

TESIS SIN PAGINACION

01161

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

2
2ej

ESTUDIO DE RIESGO SISMICO PARA CHILPANCINGO.

JORGE EDUARDO CARBALLO AREVALO.

TESIS

PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DE LA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)

CIUDAD UNIVERSITARIA

JULIO DE 1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

Agradecimientos.

Al Área de Estructuras de la Universidad Autónoma Metropolitana, quien me apoyó durante la elaboración de este trabajo y durante mis estudios de posgrado y quien es culpable por mi elección en este campo de la ingeniería. Sobre todo a mis antes maestros, ahora amigos y compañeros: al aglomerante de este concreto, Jesús, y a todos los que forman parte del Área: Alonso, Amador, Emilio, Hugón, Jorge, José Juan, Juan Pedro, Manuel.

A mis maestros de la DEPMI, en especial a Julio Damy, Neftalí Rodríguez, Mario Ordaz y a F.J. Sánchez-Sesma, por mantener mi curiosidad.

A quienes se esforzaron en leer este trabajo y mejorarlo con sus comentarios: Jesús Iglesias, Ricardo Guzmán, José Luis Trigos, Jaime Grabinsky, Losé Manuel Jara, Sonia Ruiz y Gustavo Ayala.

A Roberto Quaas y Leonardo Alcántara del Instituto de Ingeniería, y a Gerardo Suárez y Ramón Zúñiga del Instituto de Geofísica por la valiosa información proporcionada.

ESTUDIO DE RIESGO SISMICO PARA CHILPANCINGO, GUERRERO.

CONTENIDO:

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

- 1.1 OBJETIVOS
- 1.2 METODOLOGIA

CAPITULO 2: SISMICIDAD

- 2.1 MECANISMOS Y ZONAS SISMOGÉNICAS
- 2.2 SISMICIDAD LOCAL

CAPITULO 3: ATENUACION DE LAS ONDAS SÍSMICAS

- 3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE
- 3.2 MODELO MATEMÁTICO
- 3.3 LEYES DE ATENUACIÓN

CAPITULO 4: PELIGRO SÍSMICO

- 4.1 PLANTEAMIENTO DETERMINISTA
 - 4.1.1 POSIBLE PEOR ESCENARIO
 - 4.1.2 CÁLCULO DE MÁXIMAS INTENSIDADES ESPECTRALES POSIBLES
- 4.2 PLANTEAMIENTO PROBABILISTA
 - 4.2.1 PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA
 - 4.2.2 ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO
- 4.3 COMPARACION DE RESULTADOS DE ACCIONES OPERACIONALES CON ACCIDENTALES.

CAPITULO 5: ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTO

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS.

CAPITULO 1 INTRODUCCION

1.1 OBJETIVOS

1.2 METODOLOGIA

1.1 Objetivos.

El presente trabajo está enfocado a proporcionar parámetros de diseño sísmico en forma de espectro de diseño, con el fin de complementar la propuesta de microzonificación sísmica para la Cd. de Chilpancingo Guerrero, elaborada por la Universidad Autónoma de Guerrero (ref. 19) y la Universidad Autónoma Metropolitana. No obstante que en dicha propuesta se definen dos zonas sísmicas, el alcance del presente trabajo sólo abarca la definición de parámetros de diseño correspondientes a una de ellas, la zona II, que corresponde a periodos de vibración natural entre 0.4 y 0.7seg. Esta zona corresponde comparativamente a la zona de transición del Valle de México (figs. 1.1 y 1.2).

1.2. Metodología.

Para la obtención de los parámetros de diseño sísmico se emplean métodos de la herramienta de toma de decisiones llamada Análisis de Riesgo Sísmico (ARS), que es un acercamiento probabilista al problema, lo cual complementa el enfoque determinista también utilizado. La comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos, tomados en cuenta con criterios de ingeniería, permite elaborar una propuesta final.

El estudio determinista del problema sísmico se hace a partir de la evaluación de escenarios que pudieran existir; esto es, se estiman las características (como magnitud y distancia) de sismos que representan diversas condiciones límite, y se evalúa la respuesta espectral del sitio de interés. La respuesta se suele calcular con funciones que relacionan las características del temblor con la intensidad, denominadas leyes de atenuación. Este método no toma en cuenta las características aleatorias del fenómeno. Al elegir un posible peor escenario se puede aproximar la cota superior de las acciones sobre las estructuras con el fin de sensibilizar al responsable de la elección de los parámetros de diseño. Para completar el panorama conviene utilizar el ARS que sitúa los posibles escenarios en un marco probabilista y permite escoger situaciones con un riesgo asociado a consideraciones económicas aceptables.

El alcance de este trabajo en realidad abarca sólo parte de lo que globalmente se conoce como ARS, lo cubierto con el título de Análisis de

Peligro Sísmico (APS); el APS no considera la vulnerabilidad de las estructuras existentes en el sitio de interés. Es por la apenas reciente diferenciación de estos dos procedimientos, ARS y APS, que se ha optado dejar en el título el término de Riesgo Sísmico, aunque estrictamente se debe entender como Peligro Sísmico (aislado de las siglas ARS o APS se considera peligro como sinónimo de riesgo, entendiendo cierta contingencia de un daño). El enfoque probabilista considera las incertidumbres asociadas a las variables que intervienen en las acciones a considerar sobre las estructuras; éstas incluyen la distribución espacial de las fuentes sismogénicas y de las probabilidades de ocurrencia de los sismos dentro de ellas, las probabilidades propias de las magnitudes y las probabilidades asociadas a las leyes de atenuación. El APS permite relacionar las intensidades sísmicas con su probabilidad de excedencia. Mediante funciones de daños, que relacionan intensidades con costos esperados, el ARS proporciona bases para poder situar económicamente los niveles propuestos de diseño y así proponer coeficientes de diseño sísmico económicamente óptimos.

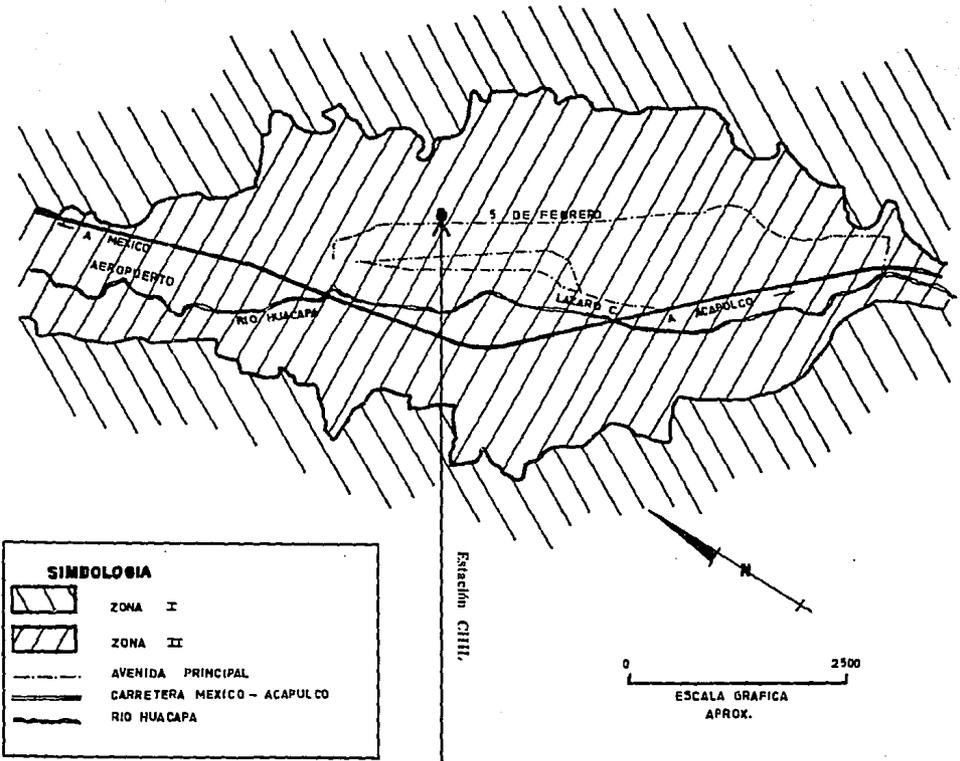


Figura 1.1
Zonificación Sísmica de Chilpancingo

CAPITULO 2. SISMICIDAD

2.1.MECANISMOS Y ZONAS SISMOGENICAS

2.2.SISMICIDAD LOCAL

En este capítulo se describen las zonas sismogénicas consideradas en el APS, así como la sismicidad local, o sea el proceso de ocurrencia de temblores generados en ellas.

Cabe mencionar que para el presente trabajo se emplearon íntegramente los datos propuestos en la referencia 11 puesto que era la única fuente de información completa disponible a la fecha de elaboración. Existen modelos más precisos, tanto para la zonificación de la sismogénesis como para la sismicidad local, preparados por el Instituto de Geofísica y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, que no habían sido publicados aun. Cabe hacer mención que se contempla a mediados del presente año (1994) la publicación de un Catálogo de Acelerogramas, por parte de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, como lo hace saber su boletín de mayo de 1994.

2.1. Mecanismos y Zonas Sismogénicas.

El riesgo sísmico para la ciudad de Chilpancingo, y en general para todo el estado de Guerrero, proviene principalmente del proceso de subducción de placas tectónicas de la costa del Pacífico. Con bastante precisión se pudo haber descrito el riesgo considerando sólo este mecanismo (ver 4.1.1); no obstante se incluyó en el trabajo la participación del riesgo proveniente de zonas que estuvieran dentro de un radio de 500km del sitio, radio a partir del cual ya no se consideran efectos importantes dada la ocurrencia de un sismo (refs. 10 y 20). Tomando esto en cuenta, el trabajo consideró dos fuentes principales de participación en el riesgo: el Eje Neovolcánico Mexicano (ENM) y la Zona de Subducción del Pacífico Mexicano (SPM).

El eje neovolcánico o cinturón volcánico transmexicano es una zona prominente de volcanismo que atraviesa el país a la altura del paralelo 19° con un ancho de 200 a 300km, como lo demuestra la distribución de los principales aparatos volcánicos mostrada en la figura 2.1 (ref. 14). El ENM es la fuente del volcanismo moderno en México y de sismos de magnitudes moderadamente grandes de profundidad intermedia. Los sismos generados son provocados generalmente por procesos de falla normal, controlados por esfuerzos tensionales de la corteza (ref.15). Se ha considerado su participación

en el riesgo, aunque el peligro sísmico que representa afecta primordialmente a la zona epicentral dada su poca profundidad, que se consideró en el modelo entre 40 y 50 km (ref.11).

La zona SPM genera temblores a causa de la subducción de la relativamente pequeña placa de Cocos bajo la placa de Norteamérica (fig.2.2). A este proceso asociamos temblores interplaca que ocurren como resultado de fallas inversas en el contacto entre placas a profundidades someras; temblores intraplaca asociados al fracturamiento de la placa subducente, que ocurren a profundidades mayores (40 - 150km); e intraplaca, debidos a deformaciones de compresión de la corteza de la Placa de Norteamérica, que producen sismos someros (figs. 2.2 y 2.3).

