra las relaciones tiempo de retorno en años *versus* aceleraciones pico en gales para cada una de las ecuaciones de atenuación utilizadas. En la tabla 2 se muestran los valores de aceleración pico para tiempos de retorno de 475, 1.000 y 2.000 años, obtenidos a partir de cada ecuación de atenuación utilizada.

Figura 2. Curva de amenaza sísmica para Ibagué utilizando la ecuación de Sarma & Srbulov (1998).



Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 3. Aceleraciones pico 1961-2009.



Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 2. Aceleración en gales para tiempo parcial (48 años)

TR (años)	Ambraseys & Douglas (2000)	Sarma y Srbulov (1998)	Sarma y Srbulov (1996)	Fukushima et ál. (1998) & Fukushima & Takada (1990)	Patwardhan, et ál. (1978)	Aceleración en gales según NSR-98	Promedio ecuaciones utilizadas	Diferencia porcentual con NSR-98
475	275	310	380	315	290	196	314	160%
1000	345	380	460	410	365	-	392	-
2000	405	520	600	430	435	-	478	-

Fuente: Elaboración de los autores.

Conclusiones

A partir del análisis de la información de estudios previos, se concluye que Ibagué es una ciudad ubicada en un contexto geológico y geotécnico de amenaza sísmica importante, debido a la heterogeneidad de los suelos y las fallas activas que atraviesan el casco urbano. Sin embargo, se debe mejorar la instrumentación del área, preferiblemente con la instalación de equipos de banda ancha y sistemas geodésicos para monitorear más y mejor la falla de Ibagué.

A partir de la metodología propuesta por Hanks y Cornell (1994) es importante seleccionar el periodo en el cual la ocurrencia de los sismos se asemeja a un proceso de Poisson, ya que si no se considera esta condición, los valores de aceleración pico serán inferiores a los que probablemente se puedan presentar por las condiciones tectónicas de la zona. Esto se evidencia en las aceleraciones pico obtenidas para cada periodo en consideración.

En efecto, se encontró que para el periodo en el cual la ocurrencia de los sismos se ajusta a un proceso de Poisson (1961-2009), los valores medios de aceleraciones para los tiempos de retorno definidos de 475,1.000 y 2.000 años, son de 314, 392 y 478 gales, respectivamente. Resulta importante observar que en el caso de Ibagué, y en términos generales en Colombia, la cantidad de datos tanto históricos e instrumentales de sismos con magnitudes mayores a 4,0 –es decir, con poder destructivo– es bastante baja, de tal forma que las conclusiones no tienen suficiente robustez.

El sismo de Quetame-Colombia (24/05/08) de magnitud Ms 5,8 generó aceleraciones de 605 gales en la componente NS, 460 gales EW y 297 gales UD en roca a 9 km del epicentro; de 59 gales NS, 42 gales EW y 71 gales UD en roca a 31 km del epicentro en Villavicencio; (Ingeominas, 2008). Este sismo generó víctimas mortales y cuantiosos daños materiales, incluida una serie de movimientos de remoción en masa en la carretera Bogotá-Villavicencio, lo que implicó el cierre de la vía durante varios días. Las aparentemente altas aceleraciones obtenidas en este estudio se ven opacadas por los registros del sismo de Quetame.

Los sismos instrumentales más grandes corresponden a 15/08/1992 con Mw de 5,9 a una profundidad estimada de 119; el del 19/08/95 con Mw de 6,6 a 119 km de profundidad; el del 02/09/97 con Mw de 6,8 a 198 km de profundidad; el del 11/12/97 con Mw de 6,4 a 177 km de profundidad; la crisis sísmica del eje cafetero que causó daños y víctimas del 25/01/99 con ML de 6,2 a 33 km y una réplica de Mw 5,5 a 17 km de profundidad; el del 22/09/2001 con Mw de 5,9 a

178 km de profundidad; el del 08/03/2005 con Mw de 5,0 y profundidad de 65 km; y el del 13/09/2008 con Mw de 5,7 y profundidad de 132 km.

De acuerdo con los resultados de neotectónica, la magnitud esperada para un tiempo de retorno de 1.300 años es de 7,0+/-0,1; y por tratarse de la falla de Ibagué sería superficial, según este estudio, las aceleraciones podrían estar entre 370 y 490 gales. Con base en las aproximaciones probabilista y determinista, respectivamente, los escenarios de daño para Ibagué podrían ser desastrosos. En efecto, es aconsejable mejorar la instrumentación sismológica, la cual –de acuerdo con lo expuesto– debe incluir equipos de banda ancha, sistemas geodésicos, extensómetros y deformímetros, con el fin de mejorar, entre otros, el conocimiento de la falla de Ibagué y determinar si ésta genera sismos lentos, callados o silenciosos.

