

**DISTRIBUCION DE LA ACTIVIDAD SISMICA EN LA REGION
COMPRENDIDA ENTRE LAS LONGITUDES 60°W Y 100°W,
LATITUDES 20°N Y 20°S Y SU INFLUENCIA EN
VENEZUELA
PERIODO 1964 - 1977**

C. Badell y Y. Lugo
Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico
Universidad del Zulia
Maracaibo - Venezuela

RESUMEN

De la actividad sísmica reportada por el Centro Internacional de Sismología (I. S. C.) en el período 1964-1977, y estaciones sismográficas localizadas en el territorio venezolano en el período 1973-1976, un total de 7400 eventos sísmicos de magnitud $m_b > 3.5$ tuvieron su epicentro en la región comprendida entre $20^{\circ} S > \varphi < 20^{\circ} N$, $60^{\circ} W < \lambda < 100^{\circ} W$; de esta actividad un total de 428 sismos tuvieron su epicentro dentro del territorio venezolano, y con una distribución espacial que define en Venezuela una alta densidad de movimientos sísmicos en el occidente y en el oriente, así como una dispersa actividad sísmica en el litoral central.

Del análisis estadístico realizado, se pudo inferir que la relación frecuencia-magnitud es:

$$\text{Log } N = 6.69 - 1.02 m_b \text{ (Venezuela)}$$

$$\text{Log } N = 7.96 - 1.00 m_b \text{ (Región total analizada)}$$

mientras que la distribución de máxima energía sísmica asociada con la ocurrencia de eventos de magnitud $m_b \geq 4.5$, resultó ser de un período de retorno de siete (7) años para toda la región analizada incluyendo a Venezuela.

ABSTRACT

From the data given by the International Seismological Centre (1964 - 1977) and seismographical stations located in Venezuela (1973 - 1976), a total of 7400 earthquakes of body wave magnitude $m_b > 3.5$ had epicenters in the region between latitude $20^{\circ} N$ and $20^{\circ} S$, and longitude $60^{\circ} W$ and $100^{\circ} W$. From this activity a total of 428 earthquakes were located in the west and north east part of Venezuela, so as a minor seismic activity occurred in the central coastal region of the country.

The magnitude - frequency relationship obtained from the statistical analysis of the data is :

$$\text{Log } N = 6.69 - 1.02 m_b \text{(for Venezuela)}$$

$$\text{Log } N = 7.96 - 1.00 m_b \text{ ..(for the region analyzed)}$$

The seismic activity energy distribution associated with earthquakes of body wave magnitude $m_b \geq 4.5$, shows a 7 year periodicity for the whole region including Venezuela.

INTRODUCCION

Los estudios hechos recientemente sobre la neotectónica en el Caribe y norte de América del Sur indican que Venezuela está influenciada por una elevada actividad tectónica, ya que su ubicación geográfica la sitúa en la zona de interacción de las grandes placas tectónicas del Caribe, América del Sur, Cocos y Nazca; este tectonismo se pone de manifiesto por la frecuente ocurrencia sísmica en el territorio venezolano, en el cual están localizadas regiones de variada actividad sísmica, y algunas de ellas de muy alta peligrosidad en el presente.

En este estudio, que constituye la segunda etapa de un amplio programa de investigaciones sismológicas llevadas a cabo en el Departamento de Geofísica de la Escuela de Ingeniería Geodésica, se hace una reevaluación de la actividad sísmica ocurrida en la región limitada por $20^{\circ} S > \varphi < 20^{\circ} N$ y $60^{\circ} W < \lambda < 100^{\circ} W$, la cual incluye a Venezuela así como la placa tectónica del Caribe y parte de las placas Nazca, Cocos y Suramérica (Figura 1, Tablas 1 y 2).

Un análisis estadístico de la actividad sísmica ocurrida en la región antes mencionada, y reportada tanto por el Centro Internacional de Sismología (I. S. C.) como por estaciones sismográficas localizadas en el territorio venezolano, permitió obtener valores característicos en las constantes a y b de la fórmula empírica de Richter para toda la región analizada, mientras que la distribución espacial y temporal de los eventos sísmicos según su magnitud, permitió obtener sobre mapas definidos en proyección Mercator las regiones de mayor riesgo sísmico y la migración en estas regiones de la actividad sísmica registrada en ellas.

PROCEDIMIENTO DE ANALISIS.

La expresión matemática empleada en esta investigación para determinar la frecuencia sísmica en un determinado intervalo de tiempo y en un rango específico de magnitud, viene dada por la bien conocida fórmula empírica de Richter,

$$\text{Log } N(m_b) = a - bm_b \quad (\text{ec. 1})$$

m_b = magnitud corpórea de los eventos sísmicos
 N = frecuencia de ocurrencia de un sismo de magnitud mayor o igual a m_b
 a, b = constantes empíricas a determinar y que están estrechamente vinculadas con la actividad sísmica y energía sísmica liberada en ellos.

