Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, N.° 95
ISSN 0121-5132 Julio-septiembre de 2014, pp. 37-46

Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente

Seismic characterization of Colombian faults by analogy with geologically and seismically known faults

PAULA MARGARITA HERRERA SUÁREZ[1] - ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO[2]

1. Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ingeniera de Diseño Ingetec S.A.
2. Ingeniero civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Máster en Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Posgrado en Sismología del International Institute on Seismology and Earthquake Engineering. Japón. Investigador del CIEES

paula.herrera@ingetec.com.co - alfaro@ciees.org

Recibido: 12/02/2014 Aceptado: 15/04/2014
Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm

Resumen

Los estudios de amenaza sísmica en Colombia cuentan con vacíos de información debido a dos causas principales: instrumentación sísmica insuficiente en el tiempo y en el espacio, y desconocimiento del comportamiento de las fallas geológicas. Por esta razón, se caracterizaron ciertas fallas que afectan ciudades de Colombia por medio de una analogía geológica y sismológica, con algunas de las fallas geológicas mejor caracterizadas del mundo. Esta analogía se realizó teniendo en cuenta las relaciones empíricas de magnitud-geometría desarrolladas por Wells & Coppersmith (1994), por medio de las cuales puede estimarse la magnitud máxima de un sismo en función de la longitud y el tipo de la falla que lo produce.

Por otro lado, desde el punto de vista sismológico, la estimación de las magnitudes máximas de los sismos producidos por las fallas estudiadas se realizó por medio de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter y las relaciones magnitud-área de Hanks & Bakun (2008), y Ellsworth (2003). De esta manera, las fallas colombianas que se caracterizaron por medio de la analogía son Buesaco, Cimitarra, Cocora, Cucuana, Garrapatas, Irlanda, Oca, Potrerillos, Sibundoy y Vianí; y las fallas bien documentadas utilizadas en esta analogía fueron Shelter Cove, North Coast, Parkfield, Mojave, Borrego Mountain, Coyote Creek, Superstition Hills, Imperial, Emerson, Camp Rock, Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando.

Palabras claves: analogía, amenaza sísmica, Colombia, falla geológica, relación Gutenberg-Richter.

Abstract

Hazard analysis studies in Colombia lack information because of two main causes: insufficient seismological data in both time and space and unknown behavior of geological faults. Because of that, some faults that could affect important cities in Colombia were characterized by geological and seismological analogy with some of the most best characterized faults in the world. This analogy was based on the empirical relations of magnitude-geometry developed by Wells y Coppersmith (1994), which magnitude can be estimated depending on a fault's longitude and type.

From the seismological point of view, the estimation of seismic maximum magnitudes produced by faults was assessed by Gutenberg-Richter recurrence law and Hanks & Bakun (2008), and Ellsworth (2003) magnitude-area relations. In such way, the Colombian faults that were characterized are: Buesaco, Cimitarra, Cocora, Cucuana, Garrapatas, Irlanda, Oca, Potrerillos, Sibundoy and Viani. And the best characterized faults that were used in this analogy are: Shelter Cove, North Coast, Parkfield, Mojave, Borrego Mountain, Coyote Creek, Superstition Hills, Imperial, Emerson, Camp Rock, Owens Valley, Dixie Valley and San Fernando.

Keywords: analogy, seismic hazard, Colombia, quaternary fault, Gutenberg-Richter relation.

INTRODUCCIÓN

La amenaza sísmica de Colombia se encuentra enmarcada por la interacción de cuatro placas: placa de Suramérica, del Caribe, Nazca y Cocos, dicha interacción ha generado un gran número de fallas geológicas de diferente tipo y una zona de subducción; de acuerdo con esta complejidad tectónica, Colombia se encuentra ubicada en una zona sísmicamente activa. A pesar de esto, el estudio de la amenaza sísmica en Colombia tiene muchas incertidumbres por la insuficiencia de equipos de medición (sismógrafos, acelerógrafos, GPS y otros), bases de datos incompletas en cuanto a eventos sísmicos y no suficiente caracterización de las fallas geológicas activas.

