

Actividad sísmológica y acelerográfica en Venezuela en el período 1970-1990

*Alfonso Malaver**

RESUMEN

En Venezuela más del 75% de su población habita en las dos zonas de más alto peligro sísmico de acuerdo al código sísmico de 1987; en el período 1530-1990 han ocurrido en nuestro país unos 148 eventos sísmicos que han causado algún tipo de daño en poblaciones venezolanas. En este trabajo se analiza la actividad sísmica en el período 1970-1990 y se destacan los sismos destructores más importantes ocurridos en ese período. Igualmente, se presenta una síntesis de la geología de fallas activas. Se evalúan las leyes de atenuación usadas en el país a partir de la información acelerográfica recopilada y se concluye sobre las más adaptables a nuestro medio. Se comparan las aceleraciones horizontales y verticales registradas y se recomienda una relación av/ah para el país.

INTRODUCCIÓN

En Venezuela uno de los mayores potenciales de pérdidas humanas y materiales está representado por los terremotos, debido a que aproximadamente el 75% de su población, así como un alto porcentaje de sus industrias están concentradas en las zonas de más alto peligro sísmico del país. Estas zonas son las 3 y 4 (Figura 1)* del Mapa de Zonificación Sísmica con fines de Ingeniería de la Norma para Edificaciones Antisísmicas COVENIN 1756 (COVENIN, 1987).

La historia sísmica de Venezuela revela que a lo largo del período 1530-1990 han ocurrido 126 eventos destructores (Grases, 1982), o sea sismos que han causado algún tipo de daño, desde temblores locales que

han causado daños menores en pequeños poblados, hasta los grandes terremotos como el del 26 de Mayo de 1812 que dejó un saldo de 20.000 muertos.

SÍNTESIS GEOLÓGICA

En Venezuela la sismicidad se reparte principalmente a lo largo de una ancha franja de unos 100 km. aproximadamente definida por los sistemas montañosos andinos, centrales y orientales. Desde el punto de vista geodinámico, los sistemas orográficos antes mencionados corresponden al afrontamiento de las placas tectónicas del Caribe al norte y la de América del Sur, al sur.

El límite principal entre estas dos placas tectónicas se efectúa a través del sistema de fallas dextrales de Boconó, San Sebastián y El Pilar (Figura 2); la velocidad del movimiento relativo a lo largo de este sistema es de aproximadamente 9 mm/año (Soulas, 1986). Este sistema de fallas dextrales puede generar un sismo máximo probable de magnitud 7,8 con períodos de retorno de 300 a 400 años (Giraldo, 1993).

ACTIVIDAD SÍSMICA EN EL PERÍODO 1970-1990

De acuerdo al Catálogo de Sismo de Funvisis (1995), en el período 1970-1990, se registraron 321 eventos con magnitud igual o mayor a 4, correspondiendo 148 a la región Oriental ($61,00^\circ - 65,00^\circ N$ y $9,00^\circ - 13,00^\circ W$), 12 a la Central ($65,00^\circ - 68,00^\circ N$ y $9,00^\circ - 12,00^\circ VV$) y 161 a la Occidental ($68,00^\circ - 74,00^\circ N$ y $7,00^\circ - 13,00^\circ M$). Comparando el número de eventos registrados por región geográfica por año y por 10.000 km², nos encontramos

* **Nota:** Ver figuras anexas al final del artículo.

* Ingeniero Civil de la Universidad Santa María. Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello.

que en la región occidental ocurrieron 0,16 sismos, en la oriental 0,38 sismos y en la central 0,05 sismos. Portanto, la actividad sísmica en la región oriental es más del doble de la registrada en la región occidental y ocho veces superior a la de la región central.

En el mencionado período se reportaron 43 eventos sísmicos destructores, esto son, sismos que causaron algún tipo de daño en localidades venezolanas. En la Tabla 1 se indican las características de los eventos destructores más importantes.

De acuerdo a Grases (1982) a lo largo del período 1530-1976 ocurrieron en el país 126 eventos sísmicos que causaron algún tipo de daño en poblaciones venezolanas; por tanto, si a esos le añadimos los 22 reportados en este trabajo después de 1976, tenemos que en el período 1530-1990 ocurrieron en Venezuela 148 eventos sísmicos destructores. En la Tabla 2 se presenta el promedio de sismos por año que han causado algún tipo de daños en localidades venezolanas desde 1530 hasta 1990.

