

MECANISMO FOCAL DE ALGUNOS EVENTOS SISMICOS

César Badell, Luis A. Marin
Universidad del Zulia
Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico

OCURRIDOS EN EL OCCIDENTE DE VENEZUELA

(Al Libertador Simón Bolívar,
en el bicentenario de su nacimiento)

RESUMEN

La mayoría de los eventos sísmicos más importantes ocurridos en la región occidental de Venezuela durante el período 1964-1977, se produjeron a profundidades corticales. Del estudio del mecanismo focal de los mismos, se pudo concluir que ellos no están asociados a las fallas tradicionalmente consideradas como muy activas e importantes por su considerable extensión y que afectan grandes regiones. La dirección de los esfuerzos máximos de compresión presentan dos orientaciones bien definidas; una orientación suroeste-noreste (S 70°W) que los asocia con la interacción entre la placa de Nazca y Sur América, y otra orientación noroeste-sureste (N 10°W) que los asocia con fallas de cabalgamiento.

ABSTRACT

The most important earthquakes to the west of Venezuela during the period 1964-1977 occurred at shallow depths. From the focal mechanism it is possible to conclude that they are not associated to the most important faults. The maximum compressive stress is defined by two directions; a southwest-northeast (S 70°W) direction associated with an east-west convergence of the Nazca and South American plates, and a northwest-southeast (N 10°W) associated with thrust faults.

INTRODUCCION

Venezuela es un país con regiones sísmicamente activas(2,18), y como tal, requiere del desarrollo de técnicas de investigación que permitan determinar de la forma más aproximada posible, las áreas de mayor riesgo sísmico y su asociación con las estructuras geológicas existentes.

Los terremotos, son producto de un cambio brusco en la situación de equilibrio de los esfuerzos en el interior de la Tierra, y aunque el mecanismo o proceso físico de éstos no se conoce totalmente, sí se ha podido demostrar que todos los terremotos de origen tectónico tienen características que permiten inferir que los mismos son generados por un

mecanismo de doble par de fuerzas, es decir, por deslizamiento sobre algún tipo de plano de falla existente (19).

METODO UTILIZADO EN ESTE ESTUDIO

El método utilizado para la determinación del mecanismo focal de los eventos sísmicos incluidos en este trabajo, es esencialmente gráfico, y consistió en la representación gráfica de la dirección del primer impulso de la onda compresional P, basado en el cálculo analítico previo de las curvas que permiten determinar el ángulo de emergencia (EH) respecto a la distancia epicentral (Δ) para dicha onda (5,19):

$$EH = \text{Arc Sen} \left(\frac{R_0}{R_d} \cdot \frac{V_d}{111,11} \cdot \frac{dt}{d\Delta} \right)$$

donde,

EH = ángulo de emergencia en el foco

R₀ = radio terrestre = 6371 km

H = profundidad focal

R_d = distancia foco-centro de la Tierra = R₀ - H

V_d = velocidad de la onda en la región focal (Km / seg)

$\frac{dt}{d\Delta} = \frac{1}{V}$ = parámetro del rayo o pendiente de la curva tiempo de tránsito para la onda sísmica considerada (seg/grados)

Tanto V_d como $\frac{dt}{d\Delta}$, fueron calculados para intervalos de 0,5° de distancia epicentral y para cada 10 kilómetros de profundidad focal, tomando como modelo de propagación el correspondiente a la publicación especial del B.S.S.A. "1968 SEISMOLOGICAL TABLES FOR P PHASES" (15).

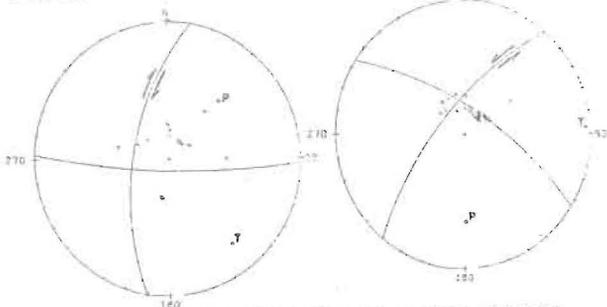
De la actividad sísmica reportada en el período 1964-1977, tanto por el International Seismological Center como por el Instituto Sismológico del Observatorio Cagigal (Fig. 9), se escogieron para el análisis del mecanismo focal un total de siete eventos sísmicos que reflejen su importancia por su magnitud mayor o igual a 4,5 en la escala de Richter, y fueron registrados por un número mínimo

de 20 estaciones bien distribuidas geográficamente. Estos eventos seleccionados resultaron estar localizados en zonas montañosas o muy cercanas a ellas (Cordillera de Mérida, Sierra de Perijá), las cuales son sísmicamente muy activas (2).

