

Anotaciones con respecto a la definición de un espectro sísmico en roca para Bogotá – Colombia

Andrés José Alfaro Castillo*

RESUMEN

Las metodologías para la determinación de espectros sísmicos de diseño están establecidas y han sido difundidas desde hace varias décadas. El proceso es relativamente fácil, sin embargo, la labor se complica ante la ausencia de datos. La ciudad de Bogotá está situada en una zona con una amenaza sísmica importante con múltiples fuentes sismogénicas. A pesar de ello, no se cuenta con registros digitales de movimientos sísmicos fuertes; lo que hace necesaria la utilización de registros de eventos sísmicos de otras partes del mundo. Este artículo muestra una evaluación probabilística de la amenaza sísmica de la ciudad de Bogotá al año 2005; a continuación se presentan los criterios de selección de registros sísmicos, teniendo cuenta los contenidos frecuenciales de los mismos y los mecanismos focales, entre otros. Finalmente, se presenta una propuesta de espectro en roca para la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Bogotá, Colombia, espectro sísmico, mecanismo focal, frecuencia de esquina, frecuencia máxima.

COMMENTS REGARDING THE DEFINITION OF A SEISMIC EVENT IN BOGOTÁ – COLOMBIA

ABSTRACT

The methodologies to determine Earthquake Design Spectra have been established and disseminated several decades ago. The procedure is relatively easy; however this task becomes difficult because of the lack of data. The city of Bogotá is located in a zone with a significant seismic hazard, including the presence of several seismogenetic sources. In spite of this fact, there are not digital records of strong ground motions. Then it is necessary to use records from all over the world. This article shows first, a Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Bogotá in 2005; then, the criteria to select seismic records, which include frequency content, focal mechanisms among others. Finally a proposal of a Design Spectra for Bogotá is discussed.

Key Words: Bogotá, Colombia, earthquake spectra, focal mechanism, corner frequency, maximum frequency.

* 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: marzo 1 de 2006.
Fecha de aprobación: abril 1 de 2006.

INTRODUCCIÓN

En términos generales, existen dos grandes metodologías para la determinación de la amenaza sísmica en un sitio, son la probabilista y la determinista; en la primera, los datos a usar corresponden a los sismos registrados en la región; en la determinista es necesario conocer a profundidad las fuentes sismogénicas de la zona de interés. En el caso de los sismos, la información de los eventos de magnitud mayor a 5.0 está contenida en los catálogos mundiales, varios de ellos disponibles en forma abierta y gratuita en Internet. No ocurre lo mismo con la información específica de fallas geológicas, la determinación del nivel de actividad de las fallas implica labores de campo y recursos importantes en tiempo y dinero para saber con certeza la magnitud de los terremotos que ha generado la falla en estudio.

Si bien existen análisis estadísticos que relacionan parámetros de las fallas con las magnitudes esperadas, estos valores solo pueden tomarse como valores de referencia. Por la ausencia de datos para realizar una aproximación determinista en este estudio se utiliza la aproximación probabilista para la determinación de la amenaza regional. Un segundo aspecto de interés, es la determinación de la atenuación de la señal sísmica con la distancia. Debido a la baja densidad de instrumentación sísmica en Colombia; por el momento no se cuentan con ecuaciones de atenuación propias, lo cual hace necesaria la utilización de ecuaciones desarrolladas en otras partes del mundo, esto se traduce en que las ecuaciones son desarrolladas en geologías y procesos tectónicos diferentes.

Ante la ausencia de registros de movimientos sísmicos fuertes de roca en Colombia; llamando fuertes aquellos que tengan mas de 100 gales; es necesario recurrir a registros de otras partes del mundo,

los cuales tienen limitaciones similares a lo mencionado anteriormente para las ecuaciones de atenuación sísmica. Es deseable seleccionar dichos registros para eventos que hayan tenido magnitudes similares a las que se prevén del estudio de amenaza sísmica; cuyas distancias sean consistentes con las fuentes sismogénicas de la región; los contenidos frecuenciales correspondan con los sismos que se generan y finalmente que los mecanismos focales sean similares que las fuentes sismogénicas. Finalmente, se puede tener un espectro sísmico que puede reflejar las condiciones sismológicas de la región.

EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA

La evaluación probabilista de la amenaza sísmica para Bogotá se realizó siguiendo a Hanks y Cornell (1994) y a Takada (2005). En primer lugar, se observó la sismicidad histórica: localización, tamaño y momento de ocurrencia de los sismos en un área de 400 km² comprendida entre las coordenadas 2,68° y 6,68° latitud Norte y entre 76,65° y 72,65° longitud Oeste. Los sismos abarcan desde el año de 1566 hasta el 2004; siguiendo a Takada (2005) se tuvieron en cuenta los sismos con magnitud mayor a 5.0, que son aquellos que causan daños en edificaciones y víctimas, en otras palabras un evento de magnitud inferior a 5.0 no tiene porque afectar la vida diaria de la población. Se asume que la ocurrencia de los sismos en esta región es un Proceso de Poisson, con una tasa constante de sismos en el tiempo y en el espacio. Los catálogos utilizados son los de SISRA y USGS disponibles en Internet (USGS, 2006).