Tabla 1
Sismos destructores más importantes en el período 1970-1990

Fecha	Mag. (mb)	Localidad más afectada	Io (mm)	Observaciones
09-06-1970	4,7	El Tigrito, Edo. Falcón	VII	Colapso de 3 viviendas y daños graves en otras siete.
06-07-1972	4,6	Linares, Edo. Portuguesa	VII	Daños en 37 viviendas, en las líneas de electricidad y en el acueducto del Municipio Palo Alzaro.
12-06-1974	5,7	Casanay, Edo. Sucre	VIII	3 muertos, varios heridos y cientos de damnificados; colapso y daños graves en unas 1.000 viviendas; daños en el hospital y otros edificios en Carúpano.
05-04-1975	5,6	San Pablo, Edo. Lara	VIII	3 muertos, 20 heridos y 600 damnificados; colapso y daños graves en 230 viviendas y daños menores en otras 50.
03-05-1975	5,5	Guanare, Edo. Portuguesa	VII	Daños moderados en edificaciones de concreto armado y daños graves en otro tipo de edificaciones.
18-10-1981	5,5	Ureña, Edo. Táchira	VII	200 muertos por deslizamiento de tierra; daños graves en edificios de concreto armado y en viviendas.
11-06-1986	5,9	El Pilar, Edo. Sucre	VII	3 muertos, 45 heridos y 1.000 damnificados; daños graves en viviendas y menores en edificaciones de concreto armado.
18-07-1986	5,6	Santa Cruz de Buracal, Edo Falcón	VII	Daños graves en la mayoría de las viviendas de la localidad.
30-04-1989	5,9	Boca del Tocuyo, Edo. Falcón	VII	Daños graves en Iglesias, escuelas y viviendas. En algunas zonas se observó el fenómeno de licuefacción.
24-11-1990	4,5	El Porvenir, Edo. Falcón	VII	Colapso de algunas viviendas y daños graves en otras.

Tabla 2
Número de sismos destructores por año

Período	N ² de Sismos	Sismos / Año	Fuente
1530-1899	59	0,16	Grases, 1983
1530-1976	126	0,28	Orases, 1982
1970-1990	43	2,05	Este trabajo
1900-1990	78	0,86	Este trabajo
1530-1990	148	0,32	Este trabajo

De los resultados mostrados en dicha tabla, podemos derivar las siguientes observaciones:

- i. La tasa promedio más alta de sismos por año corresponde al período 1970-1990, lo cual se debe a lo corto del período y al hecho de ser de fecha reciente. Adicionalmente, el desarrollo en la infraestructura del país en los últimos años, es también un factor que contribuye a que sismos moderados produzcan algún tipo de daños en localidades venezolanas.
- ii. La tasa promedio más baja corresponde al período 1530-1899, debido fundamentalmente a la falta de datos y a lo poco poblado del territorio nacional en esos años.
- iii. La tasa promedio para este siglo es más de 5 veces superior a la de siglos pasados, debido básicamente a las mejores fuentes de información que existen en este siglo y a lo más poblado del territorio nacional.

Al analizarla energía liberada en el período analizado, de acuerdo a la fórmula de Gutenberg y Richter (1956), nos encontramos que la más alta ocurrió en 1986 y las más bajas en 1971 y 1987. Al evaluar la energía liberada por regiones geográficas, notamos que la misma es baja para la región central, pues sólo se registró en el período un sismo con magnitud superior a 5. Portanto, en la Figura 3 se muestra una comparación entre la energía liberada en las regiones oriental y occidental; en dicha Figura podemos observar lo siguiente: (i) en seis oportunidades, años 1970, 1973, 1974, 1983, 1986 y 1988 la energía liberada fue superior a $2,2 \times 10^{20}$ ergios (esto es, sismos con $M_s > 5,7$) correspondiendo 3 veces a la región oriental y 3 veces a la región occidental; (ii) cuando en un determinado año se registró en una región un sismo de magnitud igual o superior a 5,7, en la otra región la energía

liberada fue comparativamente baja; por tanto, podemos concluir que cuando en un determinado año ocurra un sismo de esas características en una de las dos regiones consideradas, no se debe esperar un evento similar en la otra región en un lapso de un año. Esta observación tiene la limitación de que ha sido derivada para un lapso de tiempo de 21 años, por tanto debe ser tomada con las reservas del caso.

REGISTROS ACELEROGRAFICOS Y LEYES DE ATENUACIÓN

Desde la instalación de Red Nacional de Acelerógrafos en 1979 y hasta 1990, se han obtenido 32 registros acelerográficos en 15 eventos sísmicos con magnitud entre 4,2 y 5,9. De esos 32 registros, 15 corresponden a suelo tipo roca y 17 a otros tipo de suelo; en la Tabla 3 se presenta la magnitud de los sismos, las características de las estaciones acelerográficas y las aceleraciones horizontales máximas registradas.