RESULTADOS OBTENIDOS. ANALISIS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio, se presentan en forma resumida en la Tabla 1, y en sus correspondientes figuras del 1 al 7.

EVENTO 1. El epicentro de este evento sísmico está localizado muy cerca del extremo norte de la Sierra de Perijá, aproximadamente a 10 kilómetros S-W del Embalse Socuy. La distribución de los esfuerzos, aunque no es uniforme, genera una gráfica bien definida (Fig. 1). Los elementos calculados interpretados en base a la información geológica disponible para la región, permite inferir que el plano nodal con orientación N 10°E y movimiento transcurrente dextral, coincide aproximadamente con la orientación y movimiento asignado a la falla "Agua Dulce" (9), por lo que este plano puede identificarse como el plano de falla. El buzamiento predominante de 60°W que presenta este plano de falla, ofrece la incertidumbre en la localización del epicentro.



SOLUCION GRAFICA DE LOS PLANOS NODALES

Fig. 1
FECHA DEL EVENTO= 20.10.1969
COORD'S EPICENT.= 10.6N.72.3W
PROF.=7Kms
o = COMPRESION
Δ = DILATAION

Fig. 2
FECHA DEL EVENTO= 20.10.1969
COORD'S EPICENT.= 10.9N.72.5W
PROF.=36Kms
o = COMPRESION
Δ = DILATAION

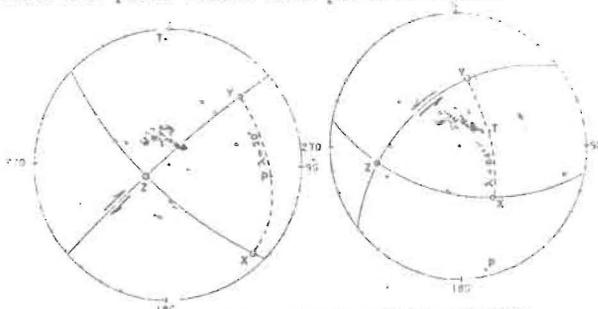
EVENTO 2. Este evento ocurrió 10 seg. después del evento sísmico anterior, y su epicentro está localizado aproximadamente a 17 kilómetros al oeste de ese mismo evento.

De la solución gráfica de los planos nodales y de las evidencias geológicas existentes para esta zona (9), se puede inferir que el plano nodal con orientación N 40°E (Fig. 2) concuerda aproximadamente con la orientación de la falla "El Resbalón", por lo que este plano se identificó como el plano de falla. El buzamiento de este plano según la solución gráfica, es de 68°NW, lo que está conforme con la localización del epicentro al este de esta falla.

De la solución mecánica del foco, se observa que la dirección del movimiento a lo largo del plano es transcurrente sinistral, contrario a la del evento 1, y no coincidente con el movimiento geológicamente señalado para la falla El Resbalón, que la define como falla normal. Estas diferencias podrían tener su explicación al suponer que este evento fue inducido por la ocurrencia del evento anterior, es decir, el movimiento del bloque oeste de la falla Agua Dulce se supone el responsable de la ocurrencia de ambos eventos, lo que por ende da explicación al movimiento opuesto de ambas fallas. Esta hipótesis está sustentada en los tiempos de ocurrencia de los eventos, sus tipos de movimiento y sus localizaciones geográficas.

EVENTO 3. Este evento sísmico tiene su epicentro instrumental en la región de San Cristobal- Río Uribante, aproximadamente a 10 kilómetros S-W del poblado de Santo Domingo, cerca de la quebrada de Guañaíta (10). De la solución gráfica del mecanismo focal para este evento, se puede observar que uno de los planos nodales tiene una orientación N 50°E, y un buzamiento 84°SW; el otro plano tiene una orientación N 47°W y un buzamiento 70°SW (Fig. 3). Estas características, conjuntamente con el ángulo de deslizamiento y la distribución de los esfuerzos por compresión y dilatación, sugieren que la falla causante de este evento es transcurrente con una pequeña componente de movimiento vertical.