Con el fin de unificar las escalas de Magnitudes a Ms, se utilizaron los estudios de Chen y Chen (1989), quienes ajustaron un conjunto de datos globales con valores de desviación estándar individual $\log M_0$

de aproximadamente ± 0.4 y confirmaron la saturación de M_s aproximadamente en 8.5, las ecuaciones son la 1, 2 y 3.

$$\log M_0 = 1.0 M_s + 12.2 \text{ para } M_s < 6.4 \quad (1)$$

$$\log M_0 = 1.5 M_s + 9.0 \text{ para } 6.4 < M_s < 7.8 \quad (2)$$

$$\log M_0 = 3.0 M_s - 2.7 \text{ para } 7.8 < M_s < 8.5 \quad (3)$$

Para M_0 y magnitudes de ondas internas m_b (período de 1 segundo) las relaciones dadas por Chen y Chen (1989) se presentan en las ecuaciones 4 y 5, con saturación m_b de 6.5 para $\log M_0 > 20.7$.

$$\log M_0 = 1.5 m_b + 9.0 \text{ para } 3.8 < m_b < 5.2 \quad (4)$$

$$\log M_0 = 3 m_b + 1.2 \text{ para } 5.2 < m_b < 6.5 \quad (5)$$

Por otra parte, en la modelación del movimiento es necesario determinar la atenuación de la aceleración con la distancia. Se han desarrollado múltiples ecuaciones en todo el mundo, por ejemplo Douglas (2001) recopiló 197 ecuaciones; Caneva *et al.* (2003, 2004) utilizaron para Bogotá las de Esteva (1970), Donovan (1973), MacGuire (1974), Aptikaev y Kopnichev (1980), Joyner y Boore (1981), Dahle *et al.* (1990a, 1990b, 1995), Crouse (1991), Taylor *et al.* (1992), Ambraseys y Bommer (1996) y Boore *et al.* (1997).

Dichas ecuaciones, contemplan un amplio espectro de condiciones del medio físico, por haber sido utilizados en su determinación registros de regiones de subducción; de las costas de Norte, Centro y Sur América, registros mundiales, entre otros. En este estudio se utilizó la ecuación (6) de Mac Guire (1974); ya que de acuerdo con los resultados de Caneva *et al.* (2003, 2004) arroja resultados que corresponden aproximadamente al promedio de las diferentes ecuaciones. Las características principales de Mac Guire (1974) son las siguientes: no define el mecanismo de la fuente y utilizó registros del occidente de los Estados Unidos.

$$a = 472,3e^{0,640M} (R + 25)^{-1,301} \quad (6)$$

donde R es la distancia epicentral en Km. y la aceleración a queda expresada en gales.

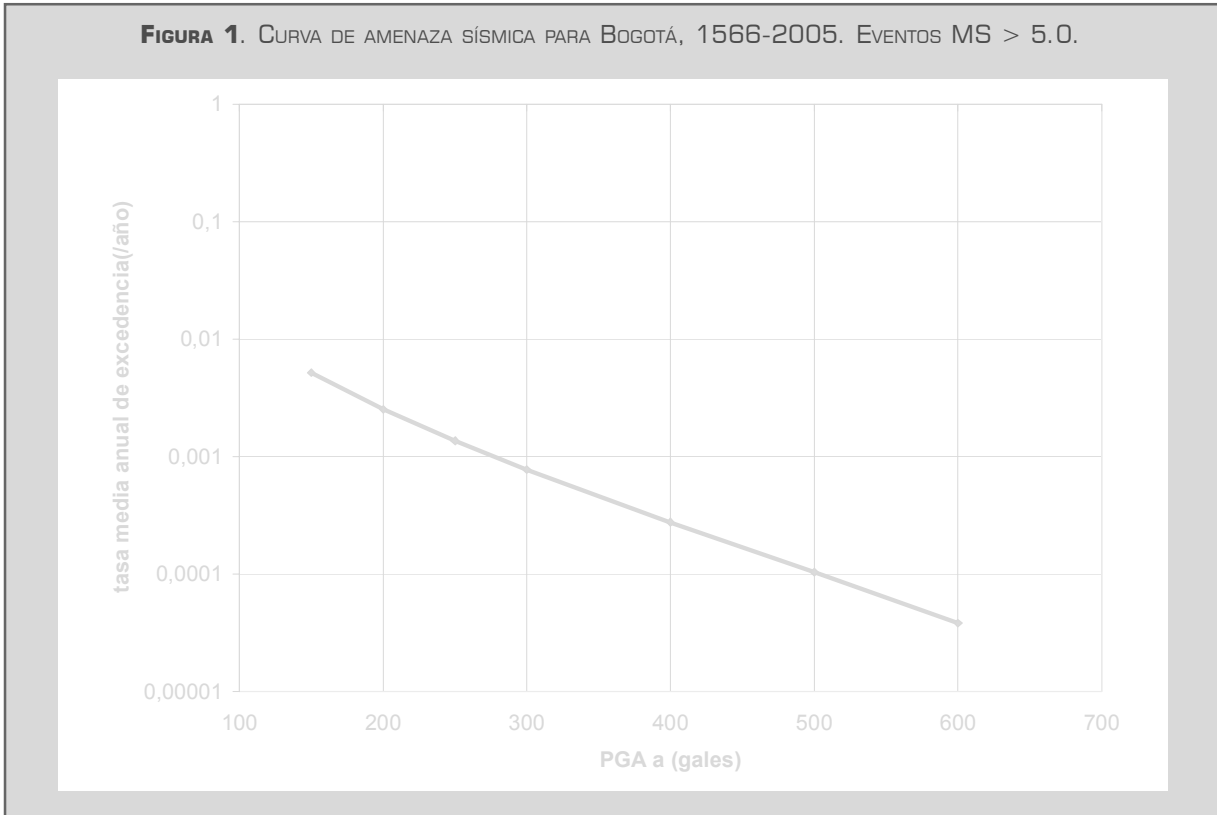
Utilizando la ecuación de atenuación, se puede calcular la distancia a la cual se pueden producir aceleraciones dadas para Magnitudes fijas. En otras palabras, en este caso, una aceleración de 200 gales puede ser generada por un evento de magnitud M_s 5.5 a una distancia de 4 kilómetros, también puede ser producida por un evento de magnitud 5.8 a 9 kilómetros; o por un evento de magnitud 6.0 a 14 kms, la Tabla 1 resume los resultados obtenidos en este estudio.

