

MÉTODO SEMIEMPÍRICO PARA ESTIMAR ESPECTROS DE AMPLITUD EN CIUDAD UNIVERSITARIA



Alejandra Arciniega¹ y Mario Ordaz.^{2,3}

RESUMEN

Se presenta un modelo semiempírico para el cálculo de espectros de amplitud de Fourier en terreno firme basado en los datos de sismos de subducción registrados en Ciudad Universitaria (CU) desde 1965. Se comparan los espectros de amplitud estimados con los observados. Con el modelo presentado, se obtienen resultados que son una buena aproximación dentro de márgenes de incertidumbre aceptables.

INTRODUCCION

En el presente escrito se proporciona una herramienta para estimar los espectros de amplitud de aceleración de Fourier de movimientos horizontales en terreno firme, a partir de los cuales se calculen espectros de respuesta en cualquier sitio del valle de México en que exista acelerómetro.

Con ayuda de la inferencia estadística y el criterio de máxima verosimilitud, se ajusta un modelo a los datos (contenidos en la tabla 1) y con ello se estiman espectros de amplitud de aceleración de Ciudad Universitaria (CU) para sismos postulados provenientes de la costa del Pacífico, definidos únicamente por su magnitud y la distancia más cercana de la zona de ruptura a la estación acelerográfica de CU.

1 Centro de Investigación Sísmica. Fundación Javier Barros Sierra.

2 Instituto de Ingeniería, UNAM.

3 Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED.

Para evaluar la confiabilidad del método se comparan los resultados obtenidos con el procedimiento propuesto y los espectros de amplitud calculados a partir de los datos.

MÉTODO PROPUESTO

Se propone un modelo semiempírico para estimar los espectros de amplitud de aceleración de Fourier en Ciudad Universitaria (CU) causados por sismos futuros de subducción originados en la costa del Pacífico, suponiendo conocidas la magnitud del sismo y la distancia más cercana del área de ruptura a las estaciones acelerométricas en CU.

La naturaleza semiempírica del modelo consiste en que la forma funcional que relaciona magnitud y distancia con ordenadas del espectro de Fourier es aproximadamente igual a la deducida de modelos teóricos de fuente y atenuación de las ondas sísmicas (ver, p.e. Boore, 1983) mientras que los parámetros libres del modelo teórico son ajustados empíricamente. El modelo usado es:

$$\log A(\omega) = \alpha_1(\omega) + \alpha_2(\omega) M_w + \alpha_3(\omega) \log R; \quad (1)$$

en donde $\alpha_1(\omega)$, $\alpha_2(\omega)$, $\alpha_3(\omega)$ son los coeficientes dependientes de la frecuencia ω , que se desea estimar; R es la distancia más corta de la zona de ruptura a CU y M_w es la magnitud de momento, aproximadamente igual, en promedio, a la magnitud de las ondas superficiales M_s para valores de $4 < M_s < 9$ (Hanks y Kanamori, 1979). En el resto del trabajo todas las magnitudes usadas son M_s .

Con base en la ec 1, los datos de amplitud de cada frecuencia, y la magnitud y distancia de cada evento se definieron los escalares, vectores y matrices siguientes (los vectores se indican en negritas y las matrices con mayúsculas):

$$\mathbf{x}_i^T = (1, M_i, \log R_i) \quad (2)$$

en donde $i = 1, 2, \dots, m$, siendo m el número de eventos, M_i es la

magnitud de cada evento, y R_1 es la distancia más pequeña de la estación de referencia a la zona de ruptura;

$$y_1 = \log A_1^{ew}(\omega) \quad (3)$$

$$z_1 = \log A_1^{ns}(\omega) \quad (4)$$

en donde $A_1(\omega)$ denota la amplitud espectral provocada por el evento i en la frecuencia ω y en la dirección señalada;

$$X = \sum_{i=1}^m x_i x_i^T \quad \text{y} \quad Y = \sum_{i=1}^m x_i v_i^T \quad (5)$$

en donde $v_i^T(\omega) = (y_1, z_1)$ es el vector constituido por las amplitudes observadas que son funciones de la frecuencia.

Para cada evento i se tiene un valor de M , uno de R y dos registros de aceleración, uno para cada componente horizontal, es decir, se trata de un caso de observaciones apareadas con correlación desconocida; por lo tanto para cada observación tenemos un vector de errores ε_1 , estimado con la diferencia entre lo calculado y lo observado:

$$\varepsilon_1(\omega) = [\varepsilon_{ew}(\omega), \varepsilon_{ns}(\omega)] = v_1(\omega) - \bar{\alpha}^T X J \quad (6)$$

en donde $J^T = (1, 1)$ y $\bar{\alpha} = [\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega), \alpha_3(\omega)]$; este es el vector de los parámetros a calcular.

Se adopta la siguiente hipótesis: *El error definido en la expresión 6 tiene distribución normal con media cero y matriz de varianzas y covarianzas C , es decir,*

$$[\varepsilon_{ew}(\omega), \varepsilon_{ns}(\omega)] \stackrel{d}{=} N \left(\begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix}, C \right) \quad (7)$$

donde

$$C(\omega) = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \rho \sigma_1 \sigma_2 \\ \rho \sigma_1 \sigma_2 & \sigma_2^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

siendo $\sigma_1 = \sigma_1(\omega)$, $\sigma_2 = \sigma_2(\omega)$ las desviaciones estándar y $\rho = \rho(\omega)$ el coeficiente de correlación, desconocidos. Para encontrar estos valores y los coeficientes de la ec 1, se aplicó el método de la máxima verosimilitud introducido por Ronald A. Fisher. La función de verosimilitud se define como la función proporcional a la densidad conjunta de una muestra evaluada en los valores observados y considerada como función de los parámetros desconocidos. Con un marco de estadística bayesiana, se justifica el uso del método de máxima verosimilitud si se le ve como el resultado de aplicar el teorema de Bayes con distribuciones previas uniformes (impropias) y si los estimadores de máxima verosimilitud coinciden, como en este caso, con los vectores esperados posteriores de los parámetros a estimar.