En la referida tabla podemos observar que para el sismo del Táchira la aceleración de 0,15g registrada en la estación 114 es muy alta para la magnitud del sismo y la distancia hipocentral, lo que pudiera justificarse por los efectos de direccionalidad y condiciones del suelo local (Malaver, *et al* 1982); ese fenómeno de amplificación del movimiento en la misma estación 114 se vuelve a notar en el sismo de la Grita. La amplificación del movimiento fuerte del terreno debido a las condiciones locales del suelo también se observa en otras estaciones en los sismos de fecha 08-03-83, 14-06-84, 11-06-86 y 25-08-86. En esos casos la aceleración es mayor en suelos aluvionales a pesar de estar esas estaciones ubicadas a distancias similares o mayores que las de otros tipos de suelos.

Debido a la ausencia de un número significativo de registros acelerográficos que permitan derivar una ley de atenuación para aceleraciones, se han usado relaciones de atenuación, bien derivadas de intensidades locales, obtenidas usando registros acelerográficos a nivel mundial y/o tomadas de otros países. En este trabajo vamos a comparar las aceleraciones horizontales registradas en Venezuela (Ar) con las que obtendríamos usando las leyes de atenuación (Ap) de INTEVEP (Quijada, 1993),

FUNVISIS (Dragone, et al, 1984) CORAL 83 (Coral 83, 1991), WDC (Cascante, 1988), J & B (Joyner and Boore, 1988) y McGuire (1976). Las 4 primeras leyes fueron elaboradas en Venezuela, teniendo las 2 primeras su origen en intensidades locales y las otras 2 en registros acelerográficos a nivel mundial en roca o suelo firme. En la Tabla 4 se presentan los coeficientes de cada una de las leyes antes señaladas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\ln a = A + B M_s + C \ln(R + D) \quad (a)$$

Tabla 4
Leyes de atenuación usadas en Venezuela

Ley	A	B	C	D	alna
INTEVEP	5,40	0,36	-0,86	10	0,66
FUNVISIS	4,87	0,96	-1,56	25	0,66
WDC	4,402	0,48	-0,74	0	0,65
CORAL 83	4,86	0,51	-1,00	5	0,68
J & B ¹	5,998	0,398	-1,23	0	0,65
Mc GUIRE	7,089	0,484	-1,30	25	0,51

¹ Aproximada a la forma de la Ecuación "a".

(La muestra analizada corresponde a 15 registros acelerográficos en roca para magnitudes desde 4,2 a 5,9,

aceleraciones entre 0,015 y 0,109g y distancias hipocentrales de 11 a 104 km (véase Tabla 3).

Tabla 3
Acercación horizontal máxima registradas

Sismo Fecha	Mag. (Ms)	Estación			Acel. Máx. (g)
		N°	Tipo de suelo	Dist. Hip. (km)	
Táchira 18-10-81	5,4	113	Roca	98	0,04
		114	Suelo residual	98	0,15
		115	Roca	101	0,09
P. de Paria 09-05-82	5,0	306	Aluvión superficial	106	0,03
		307	Roca	104	0,02
Táriba 04-07-82	5,4	114	Suelo residual	64	0,023
		116	Roca	59	0,025
P. de Paria 08-03-83	5,7	306	Aluvión superficial	107	0,09
		307	Roca	98	0,065

G. de Paria 11-04-83	4,9	305	Roca	74	0,015
		306	Aluvión superficial	50	0,085
		307	Roca	63	0,106
La Grita 15-06-83	4,7	113	Roca	68	0,027
		114	Suelo residual	67	0,166
Caparo 12-06-84	4,3	113	Roca	65	0,02
		128	Aluvión	49	0,045
El Tocuyo 14-06-84	5,0	132	Aluvión	41	0,273
		102	Roca	40	0,109
El Pilar 11-06-86	5,9	305	Roca	48	0,05
		306	Aluvión superficial	37	0,07
		312	Aluvión profundo	56	0,16
Tácata 18-08-86	4,2	201	Aluvión profundo	24	0,013
		217	Aluvión profundo	26	0,011
		225	Roca	11	0,058
		226	Roca	11	0,033
Los Teques 25-08-86	4,3	201	Aluvión profundo	39	0,088
		225	Roca	17	0,048
		226	Roca	17	0,016
Pregonero 21-02-88	4,1	114	Suelo residual	36	0,024
Pregonero 25-02-88	4,2	114	Suelo residual	42	0,041
Táriba 30-01-89	3,9	137	Aluvión profundo	12	0,081
Táriba 04-02-89	3,8	137	Aluvión profundo	25	0,019

Para evaluar cual ley de atenuación se ajustaba mejor a las aceleraciones registradas, se hizo un análisis de regresión, calculándose el términos $(Ar-AP)^2$ para cada

ley, obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 5, en donde podemos notar que el mejor ajuste corresponde a la ley de INTEVEP, y el peor a la de J & B.

