

32



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

ACATLÁN

299713



ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS SÍSMICOS REGISTRADOS EN EL VALLE DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

CARLOS IGNACIO VILLA VELÁZQUEZ MENDOZA

DIRECTORA DE TESIS: DRA. SONIA ELDA RUIZ GÓMEZ

NOVIEMBRE DE 2001





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
CAMPUS "ACATLÁN"

Relación de profesores que fungirán como sinodales en el examen profesional que presentará el (a) alumno (a): **C. VILLA MENDOZA CARLOS I.** de la carrera de **INGENIERÍA CIVIL** y que servirán firmar de enterado:

- PRESIDENTE:** ING. FRANCISCO PÉREZ ARELLANO
Tel. 53-61-94-73
- VOCAL:** DRA. SONIA ELDA RUÍZ GÓMEZ (ASESOR)
Tel. 56-58-95-50
- SECRETARIO:** ING. CARLOS ARCE LEÓN
Tel. 53-41-11-41
- SUPLENTE:** M. en I. ROLANDO REYES GRECO
Tel. 52-94-83-70
- SUPLENTE:** ING. DÁRIO RIVERA VARGAS
Tel. 53-03-57-87

Dedicatoria

♣ **A mis padres Carlos y Leticia y a mi hermano Daniel** por ser la luz de mi camino, los quiero mucho, y a b.e.t.i. por su compañía.

♣ **A la Dra. Sonia Elda Ruíz Gómez** por darme la oportunidad que siempre había estado buscando, y por ser un ejemplo a seguir.

Agradecimientos

- ♣ A la **ENEP Acatlán de la UNAM** por darme una formación de alto nivel.

 - ♣ Al **Instituto de Ingeniería de la UNAM** por las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

 - ♣ Al **M. en I. Leonardo Alcántara N.** por proporcionar los registros acelerográficos que son base fundamental de este trabajo.

 - ♣ Al **Prof. Pol D. Spanos** por sus comentarios.

 - ♣ A mis amigos de los **cubículos 208 y 213** del Instituto de Ingeniería de la UNAM.
-

♣ A la **M. en C. Juana Luz Rivera Salas**, al **M. en I. Darío Hernández Herman** y a mi hermano **Daniel** por darme no sólo su amistad y sinceridad sino también por su gran apoyo, gracias amigos les debo mucho.

♣ Esta tesis se realizó con el apoyo del proyecto **DGAPA-UNAM IN111998**

Índice

INTRODUCCIÓN	Pág.
	1
CAPÍTULO 1	
ANTECEDENTES	4
1.1 ¿QUÉ PRODUCE LOS SISMOS?	4
1.1.1 El origen de los sismos	4
1.1.2 Las placas tectónicas en México	5
1.1.3 Zonificación sísmica del Valle de México	6
1.2 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA EN MÉXICO	7
CAPÍTULO 2	
SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS	10
2.1 PARÁMETROS DE SELECCIÓN	10
2.2 EVENTOS SÍSMICOS	11
2.3 ESTACIONES ACELEROMÉTRICAS	12
2.4 ESTACIONES ACELEROMÉTRICAS POR ZONAS	15
2.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	23
CAPÍTULO 3	
PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES SÍSMICAS	25
3.1 CORRECCIÓN DE ERRORES DE DIGITALIZACIÓN	25
3.1.1 Tipos de errores y corrección de acelerogramas	26
3.1.2 Registros descartados	29
3.2 ROTACIÓN DE ACELEROGRAMAS	31
3.3 PARTE INTENSA DE LOS ACELEROGRAMAS	35
3.4 SUBMUESTREO Y SOBREMUESTREO DE LOS ACELEROGRAMAS	38
3.5 RESUMEN DE RESULTADOS	40

CAPÍTULO 4	
FILTRADO DE FRECUENCIAS Y CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE	41
4.1 ANTECEDENTES DE LA CORRECCIÓN DE LA LÍNEA BASE	42
4.2 EL FILTRADO DE FRECUENCIAS	44
4.2.1 Filtros selectivos en frecuencia	44
4.3 FILTRADO DE ACELEROGRAMAS	45
4.3.1 Filtro Butterworth	45
4.3.2 Procedimiento de filtrado	46
4.4 RESUMEN DE RESULTADOS	50
CAPÍTULO 5	
INTENSIDAD DE ARIAS Y FUNCIONES DE MODULACIÓN	51
5.1 LA INTENSIDAD DE ARIAS	52
5.2 SUBGRUPOS DE REGISTROS A PARTIR DE LA INTENSIDAD DE ARIAS	52
5.3 ESTUDIO ESTADÍSTICO DE LAS CURVAS DE INTENSIDAD	57
5.4 FUNCIÓN MODULADORA DE LA INTENSIDAD	66
5.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
CAPÍTULO 6	
ESPECTROS DE AMPLITUD DE FOURIER Y FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL	79
6.1 ANÁLISIS DE FOURIER	79
6.1.1 La serie de Fourier	79
6.1.2 La integral de Fourier	81
6.1.3 Transformada de Fourier	82
6.2 RESULTADOS DE LAS TRANSFORMADAS DE FOURIER	84
6.3 LA FUNCIÓN DE DENSIDAD ESPECTRAL	94
6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS FUNCIONES DE DENSIDAD ESPECTRAL	102
CAPÍTULO 7	
ESPECTROS DE RESPUESTA LINEAL	106
7.1 LA ECUACIÓN DE MOVIMIENTO	106
7.2 HISTORIA DE RESPUESTA Y CONCEPTO DE PSEUDO-ACELERACIÓN	107
7.3 ESPECTROS DE RESPUESTA	109
7.4 CONSTRUCCIÓN DE ESPECTROS DE RESPUESTA	112
7.5 RESULTADOS SOBRE ESPECTROS DE RESPUESTA	113

CONCLUSIONES	131
BIBLIOGRAFÍA	136
APÉNDICE A	
Programas de cómputo	139
APÉNDICE B	
Filtro de Clough y Penzien	145

Introducción

Los sismos pueden ser originados por muchos fenómenos como la actividad volcánica y las explosiones, pero los más importantes para la ingeniería sísmica son los de origen tectónico, es decir, aquellos que están asociados con deformaciones en la corteza terrestre.

En la ingeniería sísmica interesa registrar los movimientos sísmicos en función de su relevancia en cuanto a sus efectos en las estructuras construidas en una zona determinada. Una descripción relativamente completa del movimiento del terreno durante un temblor requiere la utilización de registros en varios puntos, y en tres direcciones ortogonales en cada punto. Aquí se realiza un estudio estadístico de los movimientos sísmicos horizontales registrados en el Valle de México.

Objetivo Principal

Analizar en forma estadística los movimientos sísmicos moderados e intensos registrados en el Valle de México desde 1960 hasta 1997, obteniendo valores medios y desviaciones estándar representativos de duración, intensidad de Arias, contenido de frecuencia y espectros de respuesta lineal de registros acelerográficos rotados a su máxima intensidad de Arias ante sismos de origen tectónico de subducción.

Planteamiento

Para lograr el objetivo principal se realiza lo que se describe a continuación:

Primeramente, en el Capítulo 1 se da una breve introducción sobre el origen de los sismos, las placas tectónicas en México, los tipos de fallas que existen entre dichas placas y la zonificación sísmica actual en el Valle de México.

En el Capítulo 2 se buscan las componentes E-W y N-S de todos los registros sísmicos registrados en el Valle de México desde 1960 hasta 1997, siendo estos de origen tectónico de subducción. Una vez con todas las historias de aceleración, se establecen parámetros especiales de selección de acelerogramas, buscando aquellos que su aceleración máxima sea mayor o igual que 10 gals y que sean de eventos cuya magnitud sea mayor o igual que 6.9 grados Richter, además de que todas las señales deben estar completas y sin cortes extraños.

Posteriormente, se procede a localizar las estaciones acelerométricas dentro del Valle de México para formar un catálogo general de todas las estaciones, así como también un catálogo de estaciones acelerométricas con sus características fundamentales.

En el Capítulo 3 se corrigen los registros que tengan errores de digitalización y se descartan todos aquellos que no puedan ser corregidos. Se indican los tipos de errores encontrados en los acelerogramas seleccionados y se menciona el procedimiento de corrección.

Con los catálogos del Capítulo 2 se procesan las señales, que consiste en proyectar cada componente E-W y N-S de cada registro para determinar el registro acelerográfico donde se encuentre el máximo valor de intensidad de Arias. Se dan tablas de resultados que indican el ángulo en el cual se encuentra la máxima intensidad de Arias de cada registro.

Luego, se procesan las señales de máxima intensidad de Arias, obteniendo para cada una su curva de intensidad de Arias en la cual se aplica un parámetro de corte de 2.5% y 97.5% de dicha curva para obtener la parte intensa de cada acelerograma.

En el Capítulo 4 se lleva a cabo la corrección de la línea base de las historias de aceleración, de velocidad y de desplazamiento, usando un filtro pasa-alta; cabe señalar que se utiliza la parte intensa de los registros. Se realiza lo anterior con el fin de obtener las

historias de aceleración, de velocidad y de desplazamiento corregidas en el dominio de frecuencia, para poder realizar un estudio espectral en los capítulos siguientes.

Una vez corregidos los acelerogramas se obtienen los valores de intensidad de Arias y de duración, y se agrupan dichas señales con respecto a su nivel de intensidad de Arias, por lo que cada una de las seis zonas sísmicas del Valle de México cuenta con varios subgrupos de señales que indican diferentes intervalos de intensidad de Arias. Para cada subgrupo se determina la duración máxima promedio y el valor medio de intensidad de Arias máxima de los registros que se encuentren en cada subgrupo, ver Capítulo 5.

En el Capítulo 5 se ajustan funciones matemáticas a las curvas de valor medio de intensidad de Arias de cada subgrupo, y posteriormente obtener la función moduladora de la intensidad Arias representativa de cada subgrupo.

De igual forma que se trabaja con la intensidad de Arias para obtener los valores medios, se prosigue trabajando únicamente con la parte intensa corregida en el dominio de frecuencia de cada acelerograma. En el Capítulo 6 se obtiene el espectro de amplitud de Fourier para cada registro obteniendo el valor medio y la desviación estándar de cada subgrupo. Haciendo uso de los valores medios de los espectros de amplitud de Fourier de cada subgrupo se obtienen las funciones de densidad espectral. A dichas funciones se les ajustan parámetros del filtro de Clough y Penzien, y se encuentran los parámetros que definan a cada función de densidad espectral.

En el Capítulo 7 se determina para cada zona cómo varían las formas de los espectros de pseudo-aceleración y de desplazamiento en función de la intensidad de Arias de los registros sísmicos.

Capítulo

1

Antecedentes

1.1 ¿Qué produce los sismos?

1.1.1 El origen de los sismos

Los sismos son causados por la liberación repentina de energía en una región determinada. Este tipo de energía puede producirse por una deformación elástica, reacciones químicas, o movimiento de cuerpos. De estos, la liberación de energía debida a la deformación elástica es la más importante. Esta es la única forma de energía que puede ser acumulada en cantidad suficiente como para producir los grandes sismos. Los sismos asociados con este tipo de liberación de energía se llaman sismos de origen tectónico.¹

Este tipo de energía de deformación se debe a los numerosos choques que se producen continuamente por los movimientos bruscos a lo largo de fracturas llamadas fallas o por la fricción que se ejerce entre dos o más placas tectónicas, las cuales liberan el

¹ Vladimir Kostoglodov y Javier Francisco Pacheco. Poster "Cien años de Sismicidad en México". México, Instituto de Geofísica UNAM, 1999.

esfuerzo a que están sujetas las rocas corticales. El esfuerzo se acumula hasta que se supera la resistencia de las rocas, que es cuando ocurre la ruptura y deslizamiento a lo largo de las fracturas.

La corteza terrestre es la parte más superficial y rígida de la Tierra y está compuesta por placas tectónicas. Estas placas cubren grandes áreas de la superficie terrestre y se mueven en diferentes direcciones produciendo choques entre ellas. Algunas de ellas se deslizan rozando una contra otra. Otras, al chocar frontalmente, generan lo que se denomina una zona de subducción. En estas regiones, una placa se mueve sobre la otra (movimiento de compresión); la placa más densa, que generalmente son las placas bajo los océanos, penetra bajo la placa menos densa, que usualmente son las placas sobre las que viajan los continentes. En las regiones donde se presenta el movimiento de extensión se produce un distanciamiento entre las placas. Estas regiones donde divergen las placas se les conoce como dorsales oceánicas. Las dorsales son zonas elevadas sobre el piso oceánico, llegando a elevarse hasta 3 km sobre el nivel medio del suelo oceánico. Las dorsales se caracterizan por su volcanismo activo, ya que a través de ellas se forma nuevo suelo oceánico con material que proviene del interior de la tierra.

El tamaño de un sismo es una función de la región que sufre el rompimiento. Entre mayor sea el área que se rompe por la acción de las fuerzas tectónicas, mayor es el tamaño del temblor. Como la mayor área de contacto entre placas se encuentra en las zonas de subducción, es aquí donde ocurren los sismos más grandes.

1.1.2 Las placas tectónicas en México

Cuando dos placas tectónicas o bloques de corteza terrestre están en contacto, se produce fricción entre ellas, manteniéndolas en contacto hasta que la fuerza que se acumula por el movimiento entre las placas es mayor que la fuerza de fricción que las mantiene en contacto. En ese momento se produce un sismo, al romperse ese contacto. La energía elástica que se había acumulado en la zona de contacto se libera en forma de calor, deformación de la roca y en energía sísmica que se propaga por el interior de la Tierra. Esta energía sísmica que se propaga como ondas es lo que se registra sobre la tierra.

El territorio mexicano se encuentra en cinco placas tectónicas. La mayor parte del país se encuentra sobre la placa norteamericana. Esta gran placa tectónica contiene a todo Norteamérica, parte del océano Atlántico y parte de Asia. La península de Baja California se encuentra sobre otra gran placa tectónica, la placa del Pacífico. Sobre esta placa también se encuentra gran parte del estado de California en los Estados Unidos y gran parte del océano Pacífico. El sur de Chiapas se encuentra dentro de la placa del Caribe. Esta pequeña placa contiene gran parte de las islas caribeñas y de los países de Centro América. Otras dos pequeñas placas oceánicas conforman el rompecabezas tectónico de México, Cocos y Rivera. Estas dos placas son oceánicas y se encuentran bajo el océano Pacífico.

La placa del Caribe se mueve hacia el Este respecto a la de Norteamérica. El movimiento entre estas dos placas es Transcurrente, al igual que el movimiento entre la del Pacífico y la de Norteamérica en el Norte de Baja California. La placa del Pacífico se mueve hacia el Noroeste respecto a Norteamérica. Este movimiento también genera zonas de extensión entre las placas del Pacífico y Norteamérica bajo el Mar de Cortés. Entre las placas del Pacífico y Rivera y entre las del Pacífico y Cocos chocan con la placa Norteamericana a lo largo de la Fosa Mesoamericana. Aquí se produce una compresión, figura 1.1.

1.1.3 Zonificación sísmica del Valle de México

En el Apéndice A de las Normas Técnicas Complementarias por Sismo (NTC-2001) propuestas recientemente, se muestra la zonificación sísmica del Valle de México. Por otro lado, también existen trabajos como el de Pérez-Rocha² donde se muestra la zonificación sísmica del Valle de México pero con distintas zonas. El Valle de México en el Apéndice A de las NTC-2001 es dividido en tres zonas sísmicas principales; la Zona I (suelo duro), la Zona II (suelo de transición) y la Zona III (suelo blando). A su vez la Zona III se divide en cuatro zonas que dependen principalmente del periodo de vibración dominante del suelo; la Zona IIIa ($0.5s < T < 1.5s$), la Zona IIIb ($1.5s < T < 2.5s$), la Zona IIIc ($2.5s < T < 3.5s$) y la Zona IIId ($T > 3.5s$), figura 1.2.

² Cfr. vid. Eduardo Pérez-Rocha *et al.*, "Predicción de intensidades sísmicas para el área metropolitana del Valle de México", en *Cuadernos FICA*, 13. México, Fundación ICA, 1996.

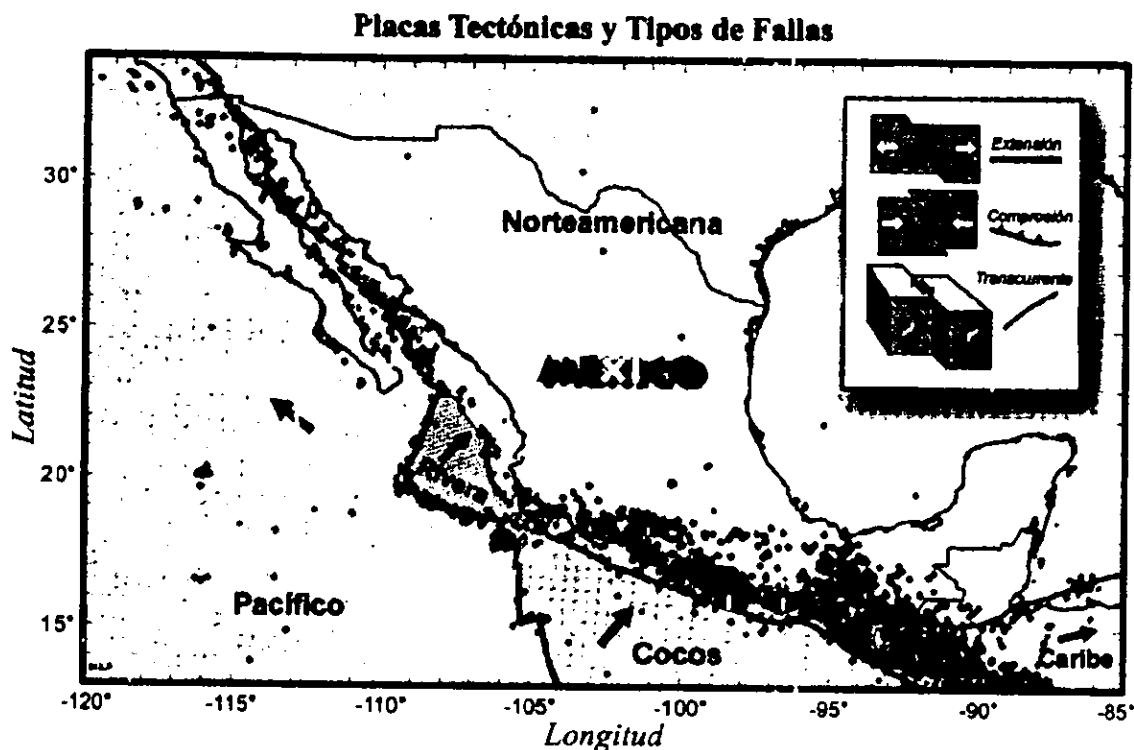


Figura 1.1 Fuente: Vladimir Kostoglodov, Javier Francisco Pacheco. Poster. "Cien años de Sismicidad en México". México, Instituto de Geofísica, UNAM, 1999.

1.2 Instrumentación sísmica en México

Como consecuencia del temblor de julio de 1957 que tuvo una magnitud de 7.5 grados, ocurrido en las costas de Guerrero, surgió la necesidad de contar con instrumentos apropiados que permitieran registrar y medir el movimiento de los suelos y las estructuras provocado por sismos fuertes. Ya que sólo se disponía de sismógrafos, los cuales, debido a su gran sensibilidad y alto factor de amplificación, impedían el registro completo de estos movimientos, especialmente de la parte intensa del temblor.

Fue por eso que se comenzó a utilizar un nuevo aparato especialmente diseñado para tales movimientos fuertes: el acelerógrafo. Los primeros dos instrumentos de este tipo

Un punto importante en la historia de la instrumentación sísmica en México lo marcaron los sismos de septiembre de 1985 ($M=8.1^\circ$ y $M=7.6^\circ$). La red acelerográfica que operaba en esa fecha en la ciudad de México y la nueva red digital instalada unos meses antes a lo largo de las costas de Guerrero y Michoacán produjeron un valioso conjunto de acelerogramas de un sismo de tan elevada magnitud.

Debido a los enormes daños y cuantiosas pérdidas que provocaron estos temblores, se hizo evidente la necesidad prioritaria de impulsar la investigación e incrementar el número de estaciones, particularmente en el Valle de México que sólo contaba con 10 estaciones. Para tal efecto, nuevas instituciones como el Centro de Instrumentación y Registros Sísmicos, Fundación ICA, CENAPRED, Comisión Federal de Electricidad, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, el Instituto de Geofísica de la UNAM, el CICESE y otras instituciones se sumaron al esfuerzo de expandir y complementar las redes acelerográficas existentes con modernos equipos de registro. Instalándose no sólo aparatos en superficie sino también en pozos profundos y en diferentes edificios.

Capítulo

2

Selección de acelerogramas

Para realizar un análisis de movimientos sísmicos es necesario contar con una serie de registros acelerográficos. Dichos registros deben de seleccionarse cuidadosamente, por ello es indispensable establecer parámetros de selección que delimiten y den forma al trabajo. Estos parámetros incluyen los siguientes conceptos: zona de estudio, tipo de falla que origina los movimientos sísmicos, aceleración y magnitud mínima de los registros y eventos, respectivamente.

2.1 Parámetros de selección

Debido a la gran cantidad de registros acelerográficos que existe en la actualidad, se hace necesario introducir ciertos parámetros de selección. Se consideran los siguientes:

1. Todos los eventos sísmicos por tratar son de origen tectónico de subducción. Estos son los de mayor magnitud en la República Mexicana. Los eventos de

subducción se originan en las costas del Pacífico, como se puede apreciar en la figura 1.1.

2. Dichos eventos sísmicos tienen una magnitud mayor o igual a 6.9 grados Richter.
3. Se toman las componentes E-W y N-S de los movimientos sísmicos registrados en el Valle de México desde 1960 hasta 1997. Los instrumentos acelerométricos deben estar a nivel superficie y no en pozos o en edificios.
4. Aquellos registros que no tengan por lo menos en una de sus componentes, ya sea E-W o N-S, una aceleración máxima menor de 10 gal son descartados del estudio.

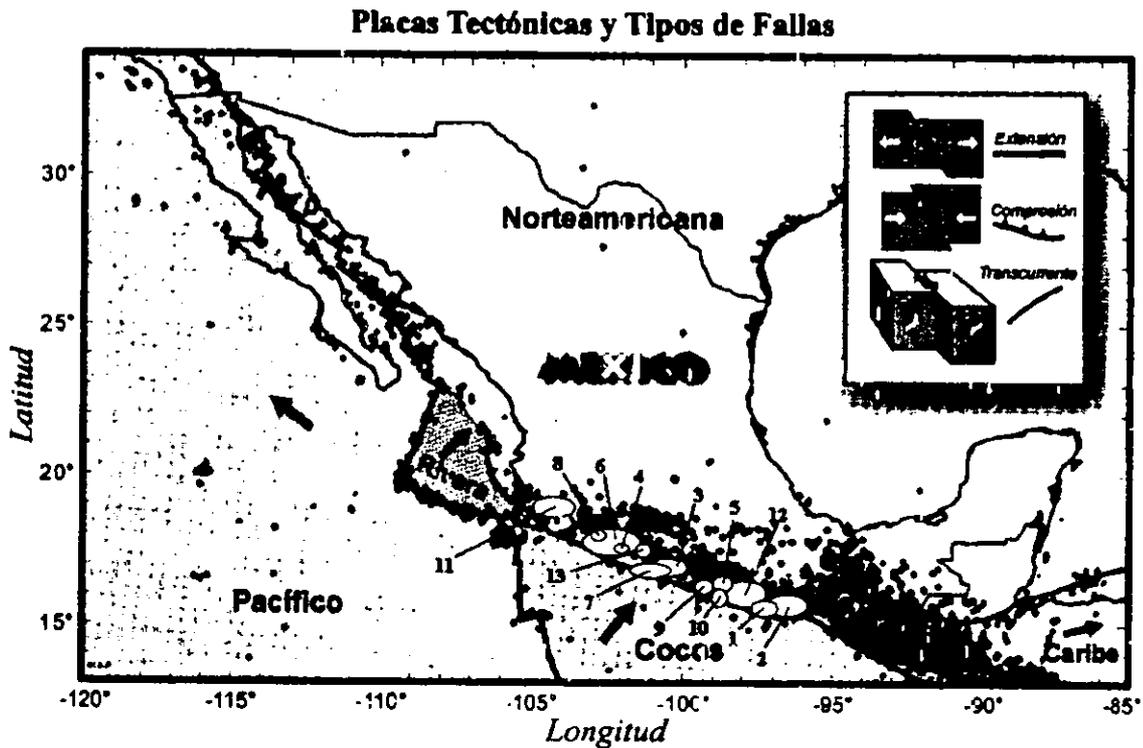
2.2 Eventos sísmicos

Aplicando la restricción número 2, se encontraron trece eventos sísmicos de origen tectónico de subducción registrados en el Valle de México. Estos son los que aparecen en la tabla 2.1. Además en la figura 2.1 se aprecia la ubicación de los epicentros de dichos eventos y la distribución de los epicentros ocurridos desde 1960 hasta 1997.

Tabla 2.1 Eventos sísmicos registrados desde 1960 hasta 1997 con una magnitud mayor o igual que 6.9° Richter

	Fecha	Magnitud Richter	Hr:Min:Sec (GMT)	Latitud (N)	Longitud (E)	Profundidad (km)
1	68-08-02	7.1	14:06:37	16.6°	-97.8°	16
2	78-11-29	7.8	19:52:50	16.01°	-96.59°	23
3	79-03-14	7.0	11:07:15	17.75°	-101.26°	25
4	81-10-25	7.3	03:22:16	18.09°	-102°	21
5	82-06-07	6.9	06:52:33	16.42°	-98.25°	6
6	85-09-19	8.1	13:17:49	18.42°	-102.47°	15
7	85-09-21	7.6	01:37:14	17.83°	-101.68°	17
8	86-04-30	7.0	07:07:19	18.36°	-103.05°	22
9	89-04-25	6.9	14:29:03	16.8°	-99.28°	23
10	95-09-14	7.3	14:04:33	16.75°	-98.67°	21
11	95-10-09	7.5	15:35:54	18.99°	-104.25°	25
12	96-02-25	6.9	03:08:19	15.88°	-97.98°	15
13	97-01-11	6.9	20:28:26	18.34°	-102.58°	40

Figura 2.1 Fuente: Vladimir Kostoglodov, Javier Francisco Pacheco. Poster. "Cien años de Sismicidad en México". México, Instituto de Geofísica, UNAM, 1999.



2.3 Estaciones acelerométricas

Existen diversas instituciones encargadas de registrar los movimientos sísmicos en el Valle de México, como son:

1. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
2. Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES)
3. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, BC. (CICESE)
4. Comisión Federal de Electricidad (CFE)
5. Fundación Ingenieros Civiles Asociados (FICA), que transfirió sus aparatos al CIRES
6. Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México

7. Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM)
8. Red Inter-universitaria de Instrumentación Sísmica (RIIS)

En la tabla 2.2 se muestran las 101 estaciones acelerométricas que registraron alguno o varios de los trece eventos mencionados en la tabla 2.1. En esta se indican las características principales de cada estación, como son: la institución encargada de su uso y mantenimiento, las coordenadas de localización del instrumento y el nombre de la estación.

Tabla 2.2 Estaciones acelerométricas del Valle de México

	Clave de la estación	Institución encargada	Coordenadas de la estación		Nombre de la estación
			Latitud N	Longitud W	
1	AE02	Cires	19.429	99.058	Aeropuerto
2	AL01	Fica	19.436	99.145	Alameda
3	ALOL	iiunam	19.352	99.155	Alberca olímpica
4	AO24	Cires	19.359	99.154	Alberca olímpica
5	AP68	Cires	19.381	99.107	Apatlaco
6	AR14	Cires	19.481	99.076	Aragón
7	AU11	Fica	19.392	99.087	Autódromo
8	AU46	Cires	19.383	99.168	Angel Urraza
9	BA49	Fica	19.41	99.145	Buenos Aires
10	BL45	Fica	19.425	99.148	Balderas
11	BO39	Fica	19.465	99.105	Bondojito
12	CA59	Fica	19.426	99.118	Candelaria
13	CDAF	iiunam	19.366	99.086	Central de abastos frigorífico
14	CDAO	iiunam	19.372	99.096	Central de abastos oficina
15	CE23	Fica	19.462	99.064	Cetis
16	CE32	Cires	19.386	99.054	Cetis 57
17	CI05	Fica	19.419	99.165	Cibeles
18	CJ03	Fica	19.41	99.157	CU Juárez
19	CJ04	iiunam	19.41	99.157	Centro urbano Presidente Juárez
20	CO47	Fica	19.371	99.17	Coyoacán
21	CO56	Cires	19.422	99.159	Córdoba
22	COYS	Cenapred	19.348	99.169	Est. # 6 Coyoacán
23	CP28	Cires	19.439	99.084	Cerro del Peñón
24	CS78	Cires	19.366	99.226	Colinas del Sur
25	CU01	iiunam	19.33	99.183	ii inst. sísmica
26	CU02	iiunam	19.33	99.183	Lab. de desarrollo
27	CU03	iiunam	19.33	99.183	Lab. de desarrollo
28	CU80	Cires	19.294	99.104	Cuemanco

29	CUIP	iiunam	19.33	99.183	ii patio
30	CUMV	iiunam	19.33	99.183	Mesa vibradora
31	CUP1	iiunam	19.33	99.183	ii patio 1
32	CUP4	iiunam	19.33	99.183	ii patio 4
33	CH84	Cires	19.33	99.125	Culhuacán
34	CHAS	Cenapred	19.416	99.205	Est. # 14 Chapultepec
35	DFRO	iiunam	19.405	99.166	Roma
36	DFVG	iiunam	19.419	99.126	Prepa # 7 La Viga
37	DM12	Cires	19.431	99.096	Deportivo Moctezuma
38	DR16	Cires	19.501	99.183	Deportivo Reynoso
39	DX37	Fica	19.332	99.144	Xotepingo
40	EJCL	iiunam	19.423	99.159	Edif. Jalapa
41	EO30	Cires	19.389	99.177	Esparza Oteo
42	ES57	Fica	19.402	99.177	Escandón
43	FJ74	Cires	19.299	99.21	Fund. Javier Barros Sierra
44	GA62	Cires	19.439	99.14	Garibaldi
45	GC38	Cires	19.316	99.106	García Campillo
46	GR27	Fica	19.475	99.18	Granjas
47	HA41	Fica	19.418	99.079	Hangares
48	HJ72	Cires	19.425	99.13	Hospital Juárez
49	IB22	Cires	19.345	99.13	Ibero
50	IMPS	Cenapred	19.488	99.149	Est. # 15 IMP
51	JA43	Fica	19.405	99.125	Jamaica
52	JC54	Cires	19.313	99.127	Jardines de Coyoacán
53	LI33	Cires	19.306	99.963	Liconsa
54	LI58	Cires	19.426	99.157	Liverpool
55	LOTA	iiunam	19.418	99.14	Lotería Nacional
56	LV17	Fica	19.493	99.128	Lindavista
57	ME52	Cires	19.438	99.182	Mariano Escobedo
58	MI15	Fica	19.283	99.125	Miramontes
59	MT50	Cires	19.425	99.19	Mariscal Tito
60	MY19	Fica	19.346	99.043	Meyhualco
61	NONP	iiunam	19.45	99.144	Nonoalco Atizapán patio
62	NZ20	Cires	19.403	99	Nezahualcoyotl
63	NZ31	Fica	19.417	99.025	Nezahualcoyotl
64	PA34	Cires	19.202	99.049	San Pedro Atocpan
65	PD42	Cires	19.406	99.1	Palacio de los deportes
66	PE10	Cires	19.39	99.132	Plutarco Elías Calles
67	PENR	iiunam	19.332	99.041	Col. Quetzalcoatl
68	PII6	Cires	19.351	99.186	Campo libre
69	RIDA	riis	19.52	99.19	UAM Azcapotzalco
70	RIDI	riis	19.36	99.06	UAM Iztapalapa
71	RIDX	riis	19.31	99.1	UAM Xochimilco
72	RM48	Cires	19.436	99.128	Rodolfo Menéndez
73	RMAS	Cenapred	19.42	99.155	Est. # 10 Roma A
74	RMBS	Cenapred	19.42	99.154	Est. # 11 Roma B
75	RMCS	Cenapred	19.419	99.155	Est. # 12 Roma C
76	SCT1	iiunam	19.393	99.147	SCT

77	SCT2	iiunam	19.393	99.147	SCT
78	SI53	Fica	19.375	99.148	San Simón
79	SP51	Cires	19.366	99.119	Sector Popular
80	SXCU	iiunam	19.326	99.182	Sismex CU
81	SXHO	iiunam	19	99.205	Sismex Hospital ABC
82	SXSO	iiunam	19.393	99.147	Sismex Sahop
83	SXVI	iiunam	19.358	99.171	Sismex Viveros
84	TACY	iiunam	19.403	99.194	Tacubaya
85	TH35	Fica	19.279	99	Tlahuac
86	TL08	Cires	19.45	99.134	Tlatelolco
87	TL55	Cires	19.436	99.143	Tlatelolco
88	TLAS	Cenepred	19.397	99.105	Est. # 7 Tlacotal
89	TLHB	iiunam	19.279	99.008	Tlahuac Bombas
90	TLHD	iiunam	19.293	99.035	Tlahuac deportivo
91	TP13	Fica	19.292	99.171	Tlalpan
92	TXCL	iiunam	19.48	98.991	Texcoco centro lago
93	TXCH	iiunam	19.43	98.95	Texcoco Chimalhuacán
94	UC44	Cires	19.434	99.165	Unidad Colonia IMSS
95	UI21	Cires(fica)	19.365	99.226	Universidad Iberoamericana
96	UNKS	Cenapred	19.419	99.111	Est. # 9 U. Kennedy
97	VG09	Cires	19.454	99.123	Valle Gómez
98	VM29	Fica	19.381	99.125	Villa del Mar
99	XO36	Cires	19.271	99.102	Xochimilco
100	XP06	Cires	19.42	99.135	Xochipilli
101	ZARS	Cenepred	19.419	99.088	Est. # 8 Zaragoza

Con base en el mapa de la figura 1.2 que muestra la zonificación del D.F. para fines de diseño por sismo, el mapa de la figura 2.2 incluye las estaciones acelerométricas mencionadas en la tabla 2.2.

2.4 Estaciones acelerométricas por zonas

Con el mapa de la figura 2.2 es posible determinar en qué zona se encuentra cada estación. Se agrupan los acelerogramas registrados en suelos con periodos dominantes similares, donde la Zona I corresponde al suelo duro, la Zona II al suelo de transición y la Zona III al suelo blando, esta última a su vez se divide en cuatro zonas; la Zona IIIa tiene un intervalo de periodos de 0.5s a 1.5s, la Zona IIIb de 1.5s a 2.5s, la Zona IIIc de 2.5s a 3.5s y la Zona IIId con periodos mayores que 3.5s.⁴ En la tabla 2.3 se indican los resultados de la

⁴ Cfr. vid. Eduardo Pérez-Rocha et al. *Op. cit.*

aplicación de los cuatro parámetros restrictivos, catalogando cada estación por su zonificación sísmica. En dicha tabla se indica la clave de cada evento en orden cronológico asociado a cada zona, así como la institución encargada del aparato, el nombre de la estación, la fecha y la magnitud del evento sísmico.

Figura 2.2 Estaciones Acelerométricas en el Valle de México

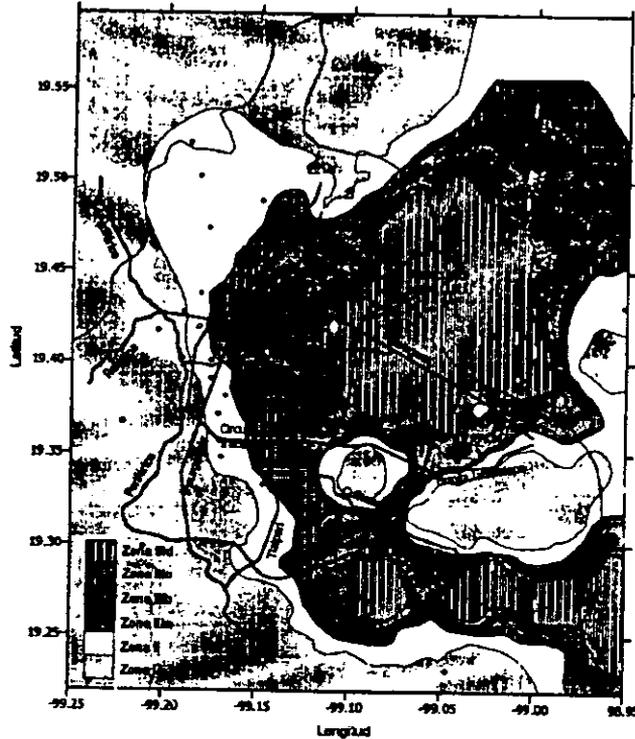


Tabla 2.3 Registros sísmicos detectados en las distintas zonas sísmicas del Valle de México

Clave tesis	Institución	Nombre de la estación	Fecha sismo	Mag. Richter	
Zona I	01i	iiunam	ii inst. sísmica	68-08-02	7.1
	02i	iiunam	Nonoalco Atizapán patio	78-11-29	7.8
	03i	iiunam	Sismex CU	78-11-29	7.8
	04i	iiunam	ii inst. sísmica	79-03-14	7.0
	05i	iiunam	Sismex CU	79-03-14	7.0
	06i	iiunam	Sismex Hospital ABC	79-03-14	7.0

07i	iiunam	Sismex CU	81-10-25	7.3
08i	iiunam	ii inst. sísmica	82-06-07	6.9
09i	iiunam	ii inst. sísmica	85-09-19	8.1
10i	iiunam	ii patio	85-09-19	8.1
11i	iiunam	Mesa vibradora	85-09-19	8.1
12i	iiunam	Tacubaya	85-09-19	8.1
13i	iiunam	ii patio	85-09-21	7.6
14i	iiunam	Mesa vibradora	85-09-21	7.6
15i	iiunam	Tacubaya	85-09-21	7.6
16i	Cires	Colinas del Sur	89-04-25	6.9
17i	iiunam	ii inst. sísmica	89-04-25	6.9
18i	iiunam	CU02 Lab. de desarrollo	89-04-25	6.9
19i	iiunam	CU03 Lab. de desarrollo	89-04-25	6.9
20i	Cires	Fund. Javier Barros Sierra	89-04-25	6.9
21i	Cires	Mariscal Tito	89-04-25	6.9
22i	Cires	San Pedro Atocpan	89-04-25	6.9
23i	iiunam	Tacubaya	89-04-25	6.9
24i	Fica	Tlalpan	89-04-25	6.9
25i	Cenapred	Est. #14 Chapultepec	95-09-14	7.3
26i	Cires	Colinas del Sur	95-09-14	7.3
27i	iiunam	ii patio 1	95-09-14	7.3
28i	iiunam	ii patio 4	95-09-14	7.3
29i	Cires	Fund. Javier Barros Sierra	95-09-14	7.3
30i	Cires	San Pedro Atocpan	95-09-14	7.3
31i	Cires	Campo libre	95-09-14	7.3
32i	iiunam	Tacubaya	95-09-14	7.3
33i	Cires(fica)	Tlalpan	95-09-14	7.3
34i	Cires(fica)	Universidad Iberoamericana	95-09-14	7.3

Zona II

01ii	iiunam	Alberca olímpica	79-03-14	7.0
02ii	iiunam	Texcoco Chimalhuacán	79-03-14	7.0
03ii	iiunam	Sismex Viveros	81-10-25	7.3
04ii	iiunam	Texcoco Chimalhuacán	82-06-07	6.9
05ii	iiunam	Sismex Viveros	85-09-19	8.1
06ii	iiunam	Sismex Viveros	85-09-21	7.6

07ii	Cires	Ángel Urraza	89-04-25	6.9
08ii	Fica	Coyoacán	89-04-25	6.9
09ii	Cires	Cerro del Peñón	89-04-25	6.9
10ii	Cires	Deportivo Reynoso	89-04-25	6.9
11ii	Fica	Xotepingo	89-04-25	6.9
12ii	Cires	Esparza Oteo	89-04-25	6.9
13ii	Fica	Escandón	89-04-25	6.9
14ii	Fica	Granjas	89-04-25	6.9
15ii	Cires	Mariano Escobedo	89-04-25	6.9
16ii	iiunam	Sismex Viveros	89-04-25	6.9
17ii	Cires	Alberca olímpica	95-09-14	7.3
18ii	Cires	Angel Urraza	95-09-14	7.3
19ii	Cires(fica)	Coyoacán	95-09-14	7.3
20ii	Cenapred	Est. #6 Coyoacán	95-09-14	7.3
21ii	Cires	Cerro del Peñón	95-09-14	7.3
22ii	Cires(fica)	Xotepingo	95-09-14	7.3
23ii	Cires	Esparza Oteo	95-09-14	7.3
24ii	Cires(fica)	Escandón	95-09-14	7.3
25ii	Cires(fica)	Granjas	95-09-14	7.3
26ii	Cenapred	Est. #15 IMP	95-09-14	7.3
27ii	Cires	Mariano Escobedo	95-09-14	7.3
28ii	iiunam	Col. Quetzalcoatl	95-09-14	7.3
29ii	riis	UAM Azcapotzalco	95-09-14	7.3
30ii	Cires	Alberca olímpica	97-01-11	6.9
31ii	Cires	Ángel Urraza	97-01-11	6.9
32ii	Cires	Dep. Reynosa	97-01-11	6.9
33ii	Cires	Xotepingo	97-01-11	6.9
34ii	Cires	Granjas	97-01-11	6.9
35ii	Cenapred	Est. #15 IMP	97-01-11	6.9
36ii	Cires	Mariano Escobedo	97-01-11	6.9
37ii	iiunam	Col. Quetzalcoatl	97-01-11	6.9
38ii	riis	UAM Azcapotzalco	97-01-11	6.9

Zona III a

01a	Cires	Culhuacán	89-04-25	6.9
02a	iiunam	Roma	89-04-25	6.9
03a	Cires	Ibero	89-04-25	6.9
04a	Cires	Jardines de Coyoacán	89-04-25	6.9
05a	Fica	Lindavista	89-04-25	6.9
06a	Fica	Miramontes	89-04-25	6.9
07a	Fica	San Simón	89-04-25	6.9
08a	Cires	Unidad colonia IMSS	89-04-25	6.9
09a	Cires	Culhuacán	95-09-14	7.3
10a	iiunam	Roma	95-09-14	7.3

11a	Cires	Ibero	95-09-14	7.3
12a	Cires	Jardines de Coyoacán	95-09-14	7.3
13a	Cires(fica)	Lindavista	95-09-14	7.3
14a	Cires(fica)	Miramontes	95-09-14	7.3
15a	Cires(fica)	San Simón	95-09-14	7.3
16a	Cires	Culhuacán	97-01-11	6.9
17a	iiunam	Roma sur	97-01-11	6.9
18a	Cires	Jardines de Coyoacán	97-01-11	6.9
19a	Cires	Lindavista	97-01-11	6.9
20a	Cires	Miramontes	97-01-11	6.9
21a	Cires	San Simón	97-01-11	6.9
22a	Cires	Unidad colonia IMSS	97-01-11	6.9

Zona III b

01b	iiunam	Lotería Nacional	79-03-14	7.0
02b	iiunam	Sismex Sahop	79-03-14	7.0
03b	iiunam	Lotería Nacional	82-06-07	7.0
04b	iiunam	SCT	85-09-19	8.1
05b	iiunam	Tlahuac deportivo	85-09-19	8.1
06b	iiunam	Tlahuac deportivo	85-09-21	7.6
07b	Fica	Alameda	89-04-25	6.9
08b	Fica	Balderas	89-04-25	6.9
09b	Fica	Cibeles	89-04-25	6.9
10b	Fica	C.U. Juárez	89-04-25	6.9
11b	Cires	Córdoba	89-04-25	6.9
12b	Cires	Garibaldi	89-04-25	6.9
13b	Fica	Liconsa	89-04-25	6.9
14b	Cires	Liverpool	89-04-25	6.9
15b	Cires	Plutarco Elías Calles	89-04-25	6.9
16b	Cires	Rodolfo Menéndez	89-04-25	6.9
17b	iiunam	SCT	89-04-25	6.9
18b	Fica	Sector Popular	89-04-25	6.9
19b	iiunam	Tlatelolco	89-04-25	6.9
20b	Fica	Tlatelolco	89-04-25	6.9
21b	Fica	Valle Gómez	89-04-25	6.9
22b	Cires(fica)	Alameda	95-09-14	7.3
23b	Cires(fica)	Balderas	95-09-14	7.3
24b	Cires(fica)	Cibeles	95-09-14	7.3
25b	Cires(fica)	CU Juárez	95-09-14	7.3
26b	Cires	Centro urbano Presidente Juárez	95-09-14	7.3
27b	Cires	Córdoba	95-09-14	7.3

28b	iiunam	Edif. Jalapa	95-09-14	7.3
29b	Cires	Garibaldi	95-09-14	7.3
30b	Cires	García Campillo	95-09-14	7.3
31b	Cires(fica)	Liconsa	95-09-14	7.3
32b	Cires	Plutarco Elías Calles	95-09-14	7.3
33b	riis	UAM Xochimilco	95-09-14	7.3
34b	Cires	Rodolfo Menéndez	95-09-14	7.3
35b	Cenapred	Est. #10 Roma A	95-09-14	7.3
36b	Cenapred	Est. #11 Roma B	95-09-14	7.3
37b	Cenapred	Est. #12 Roma C	95-09-14	7.3
38b	Cires(fica)	Sector Popular	95-09-14	7.3
39b	Cires	Tlatelolco	95-09-14	7.3
40b	Cires(fica)	Tlatelolco	95-09-14	7.3
41b	iiunam	Tlahuac deportivo	95-09-14	7.3
42b	Cires(fica)	Balderas	95-10-09	7.5
43b	Cires(fica)	Cibeles	95-10-09	7.5
44b	Cires(fica)	CU Juárez	95-10-09	7.5
45b	Cires	Centro urbano Presidente Juárez	95-10-09	7.5
46b	Cires	Córdoba	95-10-09	7.5
47b	iiunam	Edif. Jalapa	95-10-09	7.5
48b	Cires	Garibaldi	95-10-09	7.5
49b	Cires	García Campillo	95-10-09	7.5
50b	Cires(fica)	Liconsa	95-10-09	7.5
51b	Cires	Liverpool	95-10-09	7.5
52b	Cires	Plutarco Elías Calles	95-10-09	7.5
53b	Cires	Rodolfo Menéndez	95-10-09	7.5
54b	Cenapred	Est. #12 Roma C	95-10-09	7.5
55b	Cires(fica)	Sector Popular	95-10-09	7.5
56b	Cires(fica)	Valle Gómez	95-10-09	7.5
57b	Cires	Alameda	97-01-11	6.9
58b	Cires	Balderas	97-01-11	6.9
59b	Cires	Cibeles	97-01-11	6.9
60b	Cires	CU Juárez	97-01-11	6.9
61b	Cires	Centro urbano Presidente Juárez	97-01-11	6.9
62b	Cires	Córdoba	97-01-11	6.9
63b	iiunam	Edif. Jalapa	97-01-11	6.9
64b	Cires	Garibaldi	97-01-11	6.9
65b	Cires	García Campillo	97-01-11	6.9
66b	Cires	Liconsa	97-01-11	6.9
67b	Cires	Liverpool	97-01-11	6.9
68b	Cires	Plutarco Elías Calles	97-01-11	6.9
69b	Cenapred	Est. #10 Roma A	97-01-11	6.9
70b	Cenapred	Est. #11 Roma B	97-01-11	6.9
71b	Cenapred	Est. #12 Roma C	97-01-11	6.9

72b	Cires	Sector Popular	97-01-11	6.9
73b	Cires	Tlatelolco	97-01-11	6.9
74b	Cires	Tlatelolco	97-01-11	6.9
75b	iiunam	Tlahuac deportivo	97-01-11	6.9
76b	Cires	Valle Gómez	97-01-11	6.9

Zona III c

01c	iiunam	Texcoco centro lago	79-03-14	7.0
02c	iiunam	Texcoco centro lago	81-10-25	7.3
03c	iiunam	Central de abastos frigorífico	85-09-19	8.1
04c	iiunam	Central de abastos oficina	85-09-19	8.1
05c	iiunam	Central de abastos frigorífico	85-09-21	7.6
06c	iiunam	Central de abastos oficina	85-09-21	7.6
07c	iiunam	Texcoco centro lago	85-09-21	7.6
08c	iiunam	Central de abastos frigorífico	86-04-30	7.0
09c	iiunam	Central de abastos oficina	86-04-30	7.0
10c	Cires	Apatlaco	89-04-25	6.9
11c	Fica	Buenos Aires	89-04-25	6.9
12c	Fica	Bondojito	89-04-25	6.9
13c	Fica	Candelaria	89-04-25	6.9
14c	iiunam	Central de abastos oficinas	89-04-25	6.9
15c	Cires	Cuemanaco	89-04-25	6.9
16c	iiunam	Prepa #7 La Viga	89-04-25	6.9
17c	Cires	Hospital Juárez	89-04-25	6.9
18c	Fica	Jamaica	89-04-25	6.9
19c	Fica	Meyehualco	89-04-25	6.9
20c	Fica	Villa del Mar	89-04-25	6.9
21c	Cires	Xochipilli	89-04-25	6.9
22c	Cires	Apatlaco	95-09-14	7.3
23c	Cires(fica)	Buenos Aires	95-09-14	7.3
24c	Cires(fica)	Bondojito	95-09-14	7.3
25c	Cires(fica)	Candelaria	95-09-14	7.3
26c	iiunam	Central de abastos oficinas	95-09-14	7.3
27c	iiunam	Prepa #7 La Viga	95-09-14	7.3
28c	Cires	Hospital Juárez	95-09-14	7.3
29c	Cires(fica)	Jamaica	95-09-14	7.3
30c	Cires(fica)	Meyehualco	95-09-14	7.3
31c	riis	UAM Iztapalapa	95-09-14	7.3
32c	Cires(fica)	Villa del Mar	95-09-14	7.3

33c	Cires	Apatlaco	95-10-09	7.5
34c	Cires(fica)	Buenos Aires	95-10-09	7.5
35c	Cires(fica)	Bondojoito	95-10-09	7.5
36c	Cires(fica)	Candelaria	95-10-09	7.5
37c	iiunam	Central de abastos oficinas	95-10-09	7.5
38c	Cires	Hospital Juárez	95-10-09	7.5
39c	Cires(fica)	Jamaica	95-10-09	7.5
40c	Cires(fica)	Meyehualco	95-10-09	7.5
41c	riis	UAM Iztapalapa	95-10-09	7.5
42c	Cires(fica)	Villa del Mar	95-10-09	7.5
43c	Cires	Xochipilli	95-10-09	7.5
44c	Cires	Villa del Mar	96-02-25	6.9
45c	Cires	Apatlaco	97-01-11	6.9
46c	Cires	Buenos Aires	97-01-11	6.9
47c	Cires	Bondojoito	97-01-11	6.9
48c	Cires	Candelaria	97-01-11	6.9
49c	iiunam	Central de abastos oficinas	97-01-11	6.9
50c	Cires	Cuemanco	97-01-11	6.9
51c	Cires	Jamaica	97-01-11	6.9
52c	riis	UAM Iztapalapa	97-01-11	6.9
53c	Cires	Villa del Mar	97-01-11	6.9
54c	Cires	Xochimilco	97-01-11	6.9
55c	Cires	Xochipilli	97-01-11	6.9

Zona III d

01d	iiunam	Tlahuac Bombas	85-09-19	8.1
02d	iiunam	Tlahuac Bombas	86-04-30	7.0
03d	Fica	Autódromo	89-04-25	6.9
04d	Fica	Cetis	89-04-25	6.9
05d	Cires	Cetis 57	89-04-25	6.9
06d	Cires	Deportivo Moctezuma	89-04-25	6.9
07d	Fica	Hangares	89-04-25	6.9
08d	Cires	Nezahualcoyotl	89-04-25	6.9
09d	Fica	Nezahualcoyotl	89-04-25	6.9
10d	Cires	Palacio de los deportes	89-04-25	6.9
11d	Fica	Tlahuac	89-04-25	6.9
12d	iiunam	Tlahuac Bombas	89-04-25	6.9
13d	Cires	Aeropuerto	95-09-14	7.3
14d	Cires	Aragón	95-09-14	7.3
15d	Cires(fica)	Autódromo	95-09-14	7.3
16d	Cires(fica)	Cetis	95-09-14	7.3

17d	Cires	Cetis 57	95-09-14	7.3
18d	Cires	Dep. Moctezuma	95-09-14	7.3
19d	Cires(fica)	Hangares	95-09-14	7.3
20d	Cires	Nezahualcoyotl	95-09-14	7.3
21d	Cires(fica)	Nezahualcoyotl	95-09-14	7.3
22d	Cires	Palacio de los deportes	95-09-14	7.3
23d	Cires(fica)	Tlahuac	95-09-14	7.3
24d	Cenapred	Est. #9 U. Kennedy	95-09-14	7.3
25d	Cenapred	Est. #8 Zaragoza	95-09-14	7.3
26d	Cires	Aragón	95-10-09	7.5
27d	Cires(fica)	Autódromo	95-10-09	7.5
28d	Cires(fica)	Cetis 57	95-10-09	7.5
29d	Cires	Cetis 57	95-10-09	7.5
30d	Cires	Dep. Moctezuma	95-10-09	7.5
31d	Cires(fica)	Hangares	95-10-09	7.5
32d	Cires	Nezahualcoyotl	95-10-09	7.5
33d	Cires(fica)	Nezahualcoyotl	95-10-09	7.5
34d	Cires	Palacio de los deportes	95-10-09	7.5
35d	Cenapred	Est. #7 Tlacotal	95-10-09	7.5
36d	Cenapred	Est. #9 U. Kennedy	95-10-09	7.5
37d	Cenapred	Est. #8 Zaragoza	95-10-09	7.5
38d	Cires	Aeropuerto	96-02-25	6.9
39d	Cires	Aeropuerto	97-01-11	6.9
40d	Cires	Autódromo	97-01-11	6.9
41d	Cires	Cetis 57	97-01-11	6.9
42d	Cires	Dep. Moctezuma	97-01-11	6.9
43d	Cires	Nezahualcoyotl	97-01-11	6.9
44d	Cires	Nezahualcoyotl	97-01-11	6.9
45d	Cires	Palacio de los deportes	97-01-11	6.9
46d	Cires	Tlahuac	97-01-11	6.9
47d	Cenapred	Est. #7 Tlacotal	97-01-11	6.9
48d	iiunam	Tlahuac Bombas	97-01-11	6.9
49d	Cenapred	Est. # 9 U. Kennedy	97-01-11	6.9
50d	Cenapred	Est. #8 Zaragoza	97-01-11	6.9

2.5 Análisis de resultados

La decisión de utilizar eventos mayores o iguales que 6.9 grados Richter se considera adecuado ya que, como se indicó, hay marcadas diferencias en cuanto a niveles de aceleración en distintos puntos del Valle de México.

