

## **Análisis de la sismicidad en la costa Pacífica colombiana: herramienta para definir fuentes de tsunami**

### ***Analysis of seismicity in the Colombian Pacific Coast: tool to define tsunami sources generadora de tsunami en el litoral Pacífico colombiano***

Fecha de recepción: 2014-05-26 / Fecha de aceptación: 2014-09-01

Edgar Castilla<sup>1</sup>, Ronald Sánchez E.<sup>2</sup>

**Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCP).** Área de Manejo Integrado de Zonas Costeras. Capitanía de Puerto de Tumaco, Vía El Morro, Tumaco, Colombia. Tel: +57 (2) 727 26 37. Correo electrónico: ecastilla@dimar.mil.co<sup>1</sup>, rsanchez@dimar.mil.co<sup>2</sup>

**Castilla E., Sánchez R. 2014.** Sismicidad generadora de tsunami en el litoral Pacífico colombiano. Bol. Cient. CIOH 2014;32:135-147.

## **RESUMEN**

Esta investigación se centra en el estudio de la actividad sísmica en la costa Pacífica colombiana con el propósito de identificar y caracterizar las posibles zonas generadoras de tsunami, a partir de la aplicación de estadística descriptiva e inferencial, utilizando la Ley de Gutenberg-Richter para conocer la ocurrencia de sismos según su magnitud. Identificar y caracterizar las fuentes generadoras de tsunami es un componente fundamental en la evaluación de la amenaza, lo cual contribuye a la disminución de la vulnerabilidad de los pobladores de las zonas costeras, toda vez que es una herramienta base para la formulación de planes municipales de contingencia ante tsunami y permiten a la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo la toma de decisiones concernientes al manejo de desastres, a los planes de capacitación en respuesta ante tsunami y a la formulación de estrategias de mitigación [1]. En un espacio temporal de 100 años, la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 7.8 Mw en la costa Pacífica colombiana es del 99 %, con un periodo de retorno de 15.65 años. Este estudio propone como fuentes generadoras de tsunami tres zonas potenciales: la zona de interacción entre las tres placas en cercanía a Panamá, donde concurren las placas Sudamericana, Nazca y Cocos; la zona del Yaquina Graben, y la zona de subducción Colombo-Ecuatoriana.

**PALABRAS CLAVES:** costa Pacífica colombiana, zona de subducción, tsunami, Ley de Gutenberg-Richter, Gumbel tipo I, riesgo sísmico, gestión del riesgo.

## **ABSTRACT**

This research focuses on the study of seismic activity in the Colombian Pacific Coast in order to identify and characterize potential tsunami generating zones, from the application of descriptive and inferential statistics, using the Gutenberg-Richter law for knowing the occurrence of earthquakes according to their magnitude. Identify and characterize the tsunami generating sources is a key component in the evaluation of the hazard, which contributes to reducing the vulnerability of the habitants of the coastal areas, since it is a basic tool for the development of municipal contingency plans for tsunami and allow the National Risk Management Unit to make decisions concerning the management of disasters, training plans in response to tsunami and formulating mitigation strategies [1]. In a temporal space of 100 years, the probability of occurrence of an earthquake of magnitude 7.8 Mw in the Colombian Pacific Coast is 99% with a return period of 15.65 years. This study proposes as tsunami generating sources three potential zones, the zone of interaction between the three plates in proximity to Panama where attend the South American plate, Nazca and Cocos, Yaquina Graben zone, and Colombo-Ecuadorian Subduction Zone.

**KEYWORDS:** Colombian Pacific Coast, subduction zone, tsunami, Gutenberg-Richter Law, Gumbel type I, seismic risk, risk management.

## INTRODUCCIÓN

Producto de la actividad sísmica se produjeron en el Pacífico Sudeste, entre el norte de Ecuador y el sur de Colombia, cuatro eventos de tsunami reportados en 1906, 1942, 1958, 1979. El tsunami de 1979 causó la pérdida de 452 vidas humanas y arrasó poblados enteros [2]. En la actualidad en la costa del Pacífico colombiana presenta un alta vulnerabilidad, debido a sus condiciones socioeconómicas y de densidad poblacional. Estudiar la actividad sísmica ayudará a disminuir la vulnerabilidad en el Pacífico colombiano, toda vez que permitirá realizar proyectos de evaluación de amenazas de origen natural, como tsunamis y realizar planes de mitigación.

En el litoral Pacífico colombiano se pueden identificar posibles zonas o fuentes con alta probabilidad de ser generadoras de tsunamis, entre ellas la zona de interacción entre las tres placas en cercanía a Panamá, donde concurren las placas Sudamericana, Nazca y Los Cocos; el Yaquina Graben, y la zona de subducción Colombo-Ecuatoriana [3 - 5].

El estudio de la geodinámica de la zona de subducción relacionada con la costa Pacífica colombiana involucró una revisión del trabajo de diferentes autores, en los que se tratan la velocidad de las placas y el ángulo de subducción entre ellas. Pedraza [6] obtiene tres formas distintas de subducción para la placa de Nazca en la fosa Colombo-Ecuatoriana; la primera en el segmento Cali, donde el ángulo de buzamiento cambia de  $17^\circ$  a  $45^\circ$ , a una profundidad máxima de 100 km; la segunda en los segmentos Popayán y Nariño, donde el ángulo de buzamiento es aproximadamente constante de  $30^\circ$ , a una profundidad máxima de 200 km, y la última en el segmento Quito, donde el ángulo de buzamiento cambia de  $9^\circ$  a  $50^\circ$ , a una profundidad máxima de 220 km [6]. La profundidad máxima de sismicidad a lo largo de la fosa Colombo-Ecuatoriana presenta dos aumentos, el primero entre latitudes  $4.5^\circ\text{N}$  y  $5^\circ\text{N}$ , y el segundo entre latitudes  $1^\circ\text{S}$  y  $2^\circ\text{S}$ , sugiriendo la presencia de las dorsales de Malpelo y Carnegie que generan un bloqueo diferencial respecto a la cuenca del Pacífico colombo-ecuatoriano.

