



01161 9  
24.

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**“DURACIÓN DEL MOVIMIENTO DURANTE SISMOS:  
IMPLICACIONES EN LA DEGRADACIÓN  
ESTRUCTURAL”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ESTRUCTURAS)**

PRESENTA:

**RAÚL GUERRERO DEL ÁNGEL**

DIRIGIDA POR:

**DR. EDUARDO REINOSO ANGULO**

Ciudad Universitaria

Diciembre 1997

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

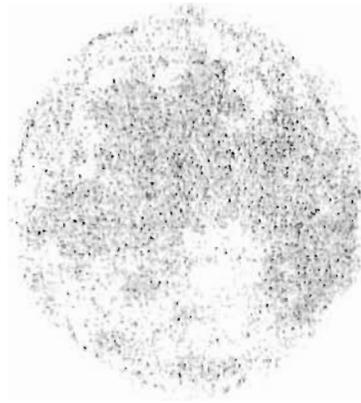
## DEDICATORIA

- \* Doy gracias a Dios por haberme dado la FE y la FUERZA para concluir mis objetivos, y por estar espiritualmente siempre a mi lado en los buenos y malos momentos de mi existencia
  
- \* A las personas más especiales que me han dado la vida, a mi padre Fermín Guerrero y a mi madre Adelfa Del Ángel, por toda la comprensión y el apoyo que me han proporcionado, hoy y siempre
  
- \* A mis hermanos, Fermín y Sagrario, por ser mis compañeros y amigos de toda la vida. Personas Extraordinarias. A mi prima Rosa Elsa por compartir buenos momentos de su infancia
  
- \* A mis amigos: el Sr. Gerardo Hernández, Jesús Castañeda, Armando Montalvo, Héctor Heyerdahl y Alejandra E. Ávila por su gran apoyo moral. Les agradezco infinitamente por compartir su gran espíritu de convivencia. A Elizabeth Osorio por brindarme siempre su amistad y alentarme para seguir adelante siempre
  
- \* A todos mis familiares y amigos de Tampico

## AGRADECIMIENTOS

- \* Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería y a mis profesores que contribuyeron a lograr mi objetivo, y por darme la oportunidad de recibir nuevos conocimientos para continuar con mi formación académica y profesional.
- \* Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo proporcionado durante dos años de estudio.
- \* Al Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Barros Sierra, a su Director, investigadores y personal administrativo por haberme recibido y dado un trato excelente.
- \* Al Instituto de Ingeniería que me apoyó para terminar este trabajo.
- \* A mi tutor y director de tesis: Dr. Eduardo Reinoso Angulo, a quien agradezco enormemente el tiempo, la paciencia y la asesoría brindada para la realización de este trabajo.
- \* Agradezco a la Coordinación de Sismología del Instituto de Ingeniería de la UNAM, al Centro de Instrumentación y registro Sísmico, y al CENAPRED por la información y datos proporcionados para llevar a cabo esta tesis. Al Ing. Oscar Villagrán Guevara por la información proporcionada para el desarrollo de algunas partes de este trabajo.
- \* A los doctores Roberto Meli Piralla, Mario Ordaz Schroeder, Eduardo Miranda Mijares y Sonia E. Ruiz Gómez por la revisión crítica de este trabajo.
- \* A mis compañeros de maestría: Jesús, Oscar, Adalberto, Juan José, Mario A., Ricardo, Andrés, Julio, Fernando, Jesús V., Maribel, Antonio, Luis, Víctor, así como a mis compañeros del Centro de Investigación Sísmica: Angélica, Juan Carlos, María, Fernando, Efraín, Marco, entre otras personas de igual importancia. Gracias por su grandiosa amistad.

\* Al Ing. José Antonio López Ávila y al Ing. Víctor Manuel González Saldierna por sus consejos y apoyo. Al Ing. Israel Díaz Acosta y al Ing. Edmundo Garza Tobías por la ayuda proporcionada al establecerme en la ciudad de México al comienzo de mis estudios de maestría.



*On my way home  
I remember  
only good days.  
On my way home  
I remember all the best days.  
I'm on my way home  
I can remember  
every new day.*

*enya*

## ÍNDICE

	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>Aspectos básicos en el estudio de la duración del movimiento fuerte del terreno</b>	<b>4</b>
1.1	Generalidades	4
1.2	Base de datos: sismos registrados y redes acelerométricas	5
1.2.1	Zona de subducción y sismos recientes	6
1.2.2	Red acelerométrica de Guerrero	8
1.2.3	Red acelerométrica del valle de México	13
1.3	Características significativas de un acelerógrafo digital	16
1.3.1	Funcionamiento de un acelerógrafo digital	16
1.3.2	Defectos en los registros acelerométricos	17
1.3.3	Registros no representativos de una zona determinada	19
1.3.4	Umbrales de referencia	21
1.4	Métodos para determinar la duración del movimiento	25
1.4.1	Formas de medir la duración a partir de registros acelerométricos	25
1.4.2	La estimación de la duración a partir de expresiones generales	29
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>Duración del movimiento en zonas de México con terreno firme</b>	<b>34</b>
2.1	La duración y su relación con otros parámetros sísmicos	34
2.2	Duración de los sismos de subducción en México	35
2.3	Duración en el área de la ruptura	36
2.3.1	El sismo del 19 de septiembre de 1985	36
2.3.2	La duración dependiente de la magnitud	38
2.4	Sitios distantes a la fuente sísmica	42

<b>CAPÍTULO III</b>	<b>La duración en la ciudad de México</b>	<b>56</b>
3.1	El movimiento en el valle de México	56
3.2	Variación de la duración con la magnitud del sismo	58
3.3	El periodo dominante del sitio	62
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>La duración del movimiento fuerte del terreno y la teoría de vibraciones aleatorias</b>	<b>82</b>
4.1	La teoría de vibraciones aleatorias	82
4.2	Cálculo de espectros de respuesta	84
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>La energía histerética disipada y la duración del movimiento en sistemas de un grado de libertad</b>	<b>91</b>
5.1	El comportamiento inelástico en sistemas estructurales	91
5.2	Número de ciclos inelásticos y periodo promedio	93
5.3	Método de análisis	96
5.3.1	Sistema estructural	96
5.3.2	Método numérico para resolver la ecuación del movimiento	96
5.3.3	Registro acelerométrico	97
5.3.4	Modelos histeréticos	98
5.3.5	Propiedades del sistema estructural y modelos histeréticos	101
5.4	Espectros de respuesta no lineales	103
<b>CAPÍTULO VI</b>	<b>La duración del movimiento y el daño estructural de un edificio de 12 niveles de concreto reforzado</b>	<b>108</b>
6.1	Concepción de la estructura	108
6.1.1	Estructuración y geometría	108
6.1.2	Análisis elástico de la estructura	109
6.1.3	Diseño de los elementos estructurales	110
6.2	Respuesta inelástica	111
6.3	Registro acelerométrico	116

6.4	Modelo histerético y degradación de rigidez	116
6.5	La evolución del daño estructural	118
6.6	Modelo del acelerograma sintético	121
	<b>Conclusiones</b>	130
	<b>Referencias</b>	139

## INTRODUCCIÓN

*“Duró más de un minuto, sin embargo de que hubo quien lo extendió a 22, otros más moderados a 15 y otros algo menos, a proporción del terror de cada uno”*

*(Diario de México, sismo del 3 de diciembre de 1805)*

La actividad sísmica presente en la República Mexicana despierta el interés por parte de investigadores e ingenieros por desarrollar trabajos concernientes a explicar los efectos del movimiento fuerte del terreno y que, aplicando ciertos criterios y procedimientos de análisis y diseño eviten, en lo posible, el daño estructural ocasionado por los temblores que se generan principalmente en la zona del Pacífico.

Algunos parámetros sísmicos como son la magnitud, la distancia epicentral, la aceleración máxima del terreno entre otras, han sido empleados de manera conjunta para comprender el potencial de un temblor y sus efectos. En este trabajo se estudia el concepto de la duración del movimiento como una variable alternativa que apoye a un mejor entendimiento del fenómeno. La duración del movimiento fuerte del terreno tiene gran influencia sobre la respuesta del suelo y el comportamiento inelástico de estructuras. El objetivo de este trabajo es establecer nuevos criterios, expresiones y procedimientos que definan un intervalo de tiempo en la historia del movimiento y que guarde relación con el posible daño estructural al presentarse un evento sísmico.

Dentro del capítulo I se muestra un catálogo con las características más importantes de algunos sismos ocurridos desde septiembre de 1985. Se describe la importancia de las redes acelerométricas de Guerrero y de la ciudad de México, así como de algunos registros obtenidos por éstas. Posteriormente, se hace énfasis sobre los posibles defectos que llegan a encontrarse en algunos acelerogramas, y se introduce la técnica del umbral de referencia. Al final se describe brevemente una serie de investigaciones en donde se derivan diferentes criterios para la medición de la duración del movimiento fuerte del terreno, siendo la más confiable aquella definida por el lapso que comprende la mayor cantidad de energía acumulada contenida en el movimiento (intensidad de Arias).

El capítulo II hace referencia a la obtención de la duración del movimiento fuerte del terreno dentro del área de la ruptura y sitios distantes de ella para diferentes temblores, así como también se presenta la comparación de los resultados con la magnitud de cada sismo analizado. Al final del capítulo, los datos disponibles de la duración, la magnitud y la distancia al área de la ruptura para diferentes temblores se engloban en una expresión general que permite estimar la duración del movimiento para sismos de subducción mexicanos futuros.

Dentro del capítulo III se lleva a cabo la determinación de la duración del movimiento en la ciudad de México. Al igual que en el capítulo II, la duración del movimiento para sismos de subducción mexicanos futuros se estima a partir de otra expresión, aunque esta vez se deriva con base en un estudio que involucra los mismos parámetros empleados para el cálculo de la duración fuera del valle de México (magnitud y distancia al área de la ruptura) más el periodo dominante del suelo.

Para el capítulo IV se plantea una aplicación directa a la expresión que estima la duración del movimiento y que fuera obtenida en el capítulo III. La aplicación consiste en emplear los valores estimados de la duración en la creación de espectros de respuesta elásticos por medio de la teoría de las vibraciones aleatorias para un determinado número de sismos seleccionados. Estos espectros se comparan con los exactos y los obtenidos al utilizarse la duración del movimiento medida en cada registro.

En el capítulo V se determina la duración del movimiento a partir de un enfoque diferente al concepto de la intensidad de Arias. En esta parte del estudio, la duración se calcula a partir de una evaluación de la energía histerética disipada por un sistema estructural de un grado de libertad con ciertas características y propiedades estructurales, sometido a una excitación basal; algunos modelos histeréticos son propuestos para evaluar la energía histerética. Al final del capítulo son generadas algunas gráficas tridimensionales a las se nombran como espectros de respuesta no lineales del número de ciclos y de la duración, calculados para un sitio determinado del valle de México y un sismo previamente seleccionado; dichas gráficas son capaces de estimar el número de ciclos inelásticos y la duración del movimiento a partir de datos conocidos, como son el periodo y la resistencia de un sistema estructural de un grado de libertad. De la misma manera,

las gráficas pueden llegar a representar un apoyo adicional para comprender el grado de daño estructural.

El capítulo VI expone un problema práctico referente al análisis inelástico de un edificio de 12 niveles de concreto reforzado. A partir de una concepción previa del sistema, el análisis y diseño de los elementos es llevado a cabo con ayuda de programas de cómputo de análisis elástico y el Reglamento de Construcciones del D.F. Mediante un programa de análisis inelástico se obtiene un historial de daño global de la estructura cuando es sometida a un registro sísmico determinado, cuyos resultados son tomados para obtener una aproximación preliminar de la duración del movimiento. Con base en el manejo de los resultados obtenidos, se desarrolla un modelo matemático (acelerograma sintético) cuyos términos se derivan de la etapa de máximas demandas del movimiento y que pretende representar el mismo grado de daño que el obtenido con el registro completo al realizarse nuevamente el análisis inelástico. Este acelerograma sintético puede ser una herramienta útil en el análisis no lineal de estructuras ya que, al menos comparándolo con el registro real analizado en este capítulo, muestra resultados similares.

## **CAPÍTULO I**

### **ASPECTOS BÁSICOS EN EL ESTUDIO DE LA DURACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO**

#### **1.1 GENERALIDADES**

El estudio de los sismos nos permite conocer las características dinámicas del terreno, así como la respuesta de sistemas estructurales sometidos a carga cíclica. A raíz de los grandes temblores de Michoacán en 1985, en México se hizo presente la necesidad de continuar y abrir nuevas investigaciones para explicar y entender el grado de daño en las estructuras, provocado por los efectos del movimiento.

En general, se han logrado algunos avances significativos para comprender el potencial sísmico de las brechas del Pacífico, interpretar los espectros de respuesta en la fuente, definir la atenuación de ondas sísmicas con la distancia epicentral, estudiar la amplificación de dichas ondas en el valle de México, determinar el contenido de frecuencias dentro de un registro sísmico a partir de espectros de Fourier, obtener el periodo dominante del suelo para un sitio específico, entre otros que sirven de base para la ingeniería sísmica moderna.

Dentro de esa serie de trabajos, la duración del movimiento fuerte del terreno es una de las fuentes de información importante para la explicación del comportamiento dinámico del terreno y del daño ocasionado en las estructuras ante un sismo moderado o intenso. En México, es un aspecto que no ha sido estudiado y atacado directamente.

No es claro que las estructuras deban de ser diseñadas solo para resistir una determinada fuerza generalmente dada por el espectro de respuesta de aceleraciones máximas. Es necesario considerar, bajo sismos moderados o intensos, el número de ciclos que tiene que soportar una estructura, la cual es desplazada de un lado a otro y en direcciones diferentes. De esta manera, la estructura tendrá la capacidad de vibrar sin pérdidas importantes de resistencia o rigidez.

En realidad una estructura presentará degradación de rigidez por el constante movimiento que, en algunos casos, puede durar hasta 10 minutos como se presenta en el registro de la figura 1.1 correspondiente a la zona de lago del valle de México, en Ciudad Nezahualcóyotl, donde el riesgo sísmico está presente. En ella se especifica la fecha del sismo, la magnitud y la distancia al área de la ruptura.

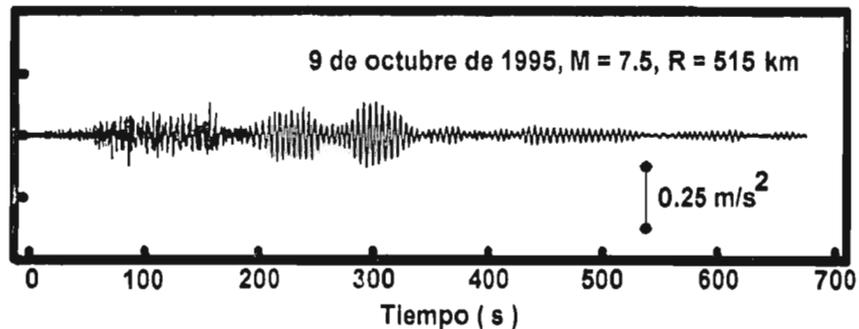


Figura 1.1 Acelerograma registrado en zona de lago del valle de México (estación 31)

El daño originado por el sismo sobre un elemento estructural, es acumulativo y la intensidad del mismo depende no solo de la deformación máxima sino de la historia de deformaciones que sufre antes o después de esa deformación máxima. Atendiendo a los relatos de sobrevivientes de inmuebles colapsados en 1985, algunos de los edificios cayeron después de decenas segundos de estar siendo sacudidos por el temblor.

El determinar en forma exacta la duración del movimiento es un propósito incierto, por lo que algunos métodos intentan obtener una cantidad de tiempo que represente de forma aproximada los efectos del movimiento. Por lo anterior, en este trabajo se intenta continuar con la obtención de resultados específicos en donde la duración del movimiento sigue siendo la principal incógnita.

## 1.2 BASE DE DATOS: SISMOS REGISTRADOS Y REDES ACCELEROMÉTRICAS

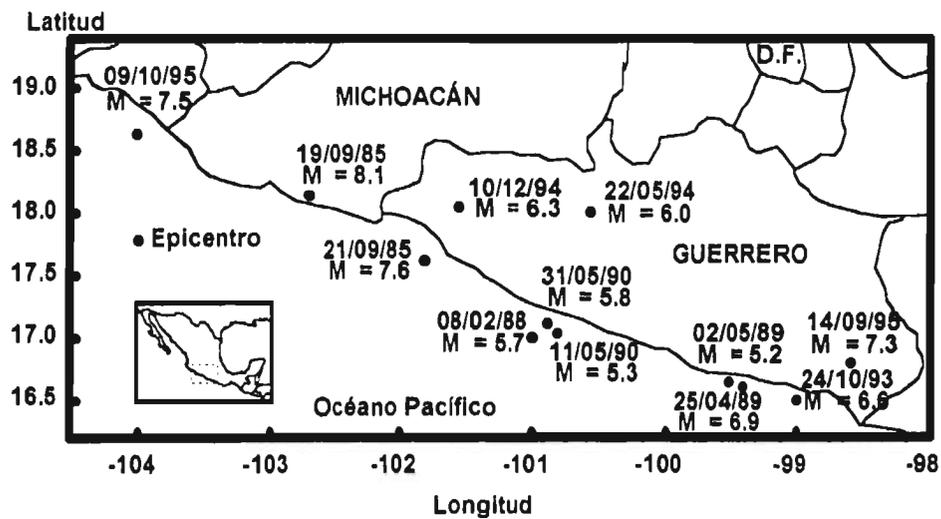
A pesar de que la ocurrencia de temblores es un fenómeno aleatorio y que requiere de un lapso para que se presenten aquellos trascendentes para la ingeniería sísmica mexicana, el paso de los años ha permitido recabar gráficamente una diversidad de movimientos telúricos que son identificados tanto por la fecha de ocurrencia, magnitud, localización del

epicentro, etc., como por los daños ocasionados en el momento del suceso, que con fines de diseño sísmico, es convincente catalogarlos como sismos de servicio y destructivos.

Para realizar cualquier estudio referente al movimiento fuerte del terreno, es importante contar con un conjunto de datos que reflejen las características y propiedades de los sismos. Afortunadamente, en México se cuenta con una gran cantidad registros sísmicos gracias al gran número de estaciones acelerométricas localizadas en la costa del Pacífico y en la ciudad de México.

### 1.2.1 Zona de subducción y sismos recientes

Para la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno, se escogió un conjunto de temblores ocurridos en una zona sísmica de la costa del Pacífico de la República Mexicana, correspondiente a la placa de Cocos subducida en la de Norteamérica y asociada principalmente con las brechas sísmicas de Michoacán y Guerrero.



**Figura 1.2** Fecha, magnitud y localización de algunos sismos mexicanos recientes (Rodríguez, 1996)

La figura 1.2 muestra la zona de interés y algunos sismos recientes ocurridos en ella (Rodríguez, 1996). En esa misma figura, se señalan algunas características de cada

sismo como son la fecha de ocurrencia, la magnitud y la localización del epicentro; este último indicado gráficamente con un punto.

La tabla 1.1 presenta la relación de los sismos recientes (pequeños, moderados y severos) mostrados en la figura 1.2 y algunas de sus características (Rodríguez, 1996).

La distancia es un parámetro importante en cualquier análisis sobre el movimiento fuerte del terreno. Atendiendo a la tabla 1.1, dicho parámetro es obtenido como la mínima distancia entre el valle de México (estación acelerométrica de Ciudad Universitaria, CU) y el área de la ruptura que corresponde a cada sismo, tomando en cuenta la profundidad.

**Tabla 1.1** Características de algunos sismos recientes (Rodríguez, 1996)

No.	Fecha	Origen	Magnitud M	Latitud ( °N )	Longitud ( °W )	Dist. (km)	Prof. (km)
1	19/09/85	Subducción (Mich)	8.1	18.14	102.71	278	16
2	21/09/85	Subducción (Mich)	7.6	17.62	101.82	310	20
3	08/02/88	Subducción (Gro)	5.7	17.00	101.00	302	19
4	25/04/89	Subducción (Gro)	6.9	16.60	99.40	253	19
5	02/05/89	Subducción (Gro)	5.2	16.64	99.51	269	13
6	11/05/90	Subducción (Gro)	5.3	17.05	100.84	287	12
7	31/05/90	Subducción (Gro)	5.8	17.11	100.89	285	16
8	24/10/93	Subducción (Gro)	6.6	16.50	99.00	280	16
9	22/05/94	Normal (Gro)	6.0	18.03	100.57	197	23
10	10/12/94	Subducción (Gro)	6.3	18.02	101.56	284	20
11	14/09/95	Subducción (Gro)	7.3	16.80	98.60	284	45
12	09/10/95	Subducción (Col)	7.5	18.60	104.00	515	27

La figura 1.3 muestra las áreas de ruptura de algunos sismos recientes como una proyección sobre la superficie terrestre, así como otras pertenecientes a sismos pasados. Como se habrá observado en la figura 1.3 y para algunos sismos recientes indicados en la tabla 1.1, se define claramente la zona de la ruptura, mientras que para los demás, el área de la ruptura fue muy pequeña y equivalente a un punto.

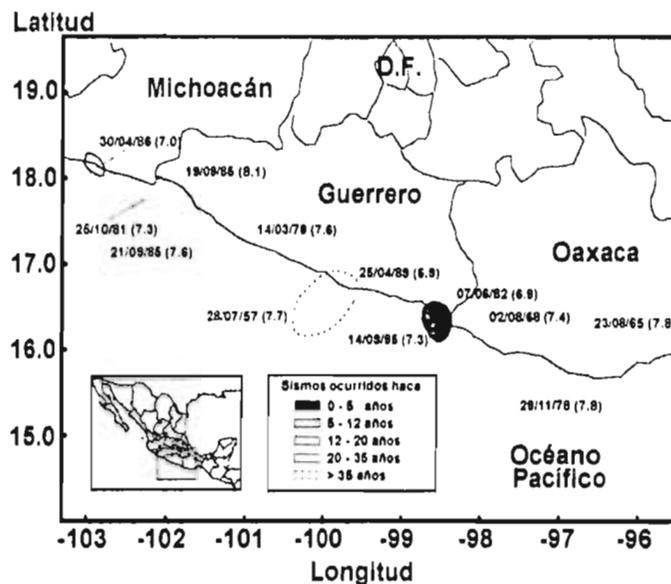


Figura 1.3 Áreas de ruptura de algunos sismos de subducción

### 1.2.2 Red acelerométrica de Guerrero

Las estaciones acelerométricas con las que se cuenta en la costa del Pacífico y puntos intermedios al trayecto hacia la ciudad de México se presentan en la figura 1.4.

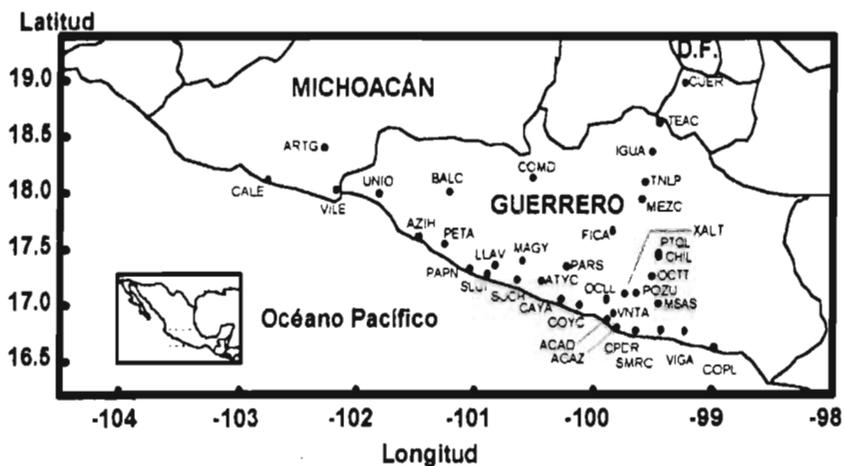


Figura 1.4 Estaciones pertenecientes a la Red acelerométrica de Guerrero

Asimismo, la figura 1.4 muestra la ubicación de las estaciones dentro de los Estados de Michoacán, Guerrero y Morelos, conocida como la Red acelerométrica de Guerrero.

**Tabla 1.2 Estaciones de la red acelerométrica de Guerrero**

Estación	Código	Tipo de suelo	Latitud ( °N )	Longitud ( °W )
Acapulco esc. Diana	ACAD	Limo arenoso	16.861	99.880
Acapulco la Zanja	ACAZ	Depósito barra	16.787	99.789
Arteaga	ARTG	Roca	18.356	102.293
Atoyac	ATYC	Roca	17.211	100.431
Caleta de Campos	CALE	Roca	18.073	102.755
Cayaco	CAYA	Terreno blando	17.045	100.266
Chilpancingo	CHIL	Roca	17.466	99.452
Cerro de la piedra	CPDR	Roca	16.769	99.633
Copala	COPL	Roca	16.605	98.974
Coyuca	COYC	Roca	16.968	100.084
Cuernavaca	CUER	Roca	18.981	99.237
El Balcón	BALC	Roca	18.011	101.216
Filo de Caballo	FICA	Roca	17.652	99.842
Iguala	IGUA	Roca	18.399	99.506
La Comunidad	COMD	Roca	18.124	100.507
La Llave	LLAV	Roca	17.346	100.792
La Unión	UNIO	Roca	17.982	101.805
La Venta	VNTA	Roca	16.923	99.816
Las Mesas	MSAS	Roca	17.007	99.456
Las Vigas	VIGA	Roca	16.757	99.236
Los Magueyes	MAGY	Roca	17.377	100.577
Mezcala	MEZC	Roca	17.930	99.590
Ocotillo	OCLL	Roca	17.038	99.875
El Ocotito	OCTT	Roca	17.250	99.511
Papanao	PAPN	Roca	17.328	101.040
El Paraíso	PARS	Roca	17.344	100.214
Petatlán	PETA	Roca	17.542	101.271
Petaquillas	PTQL	Roca	17.466	99.453
Pozuelo	POZU	Roca	17.100	99.630
San Luis de la Loma	SLUI	Roca	17.272	100.891
San Marcos	SMRC	Roca	16.776	99.408
El Suchil	SUCH	Roca	17.226	100.642
Teacalco	TEAC	Roca	18.618	99.453
Tonalapa del sur	TNLP	Roca	18.098	99.559
Villita margen derecha	VILE	Roca	18.016	102.205
Xaltianguis	XALT	Roca	17.095	99.720
Aeropuerto Zihuatanejo	AZIH	Roca	17.603	101.455

La tabla 1.2 lista las estaciones acelerométricas mostradas en la figura 1.4; además, se indica el código de cada estación, el tipo de suelo donde se desplanta y sus coordenadas

geográficas. Registros acelerométricos como los que se muestran desde la figura 1.5 hasta la 1.11 son empleados para llevar a cabo el estudio de la duración del movimiento.

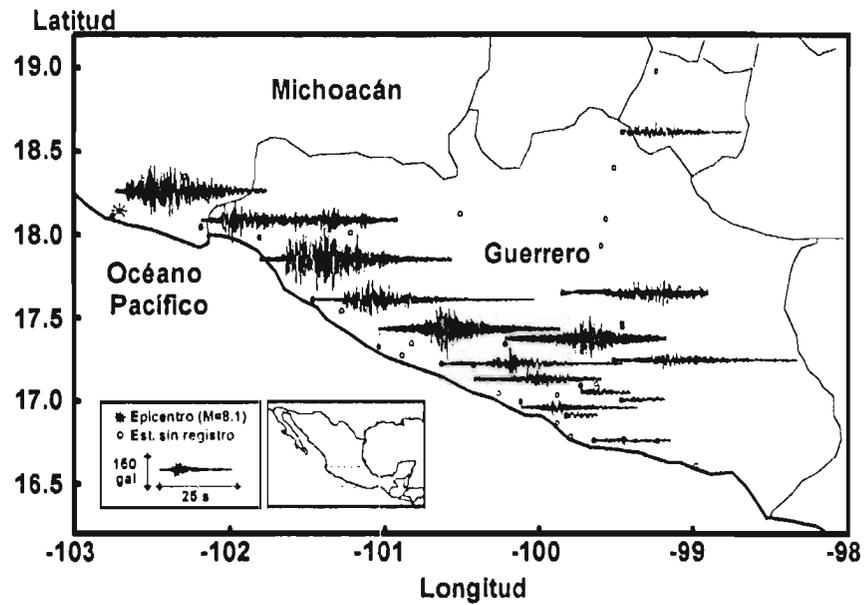


Figura 1.5 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 19/09/85, componente NS

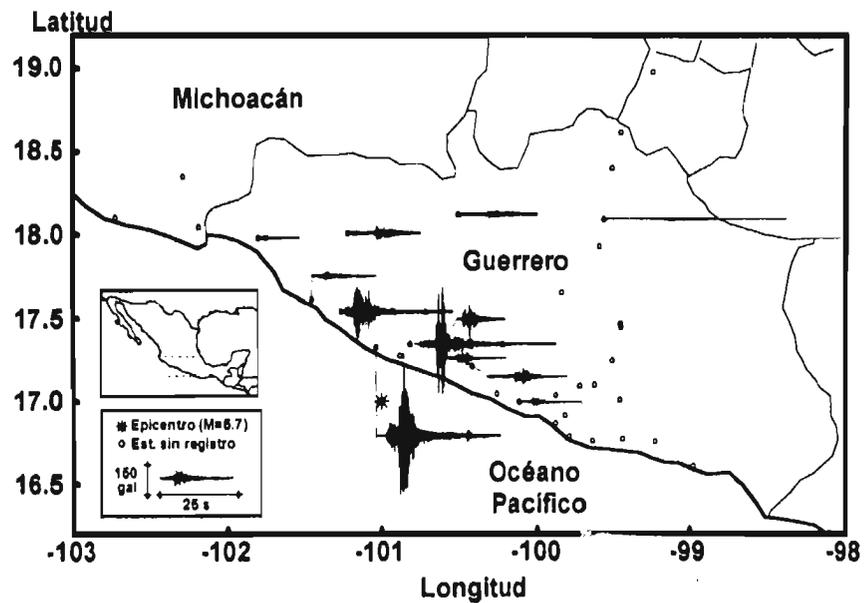


Figura 1.6 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 08/02/88, componente NS

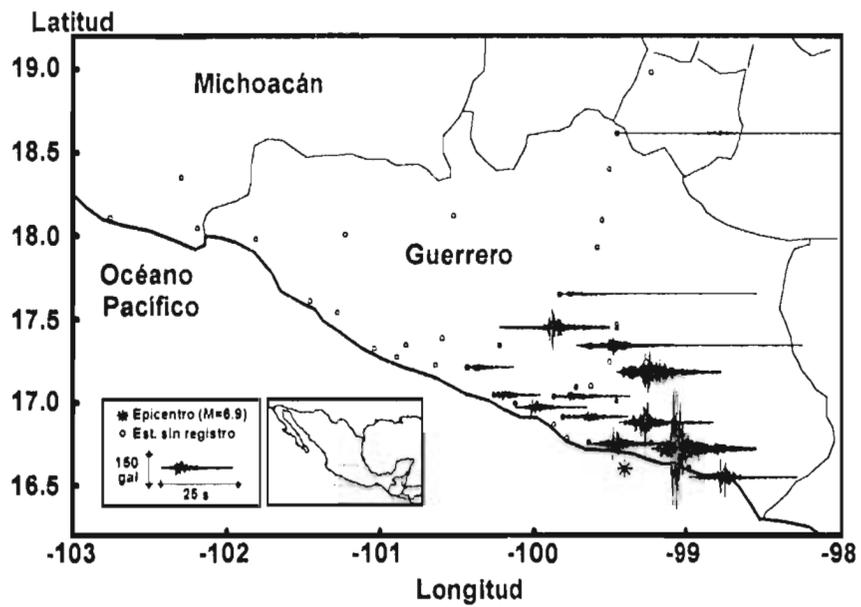


Figura 1.7 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 25/04/89, componente NS

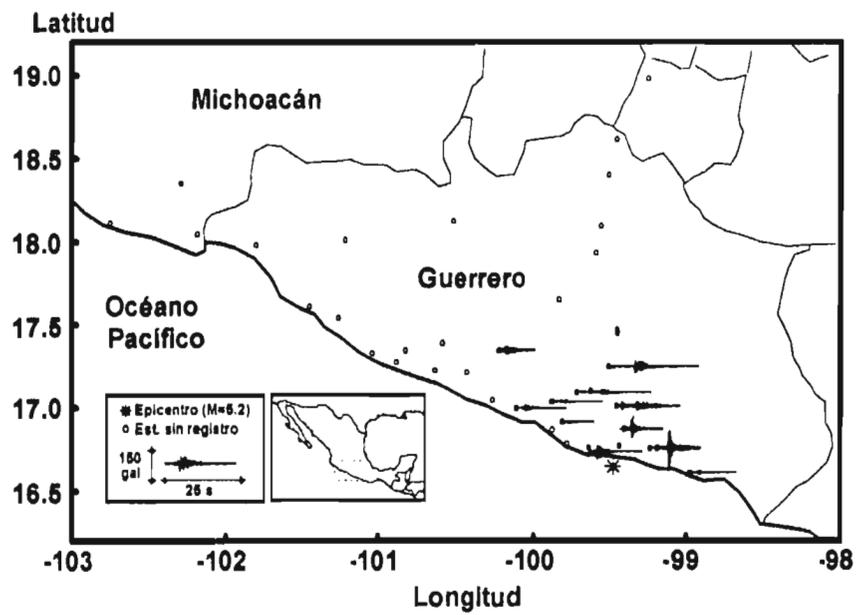


Figura 1.8 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 02/05/89, componente NS

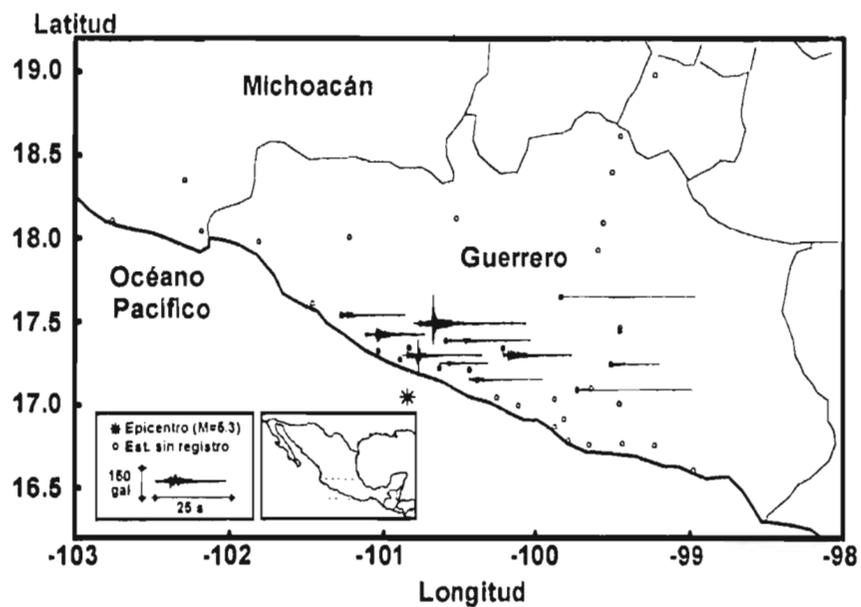


Figura 1.9 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 11/05/90, componente NS

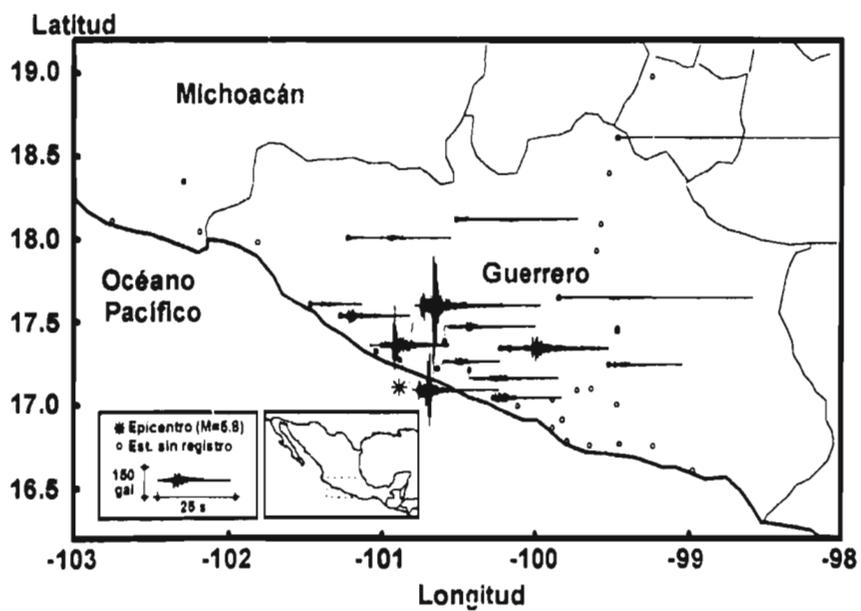


Figura 1.10 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 31/05/90, componente NS

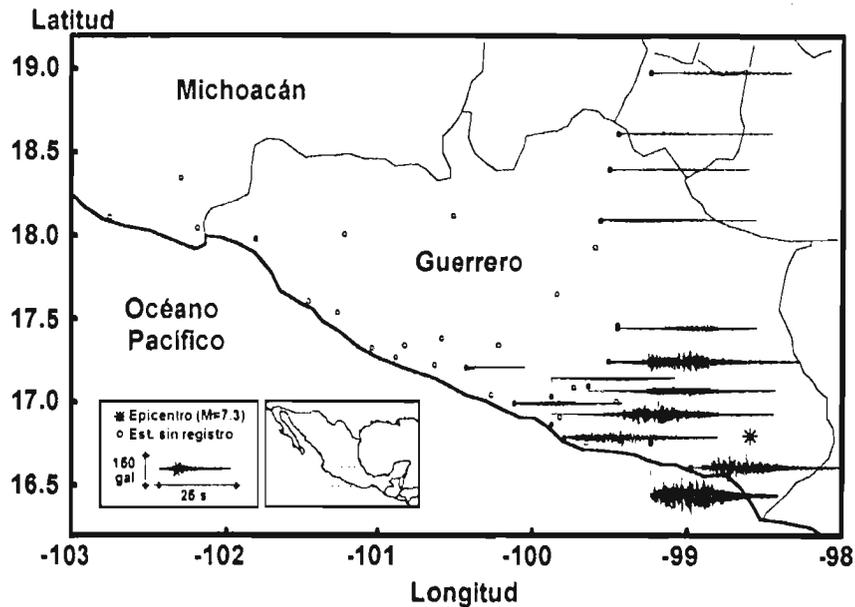


Figura 1.11 Red acelerométrica de Guerrero. Sismo: 14/09/95, componente NS

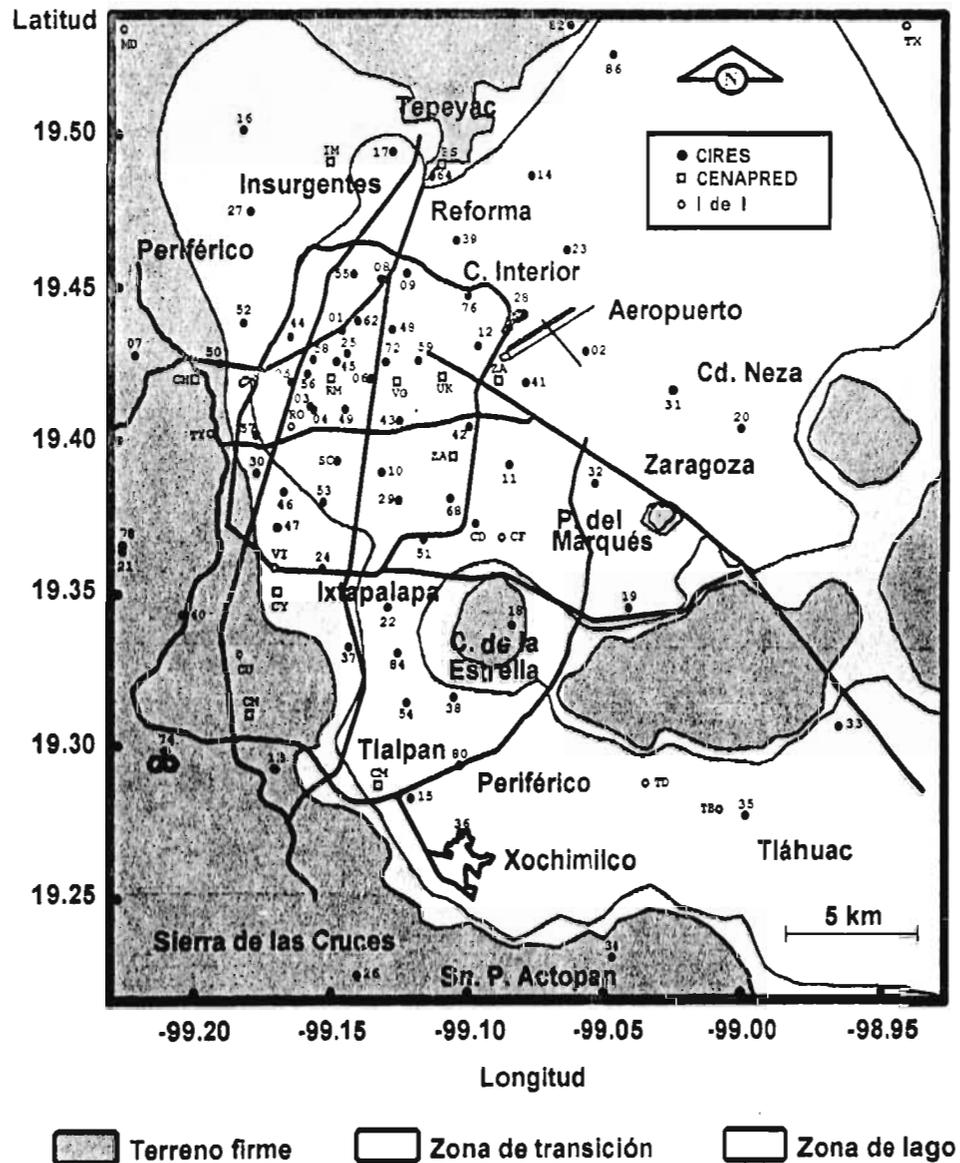
Todos los datos mostrados desde la figura 1.5 hasta la 1.11 se graficaron en la misma escala para su inmediata comparación. El hecho de seleccionar siete de los doce eventos citados en la tabla 1.1 es que estos sismos de subducción fueron bien registrados por las estaciones de la costa, aún para sismos pequeños como es el caso del temblor del 2 de mayo de 1989, de magnitud 5.2.

### 1.2.3 Red acelerométrica del valle de México

La figura 1.12 muestra la zonificación geotécnica del valle de México (Marzal y Mazari, 1990), así como la ubicación de las estaciones acelerométricas; se observa una mayor concentración de aparatos de registro en las zonas de mayor daño durante sismos intensos. En esa misma figura, se mencionan las instituciones que se encargan del control de la red: el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) de la Fundación Javier Barros Sierra, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La tabla 1.3 presenta el catálogo sísmico correspondiente a los acelerogramas obtenidos por las estaciones de registro de la ciudad de México para algunos de los temblores

mencionados en la tabla 1.1 y de interés para este trabajo. En esa misma tabla, se presenta el valor del periodo dominante ( $T_s$ ) del sitio donde se desplanta la estación acelerométrica dentro del valle de México, así como el nivel de calidad que guarda cada acelerograma registrado.