El entendimiento de los mecanismos sismogénicos conlleva la proposición de fuentes sismogénicas definidas espacialmente. En el presente estudio se supone uniforme la generación de temblores en toda su extensión. Se consideran seis zonas sismogénicas asociadas a las dos grandes fuentes anteriormente descritas, las cuales fueron tomadas de la referencia 11 (fig. 2.4). Recordemos que sólo se ha considerado un radio de influencia de 500km por lo cual las regiones de estas zonas previamente definidas que sobresalen del radio de influencia mencionado no participan en el cómputo del peligro sísmico para el sitio.

La fuente ENM ha sido modelada con dos zonas, Cinturón Volcánico Oeste (CVO) y Cinturón Volcánico Este (CVE) (fig. 2.4), que corresponden aproximadamente a las zonas sísmicas 5 y 13 y parte de la 3 propuestas en 1970 por Esteva para la regionalización sísmica de la República Mexicana (ref.16), las cuales son mostradas en la figura 2.5.

La fuente SPM ha sido modelada con cuatro zonas, en función de los mecanismos de generación y de las profundidades promedio de ocurrencia que se postularon en la referencia 11 (fig.2.3). Las zonas son denominadas: Subducción Somera Sur Oeste (SSSO), la cual es la de mayor participación en el riesgo, Subducción Profunda Sur Oeste (SPSO), Corteza Superficial Sur Oeste (CSSO) y Corteza Profunda Sur Oeste (CPSO) (fig. 2.4). Notamos que las zonas SPSO y CSSO coinciden en su proyección horizontal, pero corresponden a distintas profundidades y mecanismos de generación. La proyección de la zona CPSO está contenida en la de la CSSO, pero

obviamente corresponde a una mayor profundidad. La división de la fuente SPM corresponde aproximadamente a las zonas 1 y 2 definidas en la referencia 16 (fig2.5).

Para modelar las zonas sismogénicas en el APS se les asocia una profundidad determinada (fig.2.3), la cual fue obtenida para cada zona de un promedio de profundidades de temblores ocurridos en ellas, así como de consideraciones tectónicas (ref. 11). La manera de tomar en cuenta la zona inclinada de la falla inversa (de subducción) fue con dos planos horizontales con profundidades propias. La zona de corteza también fue considerada para planos horizontales a distintas profundidades. La profundidad asignada a cada zona es la siguiente (ref. 11):

zona	profundidad (km)
CVO	40
CVE	50
CSSO	30
CPSO	80
SPSO	120
SSSO	45

Se hace notar que la designación de una profundidad promedio para los eventos que ocurren dentro de cada una de las zonas es también una simplificación del problema, pues debería considerarse una distribución probabilista de las profundidades con que ocurren. La disposición y ubicación de las zonas se muestra en la figura 2.4 en la que se consideran los contornos ajustados para simplicidad en el modelado.

2.2 Sismicidad Local.

Definidas las zonas de generación de temblores es necesario determinar los parámetros que representarán la función de densidad de probabilidades para las magnitudes de dichos temblores. En primera instancia se define para cada zona su sismicidad local, esto es, se describe el proceso de ocurrencia de los temblores en la zona mediante curvas de tasas de excedencia de magnitud ($\lambda(M)$) que son la frecuencia con la que ocurren temblores de magnitud mayor o igual a cierto valor, en un lapso definido, generalmente

un año. En este trabajo se presentan estas tasas anuales para valores de la magnitud M siempre mayores a $M_0=4$, al haberse considerado en la referencia 11 como el mínimo valor que podría ocasionar daño. Tradicionalmente se han manejado tasas de excedencia de magnitudes descritas por la relación Gutenberg-Richter:

$$\log N(M) = a - bM$$

donde $N(M)$ es el número de temblores ocurridos en un tiempo determinado, con magnitudes mayores a M .

Para definir los parámetros de esta recta en escala logarítmica se ha de recurrir a los datos históricos provenientes de catálogos de temblores. Se verifica en escala logarítmica que los valores se ajustan a una recta en las magnitudes moderadas a bajas, y que tienden asintóticamente a la vertical definida por la máxima magnitud (M_u) que puede ocurrir en la zona (figs. 2.6 a 2.11). Esta magnitud M_u es determinada evaluando para la zona en cuestión la tendencia de las magnitudes, si es que se cuenta con una buena base de datos, o bien se evalúa con bases tectónicas, conocidas las longitudes de ruptura y la relación entre ellas y las magnitudes que pueden generar. Por otro lado, en algunas regiones sismogénicas y para ciertos valores hay un tramo horizontal, asociado a magnitudes de temblores denominados característicos que tienen cierta preferencia a ocurrir.

Si definimos la ocurrencia de temblores cuyas magnitudes estuvieran comprendidas entre ciertos valores M_0 y M_u por la relación Gutenberg-Richter, y suponemos que el tamaño de eventos sucesivos es independiente (proceso de Poisson), se pueden derivar funciones de densidad de probabilidad de magnitudes de forma exponencial truncada. Esta densidad no puede ajustarse adecuadamente a los temblores característicos. La ocurrencia de este tipo de temblores es debido a que sus magnitudes parecen seguir un modelo denominado deslizamiento predecible, en el cual en cuanto mayor sea el tiempo sin temblar, mayor será la magnitud del siguiente temblor. Esto significa que, contraponiéndose al proceso de Poisson, las magnitudes dependen del tiempo entre los eventos. Se considera sin embargo que el proceso de Poisson es válido para representar procesos de acumulación y liberación de deformaciones tectónicas poco entendidas (ésto es, de cierto carácter aleatorio), o bien para procesos cíclicos en los que la localización en

el ciclo sísmico es desconocida.

Cabe hacer notar que la tasa de excedencia debe representar toda la gama de magnitudes factibles de ocurrir en la zona. Para poder proponer parámetros del modelo que represente la sismicidad de la fuente, se debe uno basar en datos existentes obtenidos de catálogos de temblores, que registran varias escalas de magnitud. Estas se determinaron a partir de diversas componentes de las ondas sísmicas; su apego a escalas como M_w o magnitud de momento que se derivan directamente de las variables físicas que intervienen en la generación de los sismos telúricos se da sólo en algunos intervalos. Para magnitudes hasta de 6 suele considerarse m_b (magnitud de ondas de cuerpo) y M_s (magnitud de ondas superficiales) para magnitudes mayores (referencias 3 y 13). De esta manera, el modelo a considerar se deberá apegar a esta dualidad de escalas.

La referencia 11, de donde se obtuvo la definición de las provincias sísmo-generadoras, propone para éstas modelos de ocurrencia lineales en escala logarítmica considerando dos tramos o ramas excepto para CPSO, donde el modelo contempla sólo una rama, conservadoramente. Esto es para tomar en cuenta la no linealidad real y además para absorber conservadoramente las magnitudes de temblores característicos al asignarles mayores ocurrencias. Así el M_u del primer tramo lineal corresponde al M_o del siguiente. De esta manera se considera la participación de cada una de las zonas dos veces, una por cada rama, con magnitudes entre sus propias M_o y M_u exponencialmente distribuidas (excepto para CPSO, que se definió con una sola rama, fig.2.9). Una caracterización de los datos para zonas que presentan temblores característicos podría haber sido hecha con tres rectas en vez de dos. Podemos notar que, en general, los datos correspondientes a magnitudes bajas parecen estar por debajo de la recta propuesta; esto debido a que sólo hasta hace unos 10 años los catálogos de temblores presentaban completez para magnitudes mayores a 4; esto es, no todos los temblores con cierta magnitud eran registrados, por deficiencia en la red de instrumentación sísmica. Los parámetros que definen cada una de las rectas Gutenberg-Richter son los siguientes: la pendiente b de las rectas; los valores de M_o y M_u que limitan cada una de ellas; y $\lambda(M_o)$, que es el número anual de eventos de magnitud mayor o igual a M_o , o sea la ordenada correspondiente al valor M_o .

Para cada rama delimitada por su M_o y M_u , la distribución acumulativa de magnitud está dada por:

$$F_M(M) = k(1 - \exp(-\beta(M - M_o))), \text{ para } M_o \leq M \leq M_u$$

donde $\beta = b \ln 10$ y $k = (1 - \exp(-\beta(M_u - M_o)))^{-1}$. La función de densidad de probabilidades de la magnitud está dada por:

$$f_M(M) = \beta k \exp(-\beta(M - M_o)), \text{ para } M_o \leq M \leq M_u .$$

Los parámetros de las tasas de excedencia de magnitudes, en sus dos tramos, y para cada zona, fueron propuestos en la referencia 11 para ajustar los datos de catálogos de temblores para registros correspondientes al periodo de observación entre 1904 y 1980.

Para este trabajo se tuvo acceso a catálogos proporcionados por el Instituto de Geofísica de la UNAM, los cuales se utilizaron para complementar el periodo original de observación de 77 años a 11 años más (para el periodo comprendido entre 1981 y 1991). La tasa de excedencia de magnitudes $\lambda(M)$ corregida para un periodo ahora de 88 años sería entonces:

$$\lambda_{88} = (n_{77} + n_{11}) / 88$$

donde λ_{88} es la tasa corregida, asociada a cierta magnitud M , n_{77} es el número de temblores $\geq M$ observados de 1904 a 1980 (77 años) y n_{11} es el número de temblores $\geq M$ observados de 1981 a 1991 (11 años).

Las tasas corregidas no variaron sensiblemente respecto de las consideradas en la referencia 11 en donde hubo suficientes datos, y en algunos casos no se tuvo información suficiente. Por lo anterior se optó por mantener los parámetros allí propuestos que fueron ajustados a los datos observados en los primeros 77 años (figuras 2.6 - 2.11). Estas tasas corregidas están ligeramente por encima de los valores originales, y dado que las rectas propuestas tienen cierta holgura respecto de éstos, siguen envolviendo las tasas corregidas.