Se considera que los eventos cercanos a 6.9 grados abarcan intensidades moderadas, que se pueden asociar al estado límite de servicio (i.e. el ocurrido el 25 de abril de 1989 con una magnitud igual a 6.9°), mientras que los de intensidades elevadas pueden corresponder al estado límite de colapso (i.e. el evento del 19 de septiembre de 1985 con una magnitud de 8.1°)⁵.

Se considera que el hecho de retirar los acelerogramas con aceleraciones menores a 10 gals fue acertado ya que estos son demasiado pequeños y pueden introducir ruido en el procesamiento de las señales.

Una vez aplicados estos parámetros se obtuvieron 275 pares de registros acelerográficos, detectados en 101 estaciones acelerométricas en el Valle de México, debidos a 13 eventos sísmicos de origen tectónico de subducción.

⁵ Ordaz, Miranda y Avilés, "Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF", XII CNIS, León, Guanajuato, nov, 2000.

Capítulo

3

Procesamiento de las señales sísmicas

3.1 Corrección de errores de digitalización

Anteriormente se seleccionaron las componentes N-S y E-W de los registros sísmicos que se utilizan en este capítulo. Sin embargo, ciertos registros tienen algunos errores de digitalización debido a fallas en el acelerógrafo, por lo que si se desea darles un uso en ingeniería sísmica es necesario corregirlos, o descartarlos si el grado de error es tal que se imposibilita su corrección.

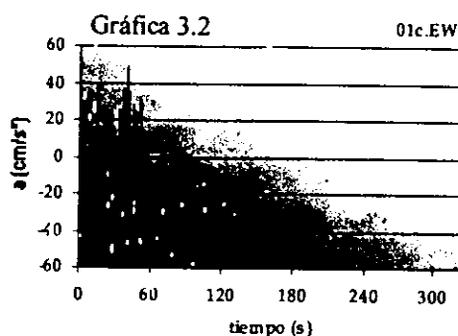
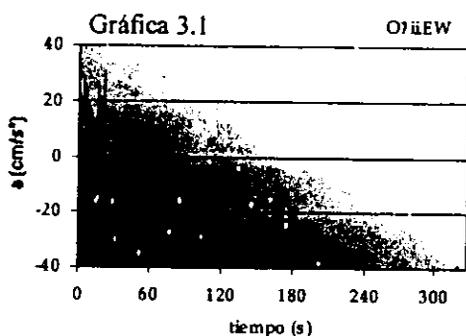
Se encontraron distintos tipos de errores en los acelerogramas. Estos errores solamente se pueden visualizar al graficar los registros, de otra forma sería muy difícil establecer si existe o no algún error, y de haberlo, de qué tipo se trata. Tomando en cuenta lo anterior, se graficaron 275 pares de acelerogramas, encontrándose diversos tipos de errores que se presentan en las gráficas 3.1 a la 3.13. Debido a la gran cantidad de espacio

que abarcan las gráficas de 275 pares de registros, sólo se presentan gráficas representativas de los tipos de errores encontrados y se indica el procedimiento de corrección.

3.1.1 Tipos de errores y corrección de acelerogramas

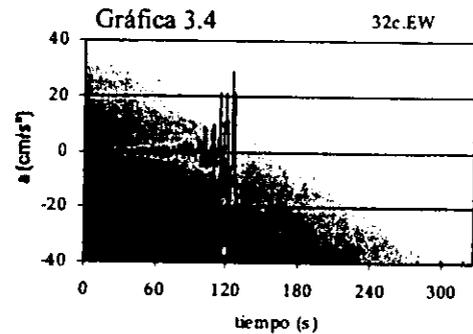
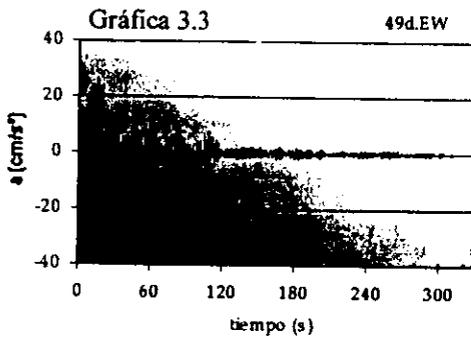
A continuación se describen seis tipos de errores encontrados en los registros acelerográficos debido a problemas en el acelerógrafo y además su procedimiento de corrección.

1. Comparado con los registros de su misma zona, su duración es extremadamente corta por lo que no se sabe si en realidad lo que se muestra es la parte intensa del registro o simplemente una pequeña parte de la parte intensa. Este tipo de registros se descartan por dos factores principales: 1) porque no muestran la duración aproximadamente real, 2) y porque ocasionarían muchos problemas al procesar estadísticamente señales completas con otras que no lo están. Por ejemplo, al obtener valores medios de duración, la desviación estándar de ésta sería muy grande dándonos así valores muy alejados de la realidad, ver gráficas 3.1 y 3.2.

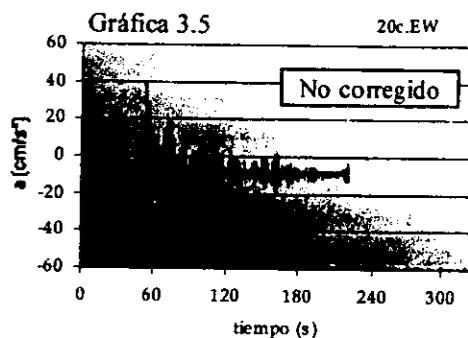


2. Este error es el más común y se debe a dos puntos: 1) el umbral de disparo del acelerógrafo es muy alto por lo que al darse un evento sísmico, el aparato lo registra hasta que la señal llega a una aceleración dada que por lo general es muy grande y el registro queda aparentemente cortado al principio, gráfica 3.3. 2) el aparato sólo registra una duración determinada, por lo que si la duración de la señal es muy larga, ésta queda cortada, gráfica 3.4. No hay forma de corregir estas señales ya que se desconoce la duración total del registro, además de que

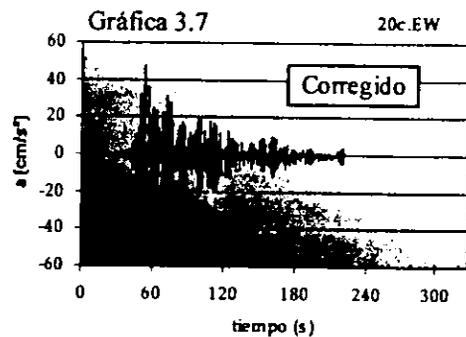
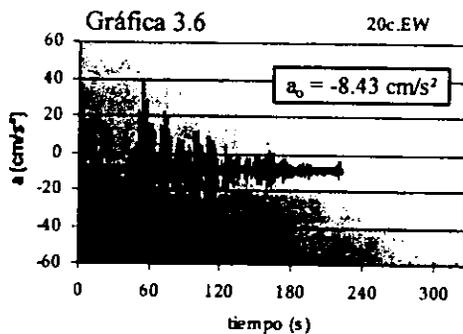
las aceleraciones cortadas son inciertas y no es posible determinar o interpolar de alguna manera el faltante. Estos registros se descartan del estudio.



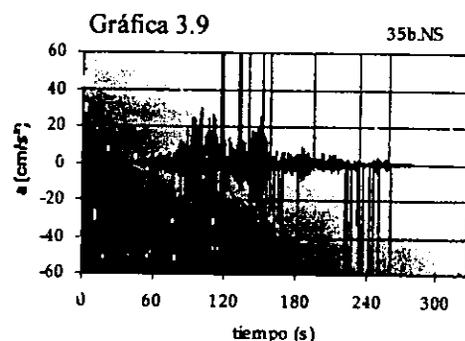
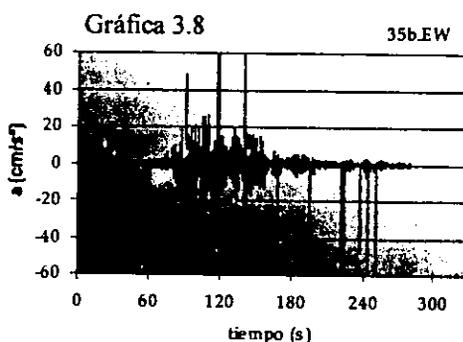
3. La línea base del registro está por arriba o por abajo de la horizontal (0,0), gráfica 3.5. Es posible corregir este tipo de errores ajustando una recta por mínimos cuadrados a la señal, gráfica 3.6. Una vez ajustada la recta se puede saber cuál es el valor de la aceleración donde comienza el registro y así sumar o restar a los valores de aceleración del registro original (según sea el caso) el valor inicial de la aceleración de la recta ajustada para corregir la línea base, gráfica 3.7. Esto se puede hacer solamente si el registro está completo (sin cortes extraños) de lo contrario, al ajustar una recta por mínimos cuadrados podría ajustarse una recta erróneamente y no indicarnos la línea base real del registro. El proceso de la corrección de la línea base se trata con detalle en el Capítulo 4. La corrección por mínimos cuadrados se lleva a cabo con el programa Excel.⁶



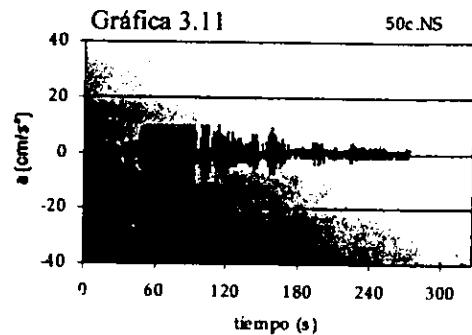
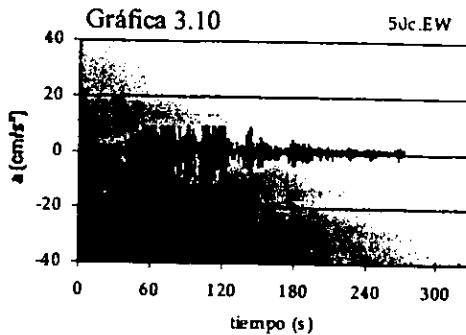
⁶ Microsoft®Excel 2000



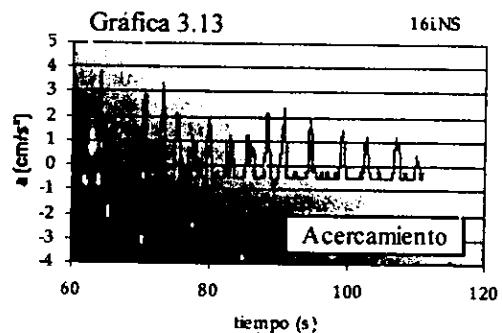
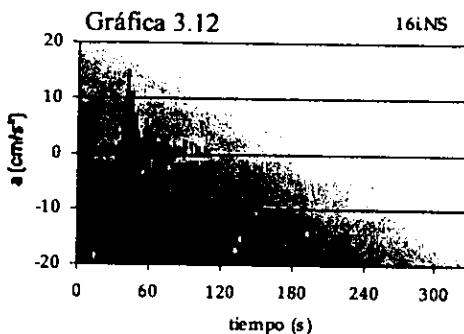
4. Los glitchés son errores de calibración del instrumento y estos errores no pueden ser corregidos sin afectar la señal en el dominio de frecuencia, gráficas 3.8 y 3.9. Es recomendable no corregir estos registros a menos de que exista algún método de corrección especial que no se toca en este trabajo. Estos registros son descartados ya que muestran aceleraciones totalmente fuera de la realidad e introducirían errores tremendos en el procesamiento de las señales. Son muy pocos los registros que tienen este tipo de error.



5. Existe un error que corta longitudinalmente los registros ocultando las aceleraciones reales, gráficas 3.10 y 3.11. No es posible corregir este error ya que se desconoce completamente cuáles son los niveles de aceleración en ese intervalo de tiempo. Por lo que se descarta el uso de éstos registros. Este problema se debe a un error en la calibración del instrumento.



6. Existen algunos registros que muestran amplitudes constantes en intervalos continuos de tiempo.⁷ Por tal motivo este tipo de registros no son un fiel reflejo del movimiento y pueden ocasionar problemas al hacer un estudio espectral. Sólo apareció un registro con este tipo de error, el cual se deja fuera del estudio, gráfica 3.12 y 3.13.



3.1.2 Registros descartados

A continuación se indican los registros que se eliminan debido a errores de digitalización, ya que muestran alguno de los cinco errores dados anteriormente, que no tienen corrección, tabla 3.1.

⁷ Raúl Guerrero del Ángel, *Duración del movimiento durante sismos: implicaciones en la degradación estructural*. Tesis de Maestría, UNAM, México, 1997.

Tabla 3.1 Registros descartados del procesamiento debido a que muestran errores

	Clave tesis	Institución	Nombre de la estación	Fecha sismo	Mag. Richter
Zona I	03i	iiunam	Sismex CU	78-11-29	7.8
	16i	Cires	Colinas del Sur	89-04-25	6.9
	19i	iiunam	CU03 Lab. de desarrollo	89-04-25	6.9
Zona II	01ii	iiunam	Alberca olimpica	79-03-14	7.0
	02ii	iiunam	Texcoco Chimalhuacán	79-03-14	7.0
	04ii	iiunam	Texcoco Chimalhuacán	82-06-07	6.9
	06ii	iiunam	Sismex Viveros	85-09-21	7.6
	09ii	Cires	Cerro del Peñón	89-04-25	6.9
	16ii	iiunam	Sismex Viveros	89-04-25	6.9
	21ii	Cires	Cerro del Peñón	95-09-14	7.3
	23ii	Cires	Esparza Oteo	95-09-14	7.3
	25ii	Cires(fica)	Granjas	95-09-14	7.3
	28ii	iiunam	Col. Quetzalcoatl	95-09-14	7.3
	37ii	iiunam	Col. Quetzalcoatl	97-01-11	6.9
Zona III a	13a	Cires(fica)	Lindavista	95-09-14	7.3
	15a	Cires(fica)	San Simón	95-09-14	7.3
	22a	Cires	Unidad Colonia IMSS	97-01-11	6.9
Zona III b	01b	iiunam	Lotería Nacional	79-03-14	7.0
	02b	iiunam	Sismex Sahop	79-03-14	7.0
	03b	iiunam	Lotería Nacional	82-06-07	7.0
	05b	iiunam	SCT	85-09-19	8.1
	14b	Cires	Liverpool	89-04-25	6.9
	24b	Cires(fica)	Cibeles	95-09-14	7.3
	35b	Cenpared	Est. # 10 Roma A	95-09-14	7.3
	36b	Cenapred	Est. # 11 Roma B	95-09-14	7.3
	41b	iiunam	Tlahuac deportivo	95-09-14	7.3
	49b	Cires	García Campillo	95-10-09	7.5
	75b	iiunam	Tlahuac deportivo	97-01-11	6.9
Zona III c	01c	iiunam	Texcoco centro lago	79-03-14	7.0
	02c	iiunam	Texcoco centro lago	81-10-25	7.3
	03c	iiunam	Central de abastos frigorífico	85-09-19	8.1
	08c	iiunam	Central de abastos frigorífico	86-04-30	7.0
	09c	iiunam	Central de abastos oficinas	86-04-30	7.0
	14c	iiunam	Central de abastos oficinas	89-04-25	6.9
	15c	Cires	Cuernanco	89-04-25	6.9

23c	Cires(fica)	Buenos Aires	95-09-14	7.3
27c	iiunam	Prepa. # 7 La Viga	95-09-14	7.3
31c	riis	UAM Iztapalapa	95-09-14	7.3
32c	Cires(fica)	Villa del Mar	95-09-14	7.3
49c	iiunam	Central de abastos oficinas	97-01-11	6.9
50c	Cires	Cuemanco	97-01-11	6.9

Zona III d

08d	Cires	Nezahualcoyotl	89-04-25	6.9
12d	iiunam	Tlahuac Bombas	89-04-25	6.9
19d	Cires(fica)	Hangares	95-09-14	7.3
20d	Cires	Nezahualcoyotl	95-09-14	7.3
38d	Cires	Aeropuerto	96-02-25	6.9
47d	Cenapred	Est. # 7 Tlacotal	97-01-11	6.9
48d	iiunam	Tlahuac Bombas	97-01-11	6.9
49d	Cenapred	Est. # 9 U. Kennedy	97-01-11	6.9

3.2 Rotación de acelerogramas

Se rotan vectorialmente las componentes E-W y N-S con el fin de obtener un registro que contenga la máxima intensidad de Arias. Para ello es necesario seguir los siguientes pasos:

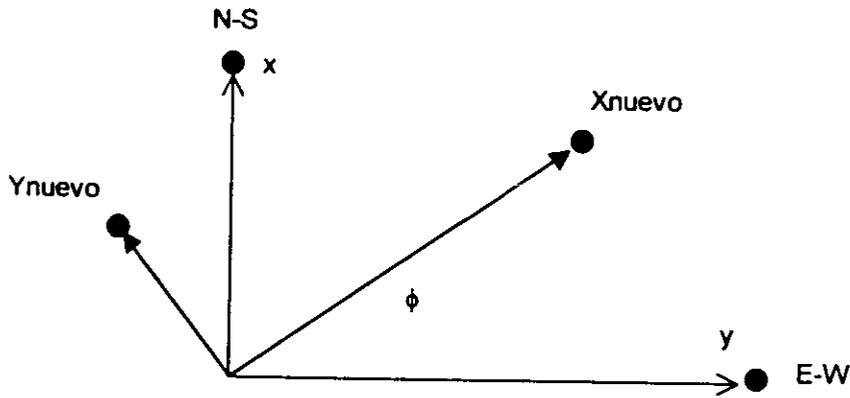
1. Se toman las componentes E-W y N-S de un registro y se aplican las ecuaciones siguientes:

$$X_{nuevo} = x_i \cos \phi + y_i \sin \phi \quad [3.1]$$

$$Y_{nuevo} = y_i \cos \phi - x_i \sin \phi \quad [3.2]$$

El valor de x_i indica la primera muestra de la componente E-W y el valor y_i la primera muestra de la componente N-S por lo que el valor X_{nuevo} y Y_{nuevo} dan los valores de las nuevas componentes perpendiculares, rotadas a un ángulo ϕ . En este caso solamente se utilizará la primera componente, ecuación [3.1] y de esa forma se reduce el tiempo de cómputo,⁸ ver figura 3.1.

⁸ Comunicación personal con el Dr. Armando Bárcena, ver Apéndice A "Programas de cómputo".

Figura 3.1 Rotación de las i -ésimas muestras de los registros E-W y N-S

2. Se rotan las componentes E-W y N-S de cada registro con un ángulo de cero grados hasta un ángulo de 179 grados, obteniendo para cada una de las 180 rotaciones el acelerograma que contiene las máximas aceleraciones. Entonces puede decirse que de cada par de registros que se tenía inicialmente, ahora se tienen 180 registros de aceleración máxima rotados de los cero grados a los 179 grados. Con ayuda del odograma es posible determinar visualmente en qué ángulo se encuentra aproximadamente la máxima intensidad de Arias y así poder reducir el número de ángulos por verificar. El odograma es la graficación de ambas componentes de aceleración y nos indica la forma y dirección en que se desarrollan dichas aceleraciones.
3. Se obtiene la intensidad de Arias de cada uno de los 180 registros acelerográficos obtenidos anteriormente. La intensidad de Arias⁹ se representa por la siguiente ecuación:

$$I_A = \frac{\pi}{2} \int a^2(t) dt \quad [3.3]$$

4. Se comparan los valores de la intensidad de Arias de los 180 registros rotados, obteniendo así, el registro con la máxima intensidad de Arias. En la tabla 3.2 se indica el ángulo y el rumbo de cada registro en el que se encuentra la máxima intensidad de Arias.

⁹ Ver definición en el Capítulo 5.

Tabla 3.2 Ángulos donde se encuentra la máxima intensidad de Arias de cada registro

	Clave	Grados	Rumbo	
Zona I	01i	110	N20W	
	02i	10	N80E	
	04i	57	N33E	
	05i	78	N12E	
	06i	4	N86E	
	07i	27	N63E	
	08i	84	N06E	
	09i	38	N52E	
	10i	49	N41E	
	11i	94	N04W	
	12i	79	N11E	
	13i	58	N32E	
	14i	63	N27E	
	15i	83	N07E	
	17i	58	N32E	
	18i	53	N37E	
		20i	61	N29E
		21i	95	N05W
22i		60	N30E	
23i		96	N06W	
24i		103	N13W	
25i		109	N19W	
26i		90	N00W	
27i		100	N10W	
28i		101	N11W	
29i		59	N31E	
30i		60	N30E	
31i		65	N25E	
32i		128	N38W	
33i		103	N13W	
34i		176	N86W	
Zona II		03ii	146	N56W
		05ii	129	N39W
		07ii	71	N19E
	08ii	113	N23W	
	10ii	12	N78E	
	11ii	133	N43W	
	12ii	176	N86W	
	13ii	34	N56E	
	14ii	160	N70W	
	15ii	39	N51E	
	17ii	46	N44E	
	18ii	36	N54E	
	19ii	136	N21W	
	20ii	177	N87W	
		22ii	111	N21W
		24ii	11	N79E
		26ii	73	N17E
		27ii	70	N20E
29ii		15	N75E	
30ii		55	N35E	
31ii		108	N18W	
32ii		16	N74E	
33ii		47	N43E	
34ii		13	N77E	
35ii		41	N49E	
36ii		82	N08E	
38ii		95	N05W	
Zona III a		01a	160	N70W
		02a	110	N20W
		03a	26	N64E
		04a	80	N10E
		05a	56	N34E
	06a	56	N34E	
	07a	103	N13W	
	08a	92	N02W	
	09a	20	N70E	
	10a	168	N78W	
		11a	39	N51E
		12a	63	N27E
		14a	105	N15W
		16a	10	N80E
		17a	34	N56E
		18a	97	N07W
		19a	129	N39W
		20a	98	N08W
21a		39	N51E	

Zona III b

04b	28	N62E
06b	33	N57E
07b	72	N18E
08b	129	N39W
09b	114	N24W
10b	136	N46W
11b	81	N09W
12b	128	N38W
13b	180	N90E
15b	90	N00E
16b	147	N57W
17b	140	N50W
18b	100	N10W
19b	143	N53W
20b	57	N33E
21b	29	N61E
22b	65	N25E
23b	153	N63W
25b	159	N69W
26b	11	N79E
27b	48	N42E
28b	68	N22E
29b	98	N08W
30b	84	N06E
31b	101	N11W
32b	107	N17W
33b	82	N08W
34b	42	N48E
37b	166	N76W
38b	125	N35W
39b	145	N55W
40b	70	N20E
42b	168	N78W

43b	115	N25W
44b	31	N59E
45b	155	N65W
46b	112	N22W
47b	73	N17E
48b	157	N67W
50b	93	N03W
51b	115	N25W
52b	102	N12W
53b	169	N79W
54b	113	N23W
55b	115	N25W
56b	58	N32E
57b	155	N65W
58b	141	N51W
59b	120	N30W
60b	146	N56W
61b	31	N59E
62b	32	N58E
63b	121	N31W
64b	61	N29E
65b	83	N07E
66b	73	N17E
67b	178	N88W
68b	60	N39E
69b	144	N54W
70b	151	N61W
71b	138	N48W
72b	150	N60W
73b	29	N61E
74b	64	N26E
76b	64	N26E

Zona III c

04c	126	N36W
05c	79	N11E
06c	113	N23W
07c	111	N21W
10c	43	N47E
11c	125	N35W
12c	7	N83E
13c	140	N50W
16c	134	N44W
17c	128	N38W
18c	100	N10W
19c	82	N08E

33c	123	N33W
34c	94	N04W
35c	61	N29E
36c	169	N79W
37c	9	N81E
38c	31	N59E
39c	33	N57E
40c	54	N56E
41c	135	N45W
42c	86	N04E
43c	14	N76E
44c	160	N70W

20c	98	N08W
21c	27	N63E
22c	89	N01E
24c	55	N35E
25c	64	N26E
26c	96	N06W
28c	99	N09W
29c	40	N50E
30c	72	N18E

45c	142	N52W
47c	54	N36E
48c	13	N77E
51c	82	N08E
52c	150	N60W
53c	134	N44W
54c	91	N01W
55c	26	N64E

Zona III d

01d	84	N06E
02d	30	N60E
03d	133	N43W
04d	105	N15W
05d	83	N07E
06d	59	N31E
07d	39	N51E
09d	77	N13E
10d	84	N06E
11d	41	N49E
13d	99	N09W
14d	54	N36E
15d	106	N16W
16d	103	N13W
17d	59	N31E
18d	31	N59E
21d	103	N13W
22d	75	N15E
23d	47	N43W
24d	91	N01W
25d	93	N03W

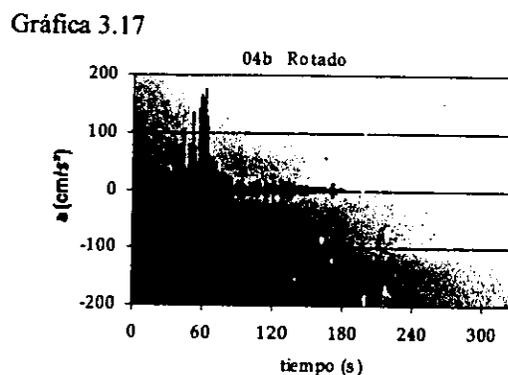
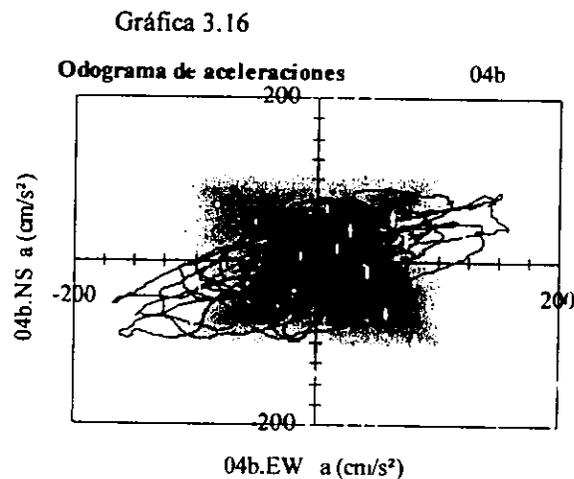
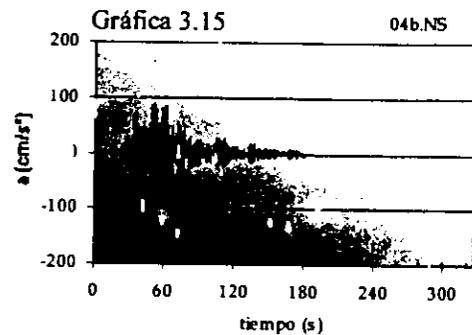
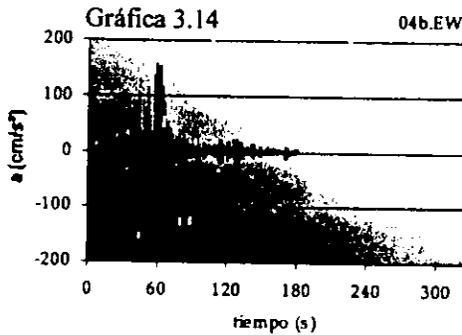
26d	82	N08E
27d	152	N62W
28d	96	N06W
29d	136	N46W
30d	42	N48E
31d	86	N04E
32d	150	N60W
33d	180	N90W
34d	85	N05E
35d	93	N03W
36d	90	N00E
37d	124	N34W
39d	82	N08E
40d	132	N42W
41d	82	N08E
42d	19	N71E
43d	12	N78E
44d	54	N36E
45d	159	N69W
46d	179	N89W
50d	4	N86E

Es importante mencionar que el registro de los 180 registros rotados que contiene la máxima intensidad de Arias no es necesariamente el registro que contiene la máxima aceleración.

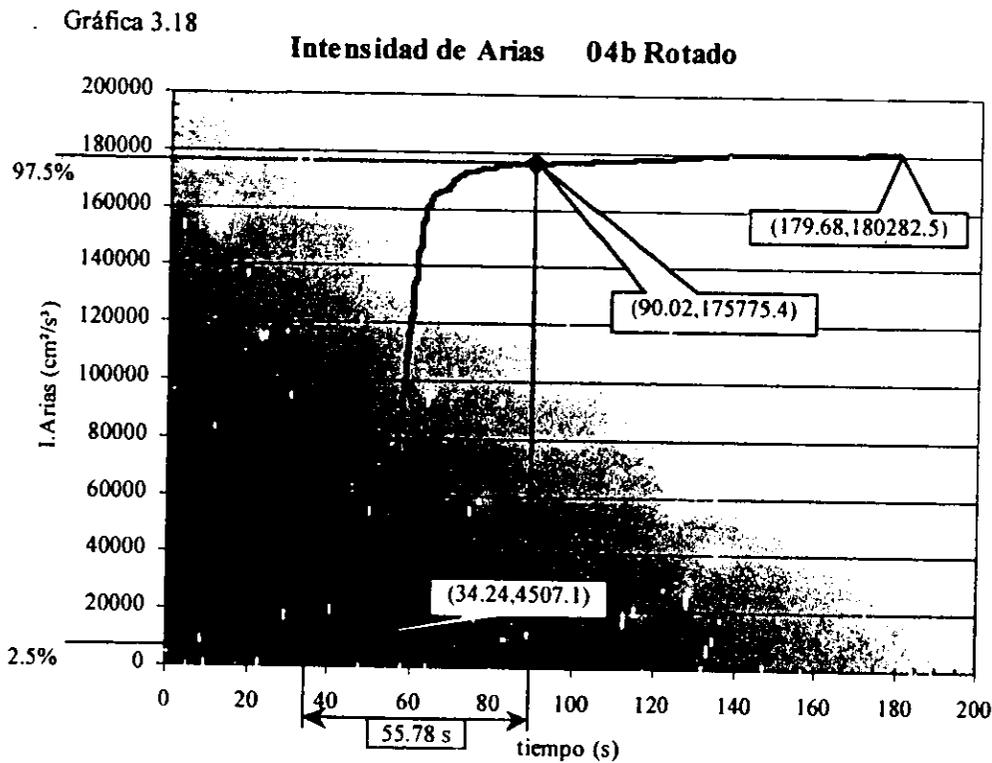
3.3 Parte intensa de los acelerogramas

Para obtener la parte intensa de un acelerograma es necesario proceder de la siguiente manera:

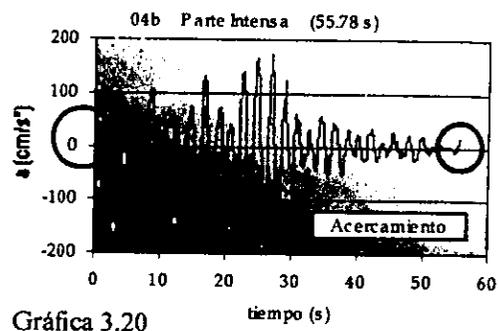
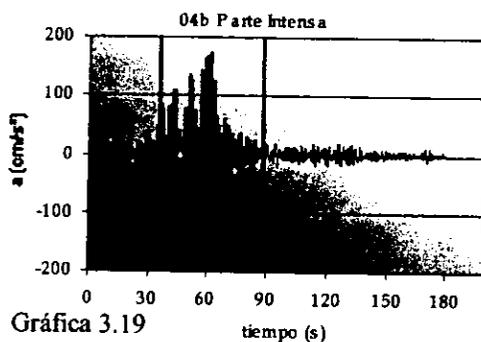
1. Obtener la intensidad de Arias de cada registro rotado. Por ejemplo, las gráficas 3.14 y 3.15 muestran las componentes E-W y N-S del registro 04b (SCT,19-09-1985), la gráfica 3.16 muestra su odograma y la gráfica 3.17 indica el registro rotado en su dirección dominante, con éste se trabajará en esta sección. De éste se obtiene la intensidad de Arias.



- Tomar el 95% de la intensidad de Arias, considerando como límites de corte el 2.5% y el 97.5% de la intensidad de Arias. De la misma forma lo toman E. Reinoso y M. Ordaz, 2001¹⁰, gráfica 3.18.



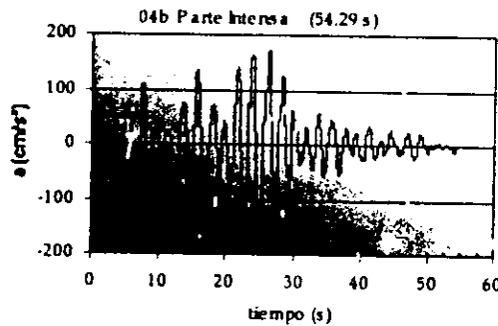
- Con los límites de corte de intensidad de Arias se obtienen los correspondientes puntos de corte en el tiempo, gráfica 3.18.
- Con dichos puntos se procede a cortar los acelerogramas y así obtener la parte intensa de cada uno, gráficas 3.19 y 3.20.



¹⁰ Eduardo Reinoso y Mario Ordaz. "Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period" en *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* #30. EUA, John Wiley & Sons, 2001. p. 653-673.

5. Al hacer el corte exacto de la parte intensa de un acelerograma, quedan valores de aceleración diferentes de cero al principio y al final del registro, gráfica 3.20. Este pequeño error puede causar inexactitudes al utilizar las historias, además de que físicamente la aceleración y la velocidad del suelo comienzan y terminan en cero.¹¹ Para evitar ese error se corta al principio y al final de cada parte intensa del acelerograma en el cruce más cercano a cero, gráfica 3.21.

Gráfica 3.21



3.4 Submuestreo y sobremuestreo de los acelerogramas

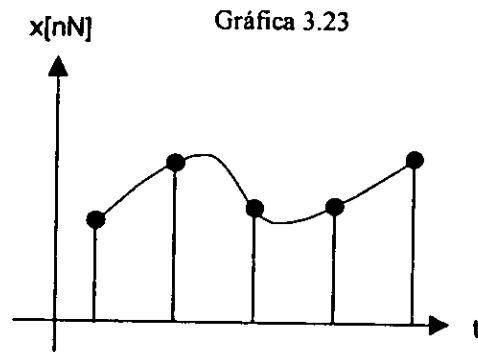
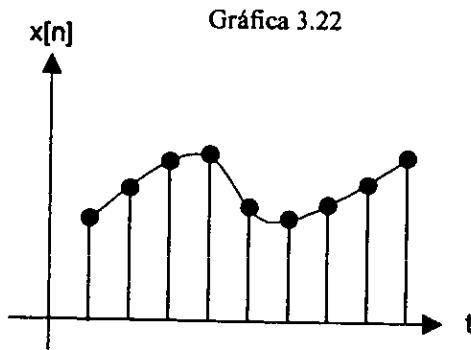
Dado que en los capítulos 6 y 7 se hace un estudio espectral de las señales sísmicas, es conveniente que todos los registros tengan el mismo intervalo de tiempo; de lo contrario, sería más laborioso procesar las señales estadísticamente, por lo cual todos los registros rotados fueron submuestreados o sobremuestreados para que todos contengan el mismo intervalo de tiempo a 0.01 segundos, ya que algunos registros están digitalizados a 0.005s, a 0.02s, a 0.03s o a 0.04s.

El proceso de decimación se conoce a menudo como reducción de muestreo o submuestreo. Consiste en tomar cada muestra N de una función discreta $x[n]$ ¹²; es decir: gráficas 3.22 y 3.23.

$$x[n] = x[nN] \quad [3.4]$$

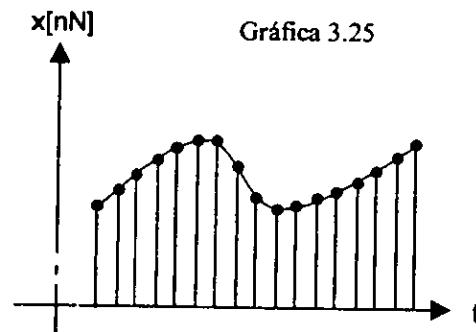
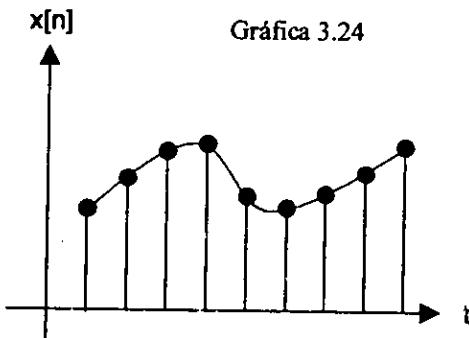
¹¹ Wilfred Iwan y Xiaodong Chen. "Important near-field ground motion data from the Landers earthquake" en *Proceedings of the Tenth European Conference of Earthquake Engineering*. Viena, Austria, 1994. vol. 1, p. 257-267.

¹² A. Oppenheim, A. Willsky y H. Nawab. *Señales y Sistemas*. México, Prentice Hall, 1997 (2ª edición). P.514-549.



Submuestreada

Así como en algunas aplicaciones es útil disminuir el muestreo, hay situaciones en las cuales es útil convertir una secuencia a una velocidad de muestreo equivalente más alta, procedimiento conocido como sobremuestreo o interpolación. El sobremuestreo es básicamente el proceso inverso de decimar o submuestrear, gráficas 3.24 y 3.25.



Sobremuestreada

El intervalo de 0.01s se estableció utilizando la frecuencia de Nyquist para que la máxima frecuencia obtenida en el espectro de amplitudes de Fourier de un registro sea de 50 Hz.

La frecuencia de Nyquist se representa con la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{2\Delta t} \quad [3.5]$$

Δt = intervalo de tiempo

3.5 Resumen de resultados

Se hace notar que se realizó un estudio estadístico de movimientos sísmicos rotados a su máxima intensidad de Arias y no como usualmente se trabaja usando la componente E-W o N-S con mayor aceleración, por lo que los valores de intensidad pueden verse incrementados. Consecuentemente, se obtienen resultados apegados a la dirección dominante de cada registro y no a los valores de las componentes E-W o N-S.

Antes de llevar a cabo la rotación de los registros se seleccionaron aquellos que no tuvieran errores de digitalización para evitar problemas en el estudio estadístico, y es posible ver los tipos de errores encontrados en los acelerogramas.

Para obtener resultados más confiables se submustraron y sobremuestrearon los registros que requerían de un cambio en su intervalo de muestreo, llevando todos los registros a un mismo intervalo de tiempo igual a $\Delta t = 0.01s$, posteriormente se obtuvo la parte intensa de la dirección dominante de cada sismo haciendo uso de la intensidad de Arias con puntos de corte igual a 2.5% y a 97.5% de dicha intensidad, con la finalidad de utilizar registros con únicamente el 95% de la intensidad de cada uno.

Capítulo

4

Filtrado de frecuencias y corrección de la línea base

El movimiento del suelo debido a un sismo se expresa por las historias de aceleración, de velocidad y de desplazamiento. Se establece que dichas historias contienen la misma información del movimiento del suelo, ya que la historia de velocidad se obtiene de la integración de la de aceleración, y a su vez la de desplazamiento se obtiene de la de velocidad. Sin embargo es necesario aplicar ciertas correcciones a las historias; estas correcciones se hacen porque el acelerograma contiene frecuencias que no corresponden al movimiento del suelo (principalmente son frecuencias muy bajas) debido al ruido ambiental y al ruido interno del aparato. Esto se visualiza en las historias de velocidad y de desplazamiento cuando la línea base de éstas tiene una pendiente diferente de cero, gráficas 4.2 y 4.3.

Se corrige en el dominio de frecuencia haciendo uso del espectro de amplitudes de Fourier¹³ mediante un filtro pasa-alta, la historia de aceleración como también la de velocidad, ya que al hacer esto se corrige la línea base, se retiran las frecuencias que no

¹³ Ver definición en el Capítulo 6.

representan al movimiento del suelo y además se hace que las tres historias sean compatibles entre ellas.¹⁴ Esto es, que todas muestren la misma información ya que representan el mismo movimiento.

4.1 Antecedentes de la corrección de la línea base

Cuando se empezó a utilizar el acelerógrafo, no era posible determinar inmediatamente las historias de velocidad ni las de desplazamiento simplemente integrando el acelerograma. Esto se debía principalmente a que no se tenía establecida la línea base del acelerograma, por lo que encontrar métodos accesibles de obtención de la línea base se convirtió en una tarea importante en el estudio de la ingeniería sísmica.

Muchos investigadores supusieron que la línea base tenía una forma parabólica, pero este tipo de ajuste parabólico no era adecuado para los registros de intermedia y larga duración debido a los errores involucrados por el aparato.

En un principio los acelerogramas se registraban en papel fotográfico y en películas de 70mm y 35mm, y su máxima resolución era de 312 puntos por centímetro; consecuentemente una mesa de longitud de 60 cm podía acomodar aproximadamente 30 segundos del registro. Los registros acelerográficos se digitalizaban a diferentes intervalos de tiempo con un promedio de 10 a 40 puntos por segundo.¹⁵

Se hicieron estudios sobre los errores de periodos largos incluidos en los acelerogramas. Estos errores se debían primordialmente a:

1. Errores causados por el movimiento transversal del instrumento al captar la señal.
2. Errores debido al ondulamiento de la cinta causado por el envejecimiento.
3. Errores causados por la expansión de la cinta filmica.
4. Errores sistemáticos debido a imperfecciones del mecanismo de detección del movimiento transversal.

¹⁴ Praveen K. Malhotra, Response spectrum of incompatible acceleration, velocity and displacement histories, en *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*#30, USA, John Wiley & sons, 2001. p.279-286.

¹⁵ M.D. Trifunac, "Low frequency digitization errors and a new method for zero baseline correction of strong-motion accelerograms", en Report No. EERL 70-07 de la National Science Foundation. USA, California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, 1970.

5. Errores aleatorios generados durante el proceso de digitalización y por la inadecuada resolución del ojo humano.

Ya que los acelerogramas se pasaban manualmente de la cinta filmica a una hoja de papel, podían existir muchos errores debido a la persona que se encargaba de ese arduo trabajo. Por lo que varias personas tomaban el mismo registro obteniendo así varios acelerogramas. Cada uno de los acelerogramas se interpolaba llevándolo a tener un mismo intervalo de tiempo. Posteriormente se obtenía un valor medio de los diversos acelerogramas. Y la diferencia entre el valor medio y cada uno de los acelerogramas representaba los errores aleatorios introducidos por el operador. Con estos errores se hacía todo un estudio estadístico para ver cómo variaban los errores causados por el humano. Luego, para determinar las frecuencias predominantes de los errores digitalizados en los acelerogramas, se obtenía el espectro de amplitudes de Fourier del valor medio de los errores. El resultado indicaba que para frecuencias intermedias su amplitud era baja y para frecuencias bajas la amplitud era mucho mayor, por lo que el error era mayor a frecuencias bajas. Finalmente se estableció el periodo de corte en 16s, ya que este rango cubre casi todo los periodos de las estructuras normales, con excepción de los puentes.

Con este corte supuestamente se corregía la línea base aunque seguía existiendo una gran incertidumbre causada por los pequeños errores en todo el procesamiento de la señal.

Los errores de alta frecuencia en los acelerogramas no eran considerados ya que se disminuía su amplitud al integrarlos por lo que no afectaban la exactitud de las historias de velocidad ni las de desplazamiento.

Ya que se vio que al ajustar una curva parabólica dejaba errores, se estableció que debía tomarse un criterio para la corrección de la línea base que pudiera formularse fácilmente. La corrección de la línea base debía ser procesada de tal manera que prácticamente toda la señal real fuera preservada, excepto el ruido representado por periodos largos de la señal; sin embargo, esto no siempre era posible ya que la banda de frecuencias característica de cada señal no estaba muy bien definida y que para ciertas señales un periodo de 16s (como el que se estableció anteriormente) era demasiado grande, por lo que aun haciendo el corte en ese punto la línea base no se corregía totalmente, o se dañaba la señal.

Dado que el corte de 16s no era ciertamente exacto para todos los registros, lo que se hacía era utilizar un filtro pasa-alta recurrente en el dominio de frecuencia buscando el punto en el que se corrigiera la línea base, además de que las historias de aceleración, de velocidad y de desplazamiento debían ser compatibles entre ellas.¹⁶

4.2 El filtrado de frecuencias

El filtrado es el proceso de modificar las amplitudes relativas de las componentes de frecuencia en una señal o de eliminar algunas componentes de frecuencia. Los sistemas diseñados para dejar pasar algunas frecuencias esencialmente no distorsionadas y atenuar de manera significativa o eliminar por completo otras se conocen como filtros selectivos en frecuencia, y aquellos que cambian la forma del espectro se conocen como filtros conformadores de frecuencia.

Aquí se utilizan los filtros selectivos en frecuencia ya que sólo se atenúa una banda de frecuencias determinada en el espectro de amplitudes de Fourier.

4.2.1 Filtros selectivos en frecuencia

Los filtros selectivos en frecuencia son una clase de filtros específicamente destinados a seleccionar con exactitud o muy aproximadamente algunas bandas de frecuencia y atenuar otras.

Mientras que la selectividad de frecuencia no es el único tema concerniente a las aplicaciones, su gran importancia ha conducido a un conjunto de términos ampliamente aceptados para describir las características de los filtros selectivos en frecuencia. En particular, mientras que la naturaleza de las frecuencias que pasarán por un filtro selectivo en frecuencia varían considerablemente dependiendo de la aplicación, varios tipos de filtros básicos se usan ampliamente y se les han dado nombres para indicar su función. Por ejemplo, un filtro pasa-baja es aquel que deja pasar frecuencias bajas y atenúa o elimina las frecuencias más altas. Un filtro pasa-alta es aquel que deja pasar las frecuencias altas y atenúa o elimina las bajas, un filtro pasa-banda es el que deja pasar una banda de

¹⁶ Praveen K. Malhotra, *Op. cit.*

frecuencias y atenúa frecuencias tanto más altas como más bajas con respecto a la banda que deja pasar. En cada caso, las frecuencias de corte son las frecuencias que definen los límites entre las frecuencias que pasan y las que se eliminan.

4.3 Filtrado de acelerogramas

Se procedió a filtrar los registros considerando los siguientes conceptos.¹⁷

4.3.1 Filtro Butterworth

En este estudio se utilizó un filtro Butterworth pasa-alta de orden $N=4$. el filtrado se hace en el dominio de frecuencia. Sea $y(t)$ la señal filtrada. Su transformada de Fourier $Y(\omega)$ está dada por:

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)$$

donde $X(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal original y $H(\omega)$ representa al filtro dado por:

$$|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{F_{min}}{f}\right)^{2N}}$$

donde:

F_{min} = frecuencia de corte

f = frecuencia en Hz

N = número de polos

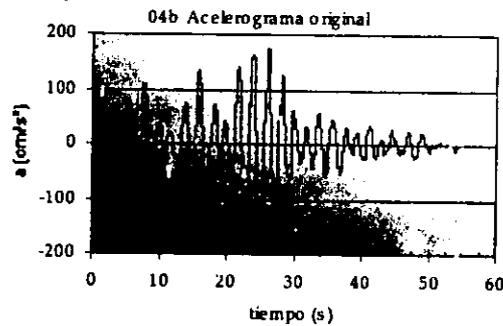
¹⁷ M. Erdik y J. Kubin. "A procedure for the accelerogram processing" en *Proceedings 8th World Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, USA, 1984. vol. II, p. 135-139.