TABLA 1. RELACIÓN ENTRE DISTANCIAS Y ACELERACIONES PARA MAGNITUDES M_s DADAS.

MS	5,0	5,5	5,8	6,0	6,1	6,3	6,4	6,5	6,6	6,7	6,8	7,0	7,2	7,3	7,4	7,6	7,8
Aceleración en gales	Distancia en kilómetros																
50	41	60	73	83	88	100	106	113	120	127	135	151	170	179	190	212	236
100	14	25	33	39	42	49	52	56	60	65	69	79	89	95	101	114	128
150	4	12	17	22	24	29	32	35	38	41	44	51	59	63	68	77	88
200		4	9	13	14	18	21	23	25	28	30	36	42	46	49	57	65
250			4	7	8	12	13	15	17	20	22	27	32	35	38	44	51
300				3	4	7	9	10	12	14	16	20	24	27	30	35	41
400							2	3	5	6	8	11	15	17	19	23	28
500										1	3	5	9	10	12	16	20
600												2	4	6	7	10	14

Para determinar la curva de amenaza sísmica (Figura 1) se procede a combinar la tasa anual de ocurrencia de sismos con una magnitud dada por unidad de área, finalmente el total de la tasa media anual

de ocurrencia del movimiento sísmico mayor que una aceleración a dada es la sumatoria de las contribuciones de las diferentes magnitudes.



En el campo de la ingeniería sísmológica es más común expresar estos resultados en tiempo de retorno utilizando para ello las ecuaciones 7 y 8.

$$P = 1 - e^{-v} \quad (7)$$

Donde v es la tasa media anual de excedencia, P es la probabilidad de ocurrencia y e es exponencial.

$$TR = \frac{1}{P} \quad (8)$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

TABLA 2. AMENAZA SÍSMICA PARA BOGOTÁ, 1566-2005. EVENTOS MS > 5.0.

Aceleración en Gales	v total	Tiempo de Retorno (TR) en años
150	0,00515697	194
200	0,00252308	397
250	0,00135867	737
300	0,00077316	1.294
400	0,00027528	3.633
500	0,00010369	9.644
600	3,8209E-05	26.172

Para labores de diseño y revisión estructural comúnmente se utilizan los períodos de retorno de 475, 1000 y 2000 años, el periodo de retorno de 475 años corresponde a una vida útil de la estructura de 50

años y a una probabilidad de excedencia del 10%. La Tabla 3 presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos en este estudio, con los resultados obtenidos por Caneva *et al.* (2003, 2004).

TABLA 3. VALORES DE ACELERACIÓN PGA EN GALES PARA 475, 1000 Y 2000 AÑOS EN ROCA.

Periodo de Retorno TR en años	Aceleración en Gales	
	Este estudio	Caneva <i>et al.</i> (2003, 2004)
475	212	204
1.000	286	265
2.000	337	354

Los resultados tienen el mismo orden de magnitud con las siguientes diferencias: un 4% más para 475 años; un 8% mayor para 1000 años y un 5% menores para un periodo de retorno de 2000 años. A pesar de las diferencias metodológicas de los dos estudios los resultados son consistentes.

SELECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS

Consultando el catálogo de NOAA (1996) hay 36 registros horizontales y 14 verticales correspondientes a nueve sismos, que cumplen con las siguientes características: contenidos frecuenciales coherentes con las fuentes sismogénicas colombianas, principalmente del sistema de Guaicáramo; Alfaro-Arias *et al.* (2001) y Arévalo *et al.* (2003), quienes analizaron los contenidos frecuenciales de cuatro fuentes sísmicas colombianas: Nido de Bucaramanga, Sistema de Fallas de Atrato, Sistema de Fallas de Romeral y el Sistema de Fallas de Guaicáramo, se ha estimado que los contenidos frecuenciales están entre 0.03Hz y 8.9Hz.; distancias epicentrales de acuerdo con el estudio geológico regional (Lobo-Guerrero, 2002); las magnitudes y las aceleraciones. Los registros son: Long Beach (1933), San Fernando (1971), Sitka (1972), Alaska Subduction (1974), Imperial Valley (1979), Morgan Hill (1984), Valparaíso segunda réplica (1985), Loma Prieta (1989); adicionalmente el sismo del Quindío (1999). La Tabla 4 presenta las características de las fuentes

sismogénicas de interés. Es importante tener en cuenta que los mecanismos focales no necesariamente corresponden con los mecanismos reportados por Lobo-Guerrero (2002), la Figura 2 muestra mecanismos focales de sismos en el área de interés, extractada de información de Harvard (2005); por otro lado la Figura 3 muestra los mecanismos de algunos de los registros que cumplen con ciertas características para su utilización. Con el fin de facilitar la interpretación de los mecanismos focales se presenta la Figura 4.