**Figura 1.12** Zonificación geotécnica (Marzal y Mazari, 1990) y ubicación de las estaciones de la red acelerométrica de la ciudad de México

**Tabla 1.3** Calidad de la información contenida en acelerogramas registrados en el valle de México para algunos sismos recientes

ESTACIÓN	T <sub>1</sub>	19/09/86	08/02/88	25/04/89	02/05/89	11/05/90	31/05/90	24/10/83	22/05/84	14/09/95	09/10/96
01	2.1	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
02	5.1	.	✓	✓	✓	cb	c	c	c	✓	✓
03	1.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
04	1.2	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
05	1.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	✓
06	2.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
07	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
08	2.2	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
09	2.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	x
10	2.3	.	✓	✓	✓	c	✓	✓	c	✓	✓
11	4.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	cb
12	3.8	.	✓	✓	cb	✓	✓	✓	✓	✓	✓
13	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14	3.8	.	✓	✓	✓	✓	c	✓	c	✓	✓
15	1.4	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
16	0.8	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
17	1.2	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓
18	0.5	.	cb	✓	✓	✓	cb	✓	✓	✓	x
19	2.7	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20	4.9	.	✓	✓	cb	cb	c	✓	c	x	✓
21	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
22	1.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
23	4.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24	1.1	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
25	2.3	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
27	0.8	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	b
28	0.5	.	✓	✓	✓	c	✓	c	✓	✓	✓
29	2.7	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓
30	0.5	.	c	✓	✓	c	✓	✓	✓	✓	✓
31	5.2	.	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
32	4.4	.	c	✓	cb	c	✓	✓	c	✓	✓
33	2.6	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
34	0.5	.	c	✓	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓
35	5.0	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
36	3.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
37	1.1	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
38	1.8	.	c	✓	✓	✓	✓	✓	c	✓	✓
39	2.7	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
40	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
41	4.7	.	c	✓	✓	✓	c	✓	✓	x	✓
42	4.4	.	✓	✓	c	cb	✓	✓	cb	✓	✓
43	3.1	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
44	1.3	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	c	x	✓
45	2.5	.	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
46	0.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
47	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
48	2.4	.	c	✓	c	✓	✓	x	c	✓	✓
49	2.8	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓
50	0.6	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
51	2.2	.	✓	✓	✓	c	✓	✓	✓	✓	✓
52	0.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
53	1.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	x	✓
54	1.1	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
55	1.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
56	2.4	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
57	0.9	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
58	2.3	.	✓	x	✓	✓	x	x	✓	✓	✓
59	3.1	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
62	2.1	.	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
64	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	c	✓	c
68	3.3	.	✓	✓	✓	cb	✓	✓	✓	x	✓
72	2.5	.	✓	✓	✓	c	✓	✓	✓	✓	✓
74	0.5	.	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	c
78	0.5	.	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
80	2.8	.	✓	✓	✓	✓	c	✓	c	✓	✓
84	1.4	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CD	3.2	✓	✓	✓	b	c	✓	✓	✓	✓	✓
CM	1.2	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Mi	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MR	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RD	1.3	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SC	1.9	.	✓	✓	✓	✓	x	✓	c	✓	✓
TB	5.0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TX	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TY	0.5	✓	✓	✓	b	✓	✓	✓	✓	✓	✓
VG	1.0	.	✓	✓	✓	✓	c	✓	c	✓	✓
VI	0.5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CU	0.5	✓	c	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CH	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CY	0.7	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ES	0.5	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IM	0.8	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
RM	2.4	.	✓	✓	✓	✓	c	✓	✓	✓	✓
TL	3.8	.	✓	✓	✓	✓	c	✓	✓	✓	✓
UK	3.6	.	✓	✓	✓	✓	c	✓	c	✓	✓
ZA	4.3	.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

- Sismo no registrado por la estación      ? Dato no disponible      b Registro de baja amplitud  
 ✓ Sismo registrado                              c Registro corto                              x Registro mal captado

Los temblores derivados a partir de un proceso de subducción son los que más han afectado a diversas ciudades del país y a la vez han arrojado una gran cantidad de datos. Por lo tanto, este trabajo se referirá a sismos de este tipo.

### **1.3 CARACTERÍSTICAS SIGNIFICATIVAS DE UN ACELERÓGRAFO DIGITAL**

Después de que un temblor importante ha ocurrido, el registro es recopilado y almacenado en un banco de información. Para poder estimar la duración del movimiento fuerte del terreno y obtener resultados confiables de su valor es conveniente realizar una selección adecuada de registros acelerométricos, definida a partir de una búsqueda de todos aquellos que posean un nivel de calidad aceptable, requiriendo para ello de una revisión visual y de contenido para cualquier registro sísmico.

Por otra parte, el hecho de considerar representativo la duración total de un registro como la duración significativa del movimiento originada por el temblor, puede conducirnos a una medición errónea del parámetro. De acuerdo con lo anterior, a cada aparato de registro se le impone un umbral de disparo, correspondiente a un valor determinado de la aceleración del terreno, y que se emplea para descartar cualquier movimiento o vibración ajeno a los efectos del temblor; este aspecto es importante para definir la magnitud de la duración del movimiento intenso en forma preliminar.

#### **1.3.1 Funcionamiento de un acelerógrafo digital**

Un acelerógrafo digital es todo aparato de registro sísmico que almacena información del movimiento del terreno al ocurrir un temblor, por medio de cintas magnéticas o memoria sólida (microcircuitos).

Para cada aparato se impone un umbral de disparo, el cual consiste en un determinado valor de aceleración que una vez rebasado por la presencia del movimiento fuerte del terreno, el acelerógrafo comienza a operar. El valor del umbral se fija de acuerdo a la zona, condiciones de sitio o de ruido ambiental. Cuando el umbral se excede, se registra una etapa de prevento el cual consiste en captar información en un lapso, entre 4 a 15

segundos, repitiéndose tantas veces como se alcance el valor del umbral; cuando se logra rebasar por última vez, se registra una etapa de postevento en la cual se logra almacenar información de 15 a 45 segundos. Los valores mencionados para las etapas de preevento y postevento dependen de la marca del aparato. Recientemente, y para estaciones localizadas lejos del área epicentral, se ha logrado disparar los acelerómetros en forma remota y obtener varios minutos de registro adicionales que permiten ver el evento sísmico más completo (Quass *et al.*, 1995).

Los acelerógrafos digitales se clasifican como: de ganancia constante o ganancia variable. Los acelerógrafos digitales de ganancia constante definen a un registro como una serie de escalones de tamaño constante; tiene la desventaja, para algunas aplicaciones, que para movimientos del terreno con baja amplitud no están correctamente registrados. Los acelerógrafos de ganancia variable tienen buena definición en todos los niveles y se ajustan a las amplitudes del movimiento que se van originando en el tiempo.

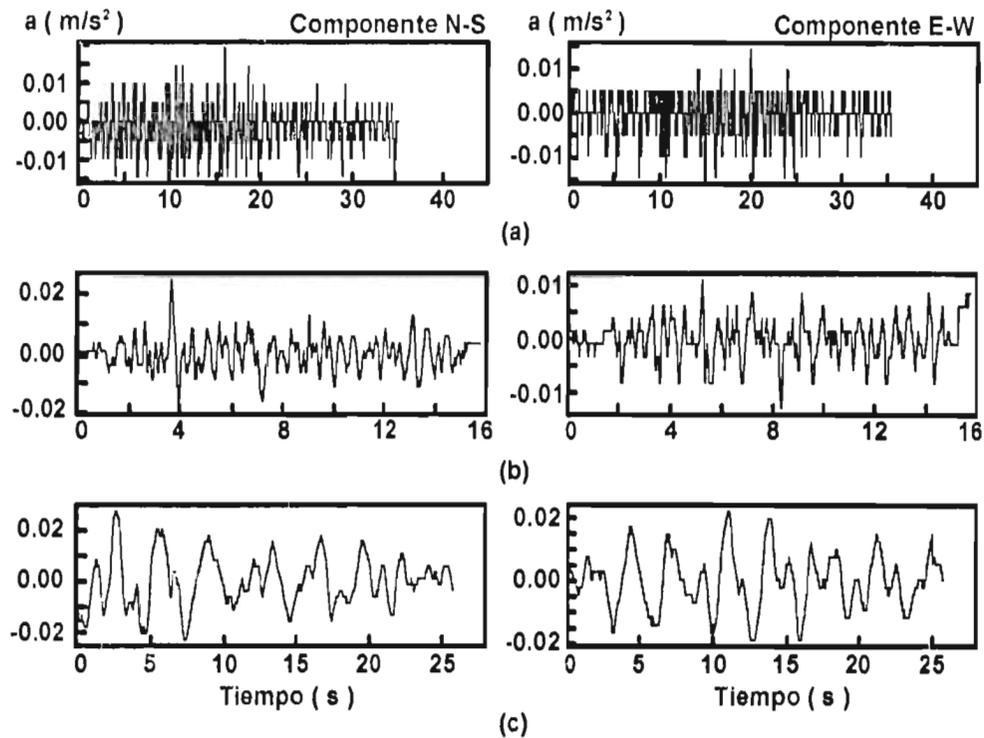
### **1.3.2 Defectos en los registros acelerométricos**

En muchas ocasiones el registro sísmico no es un fiel reflejo del movimiento. Esto dependerá directamente de las condiciones del sitio donde se ubique el acelerómetro, de su calibración, operación, mantenimiento, entre otros.

En el cálculo de la duración del movimiento fuerte del terreno, no resulta conveniente utilizar registros sísmicos en los que se presentan algunos defectos. A continuación, se describen y ejemplifican esos defectos tomando como base acelerogramas obtenidos en la ciudad de México:

#### **a) Amplitudes muy bajas:**

Cuando las aceleraciones del terreno son muy pequeñas. Se identifican por la presencia de "escalones" con amplitud constante en intervalos continuos del tiempo. La figura 1.13 ejemplifica este tipo de comportamiento dentro del acelerograma.



**Figura 1.13** Amplitudes muy bajas

- a) Sismo 02/05/89, estación TY
- b) Sismo 08/02/88, estación 18
- c) Sismo 08/02/88, estación 36

b) Pulsos repetidos:

Presencia de pulsos idénticos en un intervalo limitado dentro del acelerograma. Generados por una posible deficiencia en la extracción de datos de la cinta magnética a cualquier equipo de cómputo. Los pulsos repetidos ocurren al mismo tiempo en los 3 componentes del movimiento. La figura 1.14 muestra algunos ejemplos de este defecto.

c) Registros incompletos:

Son característicos de aquellos acelerogramas "cortados" o interrumpidos una vez que ha pasado un lapso determinado; las posibles causas que originan tales fallas son errores del sistema eléctrico o electrónico dentro de la estación acelerométrica, el valor impuesto del umbral de disparo o defectos en la cinta magnética. La figura 1.15 presenta algunos ejemplos.

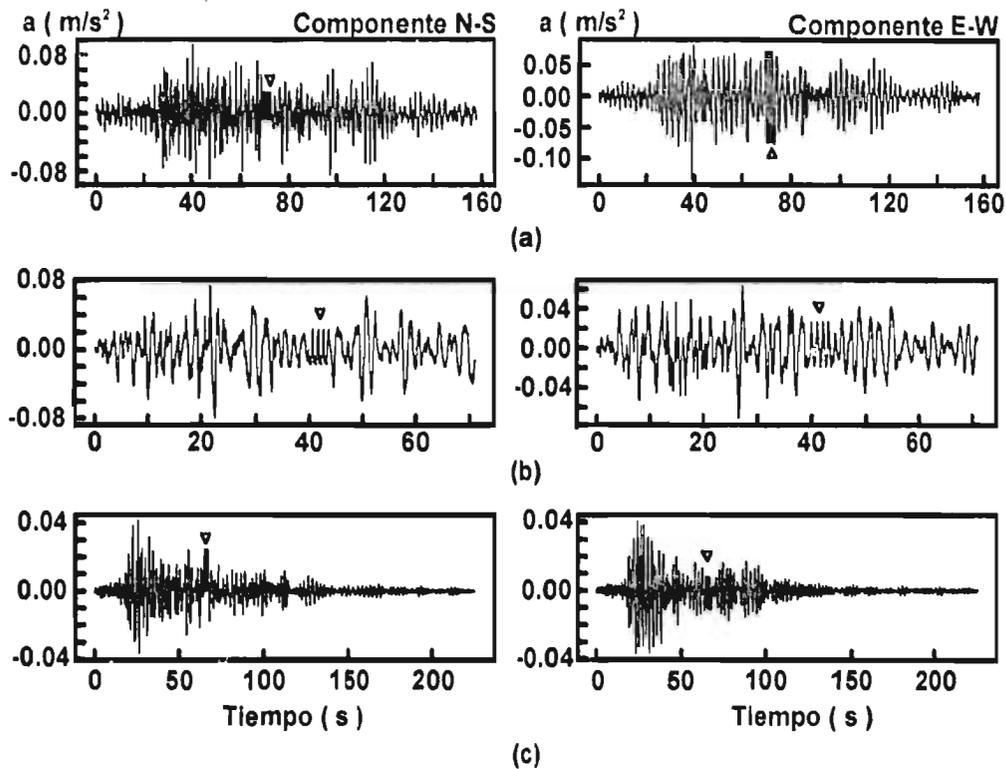


Figura 1.14 Pulsos repetidos

- a) Sismo 24/10/93, estación 58
- b) Sismo 24/10/93, estación 48
- c) Sismo 25/04/89, estación 58

### 1.3.3 Registros no representativos de una zona determinada

En ocasiones se pueden obtener acelerogramas que no representan con certidumbre las características dinámicas del terreno para las condiciones de un sitio específico, además de que no son confiables para tomar parte en el estudio de la duración del movimiento. Tal es el caso del registro mostrado en la figura 1.16, captado en la estación 20 (zona de lago de la ciudad de México) y correspondiente al evento del 2 de mayo de 1989; el acelerograma se considera de baja amplitud y corta duración. La causa de haber obtenido este tipo de registro, pudo atribuirse a las bajas amplitudes del movimiento que se generaron a partir de un sismo de magnitud pequeña ( $M=5.2$ ), las cuales no alcanzaron a excitar el terreno blando del valle en donde se ubica la estación mencionada.

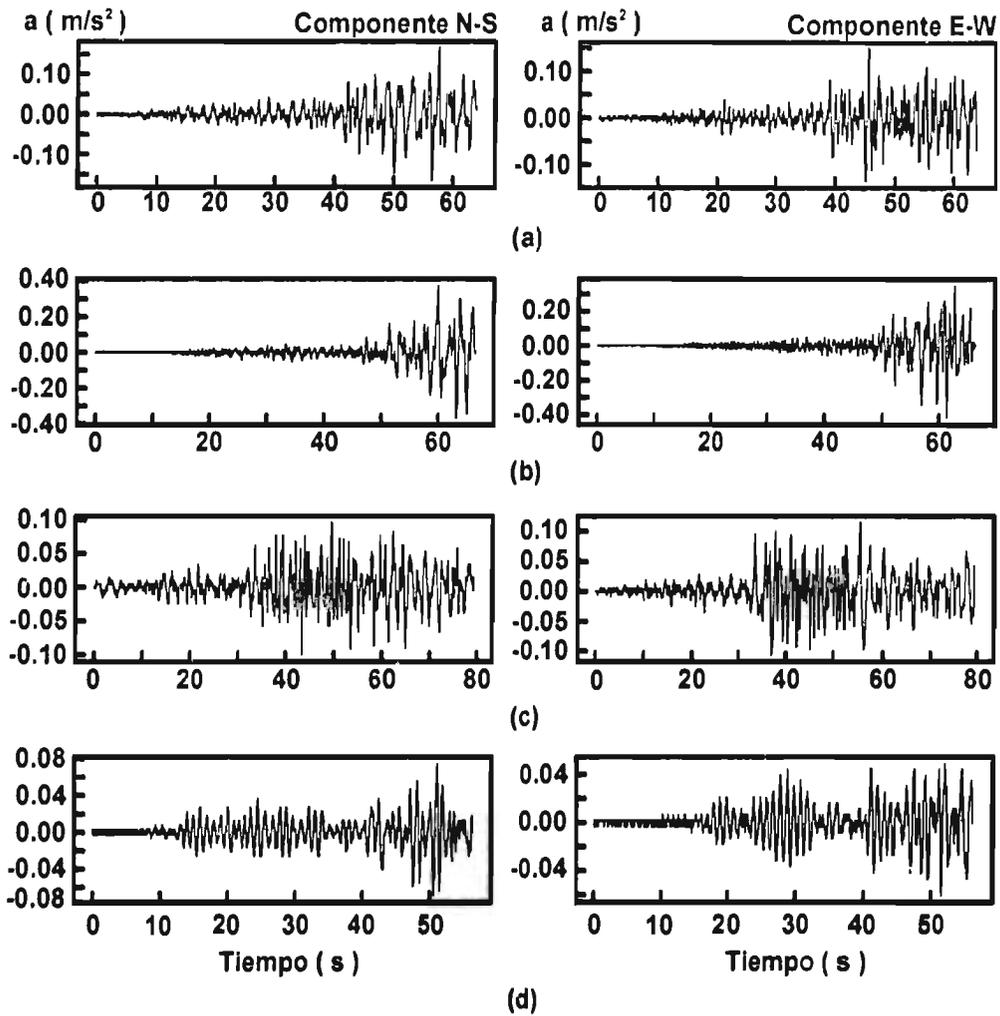


Figura 1.15 Registros incompletos

- a) Sismo 24/10/93, estación 05
- b) Sismo 14/09/95, estación 05
- c) Sismo 24/10/93, estación 09
- d) Sismo 24/10/93, estación 37

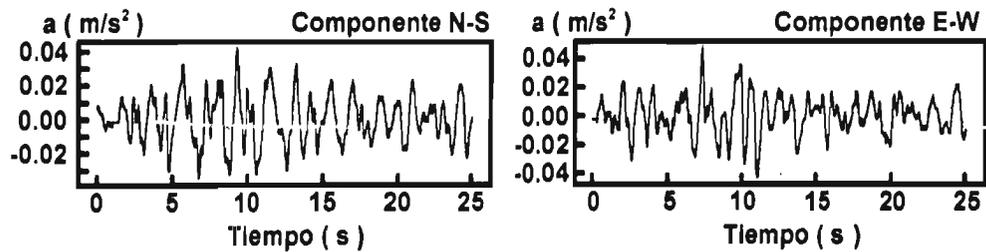


Figura 1.16 Sismo 02/05/89, estación 20

#### 1.3.4 Umbrales de referencia

El umbral de disparo puede y debe modificarse para que sea lo suficientemente alto y no estar continuamente registrando ruido o sismos pequeños, y a la vez suficientemente bajo para captar completamente los sismos importantes.

Con la cantidad de estaciones acelerométricas y de registros que se han obtenido con el paso de los años, se ha podido designar con mayor sencillez el valor del umbral, lo que no ocurría cuando apenas se empezaba a operar lo que hoy es la Red Acelerométrica Nacional.

Para poder llevar a cabo una buena elección del valor del umbral de disparo se requiere conocer algunos aspectos que se relacionan con el mismo y que se consideran para el estudio de la duración del movimiento:

a) Ruido Ambiental:

Movimientos del terreno producidos por vibraciones o excitaciones de carácter ambiental, los que a su vez pueden ser naturales (temblores locales) y artificiales (tráfico vehicular, movimiento de maquinaria, explosiones, etc.). Generalmente, salvo en algunos sitios (como en el suelo blando de la ciudad de México), se presentan amplitudes pequeñas de aceleración.

b) Efectos de sitio:

Dependiendo del tipo de suelo donde se desplante el acelerógrafo, es necesario utilizar valores de umbrales diferentes. Tal es el caso de las diferentes zonas geotécnicas de la ciudad de México y de la base rocosa de la costa del Pacífico.

En el caso de estaciones ubicadas muy cerca del epicentro de los temblores, se debe fijar un umbral muy alto para registrar con claridad sismos de magnitudes mayores de 4 ó 5

grados, y no registrar sismos pequeños para no saturar la memoria del sistema y poner en riesgo el poder captar un temblor moderado o severo.

Debido a que la Red Acelerométrica Nacional no maneja en la práctica un valor fijo del umbral de disparo para la serie de estaciones, en este trabajo se establece un umbral de referencia a partir de los registros obtenidos para el sismo del 19 de septiembre de 1985. Este sismo se selecciona debido a sus altos umbrales impuestos a los aparatos de registro en ese tiempo, así como del grado de daños que ocasionó en diversas ciudades de la República Mexicana y particularmente en la ciudad de México. La tabla 1.4 muestra los valores de los umbrales de referencia calculados.

**Tabla 1.4 Umbrales de referencia**

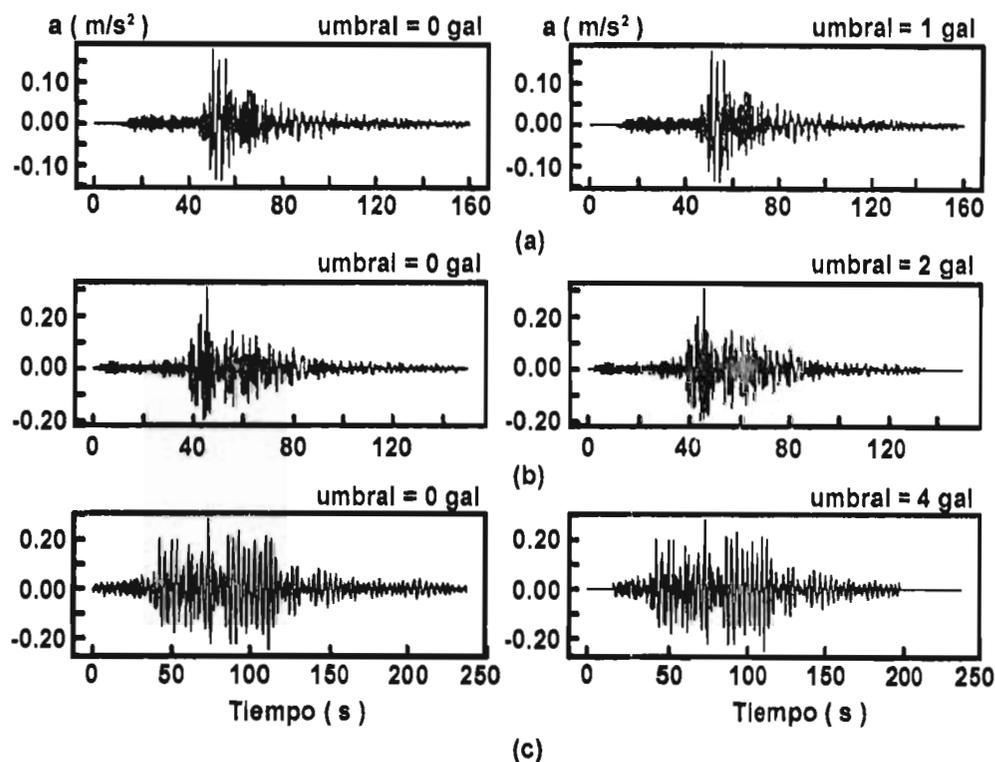
ZONA	ESTACIÓN DE ANÁLISIS	UMBRAL CALCULADO (gal )
- Costa del pacífico	Caleta de Campos	25.0
- Valle de México:		
a) Terreno firme	Tacubaya	1.0
b) Transición	Viveros	2.0
c) Zona de lago	Central de Abastos	4.0

Como podrá observarse en la tabla 1.4, el umbral de referencia para registros en la ciudad de México son mucho menores a los que se presentan para la costa. El valor del umbral de referencia calculado para registros de la costa llega a ser del orden de 25 y 6 veces mayor que la que se calculó para terreno firme y zona de lago respectivamente.

En este trabajo, las memorias de preevento y postevento son manejadas con valores de 4 y 15 segundos respectivamente, cantidades de referencia calificadas como representativas para la mayoría de las estaciones de la red acelerométrica de la República Mexicana.

Los valores de los umbrales de referencia de la tabla 1.4 se aplican en forma alterna a los componentes norte-sur, este-oeste y vertical de los registros en la costa, y solo considerando los componentes norte-sur y este-oeste para el valle de México. En la

ciudad de México, el componente vertical del movimiento no representa importancia ya que sus efectos no provocan daño relevante a los edificios.

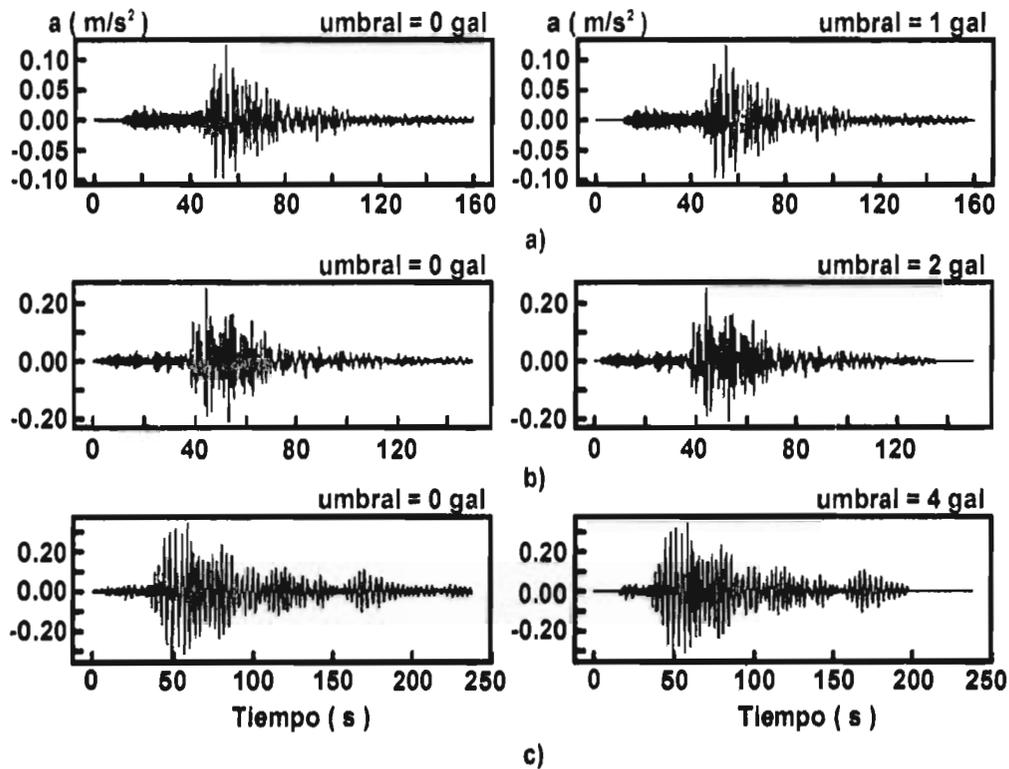


**Figura 1.17** Aplicación de umbrales de referencia.  
 Sismo: 25/04/89, componente norte-sur  
 a) Estación 13, zona I  
 b) Estación 46, zona II  
 c) Estación CD, zona III

Las figuras 1.17 y 1.18 presentan algunos ejemplos sobre la aplicación del criterio de umbral de referencia para algunos registros obtenidos en estaciones ubicadas en terreno firme (zona I), transición (zona II) y zona de lago (zona III) del valle de México. Los registros pertenecen al evento del 25 de abril de 1989 y corresponden al componente norte-sur en la figura 1.17 y al componente este-oeste para la figura 1.18.

Como una condición adicional, se propuso aplicar el umbral de referencia de 1 gal (valor obtenido para terreno firme de la ciudad de México) a todos aquellos acelerogramas registrados por las estaciones ubicadas dentro de un radio aproximado de 150 km de la

estación acelerométrica de Ciudad Universitaria ya que, el haber supuesto a esos registros dentro de una zona perteneciente a la costa del Pacífico, el umbral seleccionado para ellos con magnitud de 25 gal resulta un valor muy grande que los eliminaría completamente del análisis, cuando en realidad sus duraciones llegarían a ser del mismo orden de las que se podrían esperar para terreno firme en el valle de México.



**Figura 1.18** Aplicación de umbrales de referencia.

Sismo:25/04/89, componente este-oeste

a) Estación 13, zona I

b) Estación 46, zona II

c) Estación CD, zona III

Al hablar de la parte relevante de un acelerograma, se relaciona con la duración de la fase intensa del movimiento, quedando ésta implícita en un intervalo definido del registro completo. Aceptando el planteamiento anterior, se puede descartar el hecho de considerar que la duración total del registro es representativo de la duración de un sismo. La técnica propuesta en este trabajo con respecto al umbral de referencia, intenta eliminar

las posibles vibraciones que pudieran intervenir dentro del análisis y que no son consideradas propias del movimiento fuerte del terreno.

#### **1.4 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA DURACIÓN DEL MOVIMIENTO**

De acuerdo con la literatura, diversas investigaciones han sido desarrolladas con el fin de explicar, en forma empírica o analítica, el concepto de la duración del movimiento fuerte del terreno; existe una serie de procedimientos que intentan calcular la duración significativa. Algunos investigadores han definido el valor de la duración a partir de un determinado manejo de registros sísmicos obtenidos para una zona específica, aunque los resultados pueden ser difícilmente generalizados a todas las regiones sísmicas del mundo. Sin embargo, no se puede prescindir de los registros sísmicos, ya que son la base de información más firme en la que se puede apoyar cualquier trabajo de investigación referente al movimiento fuerte del terreno, incluyéndose el de la duración. Asimismo, la manera de procesar los datos disponibles es parte importante en el desarrollo de un estudio y los resultados que se obtengan dependerán enormemente del método empleado por cada investigador para calcular la magnitud del parámetro, tratando de apegarse a los efectos reales del temblor.

##### **1.4.1 Formas de medir la duración a partir de registros acelerométricos**

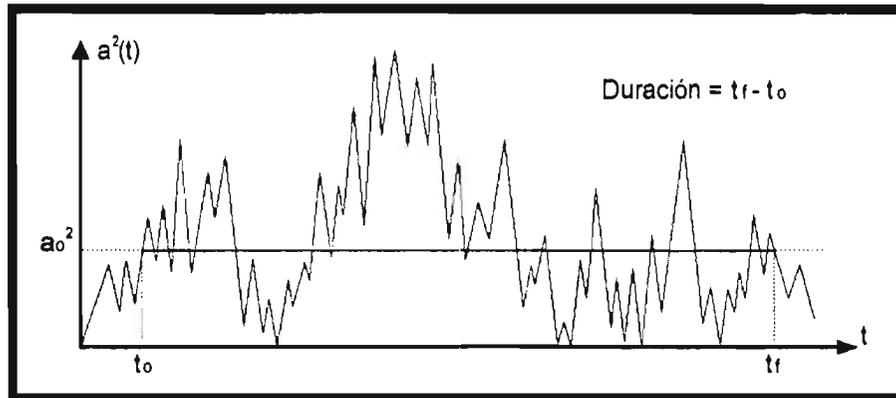
Un trabajo reciente, realizado por Bommer y Martínez-Pereira (1996), hace un repaso del estado del arte comparando diversas formas de medir la duración, estableciendo una clasificación en 3 categorías relacionada directamente con registros acelerométricos:

a) Duración acotada:

La figura 1.19 representa gráficamente la obtención de la duración del movimiento de acuerdo con el criterio de la duración acotada. La tabla 1.5 proporciona algunos valores de  $a_0$ , los cuales han sido propuestos por diferentes autores; la variable  $g$  representa la aceleración de la gravedad. En este método, la duración es muy sensible a pequeños cambios en el umbral  $e$  ignora la naturaleza del problema, lo que da como resultado que dos registros de sismos muy diferentes pueden llegar a tener la misma duración.

**Tabla 1.5** Valor de  $a_0$  para el cálculo de la duración acotada  
(Bommer y Martínez-Pereira, 1996)

Año	Estudiado por:	$a_0$
1967	Ambraseys y Sarma	0.03 g
1973	Bolt	0.05g
1976	Hisada y Ando	$t_0 = 0.0 - t_f = 0.10 a_{\text{máx}}$
1979	McGuire y Barnhard	0.05g, 0.10g, 0.15g, 0.20g $\alpha a_{\text{máx}}$ ( $\alpha=0.50, 0.67, 0.75$ )



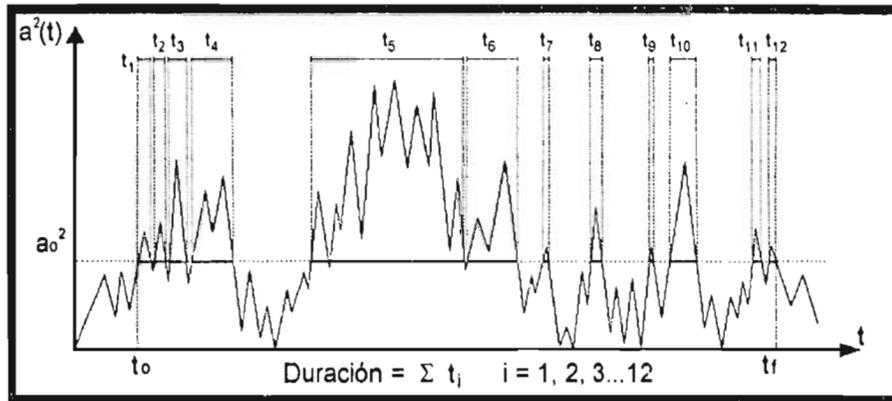
**Figura 1.19** Método para el cálculo de la duración acotada  
(Bommer y Martínez-Pereira, 1996)

b) Duración uniforme:

La tabla 1.6 presenta los valores propuestos de  $a_0$  y la figura 1.20 muestra una gráfica que ilustra este método. Tiene el mismo principio que la duración acotada, aunque la duración uniforme genera mayores incertidumbres por la presencia de etapas de tiempo.

**Tabla 1.6** Valor de  $a_0$  para el cálculo de la duración uniforme  
(Bommer y Martínez-Pereira, 1996)

Año	Estudiado por:	$a_0$
1973	Bolt	Valores absolutos de 0.05g y 0.10g
1977	Trifunac y Westermo	Valores combinados de duración uniforme y relevante
1990	Sarma y Casey	Extrapolación lineal entre Log(Duración) y $a_0$



**Figura 1.20** Método para el cálculo de la duración uniforme (Bommer y Martínez-Pereira, 1996)

c) Duración relevante:

La duración relevante del movimiento fuerte del terreno se basa en el criterio de aquel tiempo cuyo rango está comprendido entre un porcentaje determinado de la intensidad de Arias (Arias, 1970) de un registro acelerométrico. Como función del tiempo, la expresión que define la intensidad de Arias está dada por:

$$I_A = \frac{\pi}{g} \int_0^T a^2(t) dt \quad (1.1)$$

donde:

- $I_A$  Intensidad de Arias, en gal
- $a(t)$  Aceleración del terreno, en gal
- $T$  Duración total del registro, en s
- $g$  Aceleración de la gravedad, en gal

Una interpretación física de la intensidad de Arias se relaciona directamente con la función  $\int^T a^2(t) dt$  (Trifunac y Brady, 1975; Novikova y Trifunac, 1993), la cual es proporcional al trabajo (por unidad de masa) realizado en un determinado intervalo del tiempo por todas las fuerzas actuando sobre un oscilador de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso, excitado por la aceleración  $a(t)$ . La figura 1.21 muestra gráficamente la técnica para medir la duración relevante del movimiento fuerte del terreno;

asimismo, se aprecia que las amplitudes máximas del movimiento quedan incluidas dentro del intervalo de tiempo calculado.

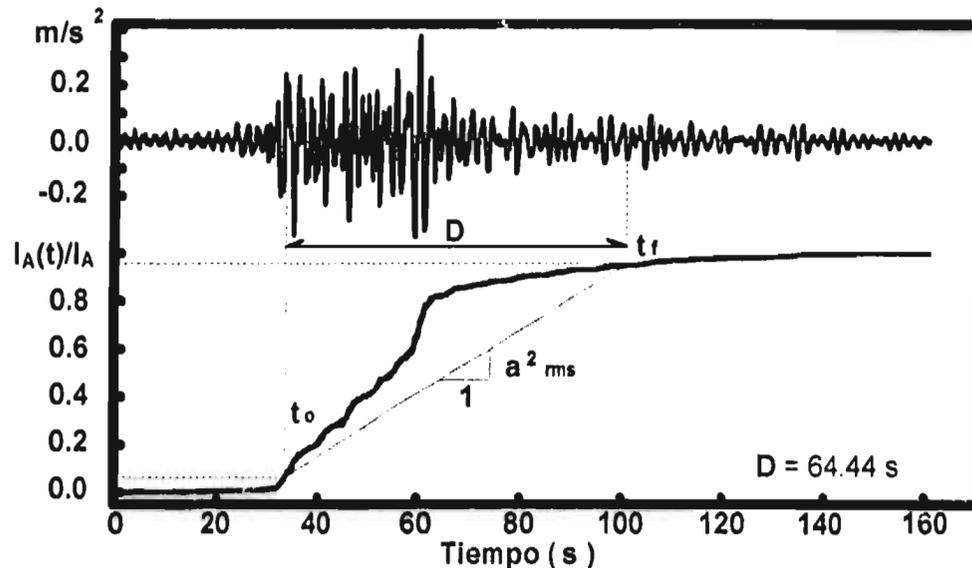


Figura 1.21 Método para el cálculo de la duración relevante

La tabla 1.7 muestra los distintos valores propuestos en la literatura para la duración obtenida con este método. Finalmente, bajo un análisis comparativo de los métodos, Bommer y Martínez-Pereira indican que:

- a) La duración acotada ignora la naturaleza del movimiento y puede ser altamente sensible a la aceleración impuesta, usada para definir los límites.
- b) La duración uniforme es preferible, pero no se define un rango de tiempo continuo, por lo que los intervalos descartados pueden ser importantes para el estudio de sismos potencialmente dañinos.
- c) La duración relevante es quizá la forma más efectiva de calcular la duración del movimiento fuerte del terreno, ya que refleja la energía contenida en el movimiento.

En México se ha propuesto que para cada registro se obtiene una duración, correspondiente al tiempo bajo el cual se presenta la parte más importante del acelerograma. De acuerdo a observaciones realizadas por Ordaz y Reinoso (1987), a

esta duración se le denominó: duración de la etapa intensa del movimiento fuerte del terreno. Para los sismos de subducción de México, se ha propuesto, para aplicarse a la teoría de vibraciones aleatorias, medir la duración como el lapso entre el cual se presenta el 5% y el 95% de la intensidad de Arias.

**Tabla 1.7** Cálculo de la duración relevante (Bommer y Martínez-Pereira, 1996)

Año	Estudiado por:	Duración
1972	Donovan	$t_0 = 0.0 - t_f = 0.90 I_{A \text{ máx}}$
1975	Housner	Duración equivalente a la proyección de la línea inclinada
1975	Trifunac y Brady	$t_0 = 0.05 I_{A \text{ máx}} - t_f = 0.95 I_{A \text{ máx}}$
1977	Trifunac y Westermo	La suma de intervalos más pequeño que contribuyen a $0.90 I_{A \text{ máx}}$
1979	McCann y Shah	Uso de la derivada ( $a_{\text{rms}}$ )
1980	Vanmarcke y Lai	Relación probabilista entre $a_{\text{máx}}$ y $a_{\text{rms}}$
1989	Theofanopulos y Watabe	Centroide de $a^2(t)$ a lo largo del eje del tiempo

Para este trabajo, se estima la duración del movimiento en la República Mexicana apoyándose en el criterio de la duración relevante. Este método resulta la manera más conveniente de medir el parámetro, ya que además de proporcionar un lapso continuo en donde toma en cuenta las máximas demandas del movimiento tiene su base en el concepto de la intensidad de Arias, cuya expresión posee una interpretación física asociada con el comportamiento dinámico de un oscilador de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso y excitado en su base. Desde el punto de vista estructural, es importante mencionar que la forma de estimar la duración del movimiento a partir del método de la duración relevante proporciona una medida de la uniformidad o no uniformidad de ingreso de energía en un edificio en comparación con la duración total del registro.

#### 1.4.2 La estimación de la duración a partir de expresiones generales

El manejo de datos sísmicos y la aplicación de procedimientos específicos para determinar la duración del movimiento en determinados lugares, ha ayudado a diversos investigadores a crear expresiones generales dependientes de otros parámetros

sísmicos. Una serie de ecuaciones han sido propuestas, y algunas de las cuales son descritas brevemente en los párrafos siguientes de este capítulo.

Esteva y Rosenblueth (1964) describen la duración de un movimiento ficticio equivalente, de intensidad uniforme por unidad de tiempo; el valor de la duración se utilizó para determinar los efectos del amortiguamiento viscoso en la forma de espectros de respuesta estimados. Dicha expresión se definió de la siguiente manera:

$$D = 0.15 e^{0.74M} + 0.3 R_o \quad (1.2)$$

donde:

<b>D</b>	Duración del movimiento, en s
<b>M</b>	Magnitud del sismo
<b>R<sub>o</sub></b>	Distancia focal, en km

Con base en diversos reportes sobre la duración del movimiento del terreno y empleando algunas formas de medirla, Housner (1965) propuso un límite superior del valor de la duración, dependiente de la magnitud del temblor. Este límite superior se obtiene mediante una ley lineal de la forma siguiente:

$$D = 11.2 M - 53 \quad \text{para } M > 5 \quad (1.3)$$

De acuerdo con la expresión 1.3, el límite superior alcanzaría una duración máxima cerca de los 45 s, para sismos grandes con  $M=8.5$ .

Otras relaciones lineales y exponenciales entre duración y magnitud han sido planteadas, una de ellas es la que propone Donovan (1974), cuya expresión incluye todas las condiciones de sitio para datos de eventos sísmicos, tanto de los Estados Unidos y Japón:

$$D = 4 + 11 (M - 5) \quad \text{para } M > 5 \quad (1.4)$$

De la misma manera Dobry *et al.* (1978) obtuvo una expresión que relaciona las mismas variables que Donovan; sin embargo, en este caso se asocia con sitios de mantos rocosos en la región occidente de los Estados Unidos, la cual quedó definida como:

$$\text{Log } D = 0.432 M - 1.83 \quad \text{para } M > 5 \quad (1.5)$$

Por otra parte, Trifunac y Brady (1975) encontraron que la duración del movimiento fuerte del terreno, en sitios con suelo de "sedimentos suaves", era de 10 a 12 segundos más grande que en sitios de basamentos rocosos. Asimismo, propusieron expresiones indicando el cambio de la duración con la distancia focal, de donde mencionan que aumentaba de 1 a 1.5 segundos por cada 10 km de incremento en la distancia. De la misma forma, encontraron que existía una variación con la magnitud del sismo en 2 segundos por cada unidad incrementada de la misma; comparando con algunos resultados que se obtenían de las expresiones de Donovan y Dobry, observaron que existían grandes variaciones en los resultados, excepto para sismos con magnitud pequeña.

Para estimar la duración del movimiento, Novikova y Trifunac (1993) propusieron sustituir los datos instrumentales por una descripción cualitativa de los efectos de un temblor en términos de la Intensidad de Mercalli Modificada ( $I_{MM}$ ). Desarrollaron dos expresiones basadas en regresiones matemáticas; en una de ellas incluye la distancia hipocentral como un parámetro importante del modelo propuesto, mientras que la otra la descarta. Ambas expresiones se propusieron en términos de la magnitud del sismo, manejada esta última en forma implícita. Como una primera opción la duración se representó como la suma de:

- a) El tiempo de ruptura en el lugar de origen del sismo ( $\tau_0$ ) que, de acuerdo con Novikova y Trifunac, puede ser relacionada con la magnitud del sismo.
- b) Un término de dispersión, que representa el aumento de la duración a lo largo de la trayectoria de propagación ( $\tau_\Delta$ ).

De esta manera, la forma más simple de representar la duración del movimiento fuerte del terreno en términos de la Intensidad Modificada de Mercalli ( $I_{MM}$ ) se estableció como:

$$(\tau_0 + \tau_{\Delta}) = C1 + C2 * I_{MM} \quad (1.6)$$

donde:

( $\tau_0 + \tau_{\Delta}$ )      Duración del movimiento  
 C1 y C2            Constantes dependientes del contenido de frecuencias,  
                          Novikova y Trifunac (1993)

La otra expresión empírica muestra la influencia de la distancia hipocentral. Basada en las mismas consideraciones del modelo anterior (ecuación 1.6), la expresión en función de la distancia se definió de la siguiente manera:

$$(\tau_0 + \tau_{\Delta}) = C3 + C4 * I_{MM} + C5 * \Delta' + C6 * I_{MM} * \Delta' \quad (1.7)$$

donde:

$\Delta'$                     Distancia hipocentral  
 C3, C4, C5, C6    Constantes dependientes del contenido de frecuencias,  
                          Novikova y Trifunac (1993)

La variable  $\Delta'$  de la ecuación 1.7 queda definida en función de la distancia epicentral y la profundidad hipocentral. En esa misma investigación, Novikova y Trifunac obtuvieron otro par de modelos en donde se incluyó la influencia del tipo de suelo dentro de las expresiones 1.6 y 1.7.