4.3.2 Procedimiento de filtrado

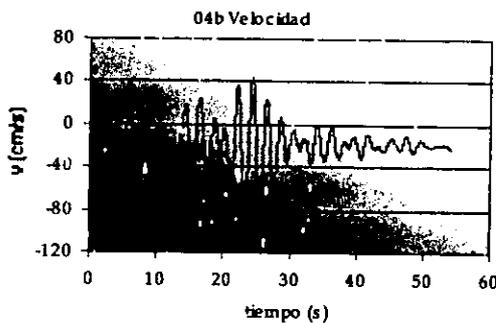
El procedimiento de filtración que se usó se describe a continuación:

1. Se filtra una sola vez el acelerograma¹⁸ (gráfica 4.1) ya que de no hacerlo, al integrar el acelerograma la línea base de la historia de velocidad (gráfica 4.2) y la de desplazamiento (gráfica 4.3) mostraría su línea base una pendiente diferente de cero.

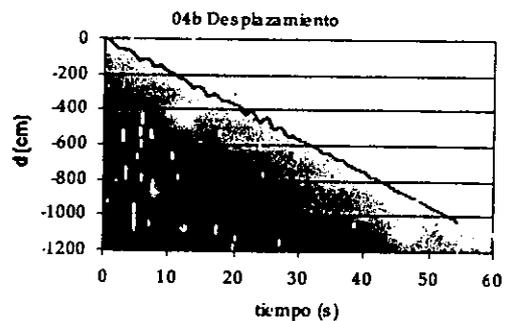
Gráfica 4.1



Gráfica 4.2



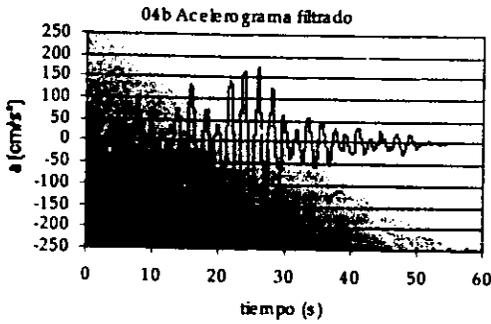
Gráfica 4.3



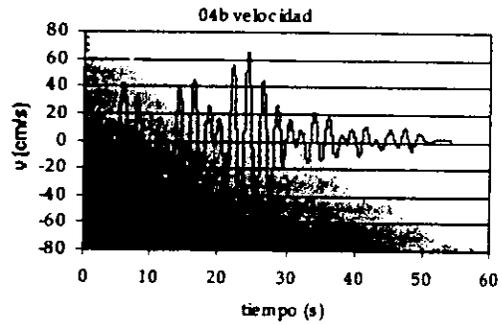
2. Se integra el acelerograma obteniendo la historia de velocidad. La línea base de esta historia está correcta debido al filtrado que se realizó en el paso 1, gráficas 4.4 y 4.5.

¹⁸ Se utilizó el programa de cómputo *Degtra* versión 1.0.45, Instituto de Ingeniería UNAM, M.Ordaz y C. Montoya, 1990-1999.

Gráfica 4.4

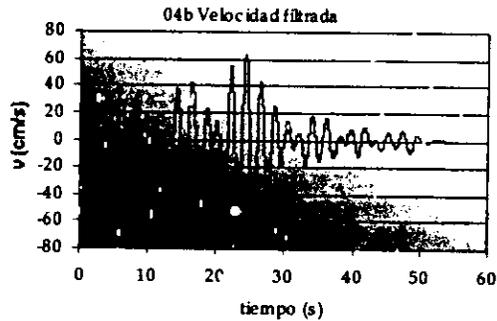


Gráfica 4.5

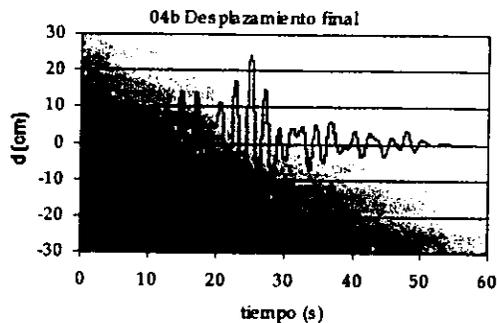


3. Dado que al integrar la historia de velocidad la línea base de la historia de desplazamiento se mueve, es necesario filtrar recurrentemente la historia de velocidad con la misma frecuencia de corte para que la línea base de la historia de desplazamiento se corrija. Con este proceso se corrige al mismo tiempo la de velocidad (si no está correcta su línea base), gráfica 4.6.

Gráfica 4.6



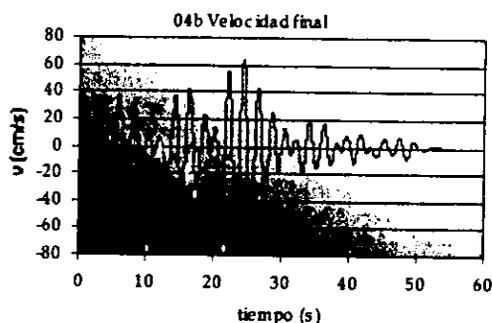
4. Se integra la historia de velocidades filtrada para obtener la historia de desplazamiento final, gráfica 4.7.



Gráfica 4.7

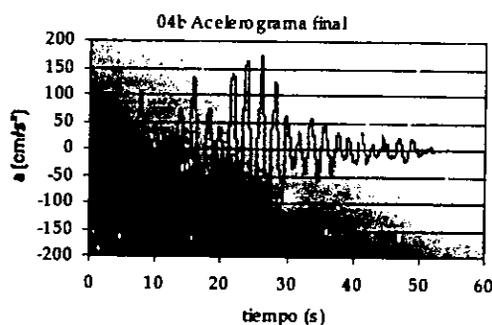
5. Como se corrigieron los registros en el dominio de frecuencia, es necesario derivar la historia de desplazamiento final para determinar la historia de velocidad final. Esta última historia de velocidad es aproximadamente igual a la historia de velocidad del paso 3, ya que la historia de desplazamiento no sufrió corrección alguna, gráfica 4.8.

Gráfica 4.8



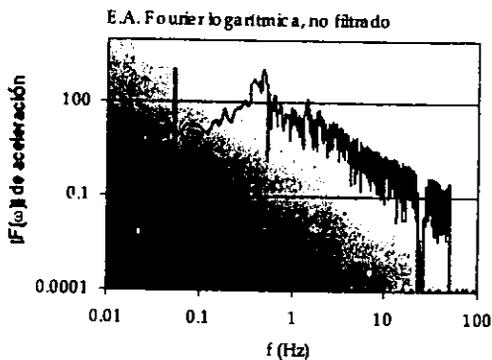
6. De igual forma que en el paso 5, se deriva ahora la historia de velocidad final para encontrar la historia de aceleración final, gráfica 4.9. Esta historia será utilizada en los capítulos siguientes.

Gráfica 4.9

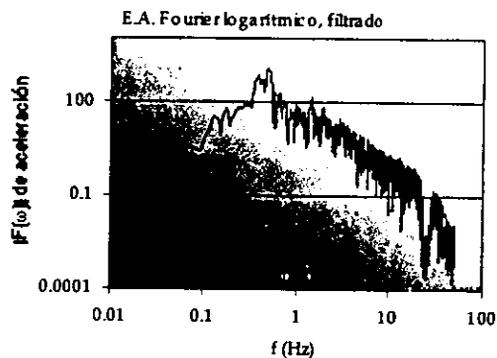
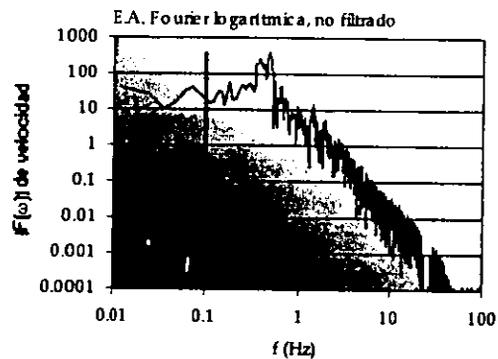


Para determinar la frecuencia de corte se utiliza el espectro de amplitudes de Fourier, con los ejes logarítmicos o semilogarítmicos. Las frecuencias atenuadas en su mayoría son menores que 0.1 Hz, ya que estas frecuencias involucran periodos altos en los registros moviendo la línea base. La frecuencia de corte se determina buscando atenuar únicamente las frecuencias muy bajas, en las gráficas 4.10, 4.11 y 4.12 se pueden apreciar los puntos de corte que se seleccionaron para un registro cualquiera.

Gráfica 4.10



Gráfica 4.11

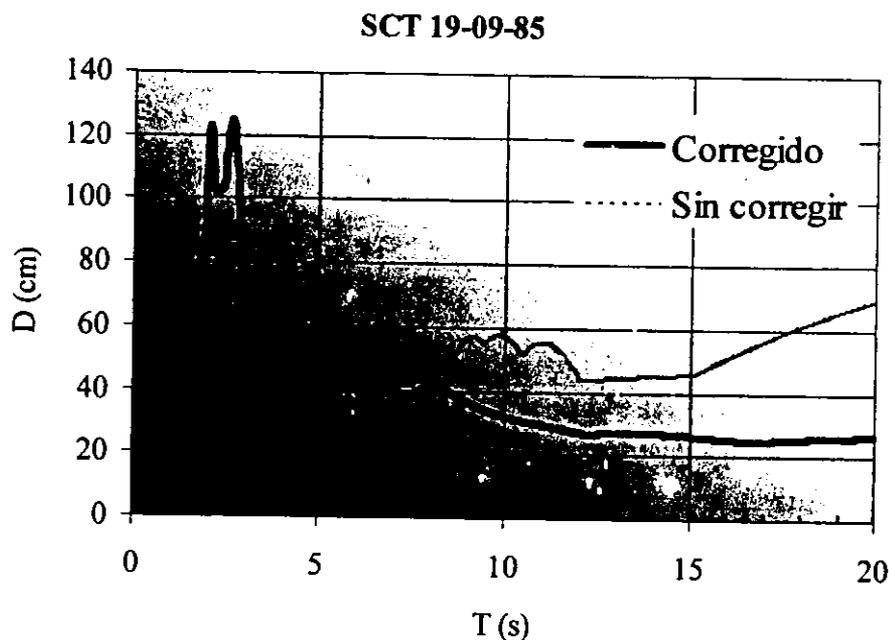


Gráfica 4.12

La razón de encontrar la historia de aceleración final filtrando el acelerograma original y de utilizar un filtro recurrente en la historia de velocidades es que de no hacerlo los espectros de respuesta lineal de desplazamiento no mostrarían valores reales tendiendo a incrementar el desplazamiento en periodos grandes.

En la gráfica 4.13 se muestra cómo varía el espectro de respuesta lineal de desplazamiento utilizando el acelerograma no corregido (gráfica 4.1) y utilizando el acelerograma final previamente corregido (gráfica 4.9).

Se puede ver en la gráfica 4.13 que existe una diferencia entre los espectros de la misma señal, esto se debe a que el acelerograma original contiene amplitudes muy altas en frecuencias muy bajas (o periodos altos). Corrigiendo esto obtenemos el espectro del acelerograma final que se relaciona con los valores de la historia de desplazamiento final, gráfica 4.7



Gráfica 4.13 Comparación entre dos espectros de desplazamiento de una misma señal, uno corregido y el otro sin corregir

Las historias de aceleración finales son las que se utilizan en los capítulos posteriores.

4.4 Resumen de resultados

Como los registros acelerográficos cuentan con ruido (frecuencias muy bajas) causando un error en la línea base de las historias de velocidad y de desplazamiento se tomó la decisión de aplicar un filtro selectivo en frecuencia haciendo uso de un filtro Butterworth pasa-alta. Cabe mencionar que el procedimiento de filtrar fue similar al de Erdik y Kubin¹⁹ (1984), filtrando el mismo intervalo varias veces hasta obtener resultados satisfactorios con respecto a la posición de la línea base. De no corregir la línea base no sería posible hacer el estudio espectral ya que dichos espectros arrojarían resultados erróneos.

¹⁹ M.Erdik y J. Kubin, *Op. Cit.*

Capítulo

5

Intensidad de Arias y funciones de modulación

Hasta este punto se cuenta con una serie de acelerogramas que fueron seleccionados detalladamente aplicando algunos parámetros de selección que se mencionan en el Capítulo 2. Estos acelerogramas se revisaron y aquellos que tenían errores se corrigieron o se descartaron. Todos los acelerogramas cuentan con la característica de tener el mismo intervalo de muestreo, lo que facilita enormemente el procesamiento estadístico de las señales. Estos acelerogramas indican la componente donde se encontró la máxima intensidad de Arias de la rotación de sus componentes N-S y E-W registradas por el instrumento. Además se cuenta con la parte intensa de cada acelerograma rotado a su máxima intensidad de Arias. Dicho acelerograma rotado fue corregido en el dominio de frecuencia para obtener el acelerograma final que es con el que se trabajará en este y en los capítulos posteriores.

Una vez agrupados los registros acelerográficos por zonas sísmicas, se procede a ordenar los registros sísmicos de cada zona por niveles de intensidad de Arias dando lugar a varios subgrupos en cada una de las seis zonas del Valle de México.

Una vez formados los subgrupos de intensidad de Arias de cada zona, se ajusta una función matemática a las curvas de valor medio de la intensidad de Arias o a las varianzas de cada subgrupo (dependiendo del caso) con el fin de encontrar el valor esperado o la función moduladora de la intensidad.

5.1 La intensidad de Arias²⁰

La expresión de la intensidad $I_A(\xi)$ definida por Arias²¹, es la siguiente:

$$I_A(\xi) = \frac{\arccos \xi}{g \sqrt{1-\xi^2}} \int_0^{\infty} a^2(t) dt \quad [5.1]$$

donde: $a^2(t)$ = aceleración del suelo
 g = aceleración de la gravedad
 t = duración del registro de aceleraciones
 ξ = amortiguamiento viscoso

Para $\xi = 0$, $I_A(\xi)$ está dada por:

$$I_A(0) = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} a^2(t) dt \quad [5.2]$$

Por lo que se puede escribir la intensidad de Arias como:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt \quad [5.3]$$

5.2 Subgrupos de registros a partir de la intensidad de Arias

En la tabla 5.1 se indica la intensidad de Arias y la duración de cada uno de los registros agrupados por zonas sísmicas.

²⁰ J. Joannon, A. Arias y R. Saragoni. *Evolución temporal del contenido de frecuencias de terremotos*. Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Obras Civiles Sección Estructuras, 1975. p. 6-10.

²¹ Arturo Arias Suárez. "A measure of earthquake intensity" en *Seismic Design for Nuclear Power Plant*. USA, MIT Press, 1969. p.438-456.

Tabla 5.1 Valores máximos de duración y de intensidad de Arias de cada registro sísmico

	Clave	Duración (s)	L. Arias (cm ² /s ³)	
Zona I	01i	26.02	306.0296	
	02i	83.31	3752.2360	
	04i	55.06	1110.1230	
	05i	79.97	998.6651	
	06i	59.21	693.0549	
	07i	64.90	376.9370	
	08i	56.45	566.2466	
	09i	70.55	4337.2160	
	10i	72.50	4585.4520	
	11i	62.39	3976.6810	
	12i	84.03	3090.6220	
	13i	28.79	572.6259	
	14i	31.81	480.2141	
	15i	99.52	619.7040	
	17i	54.00	697.7833	
	18i	50.18	604.7137	
	Zona II	03ii	73.64	708.3434
		05ii	62.85	6688.4690
07ii		56.60	1800.5460	
08ii		75.15	879.4063	
10ii		53.97	1282.6650	
11ii		48.39	5489.2130	
12ii		66.35	876.2404	
13ii		57.37	1650.7390	
14ii		49.84	4532.1870	
15ii		49.56	1517.0930	
17ii		61.50	2884.6750	
18ii		138.28	1629.2570	
19ii		99.77	756.5773	
20ii		85.90	1171.0630	
Zona III a		01a	75.68	4957.3390
		02a	55.91	9375.5140
		03a	82.31	3480.8690
		04a	65.32	6054.5670
	05a	81.66	4848.8860	
	06a	78.59	4991.1890	
	11a	73.86	5861.7090	
	12a	84.51	4412.9170	
	14a	100.28	1691.6830	
	16a	74.41	1563.1030	
	17a	62.76	1728.1210	
	18a	74.92	2520.0540	
	Zona I	20i	58.32	749.8206
		21i	51.65	731.2034
		22i	70.62	443.2026
		23i	73.05	428.4874
		24i	55.05	14.6199
		25i	71.64	451.4604
26i		90.62	612.6154	
27i		57.68	437.5665	
28i		112.26	397.1034	
29i		92.41	467.6063	
30i		70.12	749.9629	
31i		103.49	637.8370	
32i		89.68	458.2669	
33i		87.76	466.3916	
34i		98.34	848.2343	
Zona II		22ii	78.19	2529.2960
		24ii	68.83	887.2312
		26ii	90.54	2642.3950
	27ii	56.82	1994.8930	
	29ii	68.35	1336.6470	
	30ii	72.99	780.4404	
	31ii	97.34	439.8643	
	32ii	71.53	419.3102	
	33ii	75.88	1440.0580	
	34ii	80.94	954.0114	
	35ii	97.20	816.9275	
	36ii	83.21	395.8418	
	38ii	71.92	398.7173	

07a	69.35	5558.7890
08a	55.77	6731.0880
09a	95.49	6342.8050
10a	74.72	6496.2410

19a	82.36	1866.9200
20a	70.12	3607.6530
21a	76.83	1540.7500

Zona III b

04b	54.29	165886.0000
06b	58.10	13141.0400
07b	58.24	11716.4100
08b	73.89	10922.2200
09b	82.78	18271.3500
10b	89.70	9425.3890
11b	79.74	23188.8100
12b	77.01	15080.3200
13b	75.87	10687.3500
15b	79.46	20967.0000
16b	86.04	7798.6720
17b	80.25	8579.2810
18b	90.94	17780.5100
19b	84.53	9524.9790
20b	64.71	6277.8350
21b	88.97	15804.6700
22b	90.81	6601.4030
23b	130.00	5778.9130
25b	112.78	5379.3770
26b	110.17	5266.8120
27b	100.90	16094.9100
28b	93.67	6983.1010
29b	119.04	9500.0490
30b	81.69	4203.4540
31b	104.39	8839.4500
32b	123.81	10755.4400
33b	122.93	16791.0800
34b	128.84	2565.6160
37b	155.60	5375.0430
38b	132.01	11608.1400
39b	127.33	6092.9420
40b	100.11	4084.1320
42b	139.02	1983.6260

43b	163.86	2085.7400
44b	141.26	2958.8910
45b	116.79	2467.2550
46b	132.80	8950.2790
47b	145.81	1568.8920
48b	148.93	1575.7620
50b	174.05	8585.4650
51b	143.93	2946.3810
52b	155.91	4649.7530
53b	134.38	1158.2970
54b	212.07	1961.6670
55b	195.27	2872.6650
56b	165.85	3520.1700
57b	105.32	2069.0270
58b	98.43	3673.1740
59b	107.16	2796.8830
60b	117.81	2254.6460
61b	105.38	2175.1140
62b	104.24	4690.4350
63b	97.20	1792.6010
64b	120.95	3154.7230
65b	70.41	1746.7590
66b	112.08	3670.7570
67b	121.34	4134.5370
68b	117.43	3904.1210
69b	130.42	4285.7330
70b	113.34	2286.0950
71b	120.70	4122.0600
72b	125.14	2506.4880
73b	100.79	1833.3930
74b	105.68	1219.5480
76b	125.55	4331.2320

Zona III c

04c	131.93	66307.3000
05c	102.05	6531.9590
06c	118.83	10898.0700
07c	92.56	5948.8520
10c	112.92	8635.4790
11c	94.47	28230.4300
12c	101.56	13575.6100

33c	150.76	3408.2530
34c	335.89	16710.6100
35c	335.21	9819.5500
36c	336.77	12884.9300
37c	182.93	7018.9220
38c	124.38	2346.5720
39c	389.93	5220.3900

13c	115.13	13303.7200
16c	69.57	7041.8620
17c	82.92	11670.9200
18c	93.14	9233.8290
19c	110.59	10434.2700
20c	108.80	23916.3300
21c	102.94	13236.6000
22c	82.86	19645.9400
24c	129.04	7597.7250
25c	197.98	7855.6510
26c	128.12	9561.0060
28c	120.44	5339.8700
29c	133.42	6802.8700
30c	76.68	18506.5100

40c	411.29	3841.3090
41c	244.97	1825.7660
42c	374.61	12664.1600
43c	158.44	4968.4360
44c	201.73	1647.8900
45c	99.41	3830.7280
46c	267.23	11001.0700
47c	241.63	10753.8300
48c	229.87	11887.2900
51c	238.81	5932.7870
52c	159.89	2749.0550
53c	260.11	17336.1100
54c	114.52	11445.4800
55c	107.44	7832.6750

Zona III d

01d	72.71	80926.2700
02d	118.93	1864.6640
03d	205.63	5020.4160
04d	135.56	4788.5950
05d	98.78	4223.4700
06d	146.96	7723.4220
07d	107.16	8100.1130
09d	176.35	10408.0300
10d	147.89	7753.0770
11d	72.22	19343.1700
13d	214.05	11572.9900
14d	176.25	5901.4580
15d	207.57	6023.6720
16d	202.37	5100.2440
17d	172.75	4859.4540
18d	174.21	5327.0040
21d	286.77	10178.8900
22d	173.35	14799.0500
23d	118.63	23869.9500
24d	211.91	5467.8350
25d	158.07	10061.2600

26d	155.63	3696.0260
27d	240.35	4826.2500
28d	344.07	6866.2700
29d	192.09	2290.8450
30d	218.85	5335.8210
31d	248.85	3915.7990
32d	186.95	4253.7760
33d	410.65	6363.9190
34d	196.03	5763.7200
35d	182.13	3035.0000
36d	248.31	2926.6920
37d	259.87	3873.5990
39d	144.01	5760.4060
40d	128.17	7076.1980
41d	121.24	2489.2730
42d	93.42	12121.8900
43d	152.45	2667.5260
44d	224.35	5728.7430
45d	95.56	5980.1260
46d	111.92	8815.5060
50d	160.54	5607.8200

Enseguida se forman los subgrupos de acelerogramas para distintos intervalos de intensidad de Arias asociados a cada zona. Dichos intervalos son iguales para todas las zonas. Sin embargo hay algunos subgrupos que carecen de registros. Estos intervalos de intensidad Arias se forman buscando que cada subgrupo contenga curvas de intensidad de Arias similares. En este estudio se definieron los siguientes cinco intervalos de intensidad de Arias, tabla 5.2:

Tabla 5.2 Subgrupos de intensidad de Arias

Subgrupo	Intervalo de intensidad (cm ² /s ³)
1	de 300 a 1000
2	de 1000 a 3000
3	de 3000 a 11000
4	de 11000 a 50000
5	mayores que 50000

Tabla 5.3 Clasificación de registros sísmicos por subgrupos de intensidad de Arias

Intervalo de intensidad (cm ² /s ³)	Registros acelerográficos							
Zona I (300 - 1000)	01i	07i	15i	21i	25i	29i	32i	
	04i	08i	17i	22i	26i	30i	33i	
	05i	13i	18i	23i	27i	31i	34i	
	06i	14i	20i	24i	28i			
	(3000-11000)	02i	09i	10i	11i	12i		
Zona II (300-1000)	03ii	12ii	24ii	31ii	34ii	36ii		
	08ii	19ii	30ii	32ii	35ii	38ii		
	(1000-3000)	06ii	12ii	16ii	19ii	25ii	28ii	
	09ii	14ii	17ii	21ii	26ii	32ii		
	(3000-11000)	04ii	10ii	13ii				
Zona III a (1000-3000)	16a	17a	18a	19a	21a			
	(3000-11000)	01a	03a	05a	07a	09a	11a	14a
	02a	04a	06a	08a	10a	12a	20a	
Zona III b (1000-3000)	34b	44b	48b	54b	59b	63b	72b	
	42b	45b	51b	55b	60b	65b	73b	
	43b	47b	53b	57b	61b	70b	74b	
	(3000-11000)	08b	19b	26b	32b	50b	64b	71b
	10b	20b	28b	37b	52b	66b	76b	
	13b	22b	29b	39b	56b	67b		
	16b	23b	30b	40b	58b	68b		
	17b	25b	31b	46b	62b	69b		
	(11000-50000)	06b	09b	12b	18b	27b	38b	
	07b	11b	15b	21b	33b			
	(> 50000)	04b						

Zona III c	(1000-3000)	38c	41c	44c	52c			
	(3000-11000)	05c	16c	25c	33c	40c	51c	
		06c	18c	26c	35c	43c	55c	
		07c	19c	28c	37c	45c		
		10c	24c	29c	39c	47c		
	(11000-50000)	11c	17c	22c	36c	48c		
		12c	20c	30c	42c	53c		
		13c	21c	34c	46c	54c		
	(> 50000)	04c						
	Zona III d	(1000-3000)	02d	29d	36d	41d	43d	
		(3000-11000)	03d	09d	17d	26d	32d	39d
			04d	10d	18d	27d	33d	40d
			05d	14d	21d	28d	34d	44d
		06d	15d	24d	30d	35d	45d	
		07d	16d	25d	31d	37d	46d	
(11000-50000)		11d	13d	22d	23d	42d		
(> 50000)		01d						

5.3 Estudio estadístico de las curvas de intensidad

Se determinan valores medios y desviaciones estándar de la duración y de la intensidad de Arias de cada subgrupo.

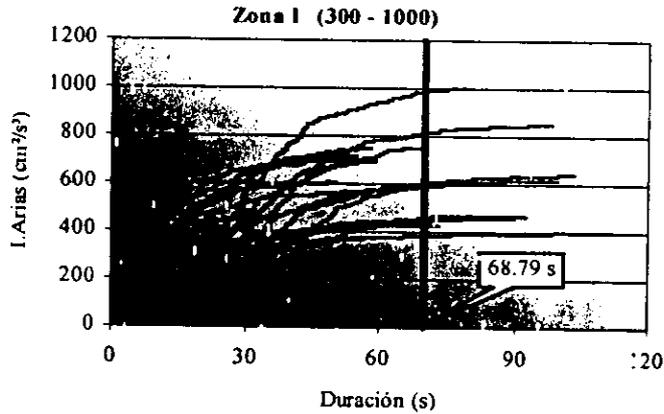
Para realizar lo anterior, se obtiene una curva que represente el valor medio de las intensidades de Arias de cada subgrupo, por lo cual es necesario determinar primeramente el valor medio de la duración de cada subgrupo. Con el valor medio de la duración, se procede a llevar todas las curvas de intensidad de Arias al valor medio de la duración de cada subgrupo. Cada subgrupo tiene un valor medio de duración diferente, ya que las características de duración y de intensidad de cada sismo varían dependiendo de la zona en que se registre.

Cuando el valor de la duración de algunos registros es mayor que el valor medio de la duración del subgrupo, es necesario cortar sus curvas de intensidad de Arias en el punto donde se encuentre el valor medio de la duración. Sin embargo cuando los registros tienen un valor de duración menor a la media del subgrupo, entonces se proyecta su valor máximo de la intensidad de Arias con una pendiente igual a cero hasta el valor medio de la duración,

ver gráficas 5.1 y 5.2. De no hacer esto, no sería posible determinar la curva media de la intensidad de Arias representativa de cada subgrupo.

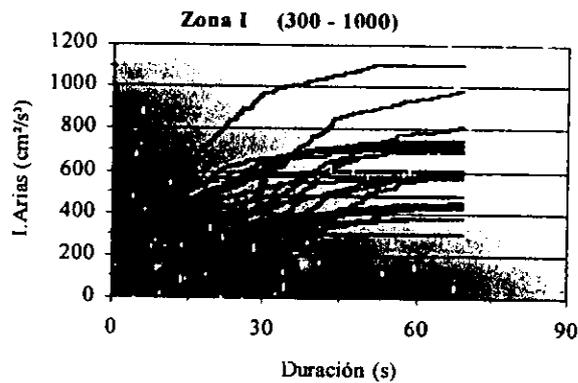
La gráfica 5.1 muestra las curvas de intensidad de Arias completas del primer subgrupo de la Zona I sin ningún corte.

Gráfica 5.1



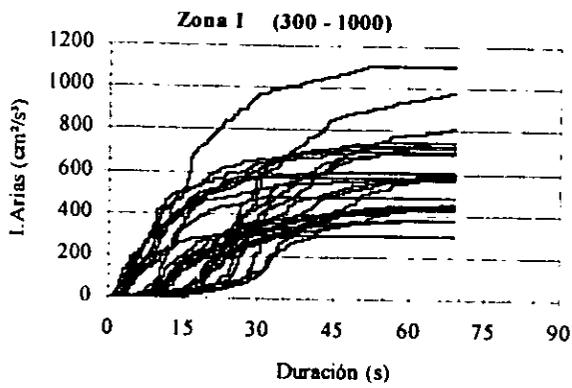
La gráfica 5.2 muestra las curvas de intensidad de Arias llevadas a su valor medio de duración.

Gráfica 5.2

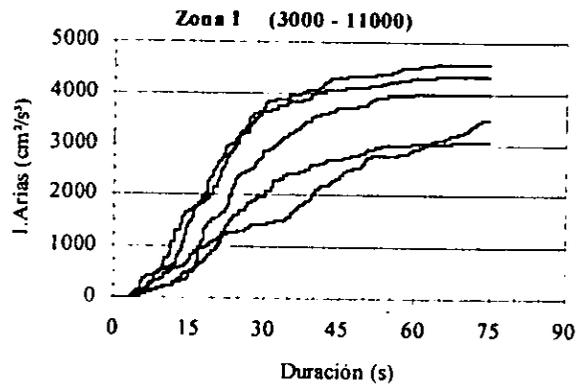


Una vez que se ajustan todas las curvas de intensidad de Arias de cada subgrupo con su respectivo valor medio de duración, gráficas 5.3 a la 5.21, se procede a obtener la media aritmética de todas las curvas de dicho subgrupo, encontrando así la curva de intensidad de Arias representativa de cada subgrupo, gráficas 5.22 a la 5.39. Estas curvas se utilizan posteriormente para determinar las funciones de modulación de la intensidad.

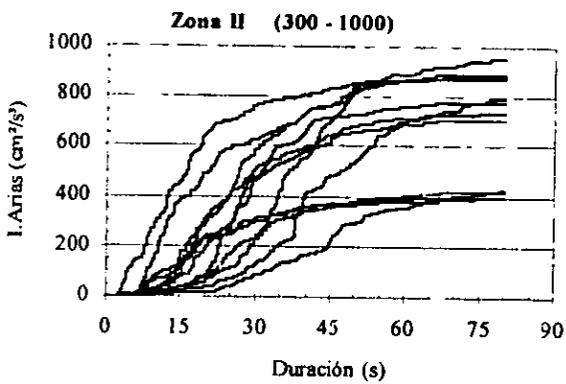
Gráfica 5.3



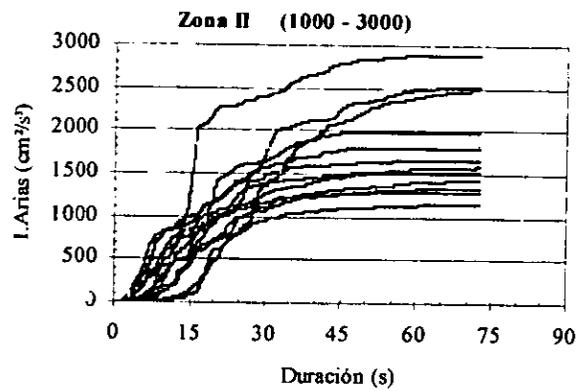
Gráfica 5.4



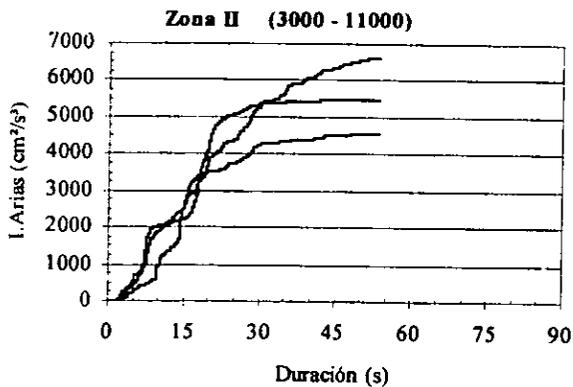
Gráfica 5.5



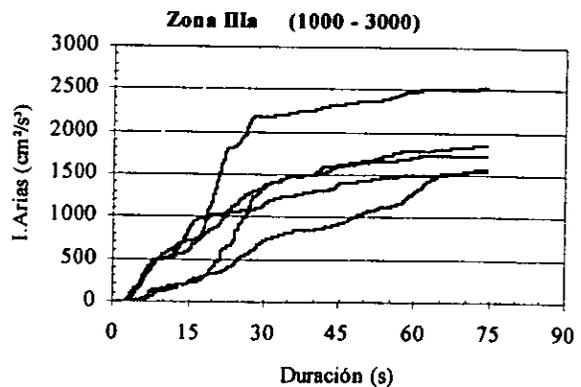
Gráfica 5.6



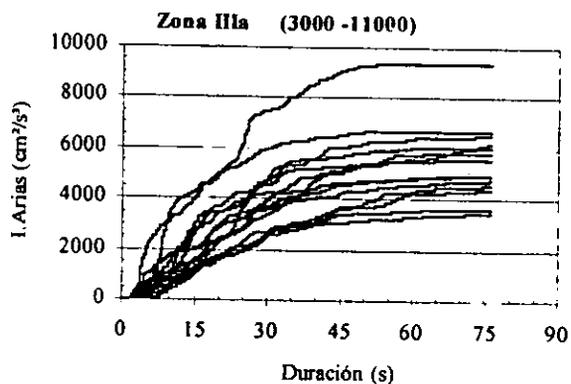
Gráfica 5.7



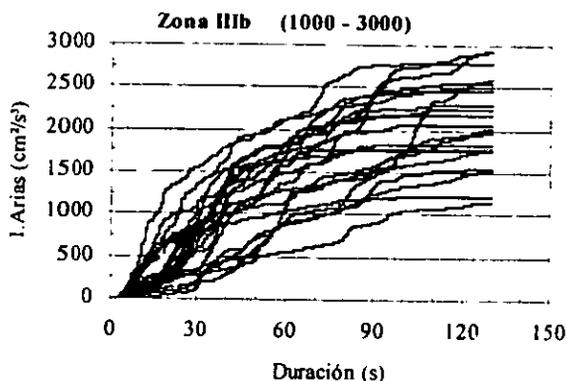
Gráfica 5.8



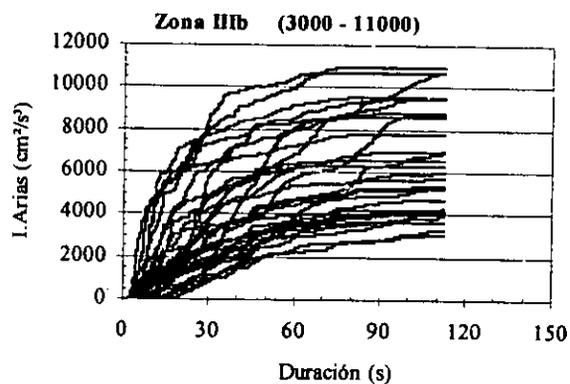
Gráfica 5.9



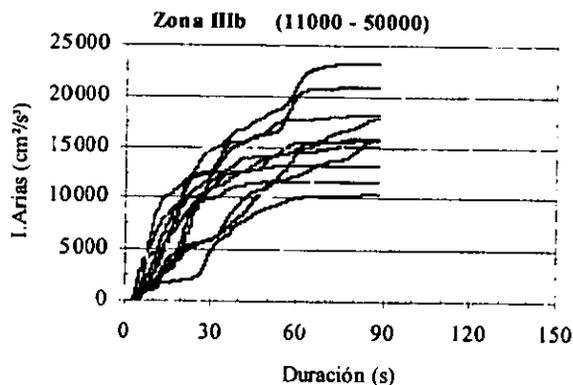
Gráfica 5.10



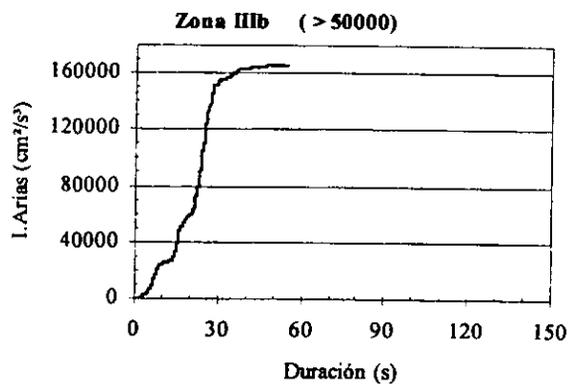
Gráfica 5.11



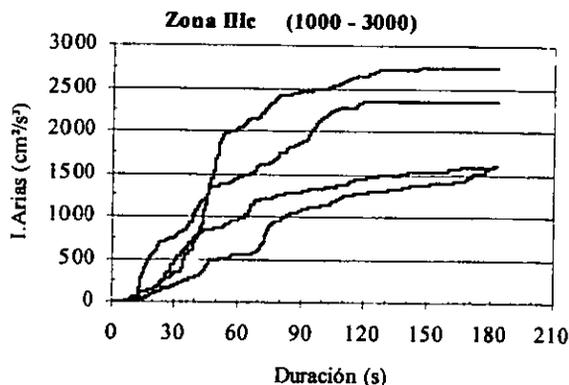
Gráfica 5.12



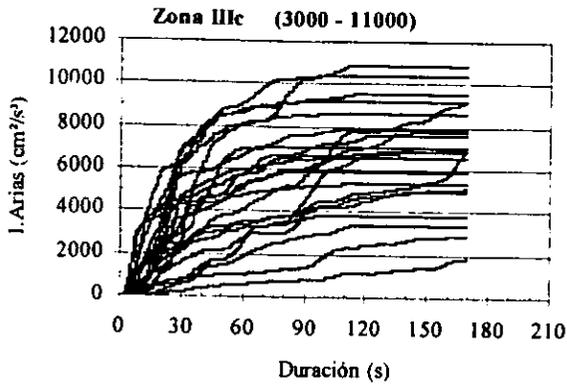
Gráfica 5.13



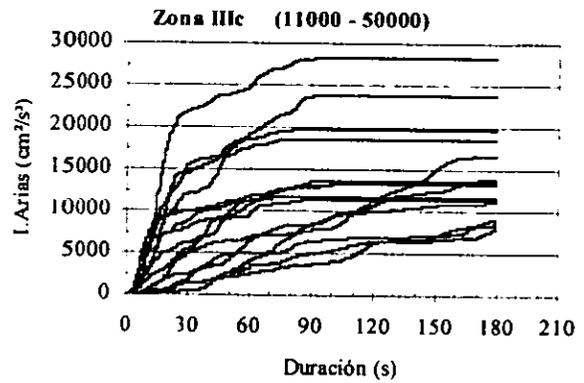
Gráfica 5.14



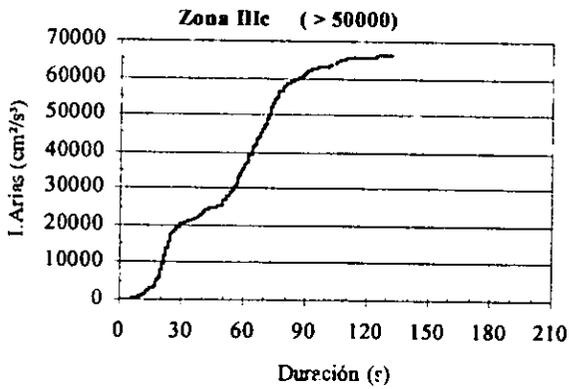
Gráfica 5.15



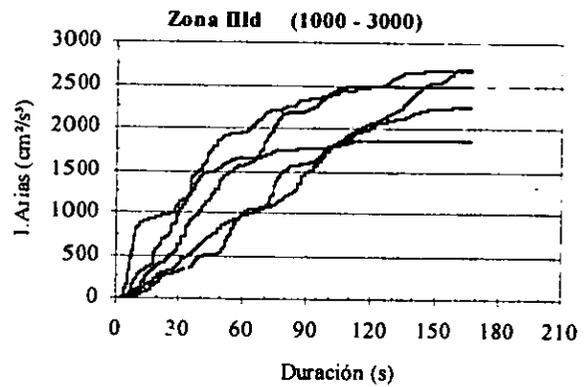
Gráfica 5.16



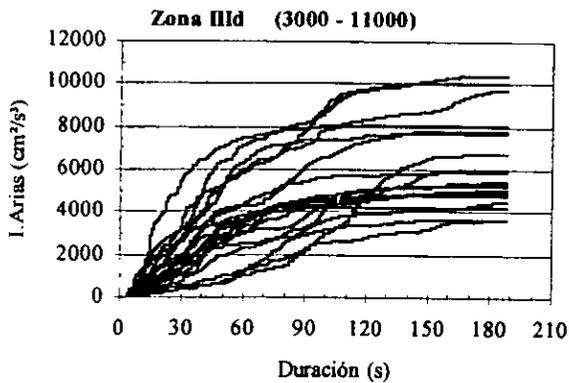
Gráfica 5.17



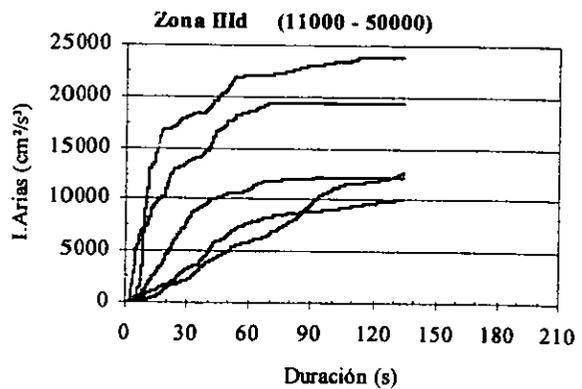
Gráfica 5.18



Gráfica 5.19



Gráfica 5.20



Gráfica 5.21

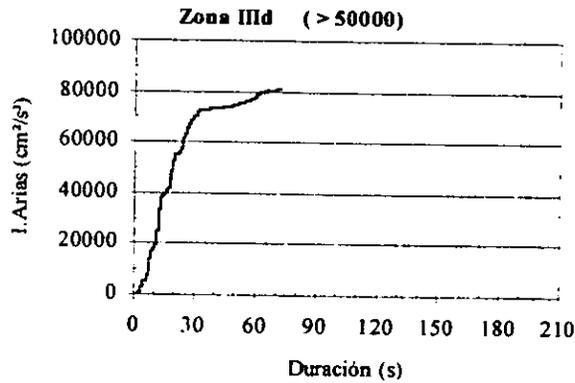
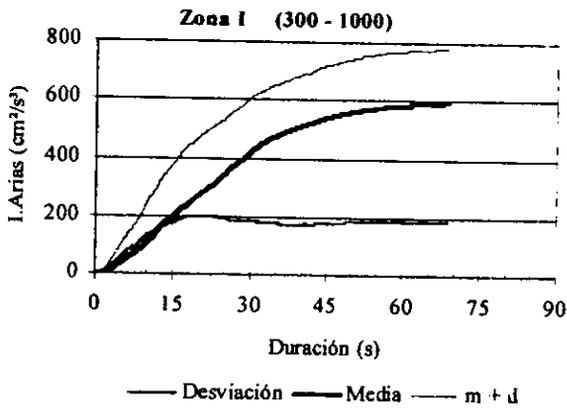


Tabla 5.4 Valores medios de duración e intensidad de Arias de cada subgrupo

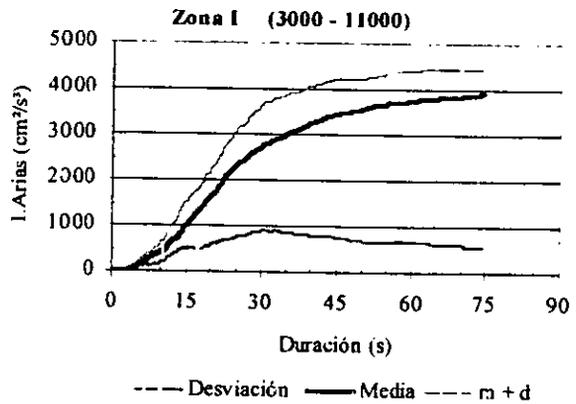
	Intervalo I.Arias (cm ² /s ²)	Promedio de Duración máx. (s)	Promedio de I.Arias máx. (cm ² /s ²)	Número de muestras
Zona I	300 - 1000	68.79	600.79	26
	3000 - 11000	74.56	3948.44	5
Zona II	300 - 1000	79.91	692.74	12
	1000 - 3000	72.75	1823.28	12
	3000 - 11000	53.69	5569.96	3
Zona IIIa	1000 - 3000	74.26	1843.79	5
	3000 - 11000	75.97	5529.37	14
Zona IIIb	1000 - 3000	129.45	2134.54	21
	3000 - 11000	112	6367.13	32
	11000 - 50000	88.28	16404.02	11
	> 50000	54.29	165886	1
Zona IIIc	1000 - 3000	182.74	2142.32	4
	3000 - 11000	169.3	7204.92	22
	11000 - 50000	178.96	15734.38	15
	> 50000	131.93	66307.3	1
Zona III d	1000 - 3000	166.6	2447.8	5
	3000 - 11000	187.62	5897.92	31
	11000 - 50000	134.33	16341.41	5
	> 50000	72.71	80926.27	1

En las gráficas 5.22 a la 5.40 se muestran las curvas de valor medio de intensidad de Arias de cada subgrupo, también se muestra su desviación estándar y la media (m) más una desviación estándar (d).