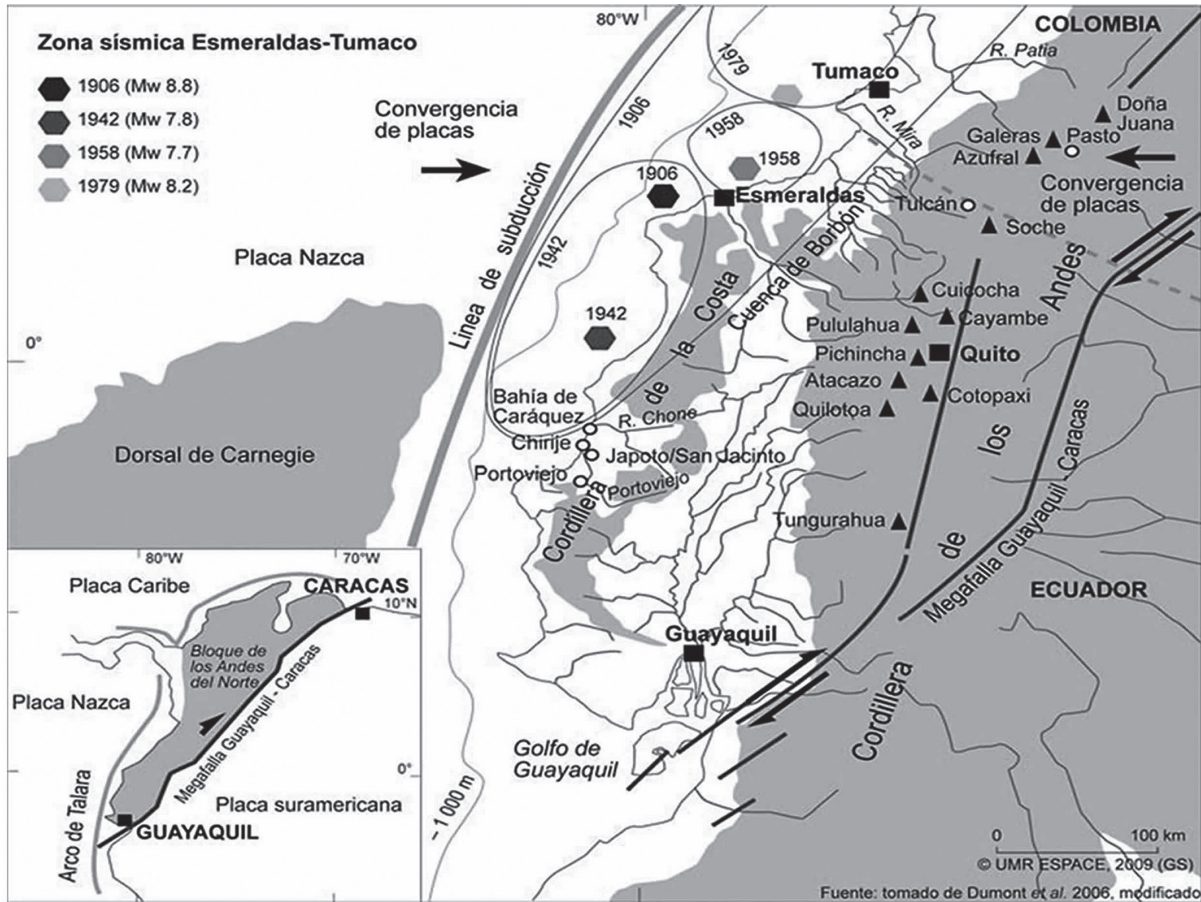
Monsalve [7] determina el ángulo de subsidencia de la placa de Nazca en un plano, hasta profundidades promedio entre 120 a 160 km, denominada como la zona de Wadati-Benioff, con un ángulo de buzamiento de  $38^\circ$  en el segmento Cauca, entre latitudes  $3^\circ\text{N}$  y  $5^\circ\text{N}$ .

La sismicidad y la curvatura de la trinchera colombiana han sido caracterizadas por un largo y complejo proceso de subducción de la placa Nazca, en la esquina noroeste de la placa Sudamericana, donde también han interactuado la placa de Cocos y placa Caribe; como producto de esta interacción de las placas se ha generado una zona de convergencia denominada la trinchera Colombo-Ecuatoriana, con una actividad sísmica de moderada a alta y una tectónica muy compleja [8 - 10].

Los cuatro tsunamis del siglo XX, ocurridos en el Pacífico colombiano en orden cronológico con su respectiva magnitud de momento son: 31 de enero de 1906, 8.6 Mw; 14 de mayo de 1942, 7.9 Mw; 19 de enero de 1958, 7.8 Mw; 12 de diciembre de 1979, 8.2 Mw [10]. Todos ellos cercanos a la zona de subducción (Fig. 1), son muestra de la alta sismicidad en la costa Pacífica colombiana. El estudio de la zona de Wadati-Benioff, de gran importancia a nivel sísmico, se debe abordar mediante diferentes métodos como los mecanismos focales (geometría de la falla que generó el sismo), geodinámica (dinámica de las placas), geomorfología, tensores, momento sísmico, magnitud de momento, energía, esfuerzos, datos GPS, probabilidad y geoestadística. Esta investigación se centró en la probabilidad de ocurrencia de un sismo en el litoral Pacífico colombiano, tomando como base datos sísmicos históricos. Se tomaron sismos con magnitud de momento  $M_w > 4$  y con hipocentro menor a 100 km de profundidad. La metodología es de tipo estadística descriptiva e inferencial, desarrollada por Gumbel [11] y Gutenberg y Richter [12]. Las subregiones de estudio fueron dos: una con latitudes  $0^\circ$  hasta  $4^\circ$  y longitudes  $-84^\circ$  hasta  $-77^\circ$ , abarcando desde la costa del Ecuador hasta la costa sudeste del Pacífico colombiano, obteniendo 574 sismos reportados; la segunda región con latitudes  $0^\circ$  hasta  $7.5^\circ$  y longitudes  $-84^\circ$  hasta  $-77^\circ$ , abarcando desde la costa del Ecuador hasta la costa de Panamá, obteniendo 1589 sismos reportados. Tomando el valor máximo por año, se ordenó de forma creciente por magnitud Mw, obteniendo la frecuencia y frecuencia acumulada para hallar N, siendo el número de sismos con magnitud mayor M, además se obtiene log N. Mediante la técnica de mínimos cuadrados se hallan los parámetros de la Ley Gutenberg-Richter.

El objetivo principal de este estudio es calcular la sismicidad en la costa Pacífica colombiana y estimar el periodo de retorno de los sismos con su magnitud de momento (Mw) en la zona del Pacífico colombiano.

Como resultado se obtuvo la ecuación de Gutenberg-Richter para las dos subregiones de estudio y se calculó el riesgo sísmico para un periodo de 1, 25, 50, 75, 100, 125, 150 años, respectivamente.



**Figura 1.** Ilustración de la sismicidad reportada entre Colombia y Ecuador (Tumaco-Esmeraldas) con ocurrencia de tsunamis durante el siglo XX, todos cercanos a la zona de subducción [10].

### ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la costa Pacífica colombiana en el Pacífico Sudeste, donde convergen las placas de Nazca y Suramericana, con límites activos que crean zonas de subducción con alta actividad sísmica (Fig. 1).