Con base en el planteamiento de expresiones generales que calculan la duración del movimiento para una zona específica y dada la gran cantidad de información disponible que se tiene a partir de sismos de subducción mexicanos, resulta válido proponer ecuaciones que estimen la duración en la zona sísmica de la costa del Pacífico y sitios distantes de ella (incluyéndose las diferentes zonas geotécnicas de la ciudad de México),

y que a su vez se relacionen con otros parámetros sísmicos. Tales expresiones son presentadas en los capítulos posteriores de este trabajo.

## CAPÍTULO II

### DURACIÓN DEL MOVIMIENTO EN ZONAS DE MÉXICO CON TERRENO FIRME

#### 2.1 LA DURACIÓN Y SU RELACIÓN CON OTROS PARÁMETROS SÍSMICOS

Dentro de la ingeniería sísmica, es común hablar de la aceleración máxima del terreno en un registro sísmico o de las aceleraciones máximas presentadas en un espectro de respuesta como parámetros relevantes para comprender los efectos causados por un temblor. Como una alternativa más, la duración del movimiento fuerte del terreno pretende ser una variable que ayude a entender mejor las características dinámicas del suelo y el deterioro estructural.

En este capítulo, se aborda la estimación de la duración del movimiento utilizando datos registrados en terreno firme de la República Mexicana. De acuerdo con la condición establecida referente al tipo de suelo, los acelerogramas que intervienen en este análisis pertenecen a la zona epicentral, al trayecto comprendido entre la zona epicentral y el valle de México, y al terreno firme de la ciudad de México. Los diferentes eventos sísmicos seleccionados para el desarrollo de este capítulo son los que se muestran en las figuras 1.5 a la 1.11.

Con ayuda de un catálogo sísmico depurado, creado a partir de sismos de subducción mexicanos ocurridos cerca de la costa del Pacífico y registrados por parte de la Red Acelerométrica Nacional, es posible estimar la duración del movimiento fuerte del terreno para todos y cada uno de los lugares en donde se ubican las estaciones acelerométricas (desplantadas sobre terreno firme) y en las que se obtuvo el registro de un temblor.

Los resultados obtenidos de la duración se relacionan con otros parámetros sísmicos como son: la magnitud del temblor (**M**) y la distancia al área de la ruptura (**R**). Se establece una expresión matemática que relaciona en cierta forma las tres variables mencionadas y la cual se expone al final de este capítulo. De esta manera, se obtiene una base analítica para la estimación de la duración del movimiento en zonas de México con terreno firme, aplicable a eventos sísmicos futuros.

## 2.2 DURACIÓN DE LOS SISMOS DE SUBDUCCIÓN EN MÉXICO

Utilizando los datos de la red acelerométrica de Guerrero y del valle de México, se presenta en la figura 2.1 un croquis donde se aprecia e ilustra la diversidad del movimiento no solo en términos de la duración sino también en amplitud y contenido de frecuencias (Reinoso, 1995). El sismo utilizado corresponde al 25 de abril de 1989 y el componente mostrado es el norte-sur; el epicentro es señalado con un asterisco. En la estación de Las Vigas, localizada sobre la zona epicentral, el movimiento fue de duración corta pero con gran amplitud y con periodos de vibración cortos.

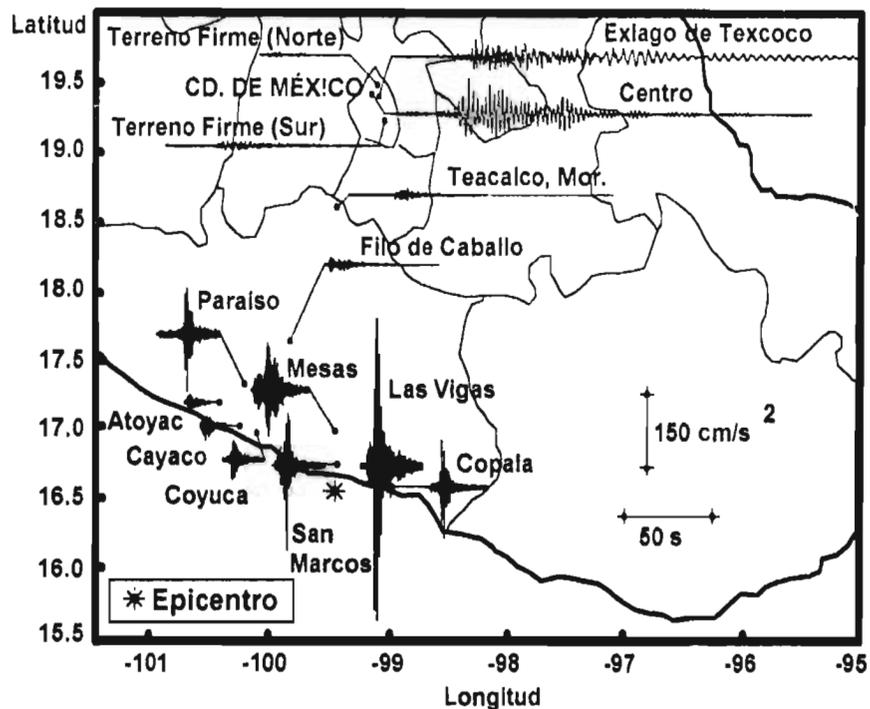


Figura 2.1 Incremento de la duración con la distancia. Sismo: 25/04/89

El efecto de atenuación se aprecia en la baja amplitud de los registros ubicados hacia el poniente (estaciones Atoyac, Coyuca y Cayaco) y al oriente (estación Copala); inclusive, otras estaciones ubicadas más al poniente no registraron el sismo. También hacia el norte, incluyendo los sitios en terreno firme de la ciudad de México, se aprecia la disminución en la amplitud de los registros y el incremento de la duración (estaciones Filo de Caballo y Teacalco). Además, se muestran dos acelerogramas en zona del lago con el

objeto de poner en evidencia la gran diferencia del movimiento causada por la brutal amplificación en la zona lacustre. En estos registros de zona del lago se aprecia la existencia de periodos dominantes largos, la gran amplificación dinámica y el sustancial incremento en la duración.

Gracias a la gran cantidad de aparatos de registro instalados, se ha podido observar la variación de la duración del movimiento para diferentes zonas de la República Mexicana. Con base en lo anterior, el interés por estimar la duración del movimiento fuerte del terreno para un determinado temblor surge de la relación que tiene el parámetro con los posibles daños estructurales causados en distintos lugares del país.

De acuerdo con la base de datos con la que se cuenta, obtenida por la Red Acelerométrica Nacional, se limita a estudiar los sismos de subducción dentro del país, y no es conveniente generalizar los resultados y expresiones finales hacia lugares distintos; sin embargo, este trabajo intenta proporcionar una base analítica y comparativa para la realización de investigaciones posteriores.

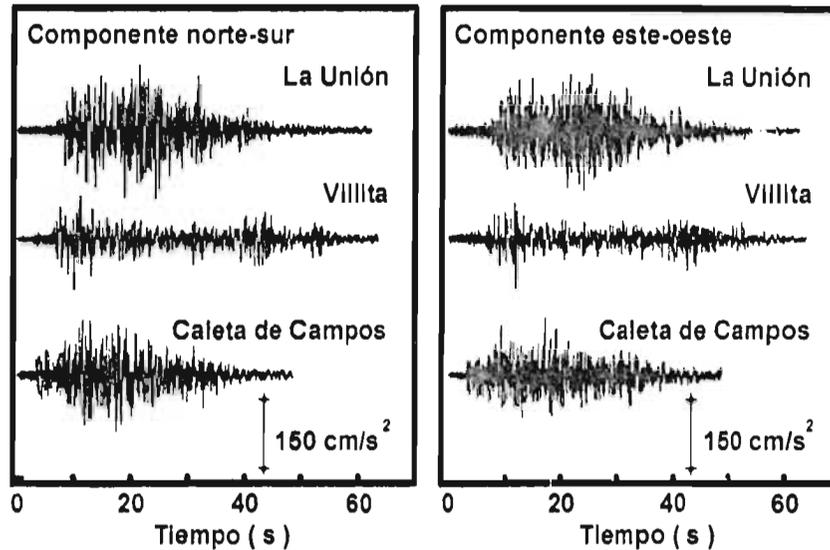
### **2.3 DURACIÓN EN EL ÁREA DE LA RUPTURA**

Una de las características asociada con la duración del movimiento fuerte del terreno es quizá los efectos dentro del área de la ruptura. La mayoría de los registros acelerométricos obtenidos cerca de la fuente sísmica muestran un comportamiento peculiar de grandes aceleraciones del terreno con duraciones relativamente pequeñas, característico de un fallamiento abrupto de la roca asociado con el proceso de subducción. En México, las poblaciones que se encuentran localizadas a lo largo de la costa del Pacífico, son las más propensas a recibir los embates relacionados con este tipo de movimientos.

#### **2.3.1 El sismo del 19 de septiembre de 1985**

Para sismos recientes ocurridos en México y principalmente en la zona epicentral, de acuerdo con una observación visual de algunos de los registros acelerométricos (figuras

1.6, 1.7, 1.8, 1.9 y 1.10), las duraciones llegan a ser del orden de 2 a 10 segundos, aunque no se descarta que para sismos futuros pueda ser aún mayor.



**Figura 2.2** Acelerogramas registrados cerca de la fuente sísmica. Sismo: 19/09/85

Tal es el caso del sismo del 19 de septiembre de 1985, en donde los datos obtenidos cerca de la fuente sísmica muestran largas codas que, estimando la duración intensa, pueden llegar a medirse más de 20 segundos. Lo anterior puede ser corroborado por algunos acelerogramas registrados sobre el área de la ruptura y en las estaciones de Caleta de Campos (CALE), Villita (VILE) y La Unión (UNIO) para ese mismo sismo; la figura 2.2 muestra gráficamente esos registros en sus componentes norte-sur y este-oeste. Este efecto pudo haber sido ocasionado por el mecanismo de falla de las mismas placas tectónicas, el tamaño del área de ruptura y la posible irradiación anómalamente energética del evento en la fuente sísmica (Singh *et al.*, 1990).

El evento del 19 de septiembre de 1985 es ejemplo de la complejidad de una fuente sísmica que se genera a partir de un temblor de gran magnitud. De acuerdo con un análisis de ondas P telesísmicas (UNAM Seismology Group, 1986; Astiz *et al.*, 1987), se determinó que el temblor estuvo compuesto por dos subeventos y que el segundo ocurrió a 95 km al sureste del primero; si tomamos en cuenta que el primer evento comenzó en el hipocentro del sismo (cerca de la estación acelerométrica Caleta de Campos), entonces

la fractura de la roca se propagó en dirección hacia otras estaciones de registro (Villitas y La Unión) originando un área de ruptura importante (ver figura 1.3). Al suponer que la falla ocurrió en forma gradual a partir del hipocentro y a lo largo de un poco menos de 170 km, que es la longitud del área de la ruptura para el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Singh y Ordaz, 1995), es motivo para justificar las grandes codas que se presentaron en los acelerogramas obtenidos cerca de la fuente sísmica. Por lo anterior, es posible que el mecanismo de ruptura de un sismo de subducción mexicano intenso puede propiciar duraciones del movimiento demasiado grandes en el área de la ruptura o cerca de ella; esto dependerá también del punto de inicio de la falla, es decir, la ubicación del hipocentro dentro del área de la ruptura que resulta al final del proceso de subducción. Quizá no se hubiera podido obtener las mismas duraciones del movimiento para el temblor del 19 de septiembre (figura 2.2) si la fractura hubiese iniciado al centro de su área de ruptura.

Esto pone en claro que no es posible considerar a todos los sismos como modelos de uria sola fuente para obtener duraciones del movimiento fuerte del terreno. En general, las duraciones que se podrían esperar en la zona de la ruptura para un sismo determinado serían pequeñas, como se demuestra en la mayoría de los acelerogramas que se han obtenido en la costa del Pacífico. Sin embargo, en casos extraordinarios se pueden presentar sismos que generen acelerogramas con duraciones mayores.

Asimismo, es deseable cuantificar la forma de acumulación de energía dentro de una brecha sísmica, conocer con certeza las características de la placa subducida, así como estudiar el proceso de ruptura, ya que son aspectos que definen en cierta forma el contenido de los registros acelerométricos cerca de la fuente sísmica y es indudable que de ello dependa también el valor calculado de la duración del movimiento intenso.

### **2.3.2 La duración dependiente de la magnitud**

La duración del movimiento en sitios sobre el área de la ruptura está dominado por ondas de alta frecuencia. Según modelos teóricos (Brune, 1970), la duración se encuentra estrechamente relacionada con la magnitud del sismo y crece con ella.

En problemas dinámicos, la capacidad de los elementos estructurales y la demanda sísmica no pueden separarse, ya que dependen una de la otra. Por ello, parámetros únicos como la aceleración y desplazamientos máximos e inclusive los espectros de respuesta no proporcionan una adecuada descripción ni de la capacidad ni de la demanda. Como ejemplo comparativo, la figura 2.3 muestra algunos acelerogramas (Singh y Ordaz, 1995) obtenidos por estaciones localizadas a menos de 20 km del área epicentral durante cuatro sismos de magnitudes diferentes ( $5.7 \leq M \leq 8.1$ ); en la parte derecha se indica la estación, la fecha del sismo, la magnitud y la duración de la ruptura calculada ( $T_d$ ). La duración de la ruptura puede ser expresada mediante la siguiente fórmula (Boore, 1983; Singh y Ordaz, 1995):

$$\frac{1}{T_d} = 4.9 \times 10^6 \beta \left( \frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} = \frac{2.34\beta}{2\pi r_0} \quad (2.1)$$

donde:

$T_d$	Duración de la ruptura, en s
$\Delta\sigma$	Caída de esfuerzos, en bares
$M_0$	Momento sísmico, en dina-cm.
$\beta$	Velocidad de las ondas de corte, en km/s
$r_0$	Tamaño de la fuente sísmica, en km

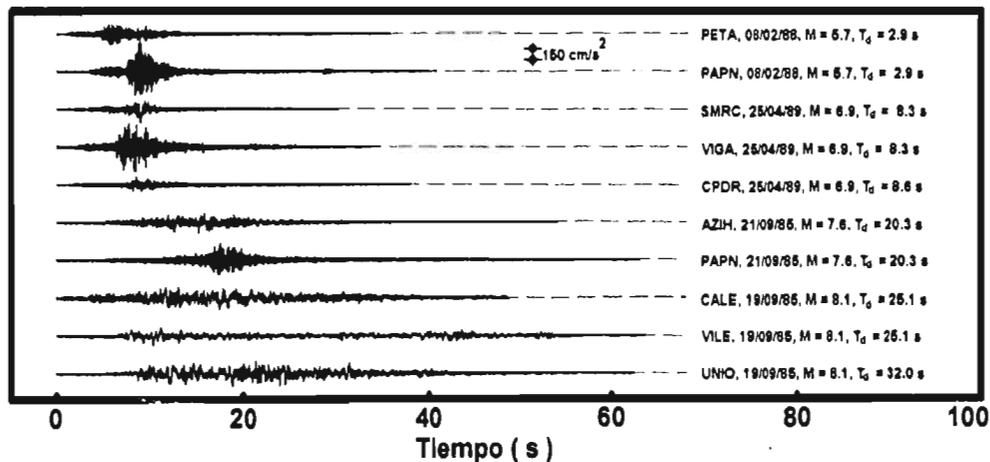


Figura 2.3 Duración de la ruptura para sismos diversos (Singh y Ordaz, 1995)

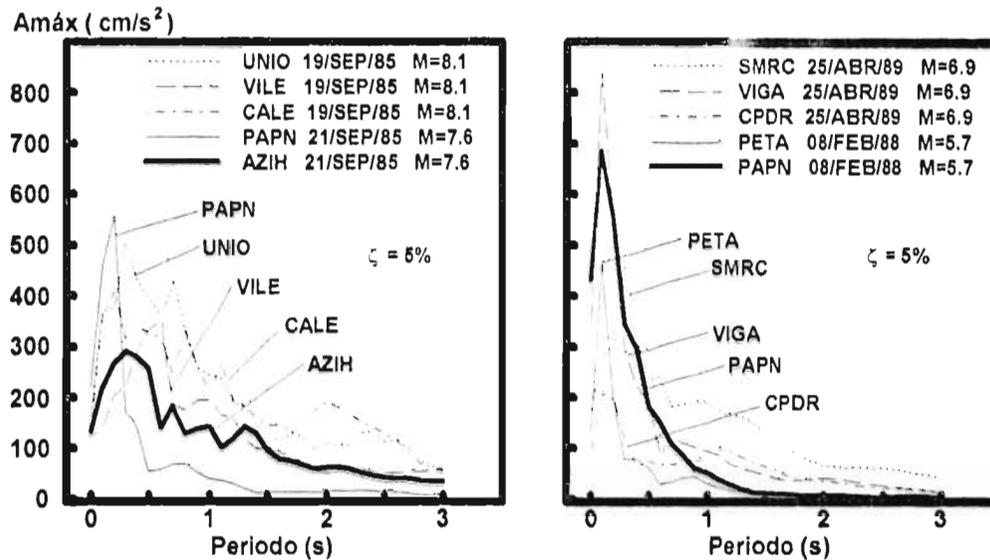


Figura 2.4 Espectros de aceleraciones asociados con los acelerogramas mostrados en la figura 2.3

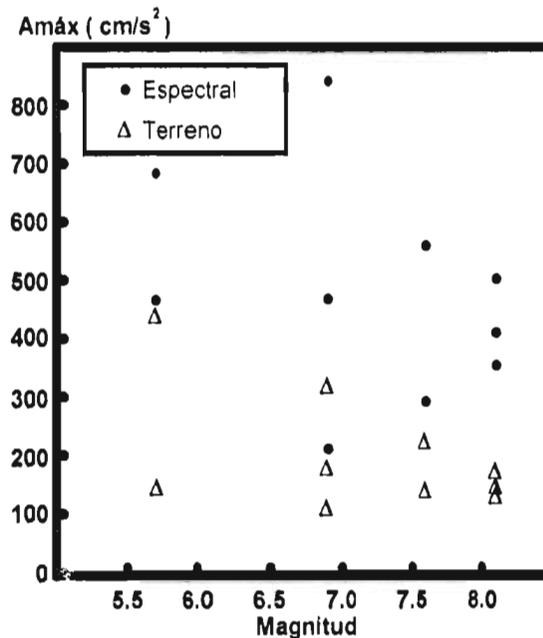
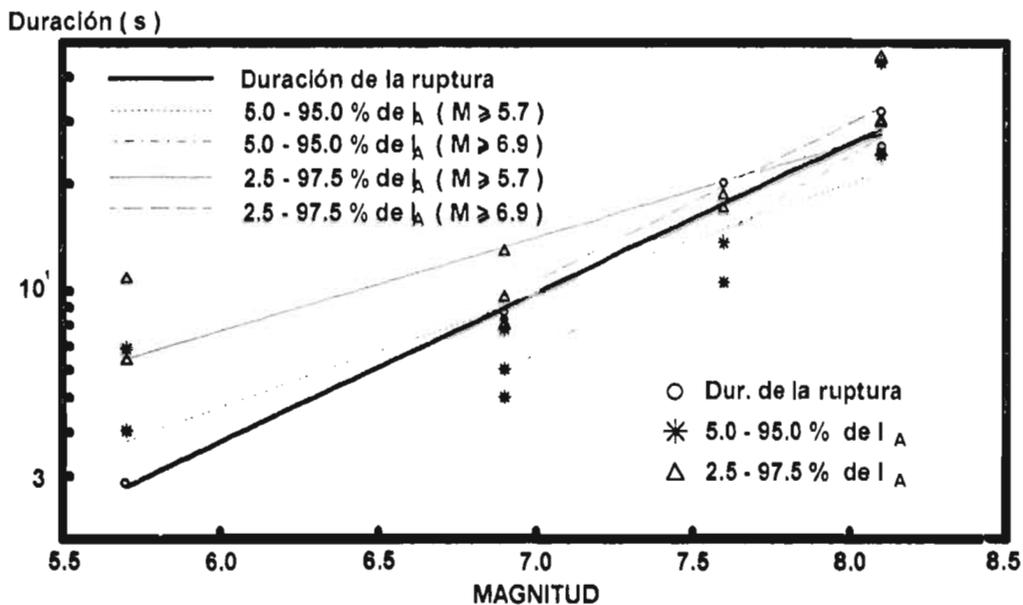


Figura 2.5 Aceleración máxima contra magnitud. Los datos mostrados se extrajeron de la información contenida en las figuras 2.3 y 2.4

Son notorias las diferencias observadas para los registros mostrados en la figura 2.3, tanto en amplitud como en la duración de la ruptura, pero uno esperaría que la aceleración para el evento con  $M=8.1$  fuera mayor que para el de  $M=5.7$ .

La figura 2.4 muestra los espectros de respuesta obtenidos a partir de los registros acelerométricos de la figura 2.3, para 5% de amortiguamiento. Es cierto que los espectros para el sismo con  $M=8.1$  presentan mayor amplitud en periodos mayores a 1.5, pero se considera que la diferencia no es suficiente para explicar los daños que se observaron durante ese terremoto.



**Figura 2.6** Duración del movimiento contra magnitud. Los datos graficados se obtuvieron a partir de los acelerogramas mostrados en la figura 2.3

La figura 2.5 relaciona la magnitud del sismo con las aceleraciones máximas del terreno y espectral, siendo evidente que no existe ninguna correlación entre esas cantidades. Lo paradójico es que el sismo de  $M=8.1$  fue destructivo, por lo que pone en claro que ni la aceleración máxima del terreno ni la aceleración máxima espectral reflejan ese daño. La figura 2.6, basada en los datos mostrados en la figura 2.3, presenta la dependencia de la duración con la magnitud. La línea gruesa es un ajuste de la duración de la ruptura reportada por Singh y Ordaz (1995). Las otras cuatro líneas indican los ajustes de las duraciones calculadas por el método de la duración relevante tomando como límites, según se indican en la figura, del 5% al 95% y del 2.5% al 97.5% de la intensidad de Arias para dos grupos de sismos: con  $M \geq 5.7$  y con  $M \geq 6.9$ . Observando la gráfica 2.6, la variación en los límites aplicados para la intensidad de Arias llega a contribuir para

obtener la duración del movimiento dentro de la zona de la ruptura, lo cual se hace muy sensible los resultados con pequeños cambios de los mismos.

De acuerdo con la figura 2.6, la magnitud resulta ser un parámetro mediador en la comparación entre la duración de la ruptura (calculada con base en parámetros sísmicos de la fuente) y la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno (calculada con apoyo de registros acelerométricos). La línea perteneciente a los límites del 2.5% al 97.5% de la intensidad de Arias y para el grupo de sismos con  $M \geq 6.9$ , se asemeja a la recta que representa la duración de la ruptura; esto indica una buena aproximación del cálculo de la duración del movimiento fuerte del terreno para sismos moderados a intensos. Por lo anterior y para los cálculos posteriores, la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno se realiza tomando como límites el 2.5% y 97.5% de la intensidad de Arias.

## **2.4 SITIOS DISTANTES A LA FUENTE SÍSMICA**

Una vez que ha ocurrido un temblor en las costas del Pacífico de la República Mexicana, las ondas sísmicas viajan en diferentes direcciones a través de la superficie (ondas Love y Rayleigh) o por los estratos del subsuelo (ondas primarias "P" y secundarias "S"). De acuerdo con el fenómeno de atenuación de ondas, la amplitud del movimiento decrece con la distancia, como pudo corroborarse por medio de los registros acelerométricos de la figura 2.1. Dado que en el proceso de subducción se libera la energía almacenada por el contacto de las placas tectónicas, dicha energía tiende a conservarse en el trayecto o viaje de las ondas sísmicas y que, de acuerdo con los registros acelerométricos que se han obtenido para un sismo determinado, se refleja en una disminución de la amplitud de la onda conforme la distancia aumenta, aunque por otra parte se presenta un incremento importante en la duración del movimiento.

Sin embargo, algunos registros acelerométricos mostrados en las figuras 1.5 a la 1.11 del capítulo anterior, indican que también existe un comportamiento diferente entre las ondas sísmicas que se internan dentro de la República Mexicana con aquellas que viajan paralelamente a la costa del Pacífico. Como pudo apreciarse en esas figuras, es posible encontrar acelerogramas que demuestran una disminución de la duración del movimiento a lo largo de la costa, y a razón de que las ondas sísmicas se alejan de la fuente; no así

para los acelerogramas que se obtuvieron en una trayectoria recta desde la zona de la ruptura al valle de México, en donde las duraciones resultan mayores.

El efecto del umbral de disparo impuesto en las estaciones de la costa es un factor que llega a reflejarse en duraciones pequeñas del movimiento fuerte del terreno. Generalmente en las estaciones de red acelerométrica de Guerrero son manejados umbrales muy altos para captar sismos con magnitudes entre 4 y 5 grados, lo cual provoca que las estaciones cerca del área de la ruptura lleguen a captar la información mientras que estaciones ubicadas a centenas de kilómetros de esa misma fuente ya no alcanzan a registrar ningún movimiento. Como casos extremos, podemos mencionar los sismos del 19 de septiembre de 1985 (figura 1.5) y del 2 de mayo de 1989 (figura 1.8), en donde se observa la diferencia de obtener información a varios kilómetros de la fuente sísmica.

Otra de las posibles causas de este fenómeno puede estar asociado con el estado físico de la roca a lo largo de la costa del Pacífico, debido al constante proceso de subducción entre placas tectónicas. Al ocurrir un temblor en la costa, las ondas sísmicas ya no son transmitidas de manera uniforme a través de la corteza terrestre y en un trayecto paralelo a la costa, posiblemente por la presencia de grietas que causan discontinuidad en el medio.

Para analizar el efecto descrito anteriormente, la tabla 2.1 muestra una serie de valores de la duración del movimiento fuerte del terreno para diversos temblores, calculadas a partir de acelerogramas obtenidos por las estaciones acelerométricas de la costa que captaron el movimiento ocasionado por los diferentes eventos sísmicos. En esa misma tabla, también se indican las duraciones calculadas en terreno firme de la ciudad de México, con la finalidad de observar la variación del parámetro con la distancia. Para los registros pertenecientes a la costa, los componentes norte-sur, este-oeste y vertical del movimiento se analizaron; para la ciudad de México solo se tomaron en cuenta los componentes horizontales norte-sur y este-oeste. La magnitud de las duraciones se calcularon con el método de la duración relevante, discutido en el capítulo anterior, y tomando como intervalo el 2.5% al 97.5% de la intensidad de Arias. Para este análisis en particular, no se contempla la aplicación de los umbrales de referencia.

Asimismo, la tabla 2.1 presenta el valor de la distancia  $R'$ , la cual define solamente la posición de la estación acelerométrica en un eje arbitrario  $R'$  perteneciente a una gráfica duración-distancia. La razón de establecer un eje arbitrario es debido a que la distancia comprendida entre el valle de México a las áreas de ruptura de los diferentes temblores varía, suponiendo que la ubicación del valle de México quedara fija en ese mismo eje. La figura 2.7 ilustra las gráficas duración-distancia.

Para realizar las comparaciones pertinentes de los resultados de la duración, obtenidos para los diversos sismos estudiados, se hace referencia a dos puntos comunes sobre el eje arbitrario  $R'$  para cualquier gráfica duración-distancia; los valores establecidos son 24 km y 302 km, correspondientes a la ubicación del área de ruptura del sismo del 19 de septiembre de 1985 y del terreno firme en el valle de México, respectivamente. De esta manera, el alcance del estudio para estimar la duración del movimiento en zonas de terreno firme de la República Mexicana se concentra en una distancia de 278 km entre la costa del Pacífico y la ciudad de México, que es la mínima distancia entre los dos puntos comunes mencionados anteriormente.

**Tabla 2.1** Duración del movimiento contra distancia

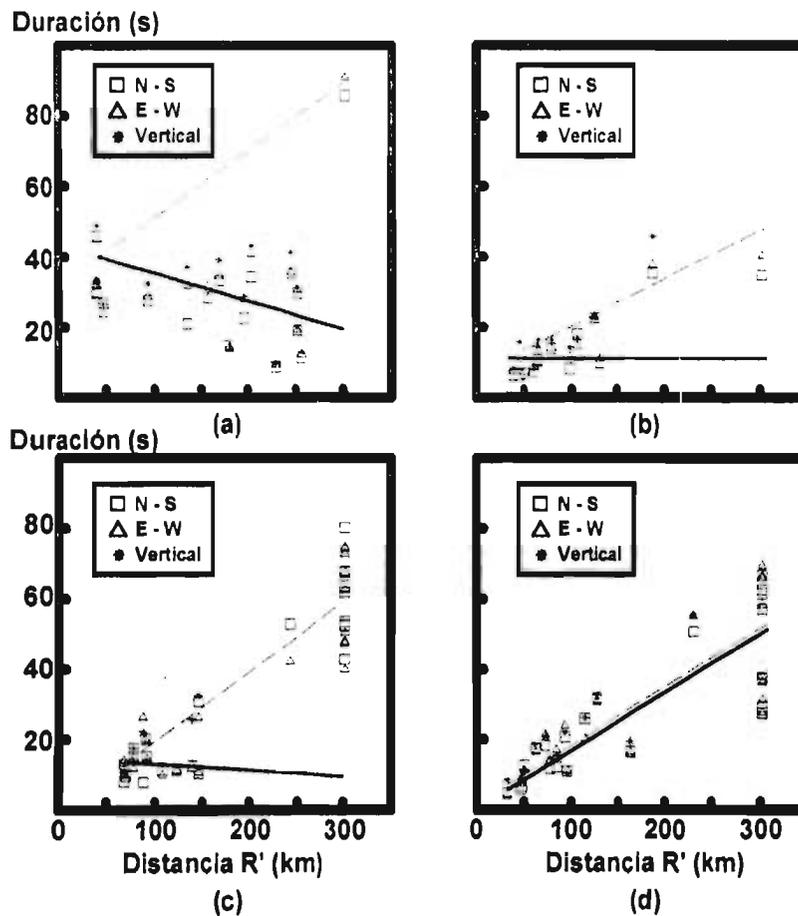
Sismo	Estación	$R'$ (km)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)	Comp-VR (s)
19/09/85	CALE	40.00	29.68	32.90	32.94
	VILE	40.00	45.63	45.07	48.89
	UNIO	40.00	30.08	31.48	33.42
	AZIH	47.00	26.72	23.64	26.59
	PAPN	93.00	27.46	28.62	32.34
	SUCH	135.00	20.87	31.71	37.05
	ATYC	157.00	28.26	31.52	29.64
	PARS	169.00	33.08	34.59	39.04
	XALT	180.00	14.60	14.30	14.43
	COYC	196.00	22.41	27.93	28.58
	FICA	203.00	34.20	40.65	43.15
	VNTA	228.00	8.60	9.22	9.49
	OCTT	245.00	35.20	35.57	41.26
	CPDR	252.00	19.10	19.23	20.08
	TEAC	252.00	29.58	30.60	30.99
	MSAS	257.00	11.17	12.19	13.04
	TY	302.00	85.70	90.68	-
08/02/88	PAPN	38.00	6.36	7.34	8.21
	LLAV	45.00	6.42	8.90	15.83
	SUCH	50.00	6.83	7.15	11.21
	MAGY	61.00	7.44	8.69	8.38
	PETA	64.00	10.79	9.66	14.57
	ATYC	66.00	10.65	13.48	16.51
	AZIH	79.00	13.93	13.98	16.34

Tabla 2.1 continuación

Sismo	Estación	R' ( km )	Comp-NS ( s )	Comp-EW ( s )	Comp-VR ( s )
08/02/88	COYC	98.00	8.18	11.35	14.19
	BALC	106.00	17.96	14.71	17.01
	COMD	125.00	22.66	23.02	22.83
	UNIO	131.00	9.82	11.15	10.99
	TNLP	188.00	35.41	37.79	45.85
	50	302.00	34.76	40.20	-
25/04/89	CPDR	68.00	12.90	13.97	12.53
	SMRC	68.00	8.02	10.12	10.51
	VIGA	70.00	9.57	9.52	13.53
	VNTA	78.00	15.20	11.80	14.22
	MSAS	78.00	17.46	14.97	17.56
	COPL	88.00	7.87	26.39	22.16
	XALT	91.00	20.26	20.03	19.34
	OCLL	92.00	15.12	14.59	14.30
	COYC	108.00	11.32	9.85	12.64
	CAYA	123.00	11.40	11.15	12.20
	PARS	139.00	12.38	12.75	25.74
	ATYC	146.00	10.33	10.68	11.88
	FICA	146.00	30.77	26.24	32.51
	TEAC	243.00	52.64	42.05	109.75
	07	302.00	80.08	74.28	-
	13	302.00	53.32	62.48	-
	18	302.00	52.38	47.22	-
	28	302.00	61.60	50.22	-
	34	302.00	67.50	74.46	-
	50	302.00	52.26	47.82	-
	74	302.00	63.60	67.38	-
	TY	302.00	67.66	72.70	-
	CU	302.00	42.72	39.82	-
	31/05/90	SLUI	33.00	4.61	4.26
LLAV		47.00	5.86	7.32	8.63
PAPN		48.00	6.42	8.70	9.80
SUCH		50.00	12.46	11.00	11.37
MAGY		62.00	17.44	16.30	18.52
ATYC		73.00	18.22	21.24	20.76
PETA		78.00	11.59	13.85	14.55
CAYA		85.00	12.07	16.90	15.53
PARS		94.00	20.63	23.75	22.08
AZIH		96.00	10.86	10.98	10.33
BALC		114.00	25.72	20.05	25.87
COMD		127.00	31.71	30.59	32.45
OCTT		164.00	16.45	16.32	19.38
TEAC		231.00	50.47	55.01	55.25
07		302.00	56.84	58.12	-
13		302.00	61.32	66.44	-
21		302.00	62.52	65.86	-
28		302.00	27.36	27.54	-
34		302.00	37.38	36.24	-
50		302.00	37.18	37.72	-
74		302.00	66.60	69.32	-
78		302.00	29.30	31.16	-

La figura 2.7 presenta gráficamente los valores mostrados en la tabla 2.1. Para cada una de las gráficas duración-distancia, se trazan aproximadamente dos rectas que indican la posible tendencia que se obtendría si consideramos la duración del movimiento a lo largo

de la costa (línea continua) y aquella que resultaría si solo tomamos en cuenta los resultados pertenecientes al trayecto comprendido entre el área de la ruptura y el valle de México (línea discontinua). Para los tres primeros sismos, la variación de la duración del movimiento con respecto a la distancia es distinguible, ya que algunos resultados representan la tendencia del viaje de las ondas sísmicas en una trayectoria paralela a la costa, reflejado en una disminución del valor de la duración conforme aumenta la distancia.



**Figura 2.7** Variación de la duración del movimiento con la distancia: considerando una trayectoria paralela a la costa del Pacífico (línea continua), y una trayectoria recta entre la fuente sísmica y la ciudad de México (línea discontinua)

- a) Sismo: 19/09/85      b) Sismo: 08/02/88  
 c) Sismo: 25/04/89      d) Sismo: 31/05/90

En este trabajo, se muestra interés por todos aquellos resultados obtenidos a partir de los acelerogramas que se hayan registrado cerca de la trayectoria recta entre el área de la ruptura hasta el terreno firme del valle de México; sin embargo, debemos ser cuidadosos en la selección de esos registros, ya que como se podrá observar en la gráfica 2.7d (correspondiente al sismo del 31 de mayo de 1990), dicha variación al parecer tiende a ser la misma para ambas situaciones.

La tabla 2.2 lista los resultados de la duración del movimiento fuerte del terreno, una vez realizada una selección de registros, aplicado los umbrales de referencia y empleado el método de la duración relevante. En esta ocasión, los acelerogramas analizados corresponden a los siete sismos mostrados gráficamente en las figuras 1.5 a la 1.11 del capítulo anterior. Nuevamente, se incluyen datos correspondientes al terreno firme de la ciudad de México. Algunos registros que tomaron parte en el análisis (escogidos como datos pertenecientes a sitios ubicados cerca de la fuente sísmica, terreno firme de la ciudad de México y al trayecto entre esos dos puntos) y que no aparecen en la tabla 2.2, se debe a que fueron eliminados por la imposición de los umbrales de referencia, lo que indica que tales registros no representaban físicamente el movimiento fuerte del terreno.

**Tabla 2.2** Duración del movimiento contra distancia

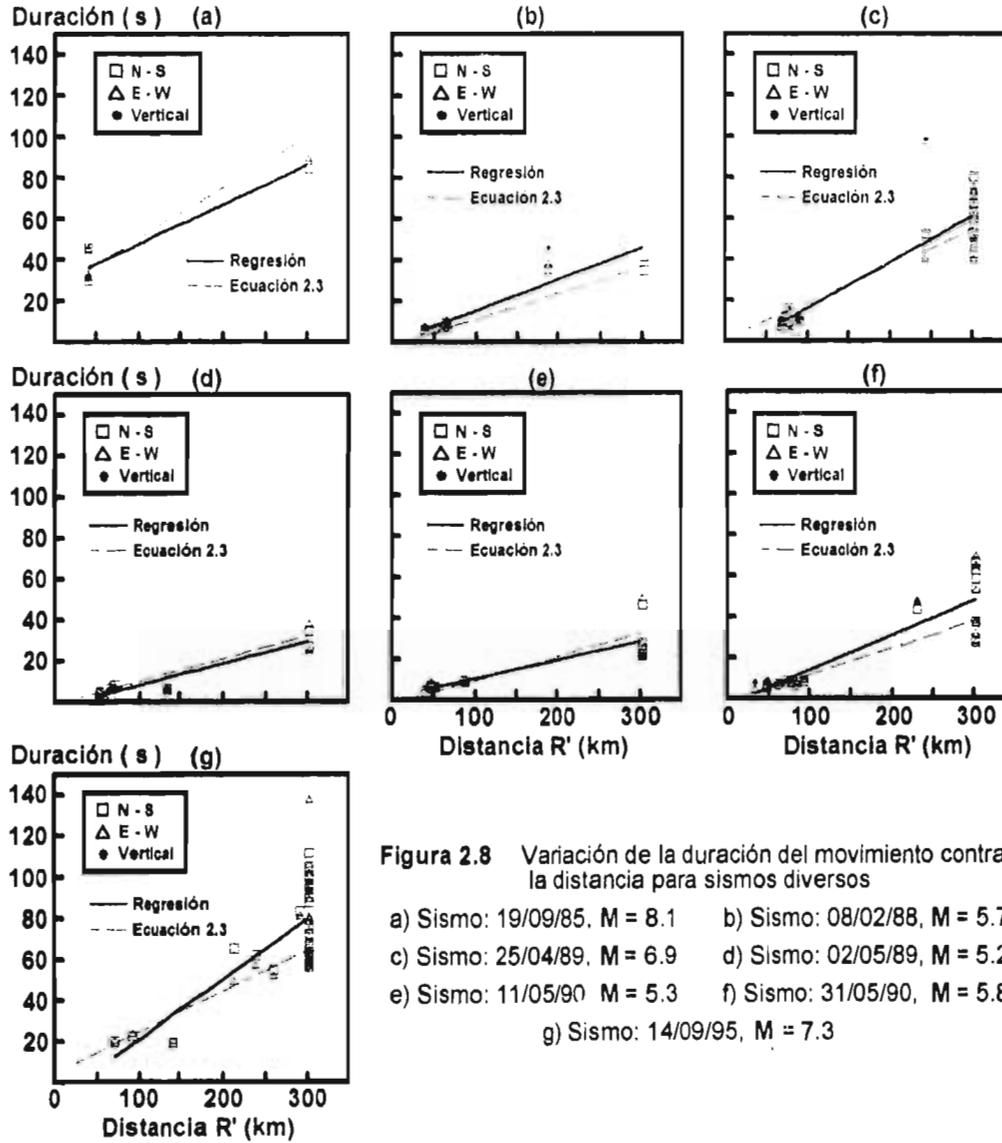
<b>Sismo</b>	<b>Estación</b>	<b>R' ( km )</b>	<b>Comp-NS ( s )</b>	<b>Comp-EW ( s )</b>	<b>Comp-VR ( s )</b>
19/09/85	CALE	40.00	29.65	32.63	31.78
	VILE	40.00	45.40	44.93	46.02
	UNIO	40.00	29.79	31.11	32.23
	TY	302.00	84.42	88.68	-
08/02/88	PAPN	38.00	5.80	6.60	7.62
	SUCH	50.00	5.94	5.61	7.94
	MAGY	61.00	7.17	7.79	7.75
	PETA	64.00	8.47	7.63	11.29
	ATYC	66.00	7.79	8.07	8.62
	TNLP	188.00	35.41	37.79	45.85
	50	302.00	34.80	40.32	-
25/04/89	CPDR	68.00	9.28	10.40	9.29
	SMRC	68.00	7.31	8.64	9.90
	VIGA	70.00	9.43	9.19	13.30
	VNTA	78.00	7.83	8.08	6.82
	MSAS	78.00	16.11	13.81	16.52
	COPL	88.00	6.16	10.67	11.34
	XALT	91.00	11.03	11.39	11.52
	TEAC	243.00	52.12	40.77	98.48
	07	302.00	80.04	74.94	-
	13	302.00	53.28	60.42	-
	18	302.00	52.20	47.40	-
	28	302.00	60.00	49.74	-
	34	302.00	66.90	73.26	-

Tabla 2.2 continuación

Sismo	Estación	R' ( km )	Comp-NS ( s )	Comp-EW ( s )	Comp-VR ( s )
25/04/69	50	302.00	52.26	47.52	-
	74	302.00	62.88	65.76	-
	TY	302.00	67.14	72.30	-
	CU	302.00	42.54	39.78	-
02/05/69	SMRC	54.00	4.70	5.02	6.29
	CPDR	55.00	1.09	1.09	1.09
	VIGA	67.00	4.50	6.49	8.40
	MSAS	72.00	7.99	7.02	7.30
	PARS	136.00	6.27	6.12	6.61
	13	302.00	34.44	37.62	-
	74	302.00	26.76	24.78	-
11/05/90	SLUI	41.00	2.81	2.65	6.24
	LLAV	47.00	5.87	7.03	9.02
	PAPN	52.00	6.02	5.99	6.29
	PARS	88.00	9.03	9.42	7.57
	21	302.00	46.32	49.20	-
	34	302.00	21.96	22.26	-
	40	302.00	24.96	23.40	-
	74	302.00	22.38	20.52	-
	CU	302.00	27.66	27.36	-
	31/05/90	SLUI	33.00	4.56	4.12
LLAV		47.00	5.37	7.15	8.08
PAPN		48.00	5.59	7.35	9.04
MAGY		62.00	6.72	6.80	7.65
ATYC		73.00	8.34	8.33	7.88
PETA		78.00	7.86	8.34	8.63
CAYA		85.00	6.23	7.06	6.51
PARS		94.00	8.50	9.07	9.58
TEAC		231.00	43.54	47.21	47.45
07		302.00	53.70	52.50	-
13		302.00	58.56	64.08	-
21		302.00	62.76	65.04	-
28		302.00	27.54	27.42	-
34		302.00	37.32	36.36	-
50		302.00	37.14	37.74	-
74		302.00	66.54	69.12	-
78		302.00	29.16	31.20	-
14/09/95	COPL	72.00	19.86	20.07	-
	VIGA	92.00	22.27	23.25	-
	OCTT	143.00	1.35	1.32	-
	CHIL	153.00	8.10	8.15	-
	TNLP	213.00	65.26	48.93	-
	IGUA	238.00	61.61	56.40	-
	TEAC	259.00	54.73	51.69	-
	CUER	291.00	83.14	80.79	-
	07	302.00	104.82	105.36	-
	13	302.00	87.48	101.40	-
	18	302.00	66.12	79.14	-
	21	302.00	100.02	97.26	-
	25	302.00	76.80	58.92	-
	34	302.00	75.00	89.28	-
	64	302.00	57.36	58.02	-
	74	302.00	95.16	88.86	-
	78	302.00	90.06	92.58	-
	CH	302.00	72.18	80.28	-
	ES	302.00	111.48	94.92	-
	MI	302.00	56.58	60.66	-

Tabla 2.2 continuación

Sismo	Estación	R' (km)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)	Comp-VR (s)
14/09/95	MR	302.00	64.92	64.08	-
	TY	302.00	99.06	93.24	-
	TX	302.00	67.80	73.98	-
	CU01	302.00	58.38	62.82	-
	CU04	302.00	96.36	137.16	-
	CU05	302.00	60.66	58.20	-



La figura 2.8 muestra diferentes gráficas duración-distancia, en donde se representan los valores de la tabla 2.2; se aplicó una regresión lineal con la recta que mejor se ajusta a cada serie de datos, identificada con línea continua en cada gráfica duración-distancia. En esa misma figura, se muestra la recta que representa a la ecuación 2.3, la cual se explicará posteriormente. Nuevamente, el criterio del eje arbitrario  $R'$  se introduce; su interpretación sigue el mismo planteamiento descrito para la figura 2.7. Como se observa en la figura 2.8, el valor de la duración del movimiento fuerte del terreno se incrementa con la distancia, así como también crece con la magnitud del temblor.