El estudio y caracterización de las fallas activas es una herramienta fundamental para la evaluación de la amenaza sísmica. Históricamente, el estudio de las fallas activas comprende publicaciones como *Fallas activas de Colombia* (París & Romero, 1994), *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions* (Paris et al., 2000), *Base de datos de fallas activas de Colombia* (Montes & Sandoval, 2001); también comprende trabajos de neotectónica realizados para microzonificación de ciudades como Popayán (1992), Manizales (1993), Medellín (1994), Bogotá (1996), Bucaramanga (1997) y Pereira (1998). En la realización de proyectos hidroeléctricos de gran magnitud, también se han hecho estudios interesantes e importantes; sin embargo, mucha de esa literatura es gris, con excepción del libro *Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia* (Page, 1986). Pero a pesar de los trabajos anteriormente nombrados, la caracterización de las fallas activas en Colombia aún cuenta con vacíos de información que impiden realizar estudios detallados de amenaza sísmica, lo que repercute directamente en la incertidumbre de evaluaciones de la amenaza símica (Alfaro, 2012).

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar algunas fallas colombianas activas a partir de analogías realizadas con fallas bien conocidas en el extranjero por medio de datos geológicos y sismológicos para complementar los registros de las fallas colombianas (Herrera, 2014).

FALLAS BIEN CARACTERIZADAS

Éstas corresponden a fallas de zonas sísmicamente activas que han sido objeto de estudio mediante sistemas de monitoreo. Las fallas utilizadas en esta investigación son Shelter Cove, North Coast, Parkfield y Mojave, que pertenecen a la Zona de Falla de San Andrés; las fallas Borrego Mountain, Coyote Creek y Superstition Hills, pertenecientes a la Zona de Falla de San Jacinto; la falla Imperial, perteneciente a la Zona de Falla Imperial, las fallas Emerson y Camp Rock, pertenecientes a Estern California Shear Zone (ECSZ); también forman parte de esta investigación las fallas Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando.

FALLAS COLOMBIANAS

Las fallas colombianas analizadas en esta investigación enmarcan la amenaza sísmica de las principales ciudades del país; las fallas utilizadas en la analogía fueron Buesaco (perteneciente al Sistema de Fallas Romeral), Cimitarra, Cocora, Cucuana, Garrapatas, Irlanda, Oca, Potrerillos, Sibundoy (perteneciente al Sistema de Falla Oriental Frontal) y Vianí.

ANALOGÍA

La analogía entre las fallas bien caracterizadas con las fallas colombianas se realizó en dos pasos. El primero fue encontrar fallas colombianas que tuvieran el mismo tipo de movimiento y la misma longitud que las fallas bien caracterizadas; esto debido a que Wells & Coppersmith (1994) señalaron que existe una relación matemática con la cual se puede obtener la magnitud de un sismo en función del tipo y longitud de la falla que lo genere, paso denominado analogía geológica. El segundo paso es la analogía sismológica, que consiste en encontrar la magnitud máxima probable de un sismo para cada una de las fallas estudiadas de conformidad con la ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter o mediante las relaciones de magnitud-área de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003).

Analogía geológica

De acuerdo con las características geológicas de las fallas, tales como el tipo (rumbo, normal e inversa), longitud y buzamiento, se hizo una analogía entre las fallas bien documentadas y fallas colombianas descritas anteriormente. El objetivo era encontrar fallas colombianas que fueran del mismo tipo, tuvieran una longitud asimilar y su buzamiento fuera orientado en

la misma dirección que las fallas bien documentadas. A continuación se resumen los resultados de esta analogía, especificando las características de las fallas colombianas según tres catálogos vigentes (cuadro 1).