### METODOLOGÍA

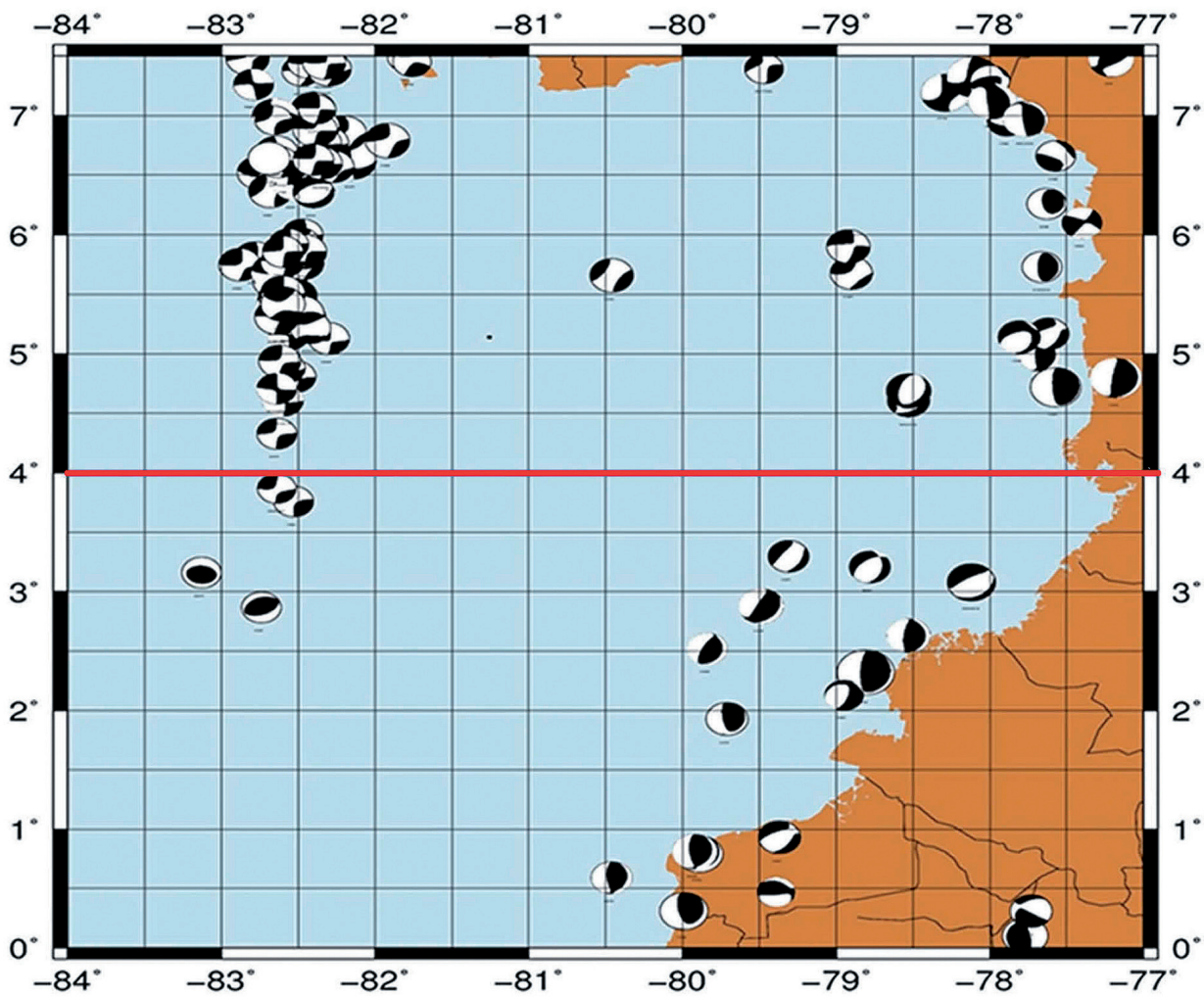
Se tomaron los sismos reportados en la página del Centro Regional de Sismología para América

del Sur (Ceresis) desde el primero de enero de 1520 hasta 1 enero de 1973, en la página del *U.S. Geological Survey* (USGS, por sus siglas en inglés), y los sismos reportados desde el primero de enero de 1973 hasta 15 de abril de 2013. De la base de datos histórica de la USGS se tomaron sismos con magnitud de momento  $M_w > 4$ , con hipocentro menor a 100 km de profundidad, debido a que diferentes autores reportan la ocurrencia de tsunamis en profundidades menores de 100 km [2]. Las subregiones estudiadas fueron dos. La primera con latitudes  $0^\circ$  hasta  $4^\circ$  y longitudes  $-84^\circ$  hasta  $-77^\circ$ , abarcando desde la costa del

Ecuador hasta la costa sudeste del Pacífico colombiano, obteniendo 574 sismos reportados. La segunda subregión, con latitudes 0° hasta 7.5° y longitudes -84° hasta -77°, abarcando desde la costa del Ecuador hasta la costa de Panamá, obteniendo 1589 sismos reportados. Tomando el valor máximo por año se ordenó de forma creciente por magnitud  $M_w$ , obteniendo la frecuencia y frecuencia acumulada para hallar  $N$ , siendo el número de sismos con magnitud mayor  $M$ , además se obtiene  $\log N$ . Mediante la técnica

de mínimos cuadrados se hallan los parámetros de la ley Gutenberg-Richter.

Se utilizaron ecuaciones que relacionan la Distribución de Gumbel tipo I y Richter, de esta manera se obtuvieron los dos parámetros de Gumbel,  $\alpha$ ,  $\beta$  y se calculó la probabilidad de ocurrencia de un sismo y los tiempos de retorno para diferentes magnitudes en las dos subregiones de estudio (Fig. 2). Además se obtuvieron los mecanismos focales.



**Figura 2.** Mecanismos focales latitudes 0° N a 7.5° N y longitudes 84° W a 77° W (CMT Harvard Catalog). La línea roja es la frontera superior de la primera subregión de estudio. Sismos con  $M_w > 4$ .

## Ecuación Gutenberg–Richter

Esta ecuación relaciona la ocurrencia de sismos en la zona de estudio frente a su magnitud.

$$\text{LOGN} = a - b * M \quad (1)$$

Donde,

**M** Magnitud de momento (Mw).

**N** Número de sismos con magnitud mayor a M.

**b** Es la pendiente que representa la proporción entre número de sismos grandes y pequeños en la zona.

**a** Es la ordenada en el origen a partir de la cual se puede estimar la tasa anual de sismos.

**b** oscila entre 0.5 y 1.5, un valor pequeño de **b** indica un alto número de sismos grandes respecto a los pequeños. Comúnmente valores grandes de **b** están relacionados con fuentes tectónicas intraplacas. Fuentes interplacas generalmente muestran valores de **b** menores que 1.

