

RELACIONES EMPÍRICAS ENTRE PARÁMETROS INSTRUMENTALES Y MACROSÍSMICOS DE ALGUNOS TERREMOTOS FUERTES DE COLOMBIA

Juan Pablo Marín Arias¹; Elkin de Jesús Salcedo Hurtado²; Hardany Castillo González¹.

RESUMEN

Con el fin de establecer relaciones entre parámetros macrosísmicos e instrumentales, se estudió el campo macrosísmico de 28 sismos históricos que produjeron grandes efectos en el territorio colombiano. La integración de los parámetros se realizó a través de la metodología de Kaussel y Ramírez (1992), para grandes sismos chilenos; Kanamori y Anderson (1975) y Coppersmith y Well (1994) para sismos mundiales. Una vez determinados los parámetros macrosísmicos e instrumentales se procedió a establecer el modelo de la fuente de cada sismo, con lo cual se completó la base de datos de dichos parámetros. Para cada sismo se complementaron parámetros relacionados con el epicentro macrosísmico local y normal, profundidad del foco local y normal, extensión horizontal de ambos focos, extensión vertical del foco normal, modelo de la fuente, área de ruptura. Las relaciones empíricas obtenidas a partir de ecuaciones lineales, muestran comportamientos muy similares a los encontrados por otros autores para otras regiones del mundo e incluso a nivel mundial. Los resultados de este trabajo permiten establecer que existe cierta incompatibilidad entre el área de ruptura y la longitud de ruptura, determinadas por los métodos macrosísmicos, con aquellos parámetros encontrados con datos instrumentales como momento sísmico, magnitud Ms y magnitud Mw.

Palabras Clave: Relaciones empíricas, terremotos, campo macrosísmico, magnitud, Colombia.

EMPIRICAL RELATIONS BETWEEN INSTRUMENTAL PARAMETERS AND MACROSEISMIC OF SOME STRONG EARTHQUAKES OF COLOMBIA

ABSTRACT

In order to establish the relationships between macroseismic and instrumental parameters, macroseismic field of 28 historical earthquakes that produced great effects in the Colombian territory were studied. The integration of the parameters was made by using the methodology of Kaussel and Ramirez (1992), for great Chilean earthquakes; Kanamori and Anderson (1975) and Coppersmith and Well (1994) for world-wide earthquakes. Once determined the macroseismic and instrumental parameters it was come to establish the model of the source of each earthquake, with which the data base of these parameters was completed. For each earthquake parameters related to the local and normal macroseismic epicenter were complemented, depth of the local and normal center, horizontal extension of both centers, vertical extension of the normal center, model of the source, area of rupture. The obtained empirical relations from linear equations, even show behaviors very similar to the found ones by other authors for other regions of the world and to world-wide level. The results of this work allow establishing that certain mutual non compatibility exists between the area of rupture and the length of rupture determined by the macroseismic methods, with parameters found with instrumental data like seismic moment, Ms magnitude and Mw magnitude.

Keywords: Empirical relations, earthquakes, macroseismic field, magnitude, Colombia.

¹Depto Ciencias Geológicas. U. de Caldas. A. A. 275. Manizales. jupamarin@yahoo.com, hardanyc@yahoo.com

²Depto Geografía. Universidad del Valle. A. A. 25360. Cali. elsalced@mafalda.univalle.edu.co

INTRODUCCIÓN

Para la estimación del riesgo sísmico a menudo es necesario establecer el tamaño de los sismos más grandes que pueden ser generados por una fuente sísmica. Así, el potencial de una falla es evaluado a partir de sus parámetros de ruptura como la longitud y el desplazamiento, que a su vez son relacionados con la magnitud del sismo (Wells y Coppersmith, 1994).

De la misma forma, los estudios paleosísmicos y geológicos en fallas activas que se centran en la estimación de las características de las fuentes pueden ser usadas para evaluar la regularidad de sismos históricos, la cantidad de desplazamiento por evento y la segmentación de la zona de falla. En la actualidad se conocen numerosas relaciones empíricas que relacionan la magnitud con diversos parámetros de fallas; se encuentra que la magnitud está relacionada con la longitud en la superficie, otras presentan la relación entre desplazamiento con longitud de ruptura o la magnitud con la longitud total de la falla (Tacher, 1958, Lida, 1959; Albee y Smith, 1966; Chinney, 1969; Ohnoka, 1978; Slemmons, 1989; en Wells y Coppersmith, 1994); y más recientemente, Wells y Coppersmith, 1994).

También han sido publicadas relaciones de la magnitud con los parámetros del momento sísmico (longitud de ruptura, ancho de ruptura y área de ruptura), estimados a partir de la extensión de la deformación en superficie, dimensiones de la zona de réplicas o funciones de tiempo de la fuente del sismo (Utsu y Seki, 1954; Utsu, 1969; Kanamori y Anderson, 1975; Wyss, 1979; Wesnousky, 1986; en Wells y Coppersmith, 1994).

En términos generales, la determinación de estas relaciones tiene como objeto principal aportar la mayor cantidad de datos para mejorar la información de los catálogos sísmicos necesarios para los estudios de evaluación de la amenaza y el riesgo sísmicos.

El presente trabajo muestra una primera aproximación para la determinación de relaciones empíricas entre parámetros macrosísmicos, que representan la ruptura de la fuente sísmica de algunos terremotos históricos ocurridos en el territorio colombiano, para los cuales existe mapa de isostasias, y la magnitud y el momento sísmico por cada evento. Para esto se han escogido sismos históricos e instrumentales ocurridos en el periodo entre 1827 y 1999, a partir de los cuales se obtuvieron los parámetros macrosísmicos siguiendo la metodología propuesta por Shebalin (1974) y reformulada por Bottari et al. (1979).

CONTEXTO TECTÓNICO Y SISMOLÓGICO

El territorio colombiano, geográficamente ubicado en la esquina noroccidental del continente suramericano, representa un ambiente tectónico complejo, donde los procesos y el régimen sísmico son producto simultáneamente de la actividad que presentan los diferentes sistemas de fallas y de la dinámica de convergencia de las placas litosféricas de Nazca, Caribe y Suramericana (FIGURA 1), que convergen en direcciones y velocidades diferentes, según ha sido establecido por los resultados por geodesia satelital a través del Proyecto CASA (Mora, H. y Trenkamp, R., comunicación escrita).

Debido a la complejidad que se presenta en este lugar, en el país ocurre una alta tasa de sismicidad con bajo periodo de recurrencia de sismos fuertes, de tal manera que casi alternamente se activan diversas fuentes sismogénicas, logrando poner en riesgo gran parte de la población. Las zonas de mayor actividad sísmica en Colombia están localizadas en la región de los Andes donde también se concentra más del 70% de la población (FIGURA 2).