Entonces, sea la densidad conjunta del error ϵ_1 igual a:

$$\lambda_{\epsilon_1 | \bar{\alpha}, C} = \frac{1}{(2\pi)(\det C)^{n/2}} \exp -(\epsilon_1^T C^{-1} \epsilon_1) \quad (9)$$

donde $\bar{\alpha} = [\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega), \alpha_3(\omega)]$ y C son los parámetros desconocidos. Se deben hallar los estimadores máximo-verosímiles $\bar{\alpha}$ y C tales que hagan máxima la función de verosimilitud $\lambda_{E | \bar{\alpha}, C}$; considerando independientes las observaciones de los vectores ϵ_1 , $i=1, 2, \dots, m$, de (9) se llega a:

$$\lambda_{E | \bar{\alpha}, C} = \prod_{i=1}^m \lambda_{\epsilon_i | \bar{\alpha}, C} = \frac{1}{(2\pi)^m (\det C)^{m/2}} \exp \left(-1/2 \sum_{i=1}^m (\epsilon_i^T C^{-1} \epsilon_i) \right) \quad (10)$$

donde E denota el evento consistente en la observación de ϵ_1 , $i=1, 2, \dots, m$. Sustituyendo (9) en (10):

$$\lambda_{E|\bar{\alpha}, C} = \frac{1}{(2\pi)^m (\det C)^{m/2}} \exp\left[-1/2 \sum_{i=1}^m (v_i - \bar{\alpha}^T \chi_i J)^T C^{-1} (v_i - \bar{\alpha}^T \chi_i J)\right] \quad (11)$$

Haciendo

$$K = \frac{1}{(2\pi)^m (\det C)^{m/2}} \quad (12)$$

y desarrollando y completando términos se llega a

$$\lambda_{E|\bar{\alpha}, C} = K \exp(-1/2) \left[(\bar{\alpha} - u)^T Q (\bar{\alpha} - u) \right] \exp(-1/2) \left[\sum_{i=1}^m v_i^T C^{-1} v_i - u^T Q u \right] \quad (13)$$

en donde

$$Q = J^T C^{-1} J \quad (15)$$

$$u = Q^{-1} \gamma C^{-1} J \quad (16)$$

Puede observarse que, dado C , el estimador de máxima verosimilitud para $\bar{\alpha}$ es u :

$$\bar{\alpha} = \chi^{-1} \gamma (J^T C^{-1} J)^{-1} C^{-1} J \quad (17)$$

Para encontrar $\bar{\alpha}$ y C tales que se maximice la ec 13, se procede por iteraciones apoyadas en la relación dada por la ec 17.

Datos

En CU existe el máximo número de registros en comparación con otras estaciones situadas en terreno firme en el valle de México. Esto se debe a que hay distintos acelerógrafos ubicados a distancias pequeñas unos de otros y a que es una estación con muchos años en operación. Para fines de este estudio el número de eventos registrados en CU representa una razón de peso, puesto que si el número de datos involucrados crece, la posibilidad de reducir las incertidumbres aumenta. Para este trabajo se utilizaron 24 registros digitales de aceleración obtenidos en CU. (ver tabla 1). Todos los datos han sido procesados previamente por

EVENTO No	FECHA	COORDENADAS		MAGNITUD	DISTANCIA km	FRECUENCIA Inicial Hz
		Lat N	Long W			
1	23 AGO 1965	16.28	96.02	7.8	466	0.3
2	03 FEB 1968	16.67	99.39	5.9	297	0.3
3	02 AGO 1968	16.25	98.08	7.4	326	0.3
4	01 FEB 1976	17.15	100.23	5.6	282	0.2
5	07 JUN 1976	17.45	100.65	6.4	292	0.3
6	19 MAR 1978	16.85	99.90	6.4	285	0.3
7	29 NOV 1978	16.00	96.69	7.8	414	0.2
8	29 NOV 1978	16.00	96.69	7.8	414	0.2
9	14 MAR 1979	17.46	101.46	7.6	287	0.2
10	25 OCT 1981	17.75	102.25	7.3	339	0.3
11	07 JUN 1982	16.35	98.37	6.9	304	0.2
12	07 JUN 1982	16.45	98.54	7.0	303	0.3
13	19 SEP 1985	18.14	102.71	8.1	295	0.05
14	19 SEP 1985	18.14	102.71	8.1	295	0.05
15	19 SEP 1985	18.14	102.71	8.1	295	0.1
16	21 SEP 1985	17.62	101.82	7.6	318	0.1
17	21 SEP 1985	17.62	101.82	7.6	318	0.2
18	30 ABR 1986	18.42	102.99	7.0	409	0.3
19	08 FEB 1988	17.00	101.00	5.8	289	0.2
20	25 ABR 1989	16.00	99.00	6.9	304	0.2
21	08 OCT 1989	17.92	100.21	5.1	260	0.2
22	13 ENE 1990	16.84	99.65	5.0	282	0.1
23	11 MAY 1990	17.15	100.85	5.3	295	0.2
24	31 MAY 1990	17.15	100.85	6.1	295	0.05

TABLA 1 Datos de los eventos registrados en los acelerógrafos ubicados en Ciudad Universitaria utilizados en este estudio

el Instituto de Ingeniería; el proceso incluye corrección por línea base y corrección instrumental.

Se calcularon los espectros de amplitud de Fourier suavizados (ver p.e. CIS, 1989; Arciniega, 1990) y se muestrearon considerando una frecuencia de inicio diferente para cada espectro (ver tabla 1) a fin de eliminar la información distorsionada contenida en las bajas frecuencias. Tal distorsión es debida principalmente a la calidad y corta duración de los registros. Se muestrearon los espectros de amplitud desde la frecuencia inicial hasta 5 Hz. Este límite es adecuado para el conjunto de datos porque, después de esa frecuencia, los registros están contaminados con ruido. En total se obtuvo información para 39 frecuencias; tres espectros cubren el intervalo de 0.05 Hz a 5.0 Hz; otros tres cubren de 0.10 Hz a 5.0 Hz; diez cubren de 0.20 Hz a 5 Hz y ocho cubren el intervalo de 0.3 Hz a 5 Hz.

Evaluación de parámetros

La tabla 2 contiene los valores de los estimadores $\bar{\alpha}(\omega)$, $\sigma_1(\omega)$, $\sigma_2(\omega)$ y $\rho(\omega)$. La figura 1 muestra su variación con respecto a la frecuencia. En una primera observación puede apreciarse que, en el intervalo 0.25 a 1 Hz, α_1 , α_2 y α_3 fluctúan, pero en general α_2 y α_3 presentan tendencia decreciente con la frecuencia.

El coeficiente α_3 que controla el decaimiento con la distancia es negativo y decreciente con la frecuencia; sus valores varían de -2 a -3.6. Su tendencia decreciente indica que las frecuencias altas se atenúan más rápido que las bajas frecuencias a medida que la distancia se incrementa, tal como predicen los modelos teóricos (Boore, 1983). De 2.5 Hz en adelante empieza a crecer. Esto podría ser causado por el ajuste numérico del procedimiento o atribuirse a efectos causados por las características propias del terreno en CU.