Para el cálculo de los constantes a y b se hicieron las siguientes consideraciones:

- i.- La magnitud de los eventos sísmicos fue clasificada por intervalos y a cada intervalo se le asignó un número clave, además de que se escogió como magnitud representativa de cada intervalo al promedio de los extremos que lo forman.
- ii.- Para la aplicación de la ecuación 1 fue necesario, en base a la frecuencia de ocurrencia, la determinación de la frecuencia acumulativa inversa para cada región en períodos de tres años, al igual que para todo el período de tiempo 1964 - 1977.
- iii.- El análisis correspondiente fue realizado individualmente para los intervalos de profundidad focal: $h \leq 70$ km, $70 < h \leq 150$ km, $150 < h \leq 300$ km, y $h > 300$ km, tanto para períodos trianuales como para todo el período de tiempo 1964 - 1977, identificados igualmente por Región Sísmica.

Sean $m_{b1}, m_{b2}, m_{b3}, \dots, m_{bn}$, las magnitudes representativas de cada intervalo de magnitud considerado y $N_1, N_2, N_3, \dots, N_n$ sus respectivas frecuencias acumulativas inversas; entonces, aplicando la ec. 1 obtenemos como ecuaciones generales de observación y de error las siguientes respectivamente:

$$\log N_i = a - b m_{bi} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{ec. 2})$$

$$v_i = a - b m_{bi} - \log N_i \quad (\text{ec. 3})$$

aplicando mínimos cuadrados a la ecuación de error (ec. 3) se tiene:

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = \sum_{i=1}^n (a - b m_{bi} - \log N_i)^2 = \min \quad (\text{ec. 4})$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n v_i^2}{\partial a} = n a - b \sum_{i=1}^n m_{bi} - \sum_{i=1}^n \log N_i = 0 \quad (\text{ec. 5})$$

$$\frac{\partial \sum_{i=1}^n v_i^2}{\partial b} = a \sum_{i=1}^n m_{bi} - b \sum_{i=1}^n m_{bi}^2 - \sum_{i=1}^n \log N_i \cdot m_{bi} = 0 \quad (\text{ec. 6})$$

las ecuaciones (5) y (6) forman el sistema de ecuaciones normales cuya solución es:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \cdot \sum_{i=1}^n m_{bi} - n \sum_{i=1}^n \log N_i \cdot m_{bi}}{n \sum_{i=1}^n m_{bi}^2 - \left(\sum_{i=1}^n m_{bi} \right)^2} \quad (\text{ec. 7})$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \log N_i + a \sum_{i=1}^n m_{bi}}{n} \quad (\text{ec. 8})$$

Determinadas las constantes a y b es posible obtener en base a la frecuencia sísmica de toda la región, un valor de magnitud mínima (m_{bmin}) a partir de la siguiente ecuación:

$$m_{bmin} = \frac{a - \log N}{b} \quad (\text{ec. 9})$$

a fin de establecer cual es la magnitud promedio (\bar{m}_b) de los eventos sísmicos en esa región mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{m}_b = m_{bmin} + \frac{1}{b \ln 10} \quad (\text{ec. 10})$$

la que combinada con la ecuación (1) permite obtener para cada región sísmica analizada en este estudio un valor mínimo para la frecuencia sísmica tal como sigue:

$$N_{min} = 10^{(a - b \cdot m_{bmin})} \quad (\text{ec. 11})$$

Conocida la magnitud de un terremoto, la energía sísmica liberada en él puede ser calculada por la fórmula empírica:

$$\log E = 5.8 + 2.4 m_b \quad (1) \quad (\text{ec. 12})$$

donde: E viene expresada en ergios.

La variación anual de la energía sísmica fué calculada aplicando mínimos cuadrados a la energía sísmica acumulativa y cuya expresión resultó ser:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \sum_{i=1}^n t_i - n \sum_{i=1}^n E_i t_i}{\left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (\text{ec. 13})$$

donde: t_i = años considerados en este estudio; $i=1, 2, 3, \dots, n$

E_i = energía acumulada hasta el año t_i respectivo

$\frac{\Delta E}{\Delta t}$ = variación anual de la energía liberada

n = número de años en estudio

Finalmente, haciendo uso de dos programas en lenguaje Fortran fue posible realizar 38 mapas temáticos de la actividad sísmica en proyección Mercator, y definido por la expresión matemática

$$Y = L_n (\tan \varphi + \sec \varphi) \quad (\text{ec. 14})$$

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

La actividad sísmica ocurrida en toda la región en estudio (Fig 2), está distribuida por región sísmica

ca de la siguiente forma:

REGION SISMICA	PORCENTAJE (%)
R - 5	25.0
R - 6	19.0
R - 7	23.2
R - 8	32.8

De la sismicidad reportada para la región sísmica R - 7, le corresponde a Venezuela un 25.0 %, lo cual es equivalente a un 5.8 % de la actividad sísmica de toda la región analizada. La distribución geográfica de la actividad sísmica ocurrida en Venezuela durante este período analizado, evidencian su asociación con los tres sistemas de fallas más importantes, Boconó, Oca y El Pilar, localizadas a todo lo largo y ancho de los Andes Venezolanos y nor-este de Sierra de Perijá, incluyendo el anticlinorium de Falcón, y en el nor-oriente del país respectivamente.