Entonces, la sismicidad considerada para cada zona está definida por los

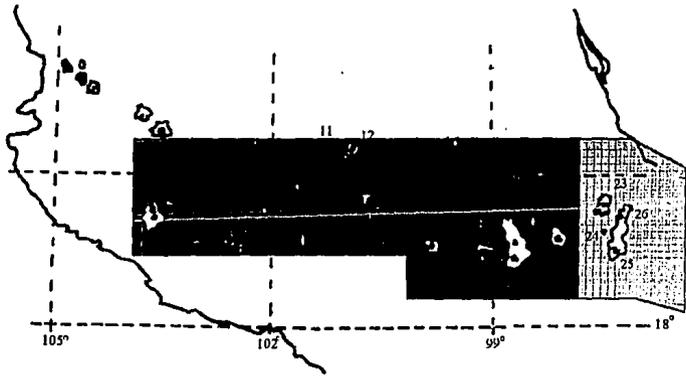
siguientes valores:

zona	Mo	rama 1				rama 2						
		a	b	$\lambda(M_0)$	β	M_u	M_0	a	b	$\lambda(M_0)$	β	M_u
CVO	4.0	0.549	0.155	0.848	0.357	6.3	6.3	4.064	0.713	0.373	1.642	7.4
CVE	4.0	2.040	0.466	1.500	1.073	7.0	7.0	4.571	0.827	0.060	1.905	7.4
CSSO	4.0	1.802	0.364	2.220	0.838	6.3	6.3	12.31	2.032	0.323	4.678	7.4
CPSO	4.0	2.971	0.627	2.900	1.444	7.4	---	---	---	---	---	---
SPSO	4.0	3.367	0.630	7.000	1.451	6.9	6.9	8.898	1.432	0.104	3.297	7.6
SSSO	4.0	3.746	0.546	36.40	1.258	7.2	7.2	7566	1.077	0.650	2.480	8.4

Tabla 2.1.
Parámetros de sismicidad local

Cabe mencionar que existen sismos cuya ocurrencia no puede en verdad asociarse a mecanismos conocidos, que en conjunto conforman la denominada sismicidad de fondo. Es usual asociar una zona de forma y dimensión arbitraria para incluir la sismicidad de fondo; no obstante, dada la escasa participación en el riesgo que tiene este tipo de sismos, así como por simplicidad, los eventos registrados en los catálogos fueron ubicados en la zona correspondiente, dada su posición geográfica, por lo que no se definió una zona de sismicidad de fondo.

En las figuras 2.6 a 2.11 se presentan para cada zona los datos originales, los datos ajustados y las rectas consideradas en la sismicidad.



- | | | | |
|--------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------|
| 1 Nevado de Colima | 9 Volcán de Capatiro | 17 Nevado de Toluca | 25 Pico de Orizaba |
| 2 Volcán de Colima | 10 Jorillo | 18 Xitle | 26 Cofre de Perote |
| 3 Volcán Apaxtepec | 11 Mares de Vallo de Santiago | 19 Sierra Chichinautzin | |
| 4 Cerro Grande | 12 Cerro de la Gavia | 20 Iztaccihuatl | |
| 5 Cerro Palambán | 13 Cerro Culliacán | 21 Popocatepetl | |
| 6 Volcán Parícutin | 14 Los Azufres | 22 Volcán de La Malinche | |
| 7 Cerro Tancitaro | 15 Caldera de Amealco | 23 Los Hornos | |
| 8 Cerro Buenavista | 16 Caldera de Huijilapam | 24 Cerro Derrumbadas | |

 CVO
 CVE

Figura 2.1
Aparatos Volcánicos del Eje Neovolcánico (ENM)

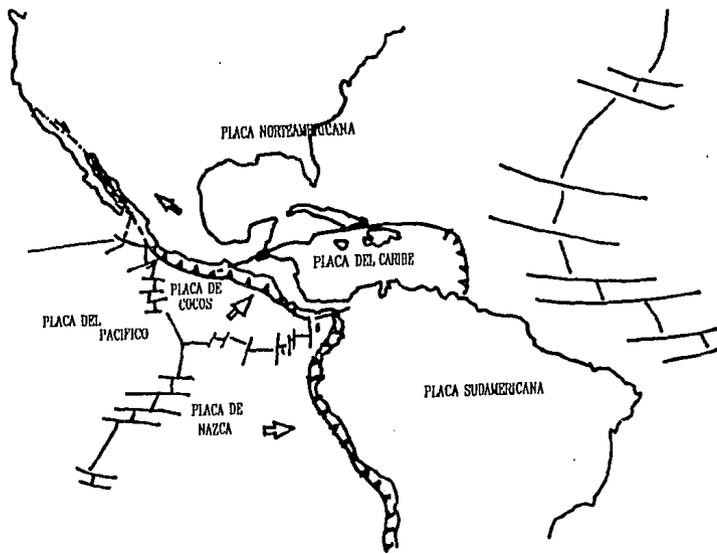


Figura 2.2
Subducción de la placa de Cocos

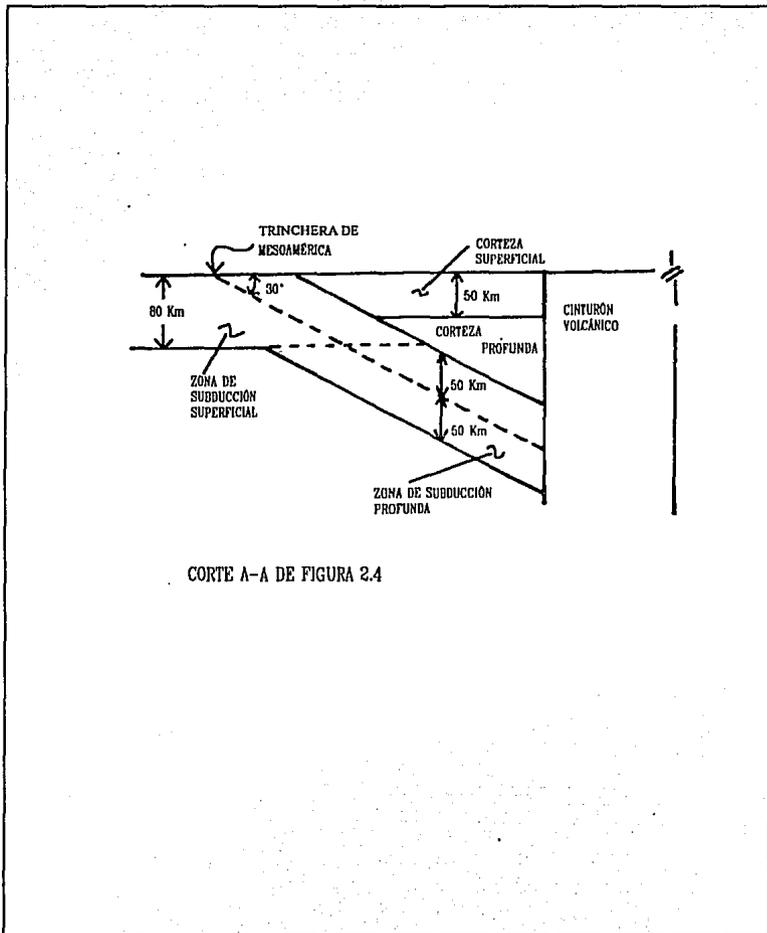


Figura 2.3
Mecanismos Sismogénicos

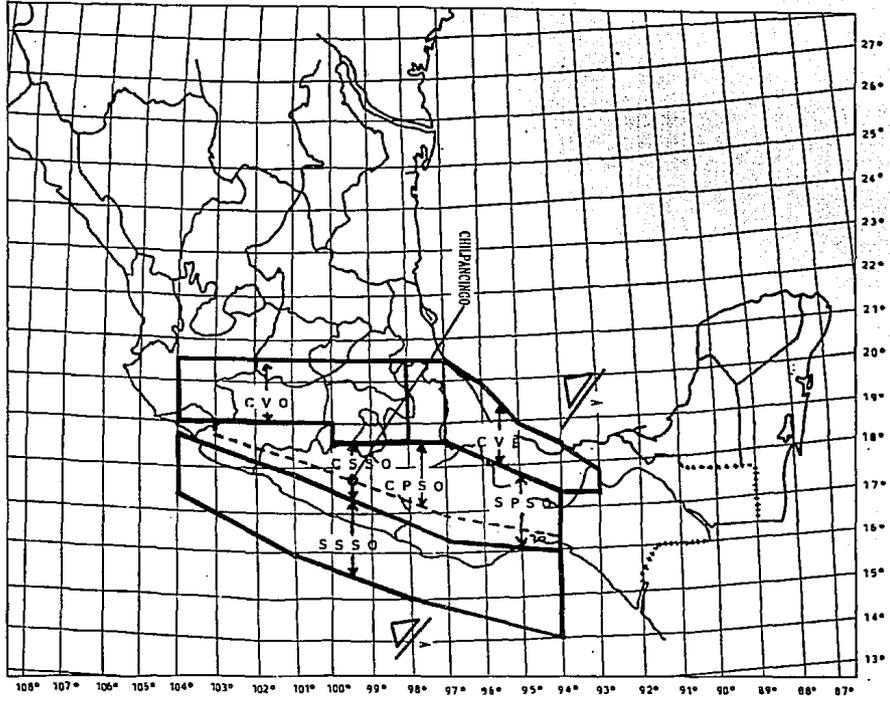


Figura 2.4
Zonas Sísmicas

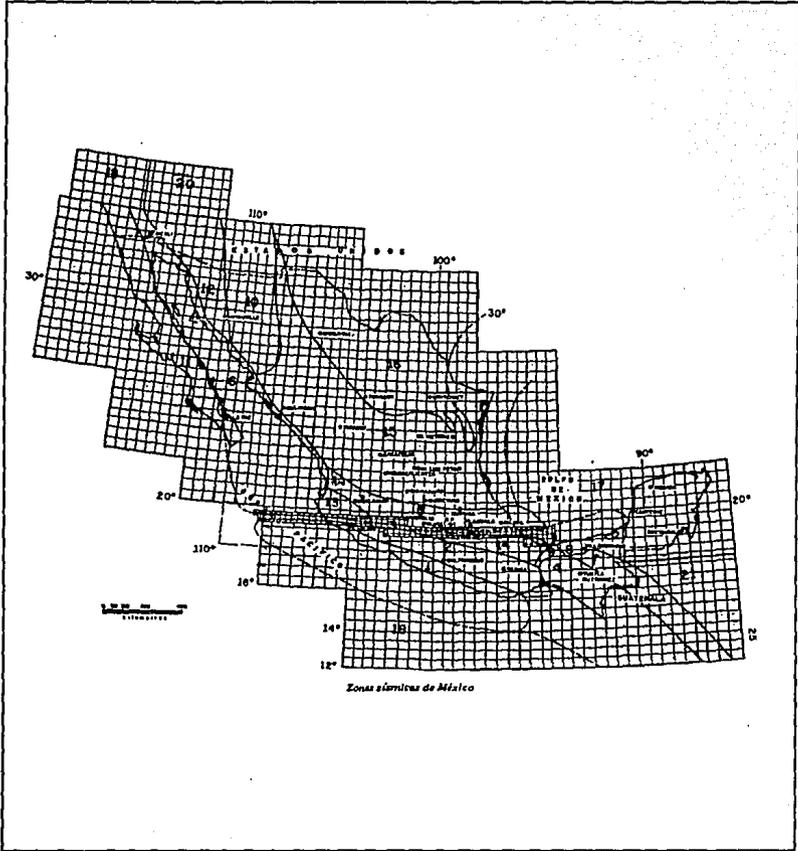


Figura 2.5
Zonas Sísmicas definidas por Esteva (ref.16)