Se aprecian concentraciones específicas en la parte continental del país, como en la región del eje Cafetero, donde ocurrió el

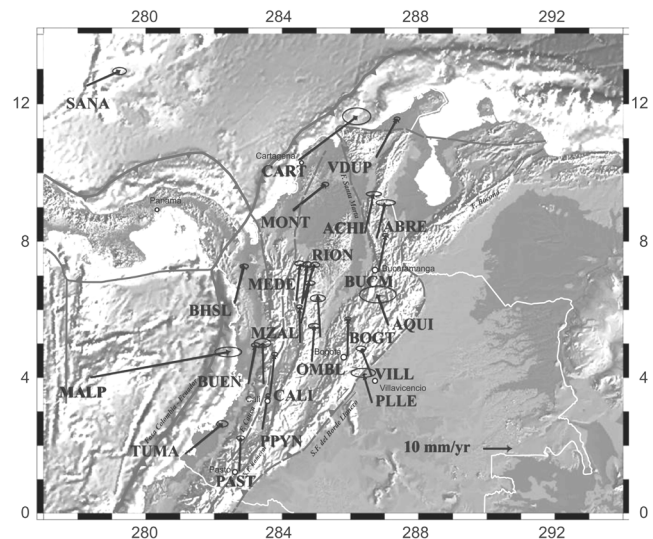


FIGURA 1. Marco tectónico regional de Colombia. (Adaptada de Mora, H. y Trenkamp, R., comunicación escrita).

terremoto del 25 de enero de 1999, que devastó gran parte de la ciudad de Armenia y poblaciones vecinas; en la parte norte del departamento del Chocó, zona de Murindó, en donde tuvieron lugar los terremotos del 17 y 18 de Octubre de 1992, que destruyó la población de Murindó y causó muchas pérdidas en la zona del Urabá chocoano y antioqueño; y en el “nido” de Bucaramanga, donde la ocurrencia de sismos se da en un pequeño volumen a profundidades intermedias, sin que hasta ahora se haya reportado un evento sísmico de grandes

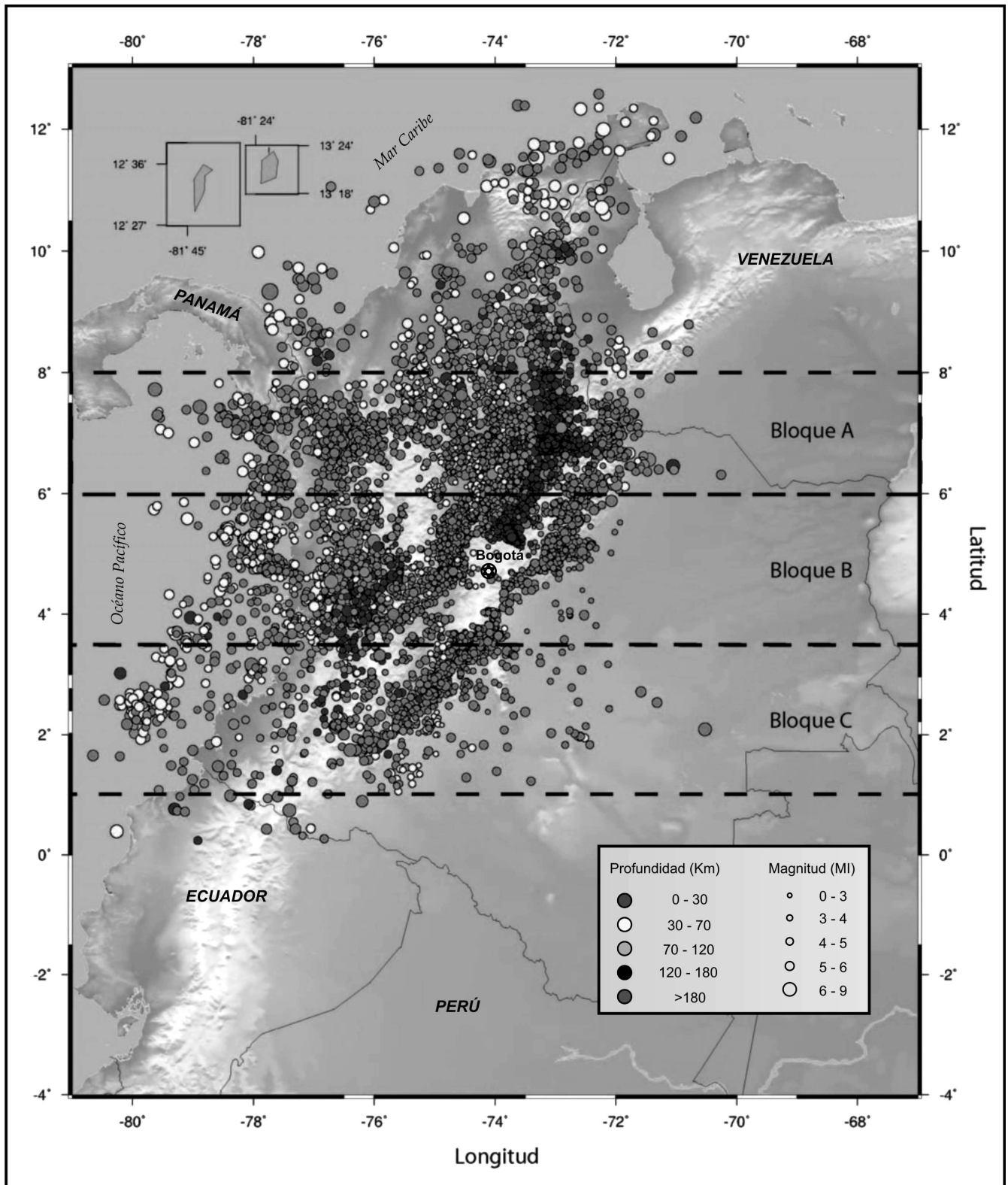


FIGURA 2. Sismicidad registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia - RSNC durante el periodo 2001 - 2005.

consecuencias para la región. También es bastante notable la concentración de epicentros a lo largo del sistema de fallas del Borde Llanero, que atraviesa el territorio colombiano en dirección suroeste-noreste, continuando luego hasta la vecina República Bolivariana de Venezuela.

En la parte oceánica se aprecian tres especiales concentraciones de epicentros: la primera, en la parte sur, en el departamento de Nariño, donde han ocurrido los sismos de subducción más fuertes del país, como el de 1906, 1958 y 1979. La segunda a la latitud entre 5.5° y 6.5°, en inmediaciones del departamento de Chocó, donde el sismo más característico puede ser el del 26 de septiembre de 1970, que causó graves daños en las Poblaciones Bahía Solano y el Valle – Chocó. En tercer lugar, se tiene la zona fronteriza entre Colombia y Panamá, que ha sido escenario de continuos eventos sísmicos fuertes que, por las características topográficas y geográficas de la zona que la hace poco habitada, no han dejado grandes pérdidas.

RECOLECCIÓN Y SELECCIÓN DE DATOS

La historia sismológica del país es relacionada por Ramírez (1975) a partir del año 1566, con un evento que sacudió las ciudades de Cali y Popayán. Aunque son muchos los terremotos fuertes que desde entonces hasta la actualidad han tenido lugar en el territorio colombiano, podemos decir que no existe la información abundante y suficiente para lograr establecer relaciones de frecuencia confiables para cada una de las principales regiones sismoactivas del país; así como tampoco se tiene la certeza de la completitud de los catálogos y de los parámetros de fuentes tanto para sismos históricos como instrumentales.

La búsqueda exhaustiva de terremotos históricos y recientes ocurridos en el territorio colombiano y que tengan información instrumental y macrosísmica completa revela un número muy escaso de eventos cuyos hipocentros han estado localizados tanto en regiones sismoactivas continentales u oceánicas. Con estas características hemos logrado identificar 33 eventos entre el periodo entre 1827 y 1999. Estos eventos se encuentran listados en la TABLA 1, y la ubicación geográfica de sus respectivos epicentros se muestra en la FIGURA 3.

Algunos de los terremotos fuertes (TABLA 1) que por los efectos causados tienden a ser los más recordados en la historia sismológica nacional son el de 1926 en Tumaco, catalogado como uno de los que mayor energía sísmica ha liberado en todo el globo terráqueo; el de Arboleda en 1950; los ocurridos el 23 de noviembre y 12 de diciembre de 1979 en el Eje Cafetero y Tumaco, respectivamente; el de Popayán en 1983; los de Murindó ocurridos el 17 y 18 de octubre de 1992; el de Páez en 1994; el de Tauramena y la Zulia en 1995, y más recientemente el de Armenia ocurrido en 1999. Cabe

mencionar que crónicas y relatos históricos registran sismos fuertes en Colombia desde el siglo XVI (FIGURA 3).

Con excepción del sismo de Armenia de 1999, la mayoría de los terremotos históricos localizados en Colombia no han tenido, por parte de las redes sismológicas nacionales, una determinación confiable de sus parámetros focales debido, en primer lugar, a la ausencia de una densa red con la suficiente cobertura para abarcar los diversos puntos geográficos indispensables para registrar las diferentes fases de las ondas sísmicas; en segundo lugar, por la poca fidelidad de la instrumentación existente en la época de ocurrencia de los eventos.