Comparando α_1 , el parámetro independiente, con α_3 , se distingue que tienen una relación casi inversa, lo que probablemente indica

f (Hz)	α_1	α_2	α_3	σ_1	σ_2	ρ
5.000	.35948E+01	.30110	-.22863E+01	.18550	.34872	.18243
3.333	.57561E+01	.38112	-.33034E+01	.14972	.18769	.60234
2.500	.55925E+01	.44621	-.33595E+01	.14115	.18750	.53402
2.000	.61859E+01	.46252	-.35984E+01	.15576	.16870	.37398
1.667	.58011E+01	.50521	-.35302E+01	.18479	.18722	.51065
1.429	.48521E+01	.56923	-.32966E+01	.16892	.21174	.62746
1.250	.50017E+01	.57891	-.33521E+01	.18844	.19542	.66590
1.111	.42067E+01	.56613	-.29753E+01	.20159	.18971	.63966
1.000	.43620E+01	.54594	-.29667E+01	.21169	.16343	.57364
0.909	.47443E+01	.54265	-.31143E+01	.22317	.19783	.60146
0.833	.50499E+01	.58587	-.33573E+01	.21866	.25717	.57548
0.769	.50462E+01	.60772	-.34063E+01	.22356	.27541	.71835
0.714	.46523E+01	.60449	-.32227E+01	.22723	.28183	.71731
0.667	.30256E+01	.58707	-.25145E+01	.24253	.29214	.69318
0.625	.25268E+01	.60226	-.23469E+01	.24496	.32149	.61131
0.588	.14668E+01	.59196	-.18888E+01	.23903	.35182	.61141
0.556	.13232E+01	.66785	-.20460E+01	.24518	.38980	.60001
0.526	.11126E+01	.69481	-.20434E+01	.22848	.39940	.70011
0.500	.90737E+00	.68994	-.19445E+01	.22095	.37600	.69687
0.476	.87553E+00	.69772	-.19613E+01	.21728	.37970	.69495
0.455	.20271E+01	.65837	-.23174E+01	.27803	.34728	.66287
0.435	.27782E+01	.61852	-.25103E+01	.30638	.34204	.65548
0.417	.34781E+01	.62621	-.28092E+01	.33320	.34509	.64612
0.400	.46046E+01	.64216	-.33048E+01	.36706	.34969	.65674
0.385	.36880E+01	.65914	-.29977E+01	.35667	.38116	.71038
0.370	.32219E+01	.65860	-.28137E+01	.35965	.39088	.72912
0.357	.31974E+01	.66000	-.28140E+01	.36232	.38211	.69650
0.345	.37023E+01	.66542	-.30382E+01	.38508	.37092	.67278
0.333	.39739E+01	.67513	-.31893E+01	.41646	.35484	.61625
0.323	.36234E+01	.68287	-.30793E+01	.40184	.35186	.55773
0.313	.33274E+01	.69684	-.30066E+01	.38975	.33700	.50811
0.303	.28716E+01	.70406	-.28487E+01	.38522	.33198	.52349
0.294	.44223E+00	.74629	-.20003E+01	.33107	.37478	.55118
0.286	.78416E+00	.74393	-.21452E+01	.34968	.36729	.55782
0.278	.89823E+00	.73388	-.21769E+01	.35473	.36247	.53641
0.270	.14056E+01	.72654	-.23718E+01	.35097	.34589	.53673
0.263	.19661E+01	.72669	-.26110E+01	.34546	.34238	.55195
0.256	.23199E+01	.72592	-.27573E+01	.34549	.33730	.57565
0.250	.28653E+01	.72393	-.30275E+01	.35272	.32428	.64771

Tabla 2 Parámetros $\alpha(f)$, $\sigma(f)$ y $\rho(f)$

una compensación numérica espuria entre α_1 y α_3 , que proviene del limitado rango de distancias focales en los datos, esto hace que el método de máxima verosimilitud sea prácticamente insensible a cambios en α_3 que originan cambios en α_1 tales que el error estándar permanece casi constante. Por esta razón se decidió fijar α_3 en un valor constante, igual a -0.5 , considerado como factor de atenuación geométrica de las ondas superficiales.

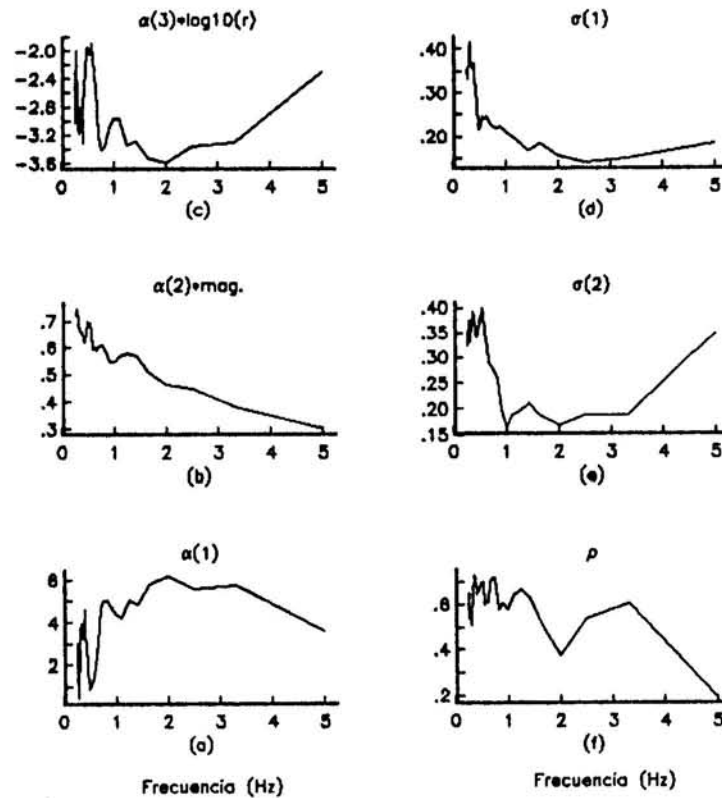


Fig 1 Comportamiento de parámetros $\alpha(f)$, $\sigma(f)$ y $\rho(f)$

Con esta consideración se redefinen el vector de la ec 2 y el vector $v_1^T(\omega)$ constituido por las amplitudes observadas y muestreadas de cada componente, como

$$x_1^T = (1, M_1) \quad (18)$$

y

$$v_1^T(\omega) = (y_1 - \alpha_3 \log R_1, z_1 - \alpha_3 M_1 \log R_1) \quad (19)$$

encontrándose los estimadores $\bar{\alpha} = [\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega)]$, $\sigma_1(\omega)$, $\sigma_2(\omega)$ y $\rho(\omega)$ con el procedimiento descrito. Los resultados se presentan en la tabla 3 y en la figura 2.

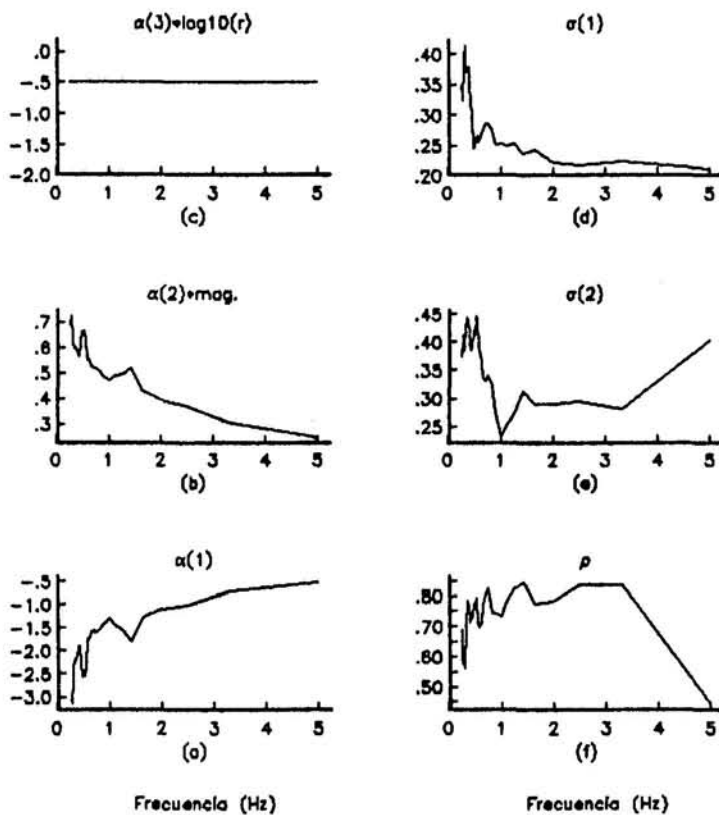


fig 2 Comportamiento de parámetros $\alpha(f)$, $\sigma(f)$ y $\rho(f)$

En general no parecen distinguirse cambios significativos comparando con los resultados mostrados en la figura 1 obtenidos con α_3 variable.