CVO

TASA DE EXCEDENCIA DE M

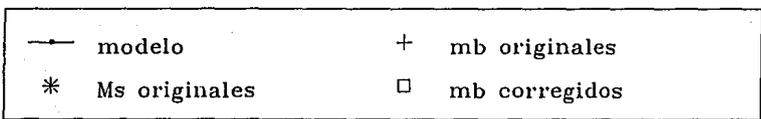
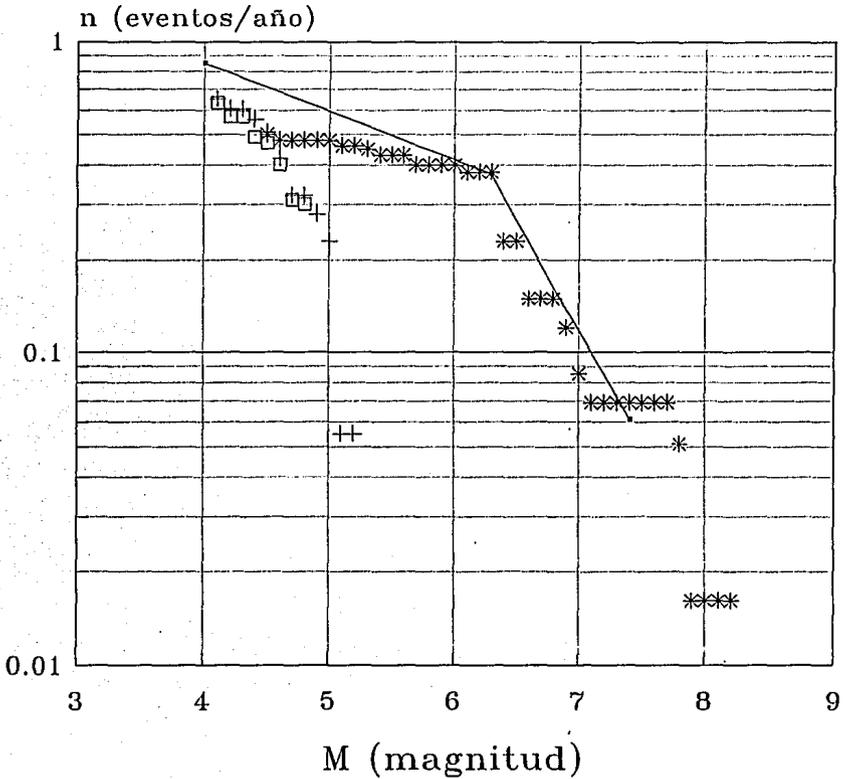