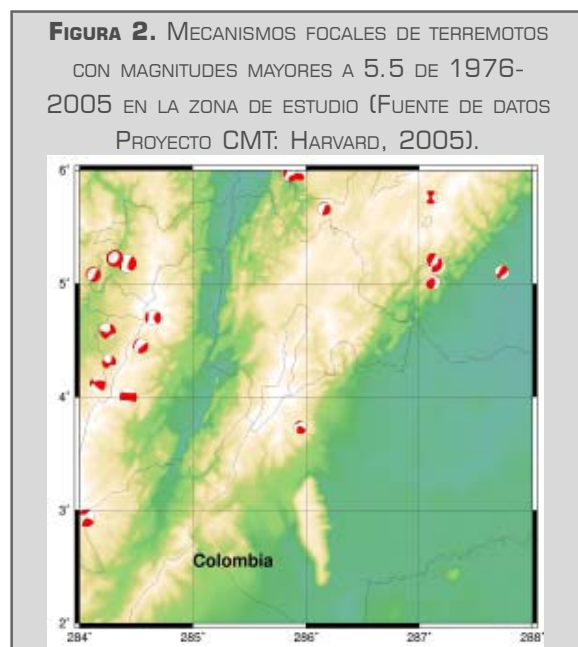


TABLA 4. FALLAS IDENTIFICADAS EN LA REGIÓN EN ESTUDIO
(LOBO-GUERRERO, 2002).

FALLA	LONGITUD (km)	AZIMUT / BUZAMIENTO	TIPO DE FALLA*	CLASIFICACION DE ACTIVIDAD	TASA DE ACTIVIDAD (mm/año)	DISTANCIA
Alto del Trigo	90	0-35 / E	I-RD	Pot. Activa	---	60
Aposentos	13	160 / 90	N	Activa	Extrem. Baja	32
Balsillas	30	165 / 80 E	N	Incierta	---	20
Barandillas	14	45 / 90	N	Activa	Extrem. Baja	50
Bituima	90	0-20 / E	I-RS	Pot. Activa	---	59
Bojacá	4	165 / E	I ?	Pot. Activa	---	30
Buenavista	6	45 / 70 E	N	Incierta	---	65
Buque	11	100 / 90	RS	Incierta	---	67
Cajitas	18	O / E	I	Activa	Moderada 0,23	40
Cambao Norte	30	10 / E	I	Pot. Activa	---	79
Cambao Sur	20	20-30 / E	I-RD	Activa	Moderada	77
Cambrás	70	20 / E	I-RS	Pot. Activa	---	89
Campamento	13	45 / 45 E	N	Incierta	---	63
Colepato	15	50 / 30 W	I	Activa	Moderada 0,1-1	68
Cuatrocasas	15	45 / 30 W	I	Activa	Alta 1-10	65
Cumaral	25	45 / 30 W	I	Activa	Alta 0,7-2,5	73
El Paujil	4	45 / 30 W	I	Incierta	---	71
El Volcán	16	45 / 45 W	I	Incierta	---	66
Facatativá	14	125 / 90	N-RD	Pot. Activa	---	37
Honda	115	345-15 / E	I	Pot. Activa	---	79
Ibagué	40	55-75 / 90	RD	Activa	Moderada-Alta 0,14-1,4	91
Los Lagartos	9	135 / 80 W	N	Activa	Muy Baja 0,07	8
Mirador	30	30-40 / 60 W	I-RD	Activa	Alta 1-10	67
Orotoy	13	60 / 60 E	N	Incierta	---	78
Pandi	60	20 / E	I	Pot. Activa	---	52
Prado	110	5-35 / E	I	Pot. Activa	---	65
Restrepo	12	45 / 45 W	I	Activa	Alta 1-10	64
Río Grande	18	30-35 / 60 E	I	Incierta	---	75
Río Tunjuelito	23	O / E	I	Activa	Extrem. Baja 0,005	14
San Cristóbal	8	70 / 45 W	I	Incierta	---	74
San Juanito-Acacias	16	40 / 45 W	I	Incierta	---	79
San Pablo	18	60 / 45 W	I	Incierta	---	69
Santa María	15	45 / 60 W	I	Incierta	---	65
Servitá	26	45 / 45 W	I-RD	Activa	Alta 1-10	62
Siecha	13	20 / W	I	Incierta	---	28
Ubaque	26	20 / W	I	Pot. Activa	---	16
Vianí	40	60 / 90	RD	Pot. Activa	---	60
Villavicencio	50	10-45 / 45 W	I	Incierta	---	70

Tipo de falla: N: Normal; I: Inversa; RD: Rumbo Dextral; RS: Rumbo Sinistral.

FIGURA 3. MECANISMOS FOCALES DE SEIS DE LOS SISMOS UTILIZADOS PARA DETERMINAR EL ESPECTRO (FUENTE DE DATOS PROYECTO CMT: HARVARD, 2005).