Los estimadores $\sigma_1(\omega)$ y $\sigma_2(\omega)$ se muestran en las figuras 1-d y 1-e para α_3 variable y en las figuras 2-d y 2-e para $\alpha_3 = -0.5$. Se aprecia un ligero aumento en la desviación estandar obtenida con el valor fijo de $\alpha_3 = -0.5$.

f (Hz)	α_1	α_2	α_3	σ_1	σ_2	ρ
5.000	-.52098E+00	.24848	-.50000	.21027	.40215	.44242
3.333	-.71932E+00	.30420	-.50000	.22372	.28088	.83841
2.500	-.10295E+01	.37051	-.50000	.21755	.29360	.83537
2.000	-.10985E+01	.39280	-.50000	.22128	.29001	.77918
1.667	-.12750E+01	.43143	-.50000	.24185	.28950	.77437
1.429	-.17997E+01	.51963	-.50000	.23600	.31186	.84529
1.250	-.15383E+01	.49407	-.50000	.25387	.27273	.82453
1.111	-.14419E+01	.48798	-.50000	.25028	.25165	.78010
1.000	-.12955E+01	.47155	-.50000	.25250	.23099	.73110
0.909	-.14079E+01	.48553	-.50000	.25230	.27446	.74481
0.833	-.15201E+01	.50253	-.50000	.27601	.32686	.74151
0.769	-.16109E+01	.51933	-.50000	.28642	.33935	.82280
0.714	-.15556E+01	.51732	-.50000	.28471	.33161	.80412
0.667	-.15678E+01	.52228	-.50000	.27234	.33461	.76920
0.625	-.17287E+01	.54801	-.50000	.26859	.36671	.70837
0.588	-.17520E+01	.55332	-.50000	.25611	.38925	.69726
0.556	-.23330E+01	.63452	-.50000	.26726	.43907	.71088
0.526	-.25367E+01	.66192	-.50000	.25998	.44637	.78798
0.500	-.24821E+01	.65645	-.50000	.24772	.41284	.76951
0.476	-.25581E+01	.66466	-.50000	.24559	.41860	.77245
0.455	-.22324E+01	.61553	-.50000	.29827	.38893	.73415
0.436	-.18948E+01	.56548	-.50000	.32378	.38504	.72036
0.417	-.19061E+01	.56686	-.50000	.34724	.39775	.71411
0.400	-.19627E+01	.57399	-.50000	.38042	.41369	.72260
0.385	-.21392E+01	.59590	-.50000	.37410	.43879	.77106
0.370	-.21587E+01	.59795	-.50000	.37481	.44409	.78271
0.357	-.21987E+01	.60228	-.50000	.37133	.43773	.75385
0.345	-.22022E+01	.59954	-.50000	.38858	.42795	.72300
0.333	-.22373E+01	.59950	-.50000	.41422	.41005	.65500
0.323	-.23453E+01	.61204	-.50000	.39447	.41097	.60740
0.313	-.24773E+01	.62823	-.50000	.37875	.39790	.56329
0.303	-.25635E+01	.63917	-.50000	.37902	.38492	.57271
0.294	-.31437E+01	.72500	-.50000	.32483	.41226	.60554
0.286	-.31578E+01	.72150	-.50000	.34329	.40222	.60014
0.278	-.31092E+01	.70970	-.50000	.35044	.39386	.57469
0.270	-.30622E+01	.69922	-.50000	.34655	.38095	.57837
0.263	-.30790E+01	.69665	-.50000	.34052	.38533	.60374
0.256	-.30722E+01	.69340	-.50000	.34044	.38356	.62815
0.250	-.30774E+01	.68850	-.50000	.34713	.37289	.68814

Tabla 3 Parámetros $\alpha(f)$, $\sigma(f)$ y $\rho(f)$

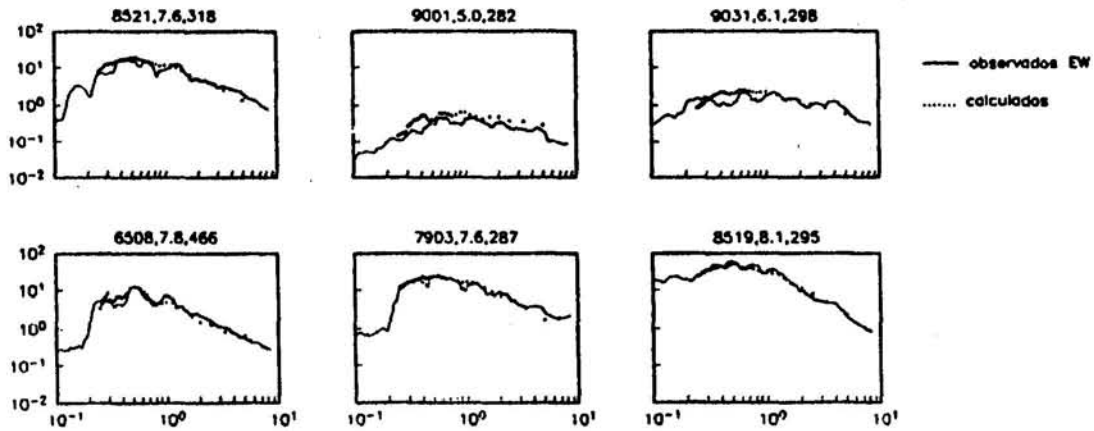
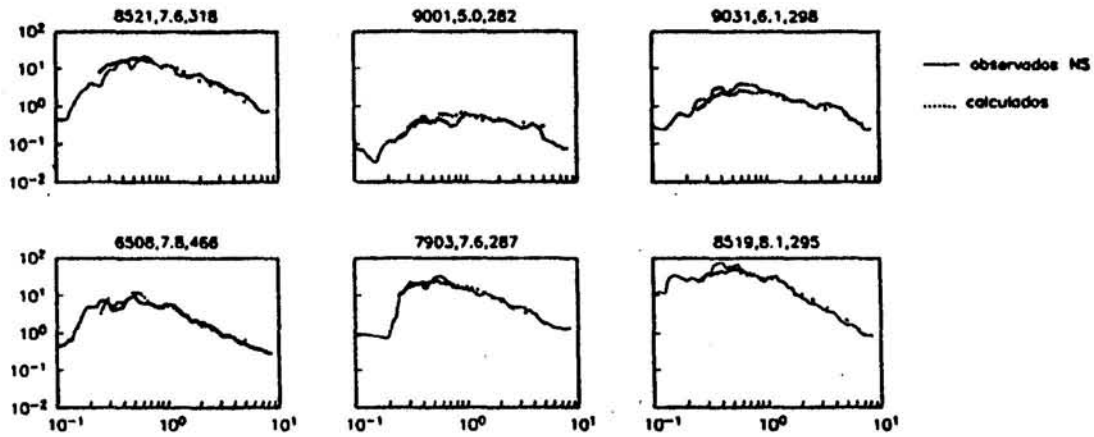


Fig 3 Mejor aproximación de espectros de amplitud calculados y observados ambos componentes, estimados con $\alpha_3(f)$ variable.