## Distribución de Gumbel Tipo I

La Distribución de Gumbel trabaja la probabilidad de no excedencia de un sismo con magnitudes más grandes que M en un año [11]:

$$G(M) = e^{-\alpha e^{-\beta M}} \quad (2)$$

Donde,

**M** Magnitud de sismo.

**$\alpha, \beta$**  Parámetros de la ecuación de Gumbel tipo I.

Existe una relación entre Gumbel tipo I y la Ley Gutenberg-Richter [12]:

$$\alpha = 10^a \quad (3)$$

$$\beta = b / \text{Loge} \quad (4)$$

$$N = \alpha e^{-\beta M} = - \text{LNG} \quad (5)$$

Para calcular la Ley de Gutenberg-Richter, de cada año se tomó el sismo con mayor Magnitud de Momento (Mw) y se organizó en una tabla

(Tabla I). Se graficaron esos datos para observar cómo estaban distribuidos en el tiempo mediante datos de estadística descriptiva: promedio, moda, desviación (Fig. 3 y 4). Luego se organizó otra tabla donde  $j$  es el número de veces que aparece un sismo de cierta magnitud  $M$  y la frecuencia  $= j / n + 1$ , donde  $n$  es el periodo de tiempo en estudio donde ocurrieron los sismos,  $G(M)$  es la frecuencia acumulada. Con la columna de  $M$  y  $\text{LOGN}$ , mediante la técnica de mínimos cuadrados se obtiene la ecuación lineal de Gutenberg-Richter para las dos subregiones de estudio; siendo  $M$  la variable independiente y  $\text{LOGN}$  la variable dependiente, se obtiene una tabla (Tabla II). La recta  $y = ax + b$ , donde  $y = \text{LOGN}$ ,  $M = x$

Las ecuaciones de Gutenberg–Richter para la subregión con Latitud  $0^\circ$  a  $4.0^\circ$  son:

$$y = \text{LOGN} = -0.55M + 2.9 \quad (6)$$

Se grafica en el Figura 5.

Subregión con latitud  $0^\circ$  a  $7.5^\circ$ . Se grafica en la Figura 6.

$$y = \text{LOGN} = -0.6M + 3.5 \quad (7)$$

Con los valores de  $a$  y  $b$  obtenidos mediante la ecuación Gutenberg–Richter para cada subregión y utilizando las ecuaciones (3) y (4) se obtuvieron los dos parámetros de Gumbel tipo I. Se utilizaron las siguientes fórmulas para el cálculo de riesgo sísmico y el periodo de retorno [13]:

$$N = \alpha e^{-\beta M} \quad (8)$$

$R1(M)$  = Riesgo sísmico por un año

$RD(M)$  = Riesgo sísmico por D años

Se calculó el riesgo sísmico para un período de 1, 25, 50, 75, 100, 125, 150 años, respectivamente,  $R1(M)$ ,  $R25(M)$ ,  $R50(M)$ ,  $R75(M)$ ,  $R100(M)$ ,  $R125(M)$ ,  $R150(M)$ , con su correspondiente periodo de retorno ( $Tr$ ) (Tabla III). Se graficó magnitud contra período de retorno (Fig. 7 y 8).

**RESULTADOS**

En la subregión 1 la estadística descriptiva presenta valores de media = 5.747 Mw, moda = 5.2 Mw, desviación estándar = 0.8485. En la subregión 2 la media = 6.22 Mw, moda = 6.3 Mw, desviación estándar = 0.71.

Obtención de la ecuación de Gutenberg-Richter en latitudes 0° a 4° y longitudes -84° a -77°, utilizando las ecuaciones (3) y (4) se obtuvieron los dos parámetros de la Distribución de Gumbel tipo I  $\alpha, \beta$ :

$$\alpha = 2.9, b = 0.55$$

$$\alpha = 794.3282347 \quad \beta = 1.266421801$$

Siguiendo la misma metodología:

Obtención de la ecuación de Gutenberg-Richter para las latitudes entre 0° a 7.5° y longitudes entre -84° a -77°:

$$a = 3.5, b = 0.6$$

$$\alpha = 3162.27, \beta = 1.385857902$$

En los dos casos se obtuvieron valores de *b* pequeños, indicando la sismicidad en los límites de dos placas tectónicas (interplacas) y un alto número de sismos grandes respecto a los pequeños. Se obtuvieron los tiempos de retorno para diferentes magnitudes, por ejemplo, en un espacio de tiempo de 100 años la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud de momento 7.8 Mw es del 98 %, con período de retorno de 24.54 años en las latitudes de 0° a 4° y longitudes -84° a -77° (Tabla III). Siguiendo la misma metodología, en el mismo espacio de tiempo de 100 años la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud de momento 7.8 Mw es del 99 %, con período de retorno de 15.65 años en las latitudes de 0° a 7.5° y longitudes -84° a -77°. A partir de los mecanismos focales se observa que los sismos en las dos zonas son generados por diferentes fallas (Fig. 2).

**Tabla I.** Sismo máximo anual (1520-15 abril 2013, Ceresis, USGS) lat. 0° a 4°.

Año	Mmax(Mw)	Año	Mmax(Mw)	Año	Mmax(Mw)
1906	8.8	1983	6.6	1999	4.9
1933	6.0	1984	5.2	2000	5.2
1944	6.7	1985	5.6	2001	5.1
1958	7.8	1986	5.0	2002	5.3
1964	5.8	1987	7.2	2003	5.0
1971	5.5	1988	5.1	2004	5.4
1973	5.0	1989	6.3	2005	5.6
1974	5.8	1990	5.5	2006	5.2
1975	5.2	1991	6.4	2007	6.8
1976	6.9	1992	5.7	2008	5.1
1977	5.5	1993	5.5	2009	5.2
1978	5.1	1994	5.8	2010	5.4
1979	7.6	1995	5.4	2011	5.2
1980	6.0	1996	6.2	2012	5.2
1981	5.9	1997	5.3	2013	4.8
1982	5.3	1998	5.0		

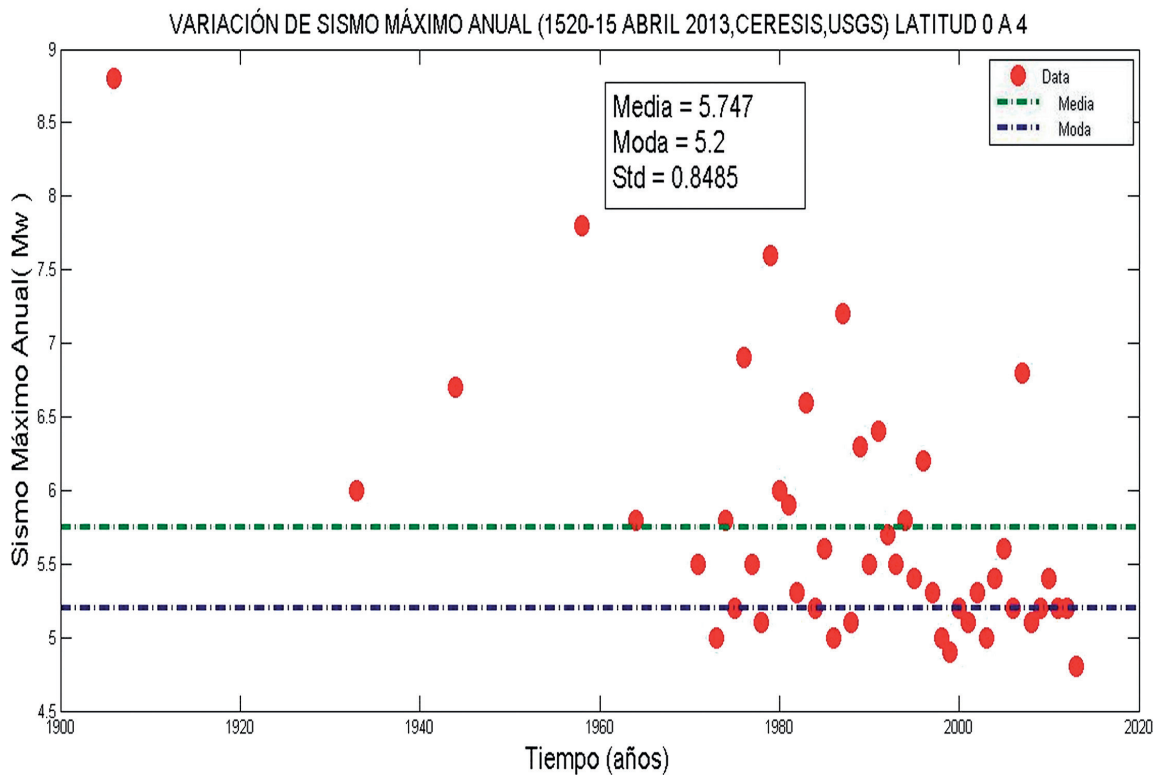
**Tabla II.** Cálculo de la Distribución de Gumbel anual latitud 0° a 4°.