De la información geológica disponible para la región donde ocurrió este evento, se puede notar que la mayoría de las fallas observadas son de movimiento vertical (sin implicar esto que las mismas no puedan tener movimiento horizontal) y que una de ellas pasa muy cerca del epicentro con una orientación aproximada N 45°E, que podría estar asociada al plano nodal con orientación N-E y por lo tanto con el evento en estudio. Esta falla se extiende a lo largo del río Cuite, y presenta su bloque norte deprimido, lo que concuerda con lo señalado por la solución gráfica, donde el ángulo de deslizamiento $\lambda = 20^\circ$ y buzamiento de 84°NW, indican que el movimiento que produjo este evento tiene una gran componente horizontal y una pequeña componente vertical que produce un pequeño levantamiento del bloque norte del plano tomado como plano de falla.



SOLUCION GRAFICA DE LOS PLANOS NODALES

Fig. 3
FECHA DEL EVENTO= 20.10.1970
COORD'S EPICENT.= 10.9N.72.5W
PROF.=36Kms
o = COMPRESION
Δ = DILATAION

Fig. 4
FECHA DEL EVENTO= 20.10.1970
COORD'S EPICENT.= 10.9N.72.5W
PROF.=36Kms
o = COMPRESION
Δ = DILATAION

EVENTO 4. Evento cuyo epicentro instrumental está localizado aproximadamente a 9 kilómetros N-E de la ciudad de Guanare, cerca del río Portuguesa. La distribución de los esfuerzos por compresión y dilatación para este evento no es uniforme, pero sí genera una solución gráfica bastante clara, tal como se muestra en su gráfica correspondiente (Fig. 4). De esta solución, y de la información geológica disponible para la región, se puede inferir que el plano nodal con orientación N 53°E concuerda aproximadamente con la orientación de la falla "Guanapa" (11,12), por lo que este plano puede identificarse como plano de falla.

De la solución mecánica del foco se puede observar que el ángulo de deslizamiento (aproximadamente $\lambda = 64^\circ$) conjuntamente con el ángulo de buzamiento del plano de falla ($\delta = 44^\circ$ NW) indican que el tipo de fallamiento que produjo este evento en particular, se corresponde con el de una falla normal con su bloque norte hundido y un movimiento de considerable componente horizontal. Esta solución concuerda hasta cierto límite con lo observado en el campo, donde se ha podido determinar que la falla de Guanapa es de movimiento vertical con su bloque norte hundido, tal como el señalado por la solución gráfica de este evento; sin embargo queda la incertidumbre de confiabilidad entre la localización del epicentro y la profundidad focal del evento.

EVENTO 5. Este evento corresponde al ocurrido el 05 de Abril de 1975, con epicentro observado localizado en la población de San Pablo donde produjo considerables pérdidas materiales y humanas (1).

De la solución del mecanismo focal para este evento, se puede observar que uno de sus planos nodales tiene una orientación N 30°E y un buzamiento de 80°NW (Fig. 5); el otro plano tiene una orientación N 66°W y un buzamiento de 68°NE. Estas características, al igual que la distribución de los esfuerzos por compresión y dilatación y la localización del epicentro, conjuntamente con la información geológica disponible para la zona (13), sugieren que este evento sísmico está asociado a una falla

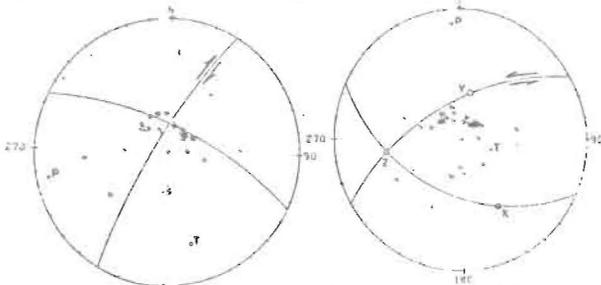


Fig. 5
SOLUCION GRAFICA DE LOS PLANOS NODALES
 FECHA DEL EVENTO= 5.4.1975
 COORD'S EPICENT.= 10.1N.69.6W
 PROF.=36Kms
 ○ = COMPRESION
 Δ = DILATACION

Fig. 6
SOLUCION GRAFICA DE LOS PLANOS NODALES
 FECHA DEL EVENTO= 11.12.1977
 COORD'S EPICENT.= 9.6N.69.5W
 PROF.=2Kms
 ○ = COMPRESION
 Δ = DILATACION

lla aún no identificada pero observada en el mapa geológico con una orientación aproximada N 40°E, que pasa cerca del epicentro observado y se extiende paralelamente a la falla de Boconó. Esta falla observada, está definida como transcurrente dextral (16), lo cual coincide con el resultado arrojado por el mecanismo focal para el plano nodal con orientación N 30°E, por lo que el mismo es identificado como el plano de falla. Este resultado es más compatible con la ubicación del epicentro observado que con la posición del epicentro instrumental calculado y reportado por el I.S.C. (6). Por otra parte, estudios anteriores realizados sobre este mismo evento sísmico arrojó resultados similares, pero los mismos fueron asociados dudosamente a la falla de Boconó (1), lo que estimula aún más este nuevo análisis.