Cuadro 1
Analogía geológica entre fallas colombianas y fallas bien documentadas

Parámetro	Falla colombiana			Falla bien documentada (USGS)
	Ingeominas (Montes & Sandoval)	USGS (París)	ISA, Integral, WCC (Page)	
Analogía 1				
Nombre	-	Buesaco	-	Camp Rock
Estado/departamento	-	Nariño	-	California
Tipo	-	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	-	29	-	30
Buzamiento	-	Vertical y W	-	90°
Tasa de movimiento	-	1-5 mm/año	-	0,2 - 1,0 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	5-7 k.y
Sismos asociados año/magnitud	-	1995/6,1	-	1992/7,3
Analogía 2				
Nombre	Cimitarra	Cimitarra	Cimitarra	Dixie Valley
Estado/departamento	Antioquia	Antioquia	Antioquia	Nevada
Tipo	Normal	Inversa - Siniestra	Normal	Normal
Longitud (km)	45	136,7	>50	57
Buzamiento	Este	-	-	30° E a 80° E
Tasa de movimiento	0,01-0,1 mm/año	<0,2 mm/año	-	0,2 - 1,0 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	15-50 ka
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1954/6,8
Analogía 3				
Nombre	Cocora	-	-	Superstition Hills
Estado/departamento	Quindío - Tolima	-	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	-	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	37	-	-	38
Buzamiento	90°	-	-	90°
Tasa de movimiento	0,1-1 mm/año	-	-	1-5 mm/año
Intervalo de recurrencia	1000-20000 años	-	-	250 (+400, –133)
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1951/5,1 1987/6,6
Analogía 4				
Nombre	Cucuana	Cucuana	-	Shelter Cove
Estado/departamento	Tolima	Tolima	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	54	142,1	-	138
Buzamiento	Vertical	Vertical	-	90°
Tasa de movimiento	0,1-1 mm/año	<0,2 mm/año	-	14 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	600-6000 años	-	-
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1906/7,9
Analogía 5				
Nombre	Garrapatas	Garrapatas	Garrapatas	Mojave
Estado/departamento	Chocó	Chocó	Chocó	California
Tipo	Rumbo Diestra	Inversa - Diestra		Rumbo Diestra
Longitud (km)	104	140,7	75	112

Parámetro	Falla colombiana			Falla bien documentada (USGS)
	Ingeominas (Montes & Sandoval)	USGS (París)	ISA, Integral, WCC (Page)	
Buzamiento	-	50° NW	-	90°
Tasa de movimiento	-	<0,2 mm/año	-	16-38 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	100-135 años
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1858/7,7-7,9
Observaciones	Potencialmente activa			
Analogía 6				
Nombre	Irlanda	Irlanda	-	Imperial
Estado/departamento	Cauca - Huila	Cauca - Huila	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	41	54,7	-	46
Buzamiento	Vertical a 82° sureste	90°	-	90°
Tasa de movimiento	-	<0,2 mm/año	-	Más de 5 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	40(+24,–17) años
Sismos asociados año/magnitud	1994/6,4	1994/6,4	-	1940/7,2 1979/6,6
Analogía 7				
Nombre	Irlanda	Irlanda	-	Coyote Creek
Estado/departamento	Cauca - Huila	Cauca - Huila	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	41	54,7	-	44
Buzamiento	Vertical a 82° sureste	90°	-	90°
Tasa de movimiento	-	<0,2 mm/año	-	1-5 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	175 (+158, –95)
Sismos asociados año/magnitud	1994/6,4	1994/6,4	-	1969/5,8
Analogía 8				
Nombre	Oca	Oca	Oca	Shelter Cove
Estado/departamento	La Guajira	La Guajira	La Guajira	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra
Longitud (km)	137	267	250	138
Buzamiento	-	-	-	90°
Tasa de movimiento	0,01-1 mm/año	0,2-1 mm/año	-	14 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	-
Sismos asociados año/magnitud	-	1833/-	-	1906/7,9
Analogía 9				
Nombre	Oca	Oca	Oca	North Coast
Estado/departamento	La Guajira	La Guajira	La Guajira	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra
Longitud (km)	137	267	250	244
Buzamiento	-	-	-	90°
Tasa de movimiento	0,01-1 mm/año	0,2-1 mm/año	-	16 - 25 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	200-400 yr
Sismos asociados año/magnitud	-	1833/-	-	1906 /7,9
Analogía 10				
Nombre	Oca	Oca	Oca	Owens Valley
Estado/departamento	La Guajira	La Guajira	La Guajira	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra
Longitud (km)	137	267	250	118
Buzamiento	-	-	-	80° ± 15° noreste-este