En este contexto, es necesario como alternativa de estudio la complementariedad de los métodos y datos instrumentales y macrosísmicos de tal manera que se establezcan relaciones empíricas de calibración para determinar los parámetros focales que caracterizan cada uno de los eventos y la sismicidad de la región, lo cual contribuye significativamente a la mejor interpretación y solución del problema de la amenaza y el riesgo sísmico.

Para este estudio, los datos instrumentales fueron extraídos de los catálogos de la Red Sismológica Nacional de Colombia, de CERESIS y de los reportes de la Red Sismológica Mundial, dados por NEIC y el USGS. Para algunos sismos se encontró información adicional reportada en la literatura, relacionada con parámetros de la falla, tales como área de ruptura, longitud de ruptura y desplazamiento; esta información se complementa con sus correspondientes datos instrumentales de M_b , M_s , M_o y M_w (TABLA 2).

Los datos macrosísmicos utilizados fueron obtenidos a partir del análisis y procesamiento de los mapas de isosistas de terremotos fuertes de Colombia previamente elaborados por diferentes autores. Los parámetros macrosísmicos se obtuvieron siguiendo la metodología propuesta por Shebalin (1974) y reformulada por Bottari et al. (1979). (TABLA 3).

Para la obtención de las relaciones empíricas entre parámetros macrosísmicos e instrumentales se estudió el campo macrosísmico de 28 sismos históricos que produjeron grandes efectos en el territorio colombiano y que están descritos en la TABLA 2. La integración de los parámetros se realizó a través de la metodología propuesta por Kanamori & Anderson (1975) y utilizada por Kaussel & Ramírez (1992) para grandes sismos chilenos; y por Coppersmith & Well (1994) para sismos mundiales.

TABLA 1. Terremotos históricos y recientes ocurridos en Colombia, para los cuales existen mapas de isosistas. También se muestran algunos datos instrumentales de los mismos, magnitudes Ms y Mb.

No	Año	Mes	Día	Hora	Min	Seg	Lat	Long	Ms	Mb	UBICACION	FUENTE
1	1827	11	11	22	45	0	1.80	-76.40	7.0	6.2	Andaquiez-Caquetá	ESPINOSA, A.
2	1875	5	18	16	15	0	7.90	-72.50	7.3	6.3	Cúcuta-N. Santander	RAMIREZ J.
3	1894	4	29	2	45	0	8.50	-71.70	*	6.2	Santa Cruz-Venezuela	FIEDLER G.
4	1906	1	31	15	36	0	1.00	-81.50	*	7.4	Océano Pacífico	ESPINOSA, A.
5	1917	8	31	11	36	18	4.00	-74.00	7.3	6.3	Acacias-Meta	ESPINOSA, A.
6	1932	3	14	22	42	56.4	8.30	-71.90	*	6.1	Táchira-Venezuela	FIEDLER G.
7	1942	12	26	*	*	*	9.15	-75.80	*	5.9		WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS
8	1938	2	5	2	23	34	5.10	-75.50	7.0	6.2	Pueblo Nuevo-Córdoba	RAMIREZ J.
9	1947	7	14	6	59	28	1.40	-77.00	5.5	5.5	Pasto-Nariño	RAMIREZ J.
10	1950	7	9	2	35	34.6	7.90	-72.60	7.0	6.2	Arboleda-N. Santander	RAMIREZ J.
11	1957	4	21	21	12	26	6.90	-72.30	6.6	6.6	Guican-Boyacá	SARRIA A.
12	1961	6	16	10	31	56.2	8.90	-73.40	6.1	6.2	Culebrita-N. Santander	SARRIA A.
13	1961	12	20	13	25	34	4.60	-75.60	6.5	6.9	Armenia, Calarcá-Quindío	SARRIA A.
14	1962	7	30	20	18	52.3	5.20	-76.40	6.7	6.9	Tadó-Chocó	SARRIA A.
15	1967	2	9	15	24	45.3	2.93	-74.83	6.7	6.3	Vega Larga-Huila	SARRIA A.
16	1967	3	21	18	11	43.3	6.81	-73.04	*	5.5	SE Bucaramanga-Santander	SARRIA A.
17	1967	7	29	10	24	24.6	6.84	-73.09	*	6.2	S. Umpalá-Santander	SARRIA A.
18	1968	5	7	9	0	29	6.82	-73.01	*	5.7	Aratoca-Santander	SARRIA A.
19	1973	8	30	18	25	42.4	7.24	-72.90	*	5.7	Pamplona-N. Santander	SARRIA A.
20	1973	4	3	13	54	1	4.70	-75.70	*	6.2	Venadillo-Tolima	SARRIA A.
21	1977	8	31	0	42	5.2	7.40	-76.21	6.4	5.7	Mutatá-Antioquia	SARRIA A.
22	1979	11	23	23	40	29.7	4.81	-76.20	6.7	6.4	Snía. Los paraguas	SARRIA A.
23	1979	12	12	*	*	*	2.80	-78.58	*	6.4	Océano Pacífico-W Nariño	SARRIA A.
24	1980	11	26	17	35	39.1	8.00	-72.40	4.7	5.0	Ricaurte-N. Santander	SARRIA A.
25	1981	10	18	4	31	1.2	8.20	-72.50	5.4	5.4	Puerto Lleras	MALAYER A.
26	1981	10	17	*	*	*	7.95	-72.44	*	5.5		SARRIA A.
27	1983	3	31	13	12	51	2.50	-76.70	4.9	5.5	Popayán-Cauca	INGEOMINAS
28	1992	10	18	15	11	59.7	7.10	-76.80	7.4	6.6	Murindó	SALCEDO E.
29	1993	7	21	4	57	7.05	6.47	-71.21	5.9	6.1	Pto. Rondón-Arauca	INGEOMINAS
30	1994	6	6	20	47	39.9	2.90	-76.10	6.6	6.4	Páez-Cauca	INGEOMINAS
31	1995	1	19	15	5	4.3	5.00	-72.90	6.6	6.4	Tauramena-Casanare	INGEOMINAS
32	1995	1	19	*	*	*	*	*	*	6.4		INGEOMINAS
33	1999	1	25	18	19		4.41	-75.72	5.4	5.9	Armenia-Quindío	INGEOMINAS