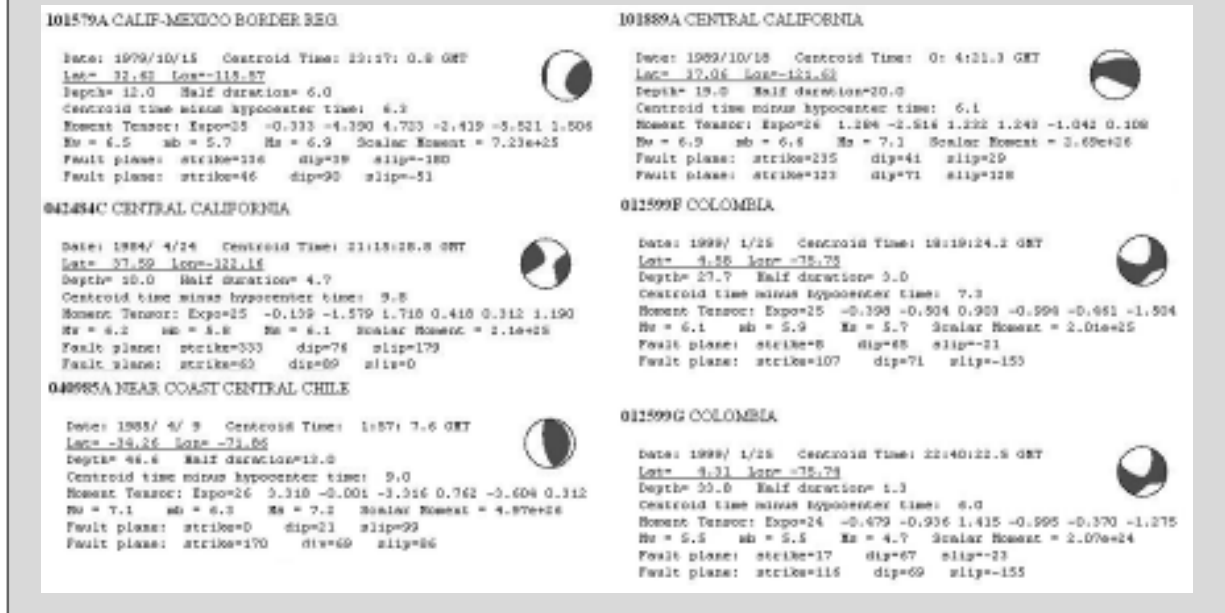
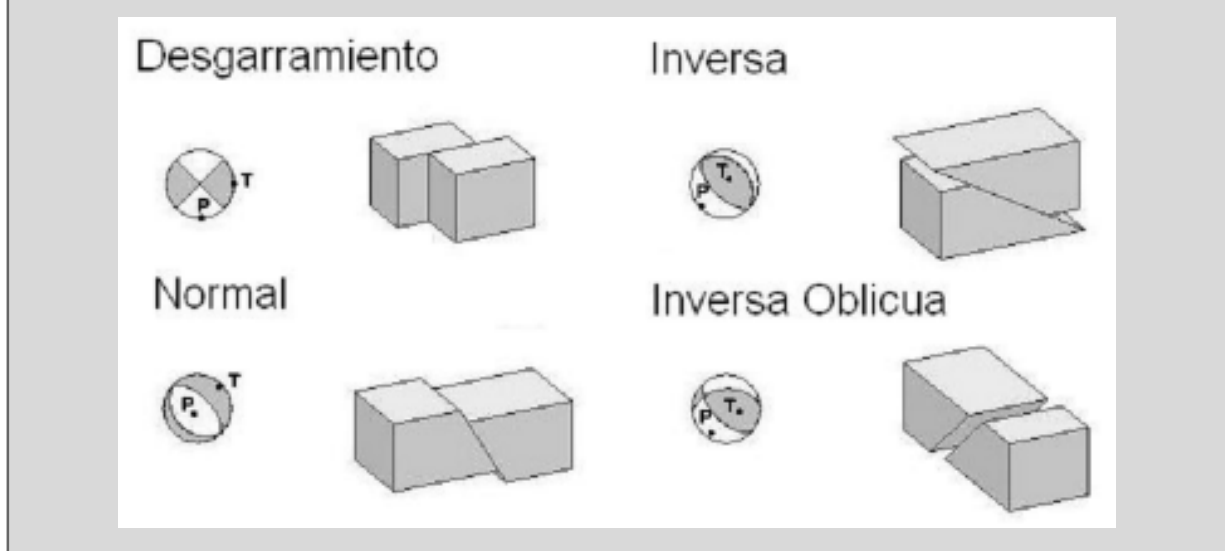


FIGURA 4. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LOS MECANISMOS FOCALES (ADAPTADO DE USGS, 2005).



Los espectros sísmicos de respuesta fueron calculados con el programa SPECEQ/UQ (Nigam y Jennings, 1968); para la determinación de los espectros sísmicos de diseño se han utilizado métodos estadísticos (Housner, 1941; Newmark y Hall, 1981). Se calculó la media, la desviación estándar y una confiabilidad del 90%.

La Figura 5 muestra los espectros de respuesta de aceleración en roca de los registros horizontales escalados. La figura 6 presenta el espectro del diseño propuesto para un período de 0.0 s una aceleración de 212 gales que crece linealmente hasta 665 gales para un período de 0.26 segundos, este valor permanece constante hasta un período de 0.72 segundos, a partir de este punto decrece con la fórmula: $a = 465 T^{-1.1}$ hasta un período de 5.0 segundos. La Tabla 5 presenta de valores del espectro sísmico de diseño en roca.