M	j	f= j / n+1	G(M)	N=-LnG	LOGN
4.8	1	=1/48	=1/48	3.87120101	0.58784572
4.9	1	=1/48	=1/48+1/48	3.17805383	0.50216125
5.0	4	=4/48	=1/48+1/48+4/48	2.07944154	0.31794672
5.1	4	0.083333333	0.20833333	1.56861592	0.19551662
5.2	7	0.145833333	0.35416667	1.03798767	0.01619219
5.3	3	0.0625	0.41666667	0.87546874	-0.05775936
5.4	3	0.0625	0.47916667	0.73570679	-0.13329523
5.5	4	0.083333333	0.5625	0.57536414	-0.24005721
5.6	2	0.041666667	0.60416667	0.50390518	-0.29765118
5.7	1	0.020833333	0.625	0.47000363	-0.32789879
5.8	3	0.0625	0.6875	0.37469345	-0.4263239
5.9	1	0.020833333	0.70833333	0.34484049	-0.46238175
6.0	2	0.041666667	0.75	0.28768207	-0.5410872
6.2	1	0.020833333	0.77083333	0.2602831	-0.58455403
6.3	1	0.020833333	0.79166667	0.23361485	-0.63149955
6.4	1	0.020833333	0.8125	0.20763936	-0.68269031
6.6	1	0.020833333	0.83333333	0.18232156	-0.73916198
6.7	1	0.020833333	0.85416667	0.15762894	-0.80236403
6.8	1	0.020833333	0.875	0.13353139	-0.87441662
6.9	1	0.020833333	0.89583333	0.1100009	-0.95860378
7.2	1	0.020833333	0.91666667	0.08701138	-1.06042396
7.6	1	0.020833333	0.9375	0.06453852	-1.19018099
7.8	1	0.021276596	0.9587766	0.04209719	-1.37574693
8.8	1	0.021276596	0.98005319	0.02014843	-1.69575875

**Tabla III.** Probabilidades de sismos para diferentes magnitudes (Mw) y diferentes períodos en latitud 0° a 4°.

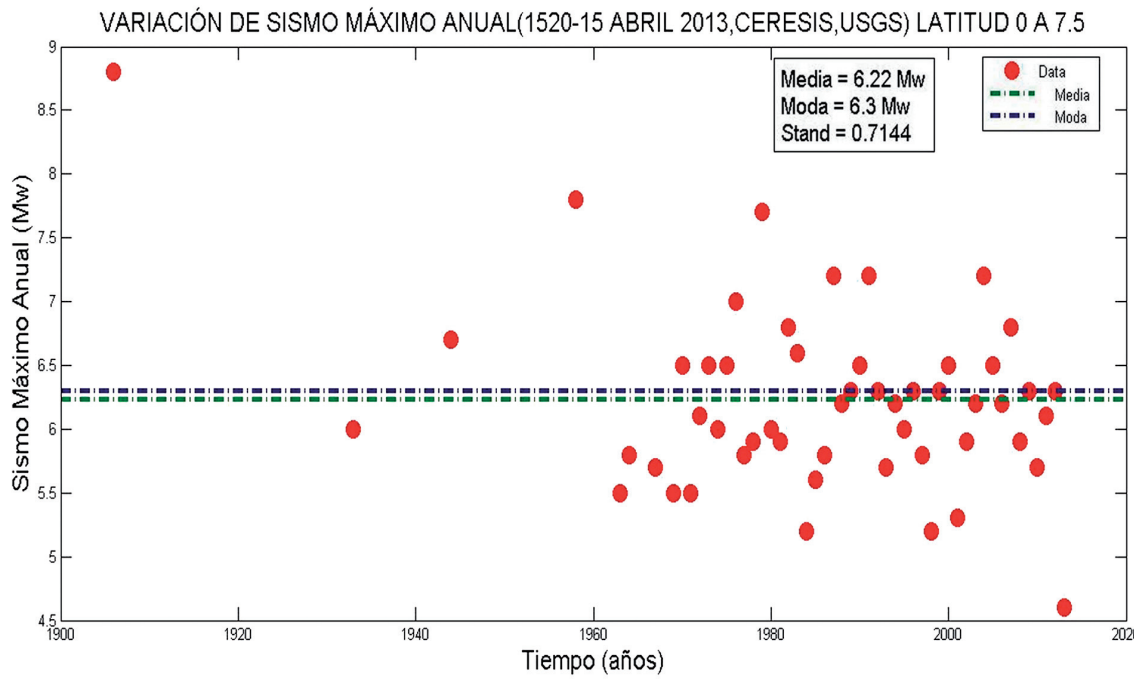
	N(M)	Tr	R1(M)	R25(M)	R50(M)	R75(M)	R100(M)	R125(M)	R150(M)
4.8	1.81970	0.54954	0.83792	1	1	1	1	1	1
4.9	1.60324	0.62373	0.79875	1	1	1	1	1	1
5.0	1.41253	0.70794	0.75647	1	1	1	1	1	1
5.1	1.24451	0.80352	0.71191	1	1	1	1	1	1
5.2	1.09647	0.91201	0.66595	1	1	1	1	1	1
5.3	0.96605	1.03514	0.61941	1	1	1	1	1	1
5.4	0.85113	1.17489	0.5730	0.99999	1	1	1	1	1
5.5	0.74989	1.33352	0.5275	0.99999	1	1	1	1	1
5.6	0.66069	1.51356	0.48350	0.99999	1	1	1	1	1