Del análisis espacial de la actividad sísmica para toda la región en estudio es posible deducir que los sismos de mayor magnitud ocurridos tienen focos comprendidos entre 0 y 70 kilómetros de profundidad. En general, la tendencia en toda la región es a la ocurrencia de eventos superficiales, siendo las regiones sísmicas R - 7 y R - 8 en las que se produce la mayor incidencia de focos sísmicos intermedios y profundos en comparación con las otras regiones sísmicas analizadas R - 5 y R - 6, en las que la actividad sísmica tiende siempre a ser superficial, producto del contacto entre las placas tectónicas del Pacífico, Suramérica y Caribe, así como del volcanismo presente en esas regiones. En Venezuela, focos de actividades sísmicas de profundidad intermedia ($70 < h \leq 300$ km) tuvieron ocurrencia específicamente en el Golfo de Paria y en la región Sur de la Sierra de Perijá.

La energía liberada en el foco de un sismo y transformada en energía sísmica fue, para el período de tiempo analizado, de 2.82×10^{22} ergios para toda la región (Fig. 3a); esta energía distribuida por región sísmica fue la siguiente:

REGION SISMICA	ENERGIA SISMICA	PORCENTAJE (%)
R - 5	3.2982×10^{21}	11.68
R - 6	5.3556×10^{21}	18.97
R - 7	4.7406×10^{21}	16.79
R - 8	1.4839×10^{22}	52.56

Como se observa, en la región R - 8 se generó más de la mitad de la energía sísmica de toda la región en estudio, correspondiéndole a Venezuela el 4.26 % del total de energía liberada; comparando con la energía sísmica liberada en las regiones sísmicas R-5 y R - 6 en conjunto, la energía sísmica liberada en Venezuela representa el 13.9%, lo que permite indicar que hubo una alta frecuencia de eventos sísmicos de magnitud considerable ($m_b \geq 4.5$) en el territorio venezolano.

Considerando que la liberación de energía en la región analizada es el producto de los esfuerzos acumulados por la interacción de las mismas placas tectónicas localizadas en dicha región, y también por la orogenia existente en ella, entonces los períodos de tiempo de seis a siete años (1964, 1971, 1977) donde se alcanzó un mínimo, y los de tres a cuatro años (1967, 1970, 1974) donde se alcanza un máximo (figuras 3a - 3b, 4a - 4b), pueden interpretarse como ciclos de mínima y máxima liberación de energía.

Comparando esto último con lo obtenido del cálculo de la variación anual de la energía para la región en estudio (2.2579×10^{21} ergios/año), para la región Sísmica R - 7 (3.9520×10^{20} ergios/año), y para Venezuela (1.0701×10^{20} ergios/año), se puede entonces inferir que ha de esperarse un incremento potencial de energía de los próximos tres o cuatro años contados a partir del año 1977, de tal forma que pueda alcanzarse el nivel máximo de energía capaz de ser liberado en la región. Existe pues el riesgo de que ocurran eventos sísmicos de magnitud $m_b \geq 5.5$ en cualquiera de las regiones sísmicas incluidas en este análisis en los próximos cuatro años contados desde 1977.

Los valores de las constantes a y b obtenidos a partir de la ecuación (1), y que definen la experiencia sísmica de una región para un intervalo de tiempo determinado, resultaron ser para el período de tiempo 1964 - 1977 los siguientes:

REGION SISMICA	a	b
R - 5	7.96	1.15
R - 6	7.35	1.02
R - 7	7.58	1.07
R - 8	7.12	0.91
Venezuela	6.69	1.02
Región total	7.96	1.00

Un análisis a las rectas compensadas que definen los valores a y b permite inferir un cuasiparalelismo entre ellas a excepción de la recta que define la actividad sísmica de la región R - 5; de igual forma se observa un comportamiento semejante entre las rectas compensadas que definen la actividad sísmica de la región R - 7 y la de Venezuela. En general, dado que los eventos de mayor magnitud ocurridos durante el período analizado tuvieron sus focos comprendidos en profundidades entre 0 y 70 km los valores de las constantes a y b características para toda la región analizada están determinados por la actividad sísmica de carácter superficial e intermedia, y altamente influenciada por la actividad sísmica ocurrida en la región sísmica R-8 donde hubo una mayor liberación de energía manifestada por los valores de las constantes a y b , los que resultaron menores que los correspondientes a las otras regiones sísmicas analizadas.