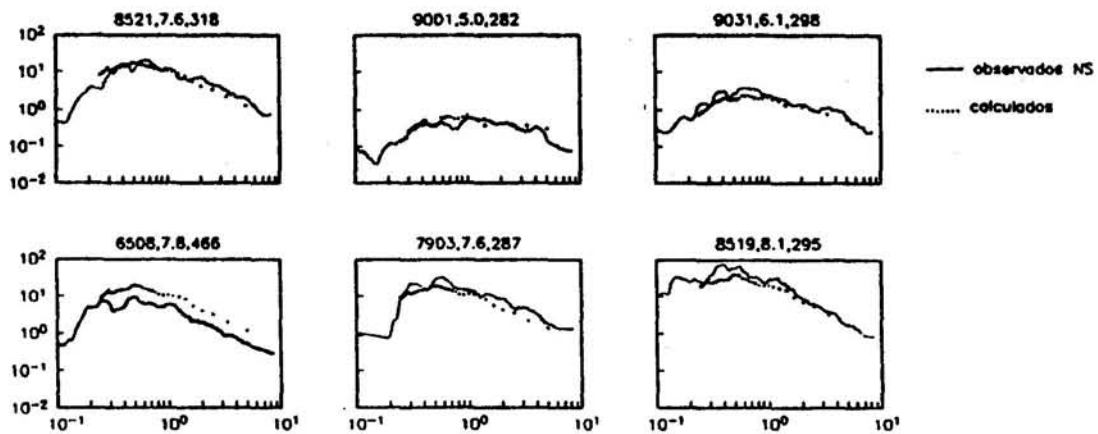


Fig 5 Mejor aproximación de espectros de amplitud calculados y observados ambos componentes, estimados con $\alpha_3(f) = -0.5$.

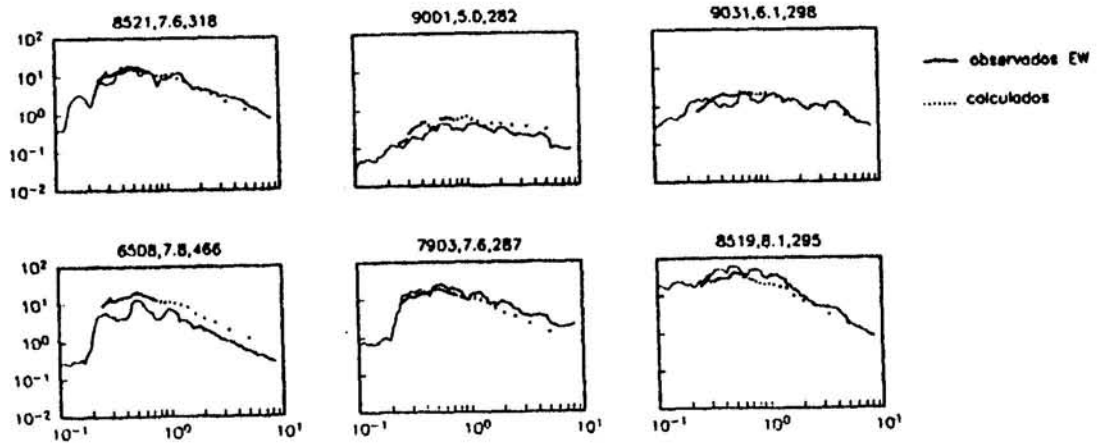
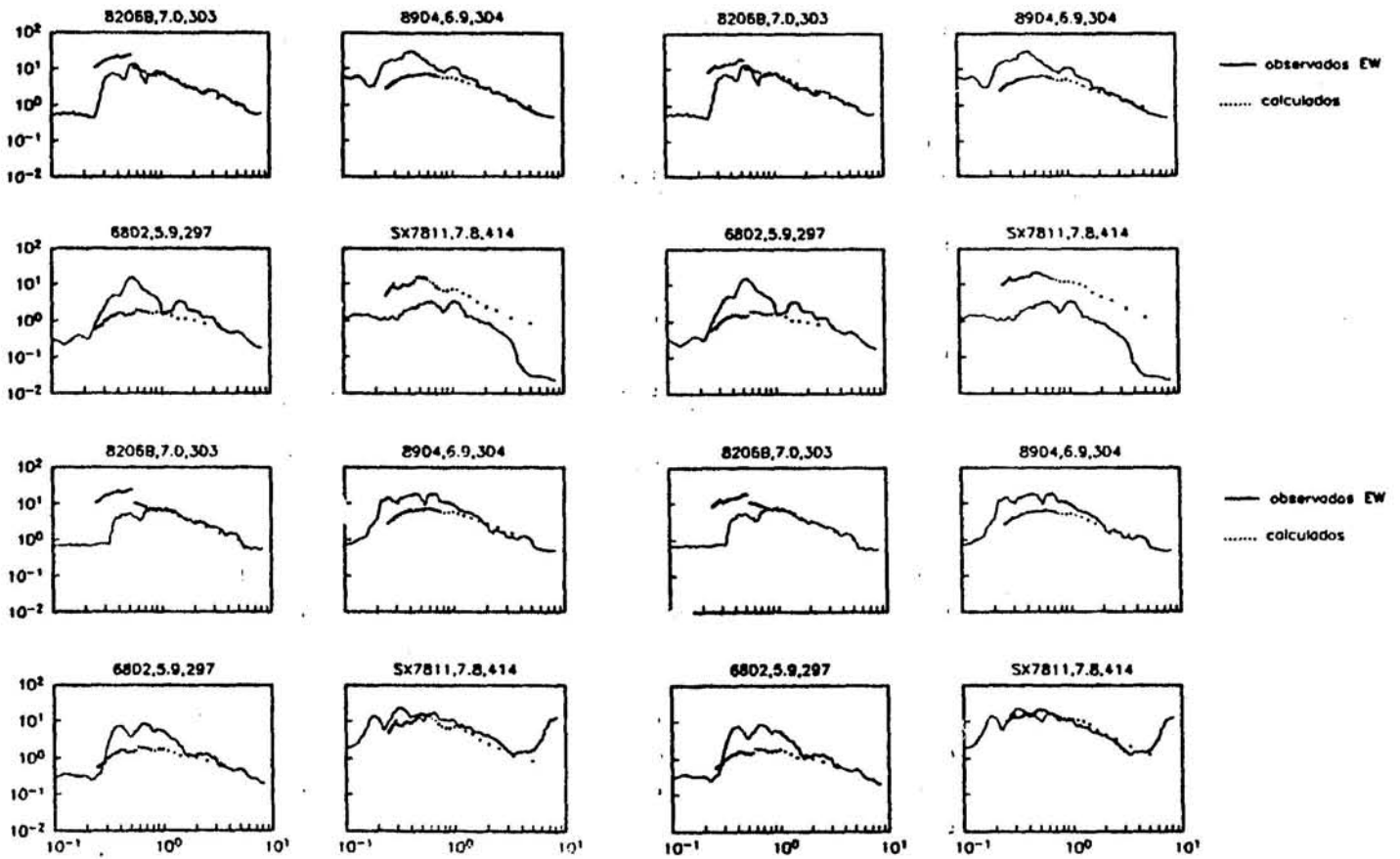