	N(M)	Tr	R1(M)	R25(M)	R50(M)	R75(M)	R100(M)	R125(M)	R150(M)
5.7	0.58210	1.71790	0.44127	0.99999	1	1	1	1	1
5.8	0.51286	1.94984	0.40122	0.99999	1	1	1	1	1
5.9	0.45185	2.21309	0.36355	0.99998	1	1	1	1	1
6.0	0.39810	2.51188	0.32840	0.99995	0.99999	1	1	1	1
6.2	0.30902	3.23593	0.26584	0.99955	0.99999	1	1	1	1
6.3	0.27227	3.67282	0.23835	0.99889	0.99999	0.99999	1	1	1
6.4	0.23988	4.16869	0.21328	0.99751	0.9999	0.99999	1	1	1
6.6	0.18620	5.37031	0.16989	0.99048	0.99990	0.99999	0.9999	1	1
6.7	0.16405	6.09536	0.15130	0.98345	0.99972	0.99999	0.9999	0.9999	1
6.8	0.14454	6.91830	0.13458	0.97304	0.99927	0.99998	0.9999	0.99999	1
6.9	0.12735	7.85235	0.11957	0.95857	0.99828	0.99992	0.9999	0.99999	0.9999
7.2	0.08709	11.4815	0.08341	0.88666	0.98715	0.99854	0.9998	0.99998	0.9999
7.6	0.05248	19.0546	0.0511	0.73072	0.92749	0.98047	0.9947	0.99858	0.9996
7.8	0.04073	24.5470	0.039	0.6388	0.869	0.952	0.9829	0.9938	0.9977
8.8	0.01148	87.0963	0.01141	0.24951	0.43677	0.5773	0.6827	0.76193	0.8213

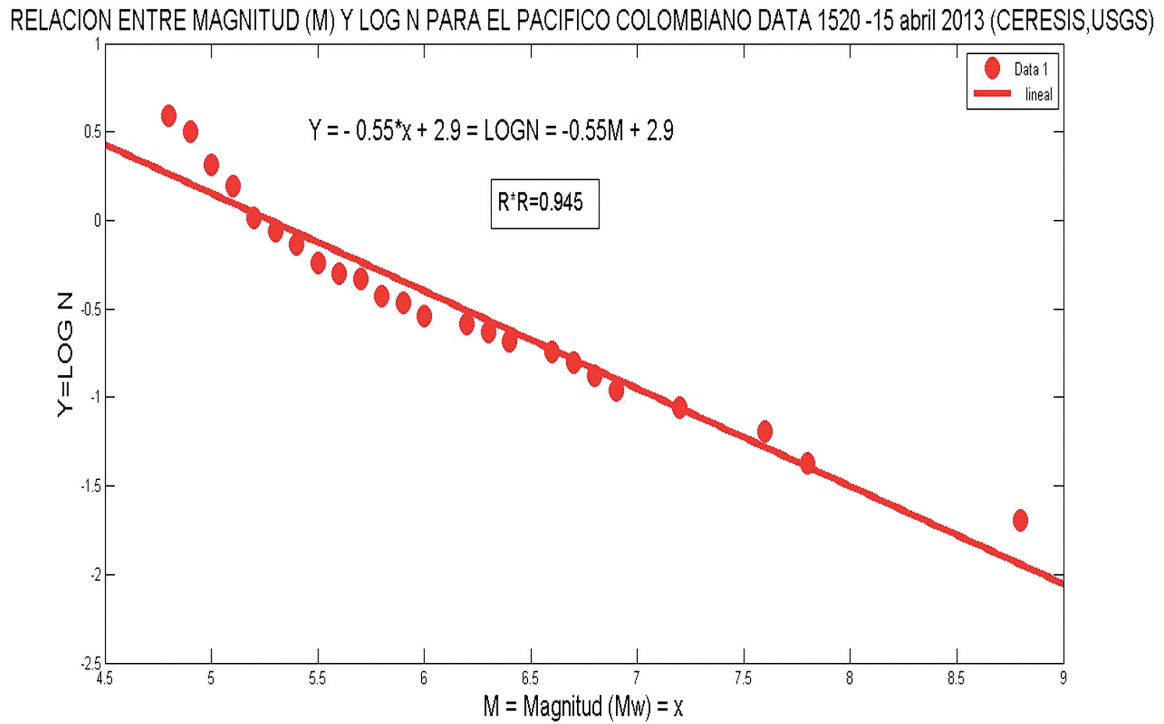


**Figura 3.** Variación de sismo máximo anual para el Pacífico colombiano, data (1520-15 abril 2013, Ceresis, USGS) latitud 0° a 4°.



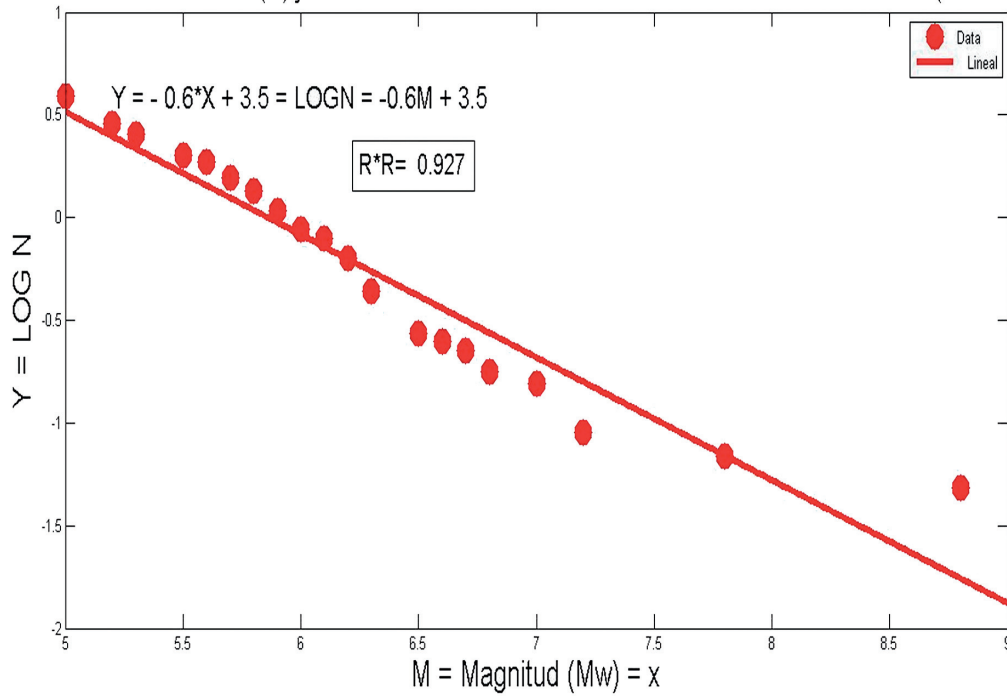


**Figura 4.** Variación de sismo máximo anual para el Pacífico Colombiano data (1520-15 abril 2013, Ceresis, USGS) latitud 0° a 7.5°.