AGRADECIMIENTO

El autor desea agradecer a la Lic. Alix Vasquez, de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, por las facilidades dadas para el manejo de la información analizada en este trabajo. Igualmente al Departamento IDS de la Empresa Maraven S. A., en Lagunillas, por el soporte técnico para la elaboración de los mapas de distribución espacial de la actividad sísmica analizada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1) BADELL, C. y BORJAS, C., "Distribución de la actividad sísmica en la región comprendida entre

las longitudes 60°W y 100°W, latitudes 20° N y 20°S y su influencia en Venezuela. Período 1964-1972", I Congreso Ibero-Latino Americano de Geofísica, Caracas, Nov. 1977.

- 2) GEOLOGICAL SURVEY CIRCULAR 791, "Seismograph Station Codes and Characteristics", U. S. Department of the Interior, 1978.
- 3) INSTITUTO SISMOLOGICO (Observatorio Cagigal), "Boletines Sísmicos mensuales", Años 1973, 1974, 1975, 1976.
- 4) INTERNATIONAL SEISMOLOGICAL CENTRE (I. S. C.), "Boletines Semestrales", Años 1973, 1974, 1975, 1976, 1977.

Recibido el 18 de octubre de 1982

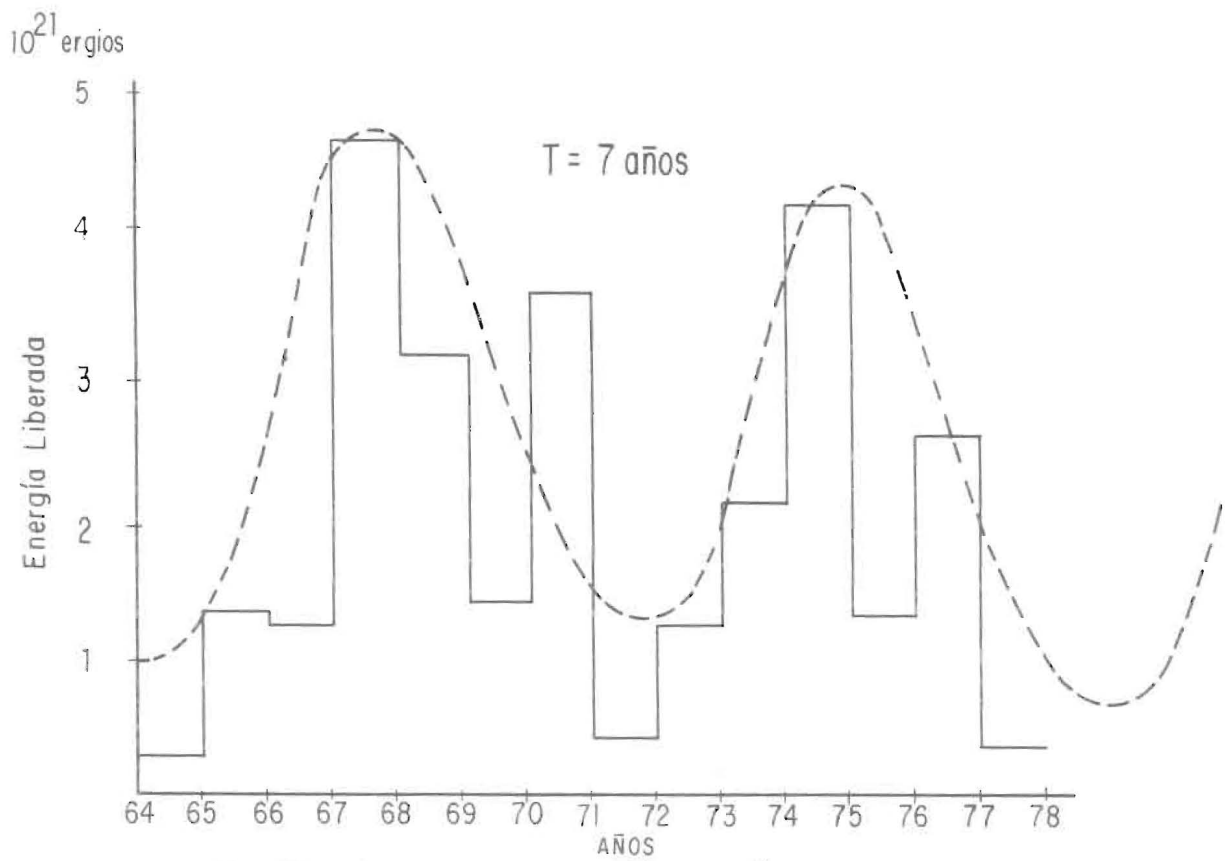


Fig. 3-a: Energía sísmica liberada en toda la región en estudio.
Período 1964-1977.