De acuerdo con la figura 2.8, es claro encontrar dispersión de datos con relación a la recta que se derivada de la regresión lineal, principalmente para aquellos resultados obtenidos en terreno firme del valle de México (representados en la gráfica duración-distancia con un valor de  $R'=302$  km). Sin embargo, con fines prácticos en la estimación de la duración del movimiento se selecciona una expresión matemática simple para llevar a cabo el estudio, como lo es la ecuación de la recta.

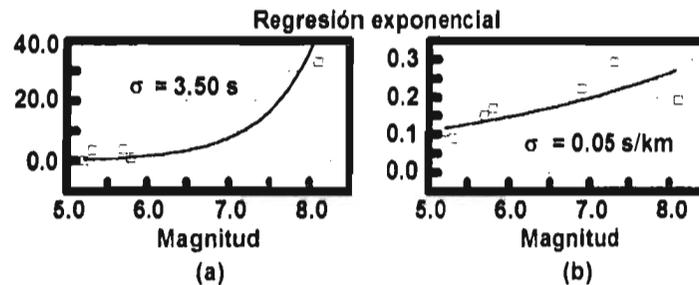
La tabla 2.3 presenta el valor de las ordenadas de cada una de las rectas obtenidas a partir de una regresión lineal y mostradas en la figura 2.8. Las ordenadas corresponden a valores de la duración del movimiento en  $R'=24$  km del eje arbitrario, el cual es considerado como punto de referencia común para todas las gráficas duración-distancia mostradas en la figura 2.8; asimismo, se calculan las pendientes para cada una de esas rectas.

De acuerdo con la tabla 2.3 y en el caso de las regresiones lineales, se observa que la magnitud de las ordenadas es pequeña para la mayoría de los eventos, con excepción del dato arrojado por el sismo del 19 de septiembre de 1985, en donde la duración es superior a todas las demás. Por otra parte, la variación en la magnitud de las pendientes es mucho más regular, aunque si se compara la pendiente que corresponde al sismo del 19 de septiembre de 1985 con la del 14 de septiembre de 1995 resulta poco congruente con lo que se podría esperar de esos valores, tomando en cuenta la magnitud del temblor; sin embargo, este aspecto puede justificarse por la gran cantidad de registros utilizados para el análisis del sismo del 14 de septiembre, equiparada con los que se emplearon para el sismo de 1985.

**Tabla 2.3** Valor de las pendientes y ordenadas, correspondientes a las rectas mostradas en la figura 2.8

Sismo	M	Valor de la ordenada en $R'=24$ km ( s )		Pendiente ( s/km )	
		Regresión	Ecuación 2.3	Regresión	Ecuación 2.3
19/09/85	8.1	32.90	31.13	0.19	0.25
08/02/88	5.7	3.80	0.81	0.15	0.13
25/04/89	6.9	-0.88	5.02	0.22	0.18
02/05/89	5.2	0.03	0.38	0.11	0.11
11/05/90	5.3	3.54	0.44	0.09	0.11
31/05/90	5.8	0.97	0.94	0.17	0.13
14/09/95	7.3	-1.71	9.23	0.29	0.20

El conjunto de datos mostrado en la tabla 2.3 (relacionados con las regresiones lineales), es información que sirve de base para plantear alguna expresión general que estime la duración del movimiento en terreno firme de la República Mexicana, conociendo de antemano algunos parámetros sísmicos del temblor. Para llevar a cabo el manejo de esos datos, se prescindió utilizar el valor de las ordenadas correspondientes a los eventos del 25 de abril de 1989 y del 14 de septiembre de 1995, ya que los valores negativos de la duración no muestran un significado físico del fenómeno. Dado que la tendencia general llega a ser razonable a lo que podemos esperar, se acepta que la totalidad de las pendientes intervengan en el ajuste de datos que se realiza posteriormente.



**Figura 2.9** Representación gráfica del valor de las pendientes y ordenadas mostradas en la tabla 2.3. Los datos graficados corresponden a las rectas que se derivan a partir de una regresión lineal (figura 2.8)

- a) Ordenadas para  $R'=24$  km, en s
- b) Pendientes, en s/km

La figura 2.9 muestra gráficamente los valores de la tabla 2.3, considerando válidas las condiciones establecidas en el párrafo anterior. Para poder obtener una expresión matemática aceptable, que llegue a estimar en forma tolerable la magnitud de la duración del movimiento, es preferible que sus términos posean una interpretación física del fenómeno.

Aceptando un crecimiento exponencial de la duración con la magnitud en  $R'=24$  km y de las pendientes de las rectas con la magnitud, la figura 2.9 muestra la curva exponencial que mejor se ajusta a los datos. En la misma figura, se indica el error estándar ( $\sigma$ ) calculado para cada uno de los ajustes.

En la figura 2.9a, se observa que el ajuste de la curva exponencial es aceptable. En lo que respecta a las pendientes, en la figura 2.9b se aprecia que la dispersión de los datos es más notoria; sin embargo, a pesar de presentar un error estándar de 0.05 s/km, éste se considera como un valor tolerablemente aceptable. De esta manera, la regresión exponencial resulta ser una buena opción para llevar a cabo el desarrollo del análisis.

Dada la variación exponencial tanto para el valor de las ordenadas en  $R'=24$  km como el de las pendientes con respecto a la magnitud del sismo (figura 2.9), y aceptando en forma adicional un crecimiento lineal de la duración con respecto a la distancia (figura 2.8), se propone una expresión general en términos de la duración del movimiento, la magnitud del sismo y la distancia a la fuente sísmica, la cual podría representar en forma global las variaciones numéricas entre esos parámetros. De esta manera, dicha expresión tendría la forma siguiente:

$$D(R', M) = f(R') C_1 e^{\alpha M} + C_2 e^{\beta M} \quad (2.2)$$

donde:

- $D(R', M)$  Duración del movimiento, en s
- $M$  Magnitud del sismo
- $f(R')$  Función lineal dependiente de la distancia (figura 2.8), propuesta como  $f(R') = (R' - 24)$ , en km

- $C_1, C_2$  Constantes dependientes de la regresión exponencial (figura 2.9),  
cuyos valores son  $C_1 = 5/193$  y  $C_2 = 1/7000$
- $\alpha, \beta$  Exponentes dependientes de la regresión exponencial (figura 2.9),  
cuyos valores son  $\alpha = 0.291$  y  $\beta = 1.554$

De acuerdo con una interpretación física, el primer término del segundo miembro de la ecuación 2.2 representa la variación de la duración del movimiento ( $D$ ) con la magnitud del sismo ( $M$ ) a una determinada distancia de la fuente sísmica ( $R'$ ); el segundo término muestra el cambio en el valor de la duración con la magnitud del temblor cerca de la fuente sísmica.

Asignando el valor correspondiente a las constantes y exponentes ( $C_1, C_2, \alpha$  y  $\beta$ ) de la ecuación 2.2 y realizando algunos acomodados en los términos que la componen, finalmente se obtiene la ecuación que ayuda a estimar la duración del movimiento fuerte del terreno:

$$D(R', M) = \frac{1}{10^5} \left[ 2590 (R' - 24) e^{7M/25} + 14 e^{38M/25} \right] \quad (2.3)$$

La figura 2.8 muestra gráficamente las rectas que se obtienen utilizando la ecuación 2.3, una vez sustituida la magnitud de los sismos estudiados y haciendo variar la distancia. Asimismo, la tabla 2.3 muestra el valor de las ordenadas (para  $R'=24$  km) y pendientes, que corresponden a esas mismas rectas.

**Tabla 2.4** Error estándar (en segundos) calculado para las rectas de la figura 2.8

Sismo	M	Regresión	Ecuación 2.3	Número de datos
19/09/85	8.1	6.20	11.57	11
08/02/88	5.7	5.58	6.23	20
25/04/89	6.9	11.19	12.57	42
02/05/89	5.2	3.82	5.17	19
11/05/90	5.3	6.74	7.97	22
31/05/90	5.8	9.86	11.08	34
14/09/95	7.3	17.04	19.75	63

Como una base comparativa, la tabla 2.4 indica el error estándar ( $\sigma$ ), tanto para la rectas obtenidas con las regresiones lineales mostradas en la figura 2.8 como para aquellas generadas a partir de la ecuación 2.3. En ambos casos, se aprecia que la diferencia entre la magnitud de los errores estándar, considerando un mismo evento sísmico, es de unos pocos segundos para la mayoría de los temblores.

La figura 2.10 presenta una comparación gráfica general que incluye todas las rectas mostradas en la figura 2.8. De acuerdo con la figura 2.10, se observa un incremento en el valor de la duración del movimiento cuando la distancia aumenta; asimismo, la duración crece con el incremento de la magnitud del sismo.

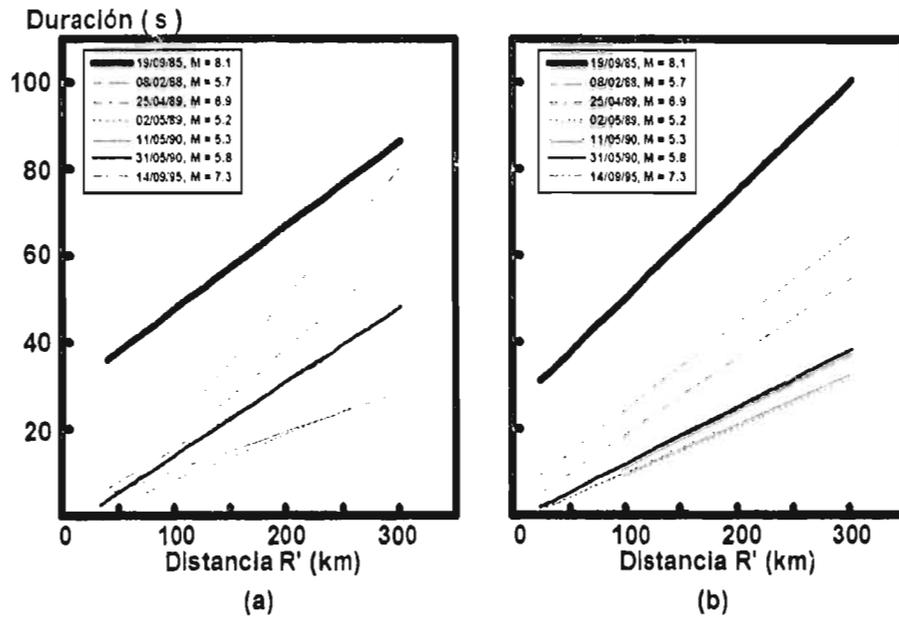
Por otra parte, la figura 2.10 muestra una clara tendencia de que las pendientes llegan a ser mayores a razón de que la magnitud del sismo aumenta. Esto contradice a anteriores observaciones de Herrmann (1985), que sugiere rectas con pendientes constantes de 0.05 s/km para estimar la duración del movimiento lejos de la fuente sísmica:

$$D = T_c + 0.05 DE \quad (2.4)$$

donde:

- $T_c$  Duración de la ruptura, en s
- $DE$  Distancia epicentral, en km

Nuevamente, es importante mencionar que el alcance de la expresión planteada (ecuación 2.3) y los resultados obtenidos (figura 2.10) toman en consideración sismos de subducción mexicanos, originados en la costa del Pacífico y asociados principalmente con las brechas sísmicas de Guerrero y Michoacán. Los resultados presentados en la figura 2.10, pueden ser utilizados para compararse con eventos sísmicos futuros semejantes a los que se retomaron en este capítulo. En caso de ocurrir un temblor que posea características sísmicas diferentes a los estudiados y que se requiera estimar la duración del movimiento en algún sitio de la República Mexicana que presente terreno firme (además de encontrarse cerca de la trayectoria recta entre la fuente sísmica y el valle de México), se puede utilizar la ecuación 2.3.



**Figura 2.10** Gráficas comparativas de la duración del movimiento contra la distancia  
 a) Resultados de la regresión lineal  
 b) Resultados empleando la ecuación 2.3

Quizá, el empleo directo de la ecuación 2.3 no sea apropiado para representar la duración del movimiento en otras regiones diferentes a las mencionadas en este trabajo; sin embargo, una calibración adecuada de los términos que componen a la expresión, tomando como base registros sísmicos observados en el sitio de interés, resultaría factible para poder aplicarse a eventos sísmicos ocurridos en otros lugares.

## **CAPÍTULO III**

### **LA DURACIÓN EN LA CIUDAD DE MÉXICO**

#### **3.1 EL MOVIMIENTO EN EL VALLE DE MÉXICO**

Las ondas sísmicas generadas por sismos de subducción mexicanos y provenientes de la costa del Pacífico, tienden a disiparse en el trayecto hacia la ciudad de México, la cual se encuentra localizada a más de 250 km de distancia; sin embargo, al internarse a los estratos blandos del valle de México originados por la desecación artificial de los antiguos lagos de Xochimilco, Texcoco, Xaltocan, Zumpango y Chalco, se presenta una importante amplificación de las ondas y un significativo incremento en la duración del movimiento, dominada por el arribo de ondas con periodo largo.

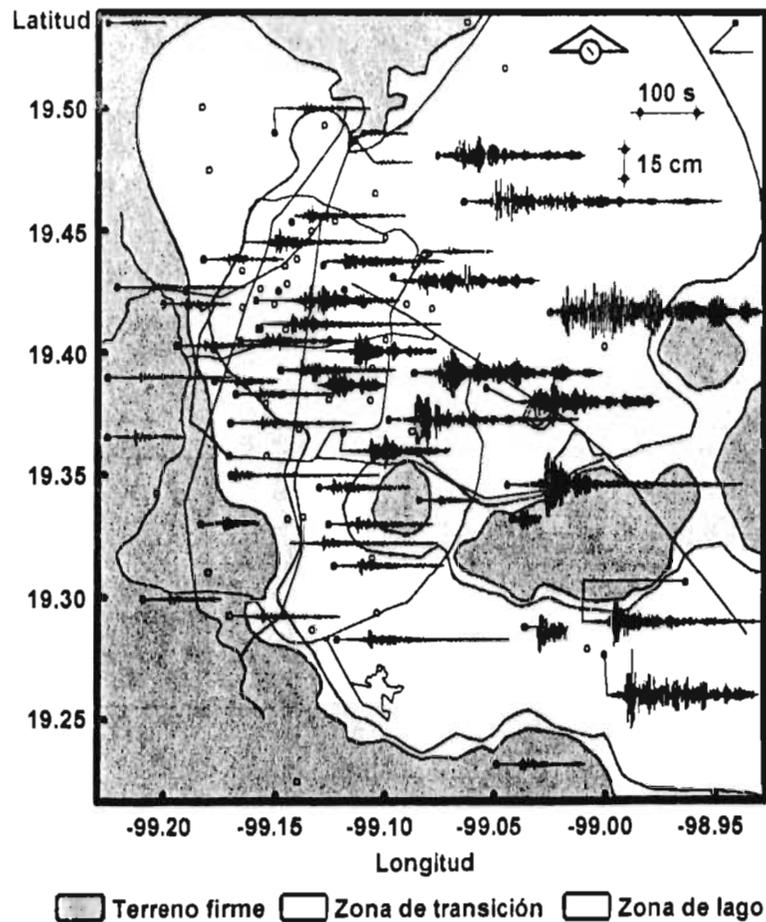
Como en pocos lugares, los edificios de la ciudad de México están sometidas ante fuerzas sísmicas con un número elevado de ciclos. Como ejemplo, obsérvese la figura 3.1 (Rodríguez, 1996). En esa figura, se muestran los desplazamientos calculados en las tres zonas geotécnicas del valle para cada sitio en donde se captó el movimiento; el evento escogido es el sismo del 14 de septiembre de 1995 y los registros empleados corresponden a la componente norte-sur del movimiento. Sorprende la extensa duración de las señales dentro de la zona de lago comparadas con las que presentan en terreno firme. Como podrá apreciarse, la duración total de algunos de los registros puede llegar a ser del orden de 300 s y aproximadamente de 150 s de etapa intensa para la zona de lago al noreste de la ciudad.

Como se mencionó en el capítulo I, ocasionalmente un registro puede no representar en forma correcta el comportamiento dinámico del terreno para un sitio determinado. Como se muestra en la figura 3.1, el registro obtenido en una de las estaciones localizada dentro de la zona de lago y al sureste de la ciudad (zona de Tláhuac), presenta una duración total de 50 s; en realidad, se esperaría un valor mucho mayor como las que se presentan en otras estaciones acelerométricas cercanas y ubicadas en la misma zona geotécnica.

Por lo anterior y para llevar a cabo una apropiada estimación de la duración del movimiento en la ciudad de México, es necesario tener un conocimiento anticipado de las

posibles características dinámicas del suelo en cada sitio del valle y evitar introducir al análisis datos que puedan generar resultados no confiables.

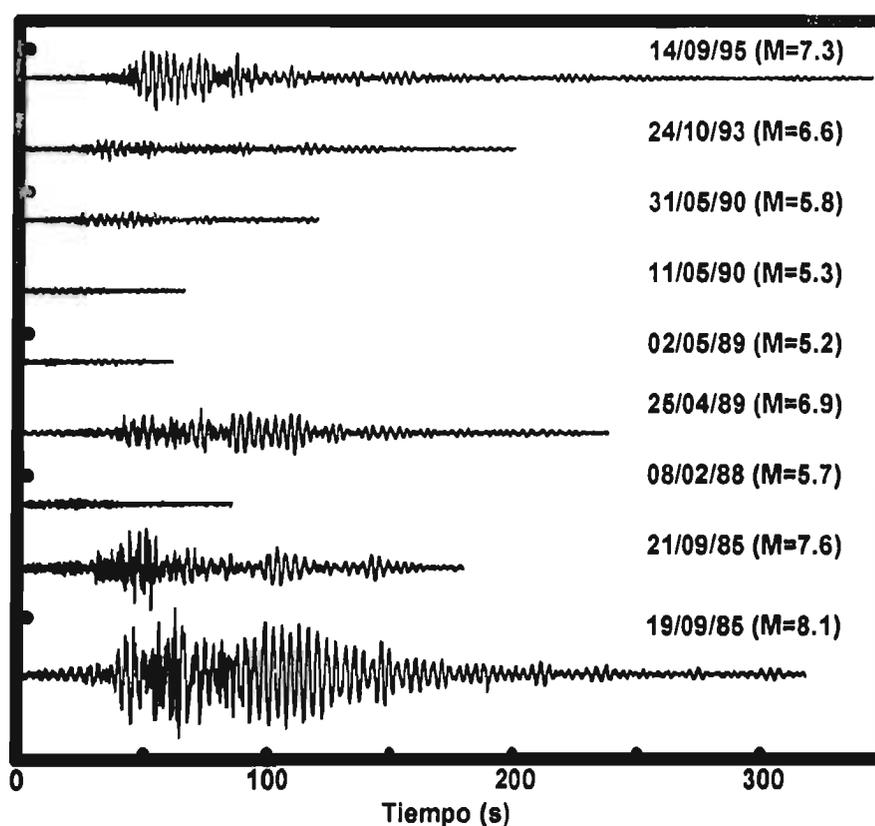
La observación, comparación y revisión de registros disponibles, correspondientes a eventos sísmicos pasados y captados por una misma estación acelerométrica, es de gran ayuda para fijar un criterio de rechazo o aceptación de la información que se tenga para un sitio específico. Bajo este aspecto, la tabla 1.3 (capítulo I) representa una fuente de información importante y que es utilizada para el desarrollo de este capítulo.



**Figura 3.1** Desplazamiento del terreno en el valle de México.  
Sismo: 14/09/95. Componente norte-sur

### 3.2 VARIACIÓN DE LA DURACIÓN CON LA MAGNITUD DEL SISMO

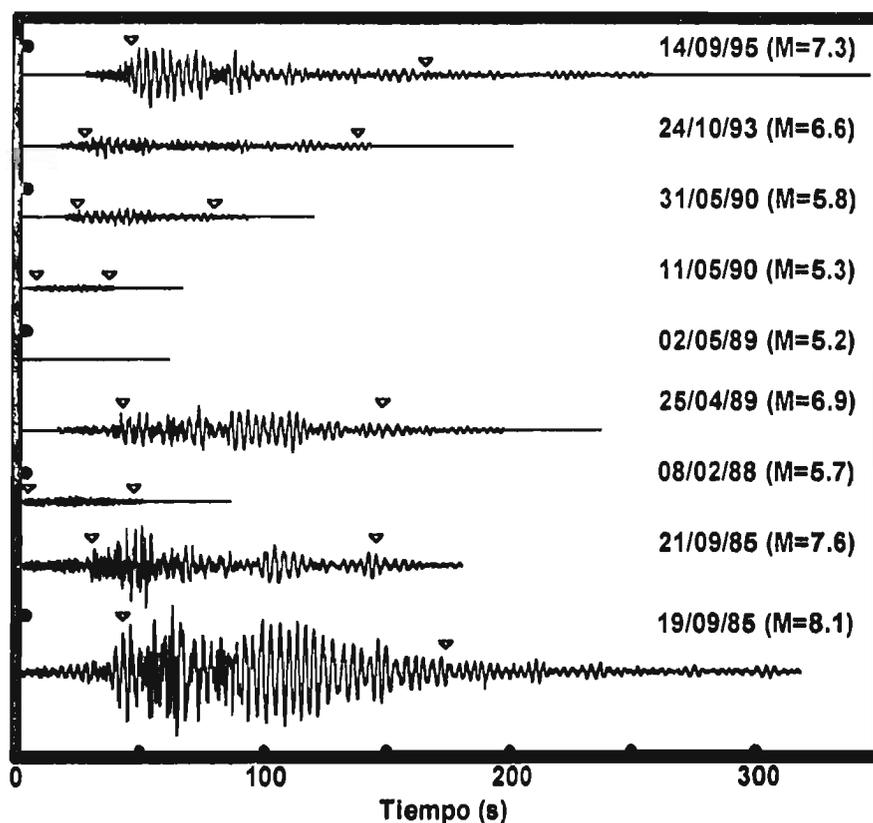
Para llevar a cabo una comparación entre la duración del movimiento y la magnitud de un temblor, se considera un sitio en particular dentro de la zona de lago en la ciudad de México, correspondiente al punto donde se localiza la estación acelerométrica Central de Abastos (CD). La estación CD se selecciona debido a que en ese lugar se ha podido capturar el movimiento del terreno para la totalidad de los sismos de subducción ocurridos en la zona sísmica del Pacífico y cuyos acelerogramas muestran una buena definición y contenido.



**Figura 3.2** Acelerogramas registrados en la estación Central de Abastos (CD), correspondientes a sismos recientes. Componente norte-sur

La figura 3.2 presenta una serie de registros captados en la estación CD (componente norte-sur) y que corresponden a algunos temblores recientes listados en la tabla 1.1 del capítulo 1. En esa figura, se aprecia la duración total de los acelerogramas; asimismo, se

indica la fecha y la magnitud del evento sísmico correspondiente. De acuerdo con la tabla 1.4 del capítulo 1, se aplicó el valor del umbral de referencia correspondiente a la zona del lago (4 gal) a cada uno de los acelerogramas de la figura 3.2; posteriormente, se calculó la duración del movimiento fuerte del terreno de acuerdo con el método que involucra la intensidad de Arias, tomando como intervalo el 2.5% y el 97.5%.



**Figura 3.3** Estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno en el sitio donde se ubica la estación acelerométrica Central de Abastos (CD) para algunos sismos recientes. Componente norte-sur

La figura 3.3 resume el procedimiento descrito en el párrafo anterior con respecto al cálculo de la duración. Para algunos acelerogramas, se observa que el umbral elimina cierta información que ya no se considera significativa en la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno. La magnitud de la duración en cada registro se indica como el lapso delimitado por los triángulos mostrados en la misma figura.

Como un caso singular, el umbral de referencia elimina completamente el sismo del 2 de mayo de 1989, según se indica en la figura 3.3. Esto significa que las amplitudes presentes en el acelerograma original que corresponde a dicho sismo, fueron inferiores a un valor de 4 gal; en otras palabras, si el sismo hubiese ocurrido antes del gran temblor de Michoacán de 1985, nunca se hubiera registrado en la estación Central de Abastos. Por lo anterior, el temblor del 2 de mayo de 1989 se descarta del análisis.

La tabla 3.1 muestra el valor correspondiente a los límites  $D_i$  y  $D_r$ , indicados simbólicamente como triángulos en la figura 3.3. La duración del movimiento fuerte del terreno ( $D$ ) se obtiene a partir de la resta de dichos valores límites y los resultados se presentan en la misma tabla 3.1. Asimismo, se indican las duraciones del movimiento para el componente este-oeste, empleando la misma secuencia de cálculo utilizada para el componente norte-sur.

**Tabla 3.1** Duración del movimiento calculada a partir de registros obtenidos en la estación Central de Abastos (CD) y correspondientes a sismos recientes

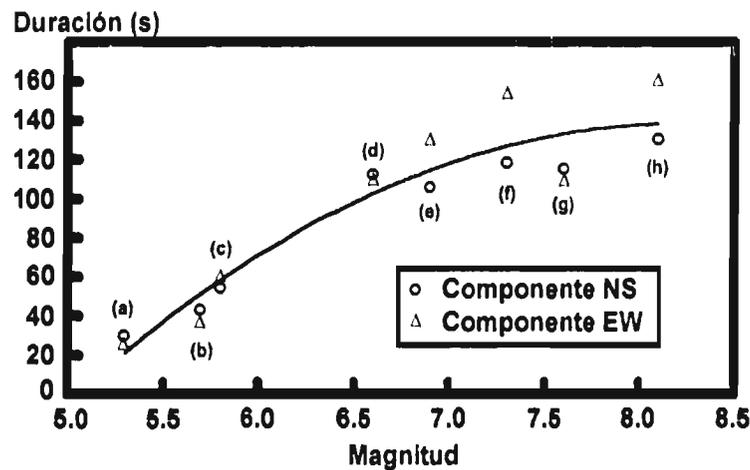
Sismo	Magnitud M	Componente norte-sur			Componente este-oeste		
		$D_i$ (s)	$D_r$ (s)	$D$ (s)	$D_i$ (s)	$D_r$ (s)	$D$ (s)
19/09/85	8.1	43.02	173.08	130.06	38.84	199.12	160.28
21/09/85	7.6	30.64	145.36	114.72	31.66	141.00	109.34
08/02/88	5.7	4.50	47.54	43.04	6.20	42.80	36.60
25/04/89	6.9	42.80	148.00	105.20	43.40	173.00	129.60
11/05/90	5.3	7.58	37.20	29.62	7.76	32.48	24.72
31/05/90	5.8	24.24	79.12	54.88	23.62	83.82	60.20
24/10/93	6.6	27.24	143.46	116.22	21.18	135.54	114.36
14/09/95	7.3	45.96	164.18	118.22	45.94	201.18	155.24

Con las cantidades mostradas en la tabla 3.1 se lleva a cabo una regresión, proponiendo un ajuste de datos a una curva con variación cuadrática. La figura 3.4 muestra la gráfica con la curva que representa la dependencia de la duración del movimiento con la magnitud del sismo en el sitio CD. El error estándar ( $\sigma$ ) calculado para la regresión es de

15 s. La expresión matemática que representa la curva mostrada en la figura 3.4 es la siguiente:

$$D(M) = -14 M^2 + 228 M - 792 \quad (3.1)$$

Como se observa en la figura 3.4, el comportamiento de la curva indica que la duración crece con la magnitud del temblor; sin embargo, cuando el valor de la magnitud del temblor es igual a 8.1, la duración no aumenta significativamente. De acuerdo con lo anterior, se esperaría que la duración del movimiento fuerte del terreno en CD, ocasionada por sismos intensos con magnitudes mayores a un valor de 8.1, no presente incremento sino que tendería a mantenerse en un valor constante. Con el razonamiento anterior, se podría esperar que para sismos futuros y con magnitudes mayores a 8.1, el valor de la duración del movimiento fuerte del terreno en CD sería al menos el que se obtiene al sustituir la magnitud de 8.1 en la ecuación 3.1.



**Figura 3.4** Variación de la duración del movimiento con la magnitud del temblor en el sitio donde se ubica la estación acelerométrica Central de Abastos (CD). Los datos graficados son extraídos de la tabla 3.1

- |                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| a) Sismo: 11/05/90, M=5.3 | b) Sismo: 08/02/88, M=5.7 |
| c) Sismo: 31/05/90, M=5.8 | d) Sismo: 24/10/93, M=6.6 |
| e) Sismo: 25/04/89, M=6.9 | f) Sismo: 14/09/95, M=7.3 |
| g) Sismo: 21/09/85, M=7.6 | h) Sismo: 19/09/85, M=8.1 |

Hasta este momento, la expresión planteada (ecuación 3.1) solo es aplicable a un sitio determinado en la zona de lago del valle de México (Central de Abastos), caracterizado

por un periodo dominante del terreno igual a 3.2 s. De esta manera, es importante mencionar que el interpretar cualquier formulación matemática en donde se involucre la duración del movimiento deberá ser identificada para un sitio o una región determinada, y no es recomendable generalizarla para otros lugares.

En los cálculos siguientes se involucran más acelerogramas captados en otras estaciones de registro, tratando de obtener una expresión general para el valle de México que englobe los parámetros de la duración del movimiento, la magnitud del sismo y el periodo dominante del terreno. La finalidad de esta ecuación sería calcular la duración del movimiento fuerte del terreno en cualquier sitio de la ciudad de México.

### **3.3 EL PERIODO DOMINANTE DEL SITIO**

De acuerdo con la zonificación geotécnica del valle de México, el periodo dominante del terreno es otro de los parámetros que influye en la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno. Al arribar las ondas sísmicas a la ciudad de México y por el efecto de amplificación dinámica, se espera que la duración del movimiento se incremente desde terreno firme hasta la zona de lago, cuyas características dinámicas de esta última tornan el movimiento mucho más armónico y con duraciones enormes.

La tabla 3.2 muestra los resultados de la duración del movimiento fuerte del terreno para distintos sitios del valle de México una vez realizada la depuración de registros acelerométricos de la tabla 1.3, aplicar los umbrales de referencia de acuerdo con la zona geotécnica correspondiente (tabla 1.4) y estimar la duración del movimiento a partir del método de la duración relevante utilizando un intervalo del 2.5% al 97.5% de la intensidad de Arias. Algunos sismos recientes (tabla 1.1) se emplearon para el cálculo de la duración, y los cuales se presentan también en la tabla 1.3. Los componentes norte-sur y este-oeste del movimiento se analizaron, descartando el efecto que tiene el componente vertical por ser poco relevante en el valle de México; el componente vertical presenta amplitudes bajas de aceleración y tal movimiento no genera daños importantes en los edificios. Por otra parte, la imposición de umbrales de referencia obligó a que algunos acelerogramas fueran eliminados del análisis, lo que hace suponer que tales registros no reflejaban un movimiento intenso del terreno.

**Tabla 3.2** Duración del movimiento contra el periodo dominante del terreno

Sismo	Estación	Periodo ( s )	Comp-NS ( s )	Comp-EW ( s )
19/09/85	TY	0.50	84.42	88.68
	SC	1.90	80.54	72.12
	CD	3.20	130.06	160.28
08/02/88	47	0.50	53.28	52.50
	50	0.60	34.80	40.32
	27	0.80	67.92	55.86
	46	0.90	39.78	43.08
	52	0.90	46.32	47.40
	57	0.90	64.20	54.06
	37	1.10	64.50	53.04
	54	1.10	62.52	55.02
	17	1.20	52.56	59.28
	RO	1.30	40.80	43.32
	15	1.40	61.14	54.48
	84	1.40	56.52	54.66
	53	1.50	57.36	58.26
	05	1.90	60.18	58.68
	55	1.90	49.62	57.48
	01	2.10	50.04	55.08
	08	2.20	57.48	53.94
	51	2.20	65.76	67.32
	09	2.50	54.54	54.30
	45	2.50	60.60	61.56
29	2.70	66.00	74.34	
43	3.10	63.00	59.40	
CD	3.20	43.04	36.60	
25/04/89	07	0.50	80.04	74.94
	13	0.50	53.28	60.42
	18	0.50	52.20	47.40
	28	0.50	60.00	49.74
	30	0.50	62.58	66.36
	34	0.50	66.90	73.26
	47	0.50	72.00	72.12
	74	0.50	62.88	65.76
	78	0.50	52.14	44.58
	CU	0.50	42.54	39.78
	TY	0.50	67.14	72.30
	16	0.60	61.08	52.92
	50	0.60	52.26	47.52
	27	0.80	51.00	49.08
	46	0.90	51.60	59.64
	52	0.90	60.30	50.64
	57	0.90	63.12	58.38
	37	1.10	64.08	50.64
	54	1.10	63.54	76.92
	17	1.20	80.70	84.24
	44	1.30	56.46	58.80
	RO	1.30	58.68	56.16
	15	1.40	83.16	79.50
	84	1.40	68.16	76.08
	22	1.50	93.12	74.16
	53	1.50	64.50	72.06
	03	1.90	95.70	87.30
	05	1.90	82.02	80.52
	55	1.90	63.30	75.66
	SC	1.90	84.66	78.54
01	2.10	61.62	66.60	

Tabla 3.2 continuación

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
25/04/89	62	2.10	89.76	81.72
	08	2.20	103.80	76.26
	51	2.20	91.74	89.64
	10	2.30	80.58	101.94
	25	2.30	74.76	118.26
	48	2.40	103.56	85.02
	56	2.40	78.60	101.76
	09	2.50	115.80	74.10
	45	2.50	84.78	98.40
	72	2.50	84.90	78.72
	19	2.70	97.56	92.76
	29	2.70	113.16	113.58
	39	2.70	115.56	105.36
	06	2.80	103.08	110.28
	49	2.80	123.36	110.40
	80	2.80	82.14	90.60
	VG	3.00	69.66	86.52
	43	3.10	94.02	104.28
	59	3.10	123.96	97.62
	CD	3.20	105.20	129.60
	68	3.30	128.70	95.16
	12	3.80	156.36	127.44
	32	4.40	108.78	166.68
	42	4.40	143.76	123.60
	11	4.50	142.26	128.46
	41	4.70	117.24	117.78
	20	4.90	128.76	117.78
23	4.90	118.98	122.76	
31	5.20	176.04	135.00	
02/05/89	13	0.50	34.44	37.62
	30	0.50	28.98	26.28
	74	0.50	26.76	24.78
	16	0.60	34.74	36.06
	46	0.90	34.86	36.42
	57	0.90	52.38	53.64
	24	1.10	49.08	50.04
	37	1.10	37.50	47.10
	54	1.10	57.24	59.58
	17	1.20	40.56	43.26
	15	1.40	41.58	45.66
	22	1.50	37.08	29.94
	03	1.90	49.92	44.10
	04	1.90	45.96	39.84
	05	1.90	50.46	59.34
	01	2.10	46.98	48.60
	51	2.20	57.24	65.10
	25	2.30	42.54	49.20
	58	2.30	49.02	50.10
	56	2.40	55.92	57.24
53	2.50	58.20	57.66	
45	2.50	45.42	48.24	
29	2.70	47.58	48.84	
11/05/90	21	0.50	46.32	49.20
	34	0.50	21.96	22.26
	40	0.50	24.96	23.40
	74	0.50	22.38	20.52
	CU	0.50	27.66	27.36

Tabla 3.2 continuación

Sísmo	Estación	Periodo ( s )	Comp-NS ( s )	Comp-EW ( s )
11/05/90	27	0.80	55.86	54.06
	24	1.10	37.62	40.44
	37	1.10	60.48	52.86
	54	1.10	59.16	56.58
	15	1.40	63.48	69.24
	22	1.50	49.62	46.74
	53	1.50	52.14	52.62
	04	1.90	52.44	48.24
	01	2.10	53.76	50.64
	51	2.20	52.32	63.60
	25	2.30	48.30	51.78
	09	2.50	62.10	59.46
	29	2.70	68.34	66.06
	49	2.80	59.10	61.32
CD	3.20	29.62	24.72	
41	4.70	66.00	62.52	
31/05/90	07	0.50	53.70	52.50
	13	0.50	58.56	64.08
	21	0.50	62.76	65.04
	28	0.50	27.54	27.42
	30	0.50	35.82	36.48
	34	0.50	37.32	36.36
	47	0.50	59.28	61.56
	74	0.50	66.54	69.12
	78	0.50	29.16	31.20
	16	0.60	49.80	55.74
	50	0.60	37.14	37.74
	CY	0.70	35.82	31.08
	IM	0.80	52.02	51.30
	46	0.90	47.34	44.10
	52	0.90	45.48	38.70
	57	0.90	78.66	75.78
	37	1.10	78.86	68.22
	54	1.10	69.36	68.88
	17	1.20	59.76	54.54
	CM	1.20	48.12	51.06
	44	1.30	47.04	45.66
	15	1.40	59.58	77.94
	84	1.40	59.22	40.80
	22	1.50	74.28	68.40
	53	1.50	78.12	66.42
	03	1.90	67.38	64.08
	05	1.90	67.26	80.82
	55	1.90	64.02	63.90
	SC	1.90	44.46	43.32
	01	2.10	64.14	64.86
	62	2.10	76.92	76.32
	08	2.20	79.38	71.64
	51	2.20	72.18	79.02
	10	2.30	66.12	56.22
25	2.30	65.82	65.88	
48	2.40	62.46	60.78	
56	2.40	74.70	63.42	
09	2.50	80.76	83.46	
45	2.50	71.40	66.78	
72	2.50	56.82	54.84	
29	2.70	80.40	88.56	

Tabla 3.2 continuación

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
31/05/90	39	2.70	80.46	75.36
	49	2.80	102.48	90.24
	43	3.10	86.52	76.44
	59	3.10	96.42	87.60
	CD	3.20	54.88	60.20
	68	3.30	85.74	69.54
	36	3.50	111.12	104.34
	12	3.80	80.88	86.82
	32	4.40	61.26	66.84
	42	4.40	85.80	87.66
	11	4.50	103.86	99.36
	41	4.70	91.68	85.08
	31	5.20	97.32	95.04
24/10/93	30	0.50	50.10	52.56
	34	0.50	87.72	77.10
	74	0.50	85.50	82.02
	78	0.50	67.74	69.84
	50	0.60	79.98	76.92
	16	0.60	66.72	74.40
	CY	0.70	83.82	79.14
	27	0.80	81.00	90.54
	IM	0.80	87.36	74.04
	52	0.90	57.54	60.60
	57	0.90	95.64	96.66
	54	1.10	89.94	84.84
	17	1.20	94.38	90.78
	44	1.30	53.04	58.68
	RO	1.30	67.14	59.28
	15	1.40	90.18	91.26
	84	1.40	80.28	71.22
	22	1.50	62.76	59.52
	38	1.80	61.26	65.58
	55	1.90	97.32	94.02
	SC	1.90	77.76	78.66
	01	2.10	117.72	108.36
	62	2.10	121.38	114.18
	08	2.20	109.38	114.72
	51	2.20	114.30	110.70
	45	2.50	108.66	104.16
	72	2.50	108.60	113.22
	19	2.70	98.34	92.88
	29	2.70	121.32	119.34
	39	2.70	135.24	131.94
	06	2.80	137.82	132.42
49	2.80	142.98	153.90	
43	3.10	112.74	103.80	
59	3.10	146.52	139.80	
CD	3.20	116.22	114.36	
36	3.50	163.92	199.20	
12	3.80	103.98	100.62	
TL	3.80	115.86	121.50	
32	4.40	72.60	83.88	
11	4.50	104.10	93.48	
41	4.70	111.66	134.58	
20	4.90	193.20	186.90	
23	4.90	126.72	117.42	
31	5.20	212.82	201.00	

Tabla 3.2 continuación

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
10/12/94	07	0.50	79.20	76.74
	13	0.50	73.74	77.52
	21	0.50	88.86	74.70
	28	0.50	47.64	52.86
	30	0.50	47.59	47.28
	40	0.50	74.70	75.54
	47	0.50	78.54	85.86
	74	0.50	67.20	67.20
	76	0.50	63.12	62.16
	CU	0.50	36.24	36.00
	CH	0.50	55.86	61.74
	ES	0.50	45.42	47.34
	TY	0.50	65.58	70.92
	16	0.60	61.26	39.12
	CY	0.70	67.62	70.68
	27	0.80	70.80	84.12
	IM	0.80	70.92	80.22
	46	0.90	66.60	77.22
	52	0.90	53.58	48.48
	57	0.90	66.60	78.84
	24	1.10	75.96	59.76
	54	1.10	69.18	81.84
	17	1.20	88.56	87.30
	15	1.40	76.80	61.92
	84	1.40	59.76	86.52
	22	1.50	95.10	81.66
	38	1.80	65.16	61.92
	03	1.90	92.16	102.00
	04	1.90	90.42	100.92
	55	1.90	85.50	74.58
	62	2.10	94.08	85.08
08	2.20	90.36	97.20	
51	2.20	107.16	98.22	
48	2.40	81.84	85.50	
56	2.40	105.30	107.94	
09	2.50	122.10	111.48	
45	2.50	106.38	92.76	
72	2.50	91.98	90.18	
19	2.70	120.36	108.96	
39	2.70	104.10	115.50	
06	2.80	103.80	117.06	
49	2.80	135.84	138.72	
43	3.10	121.14	130.26	
59	3.10	124.02	106.14	
CD	3.20	137.64	135.18	
SC	3.20	58.86	53.58	
68	3.30	108.42	101.04	
36	3.50	137.76	136.38	
UK	3.60	125.46	115.02	
12	3.80	103.80	116.16	
ZA	4.30	100.50	103.62	
11	4.50	90.90	94.08	
41	4.70	93.90	84.96	
23	4.90	80.40	75.24	
31	5.20	112.68	96.84	

Tabla 3.2 continuación

Sismo	Estación	Periodo ( s )	Comp-NS ( s )	Comp-EW ( s )
14/09/95	07	0.50	104.82	105.36
	13	0.50	87.48	101.40
	18	0.50	66.12	79.14
	21	0.50	100.02	97.26
	28	0.50	76.80	58.92
	30	0.50	69.36	69.36
	34	0.50	75.00	89.28
	47	0.50	85.50	92.70
	64	0.50	57.36	58.02
	74	0.50	95.16	88.86
	78	0.50	90.06	92.58
	CU(01)	0.50	58.38	62.82
	CU(04)	0.50	96.36	137.16
	CU(05)	0.50	60.66	58.20
	CH	0.50	72.18	80.28
	ES	0.50	111.48	94.92
	Mi	0.50	56.58	60.66
	MR	0.50	64.92	64.08
	TY	0.50	99.06	93.24
	TX	0.50	67.80	73.98
	CY	0.70	95.52	72.30
	IM	0.80	88.20	87.54
	46	0.90	80.94	74.16
	52	0.90	59.16	61.32
	57	0.90	72.06	62.94
	37	1.10	69.18	92.94
	54	1.10	87.42	89.28
	RO	1.30	76.74	75.24
	15	1.40	95.70	95.70
	84	1.40	92.94	94.98
	22	1.50	84.96	90.42
	38	1.80	82.02	88.50
	03	1.90	114.84	105.42
	04	1.90	108.54	104.58
	55	1.90	96.78	95.58
	SC	1.90	95.46	96.84
	24	1.10	70.08	70.56
	01	2.10	83.28	104.16
	62	2.10	117.78	119.04
	08	2.20	121.92	111.42
	51	2.20	110.82	118.62
	48	2.40	135.06	114.72
56	2.40	110.22	104.82	
45	2.50	116.34	121.32	
72	2.50	120.78	129.90	
19	2.70	77.94	123.24	
39	2.70	129.78	129.48	
VG	3.00	92.52	101.16	
43	3.10	126.48	117.84	
59	3.10	177.42	153.90	
CD	3.20	118.22	155.24	
CA	3.20	73.56	77.58	
CB	3.20	76.38	79.26	
12	3.80	188.28	143.76	
14	3.80	200.04	178.44	
32	4.40	174.36	151.80	
42	4.40	143.16	154.02	

Tabla 3.2 continuación

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
14/09/95	11	4.50	211.38	218.70
	23	4.90	173.64	185.10
	31	5.20	288.96	237.72
	ZA	4.30	201.48	175.80
	02	5.10	217.68	164.82

Como ejemplo ilustrativo de la variación de la duración del movimiento con el periodo dominante del sitio, la figura 3.5 muestra un mapa con curvas de igual duración para el sismo del 9 de octubre de 1995. Las duraciones se indican en segundos. Para este análisis en particular, se consideró solo la aplicación de la duración relevante utilizando como límites el 2.5% y el 97.5% de la intensidad de Arias. De acuerdo con la figura 3.5, se observa un claro incremento en la duración del movimiento desde sitios pertenecientes a la zona de transición (estación VI,  $T_s=0.5$  s) en donde encontramos cerca de los 100 s, hasta una punto en la zona de lago (estación 31,  $T_s=5.2$  s) en donde se reportan duraciones con más de 400 s.