TABLA 5. ESPECTRO SÍSMICO DE DISEÑO EN ROCA
 $T_R = 475$ AÑOS.

T (s)	Aa (gales)	% g
0.00	212	0,22
0.26	665	0,68
0.72	665	0,68
0.72-5.00	$465T^{-1.1}$	

Adicionalmente, se calcularon los espectros sísmicos de diseño en roca para períodos de retorno de 1000 y 2000 años. Los registros escalables fueron 29 sismos y 21 sismos respectivamente.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6. Estos espectros no han sido idealizados, porque corresponden a procesos de revisión estructural, el

idealizarlos implicaría someter, innecesariamente, a mayores valores de aceleración el análisis de vulnerabilidad de las estructuras.

TABLA 6. VALORES DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL EN ROCA PARA PERÍODOS DE RETORNO DE 1.000 Y 2.000 AÑOS CON EL 90% DE CONFIABILIDAD.

T	29 registros utilizados		21 registros utilizados	
	Aa para 1000 años		Aa para 2000 años	
seg.	Gales	%g	Gales	%g
0,01	286	0,29	337	0,34
0,26	886	0,90	928	0,95
0,51	733	0,75	901	0,92
0,76	642	0,65	757	0,77
1,01	612	0,62	752	0,77
1,26	427	0,44	492	0,50
1,51	343	0,35	413	0,42
1,76	303	0,31	378	0,39
2,01	249	0,25	318	0,32
2,26	218	0,22	272	0,28
2,51	216	0,22	265	0,27
2,76	201	0,20	239	0,24
3,01	192	0,20	223	0,23
3,26	181	0,18	207	0,21
3,51	167	0,17	186	0,19
3,76	154	0,16	173	0,18
4,01	141	0,14	163	0,17
4,26	131	0,13	154	0,16
4,51	124	0,13	149	0,15
4,76	119	0,12	144	0,15
5,01	114	0,12	141	0,14

DISCUSIÓN

Este artículo presenta los aspectos más importantes para la determinación de un espectro en roca para la ciudad de Bogotá, utilizando para ello, métodos

clásicos que reconocen que los fenómenos sísmicos son procesos estocásticos; lo cual implica que interviene la estadística y las incertidumbres, por tal razón se han evaluado la media, la desviación estándar y se han propuesto espectros para el 90% de confiabilidad. Es importante tener en cuenta que ha sido necesario el uso de acelerogramas registrados en otras partes del mundo, debido a que, a pesar de la instrumentación acelerográfica existente a nivel nacional, en ciudades como Bogotá y Medellín, la mayoría de sismos registrados en Colombia en roca son débiles (menores a 100 gales).

En primer lugar, se observó la sismicidad histórica: localización, tamaño y momento de ocurrencia de los sismos en un área de 400 kilómetros cuadrados comprendida entre las coordenadas 2,68° y 6,68° latitud Norte y entre 76,65° y 72,65° longitud Oeste, los sismos abarcan desde el año de 1566 hasta el 2004. Siguiendo a Tanaka (2005) se tuvieron en cuenta los sismos con magnitud mayor a 5.0, que son aquellos que causan daños en edificaciones y víctimas, en otras palabras, eventos de magnitud inferior a 5.0 no tienen porque afectar la vida diaria de la población.

El análisis probabilístico de la amenaza sísmica regional dio como resultado valores de aceleración de 212 gales para un periodo de retorno TR de 475 años, 286 gales para un periodo de retorno de 1000 años y 337 gales para un periodo de 2000 años.

En la selección de los registros de aceleración se tuvo en cuenta la magnitud, la distancia a la fuente sismogénica, los contenidos frecuenciales de acuerdo con los análisis de Alfaro-Arias *et al.* (2001) y Arévalo *et al.* (2003). También se compararon, los

mecanismos focales disponibles de los sismos en la zona con los mecanismos focales de los registros utilizados de acuerdo con Harvard (2005).

A pesar de tener un conocimiento de las fallas en la zona de estudio (Lobo-Guerrero, 2002), es importante la realización de estudios de campo para observar mediante trincheras y datación de las fallas, la posible magnitud de los sismos generados por las mismas.

Para la determinación del espectro de diseño de 475 años, se utilizaron los registros de los sismos de Long Beach (1933), San Fernando (1971), Sitka (1972), Alaska Subduction (1974), Imperial Valley (1979), Morgan Hill (1984), Valparaíso segunda réplica (1985), Loma Prieta (1989) (NOAA, 1996); adicionalmente el sismo del Quindío (1999). Se evaluó el promedio, la desviación estándar y la confiabilidad del 90%. Se idealizó de forma conservadora de la siguiente forma: para un período de 0,0 s se obtuvo una aceleración de 212 gales que crece linealmente hasta 665 gales para un período de 0,26 segundos; este valor permanece constante hasta un período de 0,72 segundos, a partir de este punto decrece con la siguiente fórmula: $a = 465 T^{-1.1}$ hasta un período de 5,0 segundos.

Se recomienda la profundización de los estudios de la caracterización de sismos colombianos, principalmente en lo que se refiere a la caída de esfuerzos; también es necesario conocer con más detalle las fuentes sismogénicas que rodean a la región; si bien su conocimiento geométrico es de calidad, es necesario conocer su poder destructivo.

FIGURA 5. ESPECTROS SÍSMICOS DE RESPUESTA EN ROCA (INSTITUTO GEOFÍSICO, 2002; ALFARO *ET AL.*, 2004).