Referencias

Acosta, H. y Ramírez, J. (1985). Ideas acerca del origen del abanico de Ibagué. Tesis de grado. Universidad Nacional, Departamento de Geología, Bogotá, pp. 64.

AIS (1984) Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Estudio General del Riesgo Sísmico de Colombia. Bogotá.

AIS, Ingeominas y Universidad de los Andes (1996) Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá.

Alfaro, A.; Díaz-Granados, A.; Escobar, P. y Martínez, L. (2001) Aportes para la Microzonificación Sísmica de Ibagué. Red Sismológica Regional Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima. Manizales-Colombia: v. 6, n.1, pp. 32-37.

Alfaro, A.; Escobar P.; Ramos M.; Calpa. C. (2000). Microzonificación Sísmica Preliminar de Ibagué. Instituto Geofísico Universidad Javeriana y Consultoría Colombiana S.A.

Ambraseys, N. N. y Bommer, J. J. (1996) Prediction of Vertical Response Spectra in Europe. *Earthq. Eng. Struc.l Dyn*. pp. 401-412.

Ambraseys, N. y Douglas, J. (2000). *Reappraisal of the effect of vertical ground motions on response*. ESEE Report 00-4. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College, London.

Association Francaise du Genie Parasismique-AFPS (1995). Guidelines for Seismic Microzonation Studies. París.

Barrero, L. (1969). Petrografía del Stock de Payandé y metamorfitas asociadas. Boletín Geológico, No. 17 (1-3), pp. 113-114.

Beltrán, J. y Castiblanco, W. (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.

Beltrán, J., Castiblanco, W. y Alfaro, A. (2006) Evaluación de zonas con posible amplificación topográfica y susceptibles a deslizamientos debido a un sismo en Ibagué-Colombia. Boletín técnico IMME. (44):3:9-16.

Beroza, G. C. y Jordan, T. H. (1990) Searching for slow and silent earthquakes using free oscillations. *Journal Geophys. Res.* 95: 2, pp. 485-510.

Caballero, J. (1902). Días de la Independencia. Biblioteca de Historia Nacional. Vol. I, Imprenta Nacional, Bogotá

Cediel, F.; Mojica, J. y Macia, C. (1980) Definición estratigráfica del Triásico en Colombia. Formación Luisa, Payandé y Saldaña. *Newsletter Stratigraphy*, 9(12), Hannover.

Dane. (2006) Base digital de Ibagué. Bogotá.

Dane. (2005) Censo nacional.

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

Diederix, H.; Gómez, J.; Khobzi y Singer, A. (1987). Indicios neotectónicos de la falla de Ibagué en el sector Ibagué-Piedras. Departamento del Tolima, Colombia. *Revista CIAF*, Vol. 11, Tomo II (1-3); pp. 242-252, Bogotá.

Douglas, J. A Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000). (2001), London: Imperial College of Science, *Technology and Medicine*.

Douglas, J. A. Errata and additions to ESEE Report No. 01-1 "A comprehensive worldwide for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969 to 2000)". London: Imperial College of Sciencie, *Technology and Medicine*, 2002.

Escobar, P. (2001) Microzonificación Sísmica preliminar de Ibagué. Pontificia Universidad Javeriana. Trabajo de grado, Bogotá.

Feininger, T. (1970). The Palestina Fault, Colombia, *Geological Society of America*. Bulletin 81(4) 1201-1216.

Franco, L. y Pineda, P. (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.

Fukushima, Y. y Tanaka, T. (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(4), pp. 757-783.

Fukushima, Y.; Tanaka, T. y Kataoka, S. (1988) A new attenuation relationship for peak ground acceleration derived from strong-motion accelerograms. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. II, pp. 343-348.

González, A.; Peña, A.; Santos, C. y Navas, O. (1983) Proyecto I. Memorias áreas al Sur Oriente de Ibagué. Centro Interamericano de Fotointerpretación. CIAF. Unidad de Geología y Geomorfología. Bogotá.

Guevara, C. (1985) Aspectos fotogeológicos y estratigráficos al sur de Payandé, Tolima, Colombia. *Revista CIAF*. Vol. 10(1), pp. 59-72. Bogotá.

Hamilton, J. (1955). Viajes a través de las provincias interiores de Colombia. Banco de la República, Bogotá, Tomo II.

Hanks y Cornell (1994). Probabilistic Seismic Hazard Analysis: A Beginner's Guide. In *Proceedings of the Fifth Symposium on Current Issues Related to Nuclear Power Plant Structures, Equipment and Piping*, North Carolina State University, Raleigh. pp. I/1-1 a I/1-17.

Harvard (2009). http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/ Fecha de consulta: agosto de 2009.

Houten, F. y Travis, R. (1968) Cenozoic deposits of the Upper Magdalena Valley, Colombia. Am. Asoc. Petr. Geol. Vol. 52, pp. 675-702.