Tabla 5

Término	Ley de Atenuación					
	INTEVEP	FINVISIS	WDC	CORAL	J & B	McGÜIRE
$E(AR-AP)^2$	0,0194	0,0272	0,0255	0,0223	0,0368	0,0219

En la Figura 4 se ha graficado la aceleración registrada versus la aceleración predicha para las 6 leyes consideradas y en ella podemos observar, a pesar de la gran dispersión, la coincidencia con los resultados mostrados en la Tabla 4.

RELACIÓN ENTRE LAS ACELERACIONES HORIZONTAL Y VERTICAL

El estudio de los movimientos fuertes del terreno siempre se ha orientado a analizar principalmente las componentes horizontales, sin prestarle mucha atención al componente vertical. Sin embargo, registros obtenidos en los últimos sismos en diversas partes del mundo nos muestran que en muchos casos las aceleraciones verticales superan a las horizontales.

En el caso de Venezuela se han obtenido 32 registros acelerográficos en el terreno libre en diferentes tipos de suelos durante 15 sismos en el período 1981-1990. Las magnitudes de esos sismos varían de 4,2 a 5,9 (Tabla 2) y las aceleraciones máximas horizontal y vertical registradas fueron de 0,166g y 0,108g respectivamente. En la Figura 5 se han graficado la relación aceleración vertical/aceleración horizontal promedio vs distancia epicentral para todos los 32 registros. En dicha figura se puede observar que generalmente la relación av/ah mayor ocurre cerca del área epicentral, esto es menos de 20 km. Esta misma conclusión la alcanzó Lew (1992) al analizar los registros acelerográficos del terremoto del Imperial Valley

Si promediamos los valores de Av/Ah en los primeros 20 km, notamos que esa relación es de 1,01 aunque existe una gran dispersión; si hacemos el mismo promedio para distancias entre 20 y 85 km observamos que la relación es de 0,70, aunque con una menor dispersión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