Figura 2.6
Tasa de excedencia de magnitudes para CVO

CVE

TASA DE EXCEDENCIA DE MAGNITUDE

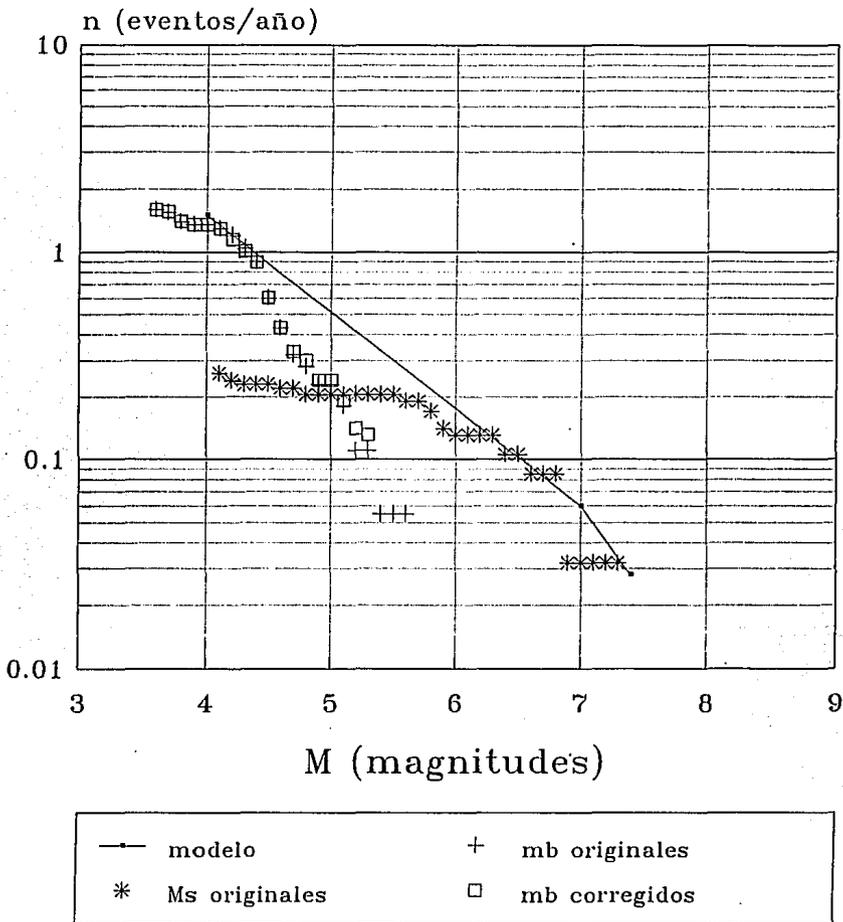


Figura 2.7
Tasa de excedencia de magnitudes para CVE

CSS0

TASA DE EXCEDENCIA DE MAGNITUDE

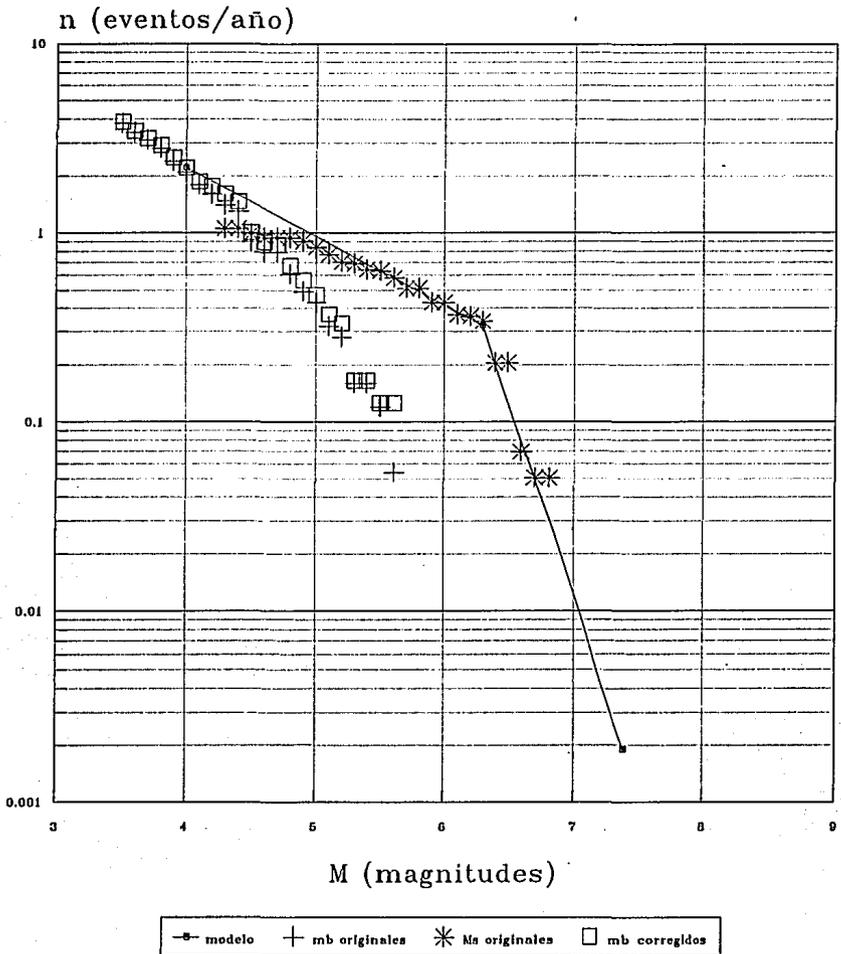


Figura 2.8
Tasa de excedencia de magnitudes para CSS0

CPSO

TASA DE EXCEDENCIA DE MAGNITUD

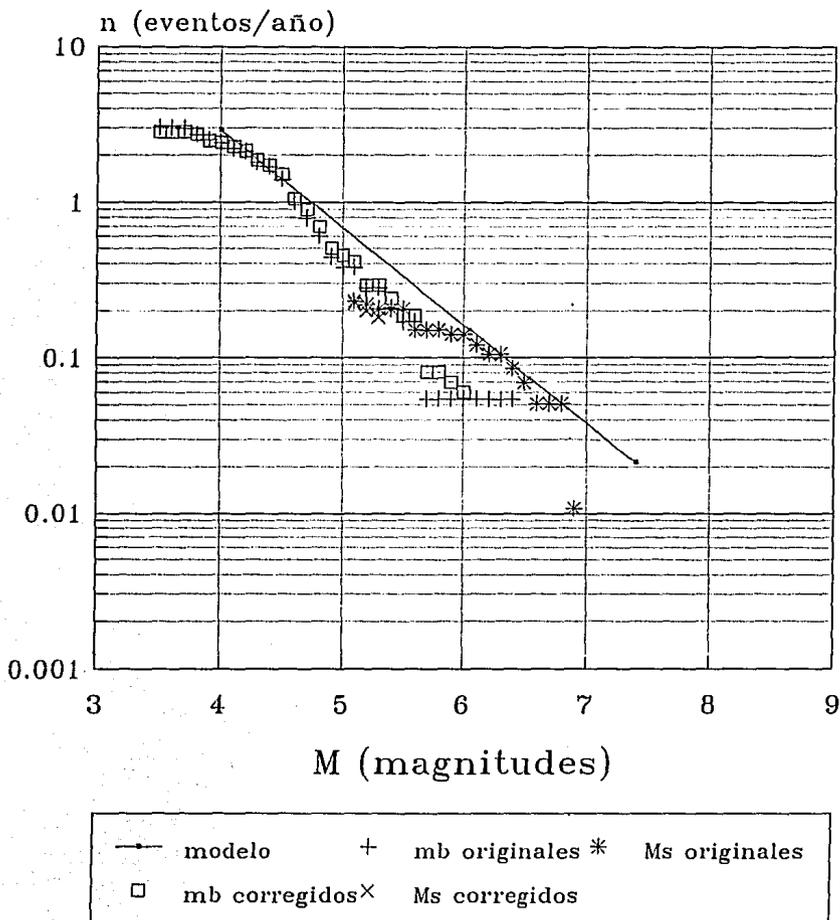


Figura 2.9
Tasa de excedencia de magnitudes para CPSO

SPSO

TASA DE EXCEDENCIA DE MAGNITUD

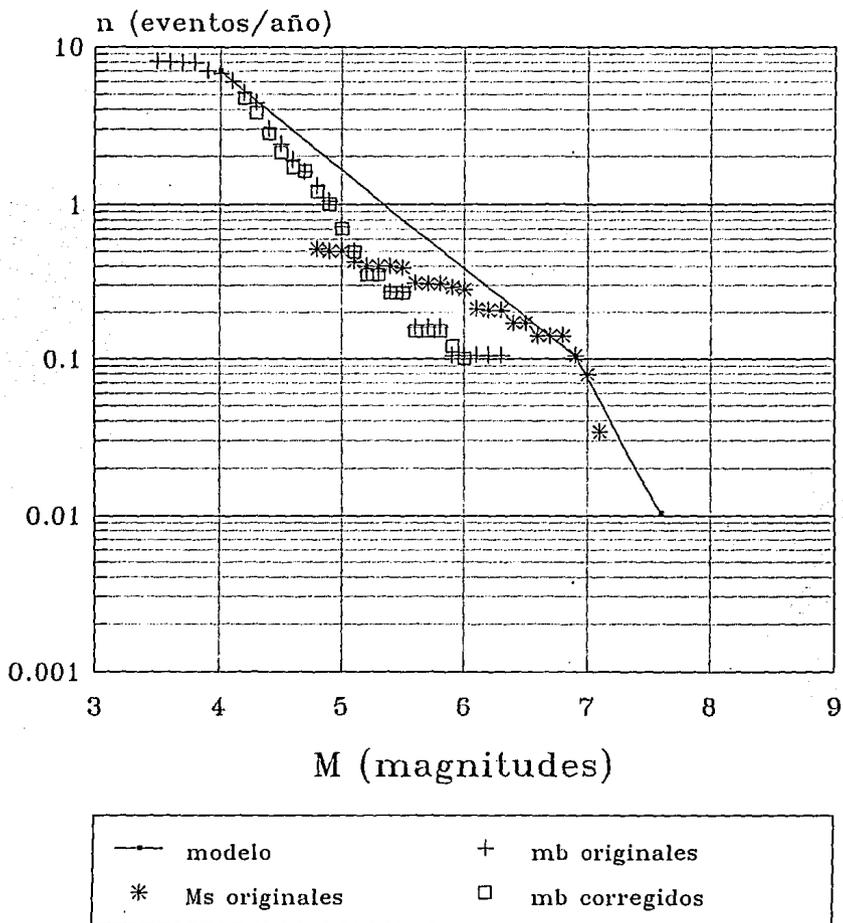


Figura 2.10
Tasa de excedencia de magnitudes para SPSO

SSSO

TASA DE EXCEDENCIA DE M

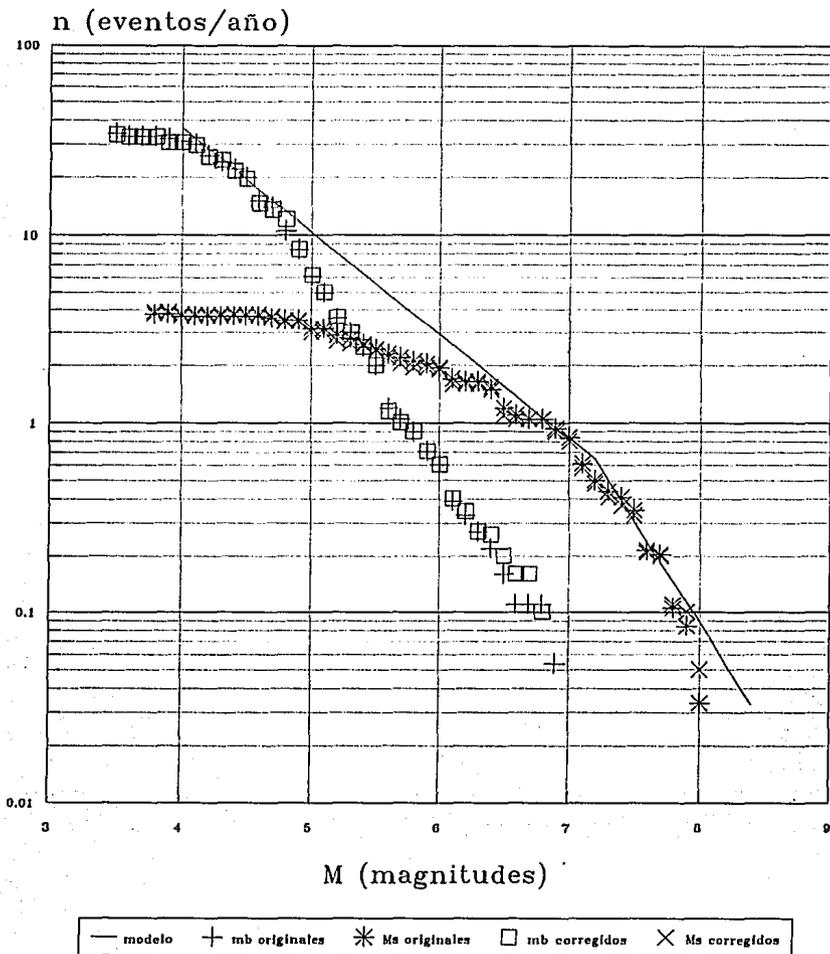


Figura 2.11
Tasa de excedencia de magnitudes para SSSO

CAPITULO 3. ATENUACION DE LAS ONDAS SISMICAS.

3.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.2 MODELO MATEMÁTICO

3.3 LEYES DE ATENUACIÓN

Una cierta intensidad asociada a un sitio en particular se puede relacionar con la magnitud de un sismo y con su distancia al punto donde se originó mediante una llamada ley de atenuación. Esta intensidad suele ser pseudovelocidad o pseudoaceleración espectral; aceleración, velocidad o desplazamiento máximo del terreno; e intensidad de Mercalli.

Tradicionalmente han existido leyes de atenuación desarrolladas a partir de registros existentes no siempre correspondientes a un mismo sitio (ref. 3). Estas leyes, además, generalmente se limitan a describir sólo la aceleración máxima del terreno, que por sí sola carece de correlación significativa con el comportamiento estructural. Incluso se han utilizado leyes para regiones distintas de donde se originaron, al no existir información local. A medida que sea más extensa la instrumentación sísmica, se podrá contar con datos que generen leyes de atenuación propias para distintos sitios. El uso de leyes de atenuación generales puede conducir a resultados poco conservadores e incluso errados para la predicción de efectos en un determinado lugar.

Con el fin de generar leyes de atenuación asociadas al sitio, de carácter espectral, se calcularon espectros de respuesta de pseudoaceleraciones de registros con los que se contó (v. 3.1), para periodos estructurales entre 0.1 y 4.2 seg a cada 0.1 seg, para el 5% del amortiguamiento crítico.

3.1 Información disponible.

Para evitar el empleo de relaciones de carácter general en este trabajo se generaron leyes de atenuación propias para la ciudad de Chilpancingo. Este procedimiento sería muy poco factible para estudios en sitios donde a diferencia de este sitio se carezca de registros sísmicos.

Se contó con diez acelerogramas registrados en la estación Chilpancingo (CHIL, (17.553N, 99.500W), fig. 1.1) de la red del Instituto de Ingeniería de la UNAM, correspondientes a cinco temblores ocurridos en los últimos 15 años, para dos direcciones ortogonales (dirección L y T). Se hizo el intento de usar otros seis registros para aumentar la base de datos, los cuales correspondían a registros más recientes de la estación Petaquillas (PET) ubicada a unos 8.5 kilómetros al sur de CHIL, de la red de acelerógrafos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

No pudo emplearse este último conjunto de registros por la diferente naturaleza de las señales que, como se describirá adelante, impedía que se consideraran juntos.

Tenemos que tener en cuenta que para mantener lo más baja posible la dispersión en las predicciones se debe procurar ciertos niveles de calidad y consistencia en los datos. Con esto se espera que los datos sean elegidos para que representen:

- 1) Provincias sísmo-tectónicas de atenuación y características de la fuente similares.
- 2) Acelerógrafos de similar respuesta.
- 3) Técnicas de procesamiento adecuadas.
- 4) Parámetros de sitio, estructura y movimiento fuerte del medio consistentes.

La primera diferencia importante que presentaban los dos grupos de registros disponibles era el tipo de terreno en que se desplantaban las estaciones. Se intentó incorporar los datos de PET a la base de datos a través de filtrar las señales; esto es, conocida la estratigrafía bajo la estación CHIL, en un modelo bidimensional se excitó la base rocosa obteniéndose la respuesta en la superficie para cada acelerograma, y de éstos se calcularon espectros de respuesta. Los registros obtenidos de la estación Chilpancingo son asociados a un sitio con periodo natural de vibración de alrededor de 0.5 seg (ref. 19). El aparato que los registró está alojado en la planta baja de un edificio de concreto de más de dos niveles que corresponde a la clasificación de grandes edificaciones dada por Boore en la referencia 3. Los registros de la estación Petaquillas corresponden a un aparato alojado en una pequeña y ligera caseta sobre roca firme, que para la misma clasificación se considera como pequeño edificio de alojamiento. El problema que puede presentarse con señales registradas en la base de edificaciones grandes es la subestimación de periodos bajos (ref. 3). Teniendo los registros filtrados, y según el procedimiento para generar leyes de atenuación que se describirá más adelante, se obtuvieron representaciones de los espectros de respuesta en general adecuadas. El problema es que todas las leyes de atenuación presentaban coeficientes que se contraponían a las formas funcionales escogidas (ver más adelante), y que las desviaciones estándar eran muy grandes en algunos casos.

Aparte de que los datos asociados a terreno firme eran aún más escasos, su aplicabilidad en cuanto a magnitudes no hubiera sido representativa para proponer los espectros de diseño apropiados, debido a que el efecto de sismos con estas magnitudes, a las distancias que se presentaron, es muy pequeño como para ser considerado en algún diseño. Además, la escala de magnitudes reportadas que generaron los acelerogramas corresponde a M_s , o magnitud de ondas superficiales, para los de la estación CHIL, y m_b , magnitud de ondas de cuerpo, para los de la estación PET. El rango de magnitudes para los registros en cada estación correspondió a sismos de magnitudes moderadas a grandes en CHIL, $6.9 \leq M_s \leq 8.1$, y sismos de magnitudes bajas a moderadas en PET, $m_b < 6$.

Por lo anterior se decidió generar las leyes de atenuación sólo con los datos de la estación CHIL, lo que significa que su aplicabilidad se limita a resultados asociados al mismo tipo de terreno donde se ubica la estación, y a los mismos intervalos de magnitudes y distancias.

Los cinco sismos que originaron los acelerogramas que se emplearon tienen las siguientes magnitudes y distancias. En la figura 3.1 observamos su ubicación.

fecha	magnitud (M_s)	distancia hipocentral (Km)
7/VI/82	7.0	180
7/VI/82	6.9	197
25/X/81	7.3	283
19/IX/85	8.1	349
21/IX/85	7.6	238

3.2. Modelo Matemático.

Como primer paso en la elaboración de leyes para predecir movimientos fuertes del terreno, está la determinación de los parámetros que intervienen en ellas, tanto los que definen las variables dependientes como las independientes.