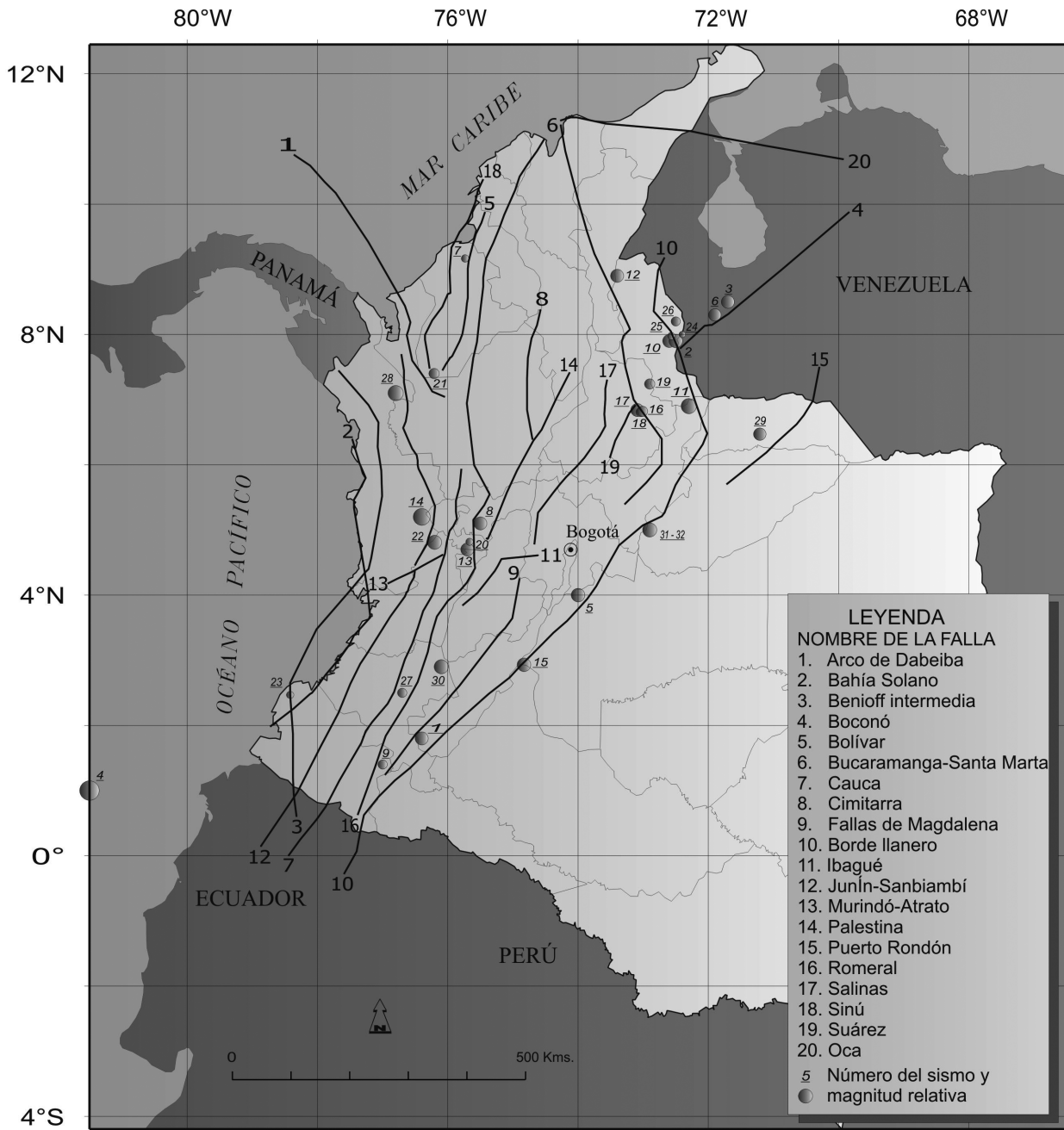


FIGURA 3. Ubicación de las principales fallas del territorio colombiano y localización epicentral de cada uno de los sismos con mapa de isosistas. Los números pequeños indican el número del sismo. Nombre de Fallas: 1-Arco de Dabeiba, 2-Bahía Solano, 3-Benioff intermedia, 4-Boconó, 5-Bolívar, 6-Bucaramanga-Santa Marta, 7-Cauca, 8-Cimitarra, 9-Fallas de Magdalena, 10-Borde llanero, 11-Ibagué, 12-Junín-Sanbiambi, 13-Murindó-Atrato, 14-Palestina, 15-Puerto Rondón, 16-Romeral, 17-Salinas, 18-Sinú, 19-Suárez, 20-Oca. (Modificado de Marin, 1999).

TABLA 2. Parámetros de fuente para 8 sismos ocurridos en el territorio colombiano.

AÑO	MES	DIA	HORA	MIN	SEG	S (Km²)	L (Km)	D (m)	Mb	Ms	Mo (D-cm)	Mw	Mw*
1906	1	31	15	36	0	1,14E+05	-	5,2	-	8,7	2,00E+29	8,8	-
1942	-	-	-	-	-	7,10E+03	-	1,3	-	7,9	3,20E+27	-	7,6*
1958	-	-	-	-	-	6,60E+03	-	2,3	-	7,8	5,20E+27	-	7,74*
1979	-	-	-	-	-	2,80E+05	-	2,7	-	7,7	2,90E+28	-	8,24*
1983	3	31	13	12	51	25	1,3	46,66**	5,5	4,9	3,50E+24	-	5,63*
1994	6	6	20	47	39,9	400(1)	40	3,91**	6,4	6,6	4,70E+19	6,7	7,05*
1995	1	19	15	5	4,3	400 (2)	-	73**	6,4	6,6	8,80E+18	6,7	6,6*
1999	1	25	18	9	19	-	-	-	5,9	5,4	1,80E+25	6,2	6,106*

* son datos calculados con $\log Mo = 1,5Mw + 16,1$ $Mw = 2/3 \log Mo - 10,73$

** son datos en cm calculados usando la expresión $Mo = SDG(Din \cdot cm)$ con $G = 3e16 \text{ ton/m}^2$ $G = 3e11 \text{ Din/cm}^2$
 (1) = Jiménez E, en Marín, 1999. (2) = Pulido N and Irukura K. (1998), en Marín, 1999.

Los nombres en paréntesis corresponden a la fuente INGEOMINAS (1999), en Marín, 1999.

Los datos sin nombre de fuente fueron extraídos de Kanamori & McNally, en Marín, 1999.

TABLA 3. Parámetros macrosísmicos de terremotos ocurridos en el territorio colombiano. (Modificado de Marín, 1999).