EVENTO 6. Evento sísmico cuyo epicentro instrumental fue localizado en la Serranía de Portuguesa, aproximadamente a 34 kilómetros al oeste de Acarigua, y a 4 kilómetros al sur del Cerro San Antonio.

La distribución de los esfuerzos por compresión y dilatación para este evento es similar a la del evento No. 4, y por consiguiente su solución gráfica también lo es (Fig. 6). Sin embargo, las evidencias geológicas existentes para esta región, al igual que la localización y profundidad a la que ocurre este evento (2 km., I.S.C.), conjuntamente con la solución mecánica del mismo ($\lambda = 60^\circ$, $\delta = 58^\circ$ NW), sugieren que este evento está asociado a una falla de corrimiento con posterior movimiento vertical cuya orientación es de aproximadamente N 61°E y que aparece convenientemente señalada en el Mapa Geológico de la Serranía de Portuguesa (12). El buzamiento del plano de falla según la solución gráfica es de 58°NW, y concuerda aproximadamente con el buzamiento observado en el campo para dicha falla.

EVENTO 7. El epicentro de este evento está localizado cerca de la Sierra de Perijá, en la zona de El Tucuco. La distribución de los esfuerzos, al igual que la orientación del eje de esfuerzo principal máximo, conjuntamente con la profundidad a la que ocurrió el evento, sugieren que los fenómenos

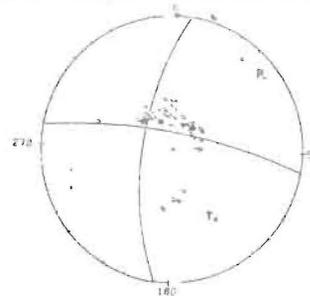


Fig. 7
SOLUCION GRAFICA DE LOS PLANOS NODALES
 FECHA DEL EVENTO=17.11.1968
 COORD'S EPICENT.=9.6N.72.6W
 PROF.=150Kms
 ○ = COMPRESION
 Δ = DILATACION

causantes del mismo no son producto de un deslizamiento por corte a lo largo de algún plano de falla específico, sino que su ocurrencia está asociado bien sea a planos pre-existentes de zonas débiles o porosas con orientación en ángulo oblicuo con respecto a la dirección del esfuerzo de compresión máximo, o bien podría estar asociado a una inestabilidad mecánica a alta presión (4).

De los eventos sísmicos analizados, se concluye lo siguiente :

1. Excluyendo el Evento 2 por considerar que el mismo fue inducido por el evento 1, se observa que la distribución de los esfuerzos máximos por compresión para los eventos 1, 3, 5 y 7, localizados al Norte y Oeste de la falla de Boconó, la que según la moderna teoría tectónica global ha sido interpretada como parte del límite entre las placas del Caribe y Sur América (18), presentan una orientación promedio suroeste-noreste de 70°. Este valor obtenido e interpretado en función de la tectónica de placas, sustenta convenientemente la teoría de