En cuanto a la elección de las variables dependientes, o sea los

parámetros a predecir, los más comúnmente elegidos con anterioridad eran la aceleración y velocidad máximos del terreno. No obstante, ésta por sí sola tiene sólo una correlación débil con el comportamiento estructural. Se hace necesario entonces considerar parámetros que ofrezcan una mejor descripción de éste.

En la referencia 5 se ofrecen formas espectrales que se asocian a la aceleración pico del terreno, para periodos cortos, a la velocidad pico para periodos intermedios, y al desplazamiento pico en periodos largos. Para tener una mayor base de comparación se han calculado leyes de atenuación para estos parámetros, a partir de la historia de desplazamientos y velocidades también proporcionadas en cada registro. No obstante el proponer espectros de diseño a partir de éstos últimos únicamente se justificaba en el pasado por la poca o nula información en cuanto a las formas espectrales reales del movimiento en el terreno. Aun cuando en este trabajo se usaron pocos registros, se obtienen leyes de atenuación que predicen con razonable precisión sus espectros de respuesta, por lo que se eligieron como variables independientes las ordenadas de pseudoaceleración espectral para más de treinta periodos estructurales.

Los acelerogramas con los que se contó correspondían a cada una de dos componentes horizontales ortogonales de cinco sismos distintos y se optó por considerar ambas como eventos independientes entre sí, aunque ligados a los mismos parámetros que los originaron. No obstante que la dispersión es un poco mayor que si se hubiera considerado el promedio de las componentes, las leyes parecen ajustarse un poco mejor a los datos. La ligeramente mayor dispersión, como se verá en el capítulo 4, no afecta mucho los resultados. Un valor que también pudo haberse considerado es la combinación vectorial; no obstante, a nivel de diseño suele considerarse por separado la acción de dos direcciones ortogonales.

Las variables independientes escogidas son distancia hipocentral y magnitud únicamente, que son los datos comúnmente más accesibles dada la ocurrencia de un sismo. La distancia empleada fue la hipocentral, por ser la única con la que se contó. En general, al tener distancias hipocentrales grandes, éstas no serán muy distintas a otras alternativas (ref. 3) usadas actualmente, como lo es la distancia más corta a la falla. La magnitud corresponde a la de ondas superficiales, M_s , pues es la que corresponde a los

datos empleados.

Otros parámetros que se pueden considerar en la elección y en la elaboración de leyes de atenuación son los relacionadas al sitio y a la estructura que aloja al aparato que registra la señal. Sin embargo, éstos son generalmente tomados en cuenta de manera cualitativa, dada su gran complejidad.

El modelo matemático que se eligió es sencillo ya que la forma funcional se representa con pocos parámetros. Generalmente puede darse sencillez en el modelo cuando hay relativa uniformidad en los datos. Este modelo tiene base geofísica en modelos de fuente teóricos, como lo es el modelo ω^2 o de fuente puntual (referencias 1 y 2). Si se simplifican las relaciones que arroja la teoría y se introduce un nuevo parámetro (el a_4) por conveniencia para controlar las amplitudes a distancias pequeñas, se puede proponer una forma como la siguiente, que ha sido una forma muy utilizada en trabajos previos (refs. 3, 6, 10, 12, 16) :

$$Y = a_1 e^{a_2 M} e^{a_3 R} (R + a_4)^{-a_5} \epsilon$$

donde Y es la variable dependiente a predecir, M y R son las variables independientes escogidas (magnitud de ondas de superficie y distancia hipocentral) y a_i son los parámetros a encontrar de las leyes de atenuación. ϵ es una variable aleatoria que representa la incertidumbre de Y.

Por simplicidad se escogieron a priori valores típicos de $a_3=0$ y $a_4=25.0\text{km}$. Estos parámetros podemos verlos comúnmente en leyes de atenuación anteriormente desarrolladas. Para comparar con parámetros de otras leyes se sugiere consultar las referencias 3 y 10.

Una vez elegido el modelo matemático para representar los parámetros a predecir del movimiento fuerte del terreno, tal como se propuso en el inciso anterior, debe hacerse un análisis de regresión para determinar los coeficientes a_1 , a_2 y a_5 desconocidos. Dada la aparente distribución lognormal de Y (refs. 3 y 10), la regresión es usualmente realizada en su logaritmo, basada entonces en el modelo:

$$\ln Y = c_1 + c_2 M + c_3 \ln(R + 25) + c_4$$

donde: $c_1 = \ln a_1$
 $c_2 = a_2$
 $c_3 = -a_5$, y
 $c_4 = \ln \epsilon$, es una variable aleatoria con distribución normal, esperanza cero y desviación estándar σ .

En estas leyes de atenuación van implícitas las condiciones locales del sitio, asociadas al tipo de terreno, en el parámetro c_1 no ligado a las variables independientes.

En términos generales, recordando que principalmente se obtendrán leyes de atenuación asociadas a intensidades espectrales, podemos escribir:

$$\ln Y(T) = c_1(T) + c_2(T)M + c_3(T) \ln(R + 25) + c_4(T)$$

dado que se generará un juego de c 's para cada periodo estructural T , y para cada una de las amplitudes máximas del terreno, en aceleración, velocidad y desplazamiento (esto es, $T=0$).

La forma más común para obtener los parámetros c_i es a través del método de mínimos cuadrados. Este procedimiento obtiene las c_i 's que minimicen la suma del error al cuadrado, para cada ley:

$$\Sigma(\ln Y' - \ln Y_i)^2$$

donde Y' es el valor calculado de Y , y Y_i es el i -ésimo valor observado de Y , uno para cada pareja magnitud-distancia de los datos. Para leyes espectrales el valor observado se obtiene de los espectros de respuesta. Para las amplitudes máximas del terreno las Y_i se obtienen directamente de los valores máximos de la historia de aceleraciones, velocidades y desplazamientos.

Como se mencionó anteriormente se integraron en el análisis de regresión las intensidades de las dos componentes ortogonales del movimiento del terreno, y se manejaron independientemente, por lo que para una misma Y' tendremos dos Y_i , y no una sola que pudo haber correspondido a la máxima, al promedio de ambas o a la combinación vectorial.

El enfoque de proyección a espacios vectoriales (ref. 4) nos lleva a la obtención de un vector \underline{c} cuyas componentes son $\{c_1, c_2, c_3\}$ a partir de la relación:

$$\underline{c} = (X^T X)^{-1} (X^T \underline{Y})$$

La matriz X , cuyo tamaño es $2n \times 3$, donde n es el número de datos (sismos) distintos: $n = 5$, es:

$$\begin{pmatrix} 1 & M_1 & \ln(R_1 + 25) \\ 1 & M_2 & \ln(R_2 + 25) \\ 1 & M_3 & \ln(R_3 + 25) \\ 1 & M_4 & \ln(R_4 + 25) \\ 1 & M_5 & \ln(R_5 + 25) \\ 1 & M_1 & \ln(R_1 + 25) \\ 1 & M_2 & \ln(R_2 + 25) \\ 1 & M_3 & \ln(R_3 + 25) \\ 1 & M_4 & \ln(R_4 + 25) \\ 1 & M_5 & \ln(R_5 + 25) \end{pmatrix}$$

El vector \underline{Y} de dimensión $2n$ es:

$$\begin{pmatrix} Y_{1jt} \\ Y_{2jt} \\ Y_{3jt} \\ Y_{4jt} \\ Y_{5jt} \\ Y_{1jt} \\ Y_{2jt} \\ Y_{3jt} \\ Y_{4jt} \\ Y_{5jt} \end{pmatrix}$$

donde Y_{ij} es la respuesta observada del i -ésimo dato, para el periodo j , en las dos direcciones, longitudinal, l , y transversal, t . Podemos observar los datos Y_{ij} graficados en sus espectros de respuesta respectivos, en las figuras 3.2 a 3.6.

El cálculo de la dispersión de las leyes está dado para la desviación

estándar de la variable aleatoria $c_4 = Y' - Y_i$, cuya esperanza es $E(c_4) = 0$, puesto que:

$$E(Y') = c_1 + c_2M + c_3 \ln(R + 25)).$$

Así,

$$\sigma^2 = \sum_{i=1,n} [(c_4 - E(c_4))^2 p(c_4)],$$

donde $n = 10$ datos (total), y p es la probabilidad de cada una de las Y' , que es igual para todas, de $p = 1/n = 0.1$.

Una técnica alternativa es hacer una regresión en dos pasos que separa la estimación de los coeficientes que escalan distancia y magnitud. Este procedimiento se caracteriza por ser más estable (el vector \underline{c} variaría menos ante una modificación de los datos). No obstante este procedimiento no pudo ser aplicado, puesto que contamos con pocos datos. La regresión en dos pasos se presta más a hacerse cuando para un mismo temblor tenemos registros asociados a varios sitios, esto es, varias parejas de distancia-intensidad para una misma magnitud.

3.3 Leyes de Atenuación.

Los datos que dan origen a las 42 leyes de atenuación, asociados a intensidades espectrales, corresponden a 42 periodos estructurales, entre $T=0.1\text{seg}$ y $T=4.2\text{seg}$ en incrementos de 0.1seg . Además se calcularon tres más, correspondientes a desplazamiento, velocidad y aceleración máximos del terreno. No obstante, surgieron algunos problemas por la compatibilidad con principios sismológicos bien establecidos. Quizás las condiciones más importantes que exige el modelo es que el parámetro c_3 , el coeficiente que afecta a $\ln(R + 25)$ debe ser negativo, y que el parámetro c_2 asociado a magnitud debe ser positivo, lo que significa que las intensidades deben disminuir con la distancia y aumentar (sin considerar saturación) con el tamaño del sismo. Aunque se espera que los coeficientes estén dentro de ciertos rangos, se les permite cierta libertad (sin violar los principios básicos mencionados), debido a las simplificaciones como la de no considerar cuantitativamente los parámetros de sitio.

En la regresión se encontró incompatibilidad para c_3 (valores positivos) en tres periodos estructurales: $T=1.9\text{seg}$, $T=2.8\text{seg}$ y $T=2.9\text{seg}$. Una técnica que puede utilizarse en estos casos es fijar el parámetro y hacer la regresión para menos variables. De esta manera se intentaron dos tipos de valores para restringir la regresión en estos periodos. El primero considera el valor esperado por la teoría, que para este caso estaría comprendido entre -0.5 (relacionado a ondas superficiales) y -1.0 (para focos cercanos). El segundo valor a considerar es el que corresponde a la tendencia del coeficiente para periodos vecinos, aun cuando se salga del intervalo impuesto por el modelo teórico, siempre que se mantenga negativo. No obstante, las nuevas leyes calculadas para estos periodos resultaron tener comportamiento anómalo, al predecir los espectros de respuesta, por lo que se optó por no emplearlas en el cálculo del peligro sísmico.