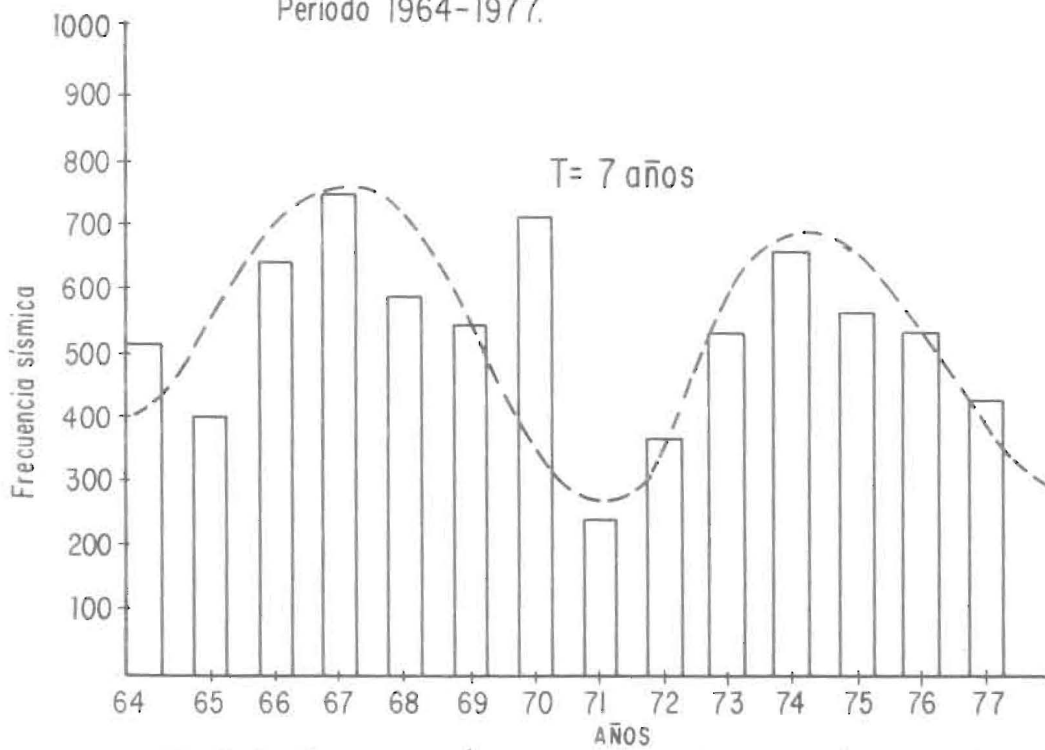
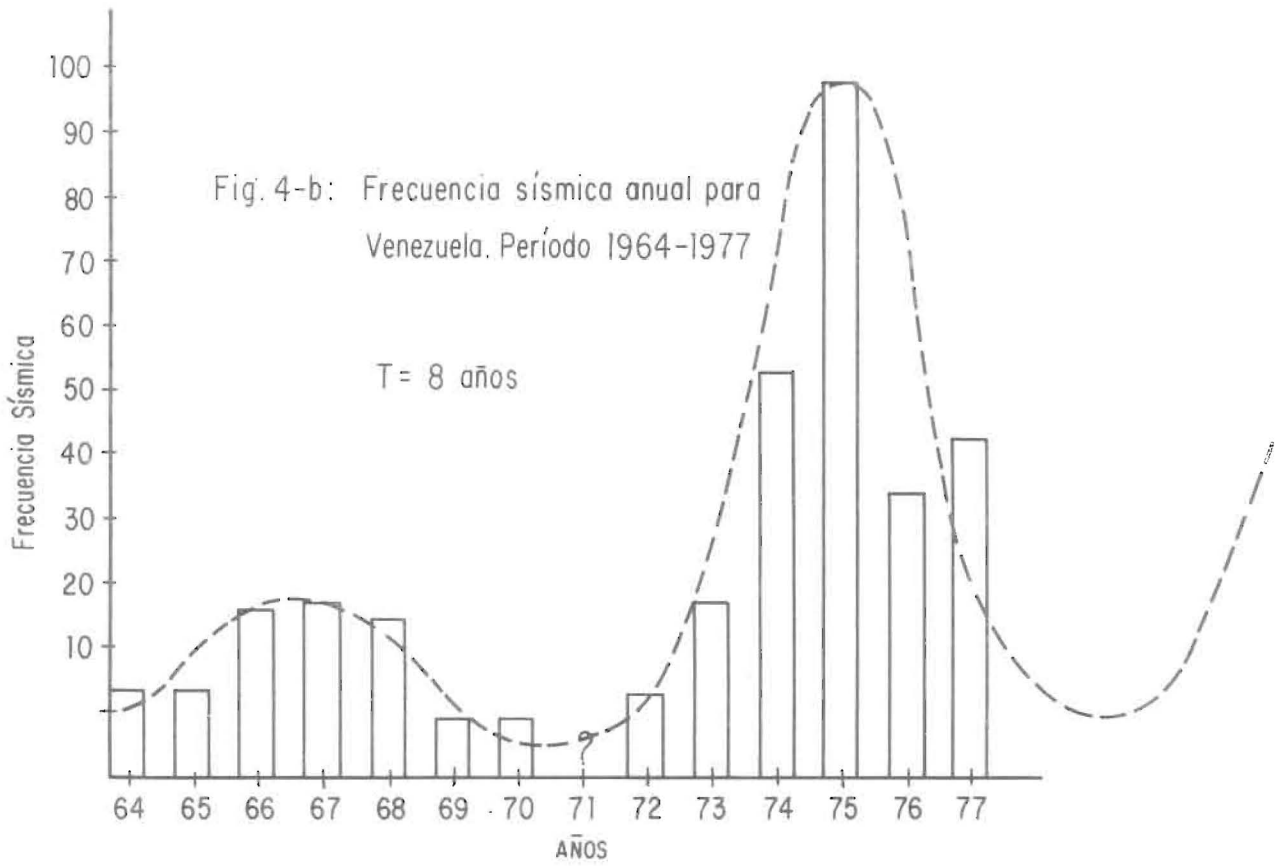