Parámetro	Falla colombiana			Falla bien documentada (USGS)
	Ingeominas (Montes & Sandoval)	USGS (París)	ISA, Integral, WCC (Page)	
Tasa de movimiento	0,01-1 mm/año	0,2-1 mm/año	-	De 1 a 5 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	3,3 a 9,2 k.y
Sismos asociados año/magnitud	-	1833/-	-	1872/7,5
Analogía 11				
Nombre	Potrerillos	-	-	San Fernando
Estado/departamento	Risaralda	-	-	California
Tipo	Inversa -Siniestral	-	-	Inversa -Siniestral
Longitud (km)	23	-	-	23
Buzamiento	70° E	-	-	40° NE
Tasa de movimiento	0,1-1 mm/año	-	-	5 mm/año
Intervalo de recurrencia	1000 a 3000 años	-	-	-
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1971/6,7
Observaciones	Falla potencialmente activa	-	-	
Analogía 12				
Nombre	Sibundoy	Sibundoy	-	Emerson
Estado/departamento	Putumayo - Nariño	Putumayo - Nariño	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	50	58,5	-	61
Buzamiento	Oeste	Vertical, con componente alto al oeste	-	90°
Tasa de movimiento	-	1,0 - 5,0 mm/año	-	0,2 - 1,0 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	7,4-12 k.y
Sismos asociados año/magnitud	1834	1834	-	1992/7,3
Analogía 13				
Nombre	Vianí	Vianí	-	Parkfield
Estado/departamento	Cundinamarca	Cundinamarca	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Inversa Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	36	39,6	-	32
Buzamiento	90°	De bajo a medio hacia el sureste	-	90°
Tasa de movimiento	0,01-0,1 mm/año	0,01-0,1 mm/año	-	Más de 5 mm/año
Intervalo de recurrencia	30000-50000 años	10-100 ky	-	Varía según el tipo de sismo de 22 a 40 años
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1966/6,25 2004/6,0
Observaciones	Potencialmente activa	-	-	-
Analogía 14				
Nombre	Vianí	Vianí	-	Borrego Mountain
Estado/departamento	Cundinamarca	Cundinamarca	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Inversa Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	36	39,6	-	34
Buzamiento	90°	De bajo a medio hacia el sureste	-	80° NE
Tasa de movimiento	0,01-0,1 mm/año	0,01-0,1 mm/año	-	1-5 mm/año
Intervalo de recurrencia	30000-50000 años	10-100 ky	-	175 años
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1968/6,6
Observaciones	Potencialmente activa	-	-	-

Fuente: Herrera, 2014.

Analogía sismológica

Como se indicó anteriormente, la analogía sismológica se realiza teniendo en cuenta la magnitud máxima de un sismo para las fallas estudiadas. El cálculo de la magnitud máxima se puede hacer de dos maneras: para fallas que no se encuentran entrelazadas con otras fallas este valor se calcula por medio de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, mientras que para las fallas que sí están unidas a otras fallas el cálculo de la magnitud máxima probable de un sismo se hace por medio de las relaciones de magnitud-área de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003).

Según esto, sólo para cinco fallas bien documentadas fue posible el uso de la ley de recurrencia Gutenberg-Richter porque su comportamiento era independiente de las fallas vecinas; el resto de las fallas bien documentadas se analizaron por medio de las relaciones magnitud-área. En el caso de las fallas colombianas, todas se analizaron por medio de la ley de recurrencia Gutenberg-Richter porque el parámetro del área de las fallas no se ha definido.

Magnitud máxima de un sismo en el caso de las fallas bien documentadas

a. Mediante la ley de recurrencia Gutenberg-Richter

De conformidad con lo descrito anteriormente, el cálculo de los parámetros de Gutenberg-Richter se realizó sólo para las fallas Imperial, Superstition Hills, Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando, debido que son fallas que no se encuentran unidas a las fallas que las rodean. Es muy importante aclarar que en el cálculo de los parámetros de Gutenberg-Richter realizado por la USGS no se incluyen los sismos con magnitud mayor de 6,5 por ser sismos extemporáneos, lo que llaman método Gutenberg-Richter "truncado". En este caso se mostrarán los parámetros calculados con el método Gutenberg-Richter "original" y con el método "truncado" (cuadro 2).

b. Mediante las relaciones magnitud-área de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003)

Teniendo en cuenta el valor del área de cada una de las fallas estudiadas, se calculó la magnitud máxima de un sismo utilizando las relaciones matemáticas de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003) (cuadro 3). Como se puede apreciar los valores calculados por el USGS coinciden perfectamente con los calculados por el autor.