A simple vista se observó el mal comportamiento de las leyes para los periodos mencionados en el párrafo anterior. Además se encontraron otras dos leyes con comportamiento inestable, para las cuales las ordenadas espectrales crecían mucho más rápidamente que las demás, al reducir la distancia, o bien, al aumentar la magnitud. Estas leyes son las correspondientes a los periodos $T=0.4\text{seg}$ y $T=0.5\text{seg}$. Estas dos leyes también fueron omitidas para el cálculo del peligro sísmico, puesto que en los espectros de respuesta que dieron origen a todas las leyes no se observó singularidad alguna en estos periodos, de tal manera que sus ordenadas podrían estimarse con las ordenadas vecinas.

Una alternativa que pudo haberse tomado para mejorar algunos de los parámetros es haber tomado registros correspondientes a otros sitios. De éstos registros pudimos haber hecho la regresión para obtener los parámetros c_2 y c_3 ya que no corresponden a los efectos del sitio.

La aplicabilidad de las leyes propuestas en un sentido estricto se limita a los valores siguientes, que pertenecen a los datos que las originaron:

magnitud:	$6.9 \leq M_s \leq 8.1$
distancia hipocentral:	$180\text{Km} \leq R \leq 349\text{Km}$.
profundidad a distancia:	$5\% \leq z/R \leq 13.5\%$
azimut:	tres registros originados con dirección E-O dos registros originados con dirección NO-SE

En realidad se debe decir que la aplicabilidad de las leyes ha de limitarse sólo a los sismos que las generaron. No podemos garantizar, sobre todo por la escasez de datos, que la ocurrencia de un sismo futuro pueda ser adecuadamente caracterizada por las leyes aquí generadas.

En la tabla 3.1 se muestran los coeficientes de las 42 leyes calculadas, incluyendo la desviación estándar del parámetro c_4 , así como las leyes para amplitudes máximas del terreno. Comparando las desviaciones estándar obtenidas con las que presentan diversos autores en la referencia 3 podemos decir que se obtienen valores satisfactoriamente por debajo de éstas. En las figuras 3.2 a 3.6 se comparan los 10 espectros fuente en sus 2 componentes con la predicción hecha por las leyes de atenuación calculadas. Como puede observarse las representaciones de los espectros de respuesta hechas con las leyes de atenuación, en algunos casos están por arriba de ambas componentes, en algunos casos están por abajo, y en algunos casos coinciden con el promedio de las componentes, pero en todos parecen ajustarse bien a las formas observadas sin alejarse mucho de las ordenadas. En la figura 3.7 se muestra la predicción del sismo del 19 de septiembre de 1985 hecha por leyes de atenuación espectrales basadas en propuestas de McGuire (ref. 11). Se notó que aun con pocos datos se han obtenido leyes más realistas para la predicción de intensidades en el sitio.

Un hecho notable en cuanto a los espectros de respuesta empleados es la aparición de altas ordenadas relativas, además de las correspondientes a la frecuencia natural del terreno (cerca de $T=0.5$ seg), alrededor de los 2seg, hecho que concuerda con lo reportado por Esteva en la referencia 21, para el sismo del 19 de septiembre de 1985, en cuanto al máximo relativo observado alrededor de 0.5Hz en espectros de fourier de señales cercanas a la fuente. Las leyes de atenuación propuestas, al haber sido originadas a partir de espectros de respuesta locales, son capaces de reproducir los dos máximos, hecho que otras leyes no pueden hacer.

RESUMEN DE LEYES DE ATENUACION

T	C ₁	C ₂	C ₃	σ
0.1	-0.501	1.988	-1.782	0.292
0.2	1.362	2.090	-2.209	0.180
0.3	-0.303	1.941	-1.665	0.216
(0.4	3.783	2.464	-3.061	0.190)
(0.5	1.155	2.139	-2.114	0.300)
0.6	-0.876	1.816	-1.316	0.279
0.7	-2.962	1.740	-0.838	0.305
0.8	-3.853	2.054	-1.140	0.395
0.9	-2.740	1.850	-1.062	0.520
1.0	-4.827	1.372	-0.042	0.528
1.1	-3.684	1.718	-0.710	0.550
1.2	-0.372	1.284	-0.748	0.489
1.3	0.128	1.116	-0.624	0.417
1.4	1.879	1.047	-0.177	0.421
1.5	-2.506	1.352	-0.498	0.459
1.6	-3.647	1.495	-0.504	0.422
1.7	-5.402	1.363	-0.019	0.371
1.8	-6.694	1.566	-0.054	0.306
(1.9	-8.417	1.677	0.098	0.316)
2.0	-9.581	1.928	-0.032	0.285
2.1	-8.553	2.570	-1.072	0.301
2.2	-7.603	2.668	-1.375	0.273
2.3	-7.556	2.495	-1.171	0.246
2.4	-7.980	2.332	-0.910	0.252
2.5	-8.625	2.078	-0.496	0.275
2.6	-8.585	2.002	-0.433	0.269
2.7	-8.620	1.990	-0.440	0.279
(2.8	-9.883	1.770	0.047	0.323)
(2.9	-10.172	1.757	0.093	0.343)
3.0	-9.153	1.787	-0.147	0.346
3.1	-8.151	1.802	-0.363	0.356
3.2	-7.578	1.782	-0.453	0.361
3.3	-6.759	1.667	-0.465	0.331
3.4	-6.382	1.564	-0.408	0.320
3.5	-6.861	1.561	-0.331	0.313
3.6	-6.716	1.469	-0.242	0.293
3.7	-6.854	1.376	-0.105	0.295
3.8	-6.802	1.418	-0.181	0.317
3.9	-6.815	1.437	-0.211	0.328
4.0	-6.792	1.437	-0.227	0.353
4.1	-6.591	1.418	-0.252	0.378
4.2	-7.029	1.483	-0.270	0.405
Amax	-0.863	2.005	-1.744	0.298
Vmax	-5.235	1.611	-0.77	0.36
D	-5.95	2.28	-1.75	0.38

Tabla 3.1
Leyes de atenuación.

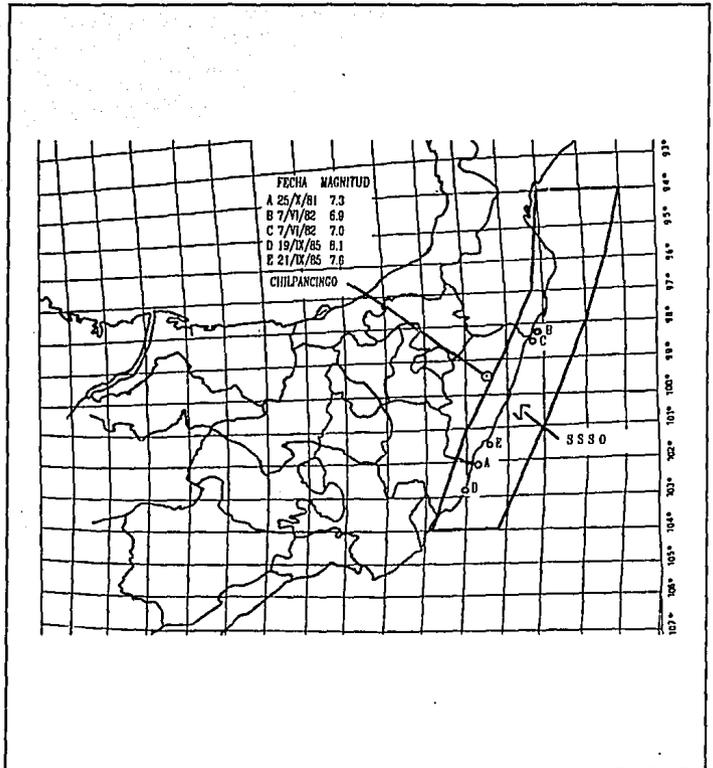
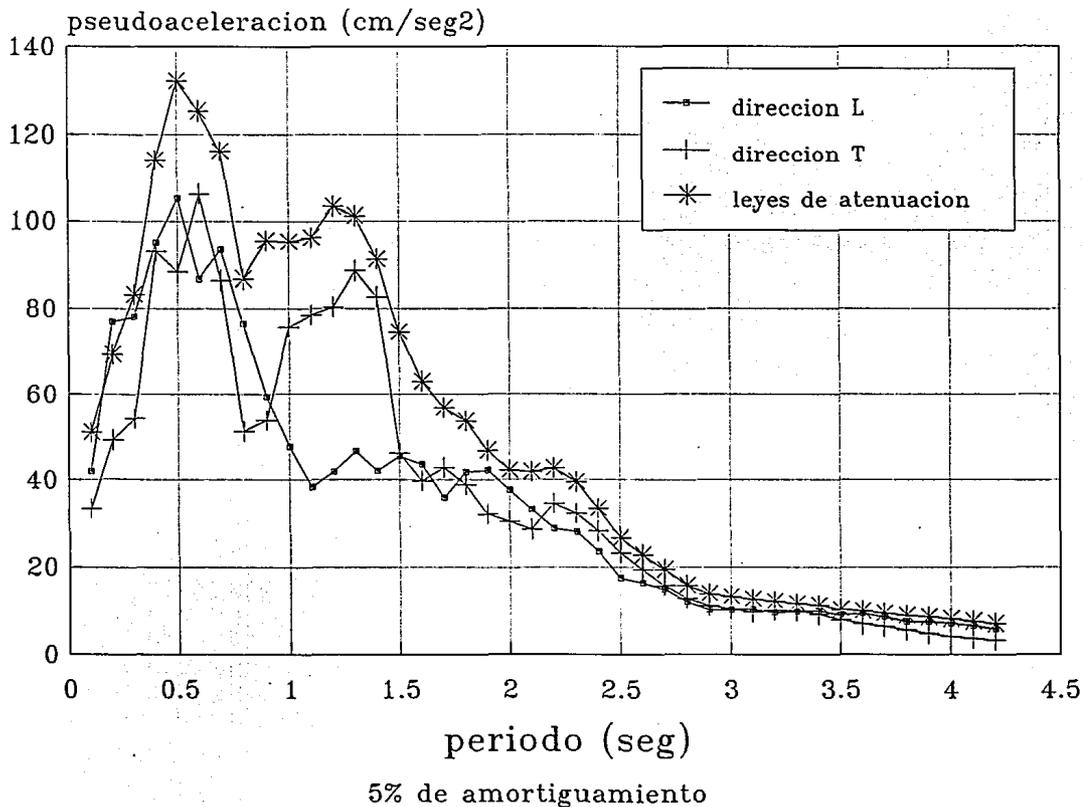