Ingeominas. (1992). Estudio Geológico-Geotécnico y aptitud urbanística de la ciudad de Ibagué, pp. 78. Ibagué.

Ingeominas (2008) El sismo de Quetame (Cundinamarca) del 24 de mayo de 2008. Aspectos sismológicos. www.ingeominas.gov.co.

International Seismological Centre, *On-line Bulletin*, http://www.isc.ac.uk, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2009.

Jaramillo, M.; Escobar, P. y Ramos, M. (2000) Marco tectónico y Amenaza Sísmica de Ibagué. Memorias del VIII Congreso Colombiano de Geotecnia. Bogotá.

Macia, C.; Mojica, J. y Colmenares, F. (1985). Consideraciones sobre la prospección de hidrocarburos en el Valle Superior del Magdalena, Colombia. Geología Colombiana No. 14, pp. 49-70. Bogotá

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

Méndez, R. y Jaramillo, C. (1999) Apreciaciones Iniciales del Sismo del 25 de enero de 1999. Red Sismológica del Eje Cafetero Viejo Caldas y Tolima. Ingeominas. Cuarta Edición.

Milne, J. (1906) A Catalogue of Destructive Eathquakes, London.

Montes, N. *et al*. (2004) Paleosismología de la falla de Ibagué. Bogotá.

Mora, B. y Talavera, H. (1991). Informe Fotogeológico de un área al Sur de Ibagué. Ingeominas.

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

Núñez, A. (1978) Petrogénesis del Batolito de Ibagué. Resúmenes II Congreso Colombiano de Geología. Bogotá.

Paris, G.; Machette, M.; Dart, R. y Haller, K. *(2000)* Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions, USGS. Open File report, CO-0284.

Ramírez, J. E. (1968) Los Volcanes de Colombia. Separata de la *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*. Volumen XIII, No. 50. Bogotá

Ramírez, J. E. (1975), Historia de los Terremotos en Colombia. IGAC, Bogotá.

Romero, M. (2007) Evaluación probabilística de la amenaza sísmica de Ibagué, Universidad de La Salle, Trabajo de Grado, Bogotá.

Romero, M. y Alfaro A. (2009) Evaluación probabilística de la amenaza sísmica de Ibagué-Colombia a 2009. Memorias de las XV Jornadas de la Ingeniería Colombiana. Bogotá. 20-22 oct. ISBN: 978-958-695-463-1.

Sarma, S. K. y Srbulov, M. (1996) A simplified method for prediction of kinematic soil-foundation interaction effects on peak horizontal acceleration of a rigid foundation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(8), pp. 815-836

Sarma, S. K. y Srbulov, M. (1998) An uniform estimation of some basic ground motion parameters. *Journal of Earthquake Engineering*, 2(2), pp. 267-287.

Soeters, R. (1976) El desarrollo geomorfológico de la región de Ibagué-Girardot. *Revista CIAF*, 3, pp. 471-480, Bogotá.

Tabor, L. (1938) Seismological Notes. Colombia. (Earthquake) February 4, 1938. *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 28, No. 3, July, pp. 227-229.

Thouret, J.; Murcia, A.; Salinas, R. y Vatin-Perignon, N. (1985) Aspectos volcano-estructurales y dinamismo eruptivo reciente de los volcanes Cerro

Bravo y Nevado del Tolima, Cordillera Central de Colombia. Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Geología, Tomo I, pp. 269-288. Bogotá.

USGS (2009). www.earthquake.usgs.gov. Fecha de consulta: 13 de julio de 2009

Van Hissenhoven, R. (2000) Comunicación personal.

Vergara, H. (1989a) Actividad Neotectónica de la Falla de Ibagué. Memorias del V Congreso Colombiano de Geología. Tomo I, pp. 147-156, Bucaramanga.

Vergara, H. (1989b). Serpentinitas asociadas a la falla de Chapetón, Departamento del Tolima, Ibagué.

Vergara, H. y Cárdenas, J. (1999). Neotectónica del Departamento del Tolima con énfasis en la Falla del Cucuana. Ingeominas, Red Sismológica Regional del eje Cafetero, Viejo Caldas y Tolima. Vol. II, pp. 24-27.

Vergara y Velasco, F.J. (1898) Los terremotos en Colombia. Anales de Ingeniería. . Vol. 10. N.º 118, pp. 186-192.

Wellman, S. (1970). Stratigraphy and petrology of the non-marine Honda Group (Miocene), Upper Magdalena Valley; Colombia. *Geol. Soc. Am. Bull.* Vol. 81 (8), pp. 2353-2374.

Yeats, R. S.; Sieh, K. y Allen, C. R. (1996) *Geology of Earthquakes*. Oxford University Press. New York, pp. 557.