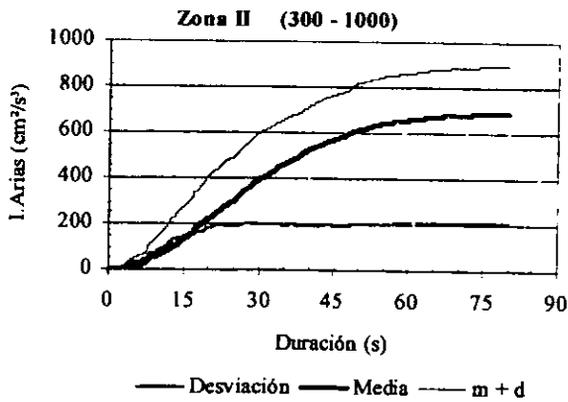
Gráfica 5.22



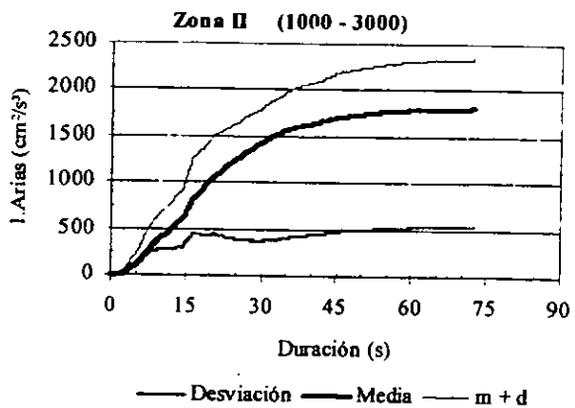
Gráfica 5.23



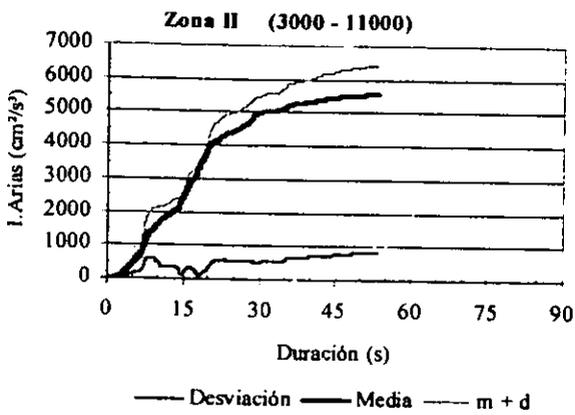
Gráfica 5.24



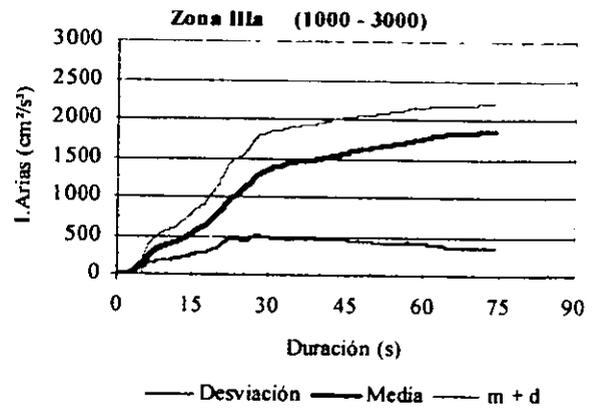
Gráfica 5.25



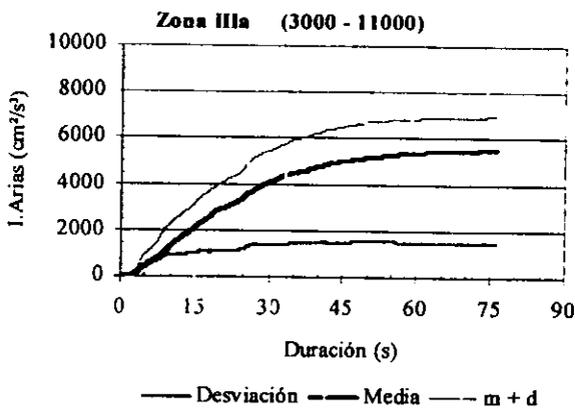
Gráfica 5.26



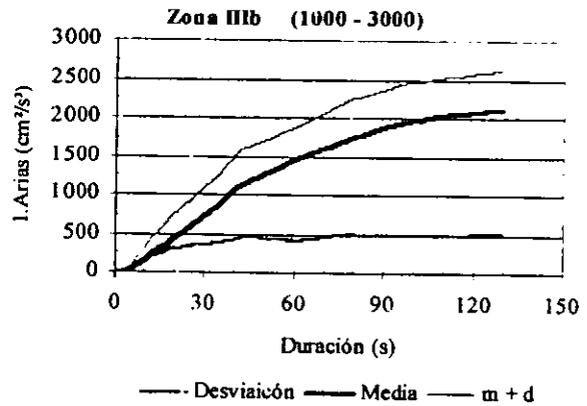
Gráfica 5.27



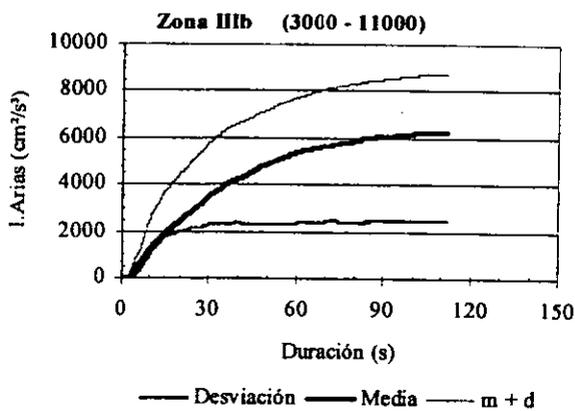
Gráfica 5.28



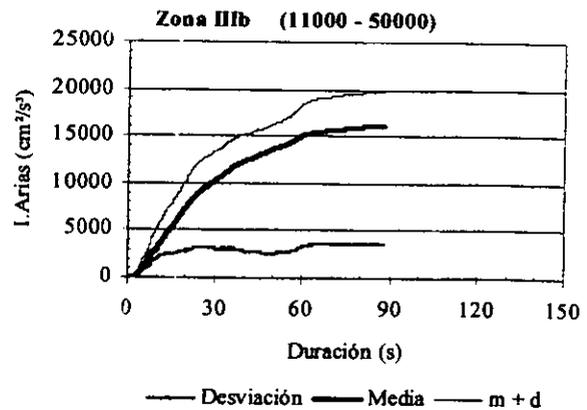
Gráfica 5.29



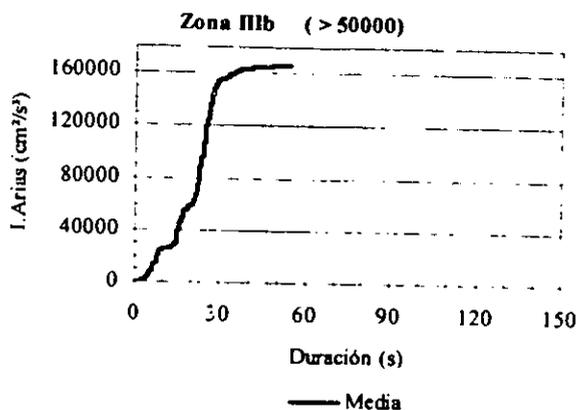
Gráfica 5.30



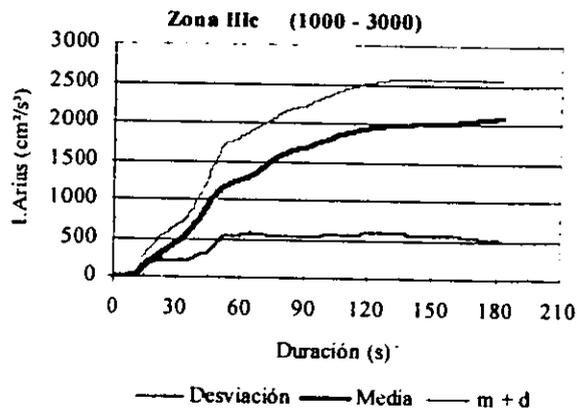
Gráfica 5.31



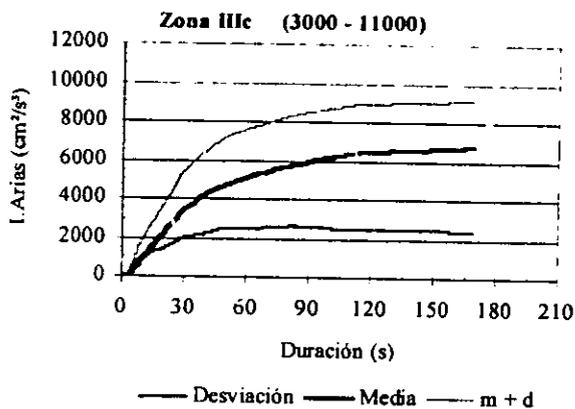
Gráfica 5.32



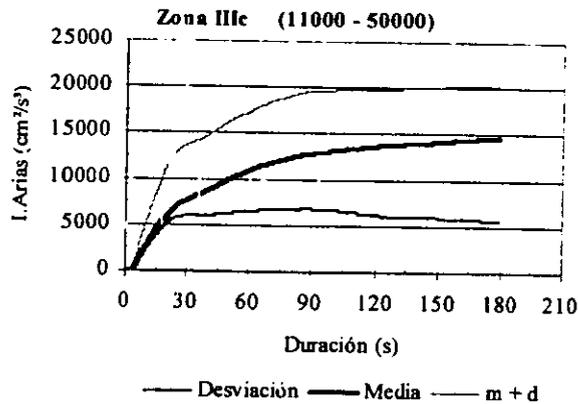
Gráfica 5.33



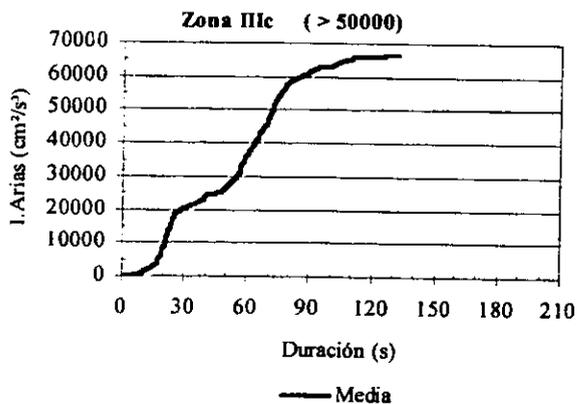
Gráfica 5.34



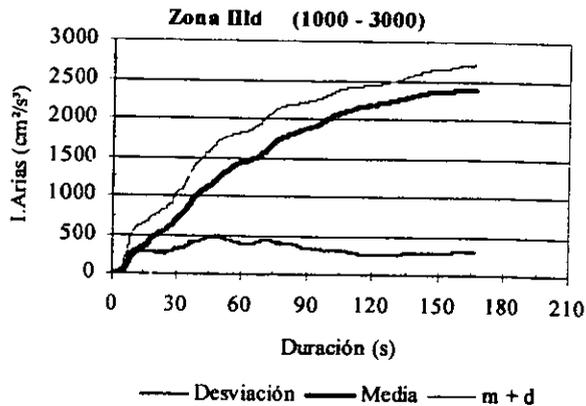
Gráfica 5.35



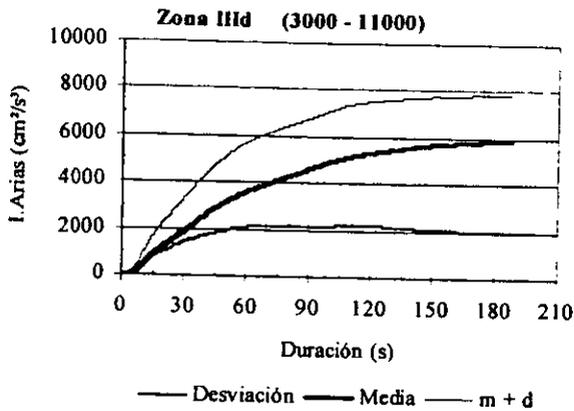
Gráfica 5.36



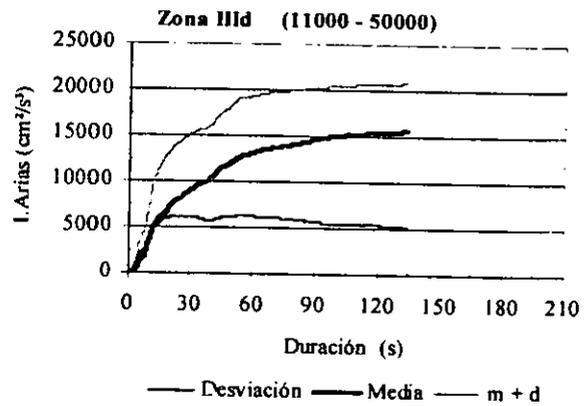
Gráfica 5.37



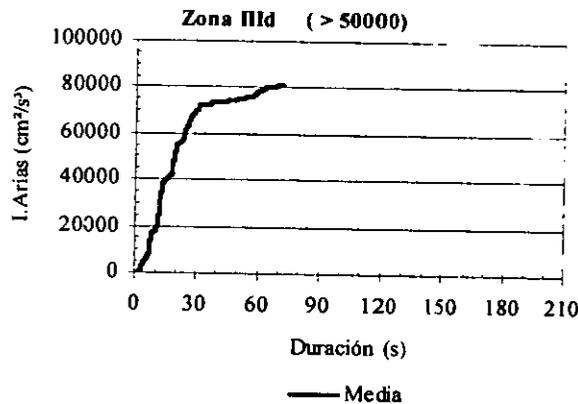
Gráfica 5.38



Gráfica 5.39



Gráfica 5.40



5.4 Función moduladora de la intensidad

La función moduladora²² $c^2(t)$ representa el valor esperado de la intensidad y es igual a la varianza σ^2 de un registro. Donde la varianza es igual a la esperanza del cuadrado de la variable menos el cuadrado de la esperanza de la misma variable.²³ Pero en el caso de acelerogramas el valor del cuadrado de la esperanza es igual a cero, por lo que la varianza es igual a la esperanza de la aceleración cuadrática:

²² Francisco Leonel Silva. *Calibración del método de linealización equivalente estocástica para sistemas histeréticos simples*. Tesis de Maestría en Ingeniería (Estructuras) UNAM. México, 1998. p. 40-52, 59-72.

²³ Robert Winkler. *Statistics: Probability, Inference and Decision*. 2a. Ed. USA, HRW, 1975. p. 159-160.

$$\sigma^2 = E(a^2(t)) - [E(a(t))]^2 = E(a^2(t)) \quad [5.4]$$

Enseguida, se procede a ajustar una función a la curva de valor medio de la intensidad de Arias de cada subgrupo, obteniendo un valor de $\int c^2(t)dt$.

En lo que sigue se ajusta la ecuación [5.5] a las curvas de valor medio de intensidad de Arias de los subgrupos mostrados en la tabla 5.5.

$$\int c^2(t)dt = \frac{ab + ct^d}{b + t^d} \quad [5.5]$$

donde:

$c^2(t)$ = función moduladora de la intensidad de Arias

t = tiempo

a, b, c y d = constantes o parámetros

Este modelo lleva el nombre de MMF Model.²⁴

Tabla 5.5

Zona	Subgrupos I.Arias (cm ² /s ³)
Zona I	300 - 1000
	3000 - 11000
Zona II	300 - 1000
	1000 - 3000
	3000 - 11000
Zona III a	1000 - 3000
	3000 - 11000
Zona III b	1000 - 3000
	3000 - 11000
	11000 - 50000
Zona III c	1000 - 3000
	3000 - 11000
	11000 - 50000
Zona III d	1000 - 3000
	3000 - 11000
	11000 - 50000

²⁴ Se utilizó el programa de cómputo *Curve Expert 1.3*, Copyright 1995-1997 by Daniel Hyams.

Para obtener el valor de la función moduladora $c^2(t)$ se deriva la función ajustada, dando lugar a:

$$c^2(t) = \frac{(c-a)bd t^{d-1}}{(b+t^d)^2} \quad [5.6]$$

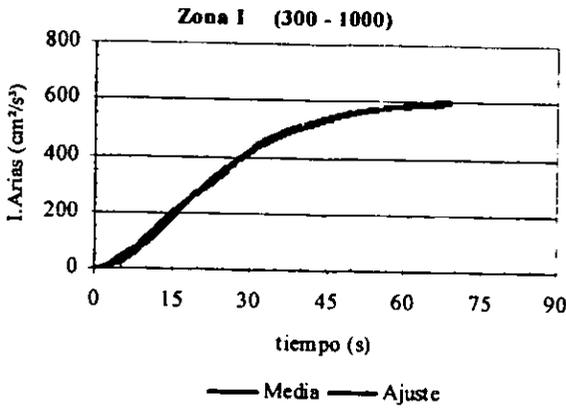
Se muestran en la tabla 5.6 los parámetros a, b, c y d correspondientes a las ecuaciones [5.5] y [5.6] de los subgrupos indicados en la tabla 5.5.

Tabla 5.6 Parámetros de la ecuación [5.5] y [5.6]

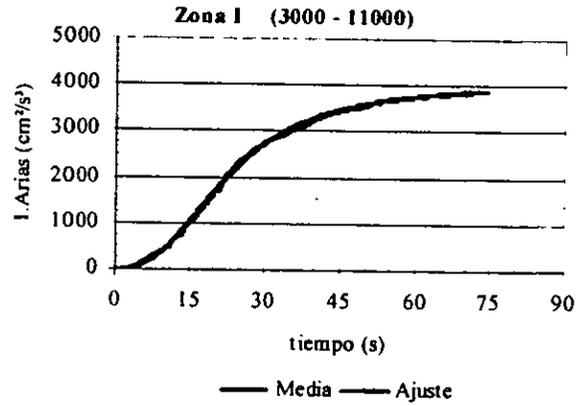
Intervalo LArias (cm ² /s ³)		Parámetros			
		a	b	c	d
Zona I	(300-1000)	0.00001	928.5778	663.45	2.158
	(3000-11000)	0.00001	3287.0491	4080	2.5832
Zona II	(300-1000)	0.00001	4800	750	2.5197
	(1000-3000)	0.00001	1141.8097	1901.1975	2.3901
	(3000-11000)	0.00001	1000	5891.241	2.5051
Zona III a	(1000-3000)	0.00001	820	1978.217	2.1585
	(3000-11000)	0.00001	350	6020	1.9389
Zona III b	(1000-3000)	0.00001	789.5394	2580.7825	1.694
	(3000-11000)	0.00001	170	7300	1.5
	(11000-50000)	0.00001	135	19000	1.5
Zona III c	(1000-3000)	0.00001	10370.014	2182.0293	2.3325
	(3000-11000)	0.00001	177.1492	7396.9408	1.4745
	(11000-50000)	0.00001	60	16842.99	1.15998
Zona III d	(1000-3000)	0.00001	549.3885	3016.1457	1.5126
	(3000-11000)	0.00001	421.9834	7030.8281	1.4923
	(11000-50000)	0.00001	57.985	18013.116	1.2322

En las gráficas 5.41 a la 5.59 se muestran las curvas ajustadas a las curvas de valor medio de intensidad de Arias de cada subgrupo.

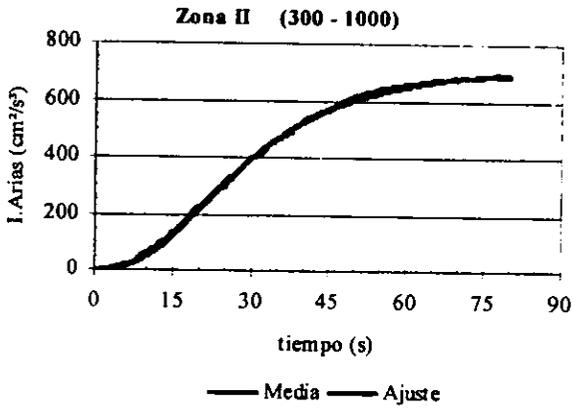
Gráfica 5.41



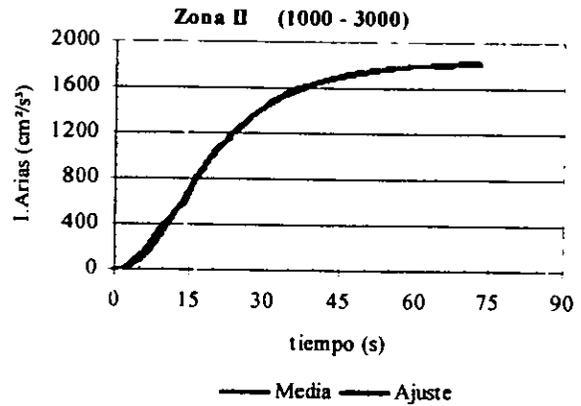
Gráfica 5.42



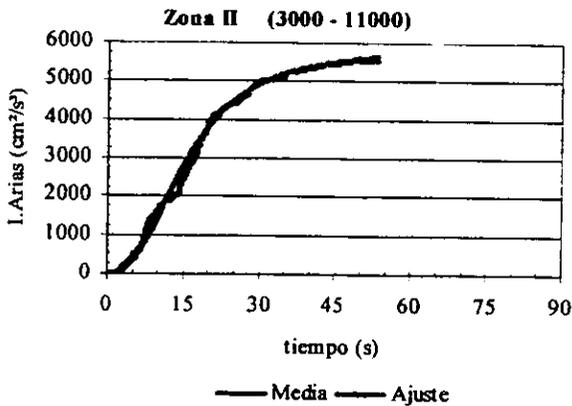
Gráfica 5.43



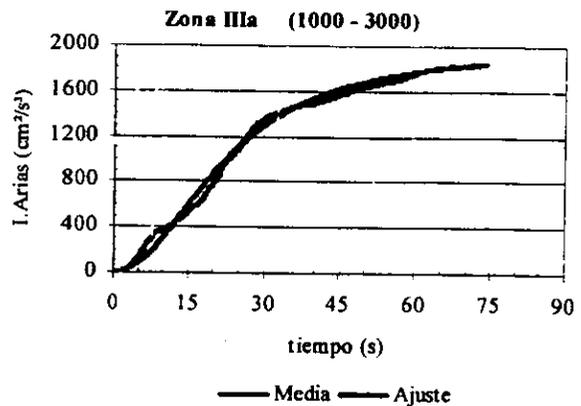
Gráfica 5.44



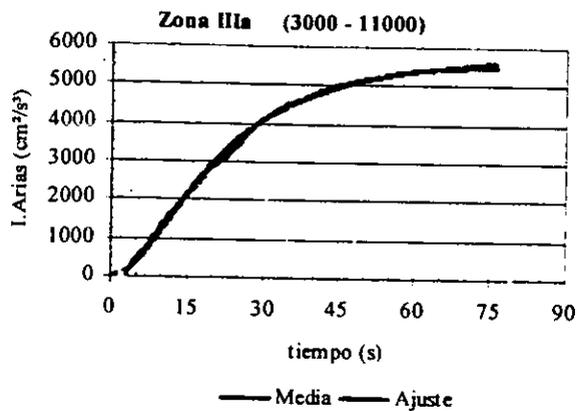
Gráfica 5.45



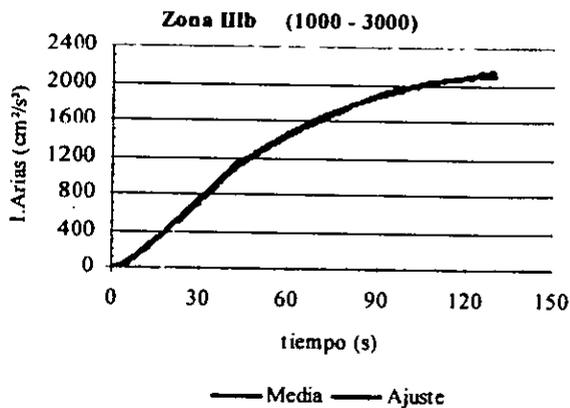
Gráfica 5.46



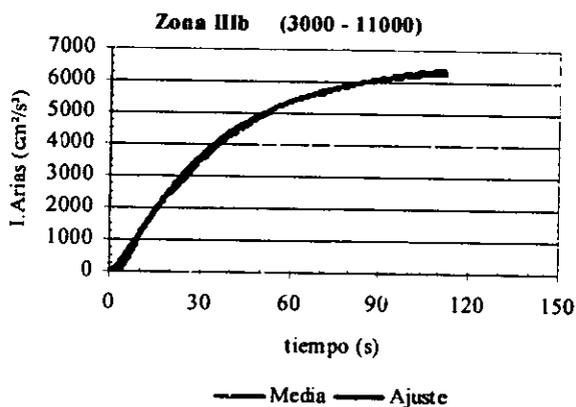
Gráfica 5.47



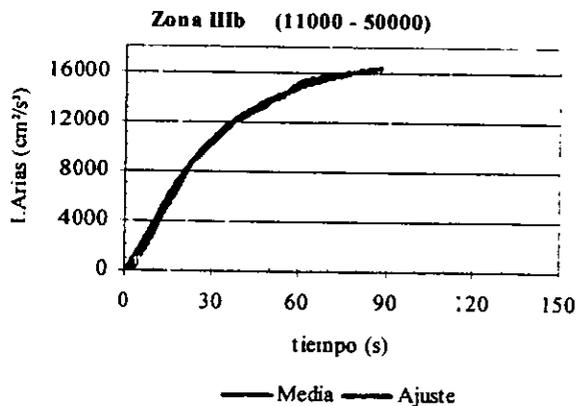
Gráfica 5.48



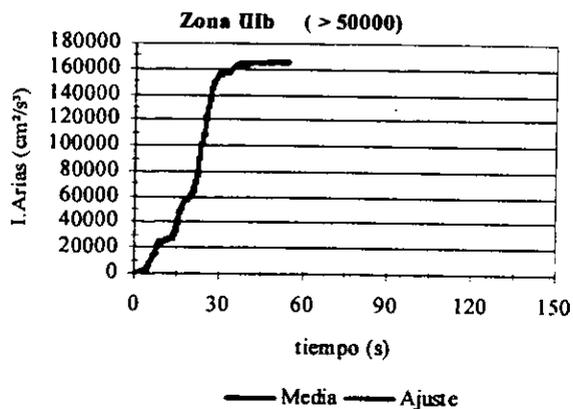
Gráfica 5.49



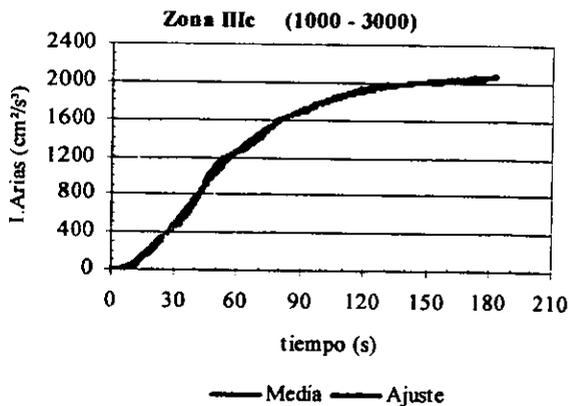
Gráfica 5.50



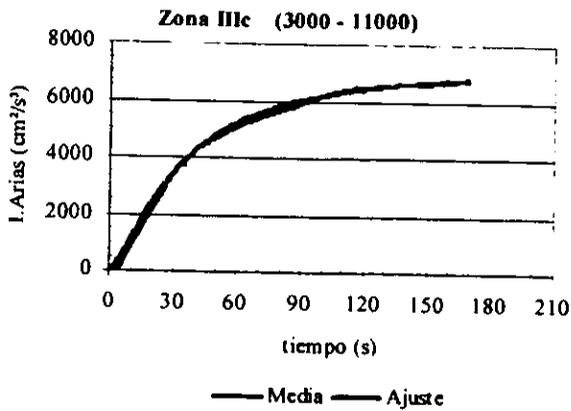
Gráfica 5.51



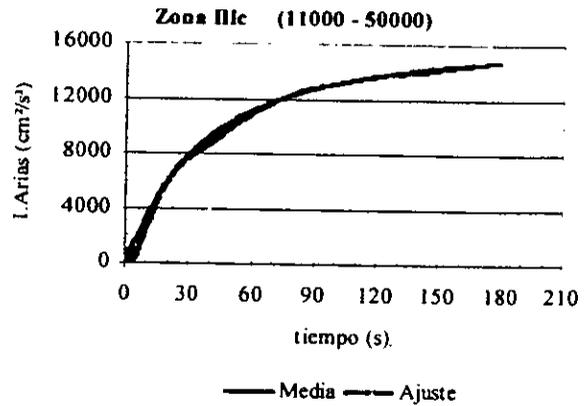
Gráfica 5.52



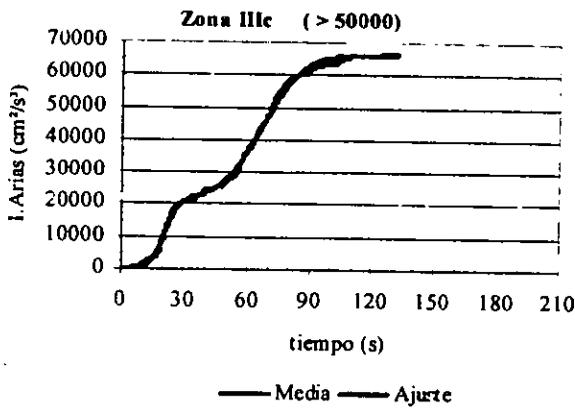
Gráfica 5.53



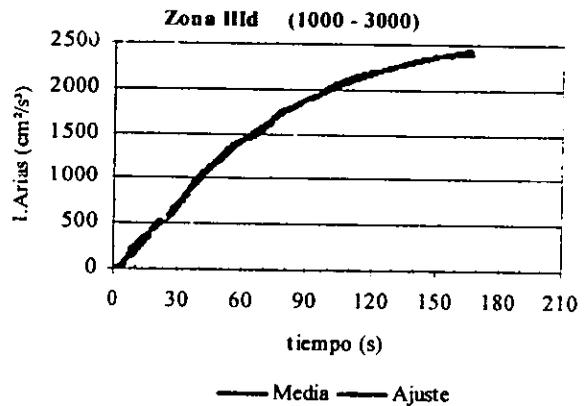
Gráfica 5.54



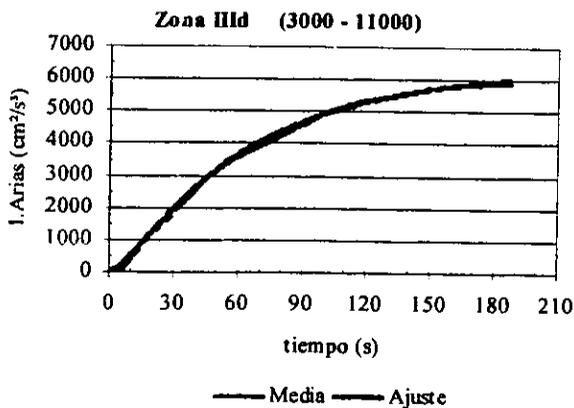
Gráfica 5.55



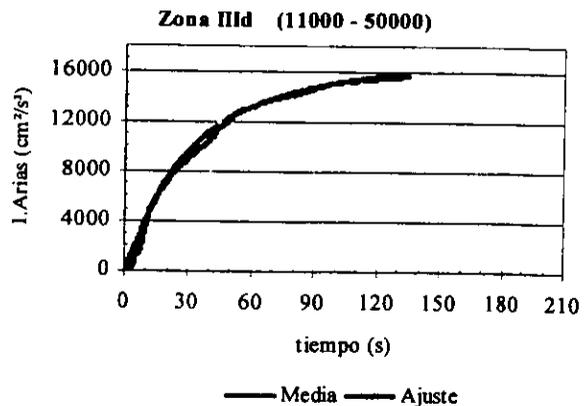
Gráfica 5.56



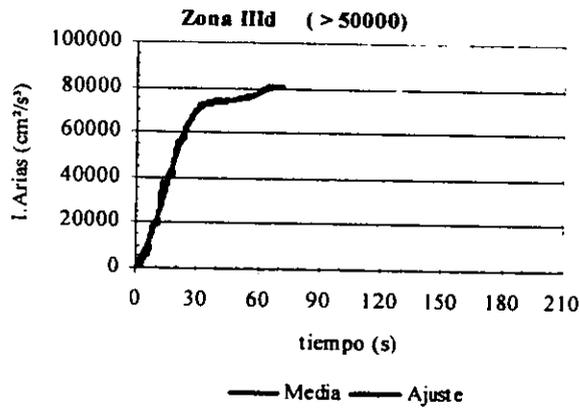
Gráfica 5.57



Gráfica 5.58



Gráfica 5.59

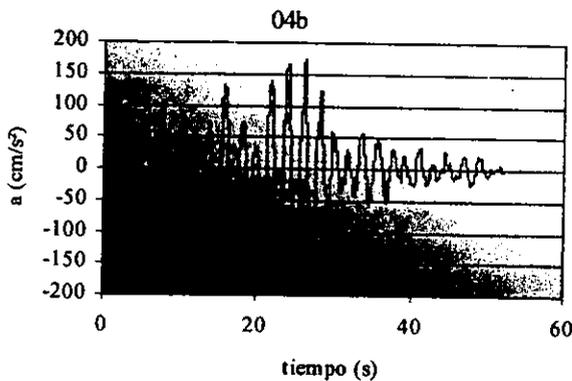


Casos especiales

Existen tres subgrupos que contienen un sólo registro por lo que el valor medio de intensidad de Arias de cada subgrupo es igual su curva de intensidad de Arias. Estos registros corresponden al evento del 19 de septiembre de 1985.

En estos casos se elevan al cuadrado directamente los valores de aceleración del acelerograma de cada registro y se procede a ajustar una función al valor de a^2 de cada registro, gráficas 5.60 y 5.61.

Gráfica 5.60



Gráfica 5.61

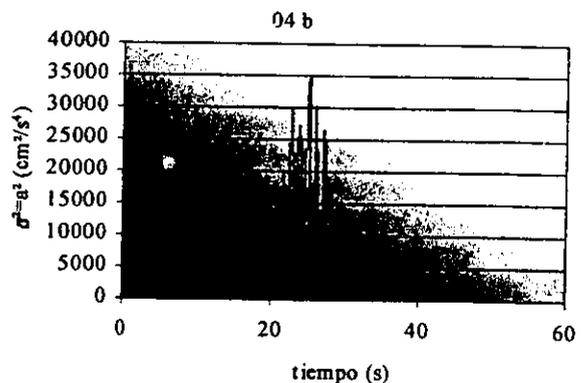


Tabla 5.7 Subgrupos que tienen sólo un registro

Zona	Subgrupos I.Arias (cm ² /s ³)
Zona III b	> 50000
Zona III c	> 50000
Zona III d	> 50000

Dado que estas curvas tienen formas muy variadas es necesario ajustarles funciones especiales. En este caso se utiliza una superposición de n funciones gaussianas truncadas.²⁵

$$c^2(t) = \sum_{i=1}^n \alpha \exp\left(\frac{(t-t_i)^2}{-\beta}\right) \quad 0 < t \leq t_0 \quad [5.7]$$

La ecuación [5.8] muestra la función ajustada a la curva de α^2 del subgrupo de la Zona IIIb (> 50000).

$$c^2(t) = b1 \left\{ b2 \exp\left[\frac{(t-A)^2}{-b6}\right] + b3 \exp\left[\frac{(t-B)^2}{-b7}\right] + b4 \exp\left[\frac{(t-C)^2}{-b8}\right] + b5 \exp\left[\frac{(t-D)^2}{-b9}\right] \right\} \quad [5.8]$$

La ecuación [5.9] indica la función ajustada a la curva de α^2 del subgrupo de la Zona IIIc y de la Zona III d indicados en la tabla 5.7.

$$c^2(t) = b1 \left\{ b2 \exp\left[\frac{(t-A)^2}{-b4}\right] + b3 \exp\left[\frac{(t-B)^2}{-b5}\right] \right\} \quad [5.9]$$

En la tabla 5.8 se muestran los parámetros de las ecuaciones [5.8] y [5.9].

²⁵ Grigoriu, Ruiz y Rosenblueth. "Nonstationary models of seismic ground acceleration". en *Earthquake Spectra*, vol. 4, No. 3, pp 551-568, 1988.

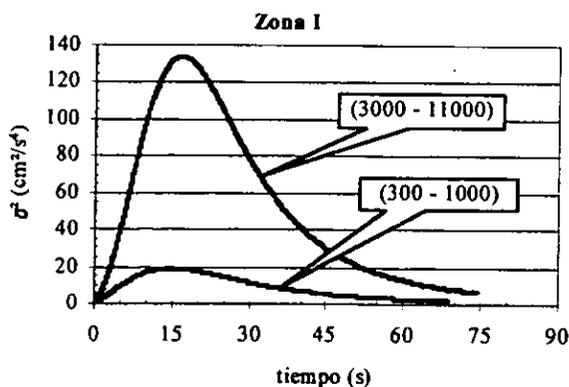
Tabla 5.8 Parámetros de la ecuación [5.8] y [5.9]

Intervalo I.Arias (cm ² /s ³)	Parámetros		Parámetros		Parámetros	
Zona III b (> 50000)	b1	160090.779	b6	3.7644	A	35.3
	b2	0.0138	b7	15.3641	B	24.35
	b3	0.0924	b8	4.341726	C	15
	b4	0.05061	b9	6.74024	D	6.66
	b5	0.03358				
Zona III c (> 50000)	b1	51	b4	54.58102	A	21
	b2	31.74203	b5	480.1493	B	67
	b3	22.57786				
Zona III d (> 50000)	b1	78.5	b4	197.7074	A	14.5
	b2	41.14997	b5	43.29099	B	60
	b3	6.348578				

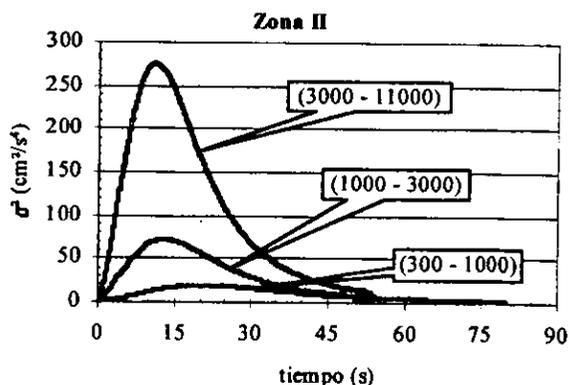
Anteriormente, en las gráficas 5.51, 5.55 y 5.59 se mostraron las curvas ajustadas a la curva de valor medio de sus respectivos subgrupos. Estas curvas ajustadas se obtuvieron integrando numéricamente las ecuaciones [5.8] y [5.9] (según sea el caso).

Las gráficas 5.62 a la 5.70 muestran las funciones de modulación de intensidad ($c^2 = \sigma^2$) de cada subgrupo agrupadas por zonas, lo que hace más accesible observar las diferencias entre las funciones de modulación de cada zona.

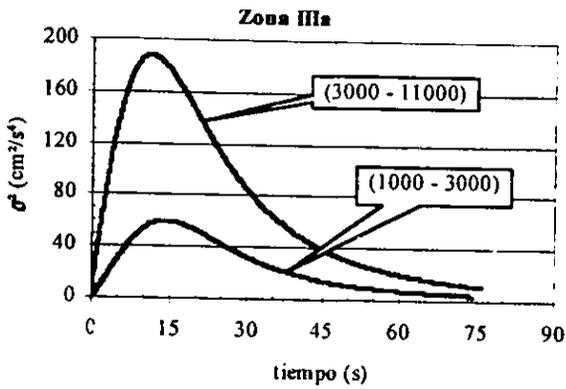
Gráfica 5.62



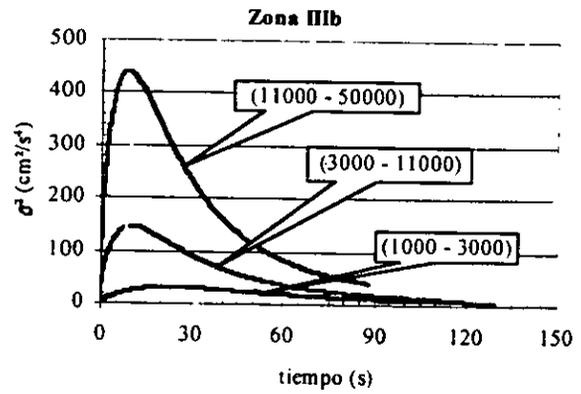
Gráfica 5.63



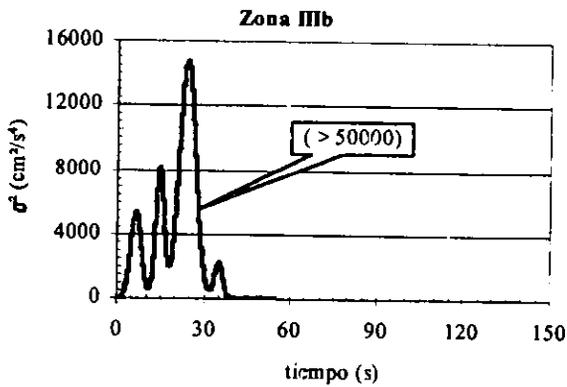
Gráfica 5.64



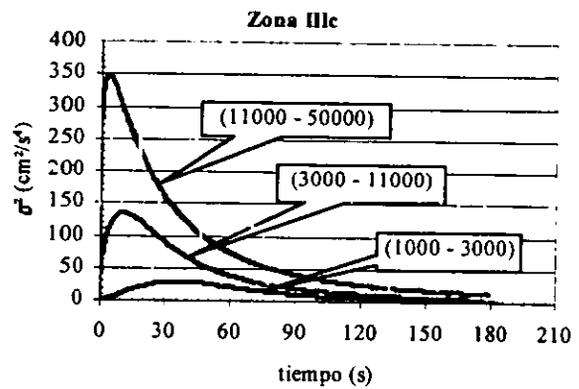
Gráfica 5.65



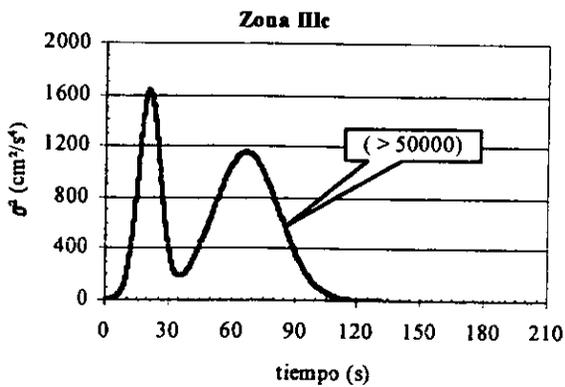
Gráfica 5.66



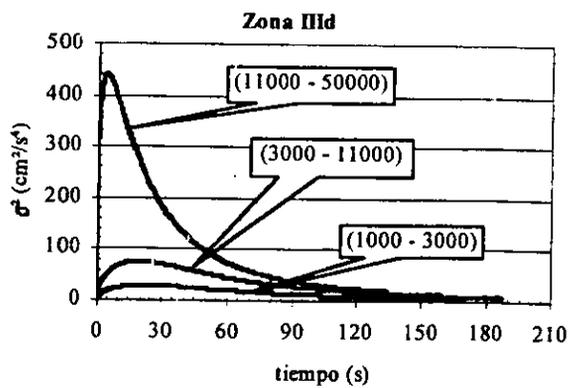
Gráfica 5.67



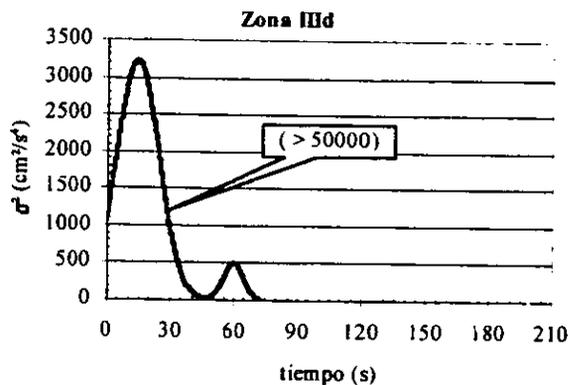
Gráfica 5.68



Gráfica 5.69

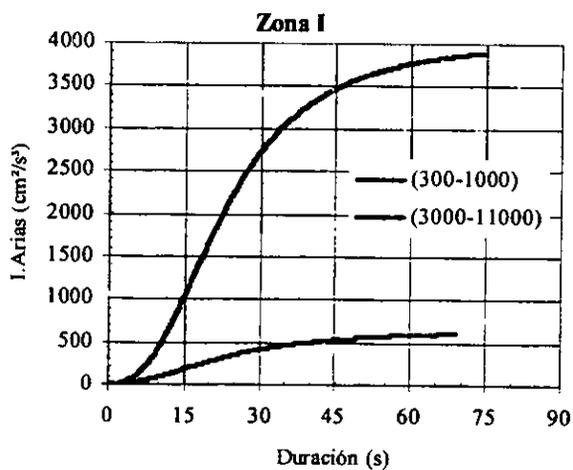


Gráfica 5.70

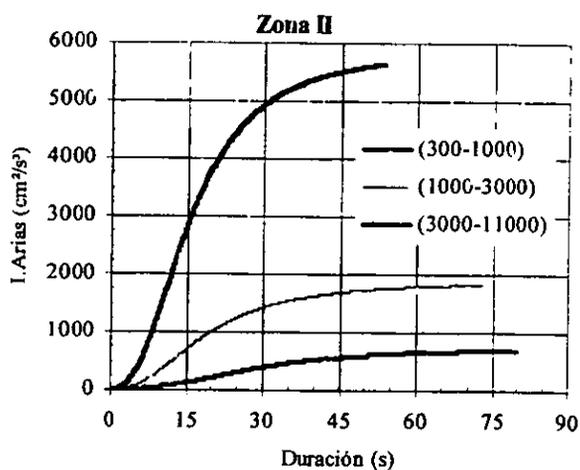


En las gráficas 5.62 a la 5.70 se muestran los resultados de las funciones de modulación de intensidad por zonas y en las gráficas 5.71 a la 5.77 se aprecian las curvas de valor medio de distintos niveles de intensidad de Arias de cada zona.

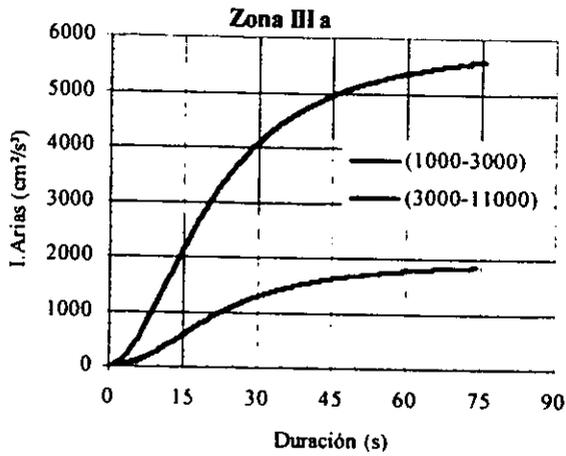
Gráfica 5.71



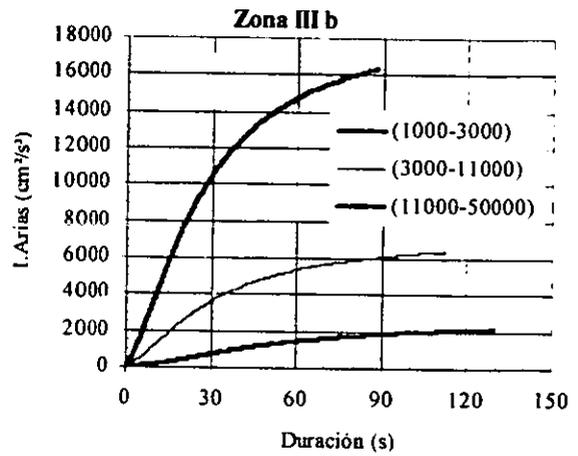
Gráfica 5.72



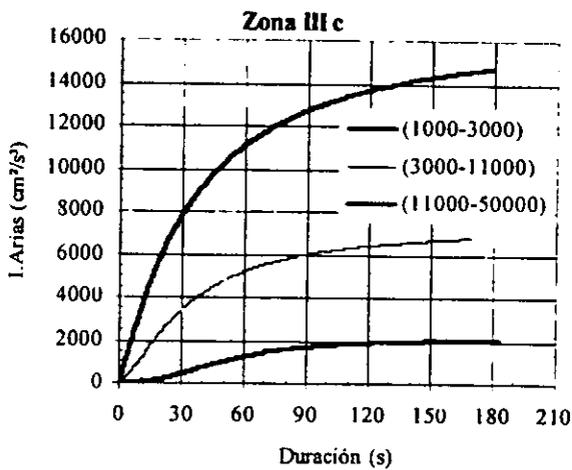
Gráfica 5.73



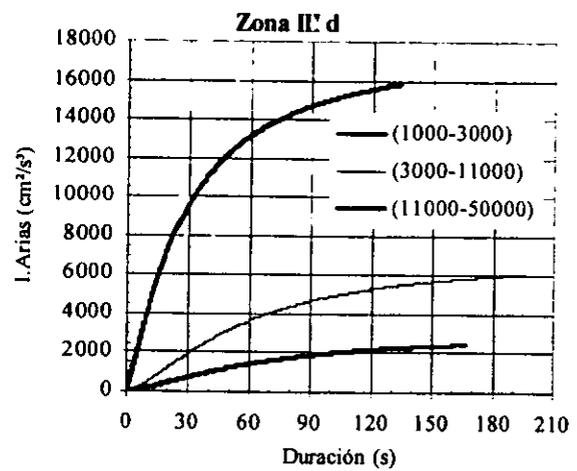
Gráfica 5.74



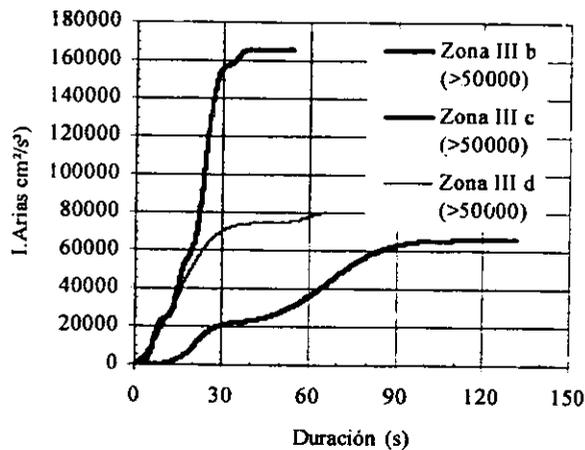
Gráfica 5.75



Gráfica 5.76



Gráfica 7.77



5.5 Análisis de resultados

Al querer realizar un estudio estadístico obteniendo valores medios y desviaciones estándar de intensidades de Arias de registros agrupados en seis zonas, surgió el problema de que existían valores muy pequeños y valores muy grandes de intensidad por lo que los resultados de desviación estándar se hacían enormes y no era posible realizar dicho estudio debido a la gran dispersión de los resultados. Para evitar este problema se propuso formar subgrupos correspondientes a ciertos intervalos de intensidad de Arias que tuvieran la misma tendencia o niveles de intensidad. Se formaron diecinueve subgrupos dentro de las seis zonas sísmicas del Valle de México asociados a cinco intervalos de intensidad de Arias por cada zona.

Agrupados los registros en los diecinueve subgrupos se pudo realizar el estudio más detalladamente observando el comportamiento de la intensidad y de la duración en distintos niveles de intensidad.

A partir de las gráficas 5.62 a la 5.70 se aprecia que a medida que la intensidad es mayor el valor máximo de $c^2(t) = \sigma^2(t)$ ocurre en la primera parte de la duración del movimiento. Esto es más notorio en los suelos blandos (zonas III).

Capítulo



Espectros de amplitud de Fourier y funciones de densidad espectral

6.1 Análisis de Fourier

6.1.1 La serie de Fourier

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Una función periódica puede ser separada en sus componentes armónicas y puede formarse una función periódica sumando todas sus componentes armónicas.^{26 27} Este hecho no fue aceptado por mucho tiempo por matemáticos como Euler, D'Alembert y Lagrange quienes decían que las funciones arbitrarias no podían ser representadas por series trigonométricas.

²⁶ D.E.Newland. *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*. USA, Longman, 1975. p.33-38.

²⁷ Hwei P. Hsu. *Análisis de Fourier*. Addison Wesley Longman, EUA, 1998. p.1-21.

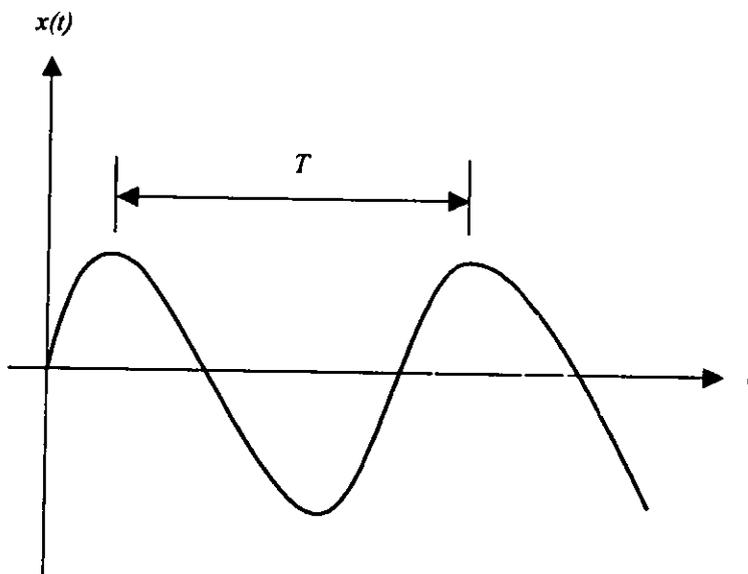
Sin embargo, ahora sí es aceptado ampliamente. Si $x(t)$ es una función periódica en el tiempo t , con periodo T , entonces $x(t)$ se puede expresar como una serie trigonométrica infinita (una serie de Fourier) de la forma:

$$x(t) = a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi t}{T} + a_2 \cos \frac{4\pi t}{T} + \dots + b_1 \text{sen} \frac{2\pi t}{T} + b_2 \text{sen} \frac{4\pi t}{T} + \dots$$

que es igual a:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos \frac{2\pi kt}{T} + b_k \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} \right) \quad [6.1]$$

Figura 6.1 Periodo de vibración de una onda armónica



donde a_0 , a_k y b_k son los coeficientes de Fourier dados por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \text{sen} \frac{2\pi kt}{T} dt \quad [6.2]$$

6.1.2 La integral de Fourier

Sustituyendo [6.2] en [6.1], para $a_0 = 0$ se obtiene:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \frac{2\pi kt}{T} dt \right\} \cos \frac{2\pi kt}{T} + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \operatorname{sen} \frac{2\pi kt}{T} dt \right\} \operatorname{sen} \frac{2\pi kt}{T}$$

Luego, sustituyendo $\omega_k = \frac{2\pi kt}{T}$ que es la frecuencia de la k -ésima armónica y

$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$ que es el espaciamiento entre las armónicas, da:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos \omega_k t dt \right\} \cos \omega_k t + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{\Delta\omega}{\pi} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \operatorname{sen} \omega_k t dt \right\} \operatorname{sen} \omega_k t$$

cuando el periodo $T \rightarrow \infty$, $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ y la \sum tiende a la integral con los límites $\omega = 0$ a $\omega = \infty$. En este caso:

$$x(t) = \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt \right\} \cos \omega t + \int_{\omega=0}^{\infty} \frac{d\omega}{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \operatorname{sen} \omega t dt \right\} \operatorname{sen} \omega t$$

sustituyendo

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos \omega t dt$$

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \operatorname{sen} \omega t dt \quad [6.3]$$

se obtiene:

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega t dt + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \operatorname{sen} \omega t dt \quad [6.4]$$

los términos $A(\omega)$ y $B(\omega)$ definidos por [6.3] son las componentes de la transformada de Fourier de $x(t)$. La ecuación [6.4] es una representación de $x(t)$ usando la integral de Fourier o la transformada inversa de Fourier.