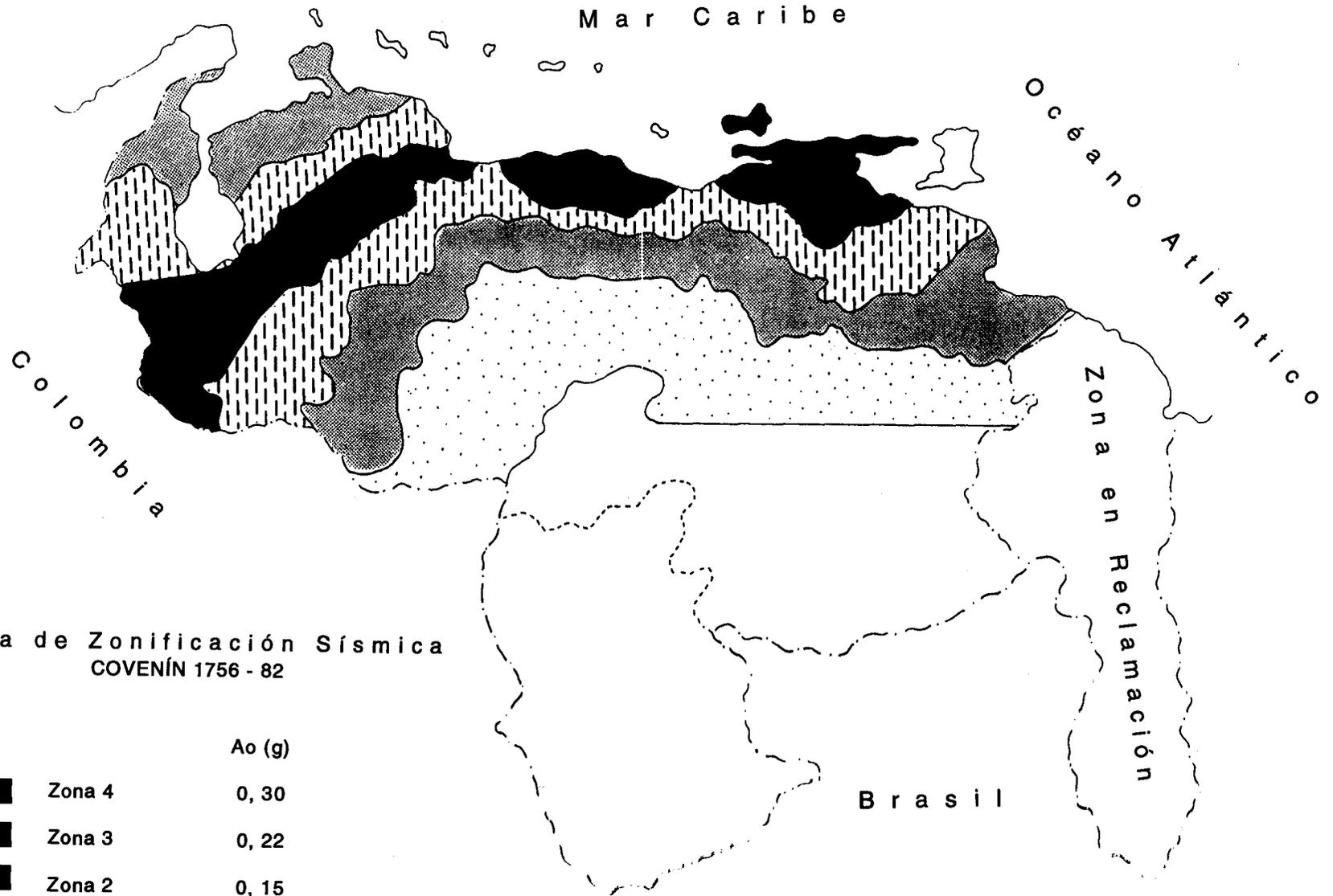
Como resultado de este trabajo, se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- i. La actividad sísmica para eventos con $m_b > 4$ por 10.000 km², tanto por región geográfica como por provincia sísmica, en el período 1970-1990, muestra que la zona oriental es la más activa del país.
- ii. En el período 1970-1990 ocurrieron 2,05 sismos destructores por año, lo cual es más del doble de los reportados en este siglo y más de 12 veces de los ocurridos en siglos anteriores, debido fundamentalmente a lo corto y reciente de dicho período.
- iii. Al compararla energía liberada anualmente entre las regiones oriental y occidental, para el lapso de 21 años analizado, podemos concluir que cuando en un determinado año ocurra un sismo de magnitud mayor o igual a 5,7 en una de esas dos regiones, no se debe esperar un evento similar en la otra región en el lapso de un año.
- iv. La distribución de los 43 sismos destructores reportados en el período estudiado, nos indica que en la región occidental ocurrieron 3 veces más eventos que en la oriental y 10 veces más que en la central.
- v. La distribución de los sismos destructores por 10.000 km², tanto por región geográfica como por provincia sísmica, nos indica que en la zona occidental del país fue donde más se reportó este tipo de eventos para el período estudiado.
- vi. Del análisis de la muestra de registros acelerográficos, podemos concluir que la ley de atenuación que mejor se ajusta a las aceleraciones registradas en Venezuela es la propuesta por INTEVEP.
- vii. Del análisis de la relación entre las aceleraciones vertical y horizontal registradas en Venezuela, se puede concluir que: (a) en el análisis de estructuras ubicadas cerca de fallas activas se le debe prestar especial atención al componente vertical, y (b) se debe revisar esta relación en el Código Venezolano y llevarla a, por lo menos, 0,70.