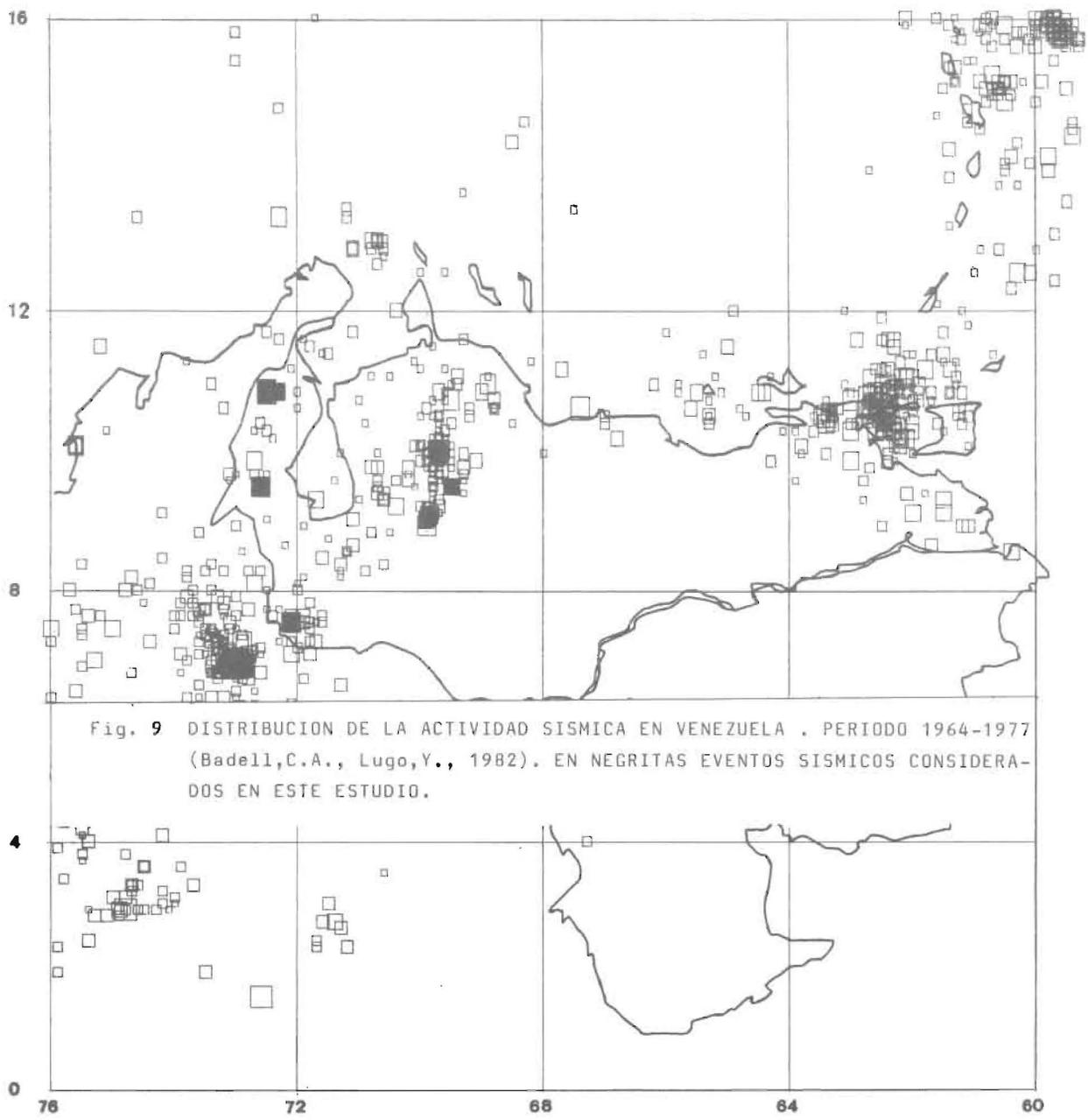
la convergencia entre la placa de Nazca y Sur América, donde la deformación producto de esta convergencia entre ambas placas probablemente sea la causante del movimiento lateral derecho que posee la falla de Boconó, (7). El evento 7, por la profundidad de su hipocentro, está íntimamente asociado con esta convergencia.

2. La dirección de los esfuerzos máximos por compresión para los eventos 4 y 6, ligeramente localizados al sur de la falla de Boconó, presentan una orientación predominante noroeste-sureste (N 10°W) asociada con fallas de cabalgamiento.

3. Un mayor y mejor conocimiento sobre el proceso mecánico de los eventos sísmicos que ocurran en el territorio venezolano, sólo será posible mediante:

- a) La instalación de estaciones sismográficas esparcidas por todo el territorio nacional, convenientemente diseñadas y ubicadas que permitan su interrelación .
- b) La definición de un modelo de propagación de energía sísmica (velocidad cortical para la onda compresional y transversal), que permita la localización del foco y epicentro sin ambigüedades.