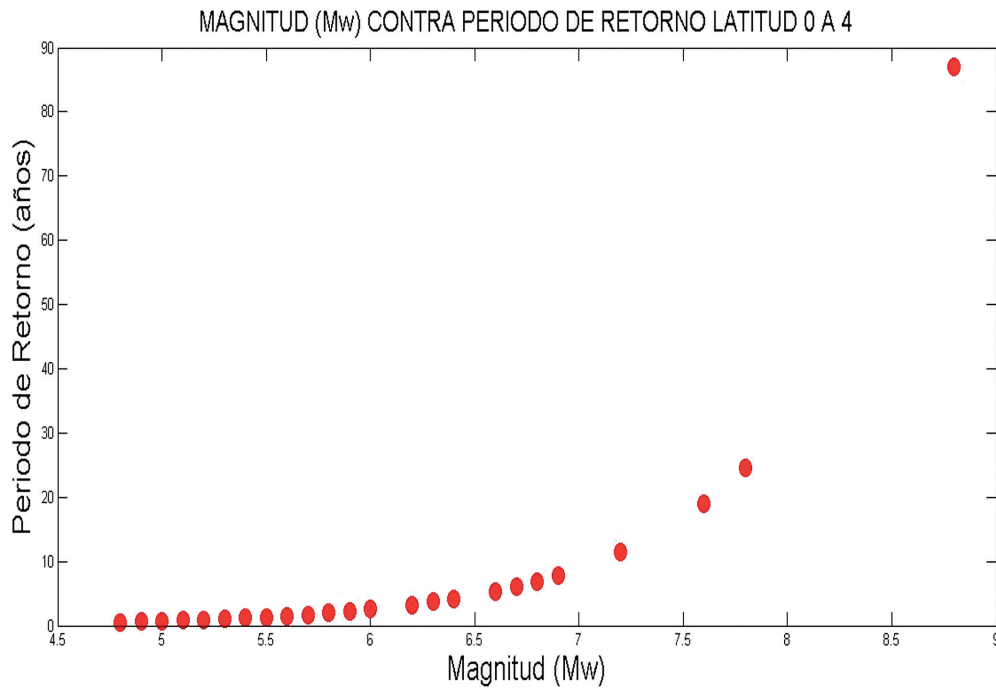


**Figura 5.** Relación entre magnitud y log N para el Pacífico colombiano, data (1520-15 abril 2013, Ceresis, USGS) latitud 0° a 4°.

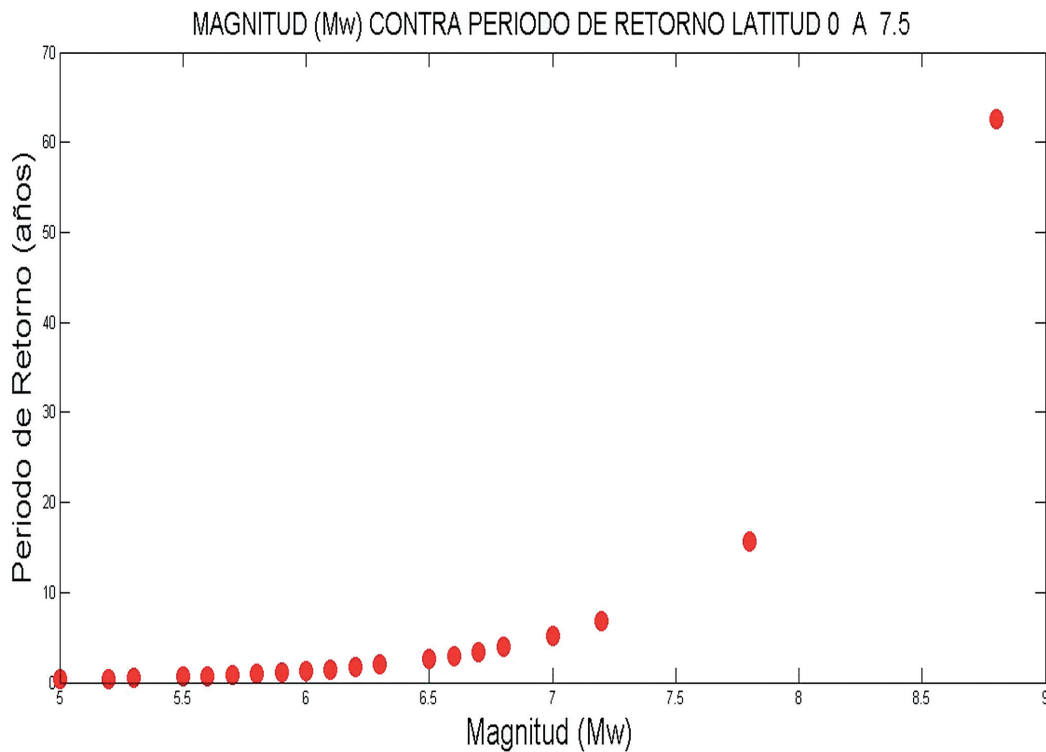
RELACION ENTRE MAGNITUD (M) y LOG N PARA EL PACIFICO COLOMBIANO DATA 1520 - 15 abril 2013 (CERESIS, USGS)



**Figura 6.** Relación entre magnitud y LOGN para el Pacífico colombiano, data (1520-15 abril 2013 Ceresis, USGS) latitud 0° a 7.5°.