REFERENCIAS

- CASCANTE, G. (1988). "Atenuación de aceleraciones máximas en roca o terreno firme obtenida de registros del World Data Center (WDC)". Informe Interno de CORAL 83, Caracas,
- CORAL 83 (1991). "Atenuación de aceleraciones máximas en roca obtenidas por regresión de registros acelerográficos". Informe Interno de CORAL 83, Caracas, Venezuela.
- COVENIN (1987). *Norma para edificaciones antisísmicas COVENIN 1756*. Fondonorma, Ministerio de Fomento, Caracas.
- DRAGONE, S.; FERREBUS, C. y YIBIRIN, R. (1984). "Ley de Atenuación para la Aceleración de la Región Norcentral de Venezuela". En: *Memorias del IV Cong. Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica*, Barquisimeto, Venezuela.
- FUNVISIS (1995). *Catálogo Sísmico Instrumental de Venezuela, período 1970-1990*. Dpto. de Sismología, Caracas.
- GIRALDO, C. (1993). "Principales fallas activas en Venezuela". Informe Interno para CORAL 83, Caracas, Venezuela.
- GRASES, J. (1982). "Notas para la historia de la Ingeniería Sísmica en Venezuela". En: *Boletín Técnico IMME*, No. 70-71, Caracas, Venezuela.
- GUTENBERG, B. & RICHTER, C. (1956). "Earthquake, magnitude, intensity, energy and acceleration". *Bulletin Seismological Society of America*, 46, 105-145.
- JOYNER, W. and BOORE, D. (1988). "Measurement, characterization and prediction of strong ground motion". *Proceedings of Earthquake Engineering & Soil Dynamics, Park City, U.S.A.*
- LEW, M. (1992). "Characteristic of vertical ground motion recorded during recent California earthquakes". En: *Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, España, V. 2.
- MALAYER, A. et al (1982). *El sismo del Táchira del 18 de Octubre de 1981*. FUNVISIS, Serie Técnica 01-82, Caracas.
- McGUIRE, R. (1976). *EQRISK, Fortran Computer Program Seismic Risk Analysis*. U.S. Geological Survey, Open File Report 76-67, U.S.A.
- QUIJADA, P. et al (1993). "Análisis de Amenaza Sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de Zonificación con fines de Ingeniería". En: *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente*, Mérida, Venezuela.
- SOULAS, J. P. (1986). "Neotectónica y Tectónica Activa en Venezuela y Regiones Vecinas". En: *Memorias del IV Cong. Geológico Venezolano*, Caracas, Venezuela.