EVEN- TO	AÑO	MES	DIA	LAT. $\phi(N)$	LONG. $\lambda(W)$	PROF. H(Km)	m_b	PLANOS NODALES				EJES			
								POLO I		POLO II		PRESION		TENSION	
								AZ°	h°	AZ°	h°	AZ°	h°	AZ°	h°
1	1969	10	20	10.88	72.34	7	5.0	100	30	2	10	46	62	143	78
2	1969	10	20	10.87	72.49	36	5.7	130	22	213	22	178	62	86	88
3	1970	01	27	7.49	72.09	31	5.6	138	6	43	20	95	76	357	84
4	1975	03	05	9.13	69.87	25	5.5	143	44	12	40	168	88	65	26
5	1975	04	05	10.08	69.65	36	5.5	120	12	204	22	256	86	163	68
6	1977	12	11	9.56	69.52	2	5.5	151	32	25	46	355	82	102	32
7	1968	11	17	9.57	72.63	150	5.8	96	26	188	14	52	82	148	64

Tabla 1. Parámetros del mecanismo focal obtenido

AGRADECIMIENTO: Los autores desean expresar su agradecimiento a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, por las facilidades en el manejo de la información básica; a la empresa Maraven, S.A. (Lagunillas), y muy especialmente al Técnico

Operador Ricardo Ramírez, por la ayuda prestada en el uso del sistema de computación. Al Dr. Carlos Schubert, del Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), por la lectura y comentarios hechos al manuscrito.

REFERENCIAS

- 1) BADELL, C.A.: "El terremoto de San Pablo del 05 de Abril 1975". Facultad de Ingeniería - LUZ, Trabajo de Ascenso, 31-37, 1981.
- 2) BADELL, C.A. y LUGO, Y.: "Distribución de la actividad sísmica en la región comprendida entre longitudes 60°- 100°W, latitudes 20°N y 20° S, y su influencia en Venezuela" Rev. Téc. Ing. Vol. 5, N° 2, 1982, pp. 45-53
- 3) BILLING, M.P.: "Geología Estructural", 4ª ed, EUDEBA, 1974.
- 4) DEWEY, J.: "Seismicity and Tectonics of western Venezuela and adjoining portions of northeastern Colombia". Berkeley, PhD Thesis, 93 - 103, 1971.
- 5) ICHICAWA, M.: "Reanalysis of mechanism of

- earthquakes which occurred in and near Japan, statistical studies on the nodal plane solutions obtained 1926-1968*". Japan Meteorological Agency, Tokyo, Vol. 35 No. 3, 208-214, 1971.
- 6) International Seismological Centre (I.S.C.): Boletines semestrales años 1965, 1966,...1977.
 - 7) KELLOG, J.N. y BONINI, W.E.: "Subduction of the Caribbean plate and basement uplifts in the overriding South American plate. *Tectonics*, Vol. 1 No. 3, 251-276, 1982.
 - 8) MOLNAR, P. y SYKES, L.R.: "Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity". *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 80, 1639-1684, 1969.
 - 9) Ministerio de Minas e Hidrocarburos: Mapa Geológico. Región Tulé (Estado Zulia).
 - 10) Ministerio de Minas e Hidrocarburos: Mapa Geológico. Región San Cristobal-Río Uribante (Estado Táchira).
 - 11) Ministerio de Minas e Hidrocarburos: Mapa Geológico. Región de Guanare-Ospino II (Estado Portuguesa).
 - 12) Ministerio de Minas e Hidrocarburos: Mapa Geológico. Serranía de Portuguesa (Estado Lara y Portuguesa).
 - 13) Ministerio de Minas e Hidrocarburos: Mapa Geológico. Región Campo Mene Grande-Barquisimeto, Acarigua-Valera, Hoja No. 5.
 - 14) ROD, E.: "Strike-slip faults of northern Venezuela". *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, Vol. 40, No. 3, 457 - 468, 1956.
 - 15) Seismological Society of America (B.S.S.A): "Seismological Tables for P phases". Vol. 58, No. 4, Agosto 1968.
 - 16) STEPHAN, J.F.: "El contacto Cadena Caribe - Andes Merideños entre Carora y El Tocuyo (Estado Lara). V Congreso Geológico Venezolano, Tomo II, 811-816, 1977.
 - 17) SCHUBERT, C.: "Investigaciones neotectónicas en Venezuela". *Interciencia*, Vol. 1, No. 3, Set-Oct 1976, 159-167, 1976.
 - 18) SCHUBERT, C.: "Neotectonic of Boconó Fault, western Venezuela". *Tectonophysics*, Vol. 85, 205-220, 1982.
 - 19) UDIAS V., A.: "Estudio del mecanismo focal de los terremotos mediante ondas internas". *Revista de Geofísica*, Vol. XXXI 1-4, 11-22, España, 1972.

Recibido el 28 de marzo de 1983