Fig 5 continuación ...



Ajuste menos aproximado de espectros de amplitud

Fig 4 Con $\alpha_3(f)$ variable

Fig 6 Con $\alpha_3(f) = -0.5$

Respecto al coeficiente que controla la dependencia con la magnitud α_2 , es apreciable la semejanza entre las figuras 1-b y 2-b. Ambos casos presentan una tendencia decreciente con la frecuencia y conservan igual forma en todo el intervalo de frecuencias, a excepción de una ligera variación en frecuencias alrededor de 1 Hz. Las máximas diferencias, del orden de 30%, se presentan en frecuencias mayores a 2 Hz. Esta semejanza sugiere que el comportamiento de α_2 es independiente de los valores que toman los otros coeficientes α_1 y α_3 . La tendencia observada coincide con lo esperado teóricamente en el sentido de que la energía en baja frecuencia aumenta más rápidamente con la magnitud del temblor que la energía de alta frecuencia (Brune, 1970).

El coeficiente de correlación ρ , tanto con α_3 variable como con $\alpha_3 = -0.5$ (figuras 1-f y 2-f respectivamente), toma valores cada vez más cercanos a uno conforme crece la frecuencia, sugiriendo que las amplitudes en los dos componentes están fuertemente correlacionadas para alta frecuencia, lo que se acentúa en el caso de $\alpha_3 = -0.5$.

Cálculo de espectros de amplitud en Ciudad Universitaria

De acuerdo con el modelo de la ec 1 y los valores $\alpha_1(\omega)$ de la tabla 2 y 3 se obtuvieron los espectros esperados de amplitud de Fourier de aceleración del movimiento horizontal de algunos eventos listados en la tabla 1, en el rango de frecuencias de 0.25 a 5 Hz. El espectro esperado obtenido representa ambos componentes horizontales, puesto que se asignó igual peso a la información muestreada de los espectros de amplitud de Fourier de cada componente y no se escogió el máximo de entre ellos. Para ejemplificar, se escogieron los espectros que mejor ajustan a los espectros observados (figuras 3 y 5) y los que más difieren de ellos (figuras 4 y 6). En general, se observa que la aproximación es buena.

En la figura 7-a, se muestran espectros de amplitud para una distancia fija y diferentes magnitudes ($5.0 \leq M \leq 8.1$). Nótese que

el contenido de energía del espectro en las bajas frecuencias se atenúa más lentamente en comparación con las altas frecuencias, en coincidencia con lo esperado teóricamente. La figura 7-b muestra espectros calculados para una magnitud de 8.1 y diferentes distancias ($260 \leq R \leq 466$); se aprecia el decaimiento rápido del espectro en las altas frecuencias. Esto contrasta con la figura 7-c en que la magnitud es más pequeña (5.6); se suaviza notoriamente el decaimiento de las altas frecuencias acentuándose el de las bajas frecuencias. Lo anterior sugiere que la forma de los espectros es notablemente sensible al valor de M .

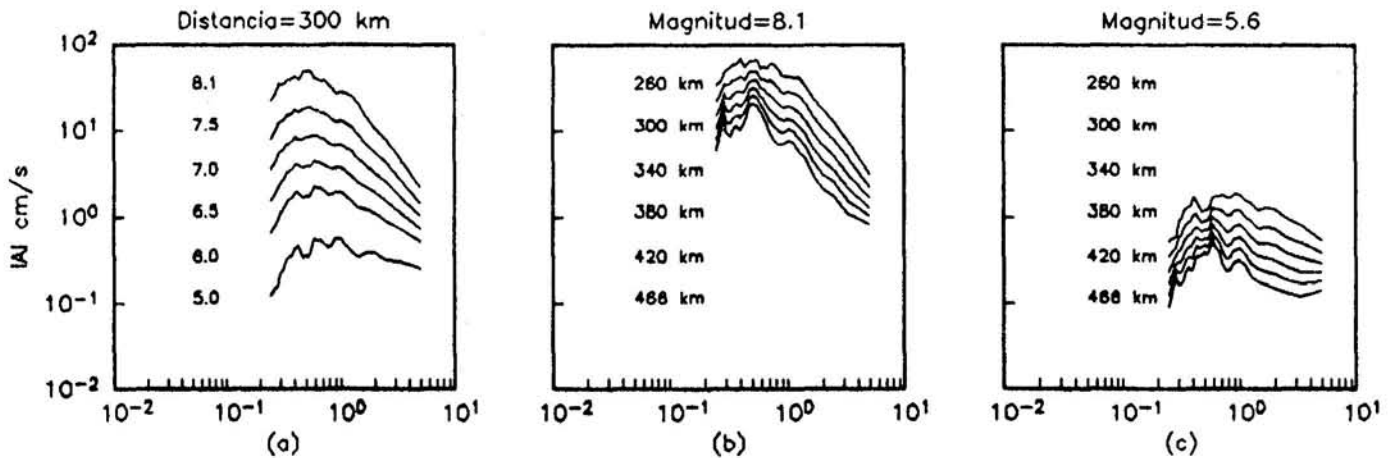


Fig 7 Espectros esperados para diferentes magnitudes y distancias, estimados con $\alpha_3(f)$ variable

Aparentemente fijar $\alpha_3 = -0.5$ no causa diferencias importantes (ver figuras 5 y 6). Sin embargo, en la figura 8-a no se aprecia variación significativa en contenido de frecuencias ni en amplitud al variar la distancia. En el caso de la figura 8-b la estimación mejora aproximándose a lo obtenido por el modelo α_3 variable. En

general, el rango que abarcan en amplitud los espectros calculados con $\alpha_3 = -0.5$ es ligeramente menor al que abarcan los espectros calculados con α_3 variable. Sólo coinciden en forma y amplitud los espectros correspondientes a $M = 6.5$, (comparar figuras 7-a y 8-b).