6.1.3 Transformada de Fourier

Es común escribir las ecuaciones [6.3] y [6.4] en el dominio de la frecuencia, haciendo uso de:

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i\operatorname{sen}\theta \quad [6.5]$$

Definiendo $F(\omega)$ como:

$$F(\omega) = A(\omega) - iB(\omega) \quad [6.6]$$

de la ecuación [6.3]

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)(\cos\omega t - i\operatorname{sen}\omega t)dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad [6.7]$$

La última expresión es la definición normal de $F(\omega)$ que es llamada la Transformada de Fourier de $x(t)$.

La ecuación de la integral de Fourier [6.4] puede ser escrita de la siguiente forma:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\cos\omega t d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\operatorname{sen}\omega t d\omega \quad [6.8]$$

donde las integrales van desde $-\infty$ hasta ∞ en lugar de 0 a ∞ y el factor 2 desaparece. La idea de una frecuencia negativa es solamente un artificio matemático para simplificar la ecuación. Ya que $A(\omega)$ es una función par y $\operatorname{sen}\omega t$ es una función impar de ω , $A(\omega)\operatorname{sen}\omega t$ es una función impar.

$$\int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\operatorname{sen}\omega t d\omega = 0$$

y

$$\int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\cos\omega t d\omega = 0 \quad [6.9]$$

la expresión [6.8] puede ser escrita como:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\cos\omega t d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\operatorname{sen}\omega t d\omega + i \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega)\operatorname{sen}\omega t d\omega - i \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega)\cos\omega t d\omega$$

ya que las últimas dos integrales [6.9] son cero, entonces:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \{A(\omega) - iB(\omega)\} \{\cos \omega t + i \sin \omega t\} d\omega$$

o bien

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad [6.10]$$

A las ecuaciones [6.7] y [6.10] se les llama el par de transformadas de Fourier, ya que $F(\omega)$ es la transformada compleja de Fourier de $x(t)$, y la otra es la integral inversa de Fourier.

Algunos autores difieren en el factor $\frac{1}{2\pi}$ que aparece en la ecuación [6.7]. Algunos incluyen $\frac{1}{2\pi}$ en la inversa, mientras otros incluyen un factor $\frac{1}{2\pi}$ en ambas.

En este trabajo, para obtener los espectros de amplitud de Fourier se utiliza el programa *Degtra*²⁸, este programa realiza la transformada de Fourier con respecto a la frecuencia cíclica f y no con la frecuencia circular ω como se describió anteriormente. Por lo que el valor medio del espectro de amplitudes de Fourier se transforma de f a ω . Finalmente se puede establecer el siguiente par de transformadas de Fourier, que se utilizan en este trabajo:

$$F(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad [6.11]$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad [6.12]$$

Para comprobar que el par de transformadas de Fourier dadas por las ecuaciones [6.11] y [6.12] son correctas, se utiliza el teorema de Parseval.²⁹ Este indica lo siguiente:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \pi \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad [6.13]$$

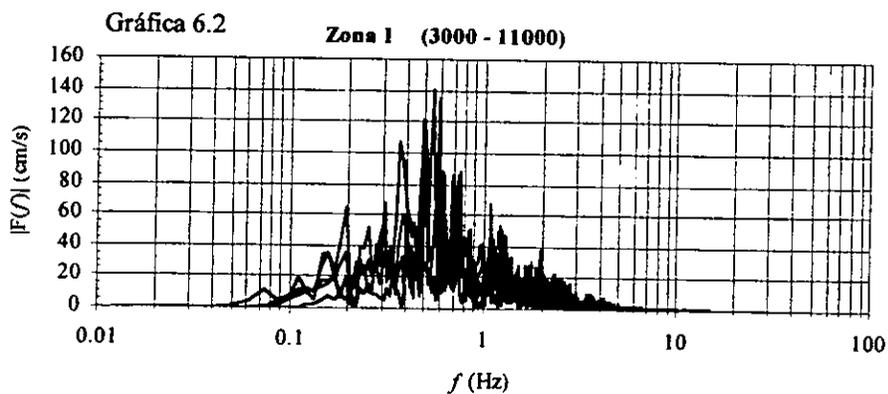
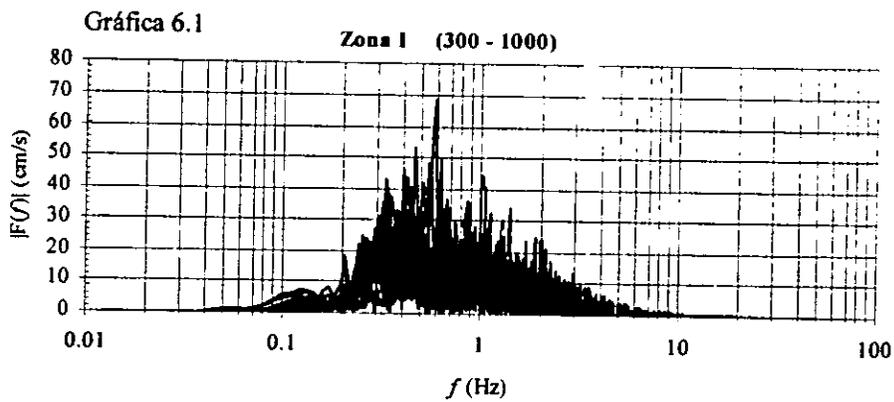
²⁸ M. Ordaz y C. Montoya, *Op. Cit.*

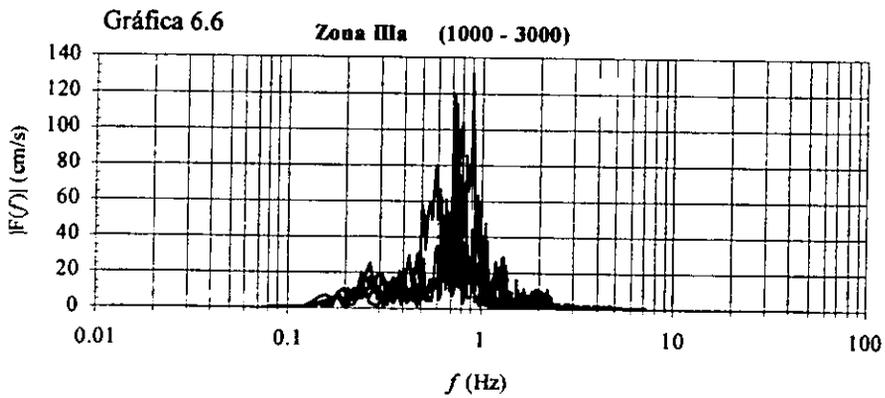
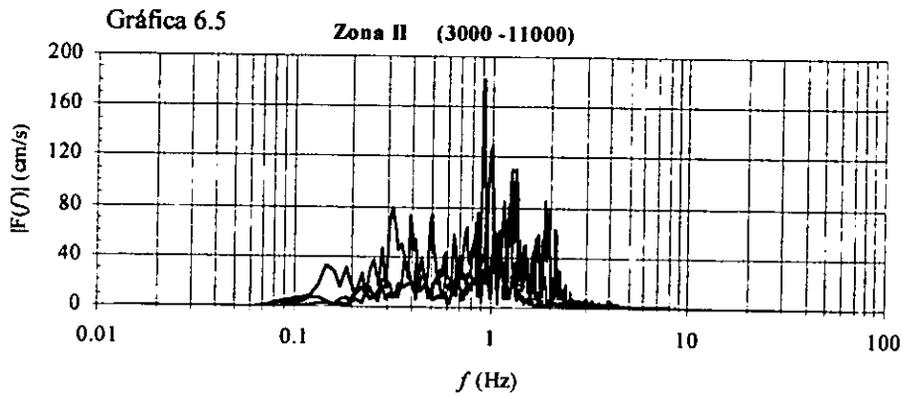
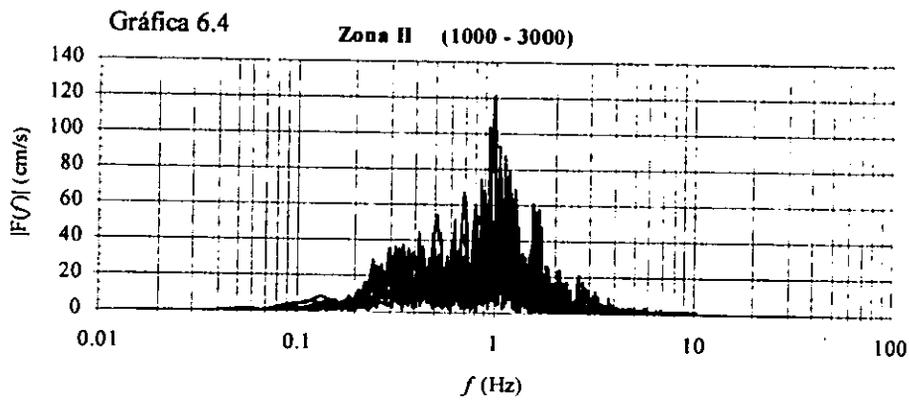
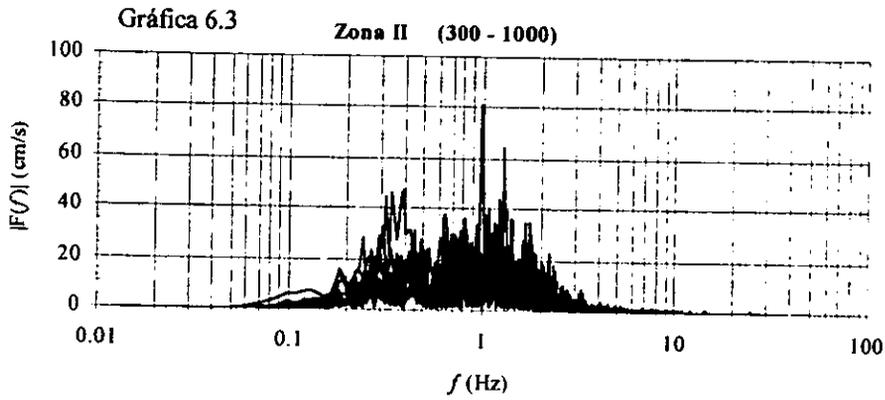
²⁹ Hwei P.Hsu. *Análisis de Fourier*. México, Addison Wesley Longman, 1998. p.94-95.

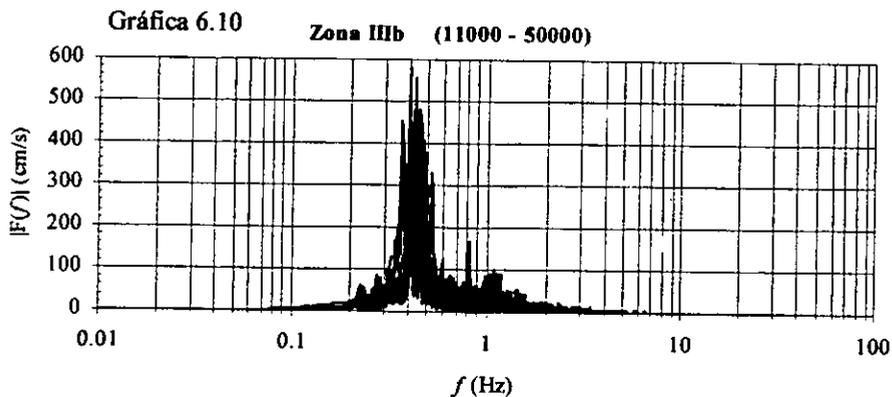
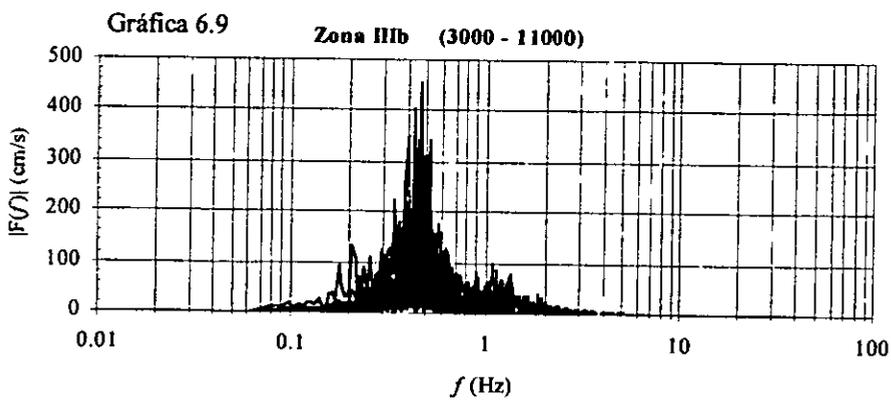
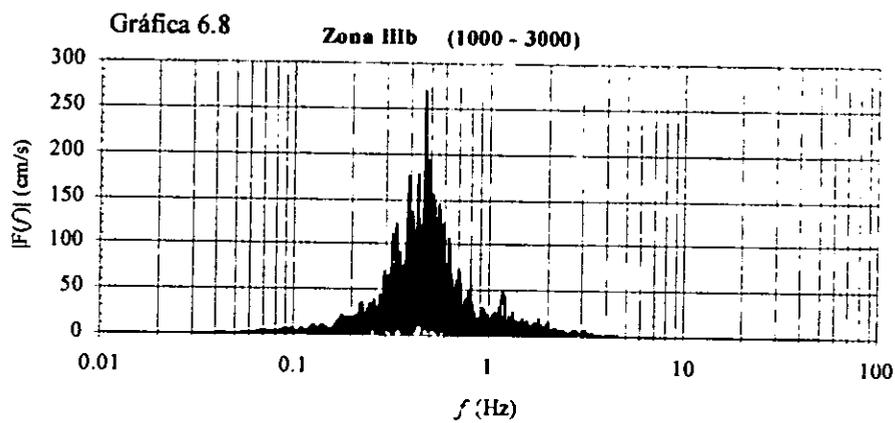
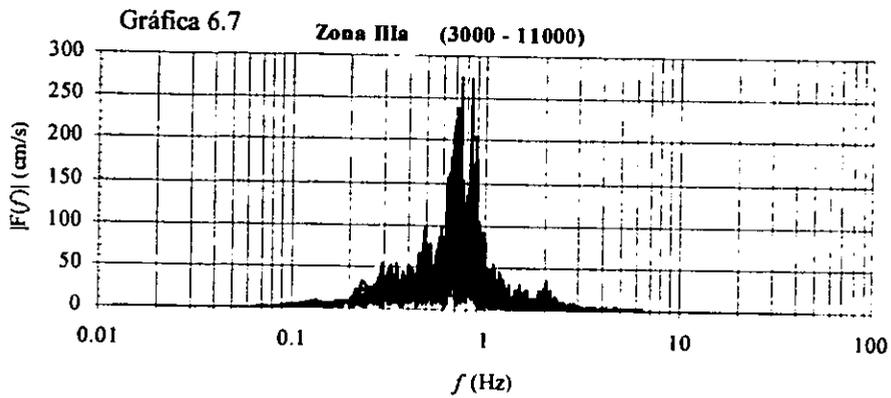
Las ecuaciones anteriores [6.11], [6.12] y [6.13] se aplican a los resultados del programa *Degtra* después de haber transformado la variable independiente f a ω .

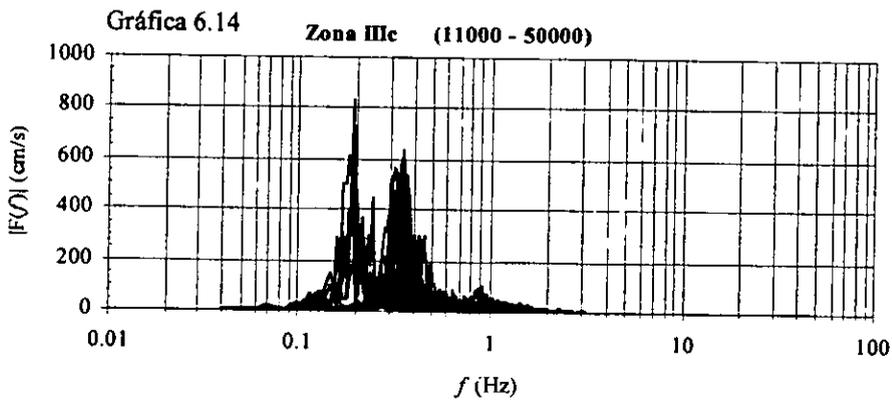
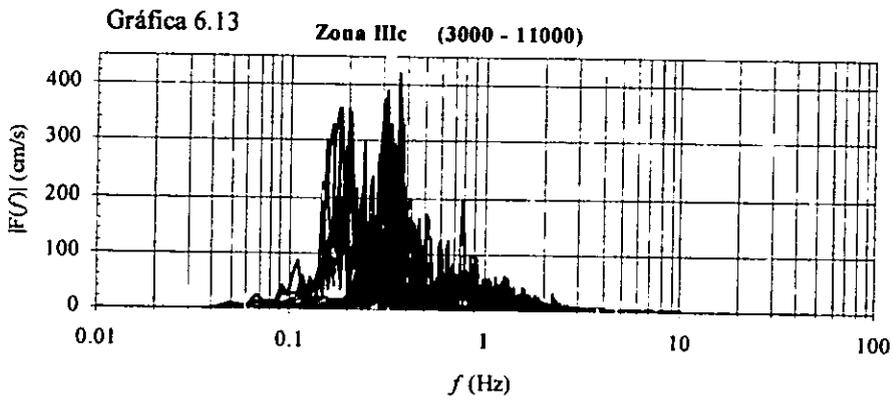
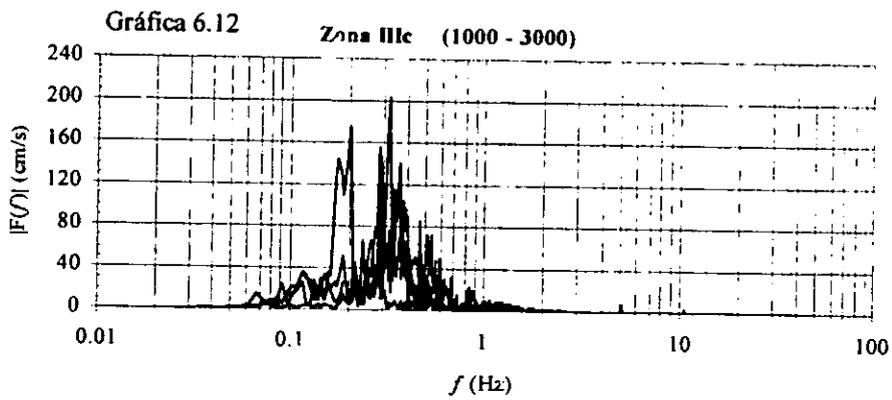
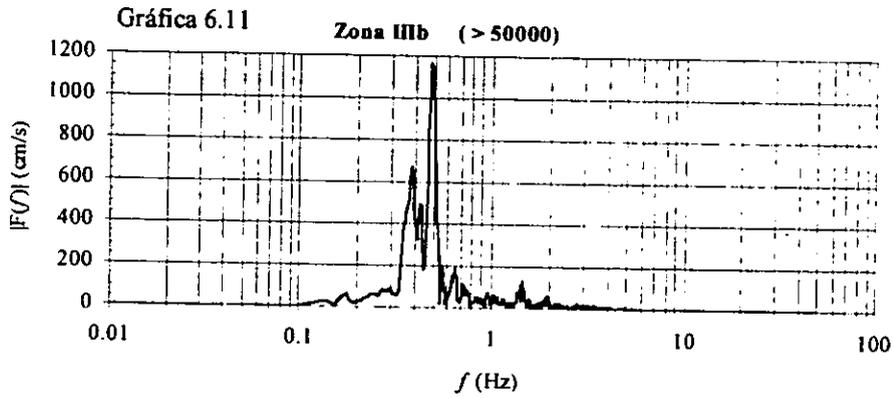
6.2 Resultados de las transformadas de Fourier

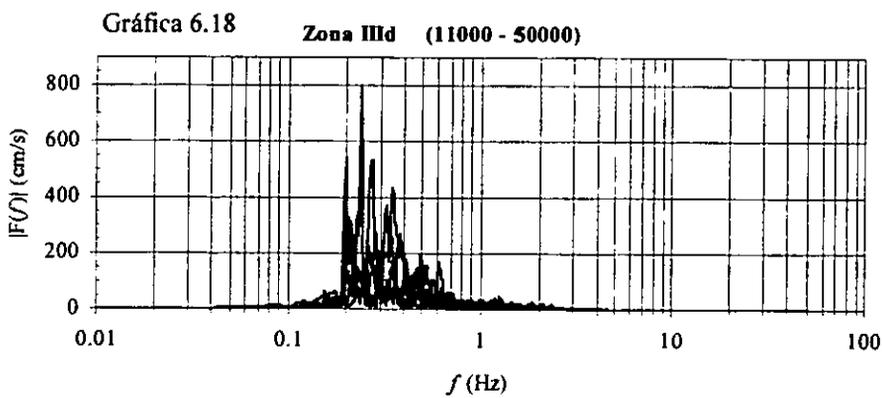
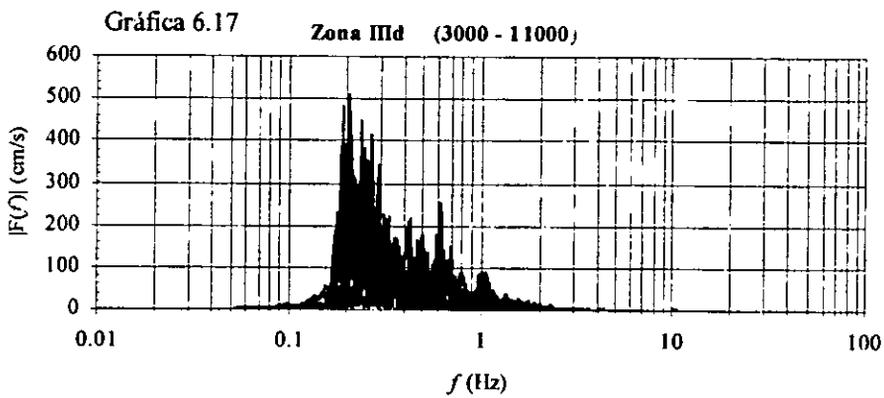
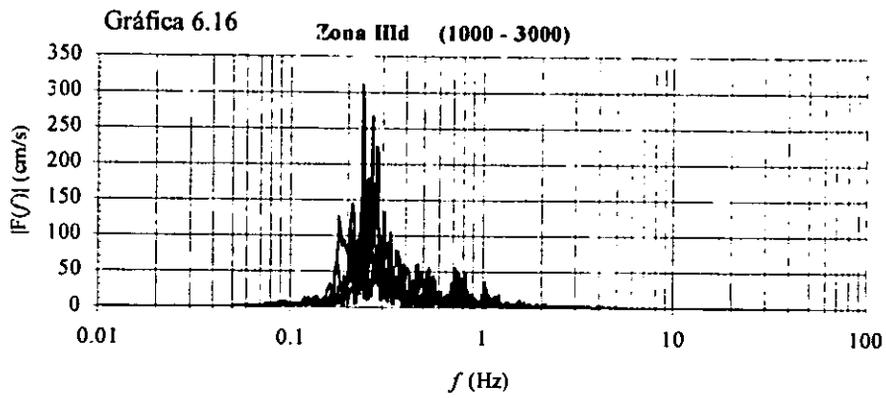
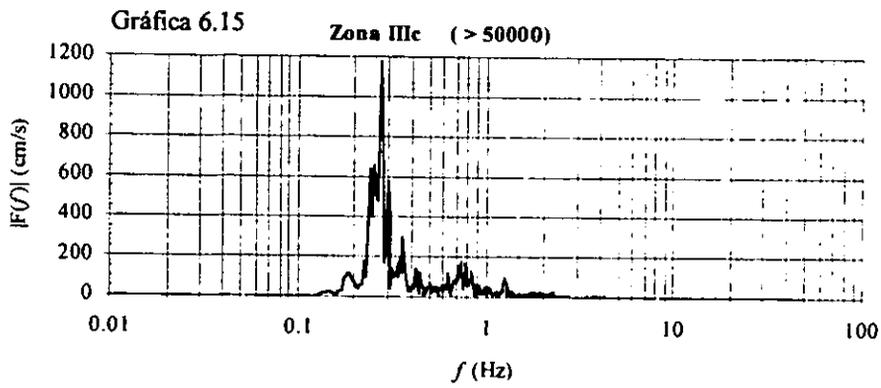
En esta sección se muestran los espectros de amplitud de Fourier de todos los registros agrupados por subgrupos, para posteriormente mostrar sus respectivas curvas de valor medio.

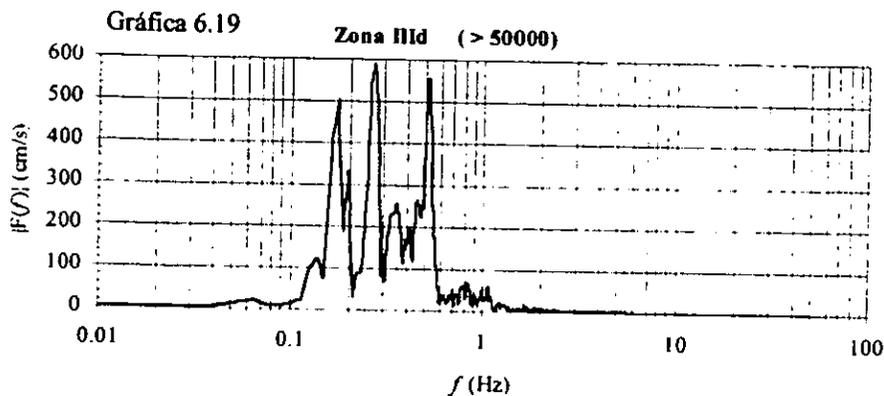






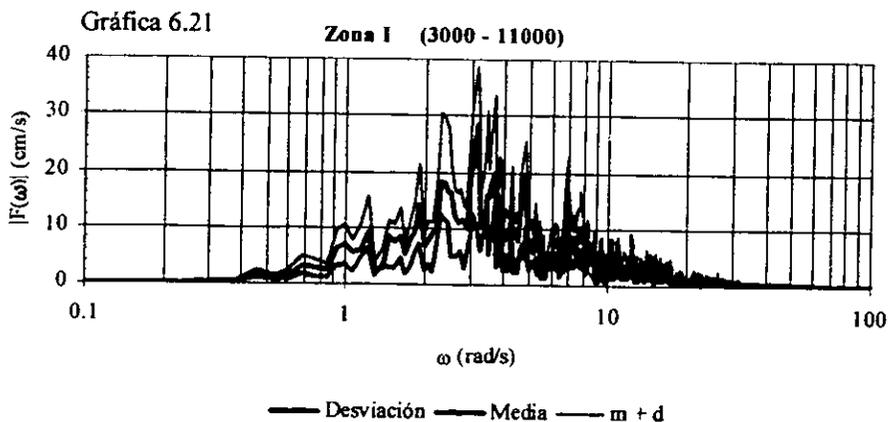
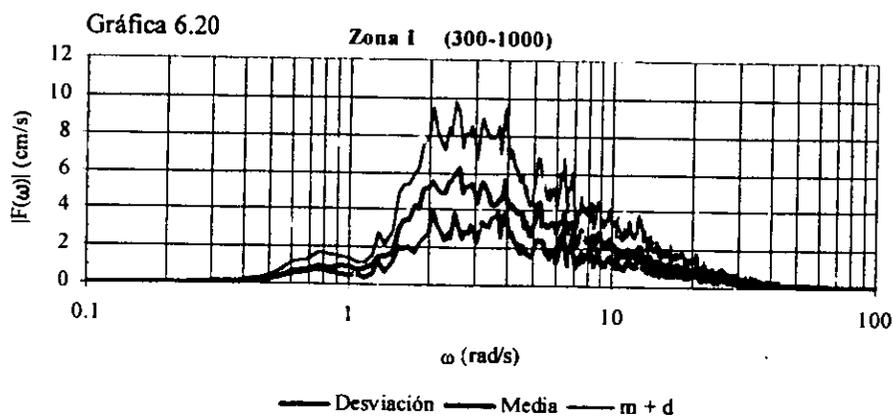


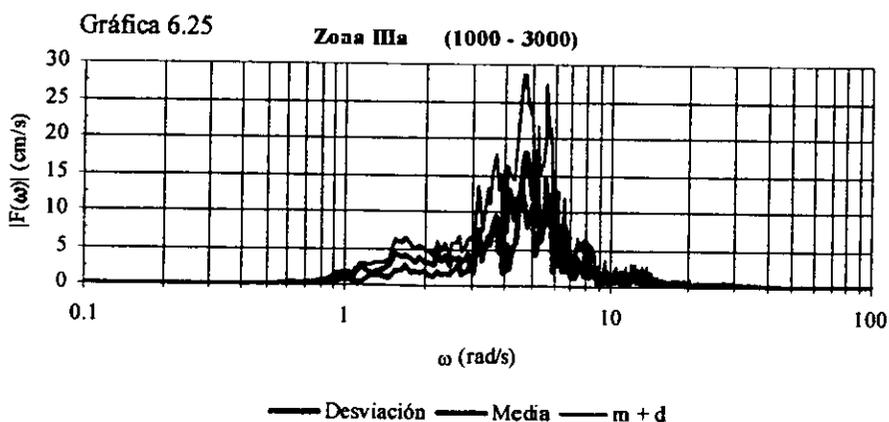
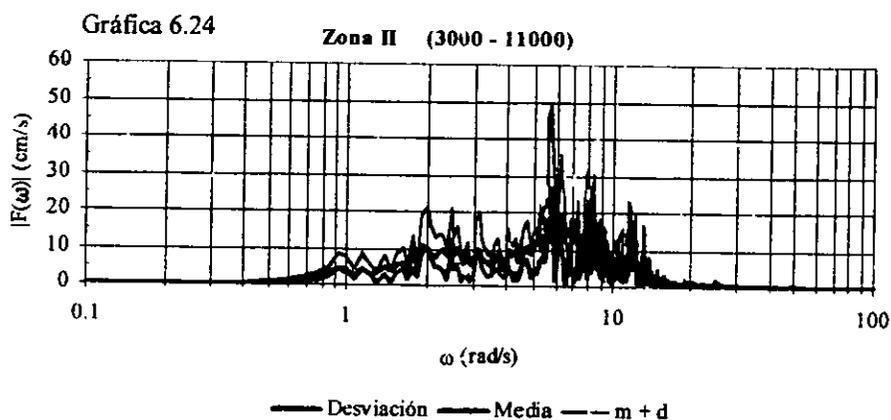
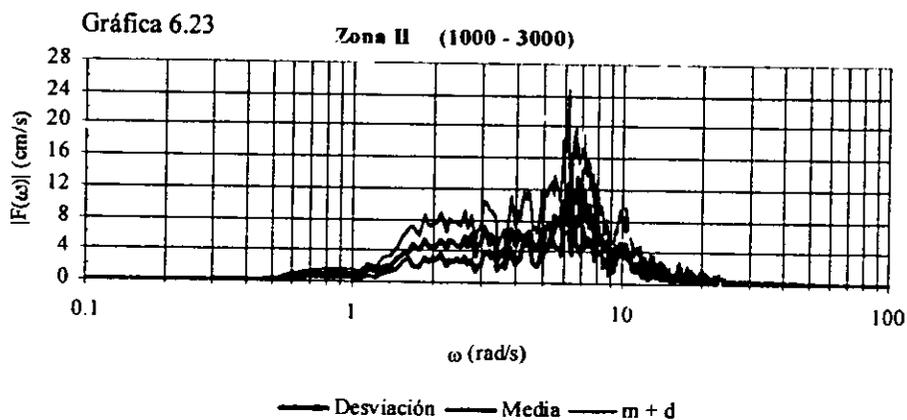
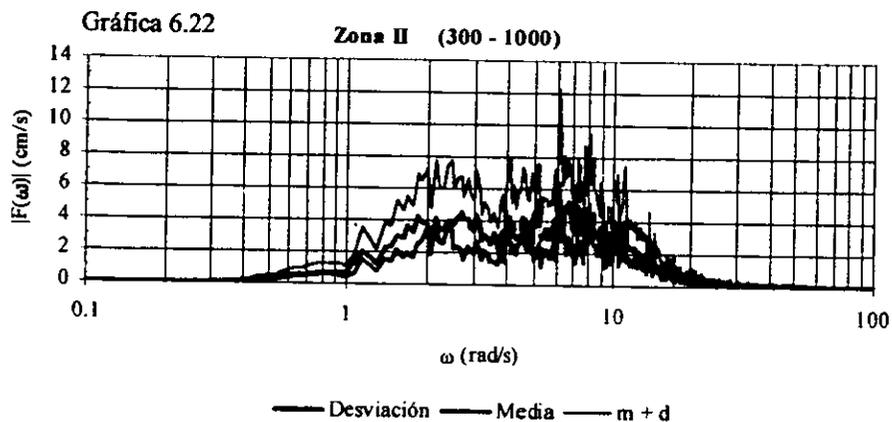


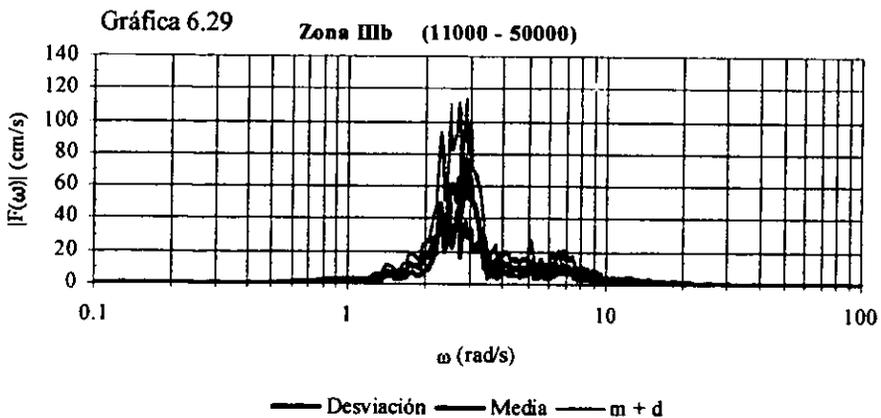
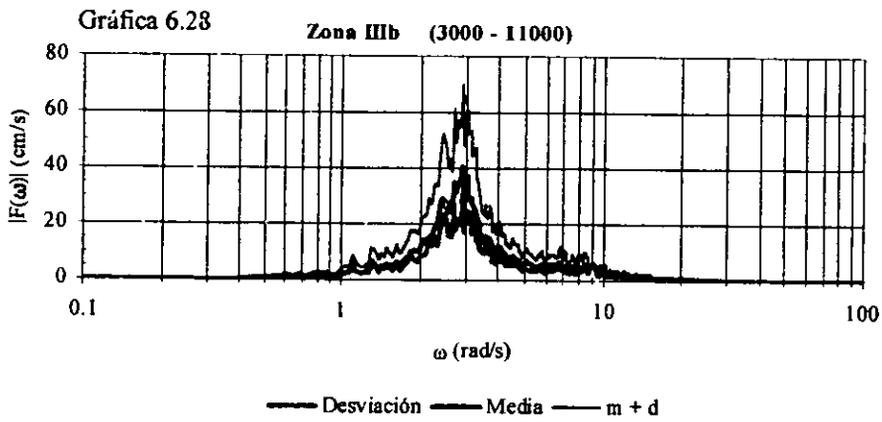
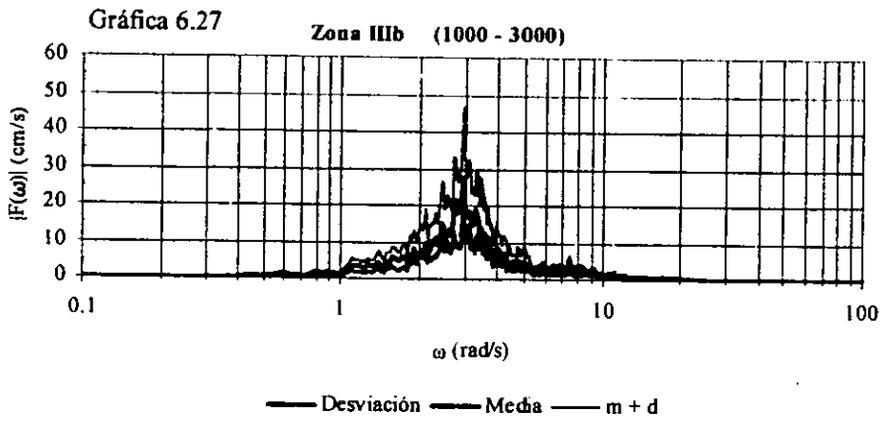
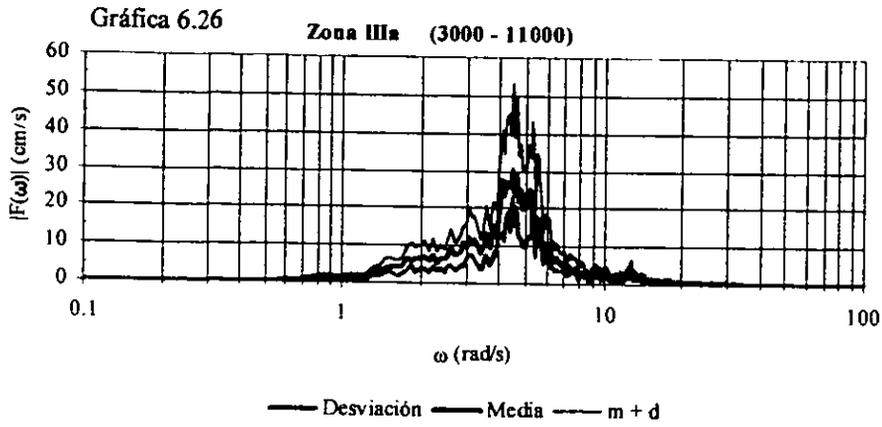


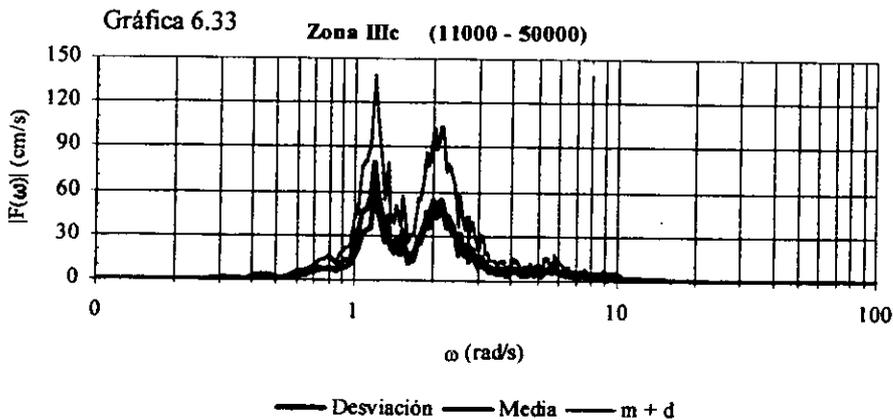
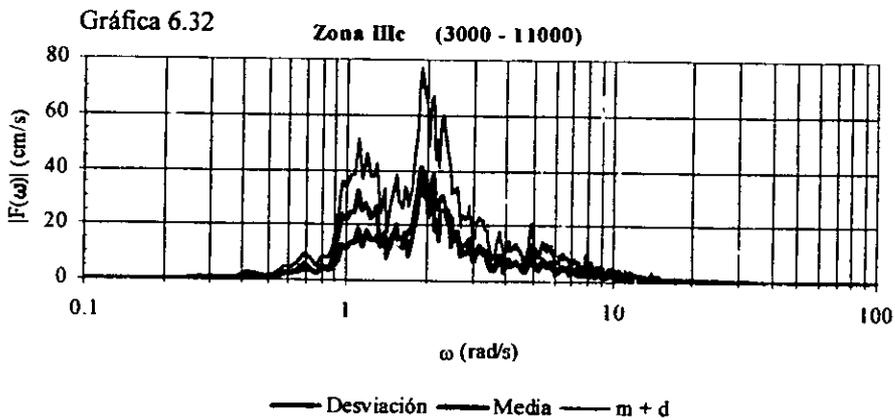
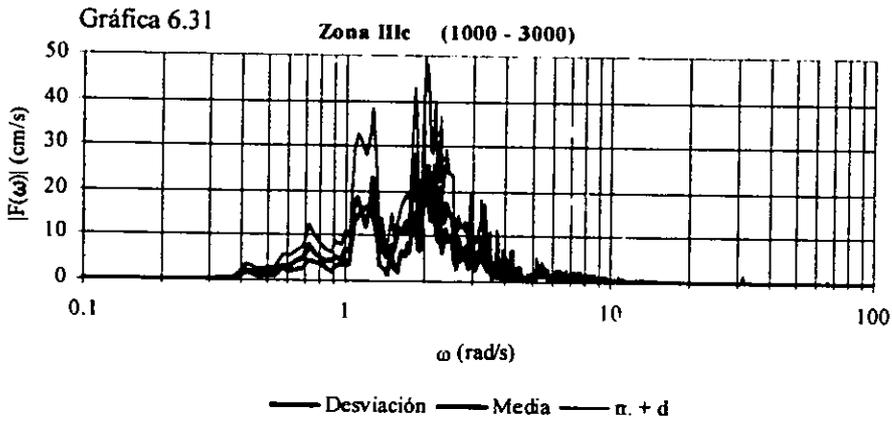
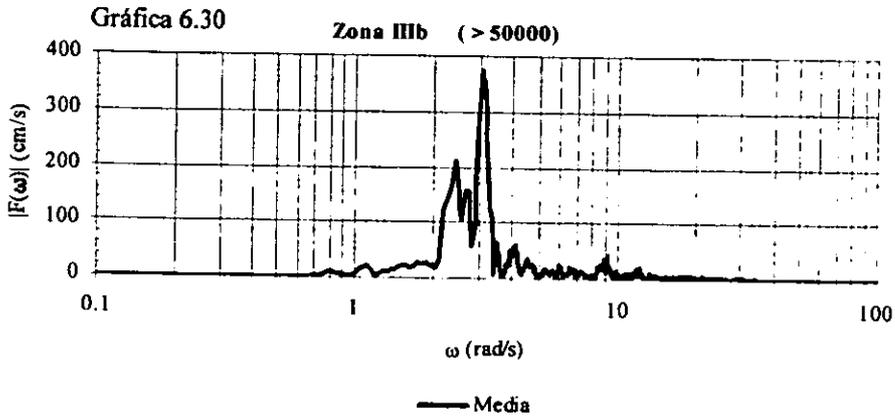
A continuación se muestran los valores medios y las desviaciones estándar de los espectros de amplitud de Fourier de cada subgrupo, gráficas 6.20 a la 6.38. Se hace la observación que éstas figuras están graficadas con respecto a la frecuencia ω y no con f como se usó en las gráficas 6.1 a la 6.18.

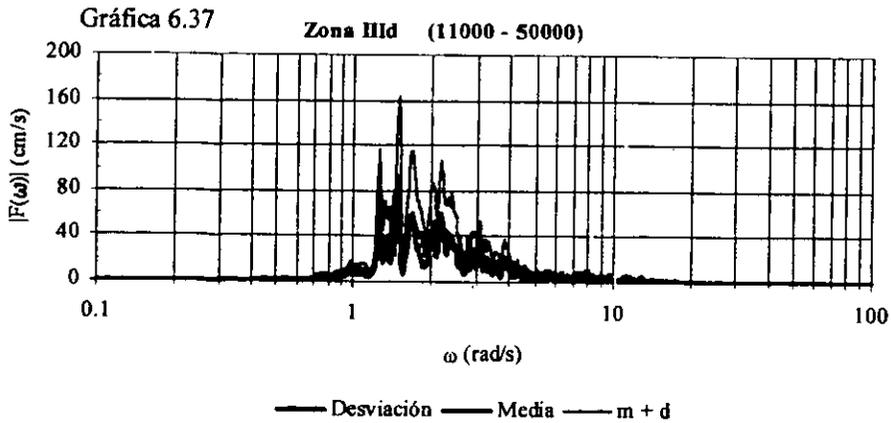
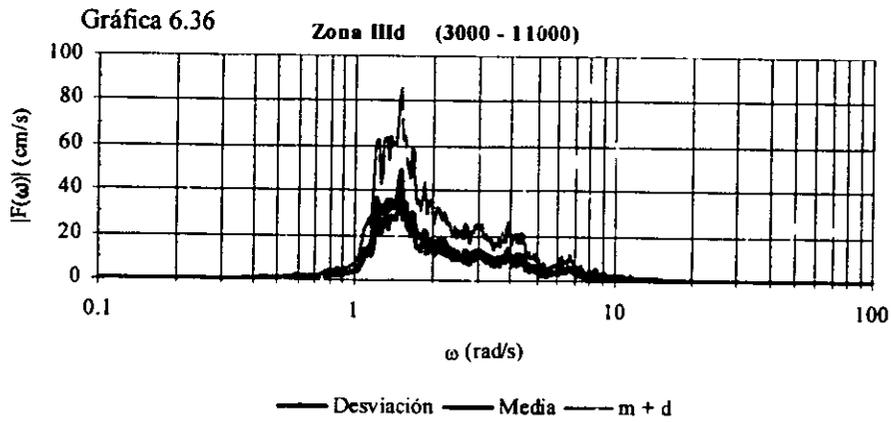
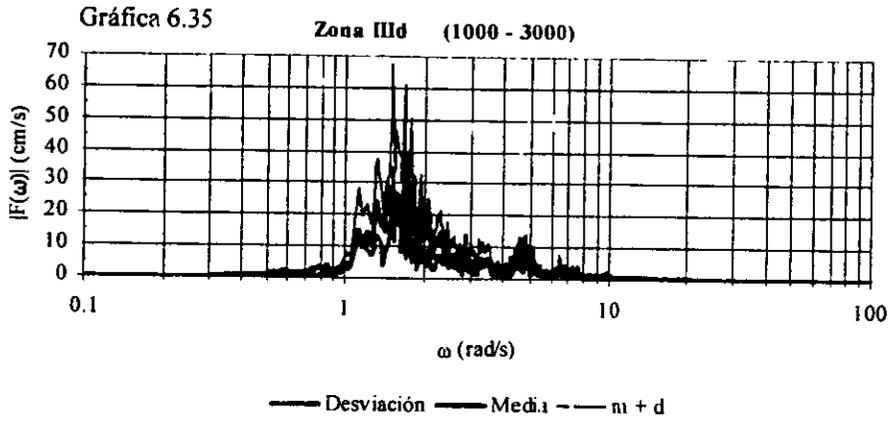
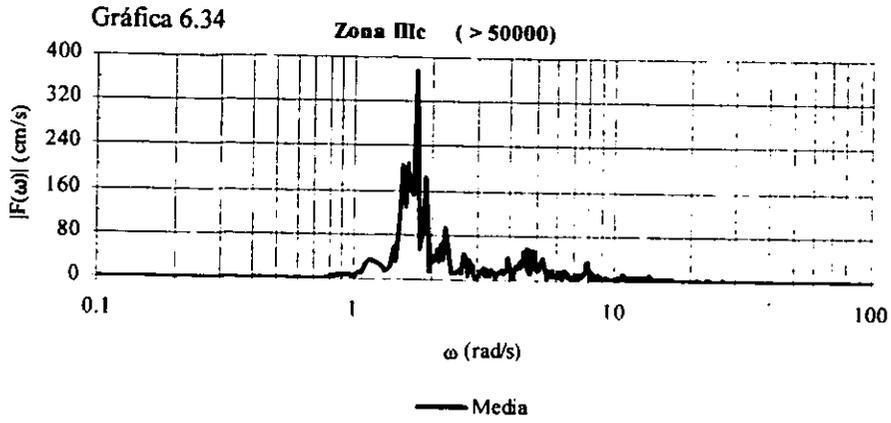
Para convertir los espectros de amplitud de Fourier de f a ω , se dividen los valores de $|F(f)|$ entre π y los valores de f se multiplican por 2π , únicamente en el caso de usar el programa *Deg:ra*.

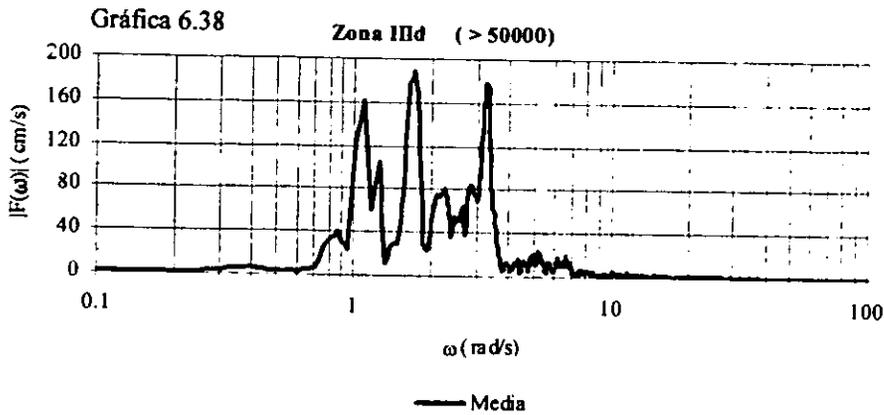












6.3 La función de densidad espectral

En la tabla 5.4 se presenta la duración promedio t de cada subgrupo. Estos valores se utilizan en la ecuación [6.14] para obtener la densidad espectral $S(\omega)$. Esta se mostrará testada para representar la función de densidad espectral media de cada subgrupo.

$$\bar{S}(\omega) = \frac{\pi}{t} |F(\omega)|^2 \quad [6.14]$$

donde $F(\omega)$ es la transformada de Fourier.

La varianza del proceso aleatorio del movimiento se obtiene al integrar la ecuación³⁰ [6.14]:

$$\sigma_0^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{S}(\omega) d\omega = \frac{\pi}{t} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad [6.15]$$

En lo que sigue, se ajusta el modelo de Clough y Penzien (1993) $\bar{S}_{CP}(\omega)$ de cada subgrupo mediante el método *Quasi-Newton* y el *Simplex*³¹ de estimación paramétrica no lineal.