SISMO			PARÁMETROS MACROSÍSMICOS																	
AÑO	MES	DIA	μ	C	Di	Ioc	Lxl	lxn	hl	hn	Lz	d	LR	Buzam.	Azimut	AR (Km²)	Lmáx	L9	L8	L7
1827	11	11	2,2	-4,1	0,1	10,1	35,2	148,2	25,5	52,2	40,1	46,7	53,8	29,786 NE	134	24298,8	674,9	47,2	239,6	529,4
1875	5	18	3,5	-4,5	1,0	11,0	2,5	71,0	3,2	20,8	26,4	17,9	25,1	44,49 NE	111	1158,2	313,6	38,0	80,8	147,3
1894	4	29	2,9	-5,3	0,6	10,6	9,2	50,2	21,4	51,4	45,1	21,6	37,0	54,29 NE	116	1371,7	597,9	113,3	246,7	347,0
1906	1	31	4,0	-7,0	0,5	10,5	120,7	282,2	95,0	166,2	106,8	66,1	97,2	47,154 SE	30	22082,0	1340,9	218,8	529,3	-
1917	8	31	3,8	-6,5	1,0	9,0	104,0	211,5	59,8	79,0	28,8	36,0	40,8	28,014 SW	112	4888,0	676,7	-	160,7	346,8
1932	3	14	3,7	-6,1	0,8	8,8	42,4	84,7	49,1	62,1	19,4	36,7	38,9	19,4 NE	168	1320,0	1300,0	-	104,3	202,0
1938	2	5	4,4	-6,6	0,3	8,3	69,3	251,2	69,2	76,3	10,8	7,2	10,2	44,954 SE	67	1964,3	1602,0	-	115,4	170,8
1947	7	14	4,8	-7,0	1,1	9,1	13,3	11,3	16,9	52,0	52,6	40,6	53,7	40,77 NE	152	616,8	283,7	35,5	-	57,6
1950	7	9	5,4	-6,8	0,4	10,4	4,1	51,3	11,2	29,4	27,3	12,1	21,9	56,31 SE	44	876,8	833,1	28,2	40,0	60,8
1957	4	21	4,8	-8,8	0,7	8,7	159,1	380,7	112,2	184,1	107,9	22,7	75,4	72,45 NW	80	30161,0	793,4	-	236,6	478,3
1961	6	16	2,9	-3,7	0,6	8,6	30,8	136,6	37,3	77,5	60,2	109,1	116,2	20,21 SE	70	5349,6	662,3	-	75,5	124,7
1961	12	20	3,0	-4,0	0,4	9,4	9,8	63,4	37,1	65,8	43,1	41,9	50,8	34,318 NE	123	1696,7	589,5	54,1	208,3	416,6
1962	7	30	4,1	-6,9	2,4	10,4	74,4	60,4	61,3	86,8	38,2	63,5	68,4	21,84 SE	8	2511,0	916,2	-	222,4	356,4
1967	2	9	4,3	-8,1	0,7	9,7	6,6	61,0	61,6	73,6	18,0	32,5	34,6	20,259 NE	113	721,8	975,0	93,0	233,8	391,4
1967	3	21	2,5	-1,7	0,7	5,7	57,3	149,0	46,0	80,7	52,8	28,6	45,4	50,91 NW	86	5337,8	592,2	-	-	-
1967	7	29	5,8	-10,8	0,5	8,5	21,0	66,6	113,6	154,6	61,6	58,1	71,2	35,21 SW	148	2710,5	1081,6	-	147,3	259,5
1968	5	7	3,4	-5,4	2,1	9,1	63,0	220,3	25,5	60,1	51,9	27,9	44,4	51,16 SW	128	7949,1	806,9	-	-	132,2
1973	8	30	4,3	-8,4	0,7	8,7	95,0	169,9	76,4	80,9	6,7	64,9	65,1	3,926 NW	19	1134,6	791,4	-	158,3	301,8
1973	4	3	3,2	-3,4	0,5	7,5	33,2	83,1	40,0	60,4	30,6	17,4	28,9	49,48 SE	14	1889,7	853,2	-	-	72,0
1977	8	31	4,9	9,0	2,5	9,5	79,8	57,6	48,1	73,2	37,7	18,2	31,2	53,736 SE	34	2390,7	452,1	-	-	197,2
1979	11	23	4,2	-7,8	0,4	9,4	49,1	153,2	60,1	116,9	85,1	47,0	73,7	50,39 NW	51	8973,6	1478,9	99,2	317,9	416,2
1980	11	26	3,9	-4,2	2,0	7,0	46,4	76,9	16,3	33,0	25,1	12,0	2,1	54,429 NW	33	1625,7	214,8	-	-	-
1981	10	18	4,0	-6,4	0,7	7,7	41,0	102,5	44,9	56,3	17,0	15,0	187,8	37,12 SE	16	1351,4	786,3	-	-	87,5
1981	10	17	2,4	-2,5	0,1	7,1	5,8	61,4	21,3	53,6	48,5	24,3	40,5	53,11 NE	165	1697,3	383,0	-	-	26,3
1983	3	31	4,9	-5,8	0,6	8,6	12,2	29,6	11,7	34,0	33,4	9,6	24,2	66,59 SW	112	756,0	139,5	-	19,3	33,0
1992	10	18	3,3	-5,2	0,4	10,4	34,8	113,2	21,6	46,0	36,6	19,5	31,2	51,317 NW	69	2822,1	525,0	167,4	238,6	371,3
1993	7	21	4,1	-5,1	0,8	8,8	12,5	96,4	30,1	71,8	62,5	23,6	47,9	60,432 NW	53	3723,4	761,6	-	53,5	139,7
1994	6	6	5,3	-8,8	0,1	11,1	6,8	97,3	13,9	23,4	14,2	103,6	104,1	5,21 NE	125	835,1	828,4	99,6	117,7	172,0
1995	1	19	2,9	-3,4	0,1	9,1	5,4	47,3	15,3	44,2	43,3	42,7	51,6	34,06 NE	94	1255,5	980,0	-	19,7	108,8

μ y C representan los coeficientes de atenuación sísmica de la ecuación general del campo macrosísmico para cada sismo; Ioc – Intensidad en el epicentro; Di – Incremento de la intensidad en el epicentro; Lmáx – Longitud del eje mayor de la isosista de menor grado; L9, L8, L7 – Longitudes del eje mayor de las isosistas 9, 8 y 7 respectivamente.

RESULTADOS

De los 33 sismos que inicialmente constituyeron la base de datos macrosísmicos solo se seleccionaron 28 a los cuales se les pudo obtener los parámetros que describen el campo macrosísmicos según es definido por Shebalin (1974). Con estos sismos se obtienen las relaciones que más adelante se describen.

Para definir los campos locales y normales del campo macrosísmico para cada sismo de dicha base de datos se realizaron los perfiles de S_{i+1}/S_i , y la función $f(\Delta i)$ (Perfiles longitudinales y transversales) (Marín, 1999). De la posición del primer máximo observado en cada perfil se marca la posición del efecto local y por ende el Epicentro local y el normal. Los resultados de los parámetros macrosísmicos encontrados, mostrados en la TABLA 3, serán usados para la determinación de las relaciones empíricas.

Relaciones Empíricas entre Parámetros Focales

A partir de los datos instrumentales de los parámetros focales encontrados para los terremotos seleccionados y los macrosísmicos deducidos a partir de los mapas de isosistas, se hace el intento de lograra establecer ecuación es empíricas que correlacionen diversos parámetros, lo cual puede ser útil para la complementación datos de los catálogos sismológicos existentes para Colombia, los que a su vez son indispensables para la valoración de la amenaza y el riesgo sísmico.

Relación entre Momento Sísmico M_0 y la Magnitud M_s

Utilizando los datos de 11 terremotos en la forma como se ha señalado, hemos obtenido una regresión lineal entre $\text{Log } M_0$ y M_s , que tiene la forma:

$$\text{Log } M_0 = 0,992M_s + 19,71$$

con un coeficiente de correlación muy bueno de $R^2 = 0.97$. Como se puede observar de la FIGURA 4, todos los eventos considerados se ajustan perfectamente a la distribución general de la ecuación deducida, lo cual hace pensar que en el territorio colombiano, hasta por lo menos la magnitud M_s 7,5, o aparece saturación en relación a M_w , que se deduce de M_0 .

La expresión deducida en este estudio es similar a la encontrada para 12 sismos chilenos cuya expresión, según (Kausel y Ramírez, 1992), es:

$$\text{Log } M_0 = 1,50M_s + 16,30; \text{ con } R^2 = 0.92$$

Sin embargo no parece presentar similitud con respecto a la aproximación de Kanamori y Anderson (1975) en la cual:

$$\text{Log } M_0 \approx 3/2 M_s$$

La expresión que define M_w en función de M_0 se cumple con buena aproximación a través de la relación empírica que liga

RELACIÓN MOMENTO SÍSMICO M_0 Y MAGNITUD M_s

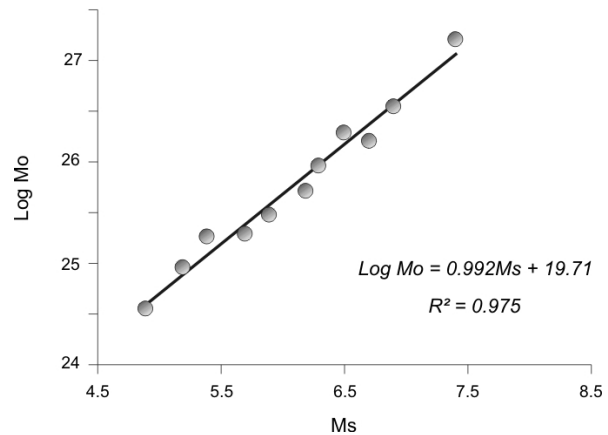


FIGURA 4. Relación entre el Momento sísmico (M_0) y la magnitud M_s .

$\text{Log } M_0$ vs. M_s , lo cual muestra un mejor comportamiento para los sismos cuya $M_s \leq 8,0$. Esto se puede corroborarse al reemplazar $M_s = 8.7$ para el sismo de 1906 con $M_0 = 200 \cdot 10^{27}$ dinas-cm.

Relación Momento Sísmico M_0 vs. Magnitud M_b

Para esta relación se utilizan los datos de siete terremotos, para los cuales se obtuvo la relación:

$$\text{Log } M_0 = 1,93M_b + 13,84$$

También con coeficiente de correlación muy bueno del orden de $R^2 = 0.975$.

Igualmente, la FIGURA 5 muestra que los siete eventos seleccionados se ajustan perfectamente a la distribución general de la distribución. Por lo cual se deduce que para el territorio colombiano no se presenta saturación de la magnitud M_b , al menos hasta 6,5, respecto a M_w .