Magnitud máxima de un sismo en el caso de las fallas colombianas

Debido a que los estudios efectuados a las fallas colombianas no incluyen el valor del área de falla ni los parámetros para calcularlas, el cálculo de la magnitud máxima probable para todas las fallas se realizó por medio de la ley de recurrencia Gutenberg-Richter. Se incluyen los parámetros *a* y *b*, junto con la magnitud máxima, así como las magnitudes máximas calculadas para cada una de las fallas en el Estudio General de Amenaza Sísmica correspondiente a los años 1997 y 2009 (cuadro 4).

Cuadro 2

Magnitud y parámetros de Gutenberg-Richter para las fallas Imperial, Superstition Hills, Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando

Falla	Parámetros Gutenberg - Richter (Herrera, 2014) "Original"			Parámetros Gutenberg - Richter (Herrera, 2014) "Truncado"			Parámetros Gutenberg - Richter (USGS) "Truncado"		
	a	b	M	a	b	M	a	b	M
Imperial	5,32	0,86	6,18	5,95	1,02	5,83	3,03	0,80	3,79
Superstition Hills	3,45	0,55	6,32	4,13	0,72	5,71	2,46	0,80	3,08
Owens Valley	2,75	0,38	7,17	4,68	0,86	5,45	1,86	0,80	2,32
Dixie Valley	1,94	0,31	6,29	6,35	1,49	4,27	2,05	0,80	2,56
San Fernando	1,93	0,30	6,37	5,91	1,39	4,24	2,28	0,80	2,85

a y *b* = parámetros Gutenberg Richter
M = Magnitud.
Fuente: Herrera, 2014

Cuadro 3
Magnitudes de las fallas bien documentadas, calculadas con el método de Ellsworth (2003) y Hanks & Bakun (2002)

Falla	Área (USGS)	Magnitud Ellsworth (USGS)	Magnitud Hanks & Bakun (USGS)	Magnitud Ellsworth (Herrera P.)	Magnitud Hanks y Bakun (Herrera P.)
Shelter Cove	1469,90	7,37	7,29	7,37	7,29
North Coast	2044,40	7,51	7,48	7,51	7,48
Parkfield	78,00	6,09	5,87	6,09	5,87
Mojave	268,00	6,63	6,41	6,63	6,41
Borrego Mountain	403,60	6,81	6,59	6,81	6,59
Coyote Creek	681,50	7,03	6,85	7,03	6,85
Superstition Hills	410,30	6,80	6,60	6,81	6,59
Imperial	607,20	7,00	6,80	6,98	6,78
Emerson	499,68	6,90	6,68	6,90	6,68
Camp Rock	245,74	6,59	6,37	6,59	6,37
Owens Valley	1156,90	7,30	7,20	7,26	7,15
San Fernando	332,60	6,70	6,50	6,72	6,50

La ecuación de Ellsworth utilizada es la B.
Fuente: Herrera, 2014.

Resultado de analogía sismológica

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se muestran los resultados de la analogía sismológica entre fallas colombianas y fallas bien documentadas (cuadro 5).

CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de magnitudes máximas para fallas colombianas y para fallas bien documentadas varían de acuerdo con el número de datos utilizados y con la metodología. La ley de recurrencia de Gutenberg-

Cuadro 4
Parámetros Gutenberg-Richter para fallas colombianas y magnitudes máximas, según Gutenberg-Richter y el Estudio General de Amenaza Sísmica