Los parámetros por ajustar son los siguientes que dan forma al modelo por ajustar.

$$s_0, \xi_g, \xi_f, \omega_f \text{ y } \omega_g$$

La forma $\bar{S}_{CP}(\omega)$ está dada por la siguiente expresión:

³⁰ Francisco Leonel Silva. *Op. cit.*

³¹ Se utiliza el programa de cómputo *Statistica* versión 5.1 (StatSoft, Inc. 1997)

$$\bar{S}_{CP}(\omega) = |H(\omega)|^2 s_0 \tag{6.16}$$

en donde $|H(\omega)|^2$ es:

$$H(\omega)^2 = \left(\frac{4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^2}{(\omega_g^2 - \omega^2) + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right) \left(\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2) + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right) \tag{6.17}$$

Se establece el requisito que la varianza de la densidad espectral $\bar{S}_{CP}(\omega)$ debe ser aproximadamente igual a la varianza de la densidad espectral $\bar{S}(\omega)$. Para ajustar el valor de los parámetros se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Se ajustan los espectros $S_{CP}(\omega)$ y $\hat{S}(\omega)$ usando un método adecuado de estimación paramétrica no lineal, obteniendo así los valores de los parámetros: s_0^* , ξ_g , ξ_f , ω_f y ω_g . Estos dan forma a $\bar{S}_{CP}(\omega)$. s_0^* es normalmente diferente de s_0 debido a que la varianza del modelo ajustado σ_{CP}^{2*} es diferente a la varianza de la densidad espectral $\bar{S}(\omega)$, ver tablas 6.1 y 6.2. La varianza del modelo ajustado está dada por:

$$\sigma_{CP}^{2*} = s_0^* \int_0^t \left(\frac{4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^2}{(\omega_g^2 - \omega^2) + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right) \left(\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2) + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right) \tag{6.18}$$

Tabla 6.1

	L. Arias (cm ² /s ³)	Varianza del modelo real σ_0^2 (cm ² /s ⁴)	Duración t (s)
Zona I	300-1000	6.3007	68.79
	3000-11000	41.3844	74.56
Zona II	300-1000	5.8429	79.91
	1000-3000	17.4045	72.75
	3000-11000	71.6125	53.69
Zona III a	1000-3000	16.6019	74.26
	3000-11000	50.891	75.97
Zona III b	1000-3000	11.4637	129.45
	3000-11000	37.6748	112.00
	11000-50000	130.0381	88.28
	> 50000	2981.7534	54.29

Zona III c

1000-3000	7.5197	182.74
3000-11000	21.2637	169.30
11000-50000	39.1363	178.96
> 50000	502.223	131.93

Zona III d

1000-3000	10.0649	166.60
3000-11000	18.2871	187.62
11000-50000	73.1214	134.33
> 50000	1064.0818	72.71

2. Usando las cantidades s_0^* , σ_{CP}^{2*} y σ_0^2 , se determina el valor s_0 mediante la siguiente expresión:

$$s_0 = s_0^* \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{CP}^{2*}} \quad [6.19]$$

3. Finalmente, se obtienen los parámetros del filtro de Clough y Penzien que garantizan que la varianza del modelo ajustado σ_{CP}^{2*} (que ahora se interpreta como σ_{CP}^2) es igual a la varianza del modelo real σ_0^2 de cada subgrupo.

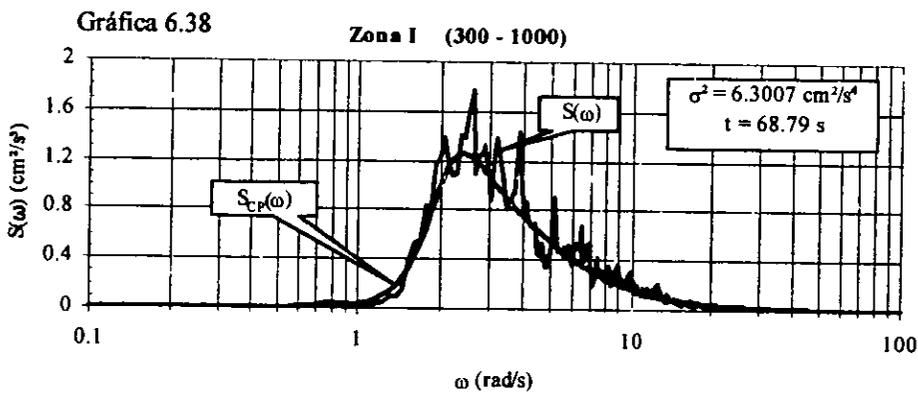
Tabla 6.2 Parámetros del filtro de Clough y Penzien ordenados por subgrupos.

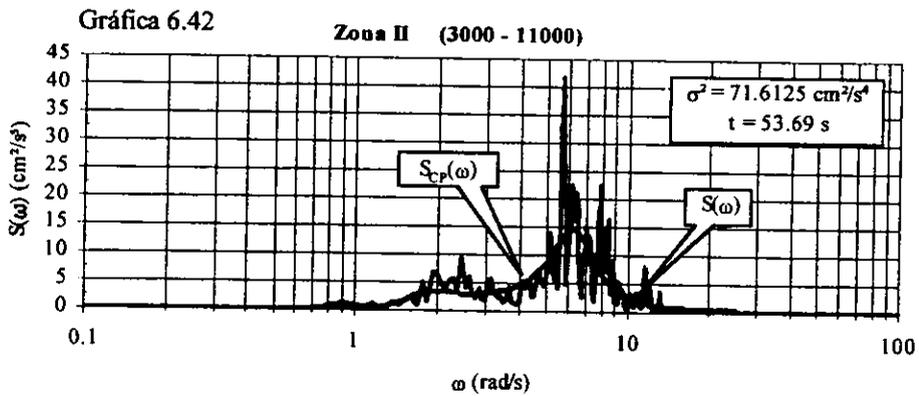
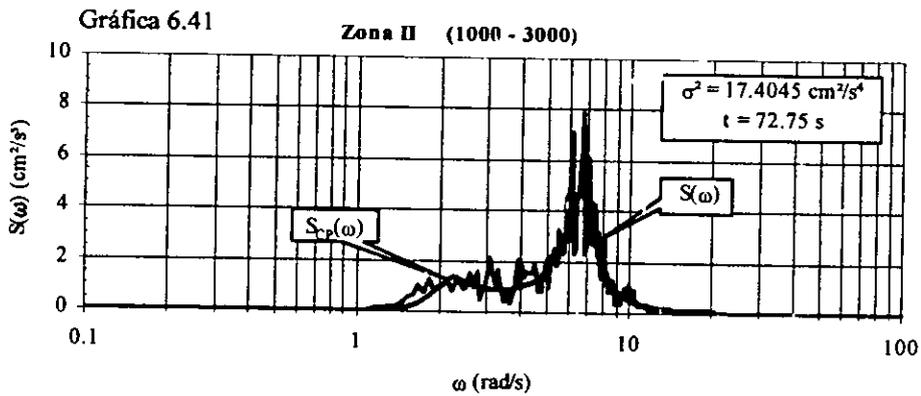
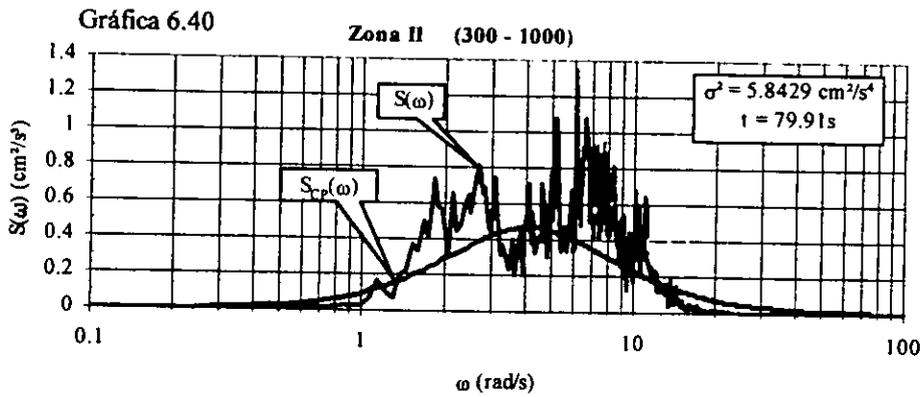
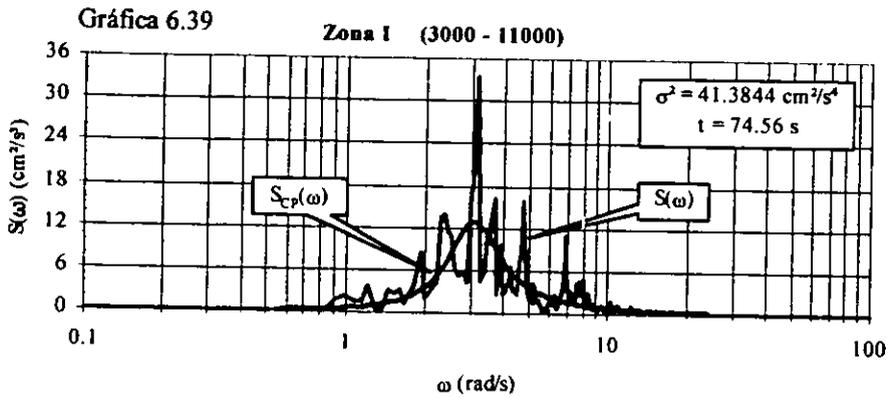
I. Arias (cm ² /s ³)	Parámetros de Clough y Penzien							
	s_0^*	ω_g (rad/s)	ξ_g	ω_r (rad/s)	ξ_r	σ_{CP}^{2*} (cm ² /s ⁴)	s_0	
Zona I	300-1000	3.8805	2.0623	0.3597	4.1444	0.8571	3.1502	7.7614
	3000-11000	13.8957	3.0506	0.2870	0.4042	10.5215	20.6927	27.7907
Zona II	300-1000	0.7289	1.4911	1.5433	0.8396	2.5277	2.9213	1.4579
	1000-3000	7.8062	2.1039	0.2146	6.6868	0.1684	8.7025	15.6195
	3000-11000	56.7785	1.7067	0.2726	6.3844	0.2416	35.8062	113.5572
Zona III a	1000-3000	5.2504	1.4549	0.2984	4.8044	0.1153	8.3008	10.5010
	3000-11000	13.7627	1.2204	0.4417	4.5615	0.1279	25.4457	27.5252
Zona III b	1000-3000	3.1935	0.8115	0.5082	2.9327	0.1162	5.7321	6.3867
	3000-11000	0.9733	2.1527	0.3066	2.9398	0.1223	18.8365	1.9467
	11000-50000	76.9461	0.0061	49.9551	2.7646	0.1181	65.0191	153.8921
	> 50000	7.9106	2.3245	0.0615	3.0807	0.0281	1490.8697	15.8213

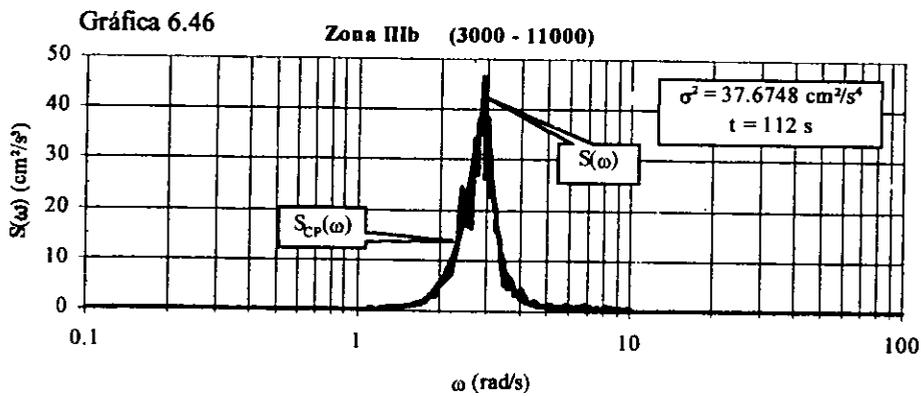
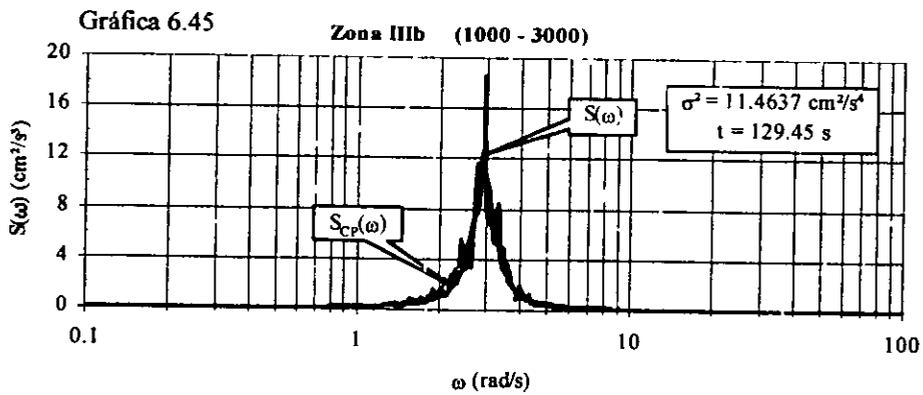
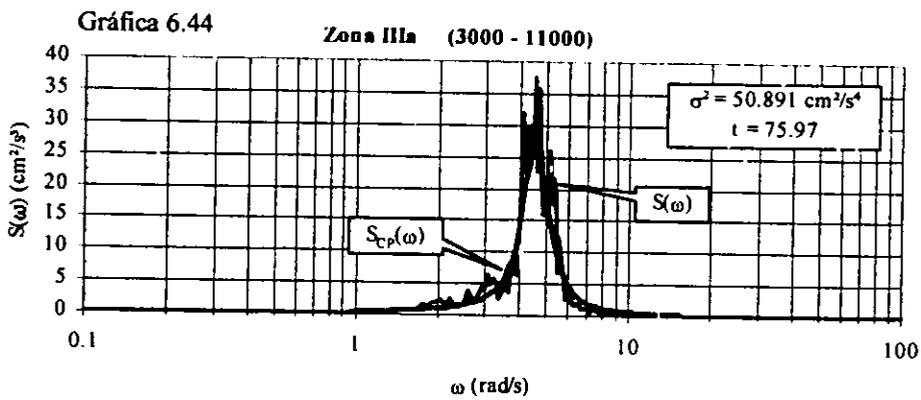
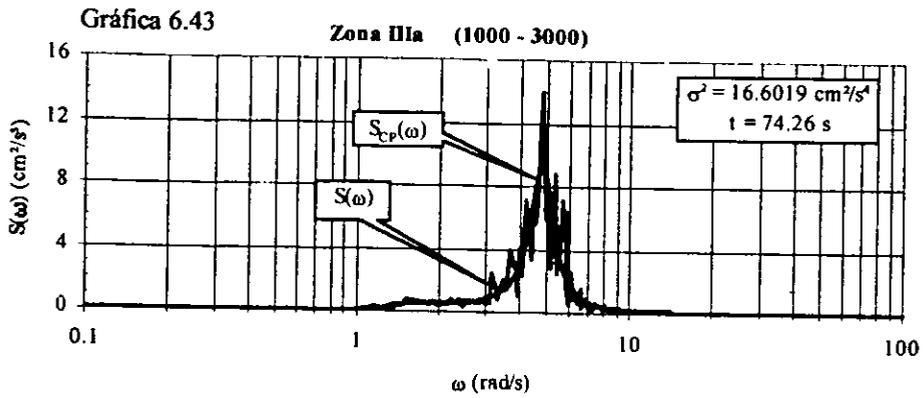
Zona III c	1000-3000	1.5140	1.0665	0.2001	2.1282	0.1278	3.7600	3.0279
	3000-11000	27.3255	0.0125	15.3467	2.0110	0.1429	10.6318	54.6513
	11000-50000	3.4935	1.1722	0.0799	2.1684	0.0800	19.5061	7.0092
	> 50000	0.0811	1.7417	0.0101	1.5298	0.0245	251.1056	0.1621

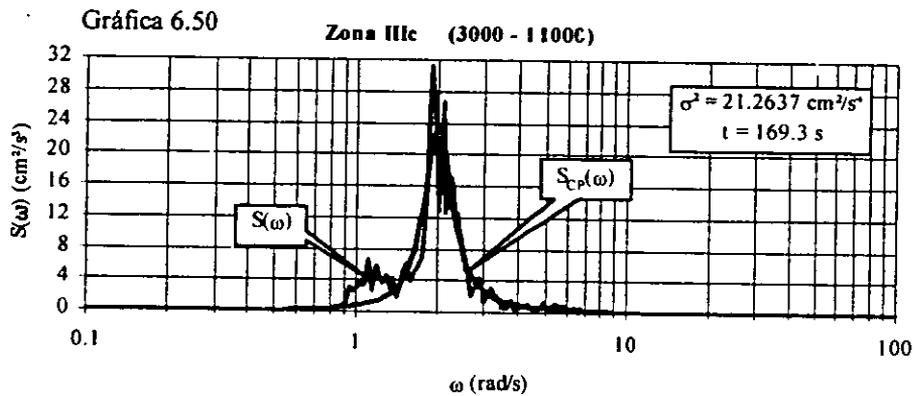
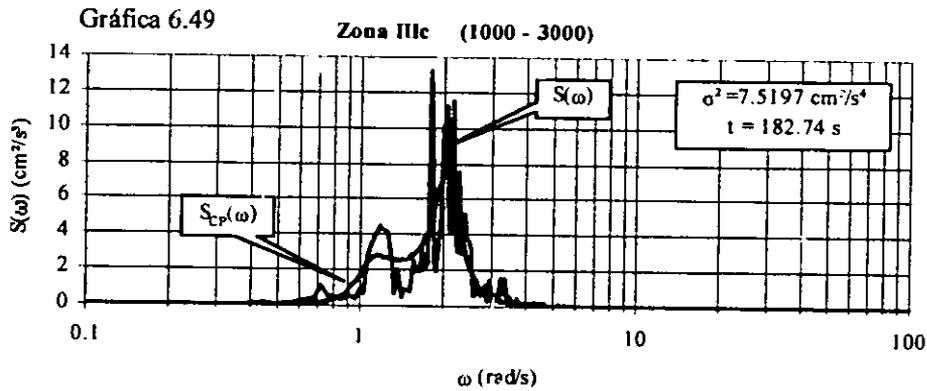
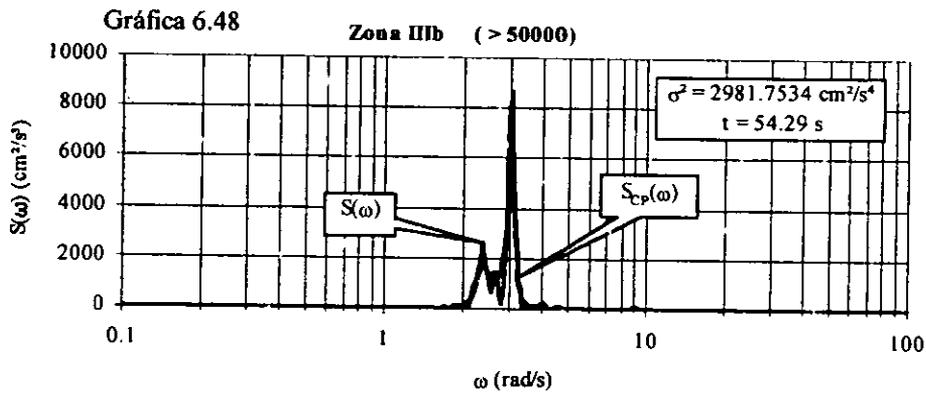
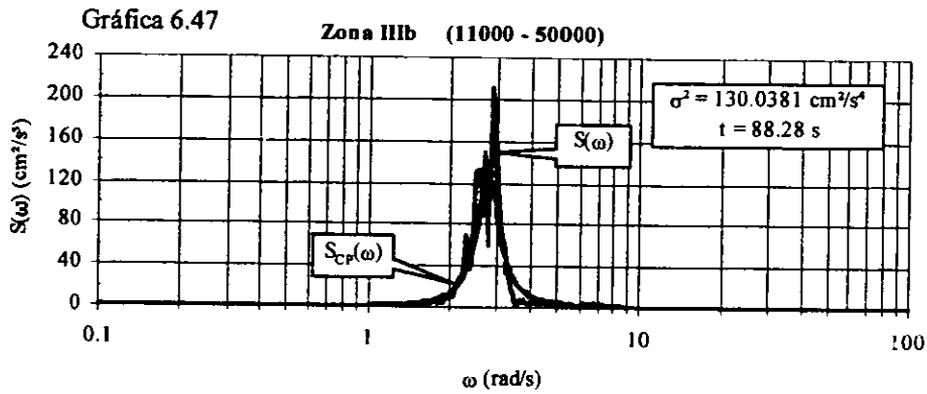
Zona III d	1000-3000	2.0332	0.4772	1.0078	1.5595	0.1628	5.0323	4.0665
	3000-11000	0.8132	0.3851	4.3242	1.4350	0.1239	9.1436	1.6264
	11000-50000	0.9574	2.2917	0.1571	1.4021	0.1458	36.5596	1.9149
	> 50000	42.0061	1.6792	0.0364	3.2616	0.0420	532.0405	84.0123

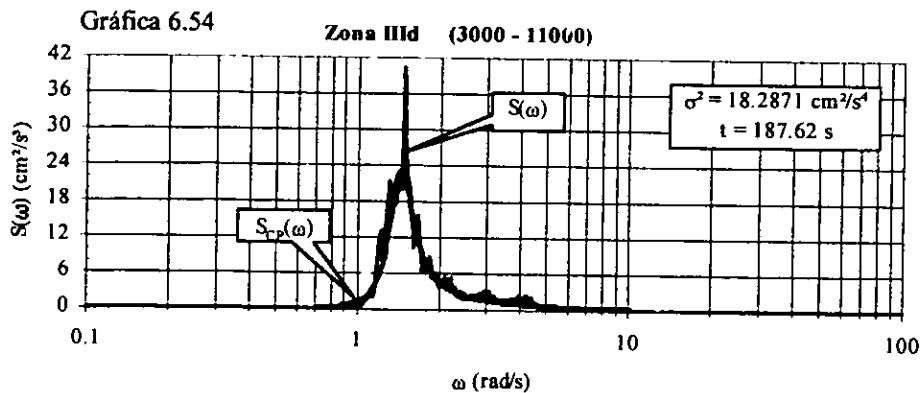
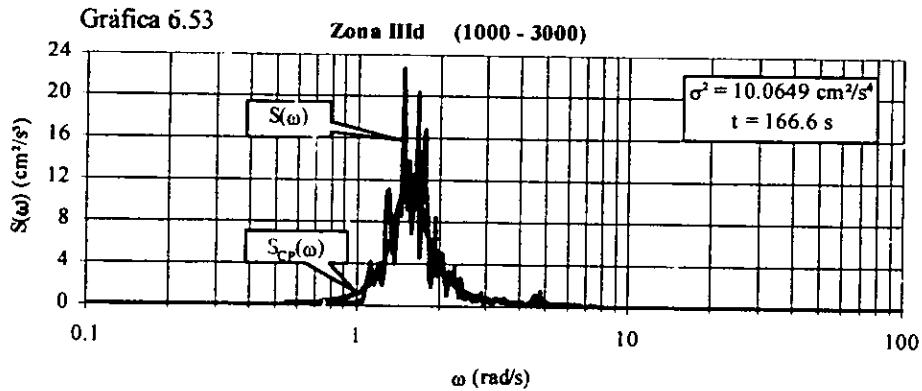
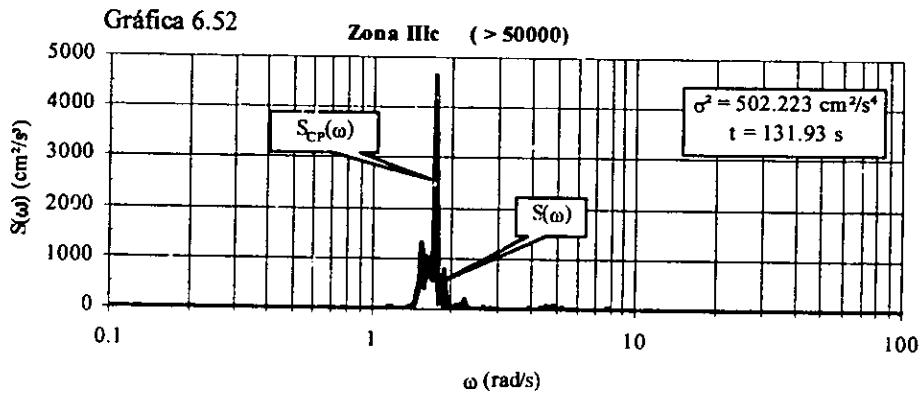
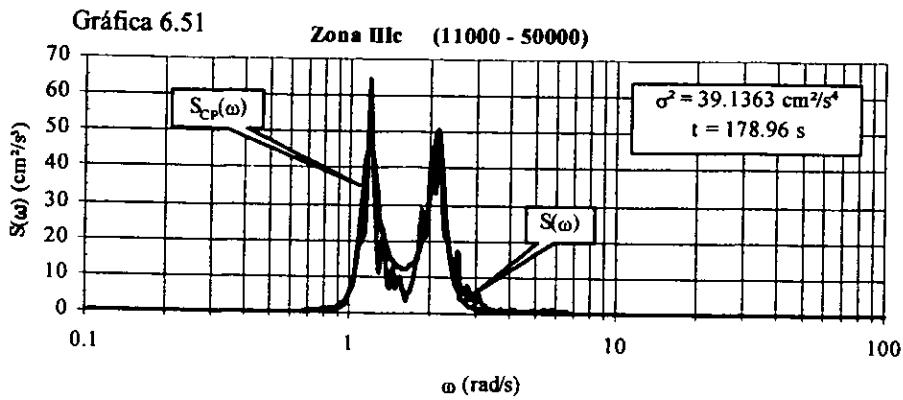
En las siguientes gráficas 6.38 a la 6.56 se muestran las curvas correspondientes a la función de densidad espectral $\bar{S}(\omega)$ y a $\bar{S}_{CP}(\omega)$, catalogadas por subgrupos. Ambas curvas tienen la misma varianza (σ^2) y los procesos tienen la misma duración (t).



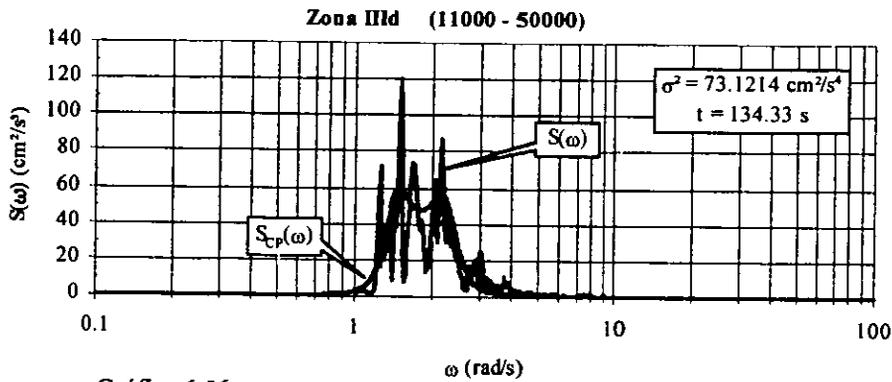




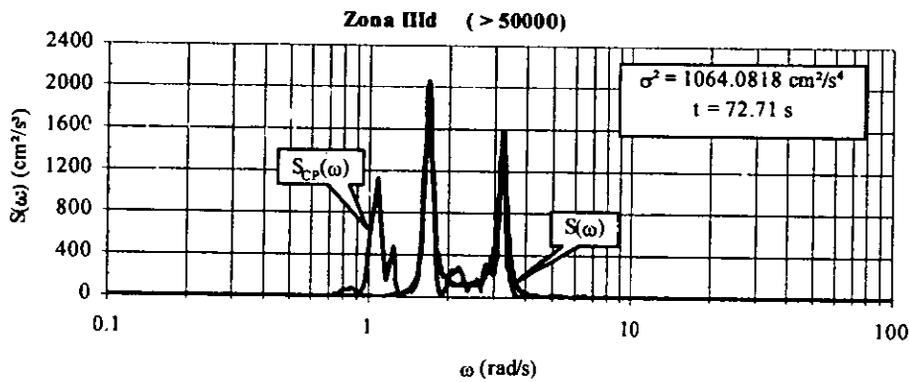




Gráfica 6.55



Gráfica 6.56



6.4 Análisis de resultados de las funciones de densidad espectral

En las gráficas 6.57 a la 6.62 se muestran las funciones de densidad espectral con las expresiones de Clough y Penzien de cada zona. En estas gráficas se puede observar que dichas funciones tienen mayor amplitud a medida que las intensidades del movimiento son mayores. Hay algunas funciones como las de la Zona I, la Zona III a y la Zona III b que tienen una forma de campana, a diferencia de las otras zonas que tienen la forma de dos campanas asociadas a dos frecuencias dominantes. Esto muestra que la banda de frecuencia dominante varía entre distintas zonas, siendo mayor en la Zona I y la Zona II, le siguen la Zona III c y la Zona III d. Las restantes tienen una banda de frecuencias más angosta. La Zona III b muestra mayores amplitudes en su función de densidad espectral. El filtro de Clough y Penzien no se ajustó completamente a la curva de la Zona III d

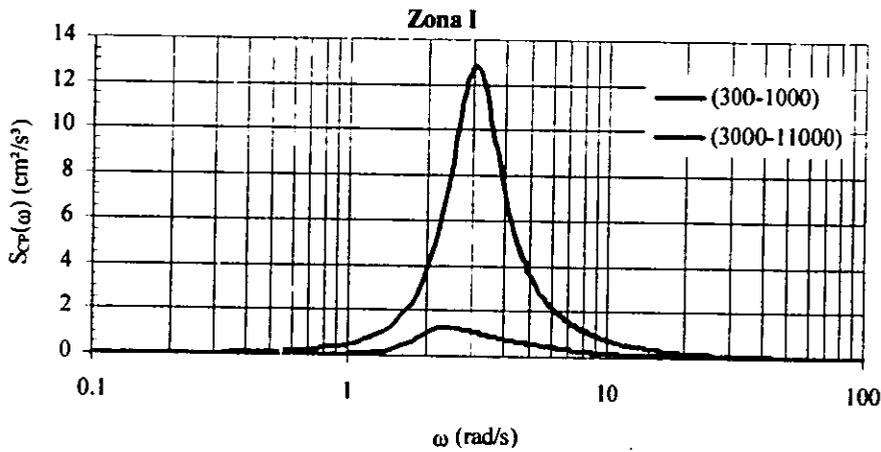
(I.A.>50000) ya que tiene tres campanas o frecuencias características y el filtro sólo cuenta con dos.

Tabla 6.3 Los periodos dominantes en las Zonas I, II, III a, b, c y d son las siguientes:

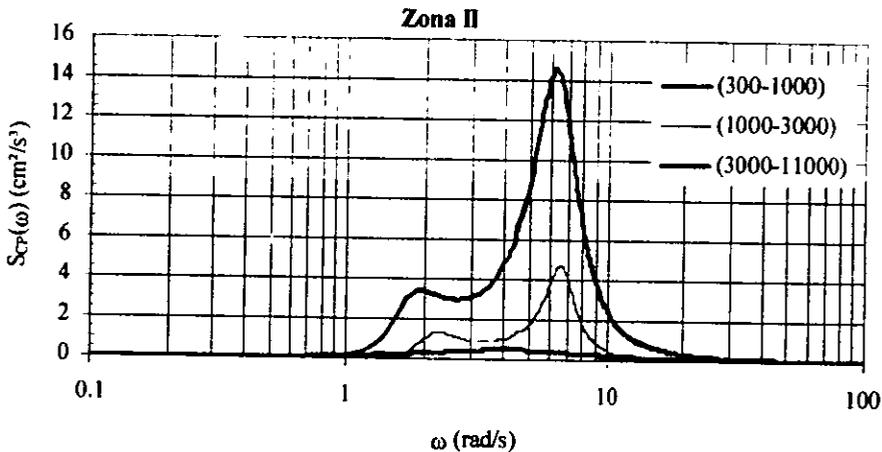
Zonas	Intensidad de Arias				
	(300-1000)	(1000-3000)	(3000-11000)	(11000-50000)	(>50000)
I	2.56 s		1.95 s		
II	1.46 s	0.94 s	0.95 s		
III a		1.3 s	1.37 s		
III b		2.1 s	2.16 s	2.24 s	2.05 s
III c		2.98 s	3.1 s	2.92 s	3.63 s
III d		3.95 s	4.25 s	4.16 s	3.72 s

Como se puede observar en la tabla 6.3, a medida que el suelo es más blando las frecuencias dominantes son menores (periodos mayores), sin considerar la zona I ya que tiene otro comportamiento.

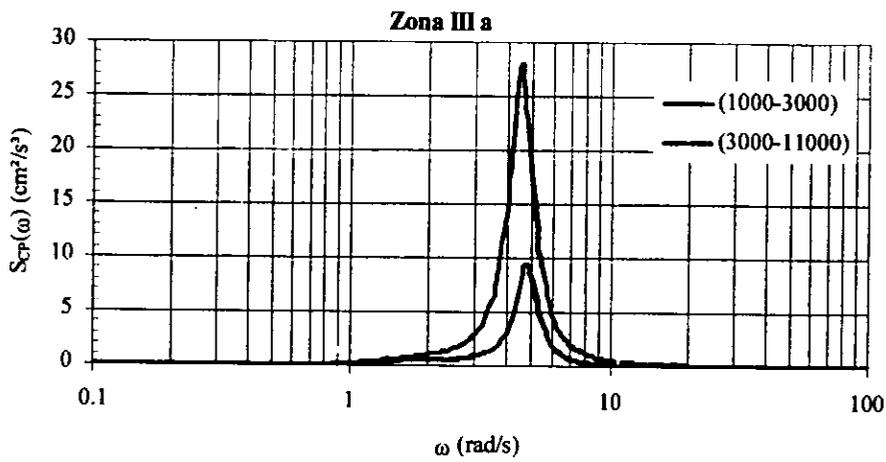
Gráfica 6.57



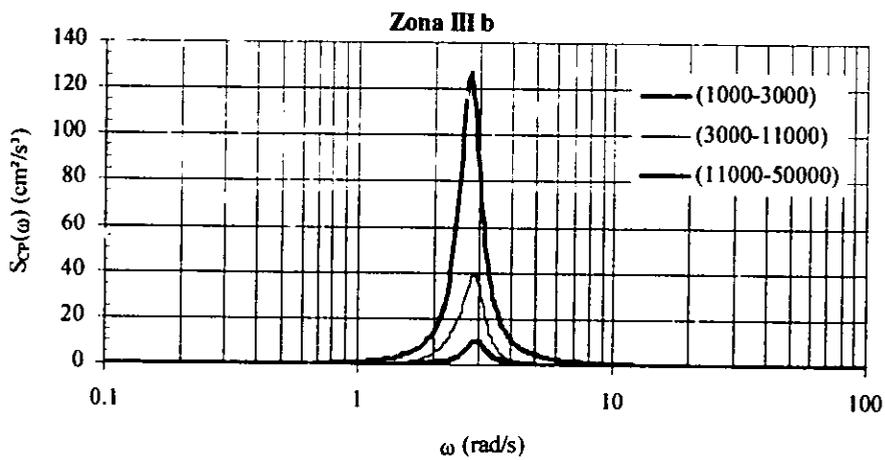
Gráfica 6.58



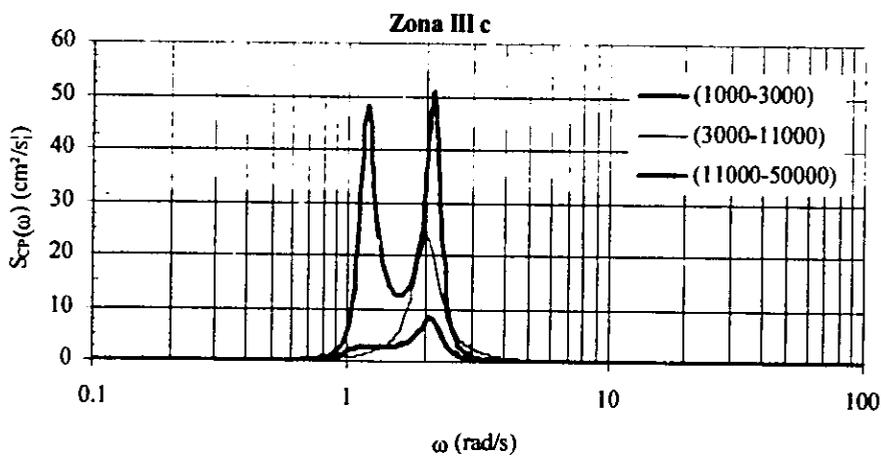
Gráfica 6.59



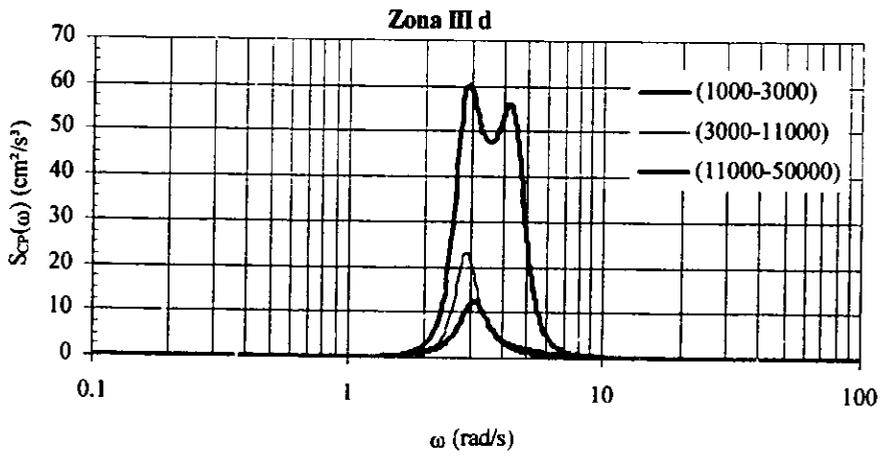
Gráfica 6.61



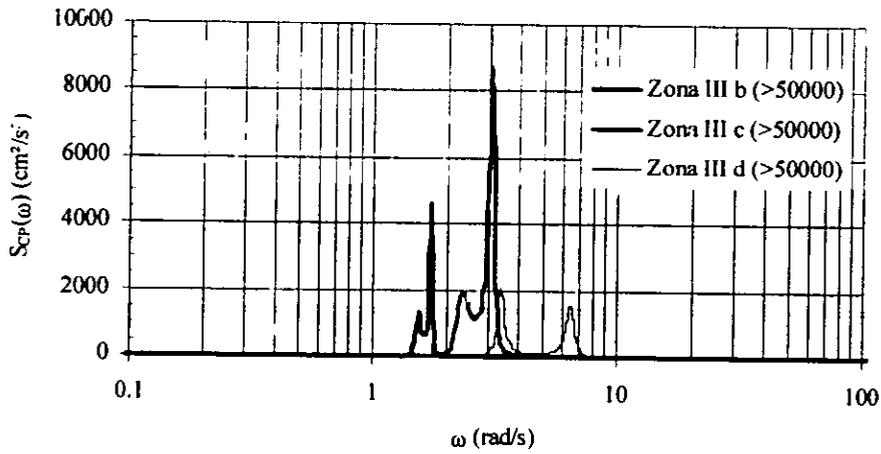
Gráfica 6.60



Gráfica 6.61



Gráfica 6.62



Capítulo

7

Espectros de respuesta lineal

Se obtienen los espectros de desplazamiento y de pseudo-aceleración representativos de cada zona y de cada subgrupo. En primer lugar se dan algunos conceptos importantes que describen el procedimiento para obtener los espectros de respuesta lineal.

7.1 La ecuación de movimiento

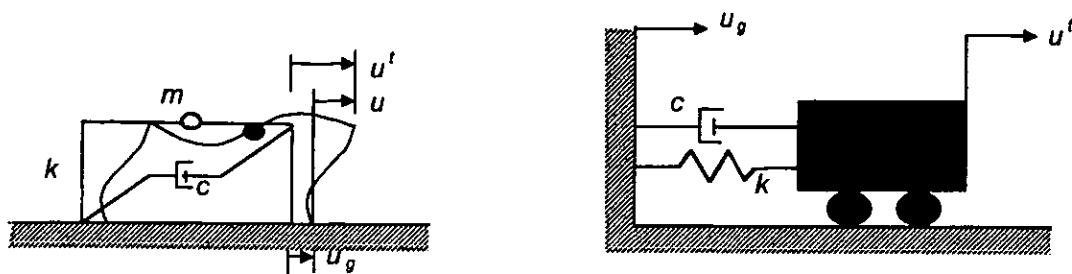
La ecuación de movimiento está dada por³²:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad [7.1]$$

Esta describe la respuesta de una estructura bajo una excitación sísmica. Para una aceleración del suelo dada, el problema por resolver se define completamente por un sistema, de un grado de libertad (S1GL), con masa (m), rigidez (k) y propiedades de amortiguamiento (c) conocidas.

³² R.Clough y J.Penzien. *Dynamics of Structures*. Singapore, McGraw Hill, 1993 (2a edición). P. 555-586.

Figura 7.1 Sistema de un grado de libertad



Dividiendo la ecuación [7.1] entre m se tiene:

$$u + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2u = -u_g(t) \quad [7.2]$$

Se puede ver que para una $u_g(t)$ dada, la respuesta de desplazamiento $u(t)$ de un sistema solo depende de la frecuencia natural ω_n o el periodo natural T_n del sistema y de su fracción de amortiguamiento crítico ξ ; escrito formalmente $u \equiv u(t, T_n, \xi)$.

La aceleración del suelo durante los temblores varía irregularmente por lo que es muy difícil resolver analíticamente la ecuación de movimiento. Por lo tanto, se hace uso de métodos numéricos para determinar la respuesta estructural.

Es de gran importancia para la ingeniería estructural el desplazamiento del sistema, o desplazamiento $u(t)$ de la masa debido al movimiento del suelo.

Puede utilizarse una solución numérica para dar resultados de cantidades relativas de $u(t)$, $\dot{u}(t)$ y $u''(t)$, como también respuestas totales $u'(t)$, $\dot{u}'(t)$ y $u''(t)$.

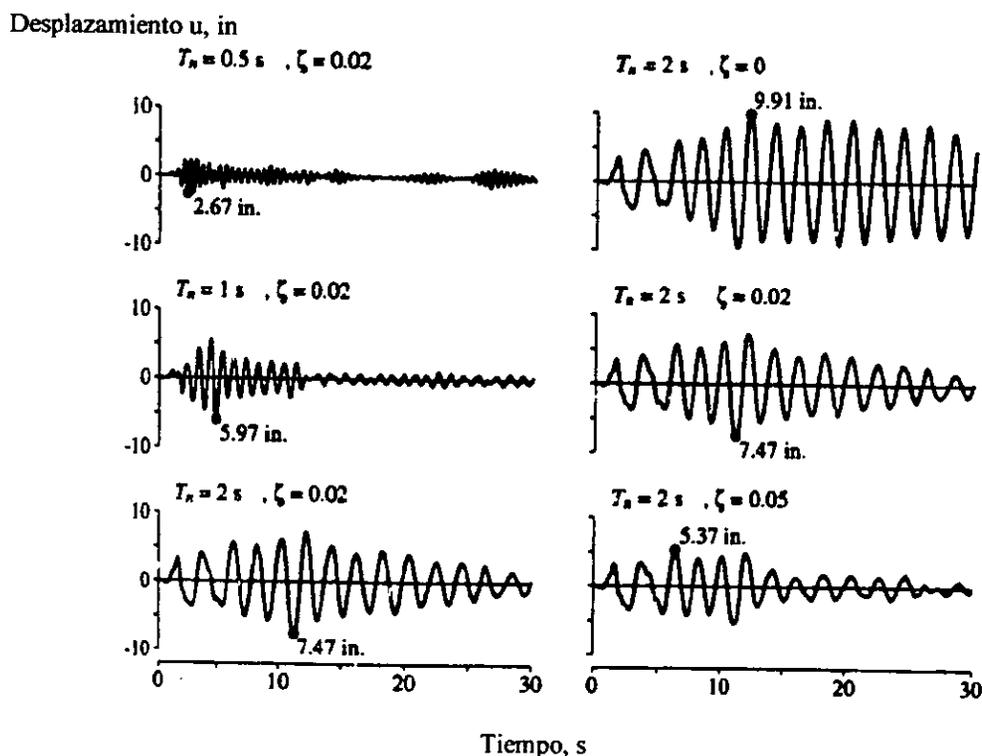
7.2 Historia de respuesta y concepto de pseudo-aceleración³³

La figura 7.2 muestra la respuesta de desplazamiento de tres sistemas diferentes debido a un movimiento sísmico.

³³ Anil Chopra, *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey, Prentice Hall, 1995. p. 155-211.

En la figura 7.2 (derecha) el periodo de vibración T_n es el mismo para los tres sistemas, y la diferencia radica en el amortiguamiento. A mayor razón de amortiguamiento, menor desplazamiento.

Figura 7.2



Una vez que la historia de desplazamiento $u(t)$ ha sido evaluada por análisis dinámico de la estructura, las fuerzas internas pueden determinarse por métodos estáticos en cada momento.

$$f_s(t) = ku(t) \quad [7.3]$$

donde k es la rigidez lateral del sistema. Expresando k en términos de la masa m

$$f_s(t) = m\omega_n^2 u(t) = mA(t) \quad [7.4]$$

donde

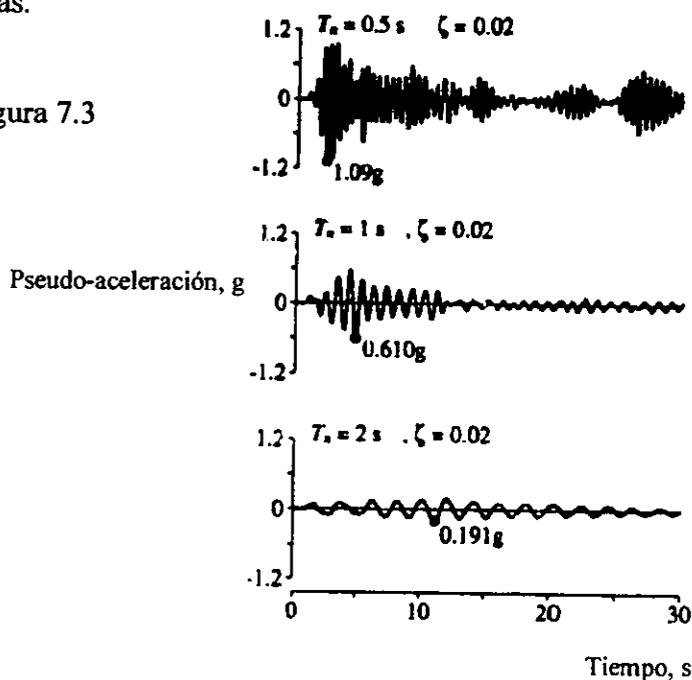
$$A(t) = \omega_n^2 u(t) \quad [7.5]$$

La fuerza estática equivalente es m veces $A(t)$, no m veces la aceleración total $u_g(t)$.

Es decir, la pseudo-aceleración $A(t) = S_A$ puede obtenerse a partir de la respuesta de desplazamiento $u(t)$.

Multiplicando cada respuesta $u(t)$ correspondiente a los tres sistemas de la gráfica 7.2 a por su respectivo valor $\omega_n^2 = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2$, se obtiene la respuesta de pseudo-aceleración de los sistemas.

Figura 7.3



7.3 Espectros de respuesta

El espectro muestra la respuesta de valores máximos de un S1GL de una componente en particular del movimiento del suelo, como se muestra en la figura 7.4. También provee un acercamiento práctico para aplicar el conocimiento de la dinámica estructural para diseñar la estructura y la magnitud de las fuerzas laterales.

A la gráfica que representa el valor máximo de una respuesta en función del periodo natural de vibrar T_n del sistema o a la frecuencia circular ω_n o a la frecuencia cíclica f_n se le llama Espectro de Respuesta. Cada gráfica es para un S1GL que cuenta con una fracción de amortiguamiento dada ξ .

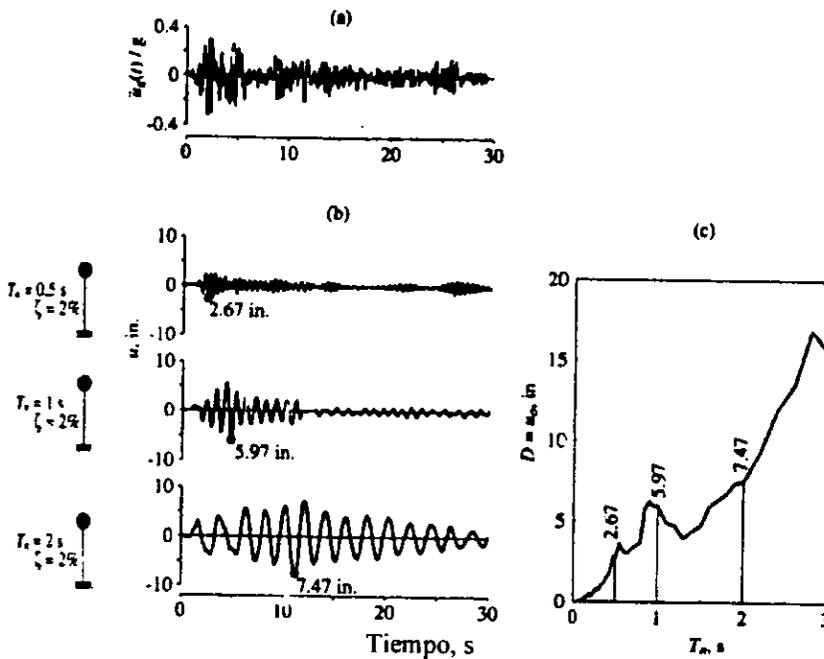
El espectro de respuesta de desplazamiento es la gráfica de u_0 vs T_n dada ξ . De igual forma para \dot{u}_0 es el espectro de respuesta de velocidad, para \ddot{u}_0 es el espectro de respuesta de aceleración.

Es decir:

$$\begin{aligned}
 u_0(T_n, \xi) &\equiv \text{máx}_t |u(t, T_n, \xi)| \\
 \dot{u}_0(T_n, \xi) &\equiv \text{máx}_t |\dot{u}(t, T_n, \xi)| \\
 \ddot{u}_0(T_n, \xi) &\equiv \text{máx}_t |\ddot{u}(t, T_n, \xi)|
 \end{aligned}
 \tag{7.6}$$

Para encontrar las fuerzas internas sólo se necesita el desplazamiento $u(t)$. Entonces, el espectro de desplazamiento da la información necesaria para encontrar los valores de desplazamiento y de fuerzas internas.