La figura 3.6 representa gráficamente los resultados de la tabla 3.2; en esa figura, se presenta una serie de gráficas duración-periodo dominante del terreno y en donde se muestra la relación entre esos dos parámetros. Para cada gráfica duración-periodo dominante del terreno, se realiza una regresión ajustando a cada grupo de datos a una variación lineal, representada con línea continua; con línea punteada se muestran los valores obtenidos con la ecuación 3.3 la cual se describirá posteriormente. Una vez más, la figura 3.6 corrobora el crecimiento de la duración del movimiento con el incremento del periodo dominante del suelo; asimismo, observamos que la duración crece cuando se presenta un aumento en la magnitud del temblor como se demostró en la figura 3.4 para el sitio CD.

De acuerdo con la figura 3.6, la variación de las pendientes de las rectas muestra el nivel de dependencia de la duración del movimiento con el cambio del periodo dominante como función de la magnitud. Al realizar un análisis comparativo entre el evento sísmico del 2 de mayo de 1989 (gráfica 3.6d) y el 14 de septiembre de 1995 (gráfica 3.6i), y considerando un intervalo definido del periodo dominante ( $0.5 \text{ s} \leq T_s \leq 2.0 \text{ s}$ ), se observa

que la recta que representa el temblor del 14 de septiembre ( $M=7.3$ ) posee una pendiente mayor, generando así un incremento importante de la duración del movimiento conforme crece el periodo; contrario a lo anterior, el sismo del 2 de mayo ( $M=5.2$ ) presenta una pendiente menor, originando que el incremento en el valor de la duración sea menos significativo. Por lo tanto, se puede esperar que para sismos intensos el nivel de dependencia de la duración del movimiento con el aumento en el periodo dominante del suelo sea más relevante que para sismos pequeños.

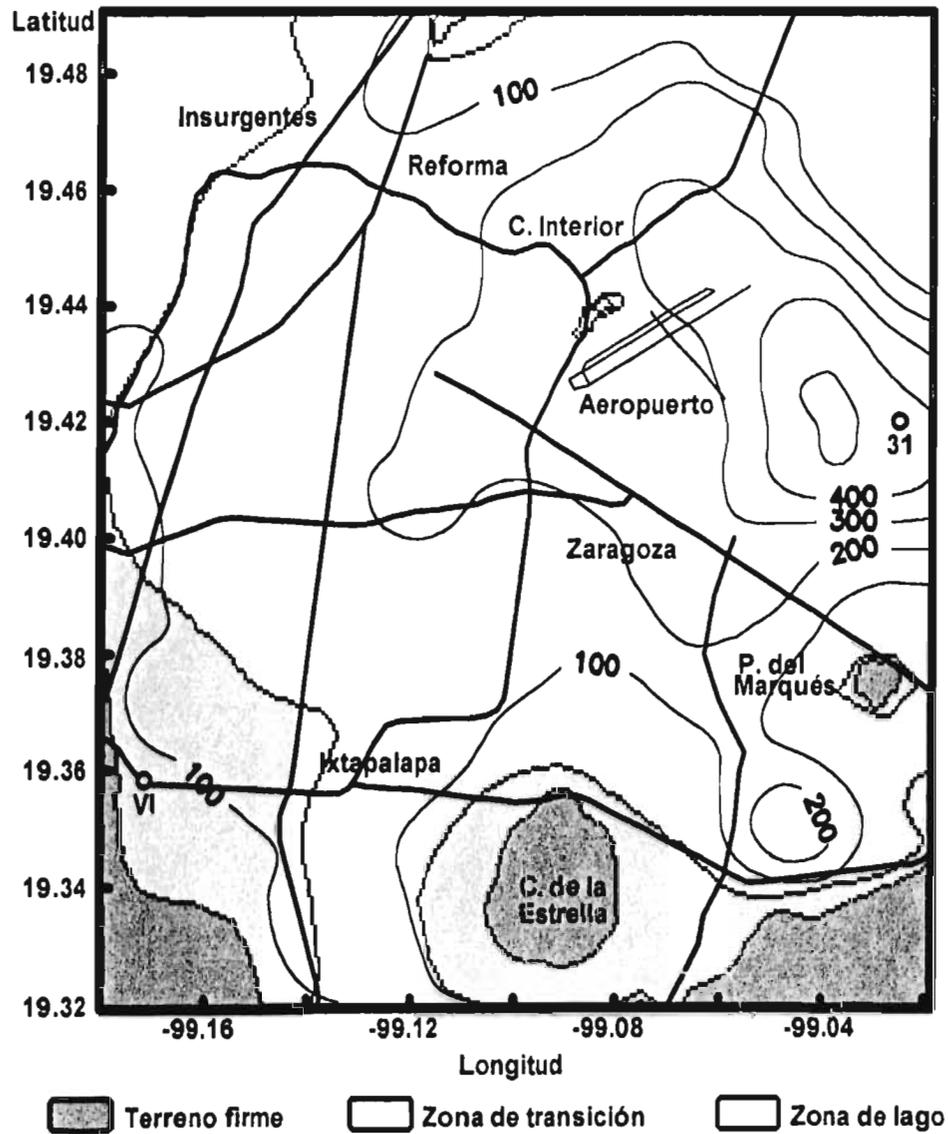
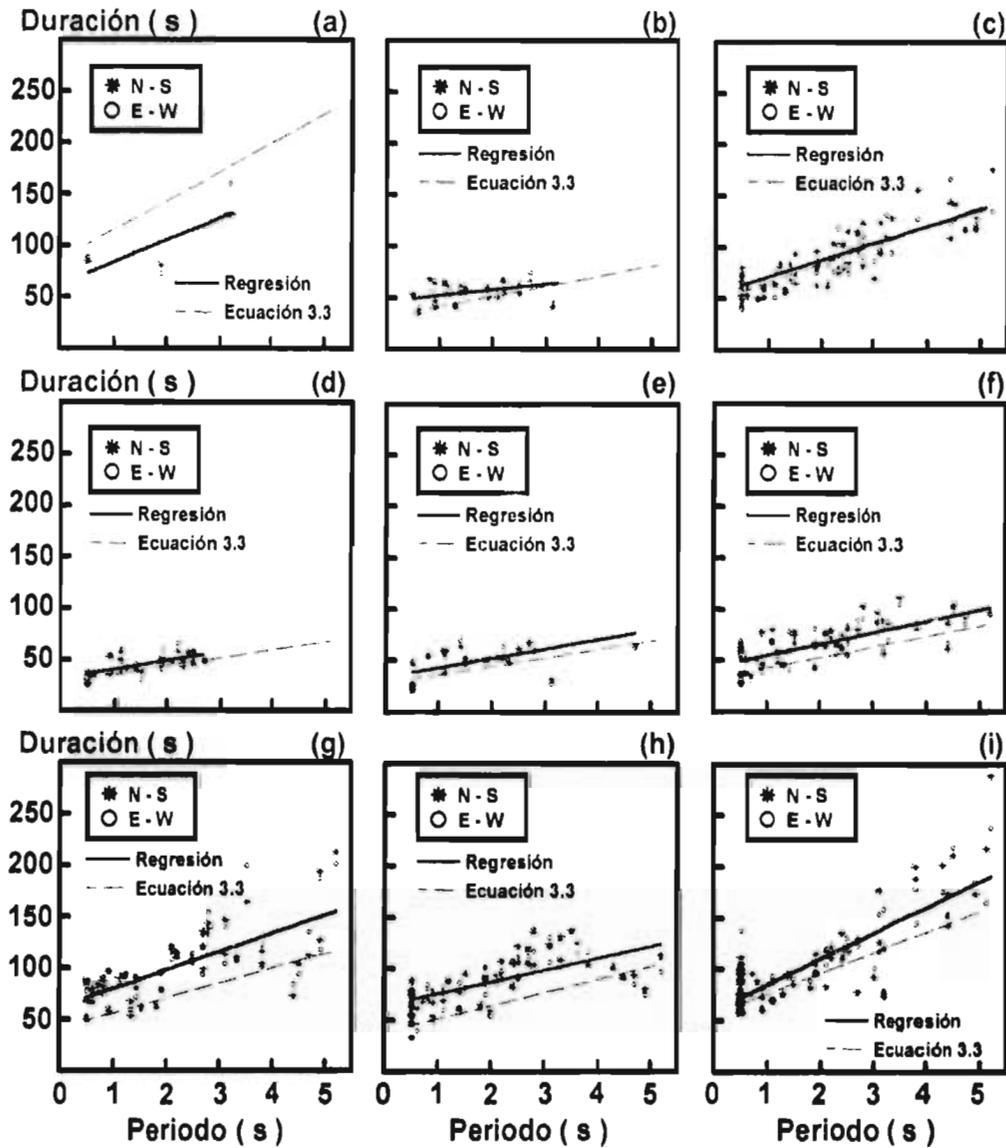


Figura 3.5 Curvas de igual duración para el sismo del 9 de octubre de 1995



**Figura 3.6** Variación de la duración del movimiento contra el periodo dominante del terreno para sismos diversos

- |                             |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| a) Sismo: 19/09/85, $M=8.1$ | b) Sismo: 08/02/88, $M=5.7$ | c) Sismo: 25/04/89, $M=6.9$ |
| d) Sismo: 02/05/89, $M=5.2$ | e) Sismo: 11/05/90, $M=5.3$ | f) Sismo: 31/05/90, $M=5.8$ |
| g) Sismo: 24/10/93, $M=6.6$ | h) Sismo: 10/12/94, $M=6.3$ | i) Sismo: 14/09/95, $M=7.3$ |

Todas las gráficas mostradas en la figura 3.6 presentan una clara dispersión de datos con relación a la recta originada por la regresión lineal. Sin embargo, la ecuación de la recta

se escoge como una forma sencilla de representar la variación de la duración del movimiento con el periodo dominante del terreno.

Un aspecto que debe ser mencionado con relación a algunos sismos recientes se explica a continuación. Así como se realizó una selección de algunos sismos a partir de la tabla 1.1, los cuales se consideraron aceptables para ayudar a describir el fenómeno de la duración del movimiento fuerte del terreno, también hubo que descartarse algunos otros. Tales son los casos de los eventos sísmicos ocurridos el 22 de mayo de 1994 y el 9 de octubre de 1995. En la tabla 3.3, se indican las duraciones estimadas para esos sismos y cuyos valores se obtuvieron tomando en cuenta las mismas condiciones planteadas en la tabla 3.2 referentes al cálculo de la duración del movimiento.

**Tabla 3.3** Duración del movimiento contra el periodo dominante del terreno para los sismos ocurridos el 22 de mayo de 1994 y el 9 de octubre de 1995

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
22/05/94	13	0.50	57.96	66.06
	21	0.50	79.38	74.10
	28	0.50	45.48	46.74
	30	0.50	47.64	44.46
	34	0.50	66.66	68.94
	40	0.50	68.16	62.52
	74	0.50	58.32	59.16
	78	0.50	60.00	58.56
	TY	0.50	65.82	62.34
	CU	0.50	65.58	63.30
	16	0.60	67.50	70.32
	50	0.60	60.00	57.78
	CY	0.70	69.12	67.98
	27	0.80	74.94	69.00
	IM	0.80	64.92	66.24
	46	0.90	64.68	63.60
	52	0.90	49.44	49.74
	57	0.90	74.10	67.80
	54	1.10	77.04	68.82
	17	1.20	63.12	60.54
	RO	1.30	71.34	61.56
	15	1.40	71.70	77.76
	84	1.40	80.70	73.62
	22	1.50	53.28	50.82
	53	1.50	52.44	57.12
	04	1.90	61.38	53.76
	05	1.90	72.48	69.72
	55	1.90	56.70	58.20
	01	2.10	63.48	59.58
	62	2.10	57.78	57.66
51	2.20	63.90	67.92	
56	2.40	78.36	72.96	
09	2.50	64.80	68.52	
45	2.50	64.14	62.10	

Tabla 3.3 continuación

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
22/05/94	72	2.50	62.82	62.70
	29	2.70	59.16	57.36
	39	2.70	68.16	67.08
	06	2.80	58.32	58.26
	49	2.80	61.38	60.48
	43	3.10	53.70	55.14
	59	3.10	59.34	55.26
	CD	3.20	64.74	60.30
	36	3.50	83.10	76.50
	41	4.70	71.88	67.44
	31	5.20	79.32	80.76
09/10/95	07	0.50	94.38	95.64
	13	0.50	109.56	113.28
	21	0.50	164.22	156.00
	34	0.50	120.72	115.86
	40	0.50	79.68	78.96
	47	0.50	164.16	159.24
	74	0.50	57.42	57.42
	78	0.50	73.02	75.30
	TY	0.50	127.92	129.06
	CU(01)	0.50	30.96	32.40
	CU(05)	0.50	38.34	39.66
	16	0.60	120.66	121.86
	50	0.60	103.14	101.28
	CY	0.70	216.84	229.08
	27	0.80	132.54	128.04
	IM	0.80	90.18	91.44
	52	0.90	105.06	109.62
	24	1.10	111.00	115.68
	37	1.10	140.16	157.14
	54	1.10	129.00	129.30
	17	1.20	155.46	175.32
	44	1.30	84.54	83.16
	84	1.40	111.24	120.00
	22	1.50	107.22	106.14
	53	1.50	74.64	74.64
	38	1.80	118.68	119.46
	03	1.90	153.06	143.94
	04	1.90	136.98	122.34
	05	1.90	180.78	139.50
	62	2.10	155.82	154.92
	08	2.20	167.82	162.78
	51	2.20	170.88	195.90
	10	2.30	115.20	135.60
	58	2.30	136.62	153.90
	48	2.40	131.10	135.18
	56	2.40	141.30	115.68
	RM	2.40	195.24	166.80
	45	2.50	177.90	147.06
	72	2.50	138.48	127.08
	UK	3.60	246.36	247.80
	19	2.70	227.22	190.62
	29	2.70	188.40	184.02
	39	2.70	164.46	176.34
06	2.80	165.96	163.74	
49	2.80	171.00	179.16	
43	3.10	203.28	206.64	

Tabla 3.3 continuación

Sismo	Estación	Periodo (s)	Comp-NS (s)	Comp-EW (s)
09/10/95	68	3.30	148.20	164.70
	12	3.80	237.66	158.10
	TL	3.80	185.70	163.98
	ZA	4.30	267.24	279.48
	42	4.40	173.16	159.42
	32	4.40	207.48	185.82
	41	4.70	247.74	238.92
	20	4.90	205.62	192.36
	23	4.90	234.00	298.50

La razón por la que el evento sísmico del 9 de octubre no se incluyó en el análisis, es porque la fuente sísmica se presentó a una distancia mayor (515 km del valle de México), ocasionando que los acelerogramas registrados en la ciudad de México carecieran de forma, mostrando amplitudes bajas. En el caso del temblor ocurrido el 22 de mayo, se considera que las duraciones obtenidas no son representativas de la magnitud del temblor; el hecho es que se trata de un temblor que ocurrió muy cerca de la ciudad de México (197 km) y cuyo fallamiento fue de tipo Normal, lo que pudo ocasionar que el valor de las duraciones no sean representativas de lo que se esperaría para un sismo con magnitud de 6.0 y con características propias de un sismo de subducción ocurrido cerca de los 300 km de distancia de la ciudad de México.

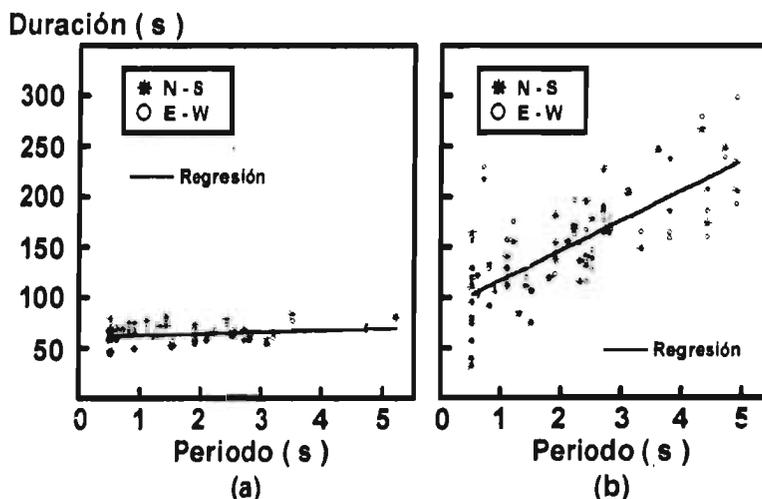


Figura 3.7 Variación de la duración del movimiento contra el periodo dominante del terreno  
a) Sismo: 22/05/94, M=6.0  
b) Sismo: 09/10/95, M=7.5

Los datos mostrados en la tabla 3.3 se representan gráficamente en la figura 3.7; además, se muestra la variación de la duración con el periodo dominante del terreno utilizando la recta que mejor se ajusta a cada grupo de datos (regresión lineal). En el caso del temblor ocurrido el 22 de mayo, se observan duraciones pequeñas para periodos dominantes grandes, incluso llegan a ser del mismo orden que los calculados en terreno firme para ese mismo sismo; quizá, este efecto se asocia con las características de las ondas sísmicas que arribaron a la zona de lago, las cuales no alcanzan a excitar completamente el terreno blando del valle. Los resultados obtenidos para el sismo del 22 de mayo se pueden comparar con los del sismo de subducción del 10 de diciembre de 1994, este último mostrado en la figura 3.6; la variación entre la duración del movimiento y el periodo dominante del terreno es completamente diferente entre esos dos eventos siendo que se tratan de temblores del mismo orden de magnitud. Por otra parte, la gráfica 3.7b muestra que para el sismo del 9 de octubre de 1995, se observan resultados de la duración demasiado grandes, debido al hecho de presentarse amplitudes pequeñas y muy uniformes en la mayoría de los acelerogramas captados en la ciudad de México para ese mismo temblor. Por estas razones, los sismos ocurridos el 22 de mayo y el 9 de octubre se excluyen del análisis.

**Tabla 3.4** Valor de las pendientes y ordenadas, correspondientes a las rectas mostradas en la figura 3.6

Sismo	M	Ordenada para un periodo dominante del suelo $T_s=0.5$ s (s)		Pendiente (s/s)	
		Regresión	Ecuación 3.3	Regresión	Ecuación 3.3
19/09/85	8.1	73.54	100.63	21.33	28.07
08/02/88	5.7	49.49	36.12	5.59	9.76
25/04/89	6.9	56.58	54.78	18.54	16.55
02/05/89	5.2	36.33	31.24	8.41	7.84
11/05/90	5.3	38.88	32.13	9.18	8.19
31/05/90	5.8	49.78	37.36	11.08	10.20
24/10/93	6.6	71.19	48.88	17.89	14.51
10/12/94	6.3	70.01	44.04	11.49	12.71
14/09/95	7.3	72.58	64.83	25.14	20.00

Retomando nuevamente la figura 3.6, se extraen de las regresiones lineales el valor correspondiente a las ordenadas, considerando un periodo dominante del terreno igual a 0.5 s (terreno firme del valle de México), y también se calcula el valor de las pendientes para cada una de esas rectas; la tabla 3.4 muestra esos valores, así como aquellos obtenidos a partir de la ecuación 3.3, la cual se estudiará más adelante. Al igual que en el capítulo II, en este se intenta obtener una expresión más que ayude estimar la duración del movimiento fuerte del terreno en el valle de México, conjuntando los resultados obtenidos de la duración con los datos disponibles de la magnitud del temblor y el periodo dominante del terreno.

Se establece una comparación entre dos formas de estimar la duración del movimiento en la zona de terreno firme del valle de México. La tabla 3.5 indica el valor de las ordenadas de las rectas mostradas en la figura 3.6 (regresión lineal), para un periodo dominante del terreno igual a 0.5 s; asimismo, se presentan aquellos valores que se derivan de la ecuación 2.3, la cual se planteó en el capítulo anterior.

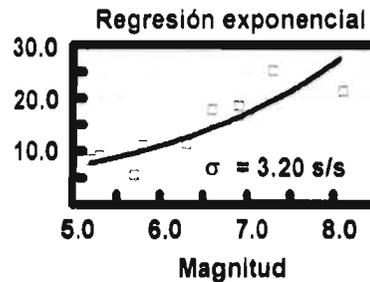
**Tabla 3.5** Estimación de la duración del movimiento en terreno firme del valle de México bajo dos criterios diferentes

Sismo	M	Ordenada para un periodo dominante $T_d=0.5s$ (figura 3.6) (s)	Aplicación de la ecuación 2.3 para el valle de México (s)	Error (%)
19/09/85	8.1	73.54	100.63	-37
08/02/88	5.7	49.49	36.12	27
25/04/89	6.9	56.58	54.78	3
02/05/89	5.2	36.33	31.24	14
11/05/90	5.3	38.88	32.13	17
31/05/90	5.8	49.78	37.36	25
24/10/93	6.6	71.19	48.88	32
10/12/94	6.3	70.01	44.04	37
14/09/95	7.3	72.58	64.83	-11

La tabla 3.5 muestra que para algunos temblores (25 de abril, 2 y 11 de mayo y 14 de septiembre), el porcentaje de error refleja una buena aproximación entre el valor de la duración del movimiento obtenida con la regresión lineal y aquel que se estima con la

ecuación 2.3. Sin embargo, en la figura 3.6 se observa que, en general, existe dispersión de datos con respecto a las regresiones establecidas, inclusive para los sismos mencionados anteriormente. Este es un aspecto que puede justificar el que se obtengan errores significativos para la mayoría de los temblores.

Dado el interés por obtener una expresión matemática que estime la duración del movimiento en el valle de México a partir del conocimiento de parámetros sísmicos y de las características dinámicas del terreno, y aceptando dentro de lo tolerable los errores mostrados en la tabla 3.5, tomamos la ecuación 2.3 como una alternativa viable para dicha estimación. De la misma manera que en el capítulo anterior, se intenta que dicha expresión buscada tenga una interpretación física.



**Figura 3.8** Representación gráfica del valor de las pendientes mostradas en la tabla 3.5. Los datos graficados corresponden a las rectas que se derivan a partir de una regresión lineal (figura 3.6)

Una vez que se tiene la forma de determinar la duración del movimiento en terreno firme del valle de México, se realiza otro análisis para definir el valor de la duración con el cambio en la magnitud del periodo dominante del terreno. Esto se logra tomando como datos el valor de las pendientes indicadas en la tabla 3.4 (correspondientes a las regresiones lineales mostradas en la figura 3.6) y suponiendo la variación lineal entre duración y periodo dominante del terreno. El valor de las pendientes se muestran gráficamente en la figura 3.8.

Para realizar el ajuste de los datos mostrados en la figura 3.8, se propone aplicar una variación exponencial. A pesar de presentarse una cierta dispersión de datos, con un error estándar de 3.49 s/s, la curva exponencial resulta tolerablemente aceptable.

Estimando la duración del movimiento en sitios de terreno firme de la ciudad de México ( $T_s=0.5$  s en la figura 3.6) con ayuda de la ecuación 2.3, aceptando una variación exponencial de la duración con la magnitud del sismo para un determinado valor del periodo dominante del terreno (figura 3.8) y considerando la variación lineal entre duración y periodo dominante (figura 3.6), se propone una ecuación que engloba a los parámetros antes mencionados: duración del movimiento, magnitud del sismo, periodo dominante del terreno; asimismo, se contempla la distancia a la fuente sísmica como un cuarto parámetro y la cual está contenida en la ecuación 2.3. La expresión general que podría estimar la duración del movimiento dentro del valle de México y que representaría las variaciones numéricas entre los cuatro parámetros sería la siguiente:

$$D(R', M, T_s) = f(T_s) C_3 e^{\gamma M} + D(R', M) \quad (3.2)$$

donde:

- $D(R', M, T_s)$  Duración del movimiento en el valle de México, en s
- $D(R', M)$  Duración del movimiento en sitios de terreno firme de la República Mexicana (ecuación 2.3), en s
- $f(T_s)$  Función lineal dependiente del periodo dominante del sitio, propuesta como  $f(T_s) = (T_s - 0.5)$ , en s
- $C_3$  Constante dependiente de la regresión exponencial (figura 3.8), cuyo valor es  $C_3 = 39/49$
- $\gamma$  Exponente dependiente de la regresión exponencial (figura 3.8), cuyo valor es  $\gamma = 219/500$

El primer término del segundo miembro de la ecuación 3.2 representa la variación de la duración del movimiento ( $D$ ) con la magnitud del sismo ( $M$ ) para un determinado periodo dominante del suelo ( $T_s$ ). Sustituyendo el valor que corresponde a las constantes y exponentes ( $C_3$  y  $\gamma$ ) de la ecuación 3.2, realizando algunas operaciones y haciendo un acomodo de términos, finalmente se obtiene la expresión general que estima la duración del movimiento fuerte del terreno en la ciudad de México:

$$D(R', M, T_s) = \frac{7}{5 \times 10^4} \left[ 2840 (2T_s - 1) e^{11M/25} + 185 (R' - 24) e^{7M/25} + e^{38M/25} \right] \quad (3.3)$$

Para estimar la duración del movimiento en la ciudad de México, la ecuación 3.3 puede reducirse aún más, ya que la magnitud de la distancia  $R'$  se considera constante e igual a 302 km (ubicación permanente del valle de México para el eje arbitrario descrito en el capítulo II).

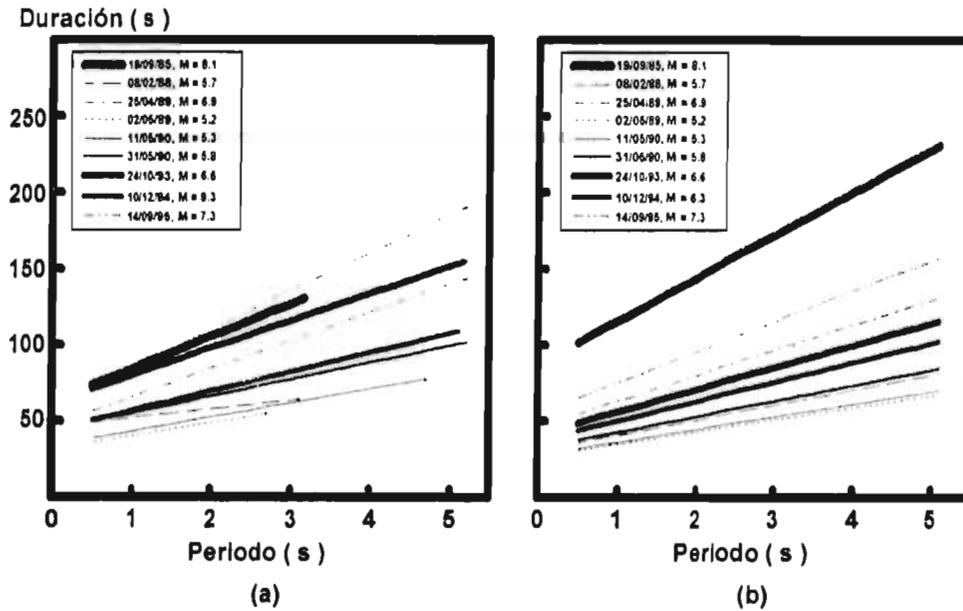
La figura 3.6 representa gráficamente las rectas que se derivan de la ecuación 3.3, una vez sustituyendo la distancia y la magnitud de los sismos contemplados en este trabajo, y haciendo variar el periodo dominante del suelo. La tabla 3.4 muestra el valor correspondiente a las ordenadas y las pendientes para cada una de las rectas calculadas con la expresión 3.3.

**Tabla 3.6** Error estándar (en segundos) calculado para las rectas de la figura 3.6

Sismo	M	Regresión	Ecuación 3.3	Número de datos
19/09/85	8.1	21.20	55.12	6
08/02/88	5.7	7.18	8.74	46
25/04/89	6.9	13.89	14.53	120
02/05/89	5.2	7.62	7.84	46
11/05/90	5.3	10.76	11.44	42
31/05/90	5.8	12.76	15.42	108
24/10/93	6.6	24.53	32.54	88
10/12/94	6.3	17.14	24.77	110
14/09/95	7.3	24.07	25.56	124

La tabla 3.6 indica el error estándar ( $\sigma$ ) estimado para las rectas mostradas en la figura 3.6. De acuerdo con esa misma tabla y para un mismo evento sísmico, la diferencia entre los errores estimados es mínima por unos cuantos segundos, lo que se considera una buena aproximación para la mayoría de los sismos estudiados. Sin embargo, se muestra también que la diferencia entre los errores calculados para el sismo del 19 de septiembre de 1985 llega a incrementarse de manera importante; quizá, la causa se debe a los pocos datos que se obtuvieron para tal evento sísmico y que intervinieron en el análisis que generó la expresión 3.3. Por la importancia que tiene el temblor del 19 de septiembre de 1985 dentro de la ingeniería sísmica y el haber sido potencialmente dañino para las

estructuras, llegamos a la conclusión de que no se puede descartar del análisis. De esta manera, la ecuación 3.3 es aceptada como apoyo en la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno en el valle de México al ocurrir un sismo de subducción en la costa del Pacífico, asociada con las brechas sísmicas de Guerrero y Michoacán.



**Figura 3.9** Gráficas comparativas de la duración del movimiento contra el periodo dominante del terreno  
**a)** Resultados de la regresión lineal  
**b)** Resultados empleando la ecuación 3.3

La figura 3.9 muestra dos gráficas comparativas en donde se presentan las rectas de la figura 3.6. De acuerdo con la figura 3.9, existe un crecimiento de la duración del movimiento cuando la magnitud del sismo aumenta, así como también la duración se incrementa a razón de que el valor del periodo dominante del sitio se hace más grande.

Los resultados de la figura 3.9 se pueden utilizar para compararse con otros temblores con características sísmicas semejantes a los que se estudiaron en este capítulo. Para cualquier otro sismo de subducción mexicano que ocurra cerca de las costas de Guerrero o Michoacán, la expresión 3.3 resulta útil para estimar la duración del movimiento dentro del valle de México con solo proponer la magnitud del sismo, el valor del periodo

dominante del sitio de interés y la distancia a la fuente sísmica ( $R=302$  km, para el caso de la ciudad de México).

Como en el caso de la ecuación 2.2, la aplicación directa de la expresión 3.3 no es apropiada para estimar la duración del movimiento fuerte del terreno en otros lugares en donde se presenten condiciones de sitio diferentes a las que se estudiaron en este capítulo. Dado que el origen principal de la ecuación 3.3 son los registros acelerométricos que corresponden a sismos de subducción mexicanos y que fueron captados por las redes acelerométricas de Guerrero y del valle de México, sería incorrecto generalizar tal expresión para calcular la duración del movimiento en cualquier otra zona potencialmente sísmica. Una calibración de los términos que componen a la expresión 3.3, utilizando datos sísmicos correspondientes al sitio de interés, resultaría un buen recurso para estimar la duración del movimiento fuerte del terreno en otras regiones. En caso de no poder hacer los ajustes pertinentes a la ecuación, una alternativa adicional sería utilizar el mismo procedimiento de análisis empleado en los capítulos II y III de este trabajo para lograr establecer nuevas expresiones que sirvan para estimar la duración, siempre y cuando dicho análisis se apoye en registros sísmicos que se hayan obtenido cerca de la región que se desea estudiar.

## CAPÍTULO IV

### LA DURACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE DEL TERRENO Y LA TEORÍA DE VIBRACIONES ALEATORIAS

#### 4.1 LA TEORÍA DE VIBRACIONES ALEATORIAS

En 1956 Cartwright y Longuet-Higgins obtuvieron la distribución de probabilidades del máximo de una función aleatoria, generando un algoritmo que se utilizó en el cálculo de la amplitud máxima esperada de las ondas marinas. Es así como surge la teoría de vibraciones aleatorias.

Años después, Vanmarcke (1976) y Boore (1983) aplicaron estos conceptos en problemas propios de la ingeniería sísmica, al considerar los acelerogramas como procesos aleatorios  $a(t)$  y suponiendo que el proceso es estacionario (Papoulis, 1985). En un proceso con estas características, sus propiedades estadísticas no varían en el tiempo y pueden determinarse a partir de uno solo de sus segmentos. A pesar de que algunos de los acelerogramas son procesos que no cumplen rigurosamente con estas suposiciones, empíricamente se han obtenido buenos resultados al aplicar el método de cálculo a espectros de respuesta (Ordaz y Reinoso, 1987). Según la teoría de vibraciones aleatorias este espectro estará dado por:

$$E(A_{\text{máx}}) = a_{\text{cm}} F_p \quad (4.1)$$

donde:

$E( )$	Denota esperanza del valor buscado
$A_{\text{máx}}$	Pseudoaceleración máxima, en $m/s^2$
$a_{\text{cm}}$	Aceleración cuadrática media, en $m/s^2$
$F_p$	Factor pico

Para obtener  $a_{\text{cm}}$  se recurre al teorema de Parseval (Papoulis, 1985) del cual bajo las hipótesis señaladas se deduce que:

$$a_{\text{cm}} = \left[ \frac{M_o}{T_{\text{cm}}} \right]^{1/2} \quad (4.2)$$

donde  $T_{cm}$  es la duración de la señal.  $M_o$  queda definido por la siguientes expresión:

$$M_o = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |Y(\Omega, \omega)|^2 d\omega \quad (4.3)$$

donde  $Y(\Omega, \omega)$  es el espectro de Fourier de la respuesta de un oscilador definido por su frecuencia circular de vibración ( $\Omega$ ) y la frecuencia circular de la excitación ( $\omega$ ). Para obtener  $T_{cm}$ , Boore y Joyner (1984) proponen un resultado empírico calibrado para temblores ocurridos en California:

$$T_{cm} = T_g + \frac{1}{2\pi\zeta f} \frac{(T_g \cdot f)^3}{(T_g \cdot f)^3 + 1/3} \quad (4.4)$$

donde:

$T_{cm}$	Duración de la señal, en s
$T_g$	Duración significativa del movimiento, en s
$\zeta$	Porcentaje del amortiguamiento viscoso
$f$	Frecuencia del oscilador, en Hertz

Para calcular el espectro de respuesta es necesario contar con el valor de  $T_g$ . La expresión 3.3 (generada en el capítulo III) ofrece una opción para estimar la duración significativa del movimiento, indicada en la ecuación 4.4.

Se limitará a calcular espectros de respuesta en algunos sitios del valle de México y considerando una serie de eventos sísmicos ocurridos cerca de las costas de Guerrero y Michoacán; estas condiciones se establecen debido al alcance estimativo de la expresión 3.3. Con esta ecuación es posible asignar un valor a  $T_g$ , conociendo solo algunos parámetros sísmicos del temblor y el periodo dominante del sitio donde se requiera determinar el espectro. Con el método de la teoría de vibraciones aleatorias, se intenta hacer uso de la ecuación 3.3, cuyos valores estimados de la duración del movimiento toman parte en los cálculos posteriores de este capítulo.

Continuando con la descripción del método de la teoría de vibraciones aleatorias corresponde ahora determinar el factor pico  $F_p$ . Se define primeramente la constante  $N$  como el número de cruces de la señal por el eje del tiempo, estimándose como:

$$N = \frac{T_g}{\pi} \sqrt{\frac{M_2}{M_0}} \quad (4.5)$$

en donde  $M_2$  se calcula con la siguiente integral:

$$M_2 = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |Y(\Omega, \omega)|^2 d\omega \quad (4.6)$$

De acuerdo con la teoría de vibraciones aleatorias, el valor de  $F_p$  se obtiene con una aproximación asintótica (Cartwright y Longuet-Higgins, 1956; Davenport, 1964; Clough y Penzien, 1975):

$$F_p = \sqrt{2 \ln N} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln N}} \quad (4.7)$$

donde  $\gamma$  es la constante de Euler con valor de 0.5772. A pesar de que la duración del movimiento en la teoría de vibraciones aleatorias no refleja el daño o deterioro que sufre una estructura, se procura dar versatilidad a los resultados de la duración para que sea una herramienta complementaria de otros métodos de cálculo, como es en este caso la obtención de espectros de respuesta a partir de la teoría de vibraciones aleatorias.

## 4.2 CÁLCULO DE ESPECTROS DE RESPUESTA

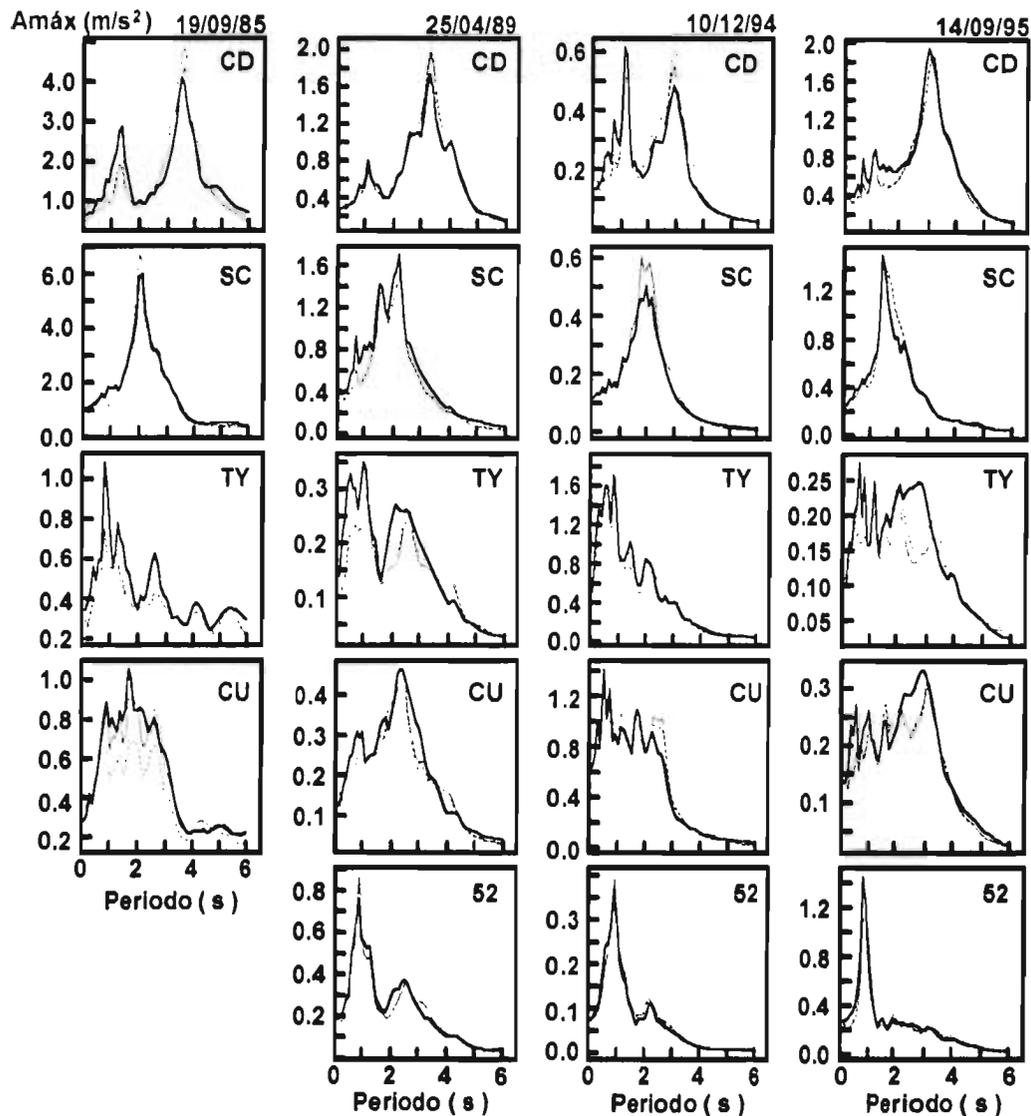
Para aplicar la ecuación 3.3 a la teoría de vibraciones aleatorias, se seleccionan algunos de los registros obtenidos en las estaciones acelerométricas ubicadas en terreno firme, transición y zona de lago del valle de México, y correspondientes a cuatro sismos de subducción mexicanos. La tabla 4.1 muestra las estaciones acelerométricas y los sismos escogidos.