Falla	Parámetros Gutenberg-Richter (Herrera, 2014)						Estudio General de Amenaza Sísmica (AIS)	
	"Original"			"Truncado"			1997	2009
	a	b	M	a	b	M	M	M
Buesaco	1,38	0,20	6,83	2,05	0,39	5,19	7,60*	7,60*
Cimitarra	2,80	0,49	5,66	NA	NA	NA	6,50	6,50
Cocora	2,77	0,47	5,84	NA	NA	NA	6,50*	6,90*
Cucuana	2,91	0,45	6,41	NA	NA	NA	-	-
Garrapatas	4,61	0,76	6,10	NA	NA	NA	6,50	6,50
Irlanda	2,61	0,40	6,44	4,19	0,79	5,30	-	-
Oca	-	-	-	-	-	-	7,40	6,50
Potrerillos	2,41	0,48	5,04	NA	NA	NA	-	-
Sibundoy	-	-	-	-	-	-	8,00*	8,00*
Vianí	2,99	0,59	5,03	NA	NA	NA	-	-

a y *b* = parámetros Gutenberg-Richter.

M = magnitud máxima.

*El Estudio General de Amenaza Sísmica de los años 1997 y 2009 no asigna una magnitud máxima para estas fallas específicamente. Para la falla de Buesaco se toma un valor de 7,60 debido a que este estudio indica ese valor para todas las fallas pertenecientes al sistema de Romeral; lo mismo ocurre con el valor de 8 para la falla de Sibundoy, que pertenece al Sistema de falla Oriental Frontal. Para la falla de Cocora se toma el valor de la falla de Ibagué, debido a que el Estudio General de Amenaza Sísmica considera la falla de Cocora como una extensión de la falla de Ibagué.

Fuente: Herrera, 2014.

Richter es la metodología que arroja las magnitudes más bajas y la relación magnitud-área de Ellsworth es la que arroja los resultados más altos en todos los casos.

Así mismo, de cada una de las analogías se puede indicar lo siguiente:

- *Analogía entre la falla Buesaco (colombiana) y la falla Camp Rock*. En este caso, la magnitud máxima obtenida para la falla de Buesaco por el método Gutenberg-Richter "original" (6,83) y la señalada en el Estudio General de Amenaza Sísmica (7,60) son mayores que la magnitud máxima encontrada para la falla Camp Rock (6,59).
- *Analogía entre la falla Cimitarra (colombiana) y la falla Dixie Valley*. La magnitud máxima calculada para la falla Dixie Valley es de 6,29, superior a la magnitud encontrada para la falla Cimitarra por medio del método Gutenberg-Richter "original" (5,66), pero inferior a la dada por el Estudio General de Amenaza Sísmica (6,90).
- *Analogía entre la falla Cocora (colombiana) y la falla Superstition Hills*. En este caso, la magnitud obtenida por la metodología Gutenberg-Richter "original" para la falla Cocora es inferior a la obtenida por la misma metodología para la falla Superstition Hills. Igualmente, el mayor valor de la magnitud máxima calculado para la falla Superstition Hills es de 6,81, similar pero inferior al propuesto por el Estudio General de Amenaza Sísmica del año 2009 para la falla Cocora.
- *Analogía entre la falla Cucuana (colombiana) y la falla Shelter Cove*. El valor obtenido de magnitud máxima para la falla Cucuana de 6,41 es muy inferior a los obtenidos para la falla Shelter Cove por los métodos

Cuadro 5

Resultados de analogía sismológica entre fallas colombianas y fallas bien documentadas