Figura 7.4 Procedimiento para determinar el espectro de respuesta D.



La pseudo-velocidad (S_v) se evalúa mediante la siguiente expresión:

$$S_v = \omega_n D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad [7.7]$$

En donde ω_n es la frecuencia natural del sistema.

El prefijo pseudo es usado porque (S_v) no es igual al valor máximo de velocidad \dot{u}_0 .

El espectro de respuesta de pseudo-velocidad es la gráfica de S_v como función del periodo T_n o la frecuencia f_n del sistema, figura 7.5b.

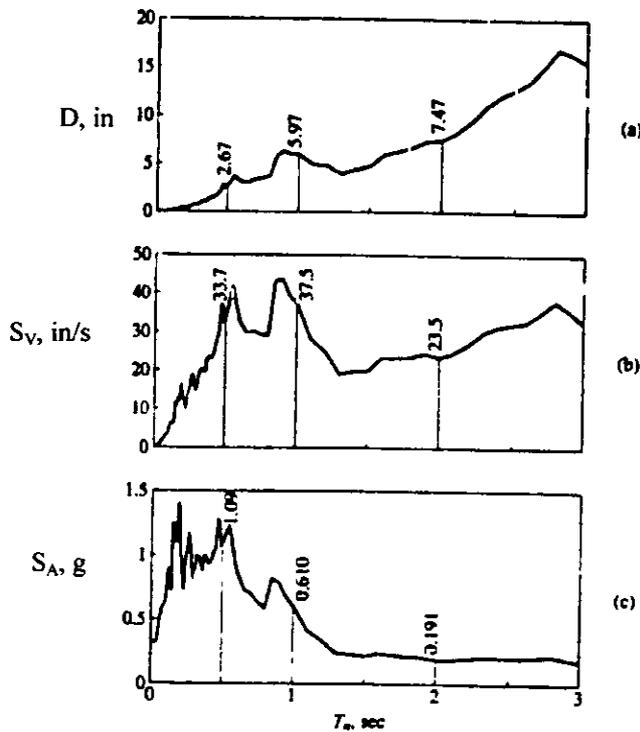


Figura 7.5 Espectros de desplazamiento, pseudo-velocidad y pseudo-aceleración lineal

La pseudo-aceleración S_A del S1GL con frecuencia ω_n se relaciona con su desplazamiento máxima $D \equiv u_0$ mediante:

$$S_A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n} \right)^2 D \quad [7.8]$$

La cantidad S_A tiene unidades de aceleración y se relaciona con el valor máximo del cortante basal V_{bo} (o al valor máximo de la fuerza estática equivalente f_{so}).

$$V_{bo} = f_{so} = mS_A \quad [7.9]$$

El cortante basal máximo puede ser escrito

$$V_{bo} = \frac{S_A}{g} w \quad [7.10]$$

y $\frac{S_A}{g}$ es el coeficiente de cortante basal o coeficiente de fuerza lateral.

Donde g es el valor de la gravedad y w el peso de la estructura.

7.4 Construcción de espectros de respuesta

El espectro de respuesta para una componente $u_g(t)$ puede desarrollarse siguiendo los pasos que a continuación se describen:

1. Se establece un intervalo de muestreo.
2. Se selecciona un periodo natural T_n y una fracción de amortiguamiento ξ del S1GL.
3. Se procesa por medio de métodos numéricos (método de las ocho constantes, integral de Duhamel, etc.), la información y se obtiene la respuesta de desplazamiento $u(t)$ debido a una aceleración $u_g(t)$.
4. Se determina u_0 , el valor máximo de $u(t)$.
5. Las ordenadas espectrales son $D = u_0$, $S_V = \frac{2\pi}{T_n} D$ y $S_A = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D$.
6. Se repiten los pasos 2 al 5 para un intervalo de valores T_n y ξ abarcando los sistemas posibles de interés.
7. Se presentan los resultados de los pasos 2 al 6 gráficamente para producir espectros como los de la figura 7.5.

7.5 Resultados sobre espectros de respuesta

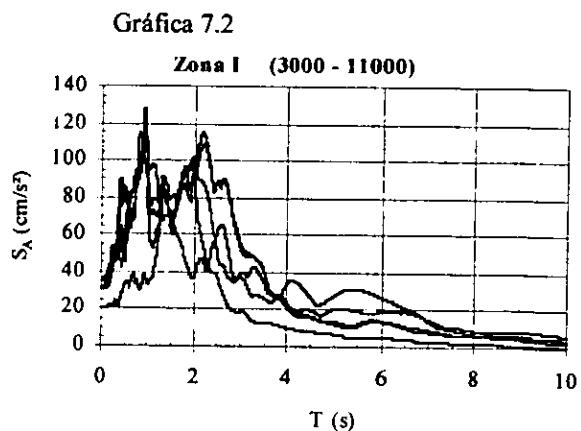
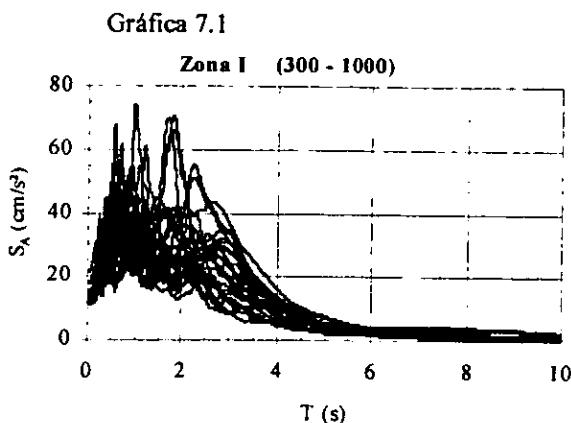
Para obtener los espectros de respuesta lineal de desplazamiento y de pseudo-aceleración se utilizó el programa de cómputo *Degtra*³⁴. Este sigue los pasos descritos en el subcapítulo 7.4, y aplica el método numérico de las ocho constantes para encontrar la historia de desplazamiento.

En las gráficas 7.1 a la 7.19 se muestran los espectros de respuesta lineal de pseudo-aceleración, y en las gráficas 7.20 a la 7.38 los espectros de respuesta lineal de desplazamiento organizados por subgrupos. También se muestran los valores medios de los espectros de pseudo-aceleración en las gráficas 7.39 a la 7.57 y en las gráficas 7.58 a la 7.75 se muestran los valores medios de los de desplazamiento.

Para observar el desarrollo de los espectros de respuesta lineal de cada subgrupo, en las gráficas 7.77 a la 7.88 se muestran dichos espectros acomodados por zonas. Las gráficas 7.77 a la 7.82 representan los espectros de pseudo-aceleración y las gráficas 7.83 a la 7.88 las de desplazamiento.

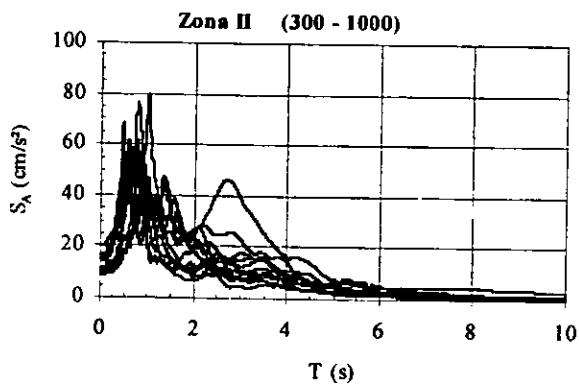
Cabe señalar que se utilizó un amortiguamiento del 5% del crítico.

Espectros de pseudo-aceleración de cada subgrupo

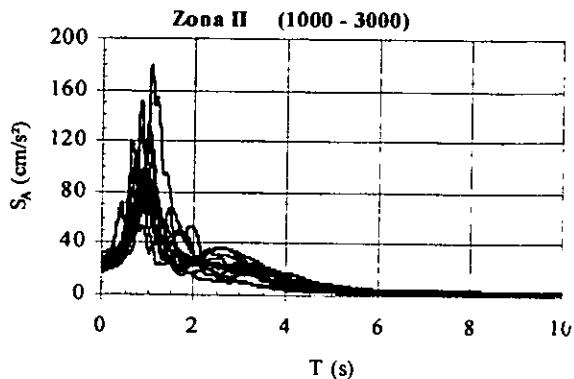


³⁴ M. Ordaz y C. Montoya, *Op. Cit.*

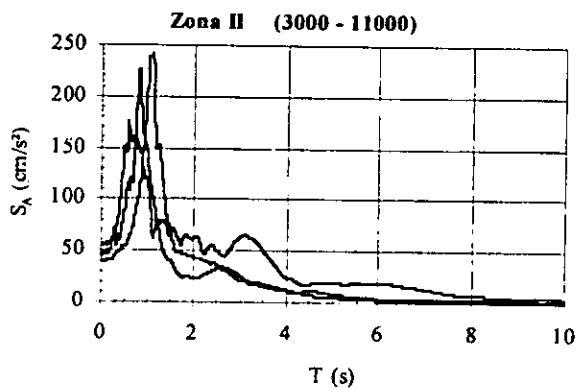
Gráfica 7.3



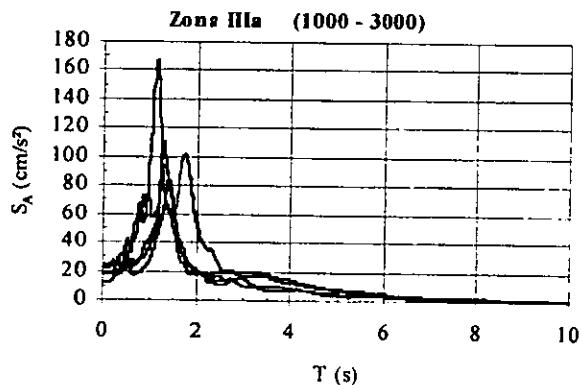
Gráfica 7.4



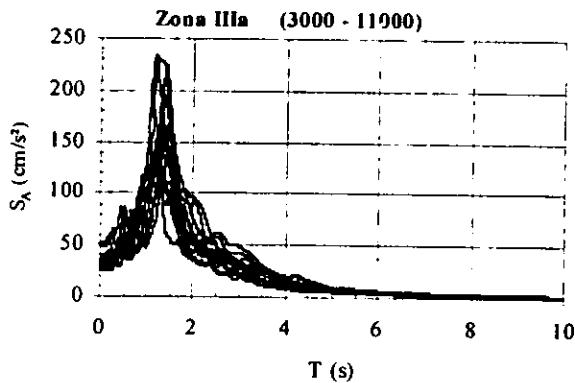
Gráfica 7.5



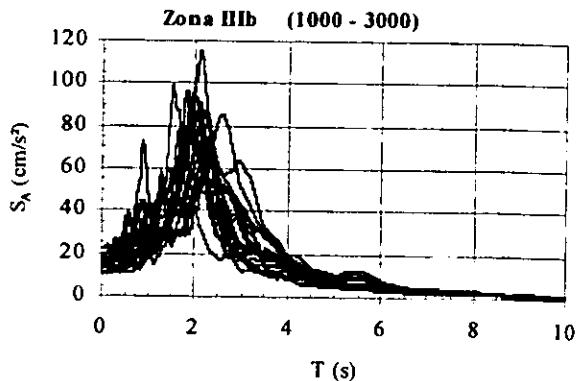
Gráfica 7.6



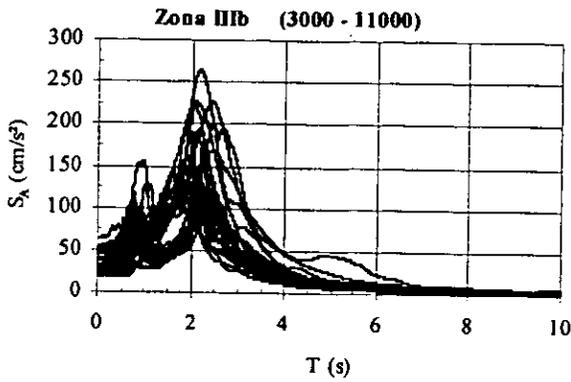
Gráfica 7.7



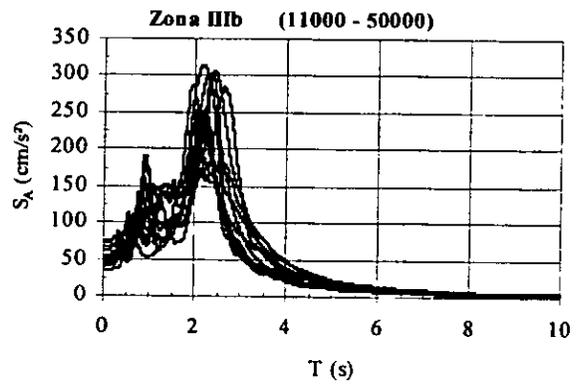
Gráfica 7.8



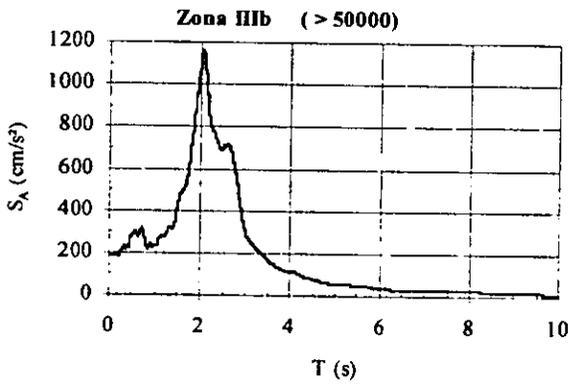
Gráfica 7.9



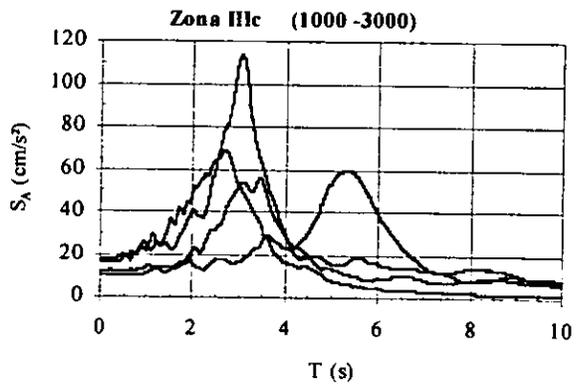
Gráfica 7.10



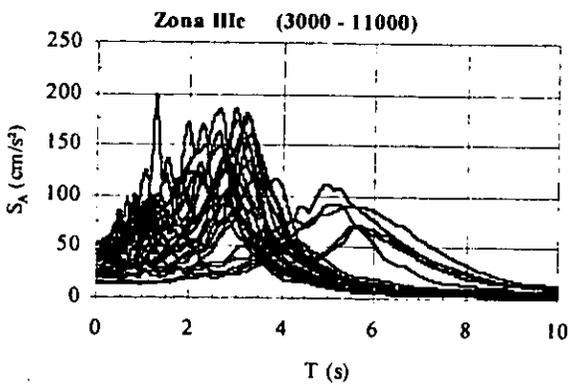
Gráfica 7.11



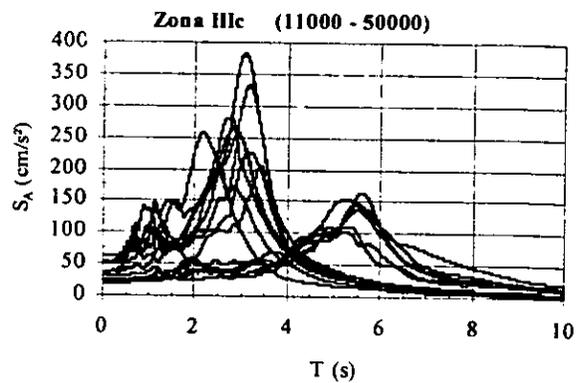
Gráfica 7.12



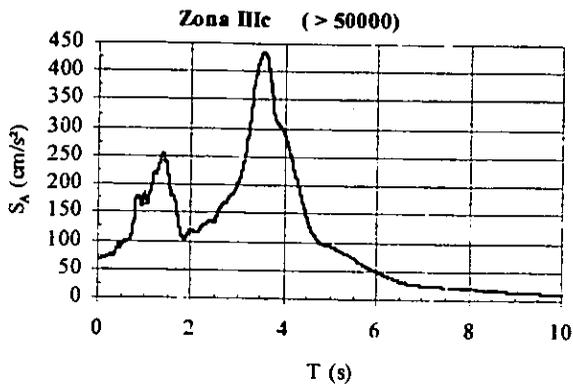
Gráfica 7.13



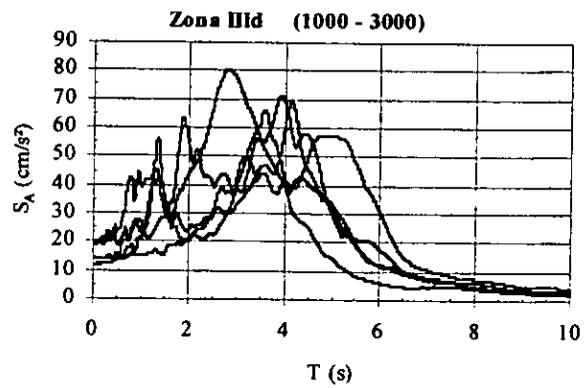
Gráfica 7.14



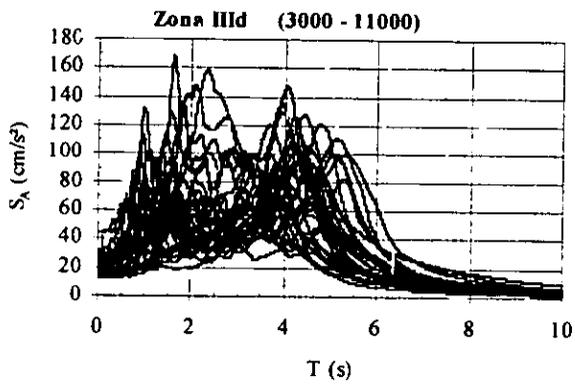
Gráfica 7.15



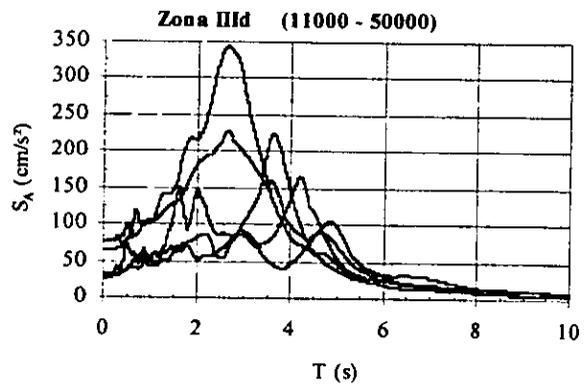
Gráfica 7.16



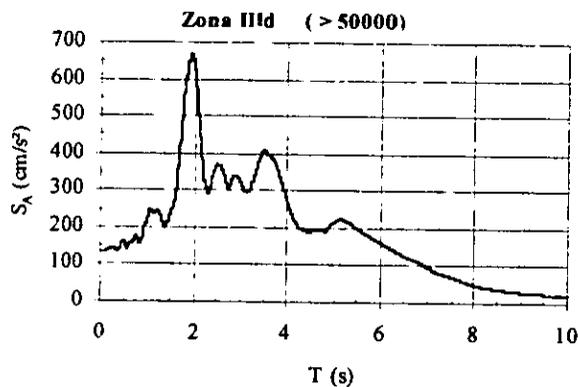
Gráfica 7.17



Gráfica 7.18

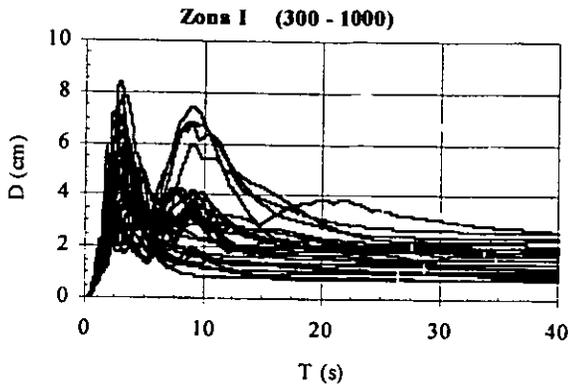


Gráfica 7.19

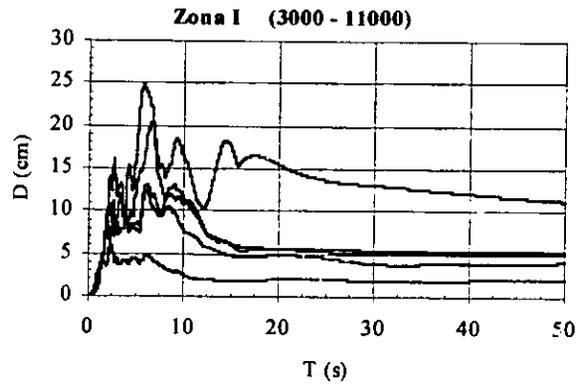


Espectros de desplazamiento de cada subgrupo

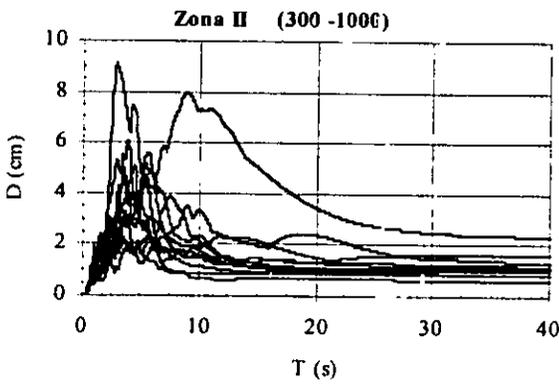
Gráfica 7.20



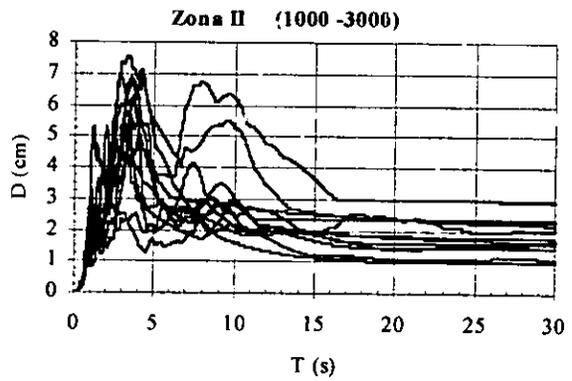
Gráfica 7.21



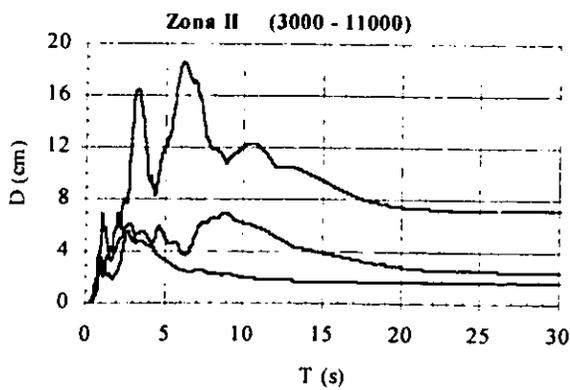
Gráfica 7.22



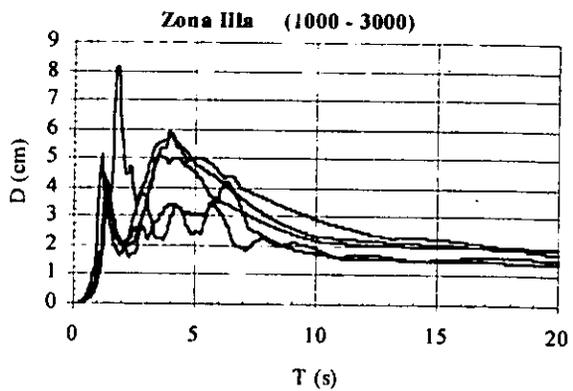
Gráfica 7.23



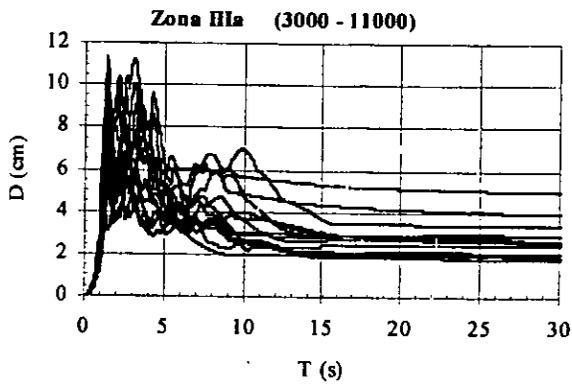
Gráfica 7.24



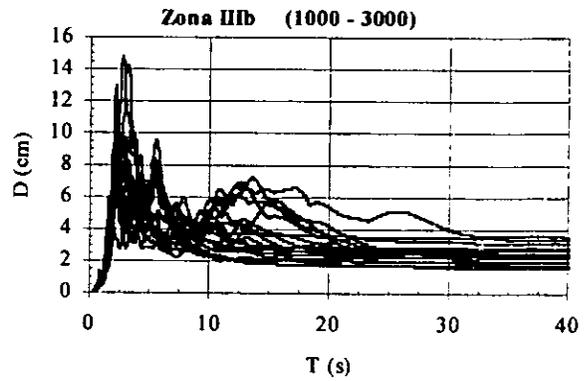
Gráfica 7.25



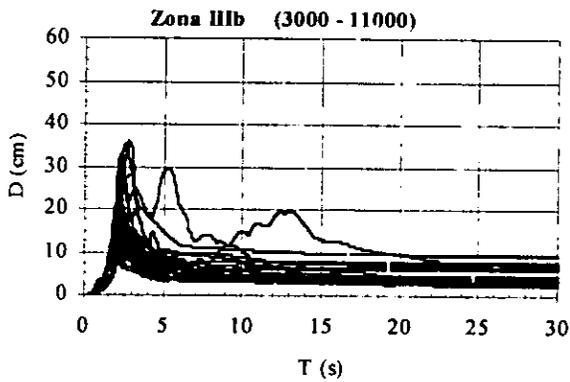
Gráfica 7.26



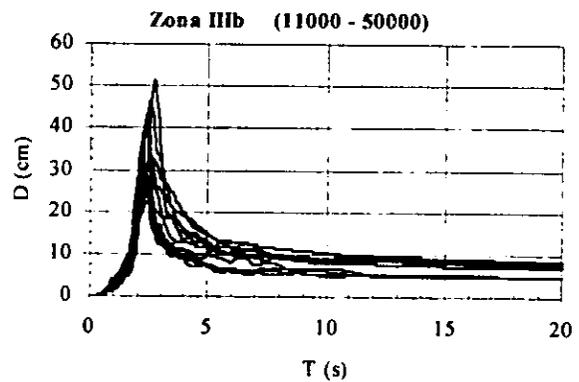
Gráfica 7.27



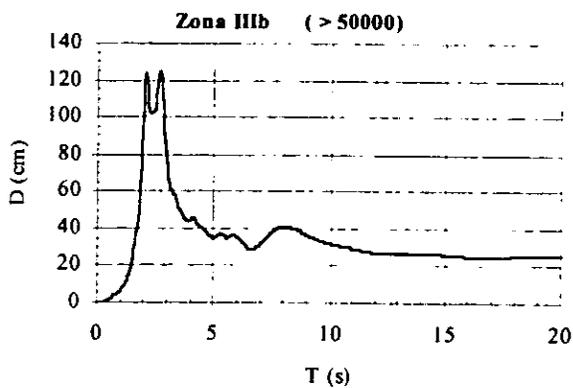
Gráfica 7.28



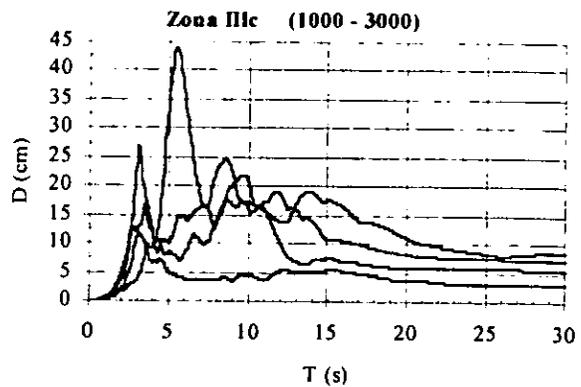
Gráfica 7.29



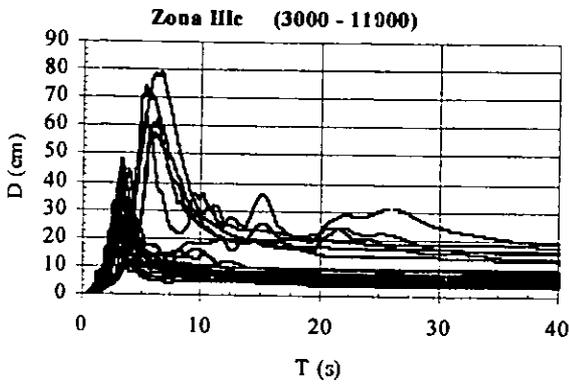
Gráfica 7.30



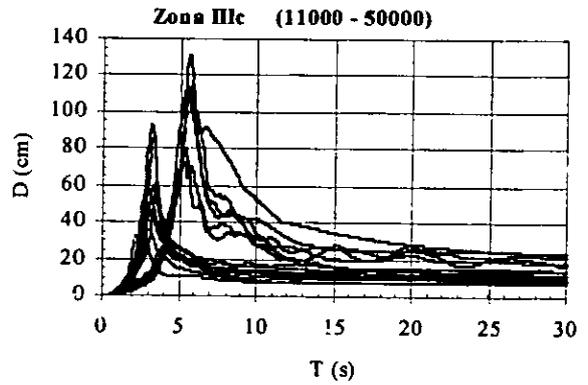
Gráfica 7.31



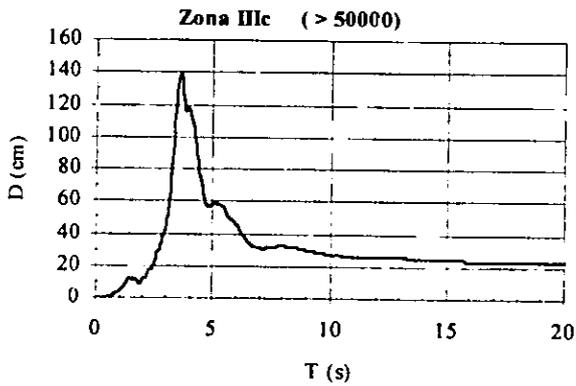
Gráfica 7.32



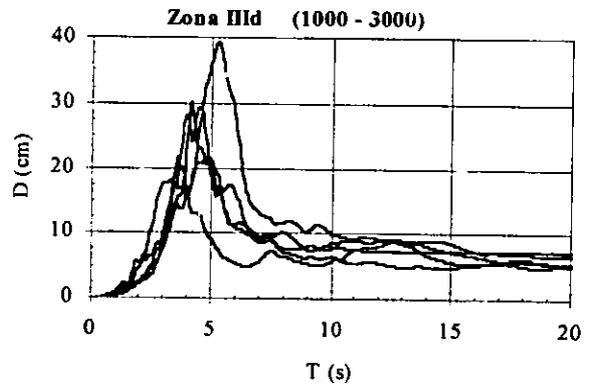
Gráfica 7.33



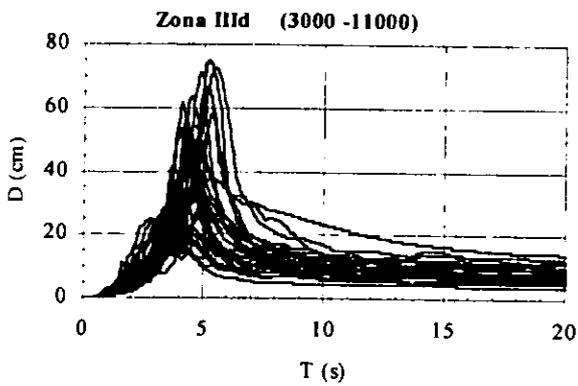
Gráfica 7.34



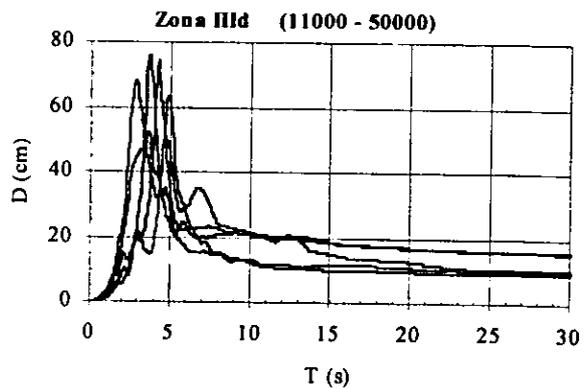
Gráfica 7.35



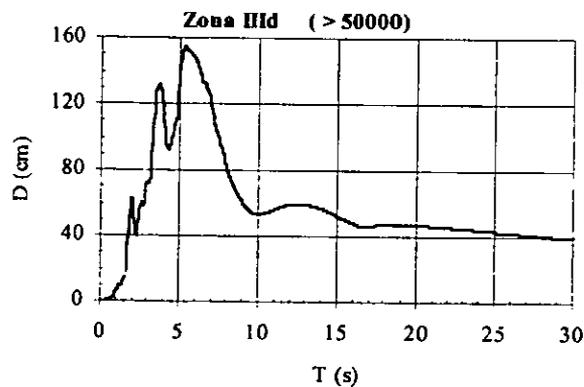
Gráfica 7.36



Gráfica 7.37



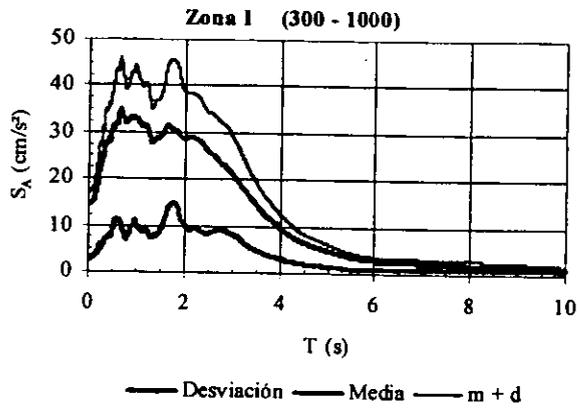
Gráfica 7.38



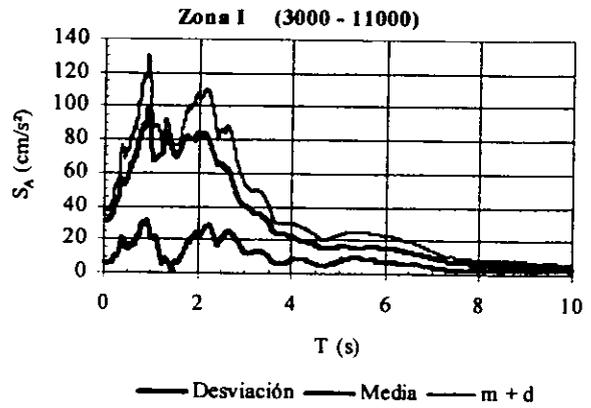
En las gráficas 7.1 a la 7.38, se puede apreciar cómo varían las curvas de los espectros de respuesta lineal de pseudo-aceleración y de desplazamiento de los registros contenidos en cada subgrupo. Se puede ver que dichas curvas llevan la misma tendencia sin embargo hay algunos subgrupos de la Zona IIIc y d que muestran dos tendencias diferentes esto es que muestran dos periodos característicos principales pero en todas las demás sólo se presenta uno.