**Tabla 4.1** Estaciones acelerométricas y sismos de subducción mexicanos seleccionados para el cálculo de espectros de respuesta

Sismo		Estación	
Subducción	19/09/85	CU	Terreno firme
	25/04/89	TY	Terreno firme
	10/12/94	52	Transición
	14/09/95	SC	Zona de lago
		CD	Zona de lago

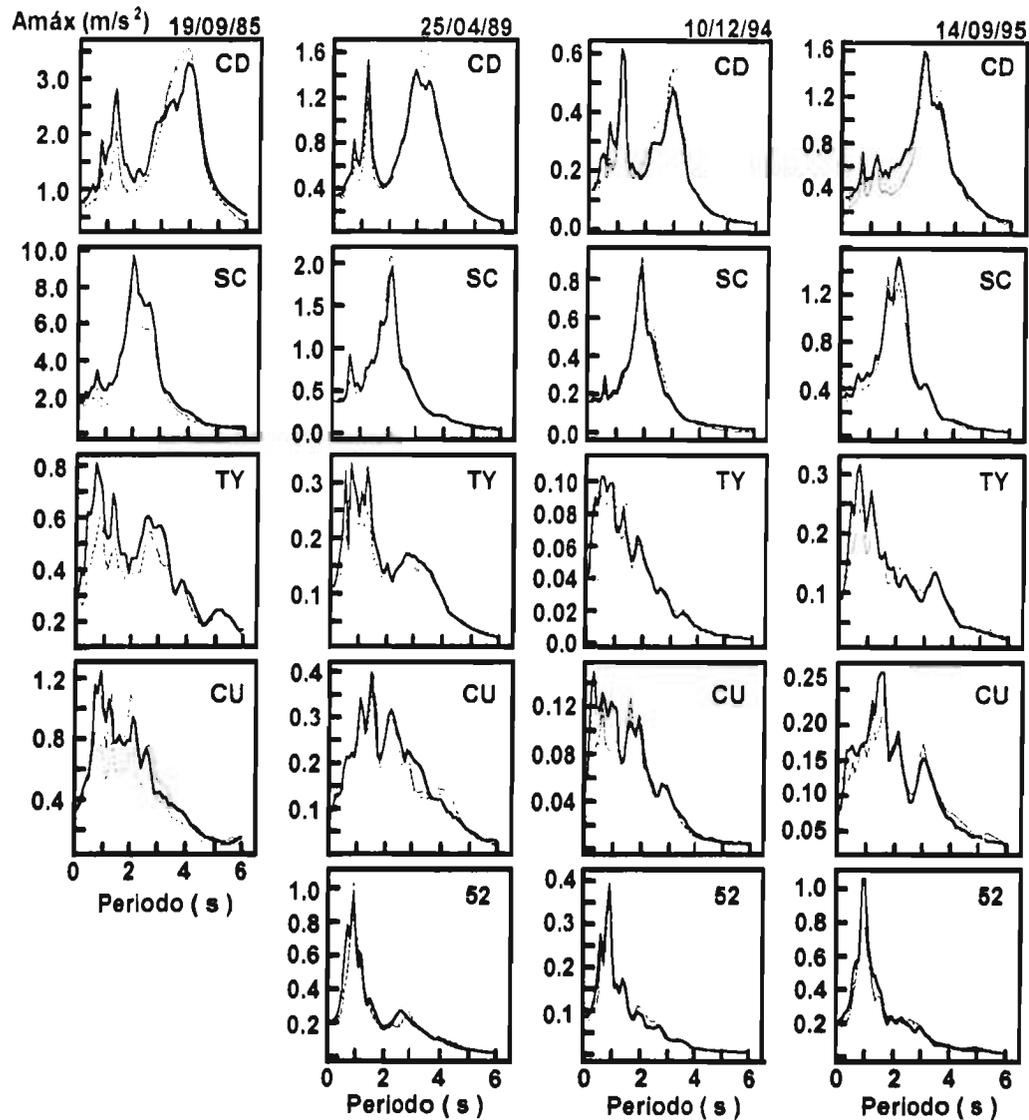
**Tabla 4.2** Duración significativa del movimiento ( $T_g$ ), calculada a partir de diferentes criterios

Sismo	Duración total del registro ( s )	Duración comprendida entre el 2.5 y 97.5% de la intensidad de Arias ( s )		Duración del movimiento obtenida a partir de la ecuación 3.3 ( s )
		NS	EW	
19/09/85				
CU	60.08	48.90	40.76	100.63
TY	158.20	85.70	90.68	100.63
52	-	-	-	-
SC	163.42	80.58	72.12	139.93
CD	318.68	130.14	160.32	176.42
25/04/89				
CU	54.30	42.72	39.82	54.78
TY	140.22	67.66	72.70	54.78
52	112.80	59.42	50.54	61.40
SC	160.90	84.48	78.50	77.95
CD	237.32	111.46	132.78	99.47
10/12/94				
CU	44.20	36.18	35.96	44.04
TY	101.20	65.82	70.70	44.04
52	71.14	53.56	48.68	49.12
SC	68.40	58.78	53.48	61.83
CD	210.40	140.84	136.78	78.36
14/09/95				
CU	97.50	58.42	62.96	64.83
TY	168.90	98.56	93.18	64.83
52	140.08	59.12	61.18	72.83
SC	207.96	99.76	96.90	92.83
CD	344.78	129.46	171.46	118.83



- Espectro de respuesta exacto: Considera la duración total del acelerograma registrado
- - - - - Espectro de respuesta estimado: Considera la duración significativa del movimiento a la que se obtiene entre el 2.5 y 97.5% de la intensidad de Arias. Calculado a partir de la teoría de vibraciones aleatorias
- ..... Espectro de respuesta estimado: Considera la duración significativa del movimiento a la que se obtiene aplicando la ecuación 3.3. Calculado a partir de la teoría de vibraciones aleatorias

**Figura 4.1** Espectros de respuesta exactos y estimados para un amortiguamiento viscoso del 5%. Componente norte-sur



- Espectro de respuesta exacto: Considera la duración total del acelerograma registrado
- - - - - Espectro de respuesta estimado: Considera la duración significativa del movimiento a la que se obtiene entre el 2.5 y 97.5% de la intensidad de Arias. Calculado a partir de la teoría de vibraciones aleatorias
- ..... Espectro de respuesta estimado: Considera la duración significativa del movimiento a la que se obtiene aplicando la ecuación 3.3. Calculado a partir de la teoría de vibraciones aleatorias

**Figura 4.2** Espectros de respuesta exactos y estimados para un amortiguamiento viscoso del 5%. Componente este-oeste

La tabla 4.2 muestra algunos valores de la duración significativa del movimiento ( $T_g$ ), calculados a partir de diversos criterios. Algunas de las cantidades mostradas en esa misma tabla se sustituyen en la expresión 4.4 para obtener el valor de la duración de la señal y posteriormente calcular los espectros de respuesta mediante el uso de la teoría de vibraciones aleatorias.

**Tabla 4.3** Error porcentual entre los espectros exacto y estimados

Sismo	Estación	Error entre los espectros exacto y estimado; para este último, utilizando la TVA y empleando un valor de la duración del movimiento ( $T_g$ ) como el intervalo del 2.5% al 97.5% de la Intensidad de Arias		Error entre los espectros exacto y estimado; para este último, utilizando la TVA y empleando un valor de la duración del movimiento ( $T_g$ ) como aquella que se deriva de la ecuación 3.3	
		Comp. NS	Comp. EW	Comp. NS	Comp. EW
19/09/85	CU	0.79	-3.04	21.73	23.02
	TY	11.39	12.37	16.23	15.51
	52	-	-	-	-
	SC	1.81	17.21	19.53	34.65
	CD	-4.84	11.41	6.49	14.57
25/04/89	CU	5.44	-0.41	12.14	8.68
	TY	7.95	4.76	1.72	-4.21
	52	2.38	-3.93	3.33	2.07
	SC	21.09	8.61	18.89	8.39
	CD	-1.05	10.37	-5.27	0.38
10/12/94	CU	-1.07	8.10	4.38	13.68
	TY	3.44	-0.52	-9.62	-17.53
	52	1.78	1.53	-1.20	1.83
	SC	2.73	13.72	4.64	17.94
	CD	-2.85	15.13	-15.27	0.13
14/09/95	CU	7.09	-4.76	10.18	-3.94
	TY	5.90	-1.31	-8.34	-14.35
	52	-1.10	-8.06	5.47	-2.13
	SC	5.21	8.80	2.69	7.43
	CD	10.82	16.11	7.95	3.80

Dado que se conocen los acelerogramas obtenidos en las estaciones de registro indicadas en la tabla 4.1, correspondientes a los eventos sísmicos que se estudian en este capítulo, también se determinan los espectros de respuesta exactos. Los espectros exactos se calculan haciendo el manejo de datos en el dominio de la frecuencia, en

donde la duración total del registro llega a tomar parte importante; estos espectros se emplean para realizar las comparaciones pertinentes con los espectros estimados a partir de la teoría de vibraciones aleatorias. Los espectros exactos y estimados se presentan en las figuras 4.1 y 4.2 para los componentes norte-sur y este-oeste, respectivamente; todos se calcularon para un amortiguamiento viscoso del 5%.

Para calcular la magnitud del error entre los espectros exactos y aquellos obtenidos con el método de la teoría de vibraciones aleatorias, se utiliza la siguiente expresión de los residuos cíclicos relativos (Levin, 1981):

$$\text{RCR} = \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \frac{\hat{Y} - Y}{\hat{Y}} \times 100 \% \quad (4.8)$$

donde:

- RCR** Residuo cíclico relativo (acumulado), en porcentaje
- $N_T$  Número de datos del espectro
- $\hat{Y}$  Valor exacto del espectro, en  $\text{m/s}^2$
- $Y$  Valor estimado del espectro, en  $\text{m/s}^2$

La tabla 4.3 presenta el valor de los errores porcentuales calculados. El signo positivo del error indica una subestimación del espectro calculado por medio de la teoría de vibraciones aleatorias con respecto al exacto, y una sobrestimación para el caso del signo negativo.

Para el sismo del 19 de septiembre de 1985, la tabla 4.3 muestra que el nivel de error se eleva de manera importante en el caso de algunas estaciones como son CU y SC, principalmente para aquellos valores correspondientes a la comparación del espectro estimado que utiliza un valor de la duración significativa del movimiento obtenida a partir de la expresión 3.3. La magnitud de estos errores porcentuales pudo originarse por la obtención de valores grandes de la duración del movimiento (mostradas en la tabla 4.2); esto se relaciona también con los pocos registros acelerométrico que se obtuvieron para ese sismo en el valle de México y que intervinieron para derivar la expresión 3.3. Asimismo, la influencia que tiene el valor de la duración al presentarse en el denominador de la ecuación 4.2, también llega a ser relevante en estos casos.

De acuerdo con la magnitud de los errores mostrados en la tabla 4.3 y a pesar de algunos resultados obtenidos para el sismo del 19 de septiembre, la aproximación entre los espectros exacto y estimados es tolerablemente aceptable para la mayoría de los registros analizados. Por lo tanto, la expresión 3.3 y el método de la teoría de vibraciones aleatorias pueden conjuntarse para ayudar a estimar espectros de respuesta en la ciudad de México.



## CAPÍTULO V

### LA ENERGÍA HISTERÉTICA DISIPADA Y LA DURACIÓN DEL MOVIMIENTO EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

#### 5.1 EL COMPORTAMIENTO INELÁSTICO EN SISTEMAS ESTRUCTURALES

Un estudio realizado por Bommer y Martínez-Pereira (1996) indica que existen pocas definiciones de la duración del movimiento fuerte del terreno que se apoyan en la respuesta de sistemas estructurales de un grado de libertad ante la presencia de un sismo. Estas definiciones pueden ser interpretadas como la aplicación de los conceptos de la duración acotada, uniforme y relevante (capítulo I) a la respuesta del movimiento. La tabla 5.1 muestra algunos trabajos referentes a la estimación de la duración del movimiento a partir de la respuesta dinámica de sistema estructurales.

**Tabla 5.1** Algunos estudios sobre la estimación de la duración del movimiento como función de la respuesta dinámica de sistemas estructurales (Bommer y Martínez-Pereira, 1996)

Año	Estudiado por:	Descripción:
1977	Pérez	Propuso una definición basada en la duración uniforme aplicada a la velocidad de respuesta de un oscilador simple con 5% de amortiguamiento.
1984	Zahrah y Hall	Definieron la duración como el intervalo entre los tiempos bajo la cual el 5% y el 75% de la energía impartida a la estructura es absorbida por histéresis y amortiguamiento; para ello, se requirió especificar el periodo, el amortiguamiento, la resistencia de fluencia y la ductilidad de la estructura. Esta técnica es una adaptación de la duración relevante.
1988	Xie y Zhang	Definieron una "duración práctica" la cual se asocia con el concepto de la duración acotada; el nivel del umbral impuesto (aceleración) es el parámetro que marca la fluencia en un sistema estructural de un grado de libertad con un determinado periodo y amortiguamiento.
1989	Mohraz y Peng	Hacen uso del concepto de la duración relevante, aplicando la definición de McCann y Shah (1979) a la respuesta de sistemas estructurales con frecuencia y amortiguamiento específicos.

En la determinación del nivel de daño que sufre una estructura ante el movimiento fuerte del terreno es muy importante tener conocimiento de su capacidad de disipar energía a través de un comportamiento no lineal, el cual dependerá de las características geométricas y de una adecuada resistencia sísmica.

La energía generada por el temblor (energía de entrada) se relaciona con el daño potencial acumulado del movimiento del terreno, y la energía histerética disipada por un sistema estructural es el parámetro de respuesta que se asocia con el daño estructural acumulado (Fajfar, 1996). En el cálculo de la energía se incorpora la influencia de la resistencia y la deformación, y se incluyen el efecto de la duración del movimiento fuerte del terreno. Con base en la relación existente entre la energía y el daño acumulado, diversos trabajos han sido desarrollados para determinar el nivel de daño de sistemas estructurales ante eventos sísmicos (Akiyama, 1985; Park y Ang, 1985; Loh y Ho, 1990; Akiyama y Kitamura, 1992; Coenza y Manfredi, 1992; Fajfar *et al.*, 1992; Krawinkler y Nassar, 1992).

La energía histerética disipada se emplea como el parámetro básico para representar el daño estructural acumulado, puesto que en ella se incluye el número y la magnitud de las incursiones inelásticas en forma acumulada que experimenta un sistema estructural al ser sometido a una excitación. De acuerdo con Fajfar *et al.* (1992), el daño estructural no depende solo de la demanda máxima que se presenta durante la historia del movimiento al ocurrir un temblor, sino que deben tomarse en cuenta el número de ciclos inelásticos al daño acumulado que resulta.

Es ahora cuando la estimación de la duración del movimiento fuerte del terreno toma otro enfoque, relacionándose con el número de ciclos inelásticos en los que se demanda la máxima energía histerética. En este trabajo, se propone un criterio en la que se establece la magnitud de la duración del movimiento a partir de la cuantificación de la energía histerética disipada por un sistema estructural. Por lo anterior, la energía histerética es una medida que se relaciona directamente con aquella duración en la que se disipa cierta cantidad de energía permitiendo un determinado daño en la estructura.

## 5.2 NÚMERO DE CICLOS INELÁSTICOS Y PERIODO PROMEDIO

Zahrah y Hall (1984) definieron un número de ciclos equivalentes ( $N$ ) como la relación de la energía histerética total disipada por unidad de masa de un sistema de un grado de libertad sometido a un sismo ( $E$ ) con respecto al área bajo la curva monótonica resistencia-desplazamiento representado por el mismo desplazamiento máximo ( $D_m$ ) y la resistencia de fluencia ( $F_y$ ) resultado de la excitación real. De esta manera, la expresión puede ser escrita de la siguiente forma:

$$N = \frac{E}{(F_y/m) D_y (\mu - 1)} \quad (5.1)$$

donde:

$E$	Energía histerética total disipada por unidad de masa
$F_y$	Resistencia de fluencia
$D_y$	Desplazamiento de fluencia
$m$	Masa del sistema
$\mu$	Ductilidad máxima resultado de la excitación real

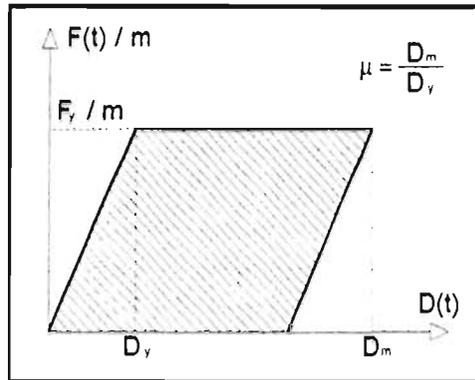
El valor de la energía total disipada se determina analíticamente proponiendo algunos modelos histeréticos que se describirán posteriormente. La figura 5.1 representa el valor del denominador de la ecuación 5.1 mediante el área sombreada.

En este trabajo, se propone una expresión semejante a la ecuación 5.1, pero cuyo denominador representa un ciclo histerético completo en la gráfica resistencia-desplazamiento, respetando el mismo desplazamiento máximo y la resistencia de fluencia que se derivan de la excitación. Este último criterio define un nuevo valor para el número de ciclos inelásticos, el cual se establece mediante la siguiente expresión:

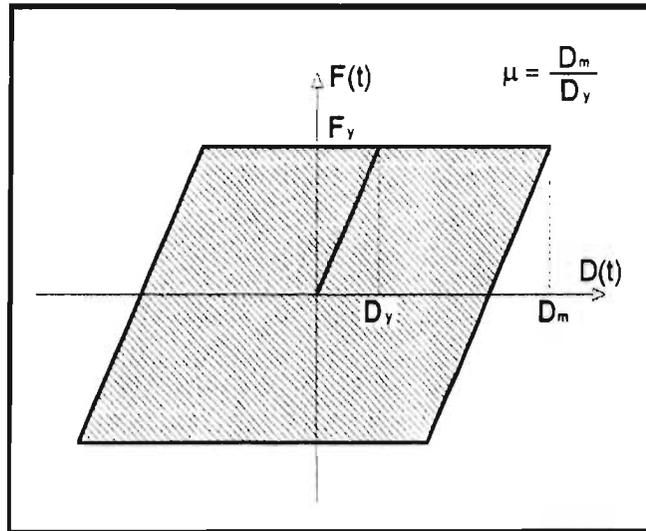
$$N = \frac{E_H}{4 F_y D_y (\mu - 1)} \quad (5.2)$$

La descripción de los parámetros en la ecuación 5.2 se define de la misma forma que para la ecuación 5.1, a reserva de que solo la expresión 5.1 está en función de la masa. La figura 5.2 muestra esquemáticamente el valor del denominador de la ecuación 5.2

mediante el área sombreada. Como se observa en la figura 5.2, la nueva área que define el ciclo completo es 4 veces mayor a la propuesta por Zahrah y Hall. Considerando la expresión 5.2 como una alternativa más para la estimación del número de ciclos inelásticos, los análisis que se realizan para el desarrollo de este capítulo se apoyan sobre esta ecuación propuesta.



**Figura 5.1** Criterio de Zahrah y Hall (1984) para definir el número de ciclos equivalentes



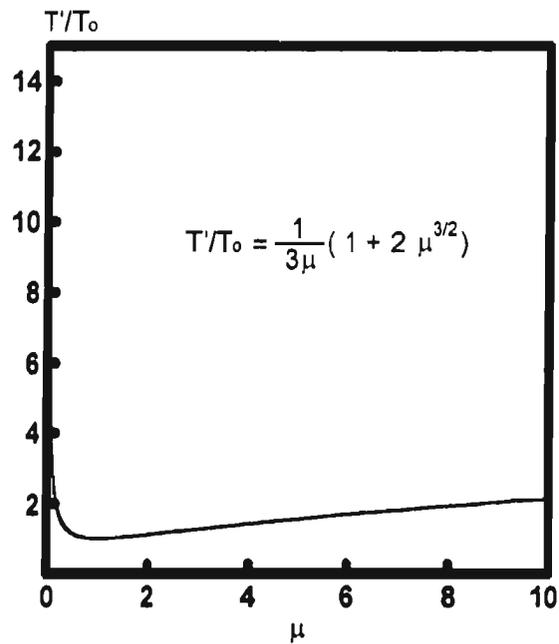
**Figura 5.2** Criterio que define el denominador de la ecuación 5.2

Para representar la duración del ciclo completo de la figura 5.2, se propone un periodo promedio ( $T'$ ) correspondiente a una excitación con una amplitud determinada que

generaría tal comportamiento. La expresión que define el valor de la variable mencionada anteriormente es la siguiente (Newmark y Rosenblueth, 1971):

$$T' = \frac{1}{3\mu} (1 + 2\mu^{3/2}) T_0 \quad (5.3)$$

donde  $T_0$  es el periodo elástico de un sistema estructural, en segundos. Cuando la ductilidad máxima es igual a 1 en la expresión 5.3, el periodo promedio es igual al periodo elástico del sistema. La figura 5.3 muestra la variación del cociente  $T'/T_0$  con respecto a la ductilidad máxima.



**Figura 5.3** Variación entre la relación  $T'/T_0$  y la ductilidad máxima (ecuación 5.3)

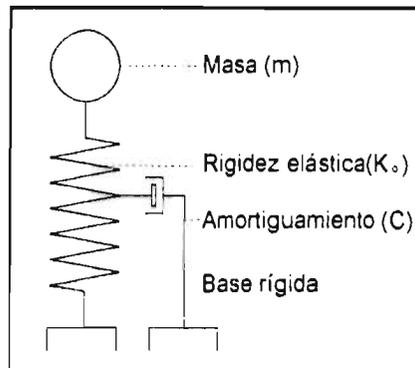
Una vez obtenido el número de ciclos inelásticos y la duración por ciclo a partir de las ecuaciones 5.2 y 5.3, respectivamente, podemos estimar la duración del movimiento ( $T$ ) mediante el siguiente producto:

$$T = N T' \quad (5.4)$$

### 5.3 MÉTODO DE ANÁLISIS

#### 5.3.1 SISTEMA ESTRUCTURAL

Aunque puede llevarse a cabo un análisis complejo para obtener el comportamiento sísmico de un sistema de múltiples grados de libertad que represente con más exactitud una estructura real de n niveles, los tiempos de cálculo pueden ser muy grandes y ellos asociados a las incertidumbres que se obtendrían en los resultados finales.



**Figura 5.4** Sistema estructural de un grado de libertad

Los análisis pueden realizarse con los sistemas más simples dentro de la dinámica estructural como el sistema estructural de un grado de libertad cuyos resultados pueden ser suficientes para realizar interpretaciones válidas. La demanda de energía en un sistema de múltiples grados de libertad, incluyendo la energía histerética, puede evaluarse a partir de la demanda de energía de un sistema de un grado de libertad (Rodríguez, 1994). Una representación esquemática del sistema estructural de un grado de libertad se muestra en la figura 5.4.

#### 5.3.2 MÉTODO NUMÉRICO PARA RESOLVER LA ECUACIÓN DEL MOVIMIENTO

La ecuación diferencial básica del movimiento está dada por la siguiente expresión (Chopra, 1995):

$$\ddot{D}(t) + 2 \zeta \omega \dot{D}(t) + \frac{F(t)}{m} = -\ddot{D}_g(t) \quad (5.5)$$

donde:

$\ddot{D}(t)$	Aceleración relativa en el tiempo t
$\dot{D}(t)$	Velocidad relativa en el tiempo t
$\zeta$	Fracción del amortiguamiento crítico
$\ddot{D}_g(t)$	Aceleración del terreno en el tiempo t
$F(t)$	Fuerza restauradora del sistema en el tiempo t
$\omega$	Frecuencia circular no amortiguada del sistema
m	Masa del sistema

La ecuación 5.5 se resuelve a partir del método paso a paso Beta de Newmark (Newmark, 1959), asignando como constantes  $\beta = 1/6$  y  $\gamma = 1/2$  dentro del método. La frecuencia circular del sistema está definida por  $\omega = (K_o / m)^{1/2}$ , donde  $K_o$  y m son la rigidez elástica y la masa respectivamente; la relación entre dicha frecuencia y el periodo del sistema está dada por  $\omega = 2\pi / T_o$ . El criterio para definir el incremento constante del tiempo en la integración numérica se toma como 1/20 de  $T_o$  ó del diferencial en el tiempo a la que se haya registrado la excitación que se vaya a analizar, lo que resulte menor.

### 5.3.3 REGISTRO ACELEROMÉTRICO

Se analiza el registro que se obtuvo en la estación acelerométrica de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en la ciudad México, para el gran temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985.

**Tabla 5.2** Datos del acelerograma seleccionado

Lugar de registro	Estación	Componente	$A_{max}$ (gal)	Duración total (s)
SCT	SC	EW	168	163.42

La tabla 5.2 indica algunas características del registro seleccionado y en la figura 5.5 se presenta gráficamente el acelerograma; en esta última también se muestra la fecha y la magnitud del evento.

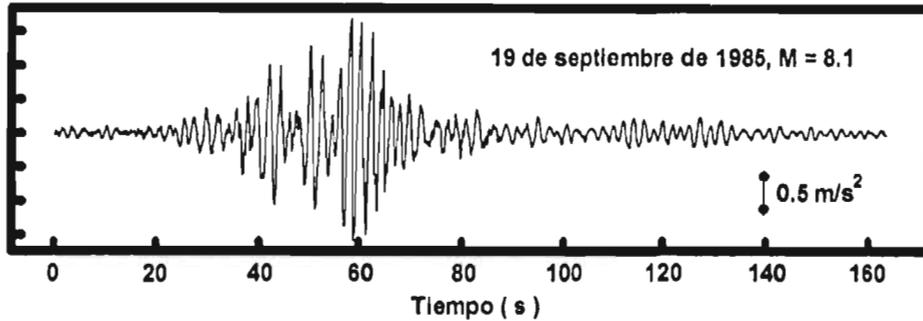


Figura 5.5 Registro obtenido en la SCT en la ciudad de México, componente este-oeste

### 5.3.4 MODELOS HISTERÉTICOS

El valor de la energía histerética disipada ( $E_H$ ) y la ductilidad máxima ( $\mu$ ) experimentada por un sistema de un grado de libertad cuando es sometido a una excitación en su base, se obtiene con la ayuda de modelos histeréticos.

En este trabajo se analizan dos modelos: Elastoplástico (a partir de un modelo bilineal general) y de Takeda (Takeda *et al.*, 1970). Este último modelo se limita a simular un comportamiento dominado por la resistencia a flexión de elementos de concreto reforzado (Otani *et al.*, 1993).

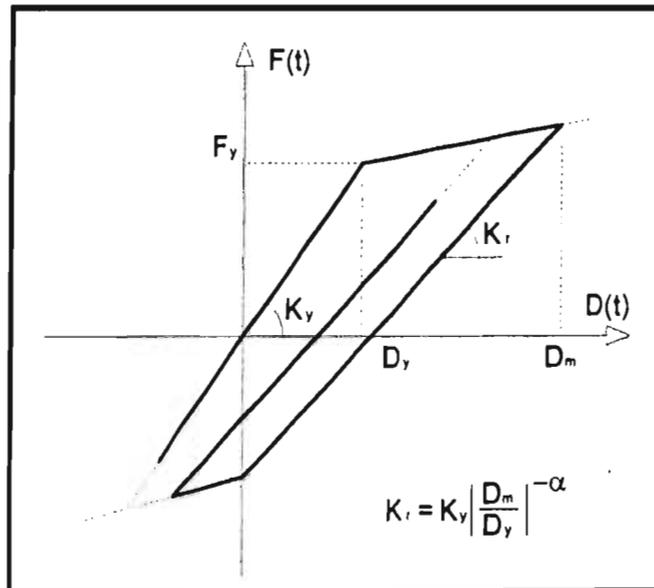


Figura 5.6 Modelo bilineal general con degradación (Nielsen e Imbeault, 1971)

El modelo bilineal general se utilizó ampliamente en los primeros cálculos de análisis dinámicos no lineales; se emplea una rigidez inicial para cargar y descargar en un rango elástico, y una rigidez postfluencia para cargar después de la fluencia. Atendiendo a la figura 5.6, el modelo bilineal general con degradación reduce la rigidez de descarga ( $K_r$ ) de acuerdo con un desplazamiento máximo previo ( $D_m$ ). La expresión que define este criterio es la siguiente (Nielsen e Imbeault, 1971):

$$K_r = K_y \left| \frac{D_m}{D_y} \right|^{-\alpha} \quad (5.6)$$

donde:

- $K_r$  Rigidez de descarga postfluencia
- $K_y$  Rigidez elástica inicial =  $K_o$
- $D_m$  Desplazamiento máximo previo a la descarga postfluencia
- $\alpha$  Parámetro de degradación de rigidez ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )

Por otra parte, la figura 5.7 muestra esquemáticamente el comportamiento histerético del modelo de Takeda, así como los parámetros que intervienen en él. La rigidez de descarga está dado por la siguiente expresión:

$$K_r = \frac{F_c + F_y}{D_c + D_y} \left| \frac{D_m}{D_y} \right|^{-\alpha} \quad (5.7)$$

donde:

- $F_c$  Resistencia de ruptura
- $D_c$  Desplazamiento que define el inicio de la ruptura

Asimismo, el modelo de Takeda proporciona un comportamiento con las características siguientes:

- a) La rigidez cambia en puntos límites de ruptura y de fluencia
- b) Propone reglas de histéresis para ciclos internos
- c) Degradación de la rigidez de descarga en función de la deformación

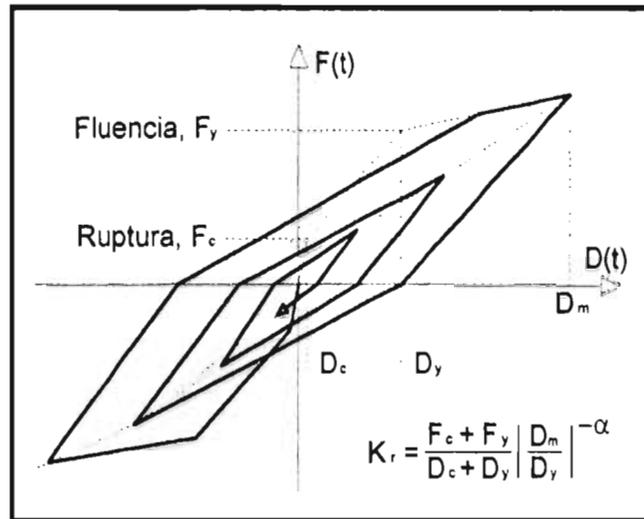


Figura 5.7 Modelo histérico de Takeda (Takeda *et. al.*, 1970)

A partir de los modelos histéricos es posible calcular diferenciales de área bajo la curva resistencia-desplazamiento para cada intervalo del tiempo; la acumulación de los diferenciales de área corresponde precisamente a la energía histérica total disipada al final de la excitación. Dentro de esa misma curva, también se puede obtener el valor de la ductilidad máxima.

Los dos parámetros mencionados en el párrafo anterior pueden calcularse con ayuda de las siguientes expresiones:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{(F_{i+1} + F_i)(D_{i+1} - D_i)}{2} \quad (5.8)$$

$$\mu = \frac{D_m}{D_y} \quad (5.9)$$

donde:

- $F_{i+1}, F_i$  Resistencia final e inicial en un intervalo del análisis
- $D_{i+1}, D_i$  Desplazamiento final e inicial en un intervalo del análisis
- $n$  Número de pasos en el análisis

### 5.3.5 PROPIEDADES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL Y MODELOS HISTERÉTICOS

El análisis consiste en determinar la duración del movimiento, planteada en la ecuación 5.3, para un determinado sistema estructural de un grado de libertad con características conocidas: periodo elástico ( $T_o$ ) y resistencia de fluencia ( $F_y$ ). Para obtener varios resultados de la duración, se varía la magnitud de los parámetros  $T_o$  y  $F_y$ , mientras se mantienen sin cambio otras variables como son: la masa ( $m$ ) y el porcentaje de amortiguamiento crítico ( $\zeta$ ) del sistema estructural.

Se propone un valor del 5% como porcentaje de amortiguamiento crítico, tomándose como modelo de amortiguamiento viscoso aquel en la cual el amortiguamiento es proporcional a la masa (Fajfar *et al.*, 1993):

$$C = 2 \zeta \omega m \quad (5.10)$$

donde  $C$  representa el coeficiente de amortiguamiento viscoso. La rigidez de fluencia ( $K_y$ ), mostrada en la figura 5.8, se propone igual al valor equivalente de la rigidez elástica inicial ( $K_o$ ), el cual está dado por la siguiente expresión:

$$K_y = K_o = m \left[ \frac{2 \pi}{T_o} \right]^2 \quad (5.11)$$

La resistencia de fluencia ( $F_y$ ) se establece en términos del peso total del sistema estructural de un grado de libertad ( $W$ ):

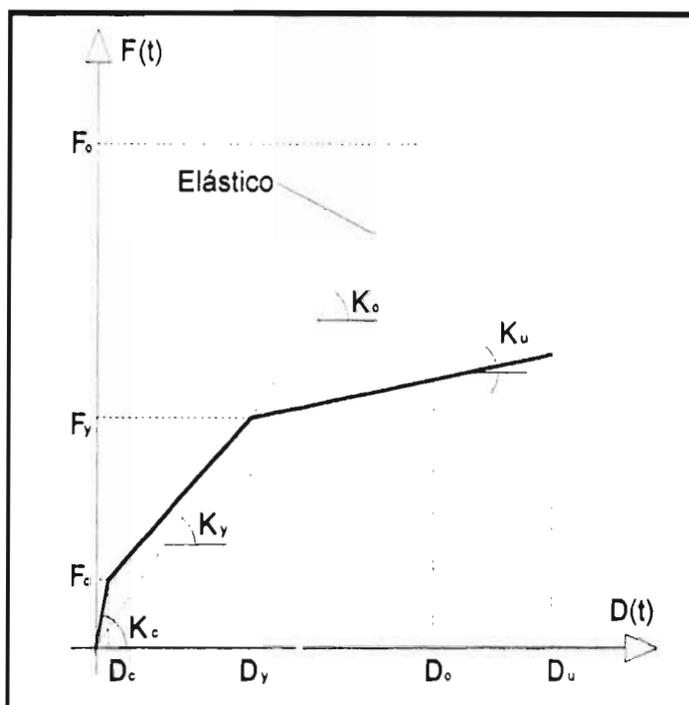
$$F_y = C_s W \quad (5.12)$$

donde  $C_s$  es el coeficiente sísmico basal. La tabla 5.3 muestra los valores extremos del periodo elástico del sistema estructural y del coeficiente sísmico basal, empleados para llevar a cabo los análisis. El incremento en el valor de  $T_o$  y  $C_s$  (a partir sus valores iniciales) es de 0.05 s y 0.01, respectivamente; por cada combinación de esos valores, se puede obtener un par de resultados correspondientes al número de ciclos inelásticos ( $N$ ) y a la duración del movimiento fuerte del terreno ( $T$ ).

**Tabla 5.3** Valores extremos de  $T_o$  y  $C_s$

Parámetro del sistema	Símbolo	Valor inicial	Valor final
Periodo elástico	$T_o$	0.05 s	4.00 s
Coefficiente sísmico basal	$C_s$	0.01	1.0

Por otra parte, para lograr un comportamiento elastoplástico, que representa un caso particular del modelo bilineal general, los valores de  $\alpha$  y de la rigidez postfluencia se proponen iguales a cero. De esta manera, se establecen las primeras condiciones para uno de los modelos a empleados en este trabajo.



**Figura 5.8** Propiedades para un sistema estructural de un grado de libertad (Otani *et al.*, 1993)

De acuerdo con el comportamiento a flexión de elementos de concreto reforzado y apoyados en la figura 5.8, las propiedades comunes del modelo histérico de Takeda se establecen de la siguiente forma (Otani *et al.*, 1993): la rigidez postfluencia ( $K_u$ ) se propone como un 10% de la rigidez de fluencia; se define el valor de la rigidez de un sistema sin agrietamiento ( $K_c$ ) como 2 veces la magnitud de la rigidez de fluencia, y la

resistencia de ruptura ( $F_c$ ) se supone como la tercera parte de la resistencia de fluencia ( $F_y$ ).

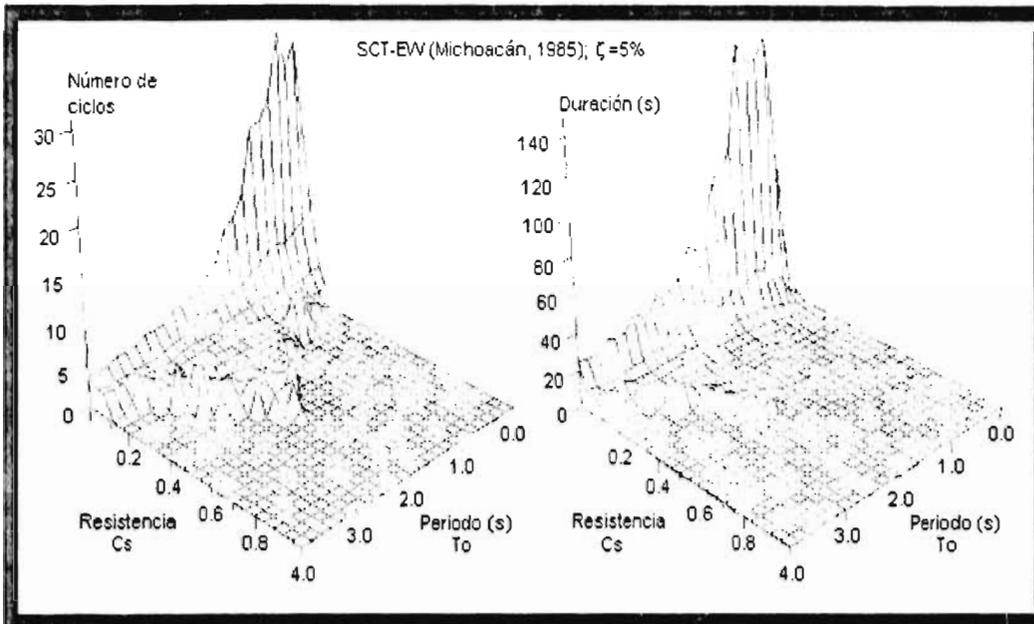
#### **5.4 ESPECTROS DE RESPUESTA NO LINEALES**

Con el apoyo de algunos programas de cómputo, se procede a dar solución a la ecuación diferencial del movimiento; en forma alterna, se calcula la magnitud de la energía histerética disipada ( $E_H$ ) y la ductilidad máxima ( $\mu$ ) que se derivan del comportamiento inelástico de un sistema estructural de un grado de libertad con características definidas ( $T_o$  y  $C_s$ ). Posteriormente, se estima el número de ciclos inelásticos ( $N$ ) y la duración del movimiento ( $T$ ) para ese sistema estructural.

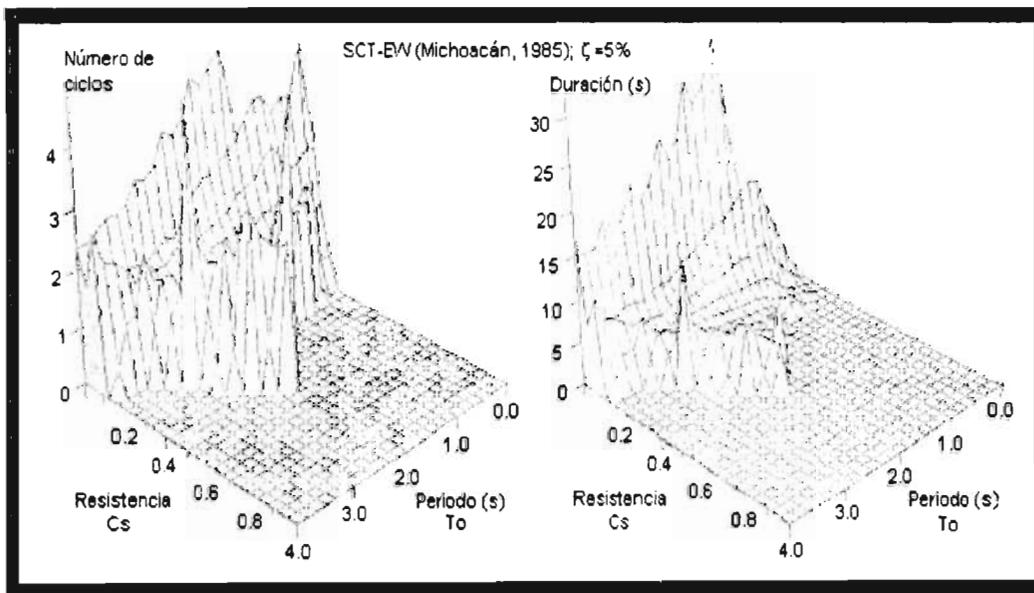
Con base en el seguimiento planteado en el párrafo anterior, se analiza el comportamiento no lineal para una serie de sistemas estructurales con características diversas, generando así las gráficas tridimensionales mostradas en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11; estas gráficas se nombran como espectros de respuesta no lineales del número de ciclos y de la duración del movimiento. De acuerdo con estas figuras, para cualquier sistema estructural de un grado de libertad situado en un lugar específico de la zona de lago de la ciudad de México, es posible estimar el comportamiento inelástico con solo conocer algunas de sus características (periodo elástico y resistencia sísmica); tal comportamiento se refleja en términos del número de ciclos inelásticos y la duración del movimiento.

Es importante mencionar que los espectros de respuesta no lineales mostrados en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, se limitan a representar el comportamiento inelástico de sistemas estructurales de un grado de libertad analizados en un lugar específico (SCT, zona de lago del valle de México) y los cuales se sometieron a un determinado movimiento basal (registro correspondiente al sismo de Michoacán de 1985), por lo que no es conveniente generalizar los resultados obtenidos, para ser aplicados en otros sitios.

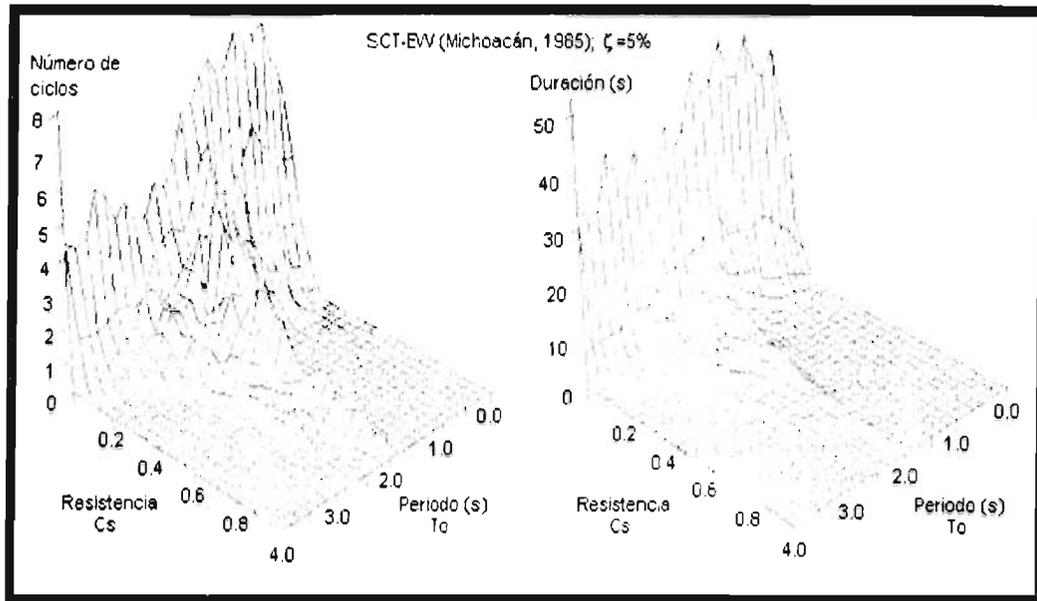
De acuerdo con las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, para aquellos sistemas estructurales de un grado de libertad que poseen un periodo elástico cercano al periodo dominante del sitio ( $T_o=2.0$  s para el lugar donde se ubica la estación acelerométrica SC), experimentan incursiones inelásticas con más frecuencia que para otros periodos.



**Figura 5.9** Espectros de respuesta no lineales del número de ciclos y de la duración del movimiento. Modelo histérico empleado: Takeda; considerando el valor del parámetro de degradación de rigidez ( $\alpha$ ) igual a cero



**Figura 5.10** Espectros de respuesta no lineales del número de ciclos y de la duración del movimiento. Modelo histérico empleado: Takeda; considerando el valor del parámetro de degradación de rigidez ( $\alpha$ ) igual a 0.5



**Figura 5.11** Espectros de respuesta no lineales del número de ciclos y de la duración del movimiento. Modelo histerético empleado: elastoplástico

Por otra parte, se observa en las gráficas tridimensionales que la magnitud del número de ciclos inelásticos, así como el de la duración del movimiento, presentan una tendencia a incrementarse a razón que disminuye la resistencia del sistema estructural, para cualquier periodo elástico; inclusive, el número de ciclos y la duración llegan a crecer en forma importante cuando el valor de la resistencia se aproxima a cero. Este comportamiento está presente en todas las gráficas tridimensionales mostradas en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, indicando con ello que estructuras con poca resistencia tendrán más incursiones inelásticas.

Haciendo referencia con el modelo histerético empleado, se observan diferencias apreciables tanto en los resultados obtenidos del número de ciclos como para aquellos que definen la duración del movimiento, según se indica en las gráficas presentadas en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11. Mientras que para los espectros generados a partir del Modelo de Takeda, marcan un límite de incursionamiento inelástico para sistemas estructurales con resistencias del orden de  $C_s=0.4$  (para ambos casos de degradación de rigidez), en el modelo elastoplástico se presenta un comportamiento de no linealidad aún para sistemas que poseen resistencias cercanas a  $C_s=1.0$ , es decir, con resistencias equivalentes al

peso del sistema estructural; lo anterior es válido si se toman en cuenta aquellos sistemas estructurales de un grado de libertad cuyo periodo se encuentra cerca del periodo dominante del terreno ( $T_s=2.0$  s). Todas estas diferencias mencionadas, se atribuyen en parte al estrechamiento que experimenta el área histerética en el modelo de Takeda por efecto de la degradación de la rigidez, lo cual no sucede con el modelo elastoplástico analizado; asimismo, la presencia de una rigidez previa al agrietamiento ( $K_c$ ) en el modelo histerético de Takeda, es un factor que influye en el incursionamiento inelástico del sistema, haciéndolo en algunos casos menos susceptible a entrar a una etapa de no linealidad.