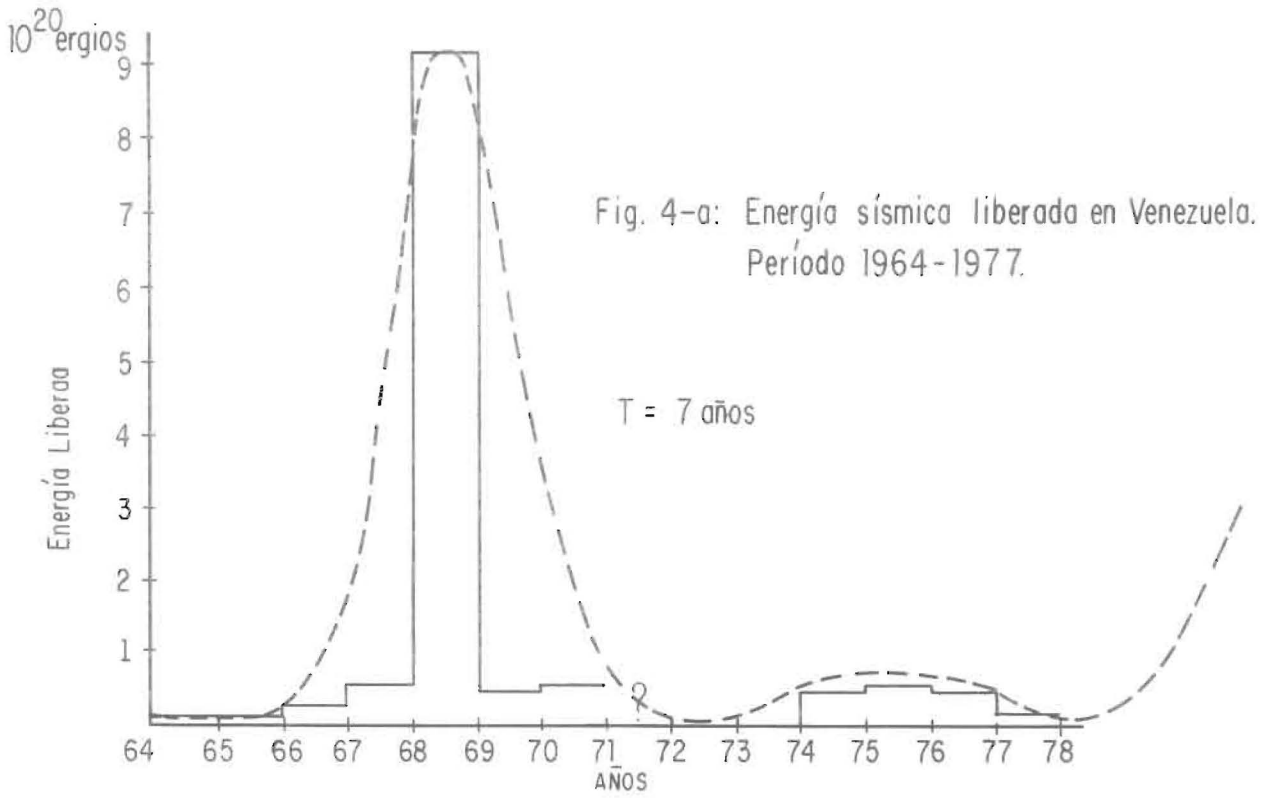