RELACIÓN MOMENTO SÍSMICO M_0 Y MAGNITUD M_b

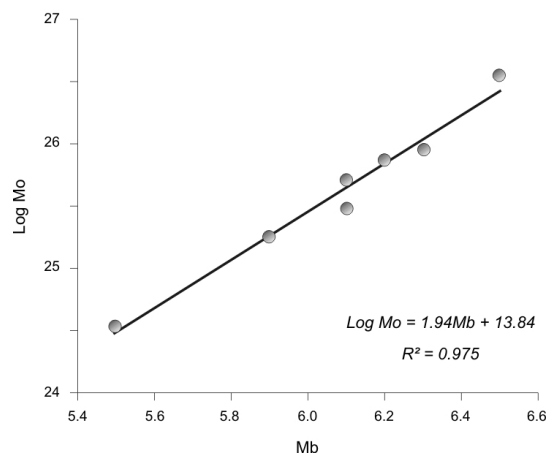


FIGURA 5. Relación entre el Momento sísmico (M_0) y la magnitud M_b .

Sin embargo, debemos decir que aunque se presenta una muy buena correlación entre los datos, esta regresión se logra con una muestra relativamente escasa en datos. Sin embargo, puede considerarse como una aproximación para determinar el M_0 de sismos históricos.

Relación Magnitud M_s vs. Magnitud M_w

Esta relación se obtiene con 14 terremotos, y tiene la forma:

$$M_s = 1,074M_w - 0,688 \text{ con } R^2 = 0,982$$

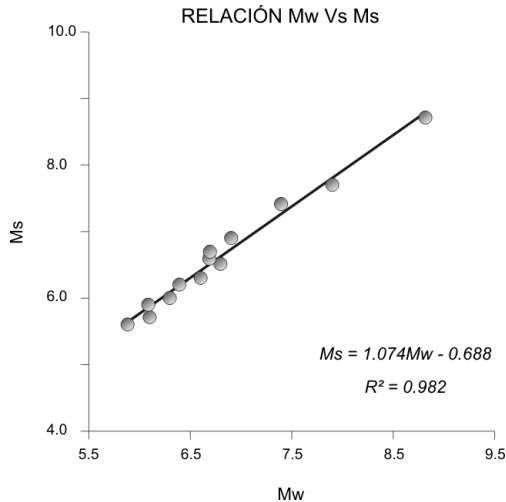


FIGURA 6. Relación entre el Magnitud M_s vs. M_w .

La FIGURA 6 muestra como los 14 eventos se ajustan perfectamente a la distribución general de la regresión, corroborando lo que ya se había señalado, que la magnitud M_s de los terremotos ocurridos en el territorio colombiano no se saturan respecto a M_w .

Reemplazando los valores de M_w para los sismos indicados se encuentra una muy buena aproximación al valor de M_s , manteniéndose inferiores con respecto a M_w . Con esta expresión se puede concluir que M_s es menor que M_w para los sismos que ocurren en el territorio colombiano.

Relación entre Magnitud M_s vs. Intensidad en el Epicentro I_{oc}

Se trata de una correlación entre parámetros de fuentes instrumentales y macrosísmicos, para lo cual se utilizaron 10 sismos, encontrándose la siguiente expresión:

$$M_s = 0,557I_{oc} + 1,279 \text{ Con } R^2 = 0,93$$

La FIGURA 7 muestra muy buena correlación entre los datos instrumentales M_s y los macrosísmicos de la intensidad en el epicentro, lográndose que cada uno de los terremotos utilizados se ajuste perfectamente a la distribución general de la regresión.

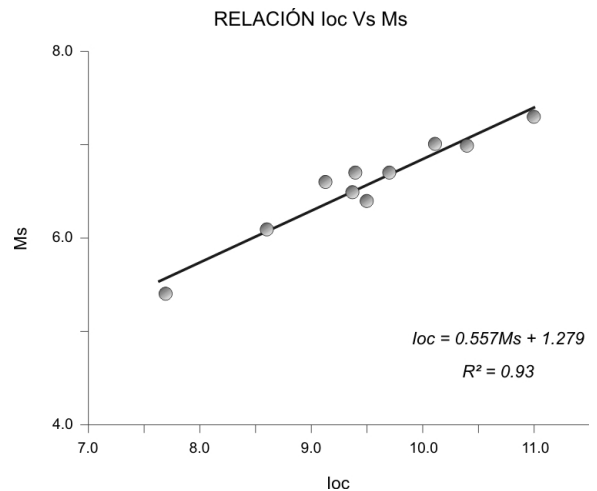


FIGURA 7. Relación entre el Magnitud M_s vs. I_{oc} .

La ecuación obtenida en esta correlación es bastante aproximada a la encontrada para terremotos en Suramérica, desarrollada y consignada en el catálogo del CERESIS (1985):

$$M_s = 0,63I_o + 1,26$$

También es similar a la ecuación derivada por Gutenberg y Richter (1956):

$$M_s = 2/3 I_o + 1,0$$

Relación entre la Longitud Mayor de la Isosista IX (L_9) y Magnitud M_s

También corresponde a la correlación entre parámetros de fuentes instrumentales M_s y la extensión de la isosista mayor relacionada con datos macrosísmicos. La ecuación obtenida para un número de siete terremotos es la siguiente:

$$L_9 = 94,41M_s - 332,01 \text{ Con } R^2 = .0924$$

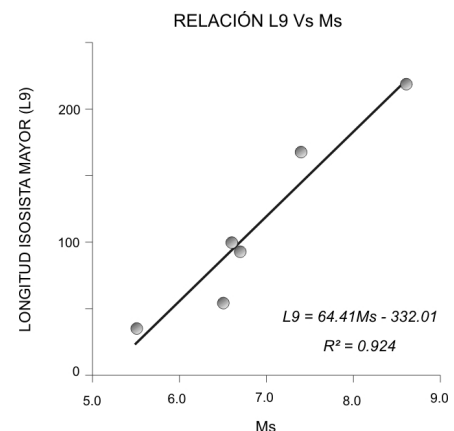


FIGURA 8. Relación entre la longitud mayor de la isosista IX y la Magnitud M_s .

A pesar de que el coeficiente de correlación es bastante bueno, y observa buen ajuste de los datos a la distribución general de la regresión (FIGURA 8), podemos decir que el número de eventos utilizados aun es muy bajo, sin embargo en la mayoría de los países donde se han desarrollado expresiones similares, también han usado un bajo número de datos. Dado que esta es la primera ecuación de esta naturaleza desarrollada en Colombia, podemos tomarla como preliminar bajo la susceptibilidad de ser mejorada en la medida en que se tengan mayor cantidad de datos.

Esta regresión permite establecer criterios acerca de la posible longitud de ruptura de los terremotos, en función de la magnitud M_s , siempre y cuando estos alcancen intensidades de IX en la zona epicentral. La escala de intensidad es la de Mercalli Modificada.

Relación entre la Longitud Mayor de la Isosista VIII (L8) y Magnitud Ms

Para la relación entre el logaritmo de la longitud mayor de la isosista de intensidad VIII y la magnitud M_s se utilizaron 8 eventos sísmicos, la ecuación obtenida es:

$$\text{Log}L_8 = 0,38M_s - 0,516$$

Con $R^2 = 0.975$. La FIGURA 9 muestra el ajuste de los datos, los cuales se acomodan perfectamente a la distribución general de la regresión.