Realizando otras comparaciones, las figuras 5.9 y 5.10 muestran algunas diferencias entre los valores del número de ciclos y de la duración del movimiento para un mismo modelo histerético empleado, principalmente cuando el valor de la resistencia del sistema estructural se aproxima a cero; esto indica que la variación del coeficiente de degradación de rigidez del modelo de Takeda ( $\alpha$ ) tiende a influir más sobre sistemas estructurales que presentan resistencias mucho menores.

En este capítulo, se presentó otra manera de estimar el valor de la duración del movimiento; se emplea un enfoque distinto al planteado en las expresiones 2.3 y 3.3 (capítulos II y III). Al estimar la magnitud de la duración con la ecuación 3.3, se muestran diferencias importantes con respecto a los resultados obtenidos a partir de los espectros de respuesta no lineales de la duración del movimiento (figuras 5.9, 5.10 y 5.11); esta observación realizada toma como referencia el temblor de Michoacán de 1985 y el sitio donde se ubica la estación acelerométrica SC en la ciudad de México (zona de lago). Dadas las condiciones anteriores, la expresión 3.3 estima un valor aproximado de 140 s (tabla 4.2 del capítulo IV) con solo conocer algunas variables: la magnitud del sismo estudiado, la distancia a la fuente sísmica y el periodo dominante del sitio de interés; este resultado es independiente de las características que presente cualquier estructura ubicada en el lugar mencionado. Por otra parte, los espectros de respuesta no lineales de la duración del movimiento arrojan una serie valores (figuras 5.9, 5.10 y 5.11) lo cual obliga a especificar previamente el periodo elástico y la resistencia sísmica de la estructura, modelada esta última como un oscilador de un grado de libertad, y suponiendo además el porcentaje del amortiguamiento viscoso (5%). De acuerdo con los espectros

de respuesta no lineales de la duración del movimiento, los resultados de la duración son muy inferiores con respecto al valor estimado con la ecuación 3.3. Por lo anterior, se piensa que la duración derivada de las gráficas tridimensionales de las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 es una fracción de tiempo que se incluye dentro de aquella duración definida a partir de la expresión 3.3; asimismo, representaría el lapso en la que una estructura sufre los daños más importantes (asociado con un comportamiento inelástico). Dado que las máximas amplitudes de la aceleración del terreno se contemplan dentro del tiempo calculado por la ecuación 3.3, la fracción de tiempo que se obtiene con los espectros de respuesta no lineales podría relacionarse con ese intervalo en donde ocurren las máximas demandas del movimiento.

Con el trabajo desarrollado en este capítulo, se propuso sustituir el concepto de la energía histerética por otra cantidad que ayudara a explicar y representar en forma más simple el comportamiento no lineal de una estructura, asociándola al mismo tiempo con el grado de daño que pudiera sufrir ante un sismo intenso. Bajo este contexto, la duración del movimiento resulta ser una buena opción y se define como el lapso en que ocurre la etapa inelástica de un sistema estructural de un grado de libertad al someterse a un temblor.

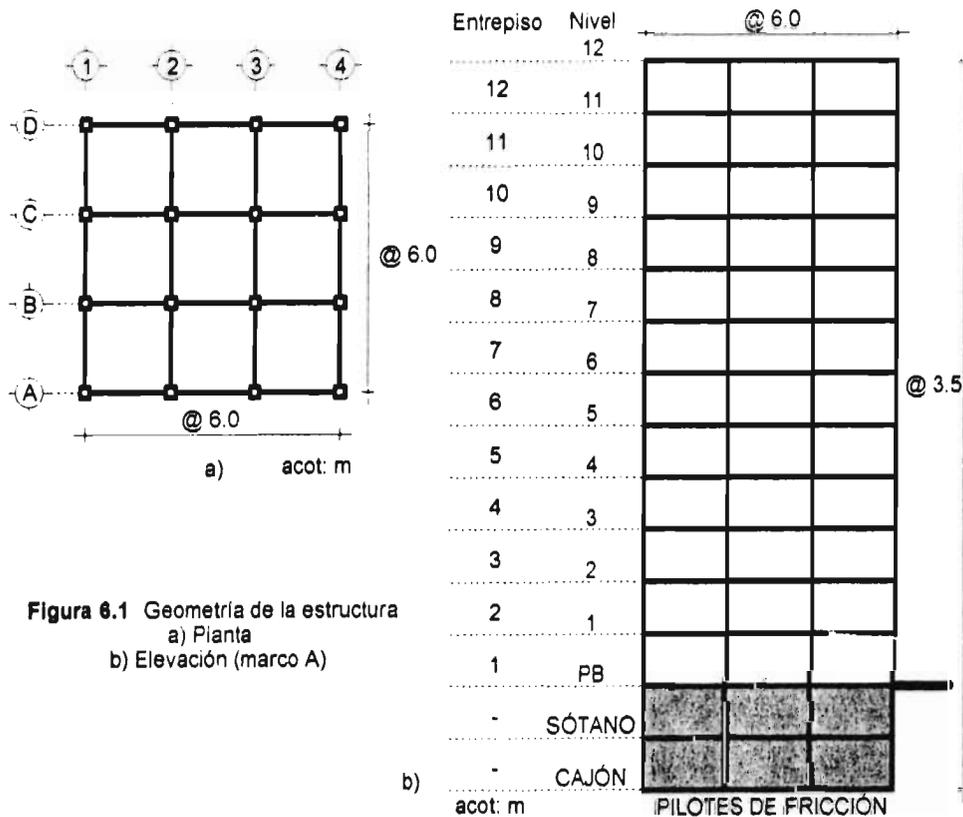
## CAPÍTULO VI

### LA DURACIÓN DEL MOVIMIENTO Y EL DAÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO DE 12 NIVELES DE CONCRETO REFORZADO

#### 6.1 CONCEPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

##### 6.1.1 ESTRUCTURACIÓN Y GEOMETRÍA

El sistema propuesto está formado de una estructura de concreto reforzado a base de trabes y columnas. Consiste de un sistema de 12 niveles, un sótano, un cajón de cimentación y pilotes de fricción; a su vez se forma por 4 marcos de 3 crujeías con claros libres de 6 m en ambas direcciones ortogonales entre sí. Con fines de ejemplificar el análisis estructural del edificio se proponen claros libres de 6 m, aunque este valor sea pequeño para representar un caso realista. La altura de los entrepisos es constante e igual a 3.5 m. La figura 6.1 muestra esquemáticamente el edificio en planta y elevación.



**Figura 6.1** Geometría de la estructura  
a) Planta  
b) Elevación (marco A)

El sistema de piso está formado por una losa plana de concreto armado de 12 cm de espesor y, dada la regularidad en planta, se supone una distribución uniforme de la masa, despreciando la excentricidad rotacional.

Los elementos no estructurales, como son los muros divisorios, se consideran desligados de la estructura principal, aunque se toman como parte en la definición de las especificaciones de carga con un valor estimado de 100 kg/m<sup>2</sup>.

### 6.1.2 ANÁLISIS ELÁSTICO DE LA ESTRUCTURA

Se establece que el edificio está localizado sobre la zona de lago de la ciudad de México, y se destina a oficinas. De acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF, Arnal y Betancourt *et al.*, 1991) correspondería a una estructura tipo B construido sobre la zona III. El edificio se analiza con el método estático propuesto en las Normas Técnicas Complementarias para Sismo (NTCS) del mencionado reglamento, con un coeficiente de 0.4 sin reducir y un factor de comportamiento sísmico (Q) igual a 4. El cálculo de las cargas gravitacionales y las masas correspondieron a una especificación de cargas muertas y vivas señaladas en la tabla 6.1.

**Tabla 6.1** Valores empleados para cargas muertas y vivas

<b>CARGAS MUERTAS (kg/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>ENTREPISO</b>	<b>AZOTEA</b>
530	450
<b>CARGAS VIVAS (kg/m<sup>2</sup>)</b>	
<b>ENTREPISO</b>	<b>AZOTEA</b>
180	70

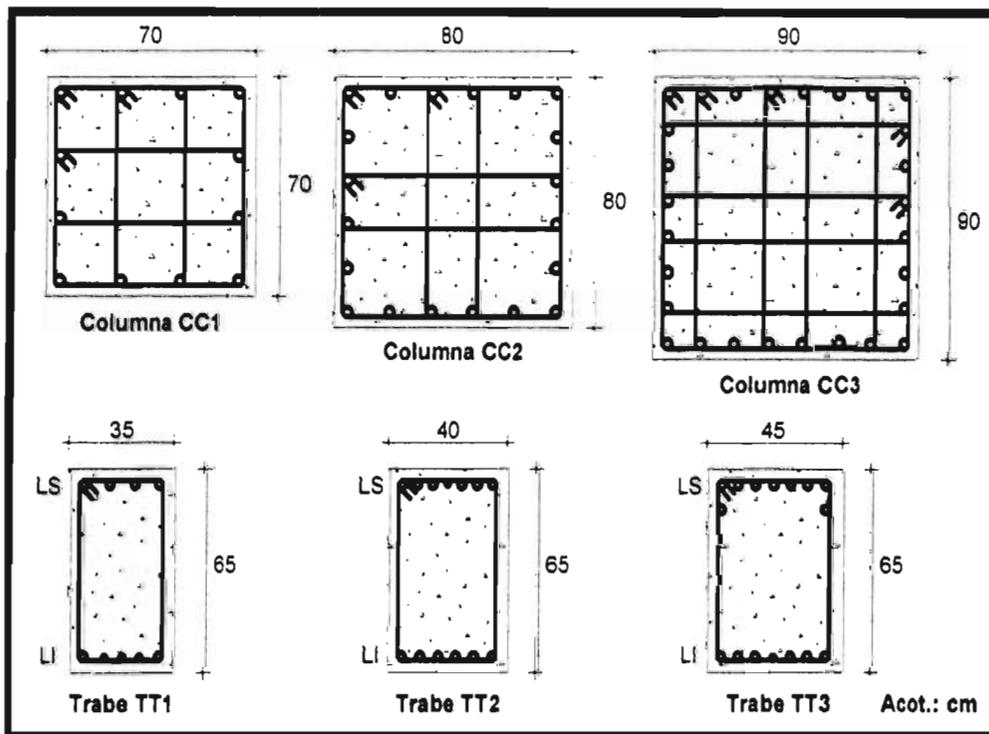
Para el cálculo de los elementos mecánicos en las trabes, el edificio se modeló en el programa SAP90 (Wilson y Habibullah, 1988) como un marco plano empotrado en su base. Para considerar en un análisis plano, el efecto tridimensional y la torsión accidental que marcan las NTCS, mediante equilibrio estático se determinó la constante por la que

se multiplicaron las fuerzas horizontales debidas al sismo que le correspondían a un marco exterior.

Los tamaños propuestos de columnas y traveses fueron los necesarios para que las deformaciones laterales de entrepiso debidas a la fuerza cortante resultaran no mayores que 0.012 veces la altura de entrepiso de acuerdo con el RCDF.

### 6.1.3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Se procedió al diseño de las traveses apoyándose en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Concreto (NTCEC) del RCDF, en su parte de marcos dúctiles.



**Figura 6.2** Dimensiones y distribución del armadura en elementos estructurales

Las columnas se diseñaron a flexocompresión en ambas direcciones (100% del momento en una dirección y 30% en la dirección perpendicular) y con una carga axial de diseño

igual a la gravitacional que le correspondía por área tributaria para cada una, más la suma del cortante sísmico de las trabes.

La figura 6.2 muestra las dimensiones y la distribución de los armados finales en los elementos estructurales. La tabla 6.2 proporciona algunas características de las secciones transversales de trabes y columnas. Las resistencias a compresión del concreto y nominal a la fluencia del acero fueron de 250 kg/cm<sup>2</sup> y de 4200 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

**Tabla 6.2** Características generales de las secciones transversales de trabes y columnas

ELEMENTO	SECCIÓN (cm)	ARMADO	CUANTÍA $\rho$	ESTRIBOS (sep. en cm)	ENTREPISO	NIVEL
CC1	70 x 70	12 # 10	0.0194	# 4 @ 10	9 - 12	-
CC2	80 x 80	20 # 10	0.0247	# 4 @ 10	5 - 8	-
CC3	90 x 90	28 # 10	0.0273	# 4 @ 10	1 - 4	-
TT1	35 x 65	(LS) 4 # 8 (LI) 2 # 8 y 3 # 6	0.0097 0.0089	# 3 @ 10	-	9 - 12
TT2	40 x 65	(LS) 6 # 8 y 1 # 6 (LI) 6 # 8	0.0139 0.0127	# 3 @ 7	-	5 - 8
TT3	45 x 65	(LS) 7 # 8 y 2 # 4 (LI) 6 # 8 y 1 # 6	0.0141 0.0139	# 3 @ 6	-	1 - 4

Entre las características dinámicas del edificio, se obtuvo una estimación del periodo fundamental de vibración bajo dos criterios: con base rígida y con interacción suelo-estructura. De este último, se propuso un piso ficticio en la base del cajón de cimentación, con propiedades calculadas a partir del apéndice 7 de las NTCS, considerando una profundidad del estrato arcilloso (H) dentro del valle de México de 40m y un periodo dominante del terreno ( $T_s$ ) igual a 2.0 s. El programa ETABS (Wilson y Habibullah, 1989) se empleó para el cálculo de dichos periodos, considerando las secciones brutas de los elementos estructurales; los valores fueron de 1.26 s y 1.38 s para las condiciones de base rígida e interacción suelo-estructura, respectivamente.

## 6.2 RESPUESTA INELÁSTICA

Procediendo a modelar la estructura para un análisis inelástico, considerando la interacción suelo-estructura a partir del criterio del piso ficticio mencionado, se utilizó el programa de cómputo IDARC2D (Valles *et al.*, 1996), el cual permite realizar un análisis

inelástico paso a paso. Entre los resultados finales que puede proporcionar el programa, se incluye una evolución de la respuesta inelástica en el tiempo a través de un estudio de daño tanto para elementos estructurales individuales como para un nivel global de la estructura. Con lo anterior, es posible obtener el daño de la estructura en cada instante del tiempo que sea de interés.

El criterio para evaluar el daño en cada uno de los elementos que componen a la estructura, se apoya en el modelo modificado del índice de daño de Park y Ang (Kunnath *et al.*, 1992) y cuyo valor se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$DI = \frac{\theta_m - \theta_r}{\theta_u - \theta_r} + \frac{\beta}{M_y \theta_u} E_H \quad (6.1)$$

donde:

$DI$	Índice de daño modificado
$\theta_m$	Rotación máxima alcanzada durante la historia de cargas
$\theta_u$	Capacidad última de rotación de la sección
$\theta_r$	Rotación recuperable a la descarga
$M_y$	Momento de fluencia
$E_H$	Energía disipada en la sección
$\beta$	Constante del modelo se interpreta como un parámetro que controla el deterioro de resistencia como función de la energía disipada, asignado como un valor de 0.1 para un deterioro nominal (Park <i>et al.</i> , 1987)

Para evaluar el daño global, el programa recurre a otras expresiones adicionales:

$$DI_{pliso} = \sum (\lambda_i)_{elemento} (DI_i)_{elemento} ; (\lambda_i)_{elemento} = \left[ \frac{E_i}{\sum E_i} \right]_{elemento} \quad (6.2)$$

$$DI_{global} = \sum (\lambda_i)_{pliso} (DI_i)_{pliso} ; (\lambda_i)_{pliso} = \left[ \frac{E_i}{\sum E_i} \right]_{pliso} \quad (6.3)$$

donde  $\lambda_i$  es un factor dependiente de la energía disipada y  $E_i$  es la energía total disipada por el elemento o piso "i". La tabla 6.3 muestra la interpretación del índice de daño global para el modelo modificado de Park y Ang (Park *et al.* 1986).

**Tabla 6.3** Interpretación del índice de daño global (Park *et al.* 1986)

ÍNDICE DE DAÑO	GRADO DE DAÑO	ESTADO DE DAÑO	CONDICIÓN DE USO	APARIENCIA
0.00	Ninguno	Sin daño	Funcional	No hay deformaciones y sin agrietamientos
0.20-0.30	Ligero	Pocos daños	Temporamente funcional	Agrietamientos moderados a severos
0.50-0.60	Menor Moderado	Daño reparable	Temporamente funcional	Expulsión del recubrimiento
> 1.00	Severo	Sin reparación	No funcional	Pandeo del acero y exposición del núcleo confinado
	Colapso	Colapso	No funcional	Pérdida de la capacidad a cortante y carga axial

Las siguientes condiciones se establecen para el uso del programa IDARC2D:

- a) Se realiza el análisis a un marco plano debido a las limitaciones que se tiene del programa IDARC2D para esta condición. El marco analizado es el exterior correspondiente al eje A de la figura 6.1.
- b) Una vez que se cuenta con las dimensiones y armados finales para los elementos estructurales, es necesario calcular el diagrama momento-curvatura para obtener su capacidad resistente. Este diagrama puede calcularse con base en un algoritmo que consiste en discretizar la sección transversal del elemento estructural en pequeñas fibras y fijando una curvatura, considerando la compatibilidad de deformaciones, se determina la deformación en cada fibra. Teniendo como datos las curvas esfuerzo-deformación de los materiales, se obtienen las fuerzas internas de la sección, las cuales deberán cumplir el equilibrio de la misma; una vez conseguido ese equilibrio, se calcula el momento correspondiente. El proceso se repite tantas veces como curvaturas se propongan hasta que ocurre cierta condición de falla en la sección (Rodríguez y Montoya, 1990). Algunas hipótesis contempladas en el desarrollo del algoritmo se describen a continuación:
  - Las secciones planas permanecen planas después de aplicado el momento.
  - La resistencia a tensión del concreto es ignorada.
  - Existe adherencia perfecta entre concreto y acero de refuerzo.
  - El valor de la carga axial es constante.

- Se conoce la curva esfuerzo-deformación del concreto (Scott *et al.*, 1982)
  - Se conoce la curva esfuerzo-deformación del acero (Rodríguez y Botero, 1996).
- A partir de esos diagramas momento-curvatura, se definen los puntos de capacidad (**M**) y curvatura ( $\phi$ ) para los estados de agrietamiento (*cr*), fluencia (*y*) y último (*u*) de cada elemento.

c) Ya que el programa no maneja la variación de carga axial por sismo a través de algún diagrama carga axial-momento y dado que el análisis que lleva a cabo el programa IDARC2D asigna, para cada diagrama momento-curvatura, un valor constante de carga axial, se define el cambio de capacidad a momento en función de la deformación como la condición más crítica de carga axial, resultando que la condición a compresión es la más importante en las columnas. Para las traveses la condición de carga axial se desprecia.

T01				
T01	C01	C02	C02	C01
T01	C03	C04	C04	C03
T01	C05	C06	C06	C05
T02	C07	C08	C08	C07
T02	C09	C10	C10	C09
T02	C11	C12	C12	C11
T02	C13	C14	C14	C13
T03	C15	C16	C16	C15
T03	C17	C18	C18	C17
T03	C19	C20	C20	C19
T03	C21	C22	C22	C21
PB	C23	C24	C24	C23
SÓTANO				
CAJÓN				

C - Columna                      T - Trabe

**Figura 6.3** Nomenclatura para asignar las propiedades indicadas en la tabla 6.4

CLAVE	ELEMENTO	C. AXIAL (kg)	SIGNO	$M_x$ (Kips-pulg)	$\phi_x$ (1/pulg)	$M_y$ (Kips-pulg)	$\phi_y$ (1/pulg)	$M_u$ (Kips-pulg)	$\phi_u$ (1/pulg)	$(EI)_x$ (Kips-pulg <sup>2</sup> )	$(EI)_y$ (Kips-pulg <sup>2</sup> )	$(EI)_u$ (Kips-pulg <sup>2</sup> )	$\mu$
C01	CC1	33501	M +/-	1991.085	1.17E-05	7259.823	1.02E-04	13907.84	3.79E-03	1.70E+08	5.86E+07	1.80E+06	37
C02	CC1	18390	M +/-	1954.753	1.07E-05	8324.423	1.21E-04	13732.07	3.99E-03	1.83E+08	5.75E+07	1.40E+06	33
C03	CC1	68748	M +/-	2202.344	1.32E-05	7618.781	1.01E-04	14254.03	3.34E-03	1.67E+08	6.20E+07	2.05E+06	33
C04	CC1	40272	M +/-	2028.944	1.17E-05	7175.201	9.91E-05	13984.24	3.69E-03	1.74E+08	5.89E+07	1.90E+06	37
C05	CC1	103995	M +/-	2495.335	1.52E-05	8249.584	1.04E-04	14528.41	2.98E-03	1.64E+08	6.47E+07	2.18E+06	29
C06	CC1	62154	M +/-	2161.589	1.32E-05	7636.49	1.02E-04	14196.13	3.42E-03	1.64E+08	6.16E+07	1.98E+06	33
C07	CC1	139242	M +/-	2829.268	1.73E-05	8713.394	1.05E-04	14735.77	2.67E-03	1.64E+08	6.70E+07	2.35E+06	25
C08	CC1	84036	M +/-	2322.465	1.42E-05	7898.437	1.02E-04	14388.08	3.20E-03	1.63E+08	6.34E+07	2.09E+06	31
C09	CC2	190273	M +/-	4563.022	1.52E-05	15120.81	9.14E-05	26609.85	2.27E-03	2.99E+08	1.39E+08	5.28E+06	25
C10	CC2	107878	M +/-	3664.188	1.22E-05	13845.07	8.89E-05	25976.3	2.63E-03	3.01E+08	1.33E+08	4.78E+06	30
C11	CC2	241304	M +/-	5079.614	1.68E-05	15690.16	9.14E-05	26811.43	2.05E-03	3.03E+08	1.42E+08	5.67E+06	22
C12	CC2	131720	M +/-	3932.033	1.32E-05	14063.09	8.84E-05	26248.94	2.56E-03	2.98E+08	1.35E+08	4.93E+06	29
C13	CC2	292335	M +/-	5735.271	1.88E-05	16485.74	9.35E-05	26944.77	1.87E-03	3.05E+08	1.44E+08	5.88E+06	20
C14	CC2	155562	M +/-	4106.331	1.37E-05	14741.39	9.14E-05	26413.19	2.43E-03	2.99E+08	1.37E+08	4.99E+06	27
C15	CC2	343366	M +/-	6359.914	2.08E-05	17251.59	9.55E-05	27024.87	1.72E-03	3.05E+08	1.46E+08	6.03E+06	18
C16	CC2	129404	M +/-	3931.322	1.32E-05	14035.97	8.84E-05	26242.11	2.56E-03	2.98E+08	1.34E+08	4.93E+06	29
C17	CC3	401147	M +/-	8816.323	1.73E-05	25784.45	8.38E-05	43560.07	2.10E-03	5.10E+08	2.55E+08	8.81E+06	25
C18	CC3	205378	M +/-	6300.314	1.27E-05	22597.65	7.98E-05	42005.14	2.51E-03	4.96E+08	2.43E+08	7.99E+06	31
C19	CC3	458928	M +/-	9624.407	1.88E-05	26388.04	8.38E-05	43631.21	1.95E-03	5.12E+08	2.58E+08	9.25E+06	23
C20	CC3	231352	M +/-	6595.327	1.32E-05	23243.96	8.13E-05	42283.11	2.47E-03	4.99E+08	2.45E+08	7.98E+06	30
C21	CC3	516709	M +/-	10417.461	2.03E-05	27192.47	8.48E-05	43691.7	1.86E-03	5.13E+08	2.60E+08	9.31E+06	22
C22	CC3	257326	M +/-	6888.879	1.37E-05	23328.49	8.03E-05	42584.62	2.42E-03	5.02E+08	2.47E+08	8.23E+06	30
C23	CC3	574490	M +/-	11195.221	2.18E-05	28060.17	8.64E-05	43806.26	1.79E-03	5.13E+08	2.61E+08	9.23E+06	21
C24	CC3	283300	M +/-	7178.971	1.42E-05	23753.57	8.08E-05	42821.04	2.38E-03	5.05E+08	2.49E+08	8.28E+06	29
T01	TT1	0	M +	891.757	1.02E-05	3700.756	1.22E-04	5434.52	4.29E-03	8.78E+07	2.50E+07	4.16E+05	35
T01	TT1	0	M -	880.168	1.07E-05	3995.87	1.25E-04	5887.832	4.37E-03	8.25E+07	2.71E+07	4.46E+05	35
T02	TT2	0	M +	1123.989	1.02E-05	5980.539	1.29E-04	8800.771	4.38E-03	1.11E+08	4.10E+07	6.64E+05	34
T02	TT2	0	M -	1109.876	1.07E-05	6499.246	1.33E-04	9530.524	3.99E-03	1.04E+08	4.42E+07	7.85E+05	30
T03	TT3	0	M +	1260.677	1.02E-05	6536.802	1.28E-04	9671.409	4.20E-03	1.24E+08	4.48E+07	7.70E+05	33
T03	TT3	0	M -	1239.968	1.07E-05	7317.642	1.33E-04	10808.55	4.56E-03	1.16E+08	4.96E+07	7.89E+05	34

**Tabla 6.4** Valores que definen los estados de agrietamiento, fluencia y último de la gráfica momento-curvatura para los elementos estructurales del marco analizado.

(El sistema de unidades empleado se debe a exigencias del programa IDARC2D)

La tabla 6.4 muestra los valores correspondientes a los puntos de capacidad y curvatura, mencionados en las condiciones establecidas para el ingreso de datos al programa IDARC2D; en esa misma tabla, se indican los distintos valores de carga axial calculados. Asimismo, se muestran las rigideces calculadas para cada tramo de la gráfica momento-curvatura (EI) y que son requeridas por el programa de cómputo. La figura 6.3 muestra la nomenclatura utilizada para la identificación de cada uno de los elementos de la tabla 6.4.

Como dato adicional y dentro de las características dinámicas empleadas en el programa IDARC2D, se define la masa del sistema, cuyo valor se asocia en cada nivel de la estructura, tomándose como la cuarta parte del correspondiente edificio en ese mismo nivel. Un valor del 5% se consideró como la fracción del amortiguamiento crítico (viscoso).

### **6.3 REGISTRO ACELEROMÉTRICO**

El sistema se sometió al acelerograma del 19 de septiembre de 1985, obtenido en la estación de registro sísmico SC del valle de México. El registro analizado es el que corresponde a la componente este-oeste del movimiento. Algunas características de este acelerograma, así como de su representación gráfica, se mostraron en la tabla 5.2 y la figura 5.5 del capítulo anterior.

### **6.4 MODELO HISTERÉTICO Y DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ**

El modelo histerético, incluido dentro de un programa de cómputo de análisis no lineal, es parte fundamental para el estudio del comportamiento inelástico de una estructura. El programa IDARC2D incluye el modelo de Park de tres parámetros (Park *et al.*, 1987), el cual es de interés para este trabajo. Este modelo incorpora la degradación de rigidez, deterioro de resistencia, respuestas no simétricas, una curva envolvente monotónica trilineal, entre otras características. El modelo se va trazando de acuerdo al comportamiento histerético de cada elemento a razón del cambio de un tramo a otro de la curva primaria, dependiente siempre de la historia de deformaciones.

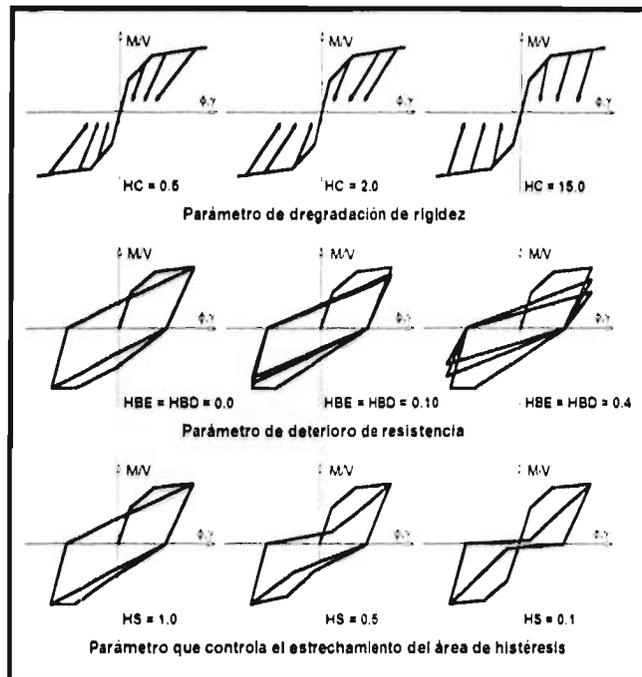


Figura 6.4 Efecto de los parámetros de degradación sobre el comportamiento histérico (Valles *et al.*, 1996)

Tabla 6.5 Rango típico de valores para modelos histéricos manejados en el programa IDARC2D (Valles *et al.*, 1996)

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	EFEECTO
HC	Degradación de rigidez	0.1	Degradación severa
		2.0	Degradación nominal (por omisión)
		10.0	Poca degradación
HBD	Degradación de resistencia (dependiente de la ductilidad)	0.0	Sin deterioro (por omisión)
		0.1	Deterioro nominal
		0.4	Deterioro severo
HBE	Degradación de resistencia (controlada por la energía disipada)	0.0	Sin deterioro
		0.1	Deterioro nominal (por omisión)
		0.4	Deterioro severo
HS	Estrechamiento del área de histéresis	0.1	Extremadamente estrecho
		0.5	Estrechamiento nominal
		1.0	Sin estrechamiento (por omisión)

Para llevar a cabo los análisis posteriores, se definió la variación de la respuesta inelástica al cambio de la rigidez dentro de la estructura; para ello, se propuso encontrar dicha respuesta suponiendo una degradación de rigidez nominal y severa. Estas dos últimas

condiciones se establecen con el parámetro de degradación HC, que se define dentro del algoritmo del programa IDARC2D y que se muestra en la figura 6.4 (Valles *et al.*, 1996).

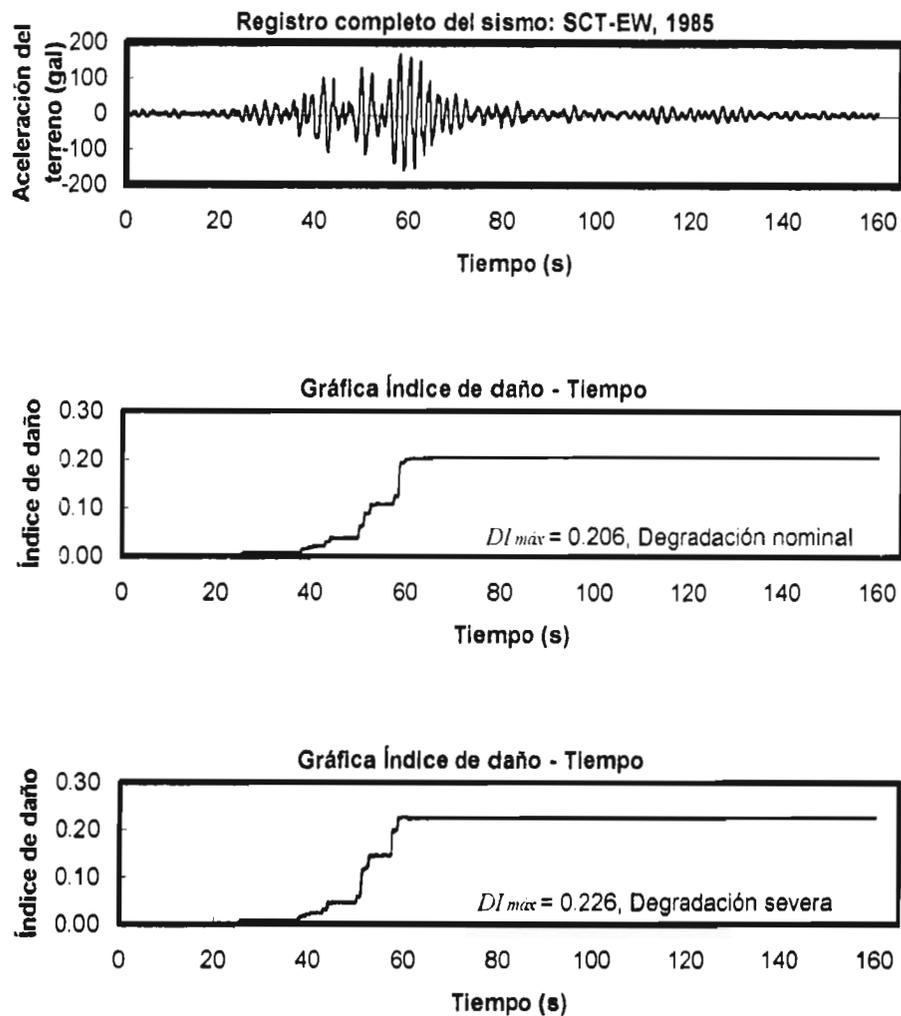
Para el parámetro de degradación de rigidez (HC), se asignó un valor de 2.0 suponiendo la degradación nominal de la rigidez, mientras que fue de 0.1 para considerar la degradación severa de la rigidez. Para los parámetros restantes, como la degradación de la resistencia (HBD y HBE) y el estrechamiento del área histerética (HS), se mantuvieron bajo un valor por omisión, constante durante el análisis inelástico; la tabla 6.5 muestra estos valores y su interpretación (Valles *et al.*, 1996).

## **6.5 LA EVOLUCIÓN DEL DAÑO ESTRUCTURAL**

Una vez que se evalúa el edificio con el programa IDARC2D, utilizando el acelerograma registrado en la estación SC y correspondiente al gran sismo de Michoacán de 1985 (figura 5.5), se obtiene la historia del daño estructural global en el tiempo, como se muestra en la figura 6.5; el acelerograma analizado se nombra en los cálculos posteriores como acelerograma completo. En la figura 6.5, se aprecia que un poco más de los 20 segundos comienza a existir daño estructural para ambas condiciones de la degradación de rigidez (nominal y severa); el comportamiento de las gráficas correspondería a un crecimiento gradual del daño hasta alcanzar un límite máximo, manteniéndose constante por el resto del tiempo. El valor máximo alcanzado del Índice de daño global es de 0.206 para la condición nominal de degradación de rigidez, mientras que para el caso de la condición severa resulta de 0.226.

Aceptando que en un intervalo definido dentro del acelerograma completo se pueda estimar el daño global máximo que tendría el edificio, se procede a recortar dicho registro en un lapso de 9.46 segundos (intervalo limitado por los tiempos 55.22 y 64.68 segundos del acelerograma completo), que incluye las máximas amplitudes de la aceleración; las condiciones iniciales contempladas para llevar a cabo el análisis inelástico del edificio con este registro (acelerograma recortado) consideran a la estructura en un estado de reposo. Nuevamente se evalúa la estructura con el programa IDARC2D obteniendo los resultados mostrados en la figura 6.6. Como se observa en esa misma figura, ya no se muestra un crecimiento gradual del índice de daño debido a que no existen datos al comienzo del

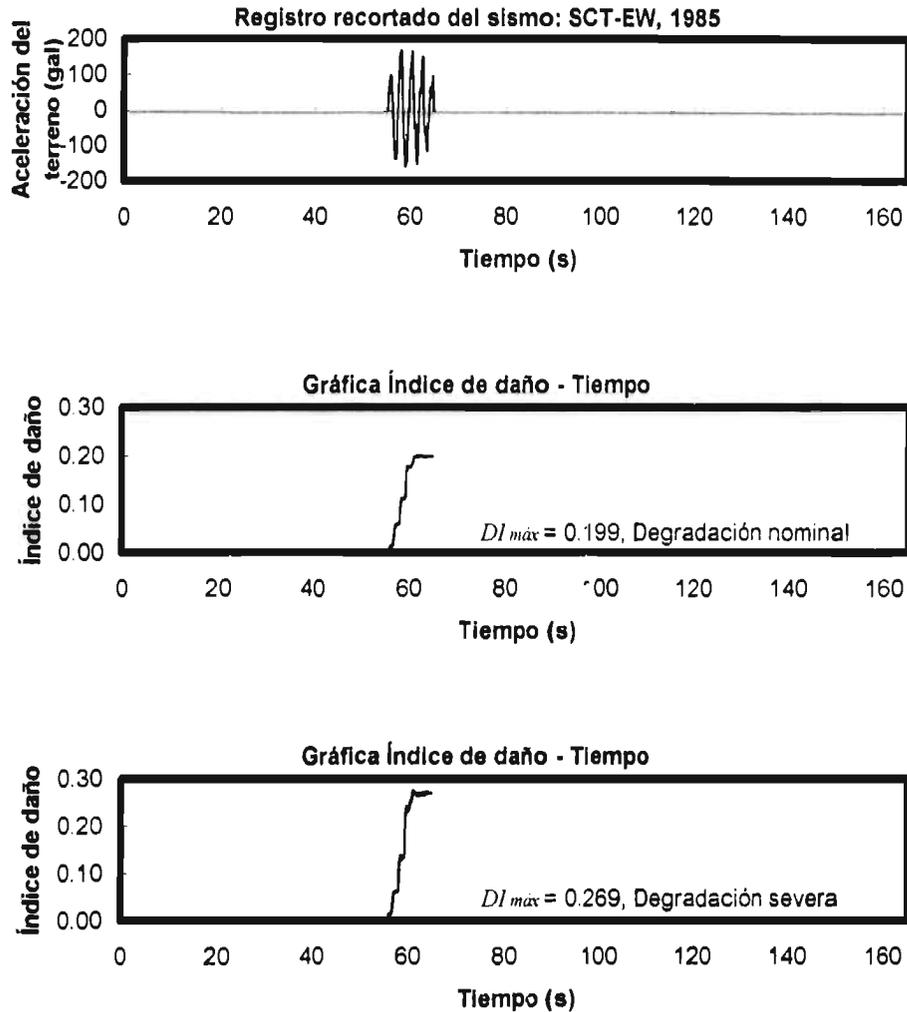
acelerograma recortado; sin embargo, se llegan a alcanzar valores máximos del índice de daño del mismo orden que los obtenidos para el acelerograma completo.



**Figura 6.5** Evolución del daño estructural al someter el marco al acelerograma completo

De acuerdo con la figura 6.6 y considerando la condición nominal de degradación de rigidez, se observa que el valor máximo del índice de daño global ( $DI_{m\acute{a}x}=0.199$ ) subestima a aquel obtenido del análisis donde se empleó el acelerograma completo ( $DI_{m\acute{a}x}=0.206$ ); sin embargo, el error calculado entre esos dos valores resulta de un 3% (con respecto al

máximo índice de daño global obtenido al evaluar el edificio con el acelerograma completo), lo cual representa una buena aproximación entre ellos.



**Figura 6.6** Evolución del daño estructural al someter el marco al acelerograma recortado

Para la condición severa de la degradación de la rigidez se presenta una sobrestimación del resultado obtenido al emplear el acelerograma recortado en el análisis inelástico del edificio ( $DI_{m\grave{a}x}=0.269$ ) con respecto al valor que se deriva al utilizar el acelerograma completo ( $DI_{m\grave{a}x}=0.226$ ), según se muestra en las figuras 6.5 y 6.6. En este caso, el error

calculado es del 19%, resultando al mismo tiempo un valor conservador del grado de daño estructural.

Con el criterio del acelerograma recortado y dada las comparaciones realizadas entre los valores máximos del índice de daño, resulta válido definir un acelerograma simplificado con una duración y amplitud semejante al recortado; es posible proponer un modelo que simule ese comportamiento y se obtenga una estimación del índice de daño máximo para una estructura a partir de un análisis no lineal.

## 6.6 MODELO DEL ACELEROGRAMA SINTÉTICO

De acuerdo con el análisis comparativo, realizado entre los resultados del índice de daño global que se obtuvieron al evaluar el edificio con los acelerogramas completo y recortado, se propone una expresión matemática que intenta representar el efecto del acelerograma recortado. El planteamiento de esa expresión se realiza de una manera simple y se define de la siguiente forma:

$$A_s(t) = A_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen} \left[ \frac{2 \pi t}{T_1} \right] \cdot \text{sen} \left[ \frac{2 \pi t}{T_2} \right] \quad (6.4)$$

donde :

$A_s(t)$	Aceleración de terreno en el tiempo t, en gal
$A_{m\acute{a}x}$	Aceleración máxima del terreno, dependiente de las características del sitio y el sismo de interés, en gal
$T_1$	Periodo dominante del terreno, en s
$T_2$	Dos veces la duración del movimiento, en s
t	Variación del tiempo, en s

La interpretación física de la expresión 6.4 señala como función principal una senoide que contiene el periodo dominante del suelo ( $T_1$ ) y cuya amplitud es regulada por otra función del mismo tipo, con otro periodo ( $T_2$ ), cuyo valor controla la duración del movimiento. El valor de  $A_{m\acute{a}x}$  puede definirse a partir de datos observados en registros acelerométricos o por medio de expresiones matemáticas derivadas de estudios sobre la estimación de movimientos fuertes del terreno originados por temblores mexicanos (Singh *et al.* 1987).

La figura 6.7 muestra gráficamente las funciones propuestas y los parámetros que intervienen en la expresión 6.4 y cuyo modelo se le llamará acelerograma sintético.

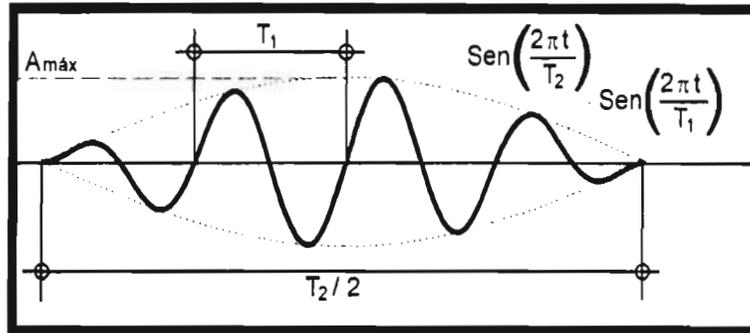


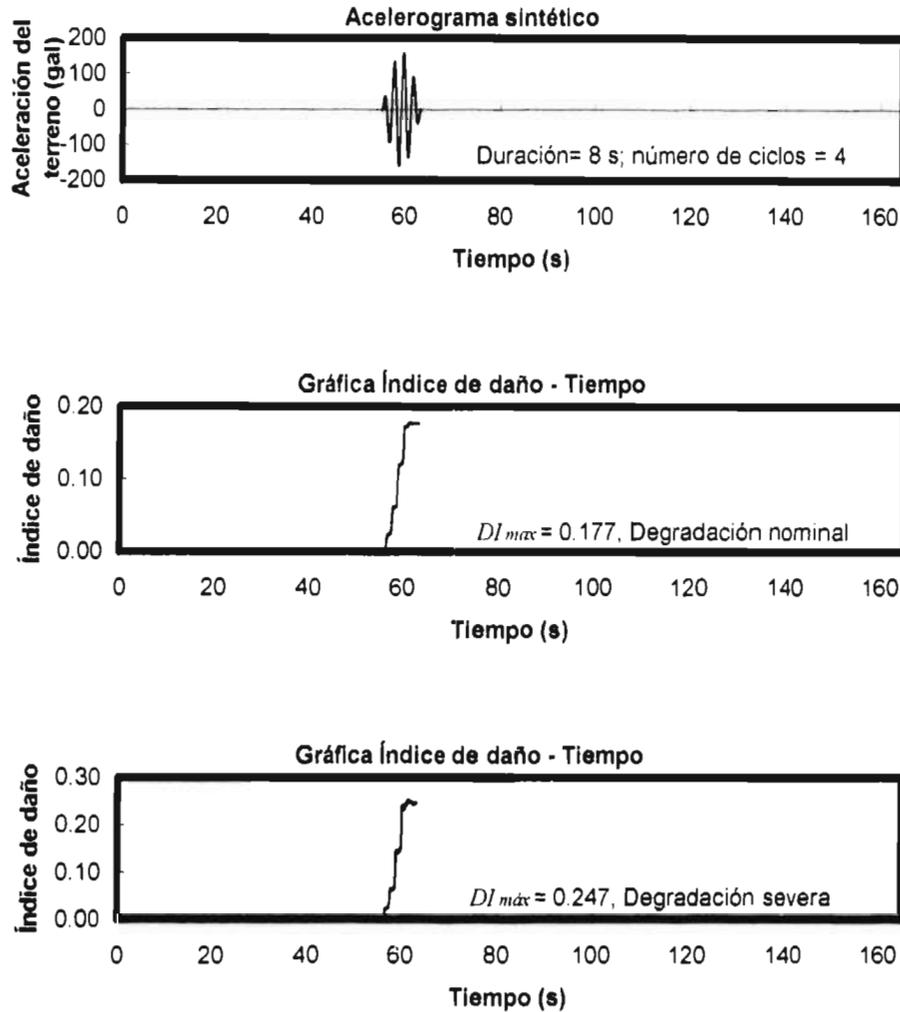
Figura 6.7 Modelo del acelerograma sintético

Para aplicar y calibrar la ecuación 6.4, se propone utilizar parámetros característicos del sitio donde se ubica la estación SC (zona de lago del valle de México) y del acelerograma del 19 de septiembre de 1985 registrado en ese mismo lugar; los datos empleados son: el periodo dominante y la aceleración máxima del terreno, calculados en 2.0 s y 168 gal, respectivamente; los valores anteriores representan a  $T_1$  y  $A_{máx}$  en la expresión 6.4.