Fig. 3-b: Frecuencia sísmica anual para toda la región en estudio.
Período 1964-1977.



PLACA	AREA	AREA CONTINENTAL
Pacífico, PAC	2.664	0.046
Eurasia, EUA	1.675	1.463
América, AME	2.486	1.494
India, IND	1.503	0.531
Africa, AFR	1.931	0.871
Antártica, ANT	1.477	0.442
Nazca, NAZ	0.405	0.
Cocos, COC	0.076	0.
Philipina, PHL	0.141	0.
Caribe, CAR	0.087	0.034
Arabia, ARB	0.121	0.104

TABLA 1: Distribución de Areas de las Placas Tectónicas.
Radio Terrestre = 1. (1)

PLACA	LIMITES DE PLACA	% EN ESTUDIO (R = 1)
Caribe	5°N - 20°N, 60°W - 90°W	100
Nazca	45°S - 10°N, 75°W - 115°W	40
Cocos	0° - 23°N, 85°W - 110°W	80
Sur América	60°S - 20°N, 0° - 110°W	15

TABLA 2: Porcentaje aproximado de las Placas Litosféricas en estudio. (1)

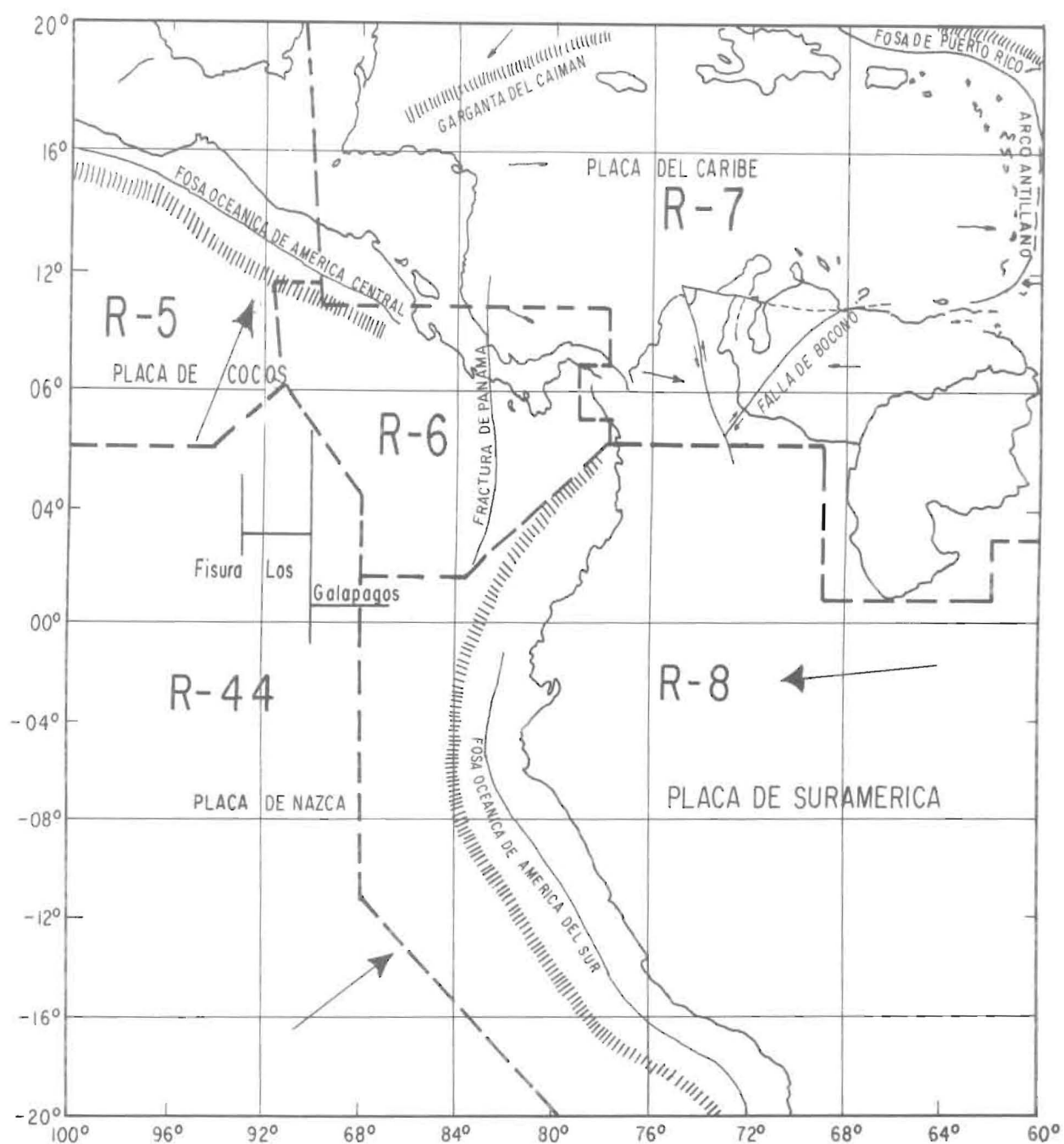


Fig. 1.- Distribución por Regiones Sísmicas de la región en estudio
Proyección Mercator.