Valores medios de los espectros de pseudo-aceleración de cada subgrupo

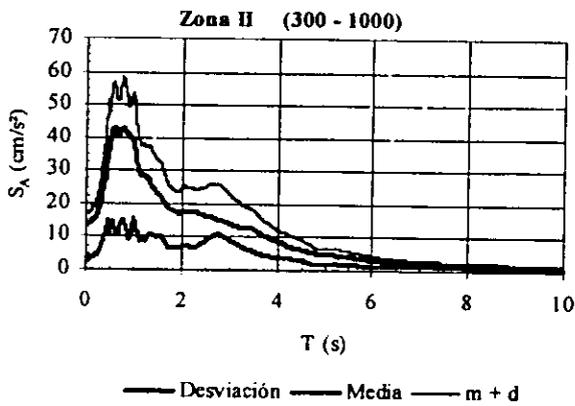
Gráfica 7.39



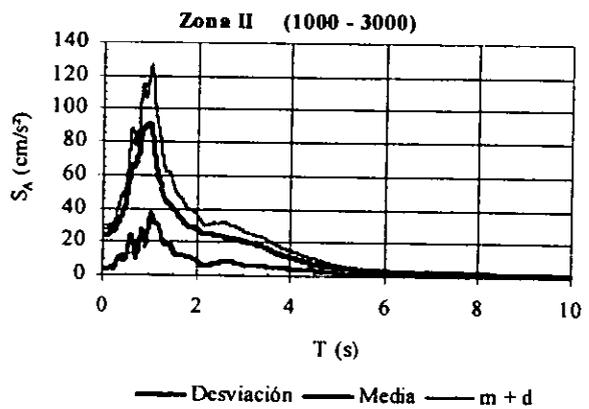
Gráfica 7.40



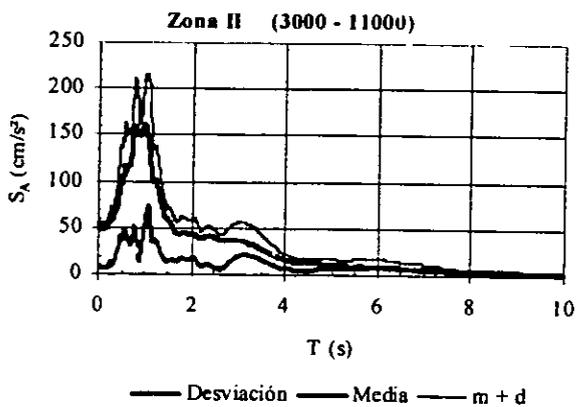
Gráfica 7.41



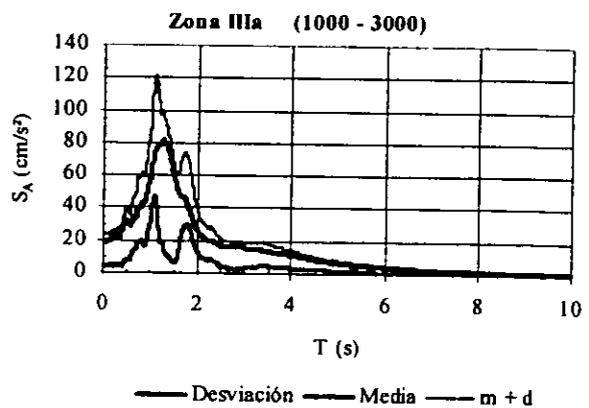
Gráfica 7.42



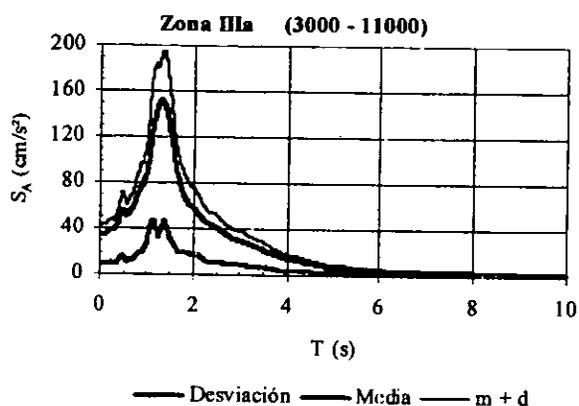
Gráfica 7.43



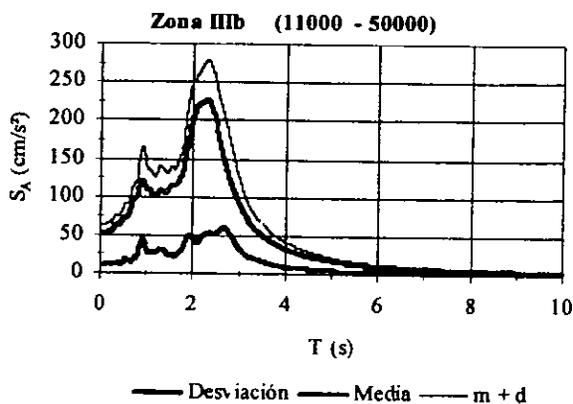
Gráfica 7.44



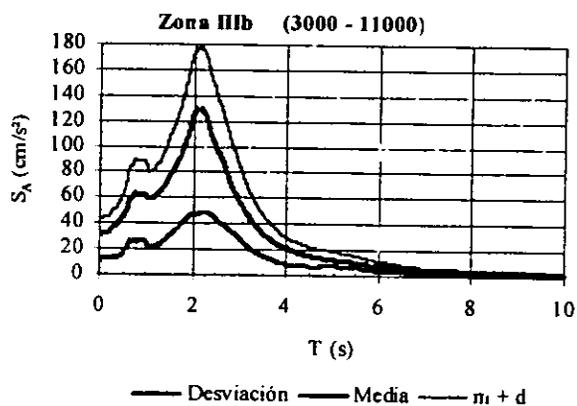
Gráfica 7.45



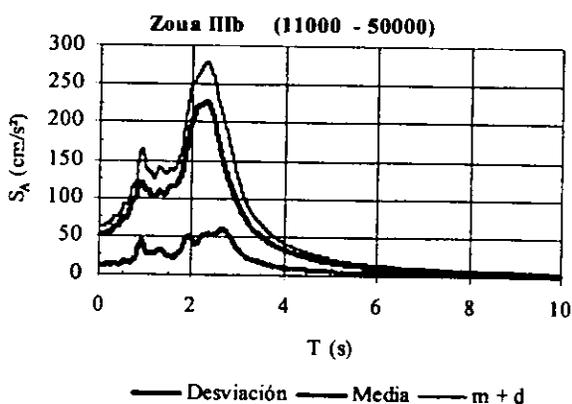
Gráfica 7.46



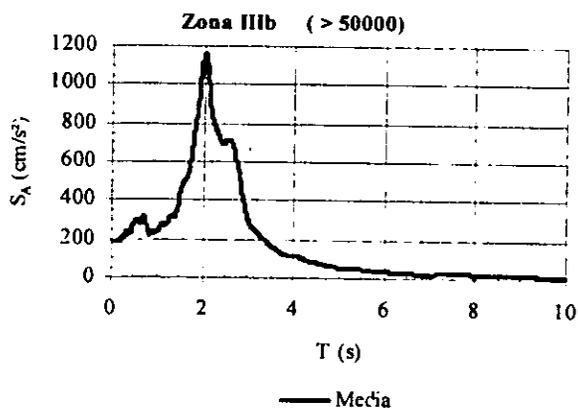
Gráfica 7.47



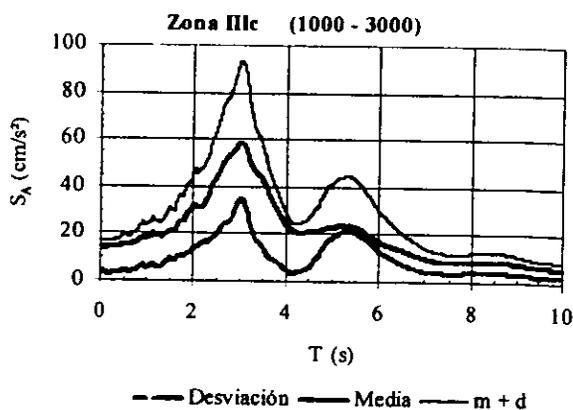
Gráfica 7.48



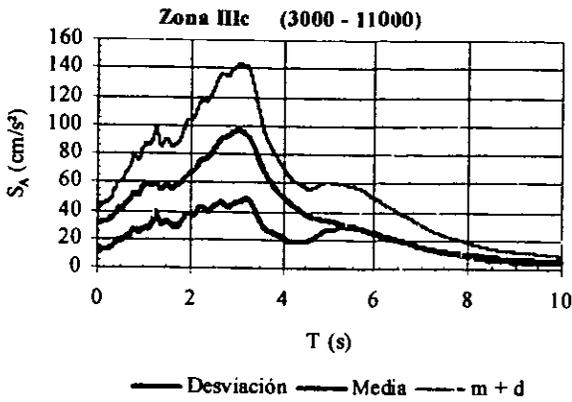
Gráfica 7.49



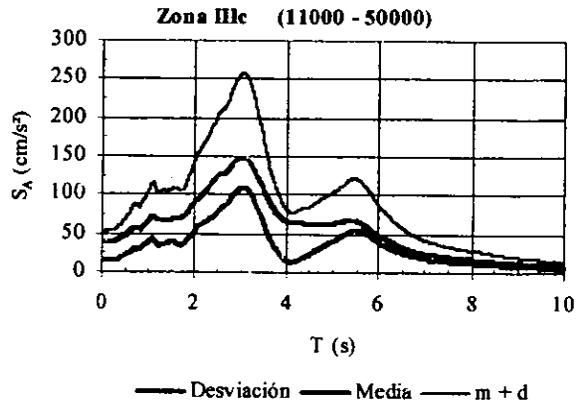
Gráfica 7.50



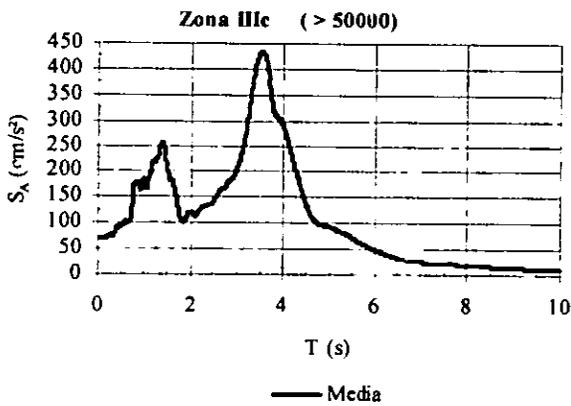
Gráfica 7.51



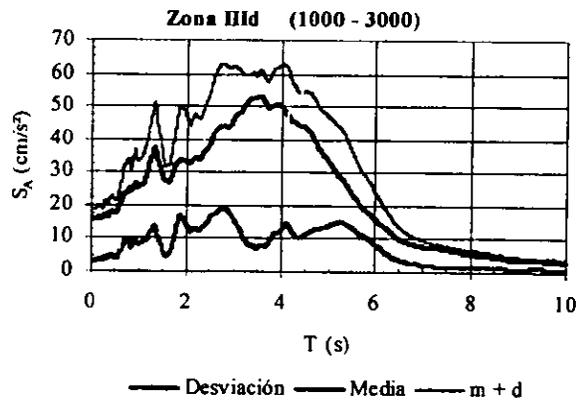
Gráfica 7.52



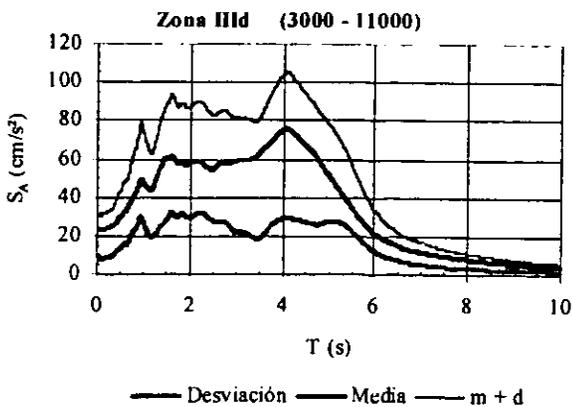
Gráfica 7.53



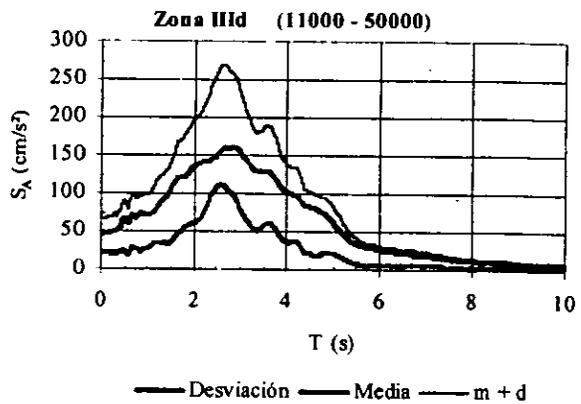
Gráfica 7.54



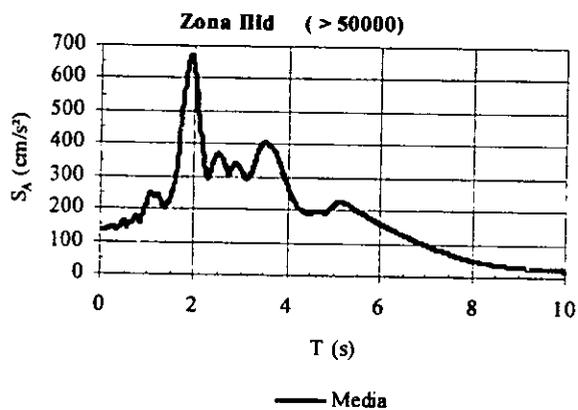
Gráfica 7.55



Gráfica 7.56

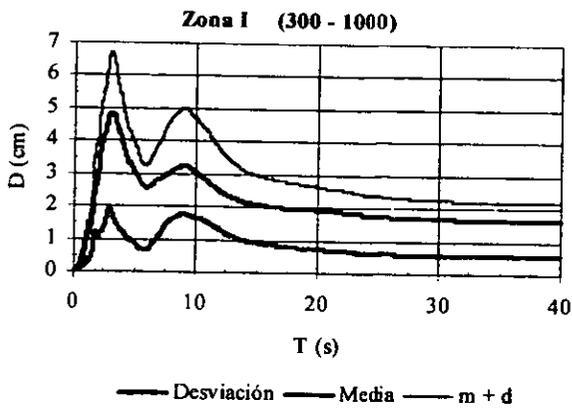


Gráfica 7.57

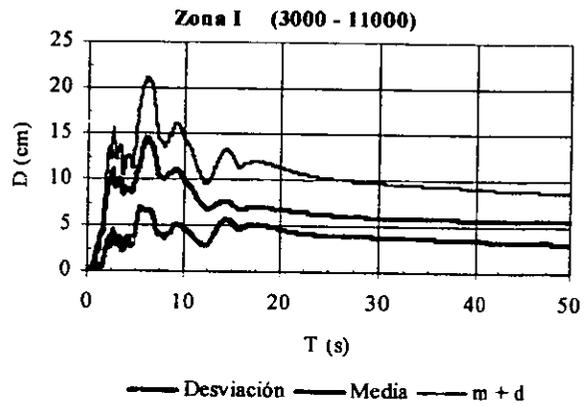


Valores medios de los espectros de desplazamiento de cada subgrupo

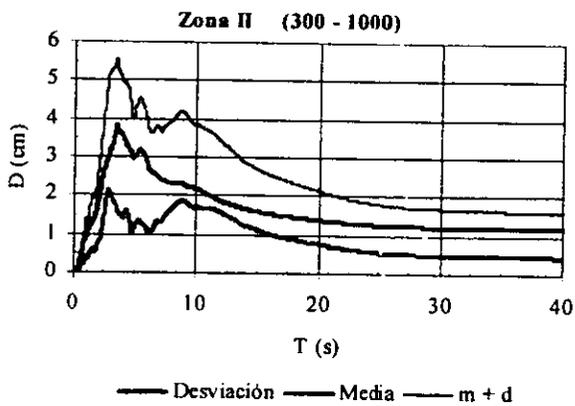
Gráfica 7.58



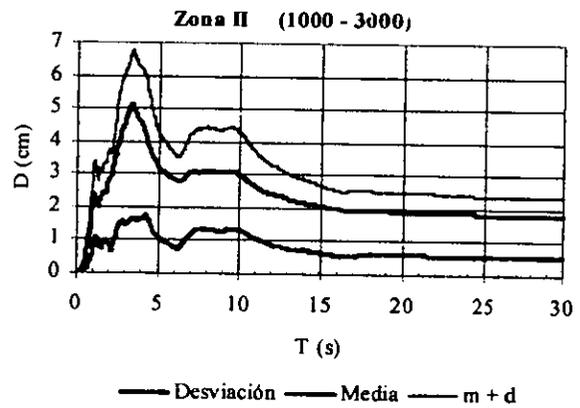
Gráfica 7.59



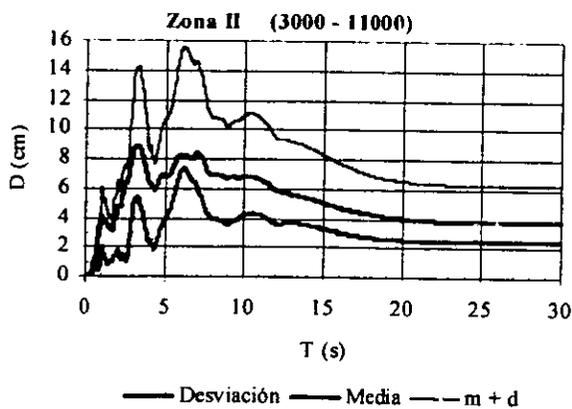
Gráfica 7.60



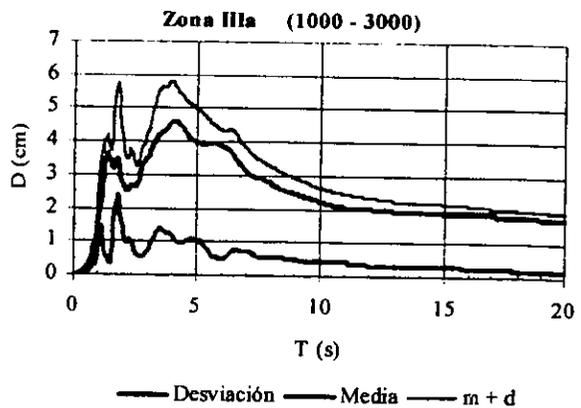
Gráfica 7.61



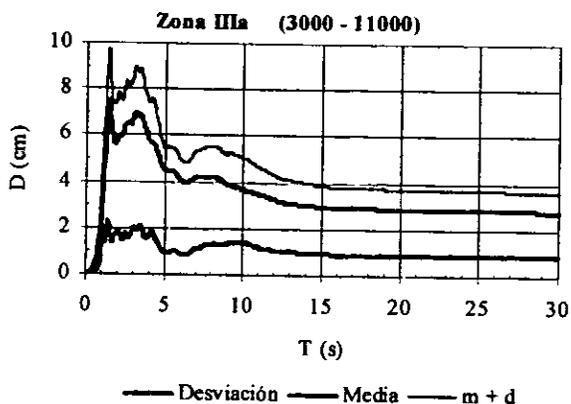
Gráfica 7.62



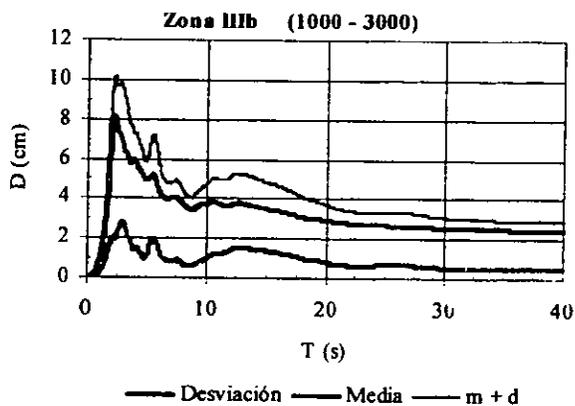
Gráfica 7.63



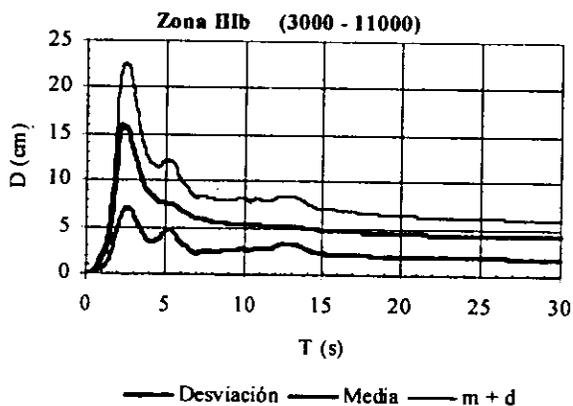
Gráfica 7.64



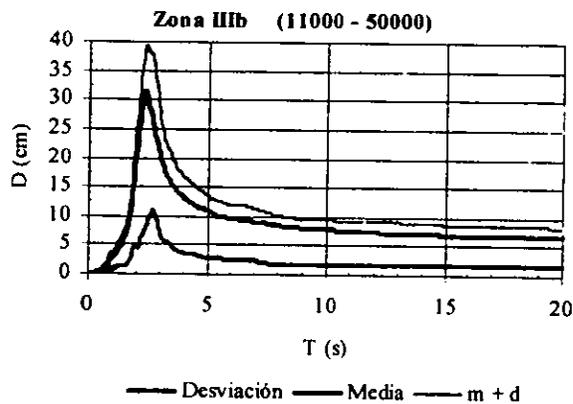
Gráfica 7.65



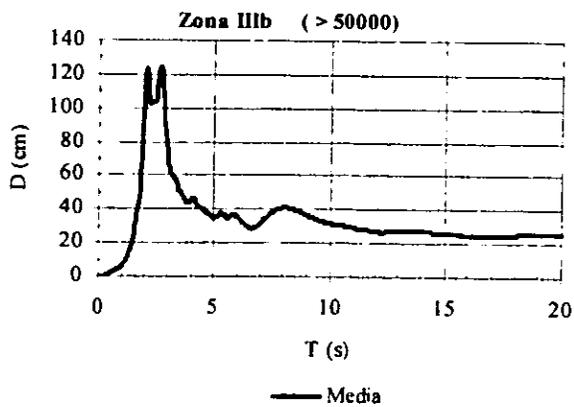
Gráfica 7.66



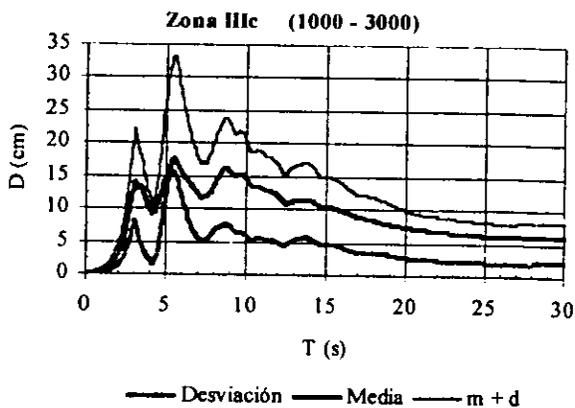
Gráfica 7.67



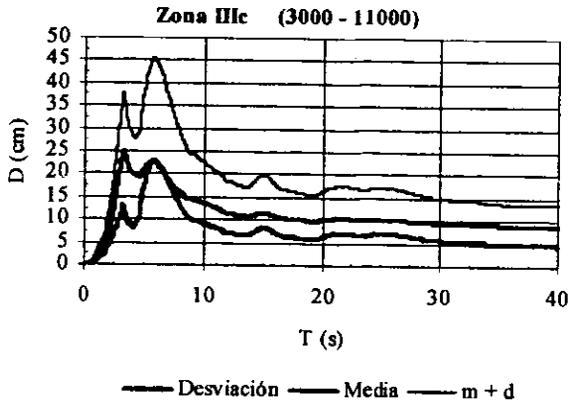
Gráfica 7.68



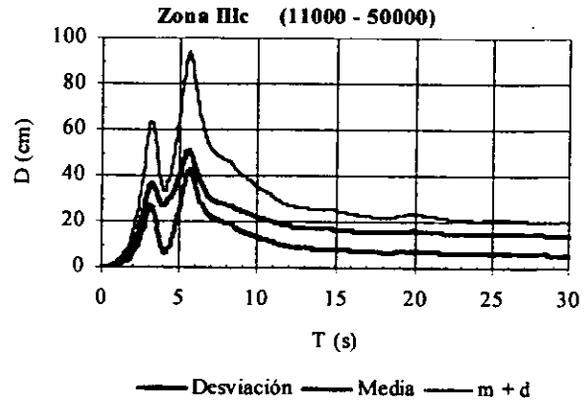
Gráfica 7.69



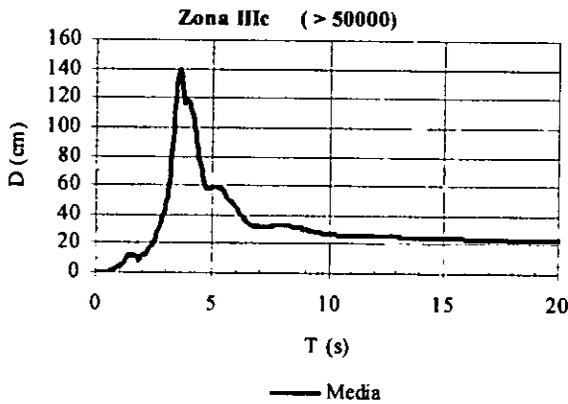
Gráfica 7.70



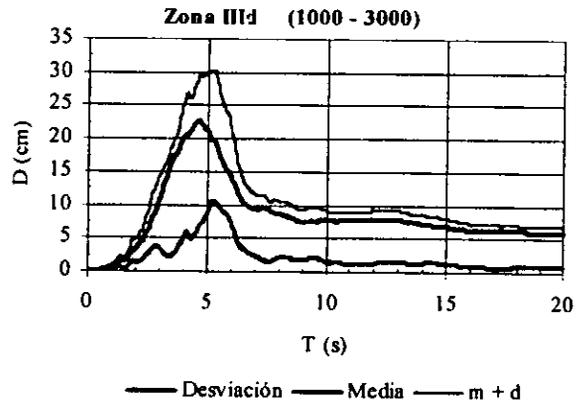
Gráfica 7.71



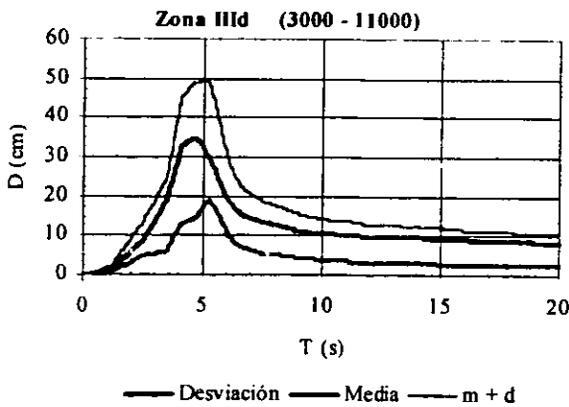
Gráfica 7.72



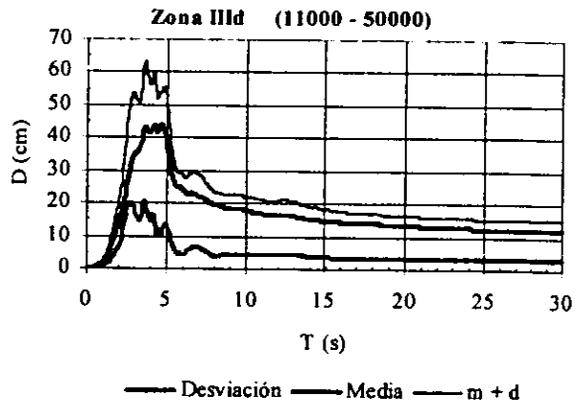
Gráfica 7.73



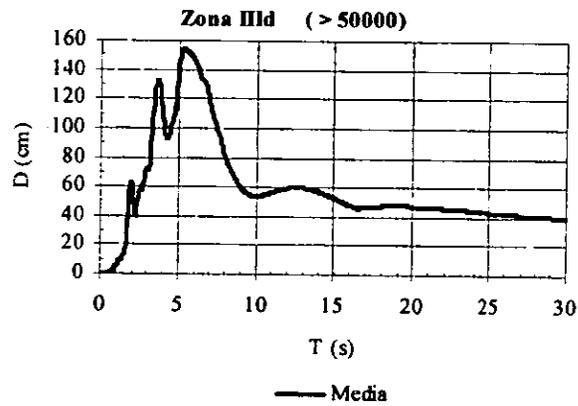
Gráfica 7.74



Gráfica 7.75



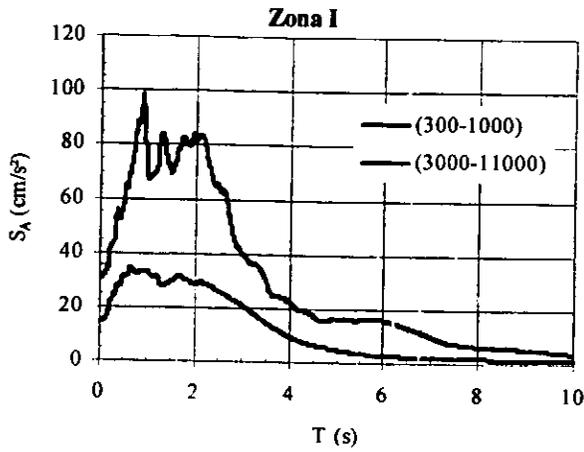
Gráfica 7.76



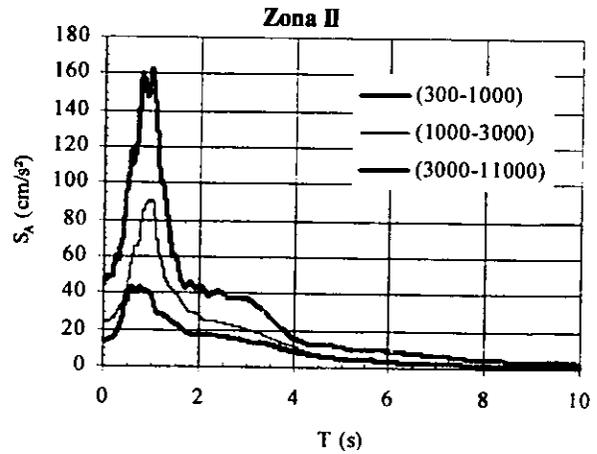
En las gráficas 7.39 a la 7.76 se presentan los valores medios de los espectros de respuesta lineal de pseudo-aceleración y de desplazamiento de cada subgrupo, así como también, las curvas de desviación estándar. Con estas curvas de valor medio es más fácil observar la forma de los espectros de cada subgrupo, y sus valores máximos de aceleración y de desplazamiento como también del periodo son establecidos con mayor facilidad.

Espectros de pseudo-aceleración medios de cada subgrupo ordenados por zonas

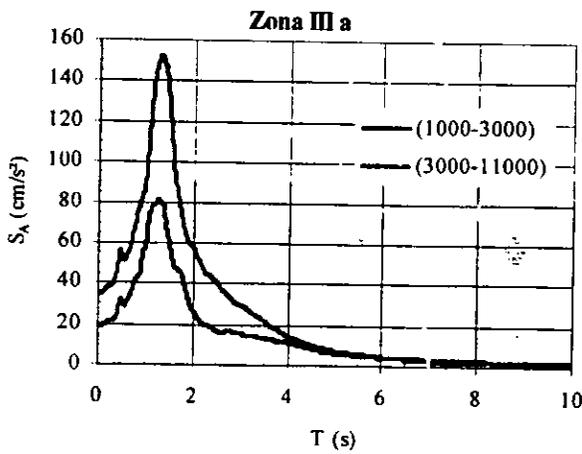
Gráfica 7.77



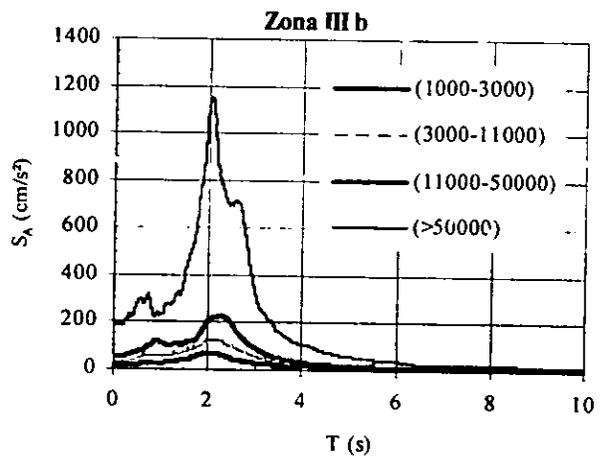
Gráfica 7.78



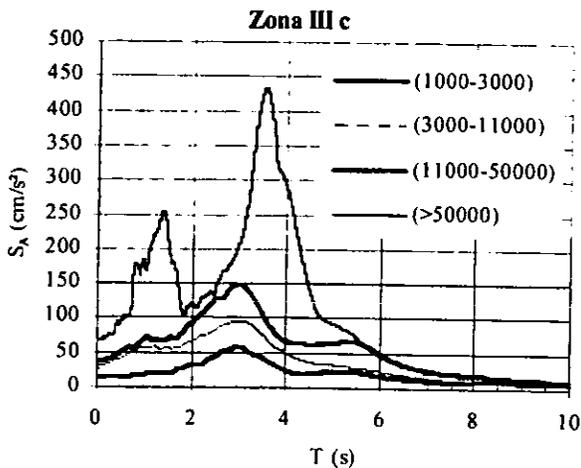
Gráfica 7.79



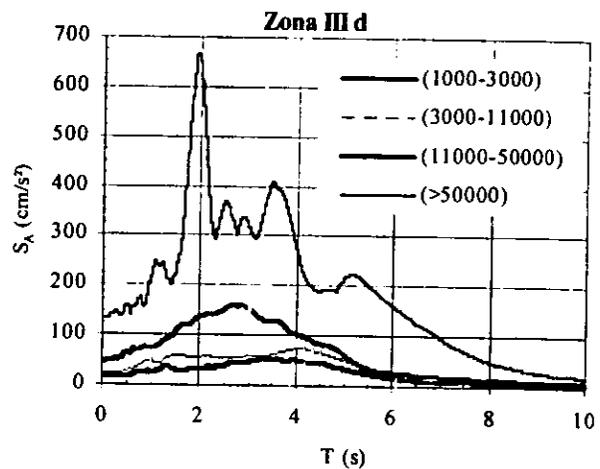
Gráfica 7.80



Gráfica 7.81

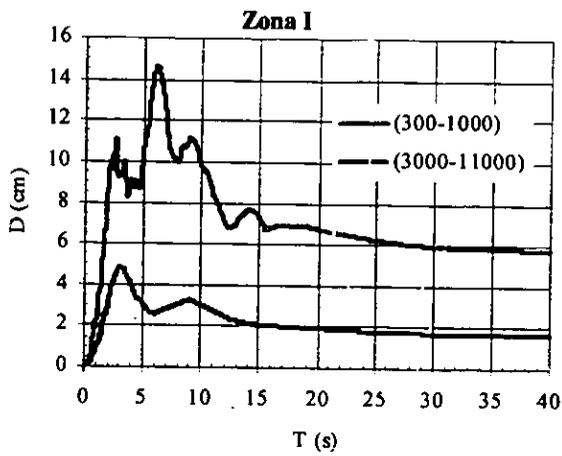


Gráfica 7.82

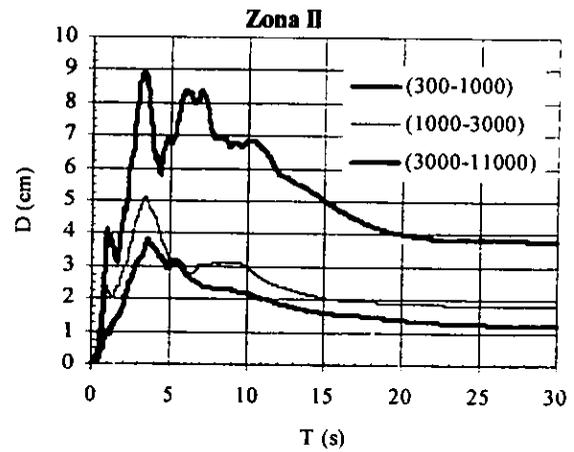


Espectros de desplazamiento medios de cada subgrupo ordenados por zonas

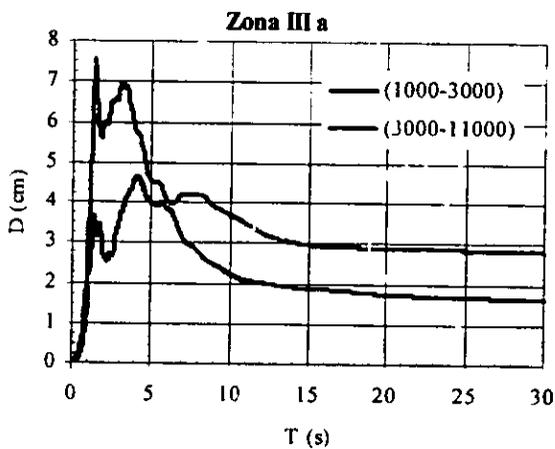
Gráfica 7.83



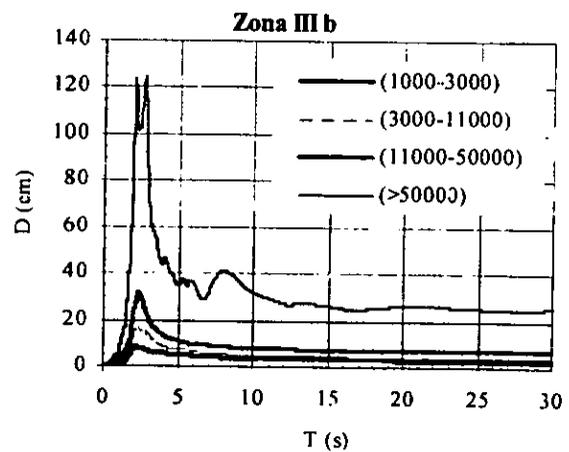
Gráfica 7.84



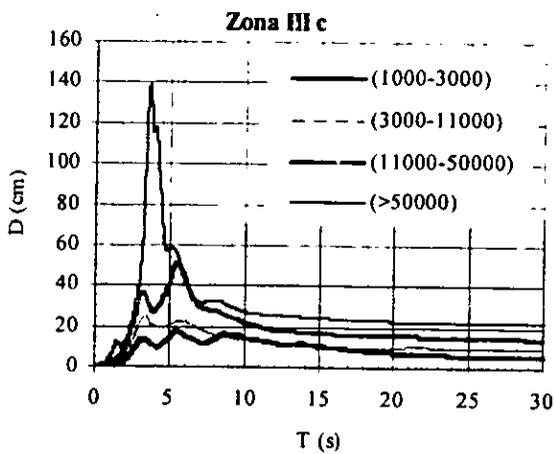
Gráfica 7.85



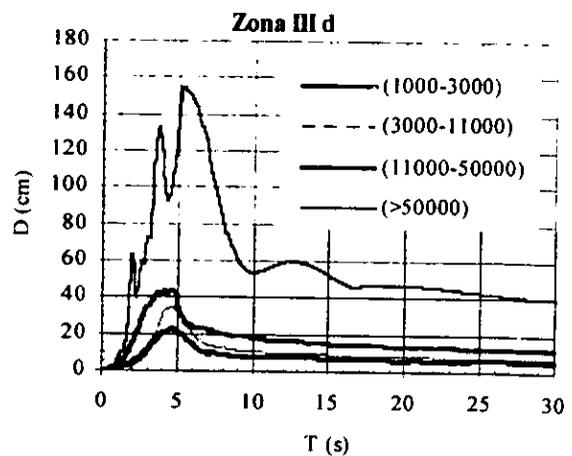
Gráfica 7.86



Gráfica 7.87



Gráfica 7.88



Conclusiones

Sobre la selección de acelerogramas

En un principio se buscaba obtener funciones moduladoras de la intensidad y funciones de densidad espectral representativos de la Zona IIIb debido a que es la zona donde se han registrado las máximas intensidades de Arias y así aplicar los resultados en la simulación de sismos fuertes en la Zona IIIb considerando la intensidad de Arias y la duración de los registros. Sin embargo, surgió la pregunta de qué registros utilizar para realizar dicho trabajo, fue cuando se decidió considerar eventos sísmicos moderados e intensos por lo que se estableció que se usarían sólo sismos con magnitudes mayores e iguales que 6.9° Richter ya que estos están asociados al límite de servicio y al de colapso. Pero todavía quedaban muchos parámetros de selección por considerar y se determinaron los parámetros que se indican en el Capítulo 2. Dado que se tenían registros sísmicos de todo el Valle de México se decidió expandir el estudio y trabajar con todas las zonas del Valle de México.

Obtener registros de eventos sísmicos de origen tectónico de subducción aseguró trabajar con los sismos de mayor magnitud en la República Mexicana.

El mayor problema en este punto de la tesis se debió a que se comenzó a utilizar el mapa de zonificación sísmica presentado por Pérez-Rocha *et al* que presenta siete zonas, sin embargo se presentó un nuevo mapa como propuesta de zonificación sísmica del Valle de México para las nuevas Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de

Construcción del DF (2001, propuestas) por lo que se tuvo que cambiar de mapa y con ello formar nuevos grupos de acelerogramas para cada una de las seis zonas.

Aquí se encontraron trece eventos sísmicos que fueron detectados por 101 estaciones acelerométricas en el Valle de México, que a su vez registraron 275 pares de acelerogramas.

Sobre el procesamiento de las señales sísmicas

Ya que se estaba trabajando con una gran cantidad de registros sísmicos, se tomó la decisión de obtener únicamente los que estuvieran en buen estado y si no corregirlos descartando todos aquellos que no se encontraran en buen estado, con el fin de poder darles un uso en otros proyectos. Por lo que así comenzó el trabajo de selección y corrección de acelerogramas en el dominio del tiempo y de frecuencia, a dicho trabajo se le llamó "el procesamiento de las señales sísmicas".

En este procesamiento se rotaron las componentes E-W y N-S de cada registro buscando obtener el registro cuya intensidad de Arias fuera la máxima en un determinado ángulo. Posteriormente, se obtuvo la parte intensa de los acelerogramas que en este caso se consideró como el 95% de la intensidad de Arias de cada registro, pero este porcentaje puede variar según el investigador.

Para facilitar el estudio estadístico se uniformizó el intervalo de tiempo de todos los registros a un $\Delta t=0.01s$ pero esto depende principalmente de los recursos de cómputo con los que se cuente porque a menor intervalo de tiempo mayor el número de muestras, sin embargo el estudio se hace más exacto. Es posible sobremuestrear los registros sin tener problemas en el dominio de frecuencia, sin embargo submuestrear los registros puede afectar o cambiar completamente la señal, por lo que sólo se submuestrearon algunos registros de 0.005s a 0.01s.

Otro de los problemas más comunes es cuando se integra la historia de aceleración buscando obtener la de velocidad y la de desplazamiento, obteniendo historias que no son compatibles unas con las otras. Esto se debe a que existen frecuencias muy bajas o periodos muy altos en el acelerograma afectando la línea base de las historias obtenidas al integrar el acelerograma. Hay varias formas de corregir este error, por ejemplo: pueden

ajustarse líneas rectas o curvas a las historias con la línea base movida sin embargo este ajuste puede ser inexacto y provocar errores al hacer un estudio espectral. Otro sería atenuar una banda más ancha de frecuencias casi hasta llegar al valor máximo del espectro de amplitudes de Fourier, o tomar un procedimiento más conservador como el presentado en esta tesis atenuando únicamente las frecuencias menores a 0.1 Hz, el problema de este proceso es el tiempo de cómputo ya que si no se corrige la línea base hay que filtrar iterativamente hasta lograr el objetivo. El uso de registros acelerográficos es muy delicado, aquí se presentó una forma de corregirlos, sin embargo una vez obtenido el acelerograma final corregido si se le vuelve a integrar directamente se encontrará uno con el mismo problema del principio, la incompatibilidad de las historias. Este problema lo atribuyo al uso de la integración y derivación numérica de las historias, la que puede introducir frecuencias muy bajas en estos.

Sobre el estudio estadístico de las señales

Para apreciar las características primordiales de la intensidad de Arias y de contenido de frecuencia de los espectros de respuesta lineal de los registros sísmicos se agruparon los registros en seis zonas sísmicas, y cada zona en cinco intervalos de intensidad de Arias, obteniéndose así diecinueve subgrupos de intensidad de Arias.

Sobre la intensidad de Arias

Se puede observar que los valores máximos de intensidad de Arias se presentan en la Zona IIIb y además conforme aumenta el periodo T del suelo el valor de la intensidad de Arias máxima se presenta más rápidamente.

La forma de las funciones moduladoras de los subgrupos con intensidad de Arias menor a $50000 \text{ cm}^2/\text{s}^3$ presenta una campana. Mientras que la Zona IIIb (>50000) tiene la forma de cuatro campanas y las zonas IIIc y IIIId (>50000) la de dos campanas, esto se expresa mediante la superposición de funciones gaussianas truncadas.

Sobre la Función de Densidad Espectral

La banda dominante de frecuencias de las funciones es más ancha en la Zona I y en la Zona II, aunque son las que presentan demandas espectrales con menor magnitud, a diferencia de las demandas espectrales de la Zona IIIb que son las máximas de todo el Valle de México.

Existen algunos subgrupos que tienen dos periodos dominantes. Estos son: la Zona II (1000-3000) y (3000-11000), la Zona IIIb (>50000), la Zona IIIc (1000-3000), (11000-50000) y (>50000) y la Zona IIId (11000-50000) y con tres periodos la Zona IIId (>50000).

A medida que el suelo es más blando las periodos dominantes son mayores, sin considerar la Zona I, esto puede observarse en la tabla 6.3.

Sobre los Espectros de Respuesta Lineal

Las mayores pseudo-aceleraciones se presentan en la Zona IIIb, siguiendo las Zonas IIIId, IIIc, IIIa, y finalmente la Zona II y I, esto se debe a que los registros con mayores aceleraciones se presentan en ese orden.

Los mayores desplazamientos se presentan en la Zona IIIId, siguiendo las Zonas IIIc y IIIb y finalmente las Zona I, II y IIIa.

La intensidad refleja una mayor influencia en los espectros de pseudo-aceleración correspondientes a las Zonas IIIb, IIIc y IIIId que en las demás zonas.

Se observó que la influencia de la intensidad en las formas espectrales es mayor en los suelos blandos que en los duros.

Estudios futuros

Los resultados de intensidad de Arias y de densidad espectral, sirven para simular movimientos sísmicos con características estadísticas similares a los que se presentan en las distintas zonas del Valle de México.

Para el análisis probabilista de estructuras se podrán utilizar dichos sismos simulados o los movimientos reales registrados en campo clasificados en subgrupos.

Dichos movimientos (simulados o registrados) podrán corresponder a intensidades moderadas, intensas, o muy intensas, según interese.

Se realizará un estudio sobre el comportamiento de la duración en distintos puntos del Valle de México, sin embargo es necesario aplicar otros parámetros de corte de los registros acelerográficos, como considerar mismos niveles de aceleración al comienzo y al final de los registros acelerográficos, y establecer otro porcentaje para obtener la parte intensa de los acelerogramas.

Bibliografía

Arias Suárez, A. "A measure of earthquake intensity" en *Seismic Design for Nuclear Power Plant*. USA, MIT Press, 1969. pp. 438-456.

Base Nacional de Datos de Sismos Fuertes. Catálogo de estaciones acelerográficas 1960-1992. México, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 1993. 210 p.

Bárcena, A. Comunicación personal, 2001.

Chopra, A. *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey, Prentice Hall, 1995. 729 p.

Clough, R. y Penzien, J. *Dynamics of Structures*. Singapore, McGraw Hill, 1993 (2ª edición). 739 p.

Erdik, M. y Kubin, J. "A procedure for the accelerogram processing" en *Proceedings of the Eighth World Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, USA, 1984. vol. II, p. 135-142.

Grigoriu, M., Ruiz, S.E. y Rosenblueth, E. "Nonstationary models of seismic ground acceleration", en *Earthquake Spectra*, vol 4, No. 3. pp 551-568, 1988.

Guerrero del Ángel, R. *Duración del movimiento durante sismos: implicaciones en la degradación estructural*. Tesis de Maestría en Ingeniería, UNAM, México, 1997.

Hsu, Hwei P. *Análisis de Fourier*. México, Addison Wesley Longman, 1998. 274 p.

Iwan, W. y Chen, X. "Important near-field ground motion data from the Landers earthquake" en *Proceedings of the Tenth European Conference of Earthquake Engineering*. Viena, Austria, 1994. vol. 1, p. 257-267.

Joannon, J., Arias, A. y Saragoni, R. "*Evolución temporal del contenido de frecuencias de terremotos*". Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Obras Civiles sección Estructuras, 1975. pp. 6-10.

Kostogladov, V. y Pacheco, J. Poster "*Cien años de Sismicidad en México*". México, Instituto de Geofísica UNAM, 199.

Leonel Silva, F. *Calibración del método de linealización equivalente estocástica para sistemas histeréticos simples*. Tesis de Maestría (Estructuras) de la UNAM. México, 1998. p. 40-52, 59-72.

Newland, D.E. *An Introduction to Random Vibrations and Spectral Analysis*. USA, Longman, 1975. 285 p.

Oppenheim, A., Willsky y Nawab, H. *Señales y Sistemas*. México, Prentice Hall, 1997 (2ª edición). 956 p.

Ordaz, Miranda y Avilés, "*Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF*", XII CNIS, León, Guanajuato, nov. 2000.

Pérez-Rocha, E., Vieitez Utesa, L., Flores Cruz, F. y Zárate Vázquez, M. "Predicción de intensidades sísmicas para el área metropolitana del Valle de México", en *Cuadernos FICA*, # 13. México, Fundación ICA, 1996. 49 p.

Reinoso, E. y Ordaz, M. "Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period" en *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* # 30. USA, John Wiley & Sons, 2001. p. 653-673.

Rivera Salas, L. *Respuesta sísmica probabilista de sistemas estructurales simples no lineales*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Instituto Politécnico Nacional. México, 2001.

Trifunac, M.D. "Low frequency digitization errors and a method for zero baseline correction of strong-motion accelerograms", en Report No. EERL 70-07 de la National Science Foundation. USA, California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, 1970. 55 p.

Winkler, R. *Statistics: Probability, Inference and Decision*. 2ª Ed. USA, H.R.W., 1975. p. 159-160.

Apéndice A

Programas de cómputo

Programa en Fortran para obtener

```
Sdebug
  real acc(20000) //Autor: LUZ RIVERA SALAS.
  parameter(dt=0.01)
  print*, 'nombre del archivo de datos'
  open(1, file= ' ')
  print*, 'nombre del archivo de resultados'
  open(2, file= ' ')
  nd=0
  suma=0
5 read(1, *, end=10) acc(nd+1)
  suma=suma+(acc(nd+1)**2)*dt
  write(2, 100) suma
  nd=nd+1
  goto 5
10 continue
100 format(2(2x, f25.9))
  stop
  end
```

Programa en C para interpolar una vez entre dos puntos de un registros.

```
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h> // AUTOR: DANIEL VILLA VELAZQUEZ MENDOZA.

FILE *ARCHIVO, *ARCHIVO2;
char C, *NOMBRE, *NOMBRE2;
char *SALIDA1, *SALIDA2, *SALIDA3;
int y;
double FIN, FIN1, FIN2, FIN3;

main()
{textcolor(15); clrscr(); textcolor(10);
  cprintf("ESTE PROGRAMA INTERPOLA UNA SOLA VEZ A LA MITAD\n\n");
  cprintf("\nNOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS: "); gets(NOMBRE);
  if(ARCHIVO=fopen(NOMBRE, "r")==NULL)
  {printf("ERROR"); getch(); exit(0);
```

```

}
cprintf("\rNOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS: "); gets(NOMBRE2);
if(ARCHIVO2=fopen(NOMBRE2,"w")==NULL)
{printf("ERROR2"); getch(); exit(0); }

fscanf(ARCHIVO,"%s",SALIDA1);
FIN1=atof(SALIDA1);
fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN1);
do
{fscanf(ARCHIVO,"%s",SALIDA2);
FIN2=atof(SALIDA2);
FIN=(FIN2-FIN1)/2)+FIN1;
fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN);
fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN2);
FIN1=FIN2;
if(y==7){getch(); y=0;}
}while(!feof(ARCHIVO));
fclose(ARCHIVO); fclose(ARCHIVO2);
textcolor(14);
cprintf("\n\nPROCESO TERMINADO");
exit(0);
}

```

Programa en C para interpolar dos veces entre dos puntos de un registro.

```

#include <conic.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h> // AUTOR: DANIEL VILLA VELAZQUEZ MENDOZA.

FILE *ARCHIVO,*ARCHIVO2;
char C,*NOMBRE,*NOMBRE2;
char *SALIDA1,*SALIDA2,*SALIDA3;
int y;
double FIN,FIN1,FIN2,FIN3;

main()
{textcolor(15); clrscr();textcolor(10);
cprintf("ESTE PROGRAMA INTERPOLA DOS VECES A INTERVALOS IGUALES\n\n");
cprintf("\nNOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS: "); gets(NOMBRE);
if(ARCHIVO=fopen(NOMBRE,"r")==NULL)
{printf("ERROR"); getch(); exit(0);
}
cprintf("\nNOMBRE DEL ARCHIVO DE RESULTADOS: "); gets(NOMBRE2);
if(ARCHIVO2=fopen(NOMBRE2,"w")==NULL)
{printf("ERROR2"); getch(); exit(0); }

fscanf(ARCHIVO,"%s",SALIDA1);
FIN1=atof(SALIDA1);
fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN1);
do
{fscanf(ARCHIVO,"%s",SALIDA2);
FIN2=atof(SALIDA2);
FIN=(FIN2-FIN1)/3;

fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN1+FIN);
fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN1+(FIN*2));
fprintf(ARCHIVO2,"%f",FIN2);
FIN1=FIN2;
if(y==7){getch(); y=0;}
}while(!feof(ARCHIVO));
fclose(ARCHIVO); fclose(ARCHIVO2);
textcolor(14);
cprintf("\n\nPROCESO TERMINADO");
exit(0);
}

```

Programa en C para obtener la componente donde se encuentre la máxima intensidad de Arias entre dos registros perpendiculares entre si.

```

#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>           // AUTOR: DANIEL VILLAVELÁZQUEZ MENDOZA
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <dos.h>

                                // PROTOTIPO DE FUNCIONES.
void VENTANAS(int),
    INFORME_FINAL(int,int),
    ENCONTRAR(int,int,int),
    ABRIR_ARCHIVO_NS_EW(int),
    PEDIR_ARCHIVO_NS_EW(void);

struct REG                    // ARREGLO DE ESTRUCTURAS
{                             // DE MAXIMA Y SU ANGULO
    float MAXIMO;             // PARA CADA PAR DE ARCHIVOS.
    int ANGULO;
};
struct REG NIV[182];

struct RUTA                   // ARREGLO VARIABLE DE ESTRUCTURAS
{                             // A LAS RUTAS DE ARCHIVOS NS Y EW.
    char RUTANS[25],
        RUTAEW[25],
        RUTAFI[25];
    int ANGINI,
        ANGFI;
};
struct RUTA *CUAL;

struct DATOS                  // ARREGLO VARIABLE PARA LOS DATOS
{                             // FINALES.
    float MAXIMAFIN;
    int ANGULOFIN;
    char NOMBRE[25];
};
struct DATOS *FINALES;

FILE *ARCHIVONS,             // PUNTEROS A LOS ARCHIVOS.
    *ARCHIVOEW,
    *ARCHIVOFI;

int NUMRUT;                  // NUMERO DE PARES DE RUTAS

////////////////////////////////////

void main()
{
    float X,
        Y,
        ANR,
        MAXI;
    int CUENTA_RUT=1,        // CONTADOR DE PARES DE RUTAS
        ANG,
        y=1;                 // VA SIGUIENDO A NUMRUT.

    _setcursortype(_SOLIDCURSOR);

    VENTANAS(0);
    VENTANAS(1);

                                // ASIGNA MEMORIA A LA ESTRUCTURA DE RUTAS.

```

```

QUAL= (struct RUTA *) malloc((NUMRUT+1)*sizeof(struct RUTA));
FINALES=(struct DATOS *)malloc((NUMRUT+1)*sizeof(struct DATOS));

PEDIR_ARCHIVO_NS_EW();
VENTANAS(3);
_setcursortype(_NOCURSOR);
gotoxy(2,1), cprintf("RUTA DEL ARCHIVO FINAL");
gotoxy(34,1), cprintf("MAXIMA INTENSIDAD");
gotoxy(60,1), cprintf("ANGULO MAXIMO");
VENTANAS(4);
do // HACE EL TOTAL DEL NUMERO DE PARES DE RUTAS.
{
char XC[17],
YC[17];

ABRIR_ARCHIVO_NS_EW(CUENTA_RUT);

ANG=CUAL[CUENTA_RUT].ANGINI;
while(ANG<=CUAL[CUENTA_RUT].ANGFI)
{
MAXI=0; // MAXIMA INTENSIDAD DE ARIAS.
ANR=ANG*3.1416/180; // TRANSFORMA GRADOS A RADIANES.
do
{
fscanf(ARCHIVONS,"%s",YC); // OBTIENE COMO CARACTER.
fscanf(ARCHIVOEW,"%s",XC);
X=atof(XC); // CONVIERTE A FLOTANTE.
Y=atof(YC);

// ACELEROGRAMA Y MAXIMA INTENSIDAD.
MAXI+=pow((X*cos(ANR)+Y*sin(ANR)),2)*.01;
}
while(!feof(ARCHIVONS)); // HASTA ENCONTRAR EL FINAL DEL ARCHIVO.
NIV[ANG].MAXIMO=MAXI; // GUARDA MAXIMA INTENSIDAD Y ANGULO.
NIV[ANG].ANGULO=ANG;
rewind(ARCHIVONS); // REGRESA AL INICIO EL APUNTAOR.
rewind(ARCHIVOEW);
ANG++; // INCREMENTA EL ANGULO EN GRADOS.
}
ENCONTRAR(CUAL[CUENTA_RUT].ANGINI,CUAL[CUENTA_RUT].ANGFI,CUENTA_RUT);
INFORME_FINAL(CUENTA_RUT,y);
CUENTA_RUT++; y++;
if(y==24) { clrscr(); y=1; }
}
while(CUENTA_RUT<=NUMRUT);
while(!kbhit())
sound(1300),delay(300),nosound(),delay(1000);

_setcursortype(_NORMALCURSOR);
textmode(C80);
free(QUAL);
free(FINALES);
exit(0);
}
////////////////////////////////////

void PEDIR_ARCHIVO_NS_EW(void)
{
int CONT=1;
VENTANAS(0);
VENTANAS(2);
do
{
textcolor(10), clrscr(); textcolor(14);
gotoxy(3,1), cprintf("RUTA ARCHIVO %d N-S: ",CONT);
scanf("%s",CUAL[CONT].RUTANS);
gotoxy(3,2), cprintf("RUTA ARCHIVO %d E-W: ",CONT);
scanf("%s",CUAL[CONT].RUTAEW);
gotoxy(3,3), cprintf("RUTA ARCHIVO %d FINAL: ",CONT);
scanf("%s",CUAL[CONT].RUTAFI);
}
do

```

```

{
gotoxy(3,4); cprintf("ANGULO DE INICIO:  ");
scanf("%d",&CUAL[CONT].ANGINI);
gotoxy(3,5); cprintf("ANGULO FINAL:  ");
scanf("%d",&CUAL[CONT].ANGFI);
flush(stdin);
}
while(CUAL[CONT].ANGFI<CUAL[CONT].ANGINI);
CONT++;
}
while(CONT<=NUMRUT);
VENTANAS(0);
}
////////////////////////////////////

void ABRIR_ARCHIVO_NS_EW(int CUENTA)
{
if((ARCHIVONS=fopen(CUAL[CUENTA].RUTANS,"r")) ==NULL) exit(0);
if((ARCHIVOEW=fopen(CUAL[CUENTA].RUTAEW,"r")) ==NULL) exit(0);
}

////////////////////////////////////
void ENCONTRAR(int INICIO,int FINN,int CUENTA)
{
int ANGU;
char XC[17],
YC[17];
float X,
Y,
RES=0,
MAYOR,
ANGUR;

MAYOR=NIV[INICIO].MAXIMO;
ANGU=NIV[INICIO].ANGULO;
for(int C=INICIO+1;C<=FINN;C++)
{
if(MAYOR<NIV[C].MAXIMO)
{
MAYOR=NIV[C].MAXIMO;
ANGU=NIV[C].ANGULO;
}
}
strcpy(FINALES[CUENTA].NOMBRE,CUAL[CUENTA].RUTAFI);
FINALES[CUENTA].MAXIMAFIN=MAYOR;
FINALES[CUENTA].ANGULOFIN=ANGU;

if((ARCHIVOFI=fopen(CUAL[CUENTA].RUTAFI,"w+")==NULL) exit(0);

rewind(ARCHIVONS);
rewind(ARCHIVOEW);

ANGUR=ANGU*3.1416/180;
do
{
scanf(ARCHIVONS,"%s",YC); // OBTIENE COMO CARACTER.
scanf(ARCHIVOEW,"%s",XC);
X=atof(XC); Y=atof(YC); // CONVIERTE A FLOTANTE.
RES=(X*cos(ANGUR)+Y*sin(ANGUR));
fprintf(ARCHIVOFI,"%f\n",RES);
}
while(!feof(ARCHIVONS));
fclose(ARCHIVONS); fclose(ARCHIVOEW); fclose(ARCHIVOFI);
}

////////////////////////////////////
void VENTANAS(int TIPO)
{
switch(TIPO)
{

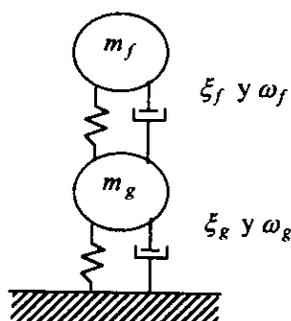
```

```
case 0:
    window(1,1,80,25); textbackground(0); clrscr();
    textcolor(10), textcolor(14); break;
case 1:
    window(2,2,40,2); textbackground(9); clrscr();
    gotoxy(2,1), cprintf("NUMERO DE PARES DE ARCHIVOS: "),
    scanf("%d",&NUMRUT); break;
case 2:
    window(2,2,50,6); textbackground(9); clrscr(); break;
case 3:
    window(1,1,80,25); textbackground(0); clrscr(); textcolor(14); break;
case 4:
    window(1,2,80,25); textbackground(0); clrscr(); textcolor(10);
}
}
////////////////////////////////////
void INFORME_FINAL(int CU,int Y)
{
    gotoxy(3,Y), cprintf("%s",FINALES[CU].NOMBRE);
    gotoxy(35,Y), cprintf("%f",FINALES[CU].MAXIMAFIN);
    gotoxy(66,Y), cprintf("%d",FINALES[CU].ANGULOFIN);
}
```

Apéndice B

Filtro de Clough y Penzien^{1 2}

Este filtro representa el paso de las ondas a través de dos medios con propiedades distintas, como se aprecia en la siguiente figura:



Las propiedades de un filtro pueden representarse mediante aquellas asociadas a una función de transferencia $H(\omega)$. Se determina dicha función asociada a un primer sistema:

$$y = z - u$$

¹ Francisco Leonel Silva. *Op. cit.*

² Luz Rivera Salas. *Op. cit.*

de la ecuación de movimiento:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = -m\ddot{u}$$

$$y + 2\xi_g \omega_g \dot{y} + \omega_g^2 y = -\ddot{u}$$

sustituyendo e igualando a cero se tiene:

$$z - u + 2\xi_g \omega_g (z - u) + \omega_g (z - u) = 0$$

simplificando las operaciones se obtiene:

$$z + 2\xi_g \omega_g z + \omega_g z = 2\xi_g \omega_g u + \omega_g u$$

considerando que la excitación es armónica

$$u = e^{i\omega t}$$

suponiendo que la respuesta z ante excitación armónica, está dada por:

$$z = H(\omega) e^{i\omega t}$$

derivando las ecuaciones anteriores y sustituyendo se tiene:

$$H(\omega) [-\omega^2 + 2i\xi_g \omega_g \omega + \omega_g^2] e^{i\omega t} = (2i\xi_g \omega_g \omega + \omega_g) e^{i\omega t}$$

la función de transferencia es:

$$H_T(\omega) = \frac{2i\xi_g \omega_g \omega + \omega_g}{\omega_g^2 - \omega^2 + 2i\xi_g \omega_g \omega}$$

En forma similar se obtiene la función de transferencia asociada a la estructura:

$$y + 2\xi_f \omega_f \dot{y} + \omega_f^2 y = -\ddot{u}$$

$$H(\omega) [-\omega^2 + 2i\xi_f \omega_f \omega + \omega_f^2] e^{i\omega t} = \omega^2 e^{i\omega t}$$

La función de transferencia es:

$$H_E(\omega) = \frac{\omega^2}{\omega_f^2 - \omega^2 + 2i\xi_f \omega_f \omega}$$

La densidad espectral de potencia (Clough y Penzien, 1975) es:

$$S_{CP}(\omega) = |H(\omega)|^2 s_o$$

donde:

$$|H(\omega)|^2 = |H_T(\omega)|^2 |H_E(\omega)|^2 = \left(\frac{4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right) \left(\frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_f^2 \omega_f^2 \omega^2} \right)$$

La curva descrita por la ecuación anterior que coincide con la [6.17], tiene la forma mostrada en la siguiente figura:

$$|H(\omega)|^2 = |H_T(\omega)|^2 |H_E(\omega)|^2$$