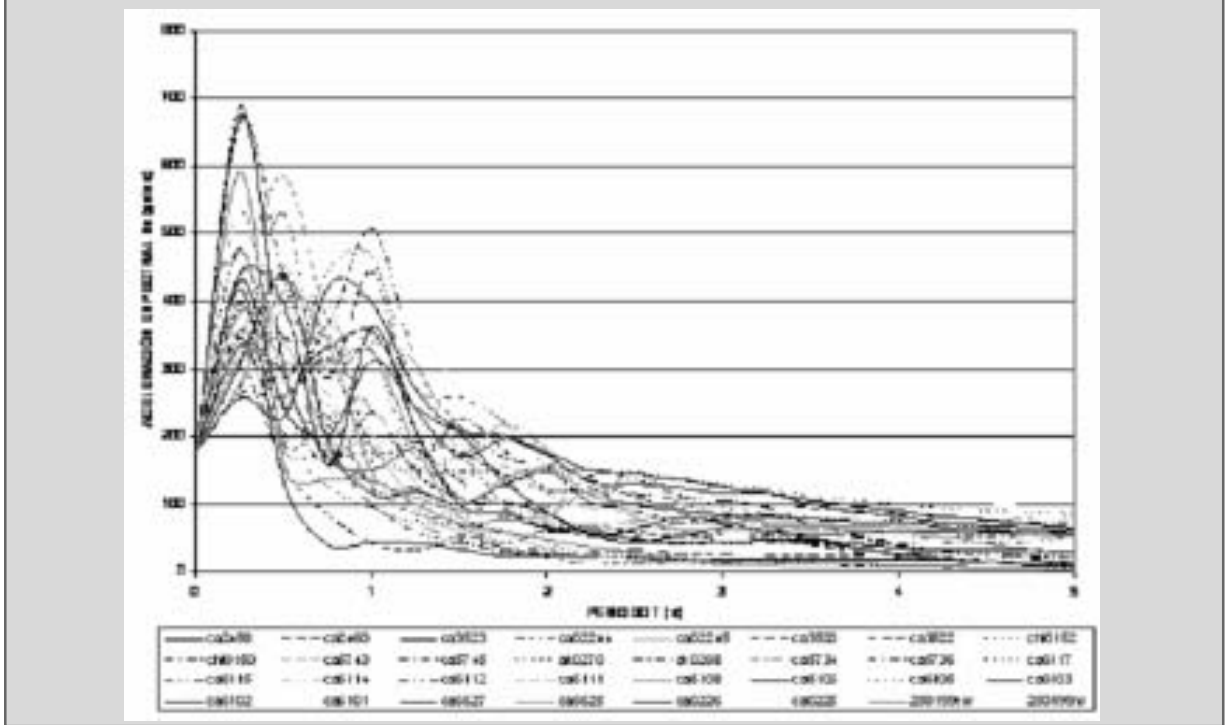
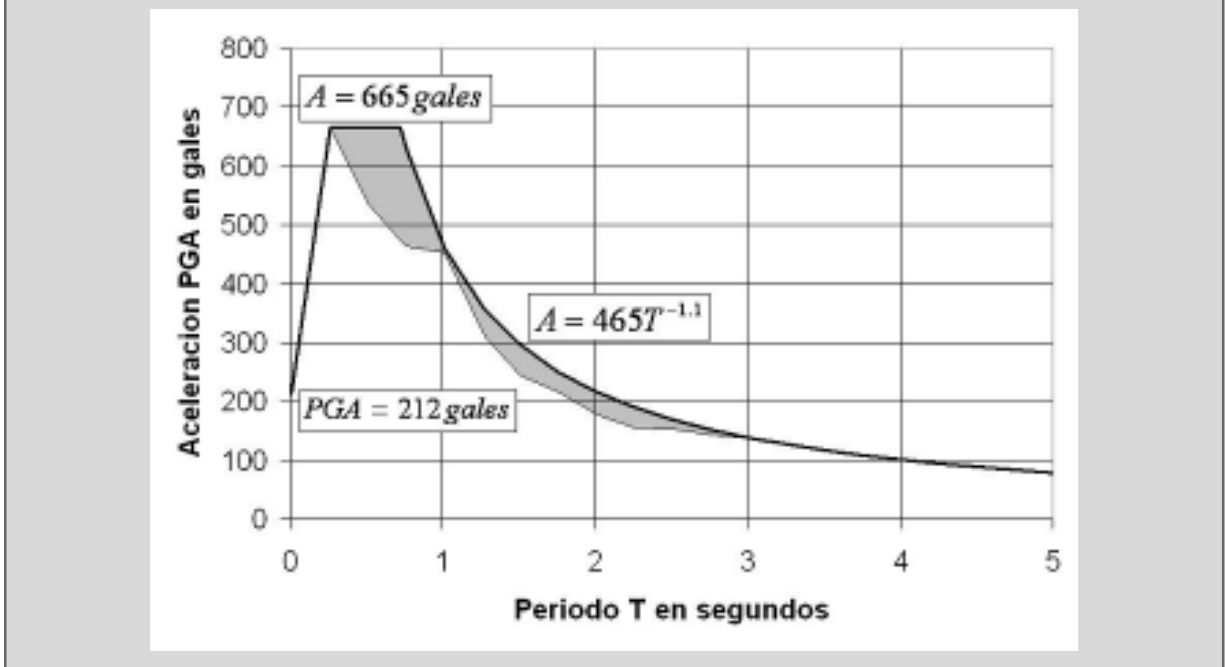


FIGURA 6. ESPECTRO SÍSMICO DE DISEÑO EN ROCA TR = 475 años; LA LÍNEA DELGADA CORRESPONDE AL 90% DE CONFIABILIDAD; LA LÍNEA GRUESA ES LA IDEALIZACIÓN DEL ESPECTRO; LAS ÁREAS GRISAS MUESTRAN LAS ZONAS MÁS CONSERVADORAS EN EL ANÁLISIS.