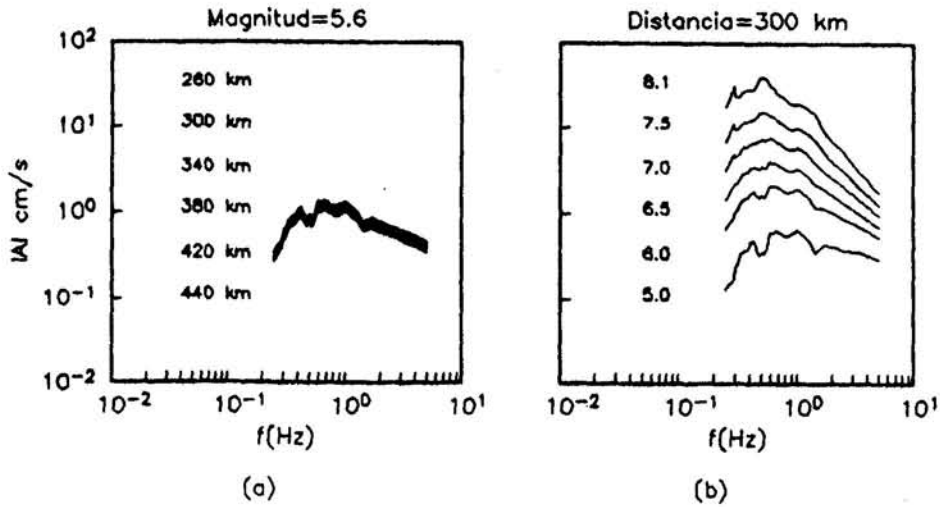


Fig 8 Espectros esperados para diferentes magnitudes y distancias, estimados con $\alpha_3(f) = -0.5$

En la figuras 7 y 8 se observa que el decaimiento de la amplitud en la alta frecuencia es más pronunciado cuanto mayor es la magnitud. Los modelos teóricos predirían decaimientos similares. Este comportamiento puede atribuirse a la calidad de los registros si se considera: a) que el 50 % de los datos utilizados en este trabajo con fecha anterior a 1985 no son de muy buena calidad (Singh, comunicación personal) y b) que la relación señal ruido varía en forma inversa con el tamaño del temblor. Por esto los registros de temblores pequeños aunque contienen información menos compleja que los de temblores grandes son menos confiables.

Comparación con otro método

En la figura 9 se muestran espectros calculados con los coeficientes de la tabla 2 (figuras 9-a y 9-c) y con los coeficientes obtenidos por Castro *et al.* (1988), (figuras 9-b y 9-d).

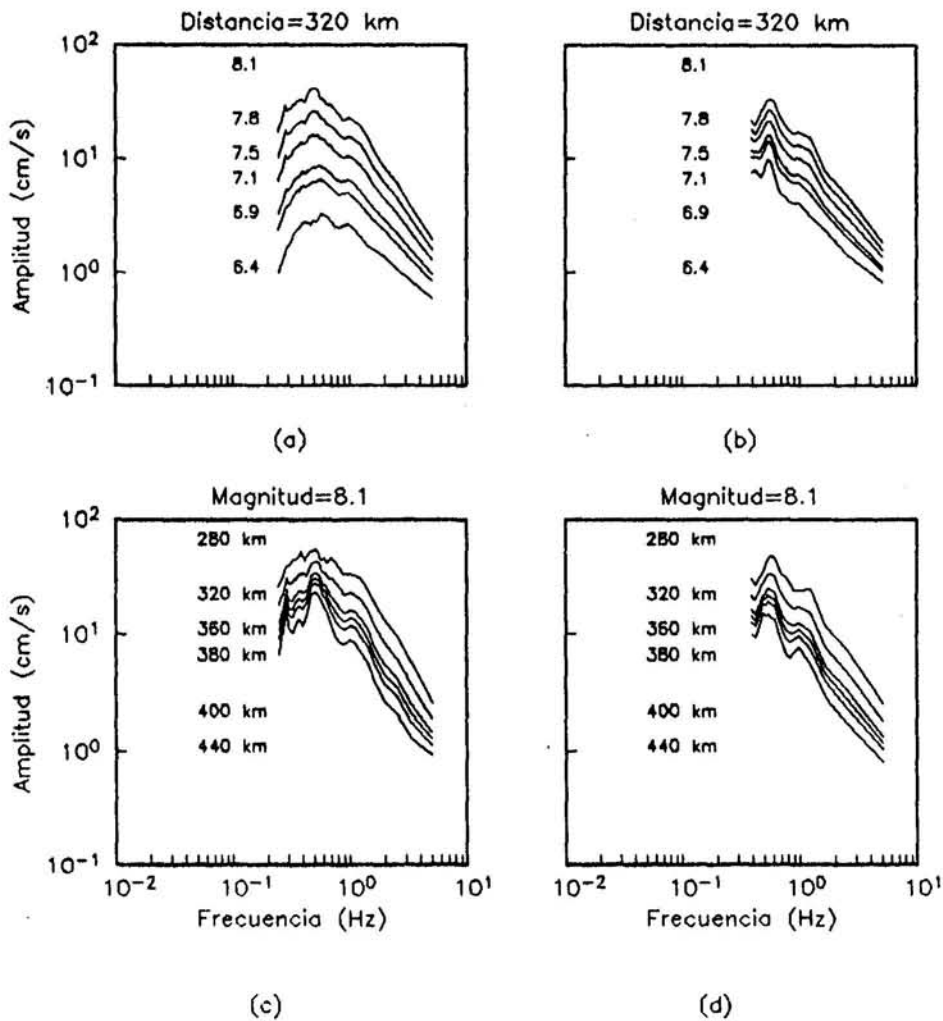


Fig 9 Espectros de amplitud para diferentes sismos postulados, estimados con el método que se propone (a y c) y calculados según Castro *et al.* (1988) (b y d)

Se estimaron espectros para una distancia fija de 320 km y valores de M en el rango de $5.6 \leq M \leq 8.1$; en el figura 9-b los máximos espectrales se ubican en 1.7 s para todas las M , y en 1.7 s a 2 s en la figura 9-a. El cambio de posición de los máximos espectrales también se observa en las figuras 9-c y 9-d, espectros para una magnitud fija de 8.1. En ambas figuras 9-d y 9-c un primer máximo espectral se mantiene fijo en 2 s para todos los espectros. Un segundo pico menos energético aparece en 1 s para valores de R entre 360 y 470 km, y en 0.8 s para R menores a 360 km. Según Castro *et al.* (1988) el segundo pico puede asociarse con los efectos de sitio propios de CU.

Por otro lado, se espera que los espectros estimados para diferentes temblores, definidos por un valor de M y registrados en una misma estación ubicada a una distancia fija, muestren un contenido de frecuencias distinto, el cual se puede asociar con el efecto de la frecuencia de esquina, característica particular de la magnitud de cada evento. Obsérvese el corrimiento en las frecuencias en la figura 9-a y no en la figura 9-b, este último calculado con las fórmulas de Castro *et al.* (1988).

De las diferencias y comparaciones anteriores podemos argumentar que el método desarrollado es más sensible a los cambios de R y M ; además, muestra las diferencia en el contenido de frecuencias entre sismos grandes y pequeños.