	MAGNITUDES FALLAS COLOMBIANAS				MAGNITUDES FALLAS BIEN DOCUMENTADAS				
Analogía	GR "Original" (Herrera, 2014)	GR "Truncado" (Herrera, 2014)	EGAS 1997	EGAS 2009	GR "Original" (Herrera, 2014)	GR "Truncado" (Herrera, 2014)	GR "Truncado" (USGS)	Ellsworth (Herrera P.)	Hanks & Bakun (Herrera P.)
1	Falla Buesaco				Falla Camp Rock				
	6,83	5,19	7,60	7,60	-	-	-	6,59	6,37
2	Falla Cimitarra				Falla Dixie Valley				
	5,66	NA	6,50	6,50	6,29	4,27	2,56	-	-
3	Falla Cocora				Falla Superstition Hills				
	5,84	NA	6,50	6,90	6,32	5,71	3,08	6,81	6,59
4	Falla Cucuana				Falla Shelter Cove				
	6,41	NA	-	-	-	-	-	7,37	7,29
5	Falla Garrapatas				Falla Mojave				
	6,10	NA	6,50	6,50	-	-	-	6,63	6,41
6	Falla Irlanda				Falla Imperial				
	6,44	5,30	-	-	6,18	5,83	3,79	6,98	6,78
7	Falla Irlanda				Falla Coyote Creek				
	6,44	5,30	-	-	-	-	-	7,03	6,85
8	Falla de Oca				Falla Shelter Cove				
	-	-	7,40	6,50	-	-	-	7,37	7,29
9	Falla de Oca				Falla North Coast				
	-	-	7,40	6,50	-	-	-	7,51	7,48
10	Falla de Oca				Owens Valley				
	-	-	7,40	6,50	7,17	5,45	2,32	7,26	7,15
11	Falla Potrerillos				Falla San Fernando				
	5,04	NA	-	-	6,37	4,24	2,85	6,72	6,5
12	Falla Sibundoy				Falla Emerson				
	-	-	8,00	8,00	-	-	-	6,90	6,68
13	Falla Vianí				Falla Parkfield				
	5,03	NA	-	-	-	-	-	6,09	5,87
14	Falla Vianí				Falla Borrego Mountain				
	5,03	NA	-	-	-	-	-	6,81	6,59

GR= Gutenberg-Richter. EGAS=Estudio General de Amenaza Sísmica.
Fuente: Herrera, 2014.

de Ellsworth y Hanks & Bakun, que fueron 7,37 y 7,29, respectivamente.

- *Analogía entre la falla Garrapatas (colombiana) y la falla Mojave*. Las magnitudes máximas de la falla Garrapatas (6,10 y 6,50) tienen un valor similar a las magnitudes máximas calculadas para la falla Mojave, pero son inferiores a éstas, calculadas por medio de la relación de Ellsworth (6,63) y Hanks & Bakun (6,41).
- *Analogía entre la falla Irlanda y las fallas Imperial y Coyote Creek*. Entre las magnitudes obtenidas para las fallas Imperial y Coyote Creek, las más críticas en relación con las magnitudes máximas de la falla Irlanda son las magnitudes de la falla Coyote Creek (7,03 calculada por Ellsworth y 6,85 calculada por Hanks & Bakun), pues los valores son mayores que los de la falla Imperial (6,98 calculada por Ellsworth y 6,78 calculada por Hanks & Bakun) y también de la falla Irlanda (6,44 calculada por Gutenberg-Richter "Original" y 5,30 calculada por Gutenberg-Richter "Truncado").
- *Analogía entre la falla Oca y las fallas Shelter Cove, North Coast y Owens Valley*. En este caso, la magnitud máxima dada en el Estudio General de Amenaza Sísmica en Colombia del año 1997 (M=7,40) es muy similar a las magnitudes máximas obtenidas para las fallas Shelter Cove, North Coast y Owens Valley. Sin embargo, la magnitud de 7,51 obtenida por el método de Ellsworth es la más crítica de las magnitudes calculadas para las fallas bien documentadas.
- *Analogía entre la falla Potrerillos (colombiana) y la falla San Fernando*. La magnitud máxima para la falla colombiana es de 5,04 y fue calculada por el método Gutenberg-Richter "original". Esta magnitud discrepa bastante del valor de la magnitud máxima calculada por la relación de Ellsworth para la falla San Fernando, que tiene un valor de 6,72.
- *Analogía entre la falla Sibundoy (colombiana) y la falla Emerson*. La magnitud máxima de la falla Emerson es 6,90, menor que la propuesta por el Estudio General de Amenaza Sísmica, que tiene un valor de 8,0.
- *Analogía entre la falla Vianí (colombiana) y las fallas Parkfield y Borrego Mountain*. La magnitud máxima calculada para la falla Borrego Mountain por medio de la relación de Ellsworth (6,81) es mayor que las magnitudes máximas calculadas de la falla Parkfield (6,09 calculada por Ellsworth) y la falla Vianí (5,03 calculada por Gutenberg-Richter "Original").