AGRADECIMIENTOS

Los datos de Harvard (2005) 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).

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, A; Arévalo, N.; García, D.; Caycedo, T. Propuesta de Espectros Sísmicos de Respuesta y Diseño para Basamento Rocoso en el Oriente de Bogotá. *Memorias del I Congreso Latinoamericano y Segundo Colombiano de Sismología*. Armenia. CD-Rom, (2004).
- Alfaro-Arias, C.; Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. «Caracterización en el Dominio de la Frecuencia de Sismos Colombianos.» *Memorias XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia*, Bogotá, (2001).
- Ambraseys, N. y Bommer, J. Prediction of Vertical Response Spectra in Europe. *Earthq. Eng. Struc. Dyn.* 25 4, (1996): 401-412.
- Aptikaev, F. y Kopnichev, J. «Correlation Between Seismic Vibration Parameters and Type of Faulting». *Proc. Seventh World Conf. on Earthq. Eng.* 1. (1980): 107-110.
- Arévalo, N.; Caycedo, T.; Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. «Contenidos Frecuenciales de sismos colombianos registrados en BOCO (Bogotá) y SDV (Santo Domingo, Venezuela) (1994-1996)». *Ingeniería y Universidad* 7 1. (2003): 19-31
- Caneva, A.; Salcedo, E.; Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. «Análisis de la Amenaza Sísmica y de la Magnitud Representativa para Bogotá». *Ingeniería y Universidad* 7 2. (2003): 133-150.
- - -. «Estudio de sismicidad regional para el análisis de la amenaza sísmica de Bogotá». *Ingeniería y Universidad* 8 5. (2004): 9-25.
- Chen, P. y Chen, H. «Scaling law and its applications to earthquake statistical relations». *Tectonophysics* 166. (1989): 53-72.
- Crouse, C. «Ground-Motion Attenuation Equations for Earthquakes on the Cascadia Subduction Zones». *Earthq. Eng.* 32 4. (1991): 193-220.
- Dahle, A.; Bungum, H. y Kvamme, L. «Attenuation Modelling Based on Intraplate Earthquake Recordings». *Proc. Ninth European Conf. Earthq. Eng.* 4A, (1990a): 121-129.
- - -. «Attenuation Models Inferred from Intraplate Earthquake Recordings». *Earthq. Eng. and Structural Dynamics* 19 8, (1990b): 1125-1141.
- - -. *et al.* «New Spectral Strong-Motion Attenuation Models for Central America». *Proc. Fifth International Conf. Seismic Zonation II.* (1995): 1005-1012.
- Donovan, N. «A Statistical Evaluation of Strong-Motion Data Including the February 9, 1971 San Fernando Earthquake». *Proc. Fifth World Conf. Earthq. Eng.* 1. (1973): 1252-1261.
- Douglas, J. *A Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000)*. London: Imperial College of Science, Technology and Medicine, 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.
- Dziewonski, A.; Chou, T. y Woodhouse, J. «Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity». *J. Geophys. Res.* 86. (1981): 2825-2852.
- Esteva, L. «Seismic Risk and Seismic Design». (Hansen, R. J. ed), *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. The M.I.T. Press. (1970):142-182.
- Hanks, T. y Cornell, C. 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. (1994): I/1-1 to I/1-17.
- Harvard <<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/>> [04/2005].
- Instituto Geofísico Universidad Javeriana, *Microzonificación Sísmica del Campus de la Universidad Sede Bogotá*. Bogotá, 2002.
- Joyner, W. y Boore, D. «Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake». *Bull. Seism. Soc. Am* 71 6, (1981): 2011-2038.
- Lobo-Guerrero, A. *Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede - Bogotá*. Estudio Geológico. Bogotá, 2002.
- MacGuire, R. «Seismic Structural Response Risk Analysis, Incorporating Peak Response Regressions on Earthquake Magnitude and Distance». *MIT, Department of Civil Engineering, Research Report R.* (1974): 74-51.
- National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA «Earthquake Strong Motion». *National Geophysical Data Center. Boulder, Colorado, CD-Rom. Vol. 1, 2 and 3*, 1996.
- Takada, T. «Seismic Macro Zonation». *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering. Lectures Notes*. 2005.
- Taylor, W.; Santos, P.; Dahle, A. y Bungum, H. *Digitization of Strong-Motion Data and Estimation of PGA Attenuation. Tech. Rept. 2-4*. NORSAR, 1992.
- USGS Available URL <<http://quake.wr.usgs.gov/beachball.htm>> [10/2005].
- USGS Available URL: <http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_rect.html> [10/2006].
- Wessel, P. y Smith, W. «The Generic Mapping Tools Version 4». Technical Reference and Cookbook. <<http://gmt.soest.hawaii.edu/>> [2004].
- 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.