Relación entre la Longitud Mayor de la Isosista VII (L7) y Magnitud Ms

Para esta relación se utilizaron 12 terremotos, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\text{Log}L_7 = 0,601M_s - 1,43 \quad \text{Con } R^2 = 0.937.$$

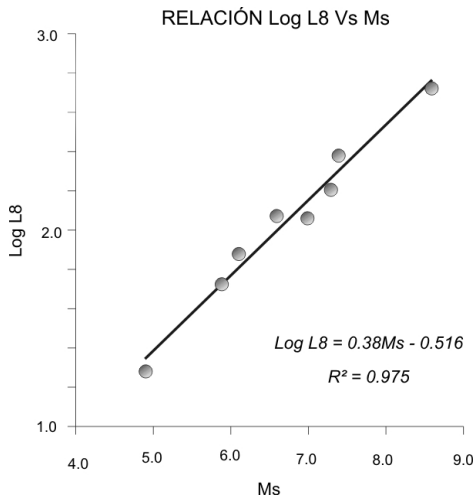


FIGURA 9. Relación entre la longitud mayor de la isosista VIII y la Magnitud M_s .

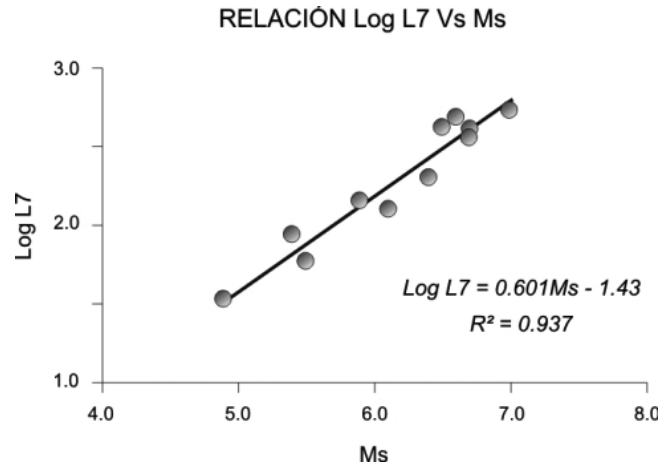


FIGURA 10. Relación entre la longitud mayor de la isosista VII y la Magnitud M_s

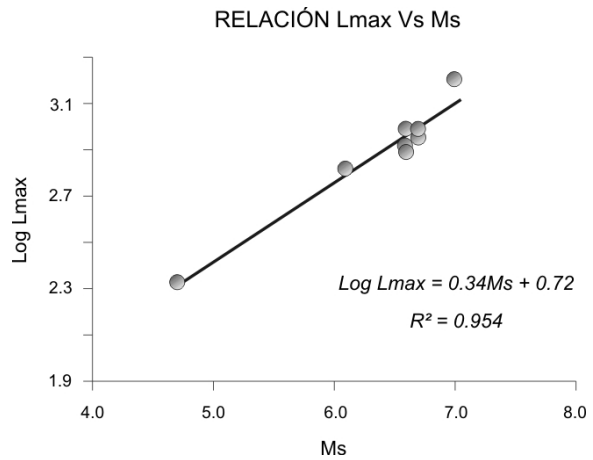


FIGURA 11. Relación entre la longitud de máxima percepción Lmax y la Magnitud M_s .

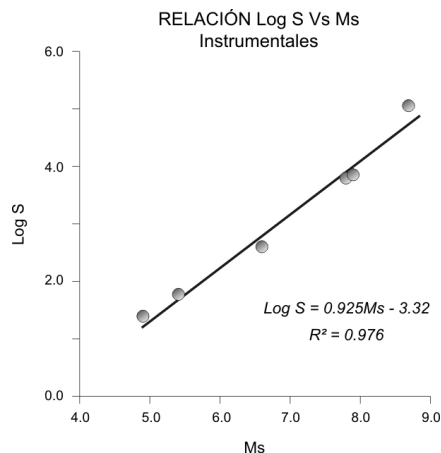


FIGURA 12. Relación entre el logaritmo del área de ruptura y la magnitud M_s .

En la FIGURA 10 se muestra como cada uno de los 12 terremotos se ajustan perfectamente a la distribución general de la regresión.

Expresiones similares se obtuvieron en Chile (Kausel y Ramírez, 1992):

$$\text{Log}L_7 = 0,34Ms - 0,03$$

con $R^2 = 0,98$; utilizando 7 terremotos.

La relación obtenida para Colombia presenta mayor número de datos. De acuerdo a la experiencia de otros autores es mejor usar la relación $\text{Log}L_7$ vs. M_s .

Relación entre Longitud de Máxima Percepción vs. Magnitud M_s

Se entiende como longitud de máxima percepción L_{max} a la longitud del eje mayor de la isosista de menor grado. Para esta relación, en este estudio se utilizaron 8 terremotos, obteniéndose la siguiente expresión:

$$\text{Log}L_{max} = 0,34Ms + 0,72$$

Con $R^2 = 0,9542$. La FIGURA 11 muestra que cada uno de los terremotos utilizados se ajusta perfectamente con la distribución general de la regresión.

También el número de sismos aquí considerado es bajo. Se puede reescribir la ecuación obtenida como:

$$Ms = 2,94\text{Log}L_{max} - 2,11$$

Que se puede ser comparada con la expresión $Ms = 3,48\text{Log}L_{max} - 2,68$ desarrollada por Hanks y Johnston (1992) usando datos de sismos registrados en California.

TABLA 4. Relaciones empíricas entre parámetros macrosísmicos e instrumentales obtenidas para terremotos fuertes ocurridos en Colombia.

PARÁMETROS		ECUACIÓN OBTENIDA	R ²	Número de Sismos	ECUACIÓN COMPARADA
Macrosísmicos	Instrumentales				
---	Mo y Ms	Log Mo = 0,99Ms + 19,71	0,97	12	Log Mo = 1,5Ms + 16,3 Kausel y Ramírez (1992)
---	Mo y Mb	Log Mo = 1,94Mb + 13,84	0,98	7	---
---	Ms y Mw	Ms = 1,07Mw - 0,69	0,98	14	---
Ioc	Ms	Ms = 0,56Ioc + 1,29	0,93	10	Ms = 0,63Ioc + 1,26 CERESIS (1985) M = 2/3 Io + 1 Gutenberg & Richter (1956)
L9	Ms	L9 = 64,41Ms - 332	0,92	7	---
L9	Ms	Log L9 = 0,26Ms + 0,22	0,92	7	---
L8	Ms	Log L8 = ,38Ms - 0,52	0,98	8	---
L7	Ms	Log L7 = 0,6Ms - 1,43	0,94	12	---
Lmax	Ms	Log Lmax = 0,34Ms + 0,72 Ms = 2,94 Log Lmax - 2,11	0,95	8	M = -2,68 + 3,48 Log Lmax Wells & Coppersmith (1994)
---	Mo y Ms	Log Mo = 1,77Ms + 18,812	0,95	6	---
S (Área de ruptura)	Ms	Log S = 0,92Ms - 3,31 Ms = 1.086 Log S + 3.59	0,98	7	Ms = 1,02 Log S + 3,72 Kausel y Ramírez. (1992) Ms = 1,5 Log S + 3,42 Kausel y Ramírez. (1992) Ms <= 6,76 Ms = 1,0 Log S + 4,53 Kausel y Ramírez (1992) 6,76 < Ms < 8,12
S (Área de ruptura)	Mw	Mw = 0.84 Log S + 4.55	0,97	6	Mw = 0.98 Log S + 4.07 Well & Coppersmith(1994) Mw = Log S + 3.99 Kausel y Ramírez.(1992)
D (Desplazamiento)	Ms	Log D = 0,24Ms - 1,40	0,94	5	---

Relación entre Superficie de Ruptura y la Magnitud Ms

Esta es una relación de mucha importancia puesto que con ella se puede predecir cual será el área de ruptura en función de la magnitud Ms, permitiendo de esta manera obtener valores del momento sísmico como medida de mejor interpretación del tamaño de los terremotos. La expresión obtenida utilizando siete eventos es la siguiente:

$$\text{Log}S = 0,925Ms - 3,32$$

Con $R^2 = 0.976$. En la FIGURA 12 se nota precisión de los datos, de forma que los siete terremotos se ajustan perfectamente a la distribución general de la regresión. Despejando Ms se puede reescribir esta expresión así:

$$Ms = 1,08\text{Log}S + 3,58$$

Expresión que es muy similar a la encontrada para sismos Chilenos (Kausel y Ramírez, 1992):

$$Ms = 1,02\text{Log}S + 3,72$$

En la TABLA 4 presenta el resumen de las relaciones obtenidos, en ella se indican los parámetros relacionados, la ecuación obtenida, el coeficiente de correlación, el número de sismos usados y ecuación con la que se compara de las obtenidas para otros países. Como se aprecia, varias de estas relaciones tienen comportamientos similares a las encontradas para otros países.