El valor de  $T_2/2$  está dado por una estimación de aquella duración en donde se hayan presentado las máximas demandas del movimiento, y dependerá en cierta forma de la serie de registros observados en el sitio de análisis. Se recomienda que la duración propuesta para el acelerograma sintético deba ser tal que el crecimiento en las amplitudes del mismo sea gradual desde el principio hasta a alcanzar la aceleración máxima del terreno que se haya establecido previamente, y de la misma manera para el decremento de las amplitudes después ese valor máximo. Establecer duraciones muy pequeñas dentro del acelerograma sintético generan incrementos abruptos en la magnitud de las aceleraciones del terreno al inicio y final del mismo, lo cual puede ocasionar que al estimar el grado de daño en un edificio a partir de un análisis inelástico y utilizando el acelerograma sintético, no sea representativo del daño real.

La duración del movimiento ( $T_2/2$ ) puede evaluarse como un porcentaje del valor estimado a partir de la expresión 3.3 (capítulo III). Utilizando la ecuación 3.3, se obtiene una duración de 140 s aproximadamente (tabla 4.2 del capítulo IV), considerando el sitio

donde se ubica la estación SC y para el caso particular del temblor de 1985. Aplicando un 7% al resultado arrojado por la ecuación 3.3, se obtiene una duración (9.8 s) cercana a la que posee el acelerograma recortado (9.46 s), lo cual resulta una buena alternativa.



**Figura 6.8** Evolución del daño estructural al someter el marco al acelerograma sintético

Como una opción adicional, considerando el caso particular del sismo de Michoacán de 1985 y el sitio donde se ubica la estación acelerométrica SC, las gráficas tridimensionales de las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 (mostradas en el capítulo V) representan una base preliminar para conocer el valor de la duración y su equivalente número de ciclos del movimiento. Bajo este criterio, la estimación de la duración del movimiento ( $T_2/2$ ) se lleva

a cabo relacionando la estructura con un oscilador de un grado de libertad cuyas características son la siguientes: una resistencia sísmica  $C_s=0.1$  (coeficiente sísmico sin reducir igual a 0.4 y un factor de comportamiento sísmico igual a 4) y un periodo elástico  $T_o=1.38$  s (periodo fundamental de vibración considerando la interacción suelo-estructura).

Recurriendo al espectro de respuesta no lineal de la duración del movimiento, mostrado en la figura 5.11, se estima una duración de 8 segundos ( $T_2/2$ ), que correspondería a 4 ciclos de movimiento; este valor se aplica en la ecuación 6.4 para generar finalmente el acelerograma sintético. Al definir la magnitud de la duración, se recomienda que sea compatible con un determinado número de ciclos equivalentes del movimiento, cuyo valor deberá corresponder a un número entero.

Contando con todos los parámetros de la expresión 6.4, se procede con la generación del acelerograma sintético y una vez más se evalúa el comportamiento inelástico de la estructura mediante el programa IDARC2D. La figura 6.8 muestra el acelerograma sintético generado y la evolución del daño estructural con el tiempo; asimismo, se presentan los valores máximos del índice de daño global. Como se observa en esa misma figura, la variación del índice de daño global muestra semejanza con la que se presentó en el análisis inelástico del edificio utilizando el acelerograma recortado (figura 6.6).

Tomando en cuenta la condición nominal de degradación de rigidez, la figura 6.8 muestra que el valor máximo del índice de daño global ( $DI_{max}=0.177$ ) subestima al obtenido del análisis inelástico donde se empleó el acelerograma completo ( $DI_{max}=0.206$ ); el error calculado entre esos dos valores resulta de un 14% (con respecto al máximo índice de daño global obtenido al evaluar el edificio con el acelerograma completo), lo cual representa una diferencia tolerablemente aceptable.

Para la condición severa de la degradación de rigidez, la figura 6.8 muestra una sobrestimación del valor máximo del índice de daño global ( $DI_{max}=0.247$ ) con respecto a al resultado obtenido del análisis inelástico en donde se empleó el acelerograma completo ( $DI_{max}=0.226$ ); el error calculado es de 9% entre esos dos valores.

Con base en los resultados obtenidos al evaluar el comportamiento inelástico del edificio con los acelerogramas completo y sintético, se establece que los errores calculados se asocian con algunos de los siguientes factores:

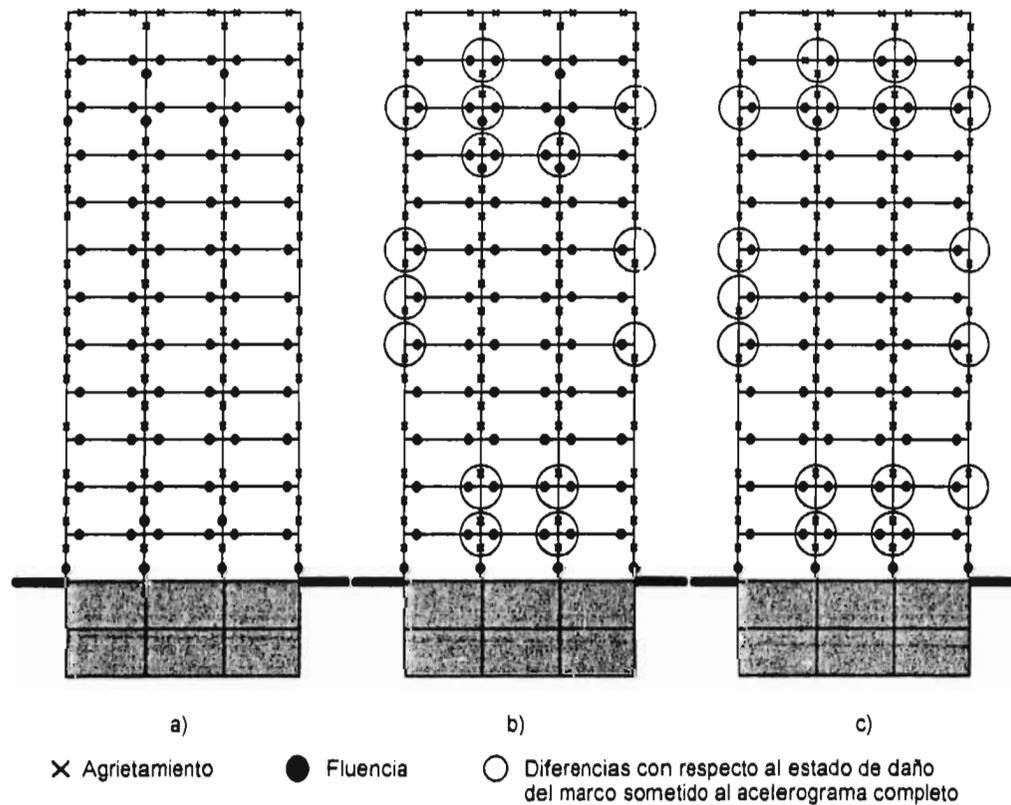
- a) La presencia de un deterioro gradual en la estructura mucho antes de entrar a una etapa de máximas demandas del movimiento (máximas amplitudes de la aceleración) en el acelerograma completo, lo cual no sucede con el acelerograma sintético.
- b) El contenido de frecuencias del acelerograma completo, el cual se simplifica en el modelo del acelerograma sintético con la aplicación del periodo dominante del suelo (valor relacionado con el lugar de desplante de la estructura por analizar).
- c) La duración del movimiento fuerte del terreno que toma parte en el modelo propuesto y cuyo valor depende de la técnica empleada para definirlo, por ejemplo, mediante la observación de una serie de registros sísmicos obtenidos en el sitio de interés o con la ayuda de alguna expresión matemática.

A pesar de la magnitud de los errores calculados, los resultados son razonablemente satisfactorios con fines de estimar el daño estructural global de un edificio. Por lo anterior, el acelerograma sintético resulta ser una excelente herramienta para llevar a cabo el análisis inelástico de un edificio. El modelo propuesto, dado por la expresión 6.4, es capaz de representar la información obtenida a partir de un acelerograma real, conociendo solo algunas variables que intervienen en dicha expresión: el periodo dominante del suelo donde se propone desplantar el edificio estudiado, una estimación de la duración del movimiento y la aceleración máxima del terreno.

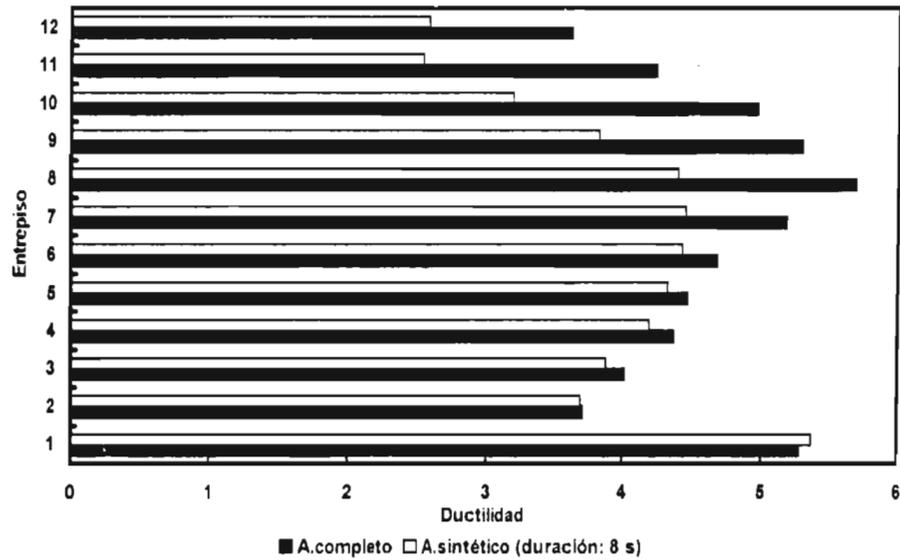
Realizando otras comparaciones, la figura 6.9 muestra los estados de daño finales del marco exterior al someterlo a los acelerogramas completo, recortado y sintético. Los resultados corresponden a una condición nominal de la degradación de la rigidez. De acuerdo con esa misma figura, se aprecian pocas diferencias con respecto al nivel de

daño, por lo que es válido señalar que el estado de daño final puede estimarse a partir del modelo del acelerograma sintético.

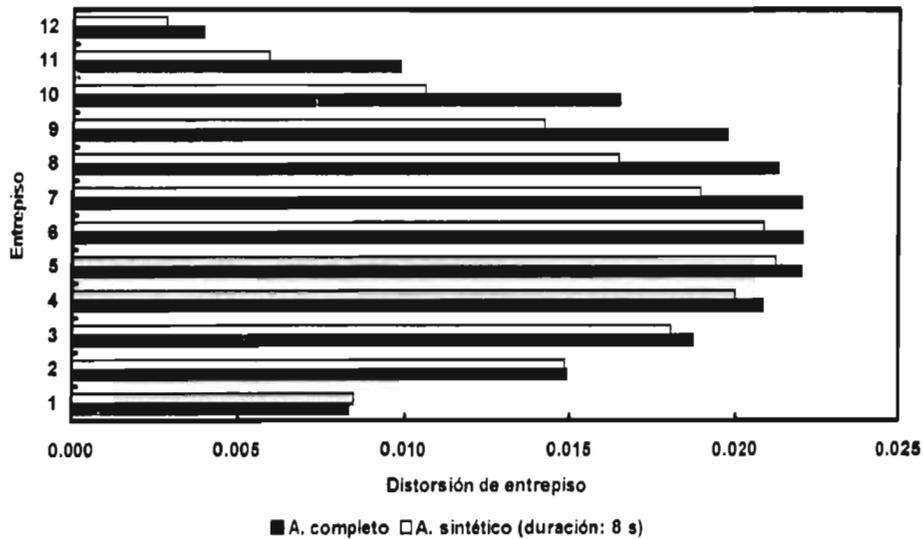
Para ilustrar de otra manera la eficiencia del acelerograma sintético, las figuras 6.10 y 6.11 muestran gráficas comparativas de las demandas de ductilidad y distorsiones de entrepiso, respectivamente; los resultados indican una buena aproximación entre el análisis inelástico realizado en la estructura a partir de los acelerogramas completo y sintético, principalmente en los primeros entrepisos. Para esta comparación, se consideró la condición nominal de la degradación de la rigidez en la estructura.



**Figura 6.9** Estado final del daño en el marco  
 a) Sometido al acelerograma completo SCT-EW, 1985  
 b) Sometido al acelerograma recortado SCT-EW, 1985  
 c) Sometido al acelerograma sintético



**Figura 6.10** Demandas de ductilidad en el edificio de concreto armado de 12 niveles cuando es sometido a dos acelerogramas diferentes, considerando una condición nominal de la degradación de rigidez



**Figura 6.11** Distorsiones de entrepiso en el edificio de concreto armado de 12 niveles cuando es sometido a dos acelerogramas diferentes, considerando una condición nominal de la degradación de rigidez

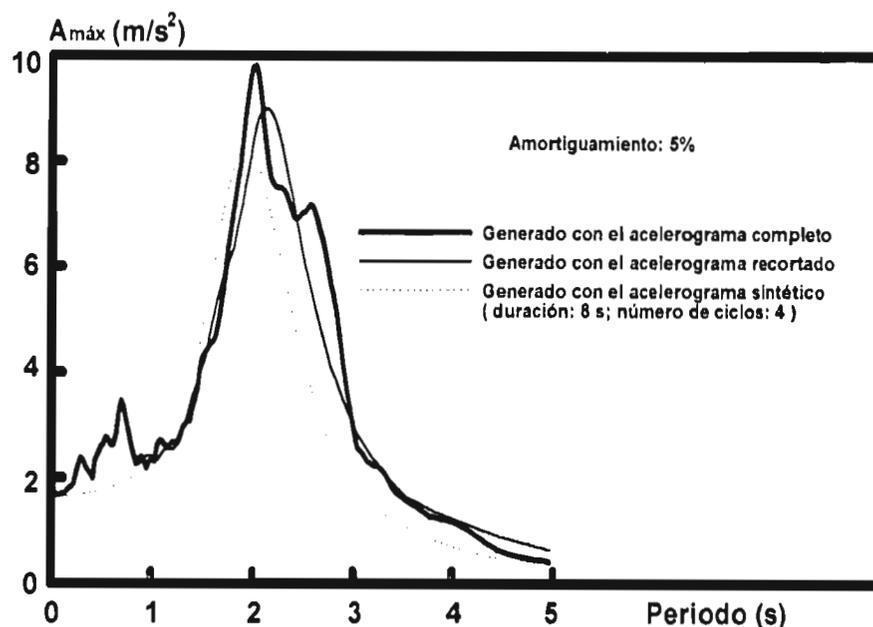


Figura 6.12 Espectros de respuesta en la estación SC para el sismo del 19 de septiembre de 1985. Componente este-oeste

Por otra parte, el acelerograma sintético puede ser también un apoyo para la estimación de espectros de respuesta elásticos, como se muestra en la figura 6.12. Los espectros fueron calculados a partir de los tres acelerogramas empleados en este capítulo: completo, recortado y sintético.

Al considerar aceptable la aproximación entre los valores máximos del índice de daño global, obtenidos al evaluar el comportamiento inelástico del edificio con los acelerogramas completo y sintético, significaría que resulta igual tomar la totalidad del registro sísmico real o proponer solo unos cuantos pulsos del movimiento en la que se incluyen las máximas amplitudes de la aceleración. Sin embargo, el suponer físicamente que las estructuras son dañadas desde mucho antes y después de presentarse las máximas demandas del movimiento, hace pensar que las herramientas utilizadas para determinar el grado de daño estructural no son suficientes.

El programa IDARC2D tiene la opción de proporcionar un lapso del movimiento en donde se presentan los primeros indicios del daño estructural, mucho antes de alcanzar las máximas amplitudes de la aceleración; como ejemplo, la figura 6.5 indica que el daño

comienza los 25 s después de iniciarse el movimiento, logrando también calcular una duración de 35 s como la etapa en la que se presenta el incremento gradual del índice de daño global en el tiempo. Una vez que se presentan las máximas demandas de la aceleración, el programa de cómputo se limita a reportar un valor máximo del daño global, continuando sin variación durante el tiempo restante.

Suponemos entonces que, aún cuando la estructura llega a un grado de daño severo provocado por las máximas demandas del movimiento, es posible que los elementos continúen deteriorándose con el movimiento restante, aunque en menor medida. Por lo anterior, no se descarta la posibilidad de que la magnitud de la duración del movimiento que interviene en la ecuación 6.4 podría ser mayor.

## CONCLUSIONES

### CAPÍTULOS I, II, III

Se presentó un estudio de la duración del movimiento, tomando como base analítica los datos pertenecientes a algunos sismos de subducción originados en la costa de Océano Pacífico y registrados por las redes acelerométricas de Guerrero y la ciudad de México.

Para llevar a cabo el estudio mencionado, se requirió del manejo de una base de datos completa (acelerogramas). Se realizó una depuración y selección de acelerogramas a partir de una revisión visual y de contenido de los mismos, excluyendo todo aquel registro defectuoso; la finalidad de esta etapa del análisis fue minimizar ciertas incertidumbres que se podrían generar en los resultados finales.

Dado que la duración total de un registro acelerométrico no es representativo del movimiento intenso del terreno al ocurrir un temblor, en forma preliminar al cálculo de la duración se introdujo la técnica del umbral de referencia como medio para descartar cierta información dentro de un registro sísmico que no resulta relevante dentro del análisis.

En este trabajo y desde el punto de vista de registros sísmicos, la duración del movimiento fuerte del terreno resultó conveniente medirla a partir del lapso definido por el intervalo del 2.5% y 97.5% de la intensidad de Arias (duración relevante). De acuerdo con ésta técnica empleada para definir la duración del movimiento, se estableció también que las amplitudes máximas del movimiento quedan incluidas dentro de ese intervalo de tiempo. Desde el punto de vista estructural, es importante mencionar que la forma de estimar la duración del movimiento a partir del método de la duración relevante proporciona una medida de la uniformidad o no uniformidad de ingreso de energía en un edificio en comparación con la duración total del registro.

A pesar de una presencia notoria de dispersión de resultados en los análisis y de acuerdo con un determinado manejo de los mismos, se derivaron dos expresiones matemáticas que estiman la duración del movimiento fuerte del terreno. Una de las expresiones determina la magnitud de la duración para zonas de terreno firme de la República

Mexicana (mostrada en el capítulo II) y la otra para las diferentes zonas geotécnicas de la ciudad de México (mostrada en el capítulo III). Las ecuaciones han sido generadas como función de la magnitud del sismo, de la distancia del sitio de interés al área de la ruptura y el periodo dominante del terreno. Las dos expresiones se limitan a estimar la duración del movimiento para eventos sísmicos originados en la costa del Pacífico de la República Mexicana a partir de un proceso de subducción de placas tectónicas que se asocian con las brechas sísmicas de Guerrero y Michoacán.

Con los resultados obtenidos en los capítulos II y III, se demostró que la duración del movimiento refleja una tendencia a aumentar con el incremento de la magnitud del sismo y la distancia a la fuente sísmica, en zonas de terreno firme de la República Mexicana. Para el caso de la ciudad de México, la influencia del periodo dominante llega a ser importante, mostrando un aumento de la duración a razón que las ondas sísmicas se llegan a internar a la zona de lago (suelo blando), este último caracterizado por la presencia de periodos dominantes mayores a los que presenta la zona de lomas o terreno firme.

Para estimar la duración del movimiento fuerte del terreno de sismos de subducción mexicanos futuros, se recomendó utilizar las expresiones matemáticas planteadas y algunas gráficas mostradas en este trabajo. Quizá, el empleo directo de las ecuaciones no sea apropiado para representar la duración del movimiento en otras regiones diferentes a las mencionadas en este estudio; sin embargo, una calibración de los términos numéricos que componen a las expresiones, con base en registros sísmicos observados en el sitio de interés, podría resultar factible adaptarlas a sismos ocurridos en otros lugares.

#### **CAPÍTULO IV**

Se mostró una aplicación directa de la estimación de la duración del movimiento derivada de la expresión matemática planteada en el capítulo III, la cual es dependiente de algunos parámetros como son: la magnitud del temblor, la distancia a la fuente sísmica y del periodo dominante del terreno.

Se procuró dar versatilidad a los resultados de la duración del movimiento fuerte del terreno para emplearse como una herramienta complementaria en la predicción de espectros de respuesta para el valle de México, aplicándose directamente en el método de la teoría de vibraciones aleatorias. Para llevar a cabo el cálculo de espectros de respuesta, se seleccionaron algunos de los registros obtenidos en diferentes estaciones acelerométricas ubicadas en terreno firme, transición y zona de lago del valle de México, y correspondientes a cuatro sismos de subducción mexicanos.

Las comparaciones realizadas entre los espectros estimados (teoría de vibraciones aleatorias) con sus respectivos espectros exactos (cálculos en el dominio de la frecuencia) mostraron una buena aproximación para el caso de sismos moderados; sin embargo, una sobrestimación de la duración del movimiento calculada a partir de la expresión matemática mencionada, puede llegar a representar diferencias importantes para sismos intensos.

## **CAPÍTULO V**

En este capítulo, la duración del movimiento fuerte del terreno tomó un enfoque diferente al planteado en los capítulos II y III. La duración se estableció como un parámetro dependiente de la energía histerética disipada por un sistema estructural de un grado de libertad al someterse a un movimiento sísmico basal; es el lapso en el que ocurre la etapa inelástica de dicho sistema.

El concepto de la energía histerética disipada se sustituyó por el de la duración del movimiento para ayudar a explicar y representar en forma más simple el comportamiento no lineal de cualquier sistema estructural de un grado de libertad, resultando ser ésta una buena alternativa. Al igual que la energía histerética, la duración del movimiento es una variable que llega a relacionarse con el posible daño estructural que sufre un sistema ante un evento sísmico.

Se dedujo que la duración del movimiento guardaba cierta relación con el número de ciclos inelásticos experimentados por el comportamiento no lineal del sistema estructural de un grado de libertad. La magnitud del número de ciclos inelásticos se obtuvo a partir

de una expresión que toma en cuenta una cuantificación de la energía histerética total disipada por el sistema estructural ante la excitación basal; asimismo, la ecuación se presenta en función de otras variables características del mismo sistema.

Dado que se determina del número de ciclos inelásticos que ocurre en el comportamiento no lineal de un sistema estructural de un grado de libertad, se propuso utilizar una expresión que calculara la duración por ciclo inelástico. Bajo cierto planteamiento, la ecuación se expresa en términos del periodo elástico del sistema y la ductilidad máxima que resulta de la excitación real. Al final, el producto entre el valor que corresponde al número de ciclos inelásticos y la duración por ciclo proporcionó como resultado la magnitud de la duración total del movimiento.

Para definir el lapso en la que ocurre la etapa inelástica de un sistema estructural de un grado de libertad, se tomaron en cuenta algunos aspectos importantes. Para la ciudad de México, se ilustró la importancia que puede llegar a tener la duración del movimiento como parámetro relevante en la zona de lago; para ello, se seleccionó como excitación basal el acelerograma (componente este-oeste) correspondiente al gran temblor de Michoacán del 19 de septiembre de 1985, registrado en el sitio donde se ubica la estación acelerométrica SC. Para cada sistema estructural de un grado de libertad analizado, se propusieron algunos datos como fueron: la resistencia sísmica, el periodo elástico y la fracción del amortiguamiento, ésta última se fijó como el 5%. Para evaluar algunos parámetros como fueron: la energía histerética disipada y la ductilidad máxima resultado de la excitación real, se recurrió al empleo de algunos modelos histeréticos; en este trabajo, se consideraron útiles los modelos de Takeda (que contempla la degradación de la rigidez en los ciclos histeréticos) y el elastoplástico.

Con base en el análisis de una serie de sistemas de un grado de libertad con resistencias y periodos elásticos variables, se generaron diversas gráficas tridimensionales que estiman el comportamiento no lineal en términos del número de ciclos inelásticos y la duración del movimiento. Las gráficas se nombraron como: espectros de respuesta no lineales. Para el sitio donde se ubica la estación acelerométrica SC en la zona de lago del valle de México, es posible estimar la duración del movimiento (o su equivalente en número de ciclos inelásticos) para cualquier sistema estructural de un grado de libertad,

conociendo solo su periodo elástico y su resistencia sísmica. Por las condiciones establecidas para generar las gráficas tridimensionales mencionadas, la estimación de la duración del movimiento se lleva a cabo suponiendo la presencia de un sismo de subducción mexicano intenso ( $M=8.1$ ).

De acuerdo con los resultados presentados en los espectros de respuesta no lineales, se mostró que todos aquellos sistemas estructurales de un grado de libertad que poseen un periodo elástico cercano al periodo dominante del sitio experimentan incursiones inelásticas con más frecuencia que para otros periodos. Asimismo, se observó que el número de ciclos inelásticos y la duración del movimiento presentan una tendencia a incrementarse a razón que disminuye la resistencia del sistema estructural, para cualquier periodo elástico; esto indica que estructuras con poca resistencia tendrán más incursiones inelásticas.

Bajo una comparación de espectros de respuesta no lineales, tomando como referencia el tipo de modelo histerético empleado, se mostró que existen diferencias apreciables tanto del valor del número de ciclos inelásticos como de la duración. Los espectros que se derivan del empleo del modelo elastoplástico arrojaron resultados en las que se muestran indicios de un comportamiento de no linealidad aún para sistemas que poseen resistencias equivalentes al peso total del mismo (considerando los sistemas con periodo elástico cercanos al periodo dominante del terreno). A diferencia de los espectros generados con el modelo elastoplástico, en aquellos que se calcularon con el modelo de Takeda, se observó que se marca un límite de incursionamiento inelástico para sistemas estructurales con resistencias igual a la mitad del valor de su peso total. Las diferencias mencionadas se atribuyeron al estrechamiento que experimenta el área histerética en el modelo de Takeda por efecto de la degradación de la rigidez, así como la presencia de una rigidez previa al agrietamiento del sistema en ese mismo modelo. Por otra parte, se mostró que aún para un mismo modelo (modelo de Takeda) existen diferencias entre los valores calculados del número de ciclos inelásticos y la duración del movimiento, principalmente para sistemas con resistencias cercanas a cero; esto significa que la variación del coeficiente de degradación de rigidez que se utiliza en el modelo de Takeda tiende a influir más sobre sistemas estructurales que presentan resistencias menores.

Tomando como referencia el temblor del 19 de septiembre de 1985 y el sitio donde se localiza la estación acelerométrica SC en la ciudad de México (zona de lago), la expresión que estima la duración del movimiento, derivada en el capítulo III, arroja un valor aproximado a 140 s; este valor mostró diferencias importantes con los resultados obtenidos a partir de los espectros de respuesta no lineales. Mientras que la expresión del capítulo III calcula la duración del movimiento independientemente de las características que presente cualquier estructura ubicada en el lugar mencionado, los espectros de respuesta no lineales de la duración del movimiento proporcionan una serie de valores, lo cual obliga a especificar previamente algunas características de la estructura (modelada como un oscilador de un grado de libertad) desplazada en el sitio de estudio. De acuerdo con los espectros de respuesta no lineales, los resultados de la duración del movimiento fueron muy inferiores con respecto al valor estimado con la ecuación del capítulo III. Se estableció que el valor de la duración del movimiento proporcionada por dichos espectros es una fracción de tiempo que se incluye dentro de aquella duración definida a partir de la expresión del capítulo III, como un porcentaje de la misma; asimismo, representaría el lapso en la que una estructura sufre los daños más importantes (asociado con un comportamiento inelástico). Se dedujo que la fracción de tiempo que se obtiene con los espectros de respuesta no lineales podría relacionarse con el intervalo en donde ocurren las máximas demandas del movimiento.

En este capítulo se mostró un procedimiento para generar espectros de respuesta no lineales que sirven de apoyo para dar explicación al comportamiento inelástico de sistemas estructurales de un grado de libertad mediante una estimación de la duración del movimiento. Sin embargo, los resultados obtenidos resultan limitados por las condiciones establecidas que relacionan al sitio estudiado y el evento sísmico seleccionado. Este análisis debe hacerse extensivo tomando en cuenta otras zonas, así como considerar una escala mayor de temblores; para ello, es posible que se requiera de un estudio exhaustivo. Con base en lo anterior, la disposición de un buen número de espectros de respuesta no lineales del número de ciclos inelásticos y de la duración del movimiento serviría para hacer más general el conocimiento sobre el comportamiento no lineal de un sistema estructural de un grado de libertad.

## CAPÍTULO VI

El comportamiento inelástico de un edificio de concreto armado, previamente diseñado, se evaluó mediante un programa de cómputo de análisis no lineal, el cual permitió obtener la historia del daño global en el tiempo bajo dos condiciones de degradación de rigidez estructural: nominal y severa. Para estimar el daño estructural, el programa de cómputo aplica el criterio del modelo modificado del índice de daño de Park y Ang (Kunnath *et al.*, 1992). El análisis se realizó suponiendo a la estructura sobre terreno blando de la ciudad de México; el acelerograma empleado (componente este-oeste) es el que se registró en la estación SC correspondiente al sismo del 19 de septiembre de 1985. El acelerograma se manejó en dos formas: completo (movimiento real) y recortado; el acelerograma recortado se definió de tal manera que se incluyeron las máximas amplitudes que se presentaron en el acelerograma completo. A partir de una comparación entre los valores máximos del índice de daño global obtenidos al analizar el edificio con los acelerogramas completo y recortado, se observó que existen diferencias razonablemente aceptables; esto demuestra que el daño máximo global de una estructura puede estimarse con unos cuantos pulsos del movimiento real.

Se propuso un modelo simplificado que provoca un daño máximo global en el edificio del mismo orden que el originado por los acelerogramas completo y recortado; dicho modelo se nombró como acelerograma sintético. Para generar este acelerograma se requiere conocer tres parámetros: la aceleración máxima del terreno, periodo dominante del sitio y la duración del acelerograma, lo cual lo hace una herramienta de simple manejo. Definiendo tolerablemente el valor de los parámetros mencionados, este modelo propuesto resulta útil para llevar a cabo cualquier análisis no lineal.

Para emplear y calibrar el acelerograma sintético, se utilizaron algunos valores característicos que corresponden al sitio donde se ubica la estación SC y al registro acelerométrico de 1985 que se obtuvo en ese mismo lugar (el periodo dominante del suelo y la aceleración máxima del terreno). Para la estimación de la duración del acelerograma sintético, se recomendó emplear los espectros de respuesta no lineales de la duración del movimiento (gráficas obtenidas en el capítulo V) o aplicar un porcentaje de la duración estimada a partir de la expresión matemática creada en el capítulo III. Los

resultados obtenidos del análisis inelástico al evaluar el edificio con el acelerograma sintético mostraron diferencias tolerables al compararse con los valores conseguidos al emplear el acelerograma completo.

De acuerdo con la comparación hecha entre los valores máximos del índice de daño global, obtenidos al evaluar el edificio con los acelerogramas completo y sintético para las condiciones nominal y severa de degradación de rigidez estructural, se observó que no muestran diferencias importantes. Lo anterior, pudo corroborarse también con los estados finales del daño en el marco analizado, las demandas de ductilidad y distorsiones de entrepiso que se mostraron en este capítulo. Por lo anterior, el acelerograma sintético resulta ser una excelente ayuda en la evaluación del comportamiento no lineal de una estructura y es capaz de representar información obtenida con el acelerograma real.

Se llegó a la conclusión de que los errores calculados entre los valores máximos del índice de daño global, obtenidos al evaluar el comportamiento inelástico del edificio con los acelerogramas completo y sintético, se asocian con algunos de los siguientes factores:

- a) La presencia de un deterioro gradual en la estructura mucho antes de entrar a una etapa de máximas demandas del movimiento real, lo cual no sucede con el acelerograma sintético.
- b) El contenido de frecuencias del acelerograma completo, el cual se simplifica en el modelo del acelerograma sintético con la aplicación del periodo dominante del suelo (valor relacionado con el lugar de desplante de la estructura por analizar).
- c) La duración del movimiento fuerte del terreno que toma parte en el modelo propuesto y cuyo valor depende de la técnica empleada para definirlo, por ejemplo, mediante la observación de una serie de registros sísmicos obtenidos en el sitio de interés o con la ayuda de alguna expresión matemática.

A pesar de los análisis realizados y de los resultados obtenidos en este capítulo, se llegó a la conclusión de que las herramientas empleadas no son suficientes para explicar en su totalidad el deterioro estructural del edificio. Por lo anterior, se sugiere extender este estudio con la finalidad de encontrar etapas de degradación de rigidez previas y

posteriores al intervalo en donde se definen las máximas demandas del movimiento (máximas amplitudes de la aceleración del terreno). Cuando el edificio se sometió al acelerograma completo, la información que resulta de su análisis inelástico proporciona una duración previa del movimiento, reflejado en el incremento gradual del índice de daño global y en la que se mostraron los primeros indicios del deterioro estructural, mucho antes de presentarse las aceleraciones máximas del terreno. Sin embargo, es necesario tratar de encontrar una técnica adicional que permita conocer los efectos del movimiento en una etapa posterior a las máximas demandas, aceptando que los elementos aún continuarían deteriorándose con el movimiento restante. De esta forma, se llegaría a la conclusión que la estimación de la duración del movimiento, propuesta en el modelo sintético, resultaría mayor a lo previsto en este capítulo; en este caso, se podrían generar resultados todavía más cercanos al daño estructural real.

## REFERENCIAS

- **Akiyama, H.**, *Earthquake-resistant limit-state design for buildings*, Tokyo: Univ. of Tokyo Press, 1985.
- **Akiyama, H., y Kitamura, H.**, "Design energy spectra for specific ground conditions", *Int. Workshop on recent developments in base-isolation techniques for buildings*, Tokio, Final report: 73-84, Tokyo: AIJ, 1992.
- **Arnal, L., y Betancourt, M.**, *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal: ilustrado y comentado*, Editorial Trillas, México, D.F., 1991.
- **Astiz, L., Kanamori, H., y Eissler**, "Source characteristics of earthquakes in the Michoacan seismic gap in Mexico", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.77, 1326-1346, 1987.
- **Arias, A.**, "A measure of earthquake intensity", *Seismic Design of Nuclear Power Plants*, R.Hansen, Editor, MIT Press, Cambridge, Mass., 1970.
- **Bommer, J.J., y Martinez-Perreira, A.**, "The prediction of strong-motion duration for engineering design", *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, No.84, Acapulco, México, 1996.
- **Boore, D.M.**, "Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6, 1865-1894, 1983.
- **Boore, D.M., y Joyner, W.B.**, "A note on the use of random vibration theory to predict peak amplitudes of transient signals", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.74, No.5, 2035-2039, 1984.
- **Brune, J.N.**, "Tectonic stresses and spectra of seismic waves during earthquakes", *Jour. Geop. Res.*, 75, 4997-5009, 1970.

- **Cartwright, D.E., y Longuett-Higgins, M.S.**, "The statistical distribution of the maxima of a random function", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. A237, 212-232, 1956.
- **Clough, R.W., y Penzien, J.**, *Dynamics of Structures*, McGraw-Hill, New York, 634, 1975.
- **Coenza, E., y Manfredi, G.**, "Seismic analysis of degrading models by means of damage functions concept", *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Fajfar, P., y Krawinkler, H., Editors, Elsevier Applied Science, London and New York, 77-94, 1992.
- **Chopra, A.K.**, Earthquake response of inelastic systems, *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 7, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1995.
- **Davenport, A.G.**, "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading", *Proc. Institution of Civil Engineers*, 28, 187-196, 1964.
- **Dobry, R., Idriss, I.M., y Ng, E.**, "Duration characteristic of horizontal components of strong motion earthquake records", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.68, No.5, 1487-1520, 1978.
- **Donovan, N.C.**, "Earthquake hazards for buildings", *Engineering Bulletin*, No.46, Dames and Moore, Los Angeles, 3-20, 1974.
- **Esteva, L., y Rosenblueth, E.**, "Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes", *Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, Vol.2, No.1, 1-18, 1964.
- **Fajfar, P., Vidic, T., y Fischinger, M.**, "On energy demand and supply in SDOF systems", *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Fajfar, P., y Krawinkler, H., Editors, Elsevier Applied Science, London and New York, 41-62, 1992.

- **Fajfar, P., Vidic, T., y Fischinger, M.**, "Influence of damping model on the seismic response of nonlinear SDOF systems", *Structural Dynamics - EURODYN'93*, Moan *et al.*, Editores, Balkema, Rotterdam, 1, 77-84, 1993.
- **Fajfar, P.**, "Elastic and inelastic design spectra", *Towards a New Seismic Design Methodology for Buildings: Research at the University of Ljubljana*, Fajfar, P., Editor, Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Institute of Structural and Earthquake Engineering, University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia, 101-110, 1996.
- **Herrmann, R.B.**, "An extension of random vibration theory estimates of strong ground motion to large distances", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.75, 1447-1453, 1985.
- **Housner, G.W.**, "Intensity of ground shaking near the causative fault", *Proc. World Conf. Earthquake Eng.*, 3rd, New Zealand, 3, 94-109, 1965.
- **Kunnath, S.K., Reinhorn, A.M., y Lobo, R.F.**, IDARC2D Version 3: A program for the inelastic damage analysis of reinforced concrete structures, *Report No.NCEER-92-0022*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1992.
- **Krawinkler, H., y Nassar, A.A.**, "Seismic design based on ductility an cummulative damage demand and capacities", *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Fajfar, P., y Krawinkler, H., Editors, Elsevier Applied Science, London and New York, 23-40, 1992.
- **Levin, R.I.**, Series de tiempo, *Estadística para administradores*, Capitulo 13, Prentice-Hall Hispanoamericana, México, D.F., 420-456, 1981.
- **Loh, CH.H., y Ho, R.CH.**, "Seismic damage assessment based on different hysteretic rules", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.19, 753-771, 1990.

- **Marzal, R., y Mazari, M.**, Desarrollo de la mecánica de suelos en la ciudad de México, *El subsuelo de la cuenca del valle de México y su relación con la ingeniería de cimentaciones a cinco años del sismo*, 3-24, 1990.
  
- **Newmark, N.M.**, "A method of computation for structural dynamics", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, 85, 67-94, 1959.
  
- **Newmark, N.M., y Rosenblueth, E.**, Respuesta de los sistemas no lineales, *Fundamentos de Ingeniería Sísmica*, Capítulo 11, Editorial Diana, México, D.F., 349-394, 1971.
  
- **Nielsen, N.N., y Imbeault, F.A.**, "Validity of various hysteretic systems", *Proceedings, Third Japan National Conference on Earthquake Engineering*, 707-714, 1971.
  
- **Novikova, E.I., y Trifunac, M.D.**, "Modified Mercalli Intensity scaling of the frequency dependent duration of strong ground motion", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 12, 309-322, 1993.
  
- **Ordaz, M., y Reinoso, E.**, "Uso de la teoría de las vibraciones aleatorias en la determinación de los espectros de diseño del reglamento para las construcciones del D.F.", *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Querétaro, México, A155-A167, 1987.
  
- **Otani, S.**, "Hysteresis models for earthquake response analysis", *Earthquake Resistance of Reinforced Concrete Structures, A Volume Honoring, Hiroyuki Aoyama*, 387-398, November, 1993.
  
- **Papoullis, A.**, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill International Company, Second Edition, 1985.
  
- **Park, T.J., y Ang, H.S.**, "Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete", *Journal Structural Engineering*, ASCE, Vol.111, 722-739, 1985.

- **Park, T.J., Ang, H.S., y Wen, Y.K.**, "Damage-limiting aseismic design of buildings", *Earthquake Spectra*, May, 1986.
  
- **Park, T.J., Reinhorn, A.M., y Kunnath, S.K.**, IDARC2D : Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame-shear-wall structures, *Technical Report NCEER-87-0008*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1987.
  
- **Quass, R., et al.**, "Reporte preliminar de los registros del temblor del 14 de septiembre de 1995 (M=7.3) obtenidos por la red de observación sísmica del CENAPRED", Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, 1995.
  
- **Reinoso, E.**, "Características sísmicas de la ciudad de México: amplificación de las ondas sísmicas en el valle de México, características del movimiento del terreno y microzonificación de la ciudad", *Curso de seguridad sísmica de las construcciones para directores de obra*, Sistema Nacional de Protección Civil, CENAPRED, México, D.F., 53-82, febrero, 1995.
  
- **Rodríguez, J.C.**, *Estudio de sismos de subducción que afectan a la ciudad de México*, Tesis de Licenciatura, Universidad La Salle, Escuela de Ingeniería, México, D.F., 1996.
  
- **Rodríguez, M., y Montoya, C.**, "Análisis de la resistencia y ductilidad de marcos de concreto reforzado", *Revista Ingeniería Sísmica*, No.39, México, D.F., 1990.
  
- **Rodríguez, M.**, "A measure of the capacity of earthquake ground motions to damage structure", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.23, 627-643, 1994.
  
- **Rodríguez, M., y Botero Palacio, J.C.**, "Aspectos de comportamiento sísmico de estructuras de concreto reforzado considerando las propiedades mecánicas de aceros producidos en México", *Instituto de Ingeniería*, No.575, México, D.F., 1996.

- **Scott, B.D., Park, R., y Priestley, M.J.N.**, "Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates", *ACI Journal*, January-February, 13-27, 1982.
  
- **Singh, S.K., Mena, E., Castro, R., y Carmona, C.**, "Empirical prediction of ground motion in Mexico city from coastal earthquake", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.77, 1862-1867, 1987.
  
- **Singh, S.K., Mori, A., Mena, E., Kruger, F., y Kind, R.**, "Evidence for anomalous body-waves radiation between 0.3 and 0.7 Hz from the 1985 september 19 Michoacan, Mexico earthquake", *Geophys. J. Int.*, 101, 37-48, 1990.
  
- **Singh, S.K., y Ordaz, M.**, "Sismicidad y movimientos fuertes en México: una visión actual", *Memorias del Simposio Internacional: La ingeniería civil a 10 años de los sismos de 1985*, 1-32, 1995.
  
- **Takeda, T., Sozen, M.A., y Nielsen, N.N.**, "Reinforced concrete response to simulated earthquake", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.96, No.ST12, december, 2557-2573, 1970.
  
- **Trifunac, M.D., y Brady, A.G.**, "A study on the duration of strong earthquake ground motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.65, No.3, 581-626, 1975.
  
- **UNAM Seismology Group**, "The September 1985 earthquakes: aftershocks distribution and history of rupture", *Geophys. Res. Lett.*, 13, 573-576, 1986.
  
- **Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C., y Madan, A.**, IDARC2D Version 4: A Computer Program for the Inelastic Damage Analysis of Building, *Technical Report NCEER-96-0010*, State University of New York at Buffalo, 1996.

- **Vanmarcke, E.H.**, Structural response to earthquake, *Seismic Risk an Engineering Decisions*, C. Lomnitz and E. Rosenblueth, Editores, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 287-337, 1976.
  
- **Wilson, E.L., y Habibullah, A.**, "SAP90 - A series of computer programs for the static and dynamic finite element analysis of structures. User's manual", *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, 1988.
  
- **Wilson, E.L., y Habibullah, A.**, "ETABS. User's manual", *Computers and Structures, Inc.*, Berkeley, California, 1989.
  
- **Zahrah, T., y Hall, W.J.**, "Earthquake energy absorption in SDOF structures", *Journal Structural Engineering*, ASCE, Vol.110, 1757-1772, 1984.