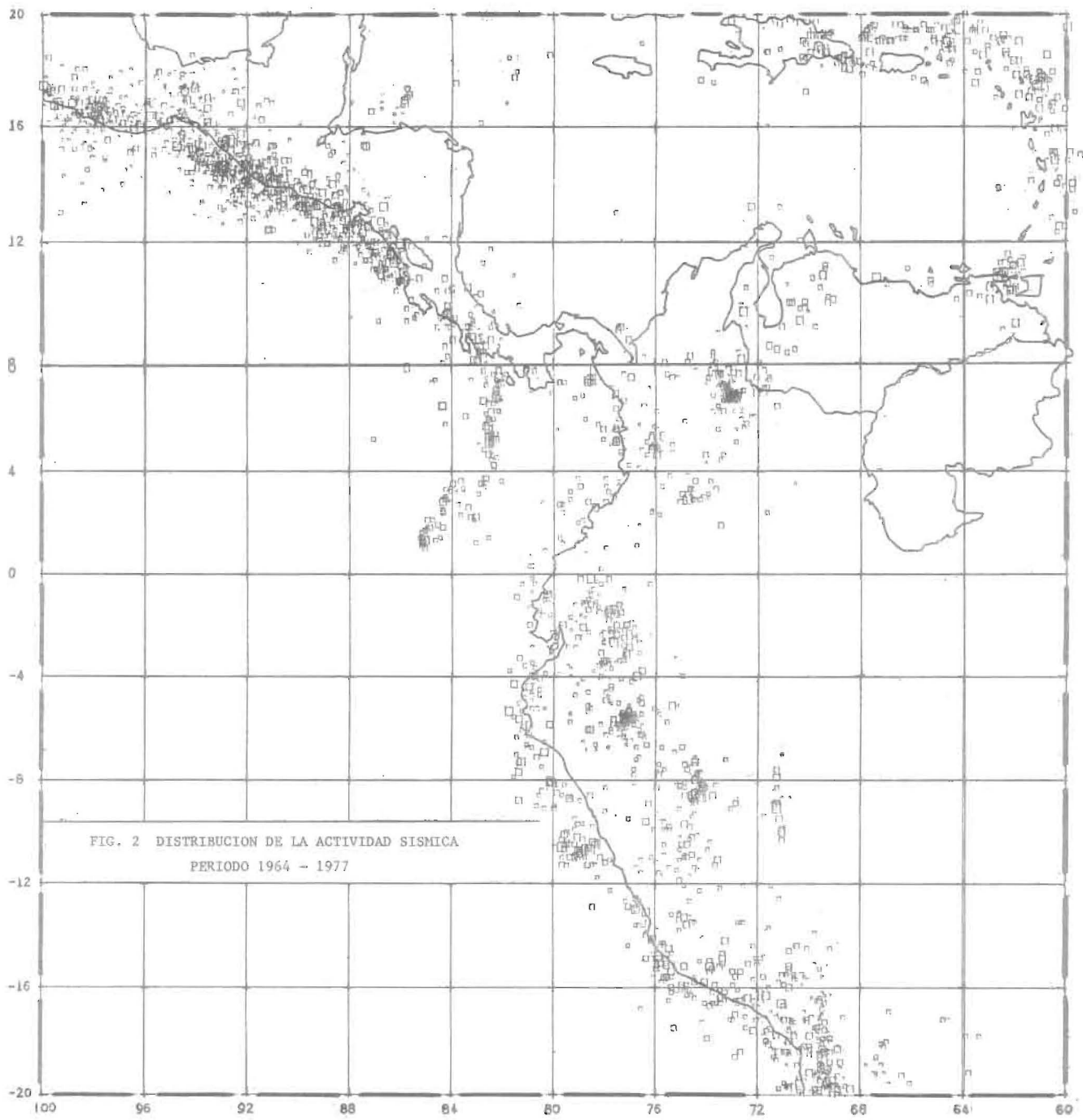


FIG. 2 - DISTRIBUCION DE LA ACTIVIDAD SISMICA -AÑOS 64-77- PROYECCION MERCATOR