Figura 1



Mapa de Zonificación Sísmica
COVENÍN 1756 - 82

	Ao (g)
Zona 4	0,30
Zona 3	0,22
Zona 2	0,15
Zona 1	0,08
Zona 0	—

Figura 2

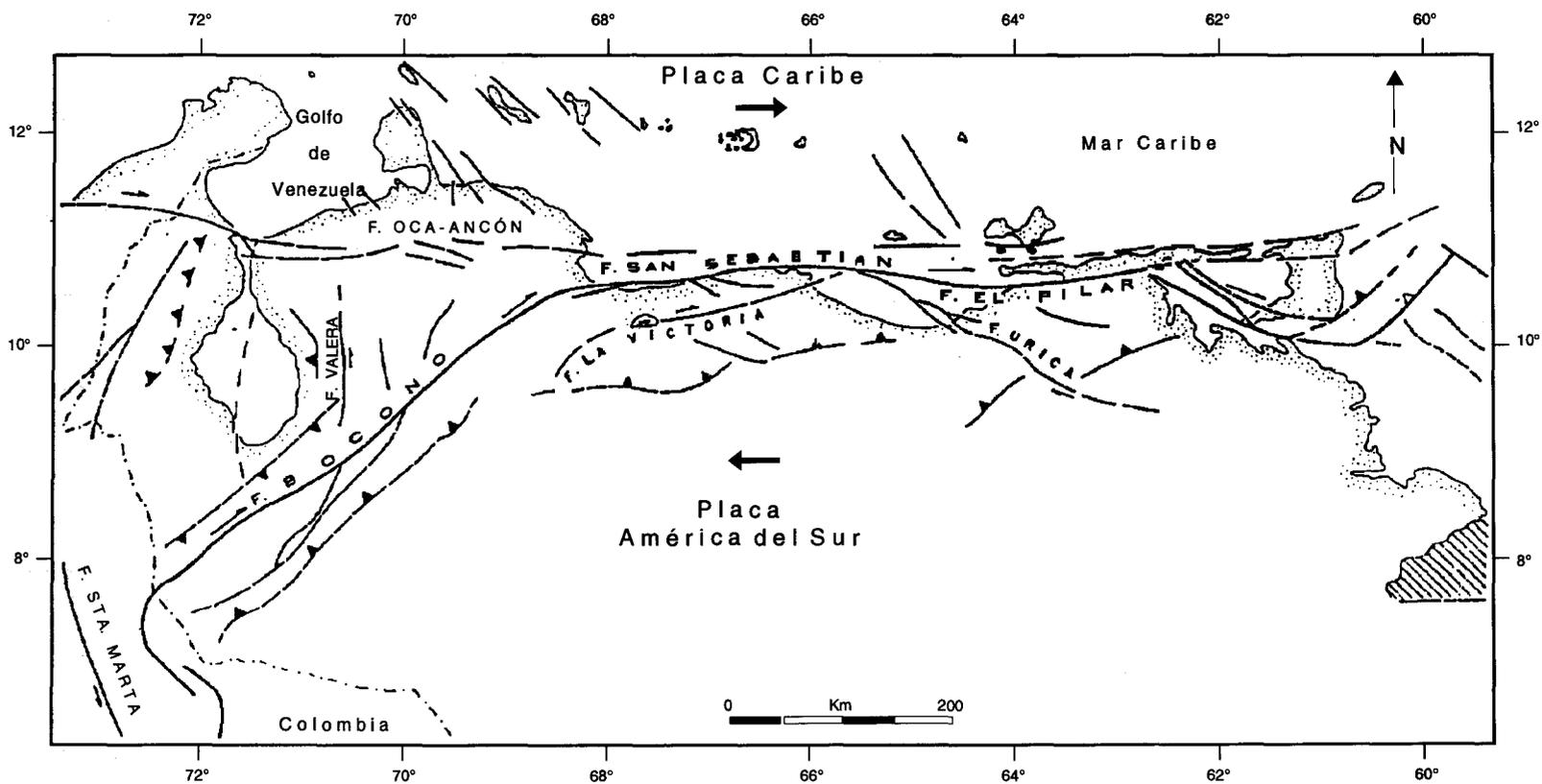


Figura 3
Energía liberada en las regiones oriental y occidental en el período 1970-1990