Los resultados obtenidos son compatibles con los encontrados por otros autores para otras regiones del mundo. A partir de estos resultados, se puede establecer que existe cierta incompatibilidad entre el área de ruptura y la longitud de ruptura, determinadas por los métodos macrosísmicos y los parámetros instrumentales, como el momento sísmico, la magnitud Ms y magnitud Mw. Sin embargo, estos resultados deben ser comprobados y complementados con estudios geológico-estructurales de campo y con un análisis exhaustivo de los mecanismos focales.

CONCLUSIONES

Existe una buena concordancia entre las relaciones Ms vs. Ioc, Mo vs. Ms, Ms vs. Mw y S vs. Ms, con las expresiones encontradas por otros autores como Wells y Coppersmith (1994), Singh et al. (1980) y Kausel y Ramírez. (1992).

Las relaciones empíricas encontradas y propuestas presentan buenos coeficientes de correlación aunque el número de datos en algunos casos se muestra relativamente bajo; no obstante, esto no resta la importancia que los resultados tienen para los futuros estudios de completitud de los catálogos en Colombia, y a su vez para la evaluación de la amenaza y el riesgo sísmico.

En vista de que las expresiones encontradas guardan buena correspondencia con las encontradas para otras regiones del

mundo, se establece que la metodología utilizada puede ser aplicada sin muchas restricciones para regiones particulares del territorio colombiano.

Las relaciones encontradas entre Mo y Ms: $\text{Log}Mo = 0,992Ms + 19,71$ comparada con la expresión de Kausel y Ramírez (1992): $\text{Log}Mo = 1,5Ms + 16,3$ para una magnitud Ms dada, siempre resulta ser superior, así:

$$Mo = 4,62 * 10^{25} \text{ dinas} - \text{cm}, \text{ para } Ms = 6 \text{ (este estudio)}$$

$$Mo = 1,99 * 10^{25} \text{ dinas} - \text{cm}, \text{ para } Ms = 6 \text{ (Kausel \& Ramírez, 1992)}$$

El coeficiente de correlación es superior al encontrado por Kausel y Ramírez (1992) a pesar de usar el mismo número de sismos, sin embargo la expresión encontrada no parece guardar similitud.

A pesar del registro histórico de la sismicidad colombiana, no existe abundante información respecto a los parámetros de la fuente de los sismos más importantes.

La relación entre superficie de ruptura S y magnitud Ms se expresa como:

$$\text{Log}S = 0,9249Ms - 3,3, \text{ con } S \text{ en } \text{Km}^2;$$

$$\text{Donde: } Ms = 1,08\text{Log}S + 3,587$$

Siendo una expresión muy cercana a la encontrada por Kausel y Ramírez (1992) para sismos chilenos, dada como

$$Ms = 1,02\text{Log}S + 3,72$$

Se observa como para un valor de Ms = 6, con Kausel y Ramírez (1992) se obtiene $S = 171,9\text{Km}^2$, mientras que con la expresión propuesta para el territorio colombiano se obtiene que $S = 171,15\text{Km}^2$. Si se comparan estas dos expresiones con las obtenidas por Singh et al. (1980); y con la expresión $\text{Log}S = 1,21Ms - 5,05$ ($Ms = 0,826\log S + 4,17$), obtenida por Kanamori y Anderson (1975), se observa que para una magnitud dada, el área S es mayor para los sismos colombianos que para el promedio mundial.

La relación de Mw vs. Log S se presenta como $Mw = 0,84\text{Log}S + 4,55$ con N = 6 y $R^2 = 0.973$, es consistente con los resultados de Wells & Coppersmith (1994), en la cual $Mw = 0,98\text{Log}S + 4,07$, obtenida para todo tipo de fallas.

La expresión entre Ms vs. Ioc (intensidad epicentral) $Ms = 0,55 + 5Ioc + 1,279$ obtenida con N=10 y $R^2 = 0.93$, es bastante aproximada a la encontrada para sismos ocurridos en el continente Suramericano (CERESIS, 1985):

$$M_s = 0,63I_{oc} + 1,26$$

También resulta ser similar a la ecuación derivada por Gutenberg y Richter (1956):

$$M = 2/3I_o + 1,0$$

La relación $L_{máx}$ vs. M_s , obtenida como $LogL_{max} = 0,34M_s + 0,72$ ($M_s = 2,93LogL_{max} - 2,11$) puede compararse con la expresión $M = 3,48LogL_{max} - 2,68$ desarrollada por Hanks y Johnston (1992) usando datos de sismos registrados en California.

La expresión $LogL_7 = 0,601M_s - 1,43$ no guarda relación con la encontrada para sismos chilenos en donde $LogL_7 = 0,34M_s - 0,03$; sin embargo, para magnitudes menores o iguales a 6, con ambas expresiones se obtienen valores de L_7 muy similares. En cualquier caso para una M_s menor o igual a 5 la expresión desarrollada para Colombia siempre arroja valores por debajo de los encontrados con la expresión de Kaussel y Ramírez (1992).

REFERENCIAS

Bottari, A., Federico, B., y Lo Giudice, E. 1979. Metodological Considerations Regarding the Determination of Some Macroseismic Field Parameters. Application to earthquakes in the Calabro-Pelotarian Arc. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 23(83): 197-225.

CERESIS 1985. Catálogo de Terremotos para América del Sur. Centro Regional de Sismología Para América del Sur. 1-14.

Gutenberg, B. y Richter, C.F. 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 46: 105-145.

Hanks, T.C. y Johnston, A.C. 1992. Common features of the excitation and propagation of strong ground motion for North American earthquakes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82: 1-23.

Kanamori, H. y Anderson, D. 1975. Theoretical Basics of Some Empirical Relations in Seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(65): 1073 – 1095.

Kaussel, E. y Ramírez, D. 1992. Relaciones entre parámetros focales y macrosísmicos de grandes terremotos chilenos. revista geofísica, instituto panamericano de geografía e historia, (37): 159-193. julio – diciembre.

Marín, J. P. 1999. Campo Regional Macrosísmico de Algunos Sismos Históricos y Algunas Relaciones con Datos instrumentales. Tesis de maestría en Ingeniería Sísmica. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. 102p.

Mora, H. 1995. Central and South America GPS Geodesy: Relative plate motions determined from 1991 and 1994 measurements in Colombia, Costa Rica, Ecuador, Panama and Venezuela, MSc Thesis, University of South Carolina.

Ramírez, J. E. 1975. El terremoto de Cúcuta cien años después. Edit. Desarrollo, Bogotá:

Shebalin, N. V. 1974. Focos de Terremotos Fuertes en el Territorio de la URSS. Moscú. Nauka: 52. [En Ruso].

Singh, S. K., Bazan, E. y Esteva, L. 1980. Expected earthquake magnitude from a fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*; June 1980; 70(3): 903-914

Wells, D. y Coppersmith, K. 1994. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002.

Fuentes electrónicas:

Red Sismológica Nacional De Colombia. RSNC. Sismicidad Registrada por la Red Sismológica Nacional de Colombia RSNC durante el periodo 2001 - 2005. Colombia. 22/02/2006. <http://seisan.ingeo Minas.gov.co/RSNC/publicaciones.html>

Trabajo recibido: Junio 29 de 2007

Trabajo aceptado: Febrero 25 de 2008