Las diferencias entre los métodos discutidos se explican principalmente por los siguientes aspectos: a) la base de datos utilizada en este trabajo incluye los eventos posteriores a 1988, se aclara que la comparación se hizo únicamente con los valores de magnitud y distancia del rango de datos utilizados por Castro *et al.* (1988); b) se tomaron en cuenta más datos en baja frecuencia debido al criterio de muestreo y c) la técnica estadística permite distinguir entre componentes horizontales. En cambio, el método previo toma la amplitud máxima espectral que se presenta en la frecuencia de interés, sin importar el componente. Estas razones

amplian el margen de confiabilidad para estimar un espectro de amplitud en terreno firme utilizando el modelo que se propone.

Verificación del método

Para verificar el modelo propuesto se calculó el espectro de amplitud en CU para el sismo de mayo 31 de 1990, el cual se excluyó de la regresión. Los datos de distancia y magnitud están contenidos en la tabla 1 (magnitud 6.1 y distancia más cercana a CU, $R=295$ km). Las diferencias que presenta el espectros de amplitud calculado respecto al observado son aceptables (ver figura 10).

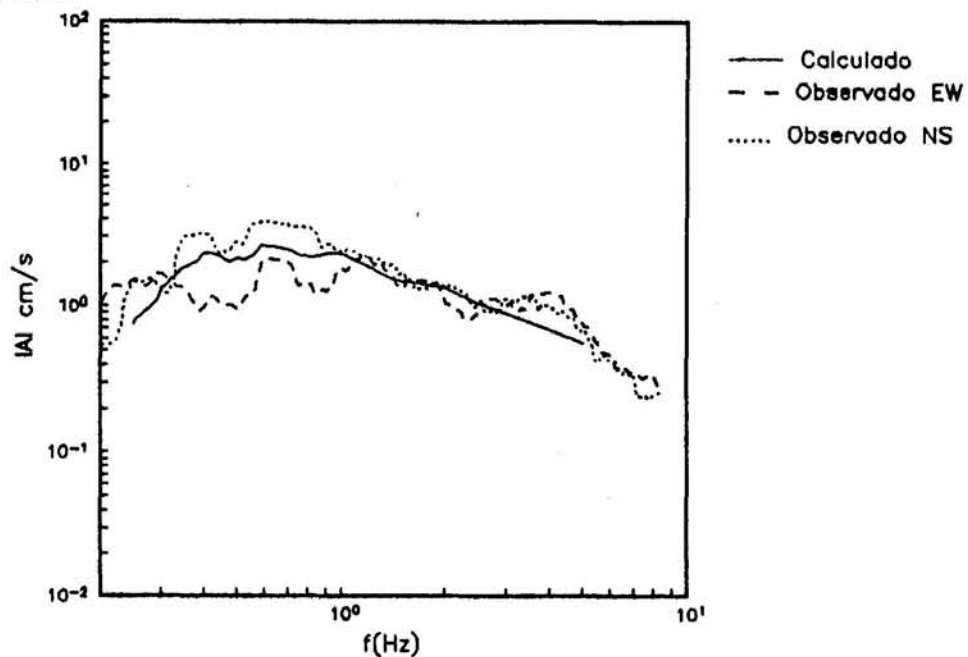


Fig 10 Verificación del método, predicción del sismo 31 de mayo de 1990. Espectro de amplitud estimado contra ambos componentes observados

Conclusiones

Dada la vulnerabilidad del valle de México a sismos de gran magnitud provenientes de la costa, importa contar con un procedimiento que permita estimar el movimiento en terreno firme en términos de espectros de aceleración de amplitud de Fourier.

El método semiempírico desarrollado permite predecir espectros de amplitud de Fourier en terreno firme (CU), y tiene como aplicación práctica la estimación de espectros de respuesta en otros sitios del valle de México mediante la teoría de vibraciones aleatorias y el uso de funciones de transferencia empíricas; esta técnica se describe con detalle en Ordaz *et al.* (1988, 1989), Reinoso, E (1990) y Arciniega, A (1990).

Los resultados obtenidos de estimar los espectros de amplitud cumplen con algunas consideraciones teóricas fundamentadas en modelos de fuente. De acuerdo con el tamaño del temblor, los espectros estimados presentan variaciones en su contenido de frecuencias; esto se asocia principalmente con el tamaño de la fuente sísmica.

De las comparaciones con los espectros observados se puede concluir que el método propuesto, si bien no reproduce rigurosamente los espectros observados, sí da resultados satisfactorios que pueden ser mejorados al incorporar a los datos los sismos de subducción que con el transcurso del tiempo vayan sucediendo. Por el momento, la precisión del método es mejor para los rangos de magnitud de $5.0 \leq M \leq 6.0$ y $6.9 \leq M \leq 8.1$.

Se verificó el modelo propuesto, calculando el espectro de amplitud en CU para el evento del 31 de mayo de 1990, excluyéndolo de la regresión. De la comparación entre el espectro estimado con los observados, se encontraron diferencias no muy importantes. En este trabajo se han achacado al azar todas las diferencias entre lo observado y lo calculado. Esto seguramente es inexacto y procede entonces explorar la dependencia de los espectros con otros factores además de magnitud y distancia, tales como efectos de trayectoria.

Agradecimientos

Los autores agradecen a E Rosenblueth y a S K Singh sus comentarios y sugerencias. Los acelerogramas fueron proporcionados por el Instituto de Ingeniería. Este trabajo fue patrocinado por la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal y la DGAPA de la UNAM.

REFERENCIAS

- Arciniega, A. 'Método semiempírico para la estimación de espectros de respuesta sísmicos en el valle de México', Ingeniería Geofísica tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (1990).
- Boore D. M. 'Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra', *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1865-1894 (1983).
- Brune, J. B. 'Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes', *J. Geophysc. Resch.*, 75, 4997-5009 (1970).
- CIS. 'Cálculo de espectros de respuesta a través de funciones de transferencia empíricas'. Proyecto de investigación Centro de Investigación Sísmica Fundación Javier Barros Sierra AC. Informe final al DDF (1989).
- Hanks, T.C. y Kanamori, H. 'A moment magnitude scale', *J. Geophysc. Resch.*, 84, may (1979).
- Ordaz, M., Singh, S.K., Reinoso, E., Lermo, J., Espinosa, J.M. y Domínguez, T. 'Estimation of Response Spectra in the Lake Bed Zone of the Valley of Mexico', *Earthquake Spectra*, 4, 815-834, Nov. (1988).
- Ordaz, M., Reinoso, E., Singh, S.K., Vera, E. y Jara, J.M. 'Espectros de respuesta en sitios del valle de México ante temblores postulados en la brecha de Guerrero', *Memorias VIII Congr. Nac de Ing Sísmica*, Acapulco, Gro. México, A187-A198 (1989).
- Reinoso, E. 'Un método para el cálculo aproximado de espectros de respuesta sísmica y algunas aplicaciones', *Ingeniería Sísmica*, 38, 39-56 (1990).