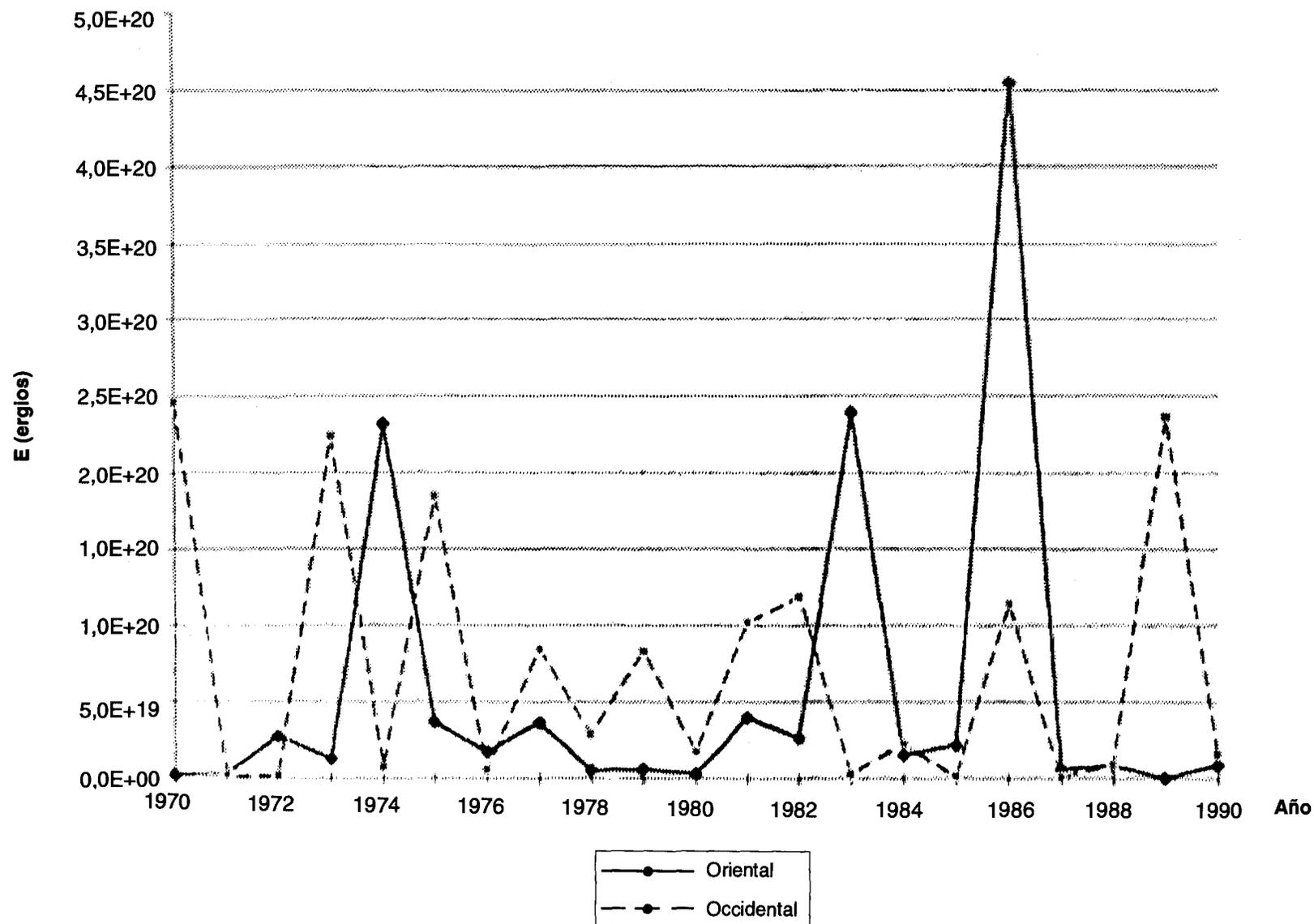


Figura 4
Aceleración registrada vs. aceleración predicha

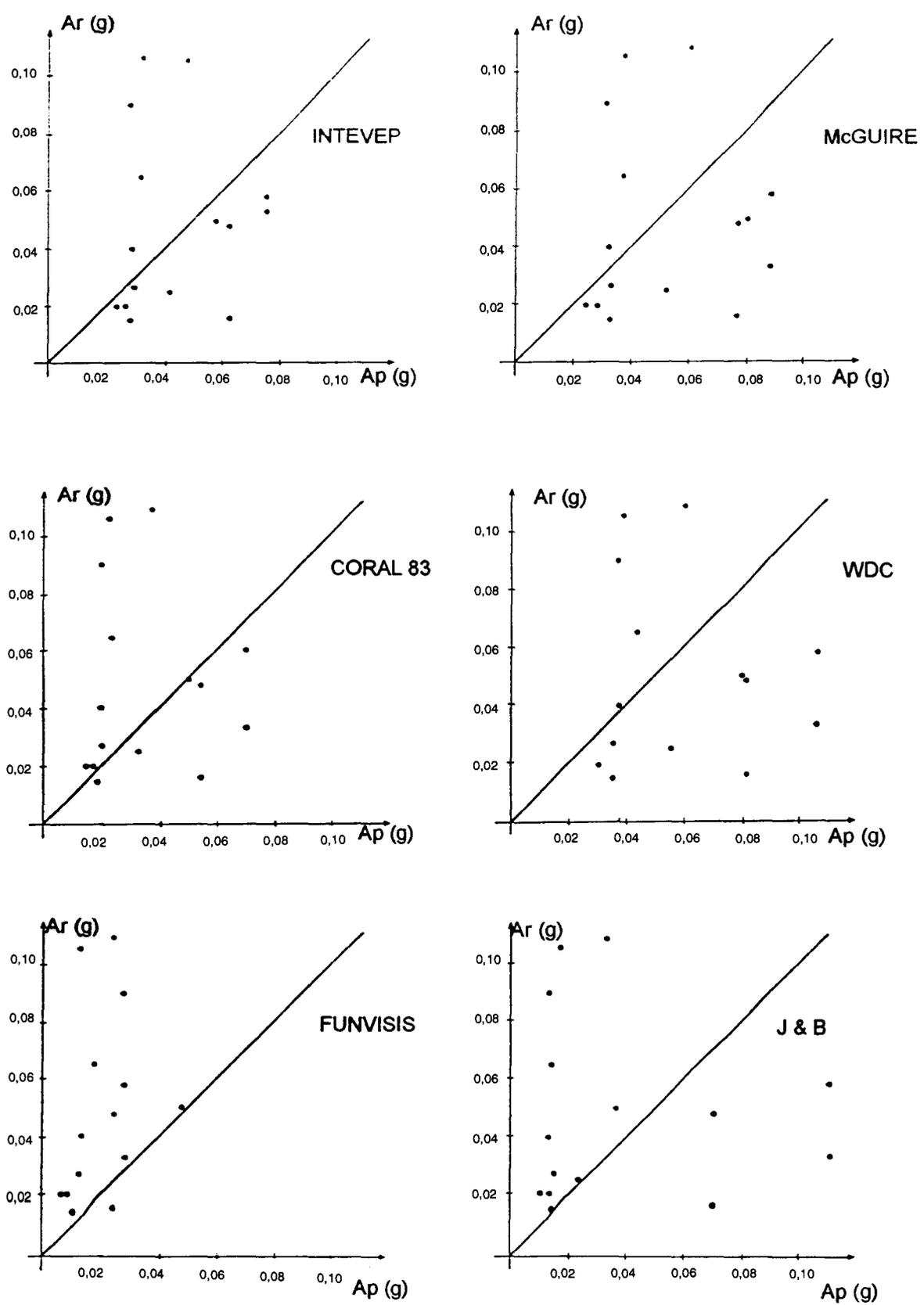


Figura 5
Relación entre la componente vertical y el promedio de las componentes horizontales