De acuerdo con los resultados obtenidos de la analogía, se recomienda que para las fallas colombianas estudiadas se utilicen los valores más altos de las magnitudes máximas (cuadro 6). Es importante tener en cuenta que no se han asociado sismos de las magnitudes descritas a fallas colombianas, por lo que se corre el riesgo de sobre estimar la magnitud máxima de cada falla.

Cuadro 6
Magnitudes máximas recomendadas para fallas colombianas estudiadas

Falla colombiana	M	Fuente
Buesaco	7,60	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Cimitarra	6,50	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Cocora	6,90	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Cucuana	7,37	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Shelter Cove)
Garrapatas	6,63	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Mojave)
Irlanda	7,03	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Coyote Creek)
Oca	7,51	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla North Coast)
Potrerillos	6,72	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla San Fernando)
Sibundoy	8,00	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Vianí	6,81	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Borrego Mountain)

M= magnitud máxima recomendada.
Fuente: Herrera, 2014.

REFERENCIAS

Alfaro, A. (2012). Difficulties on PSHA in Colombia Because of Data Scarcity. *Bulletin of IISEE*, N.º 46, pp. 145-152.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá, 252 pp.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá, 220 pp.

Burford, R. (1972). Continued Slip on the Coyote Creek Fault after the Borrego Mountain Earthquake. *Geological Survey Professional Paper*, 787, pp. 105-111.

Ellsworth, W. (2003). Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002–2031. Chapter 4 -The SFBR Earthquake Source Model: Magnitude and Long Term Rates and Appendix D of the 2002 Working Group on California Earthquake Probabilities. Open-File Report 03-214.

Gutenberg, B. & Richter, C. (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bull. Seism. Soc .Am*., vol. 32, 163-191.

Gutenberg, B. & Richter, C. (1956). Magnitude and Energy of Earthquake. *Ann. Geofis*, 1-15.

Hamilton, R. (1972). Aftershocks of Borrego Mountain Earthquake from April 12 to June 12, 1968. *Geological Survey Professional Paper*, 787, pp. 31-54.

Hanks, T. C. & Bakun, W.H. (2002). A bilinear source-scaling model for M-log A observations of continental earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer*, vol. 92, 1841-1846.

Hanks, T. C. & Bakun, W.H. (2008). M-log A observations for recent large earthquakes, doi: 10.1785/0120070174. *Bulletin of the Seismological Society of America*, February, vol. 98, N.º 1, 490-494.

Herrera, P. (2014). Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente. Tesis de maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, pp. 18-138.

Langbein, J. (2006). Coseismic and Initial Postseismic Deformation from the 2004 Parkfield, California, Earthquake. Observed by Global Positioning System, Electronic Distance Meter, Creepmeters, and Borehole Strainmeters Era. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 96, N.º 4B, pp. 304-320.

Montes, N. & Sandoval, A. (2001). Base de datos de fallas activas de Colombia. Bogotá: Ingeominas, pp. 9-28.

National Geophysical Data Center (2013). <http://ngdc.noaa.gov/>

Page, W.D. (1986). Geología Sísmica y Sismicidad del Noroeste de Colombia. Seismic geology and seismicity of Northwestern Colombia: San Francisco, California, Woodward-Clyde Consultants Report for ISA and Integral Ltda, 200 p

París, G. & Romero, J. (1993). Fallas activas de Colombia. *Boletín Geológico*, N.º 34. Bogotá: Ingeominas, pp. 25.

París, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. USGS.

Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Servicio Nacional de Geología y Minería (2009). *Atlas de Deformaciones Cuaternarias de los Andes*. Publicación geológica multinacional, pp. 244-250.

Sharp, R. (1972). Tectonic Setting of the Salton Trough. *Geological Survey Professional Paper*, 787, pp. 3-15.

Stirling, M., Rhoades, D. & Berryman, K. (2002). Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era. *Bull. Seism. Soc. Am*., vol. 92, N.º 2, pp. 812-830.

USGS (2013). Global Earthquake Search. <www.earthquake.usgs.gov>.

Wells, L. & Coppersmith, K. (1994). New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, N.º 4, pp 974-1002.

Yeats, R.S., Sieh, K. & Allen, C.R. (1997). *Geology of earthquakes*, Oxford University Press, 568 pp.