**Figura 7.** Magnitud (Mw) contra período de retorno latitud 0° a 4°.



**Figura 8.** Magnitud (Mw) contra período de retorno latitud 0° a 7.5°.

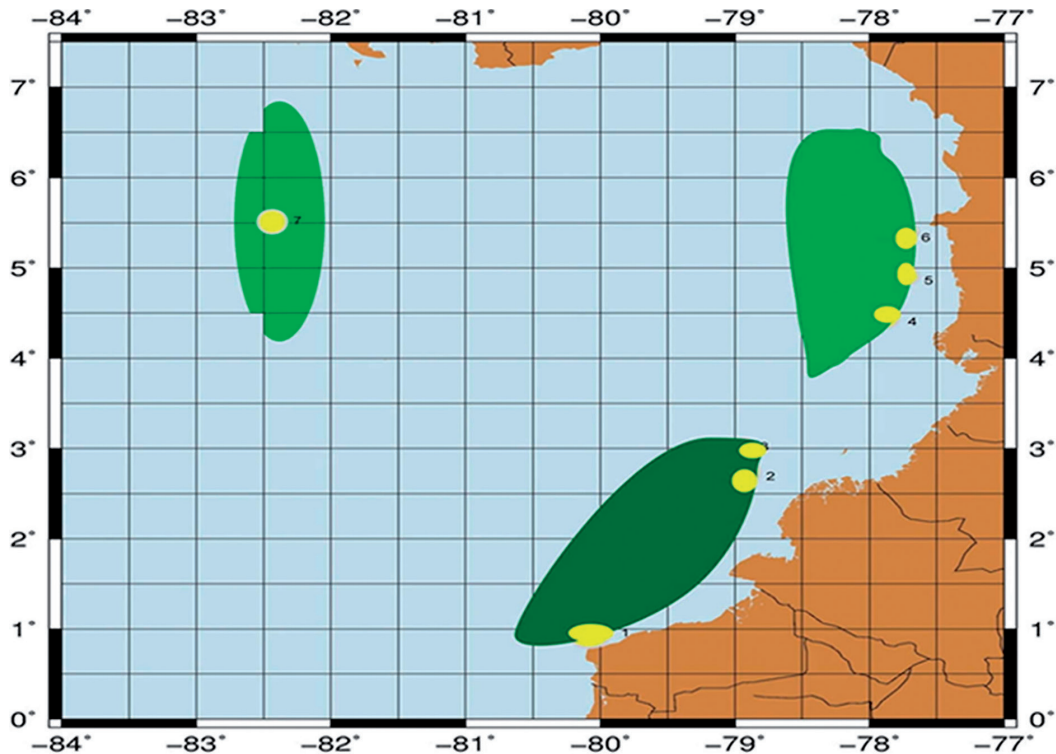
## DISCUSIÓN

En las dos subregiones se obtuvieron valores de  $b$  pequeños indicando la sismicidad en los límites de dos placas tectónicas (interplacas) y un alto número de sismos grandes respecto a los pequeños. El valor de  $a = 2.9$  de la subregión 1 es menor que el valor de  $a = 3.5$  de la subregión 2, como era de esperarse, debido a que esta última tiene una zona de estudio más grande. Referente a la subregión 1 se puede decir que hay en promedio anual 2.9 sismos con magnitudes mayores a 4 Mw. En la subregión 2 hay en promedio anual 3.5 sismos con magnitudes mayores a 4 Mw.

A partir de los mecanismos focales se aprecia, por medio del balón de playa, que los sismos

en las dos zonas son generados por diferentes fallas (Fig. 2). Mediante la estadística de valores extremos, utilizando la Ecuación de Gumbel tipo I se obtuvieron los tiempos de retorno para diferentes magnitudes, en un espacio de tiempo de 100 años. En la subregión 1 la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 7.8 Mw es del 98 %, con período de retorno de 24.54 años. En la subregión 2 la probabilidad de ocurrencia de un sismo de igual magnitud es del 99 %, con período de retorno de 15.65 años.

Con base en los resultados encontrados, el cálculo de probabilidad de eventos sísmicos normales e inversos y los mecanismos focales pueden establecerse tres zonas potenciales generadoras de tsunamis, relacionadas con la zona de subducción y la interacción entre la placa de Nazca, Sudamericana y Los Cocos (Fig. 9).



**Figura 9.** Fuentes generadoras de tsunami, con siete posibles puntos tsunamigénicos.

## CONCLUSIONES

En la subregión 2 la media y moda son mayores, debido a su mayor extensión tiene 1589 sismos contra 574 de la subregión 1. En la subregión 2 los sismos están distribuidos más cercanos a la media, debido a que su desviación estándar es menor que en la subregión 1.

En las dos subregiones se obtuvieron valores *b* pequeños, indicando la sismicidad en los límites de dos placas tectónicas (interplacas) y un alto número de sismos grandes respecto a los pequeños.

Referente a la subregión 1, puede decirse que hay en promedio anual 2.9 sismos con magnitudes mayores a 4 Mw, con respecto a la subregión 2 que reporta un promedio anual 3.5 sismos con magnitudes mayores a 4 Mw.

A partir del análisis de los mecanismos focales se entiende que los sismos en las dos zonas son generados en su mayoría por fallas normales o inversas.

Mediante la estadística de valores extremos, utilizando la Ecuación de Gumbel tipo I, se obtuvieron los tiempos de retorno para diferentes magnitudes, en un espacio de tiempo de 100 años la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 7.8 Mw es del 99 %, con periodo de retorno de 15.65 años en las latitudes de 0° a 7.5° longitudes -84° hasta -77°. En el mismo espacio de tiempo la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud 7.8 Mw es del 98 % con periodo de retorno de 24.54 años en las latitudes de 0° a 4° longitudes -84° a -77°. Si se tiene en cuenta que en la subregión 1 de estudio el último sismo con magnitud de momento aproximada a 7.8 Mw fue en 1979, se deduce que se ha superado el periodo de retorno a la fecha, ya que han transcurrido más de 33 años.

La pérdida de vidas humanas a causa del tsunami de 1979 fue significativa (452 víctimas), en la actualidad con la densidad poblacional aproximada de más de 500.000 habitantes, sumando los pobladores de los puertos de Tumaco y Buenaventura expuestos, el número de vidas humanas que se perdería crecería de manera exponencial.

## LITERATURA CITADA

- [1] Sánchez R, Puentes M. Estimación de la amenaza por tsunami en el municipio de San Andrés de Tumaco, Pacífico Colombiano, utilizando información LiDAR. Bol. Cient. CIOH 2012;30:29-42.
- [2] Restrepo JC, Otero LJ. Modelación numérica de eventos tsunamigénicos en la Cuenca Pacífica Colombiana-Bahía de Buenaventura. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 2007;31(120): 363-377. ISSN 0370-3908.
- [3] Gusiakov V. Tsunami generation potential of different tsunamigenic regions in the Pacific. Marine Geology 2005;215:3-9.
- [4] Hayes G, Furlong K. Quantifying potential tsunami hazard in the Puysegur subduction zone, south of New Zealand. Geophysical Journal 2010;183:1512-1524.
- [5] Ioualalen M, Ratzov G. The tsunami signature on a submerged promontory: the case study of the Atacames Promontory, Ecuador, Geophysical Journal 2011;184:680-688.
- [6] Pedraza P. Geometría de la subducción de la placa Nazca en el suroeste de Colombia, implicaciones tectónicas y sísmicas. Tesis para optar al título de magister. Universidad Nacional de Colombia; 2006.
- [7] Monsalve H, Mora H. Tectónica de placas, sismicidad y deformación en el noroccidente colombiano; 1999.
- [8] Adamek S, Frohlich C, Pennington WD. Seismicity of the Caribbean-Nazca Boundary; constraints of Microplate Tectonics of the Panama Region. Journal of Geophysical Research 1988;93:2053-2075.
- [9] Pennington WD. Subduction of the Eastern Panama basin and seismotectonics of Northwestern South America, Journal Geophysical research, 86, 10753-10770.
- [10] Usselman P. 2010. Geodinámica y ocupación humana del litoral Pacífico en el sur de Colombia y Ecuador desde el Holoceno (últimos 10000 años), Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines 1981;39(3):589-602.
- [11] Gumbel EJ. Statistics of Extremes, Columbia University Press. N.Y., USA; 1958.
- [12] Gutenberg B, Richter CF. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration, Bull. Seism. Soc. of America 1956;32(3) July.
- [13] Tezcan SS. Probability Analysis of Earthquake Magnitudes, Turkish Earthquake Foundation; 1996.