Figura 3.1
Epicentros de los sismos empleados

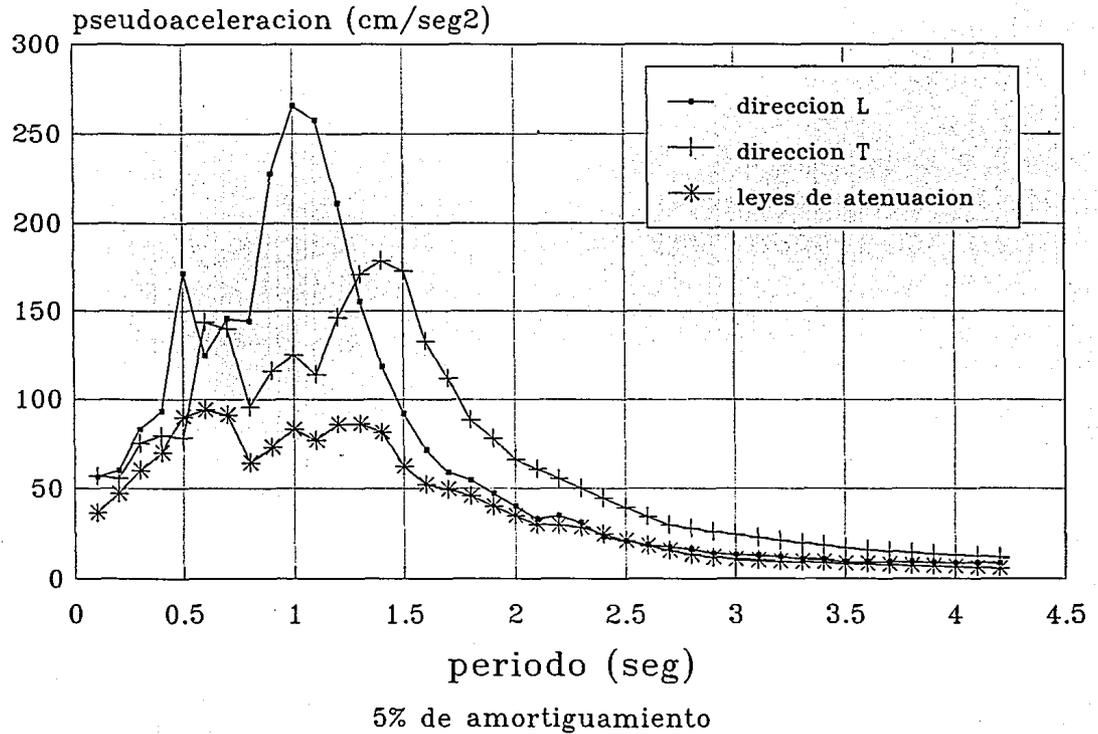
7/VI/1982 Ms=7.0 R=179.8Km



Espectros de respuesta reales y calculado para el sismo del 7/VI/82 (Ms=7.0)

Figura 3.2

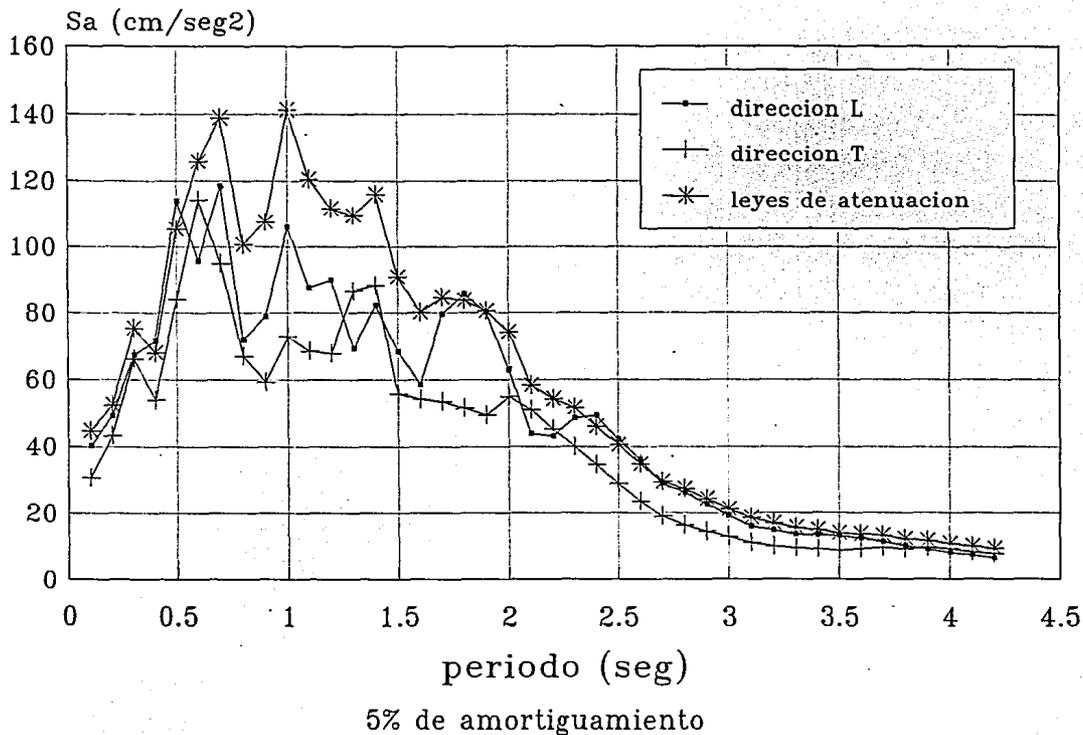
7/VI/1982 Ms=6.9 R=196.7Km



Espectros de respuesta reales y calculado para el sismo del 7/VI/82 (Ms=6.9)

Figura 3.3

25/X/1981 Ms=7.3 R=283.4Km



Espectros de respuesta reales y calculado para el sismo del 25/X/81 (Ms=7.3)

Figura 3.4

19/IX/1985 Ms=8.1 R=348.5Km

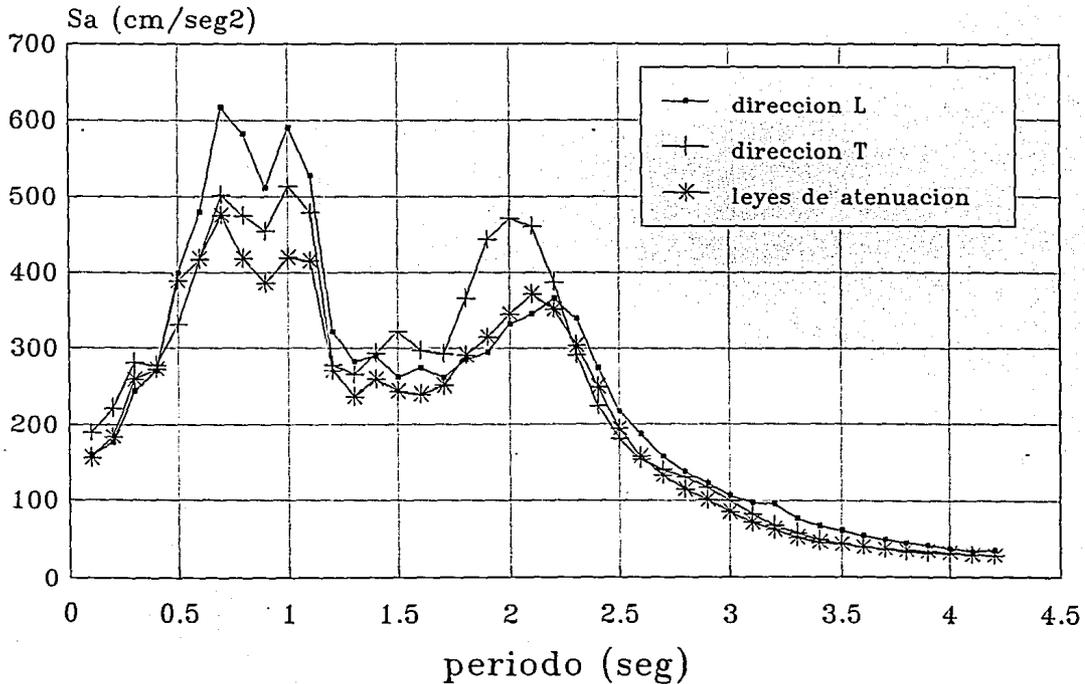


Figura 3.5
Espectros de respuesta reales y calculado para el sismo del 19/IX/85 (Ms=8.1)

5% de amortiguamiento

21/IX/1985 Ms=7.6 R=238.0Km

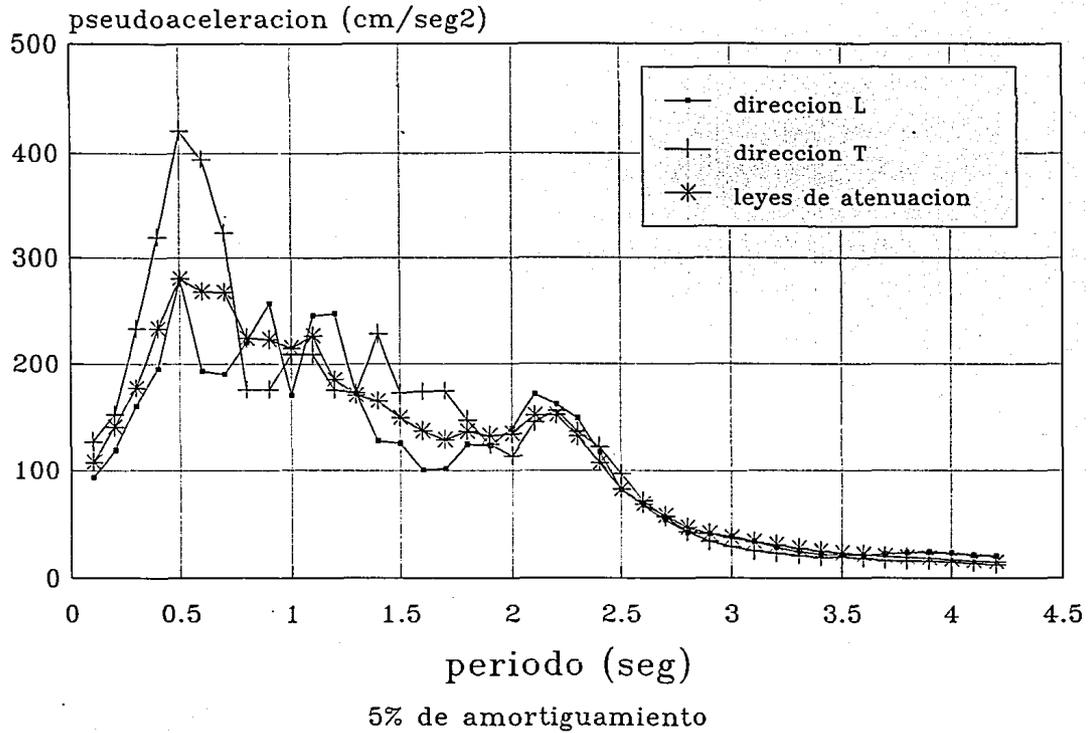


Figura 3.6
Espectros de respuesta reales y calculado para el sismo del 21/IX/85 (Ms=7.6)

COMPARACION DE ESPECTROS

19/IX/1985 Ms=8.1 R=348.5Km

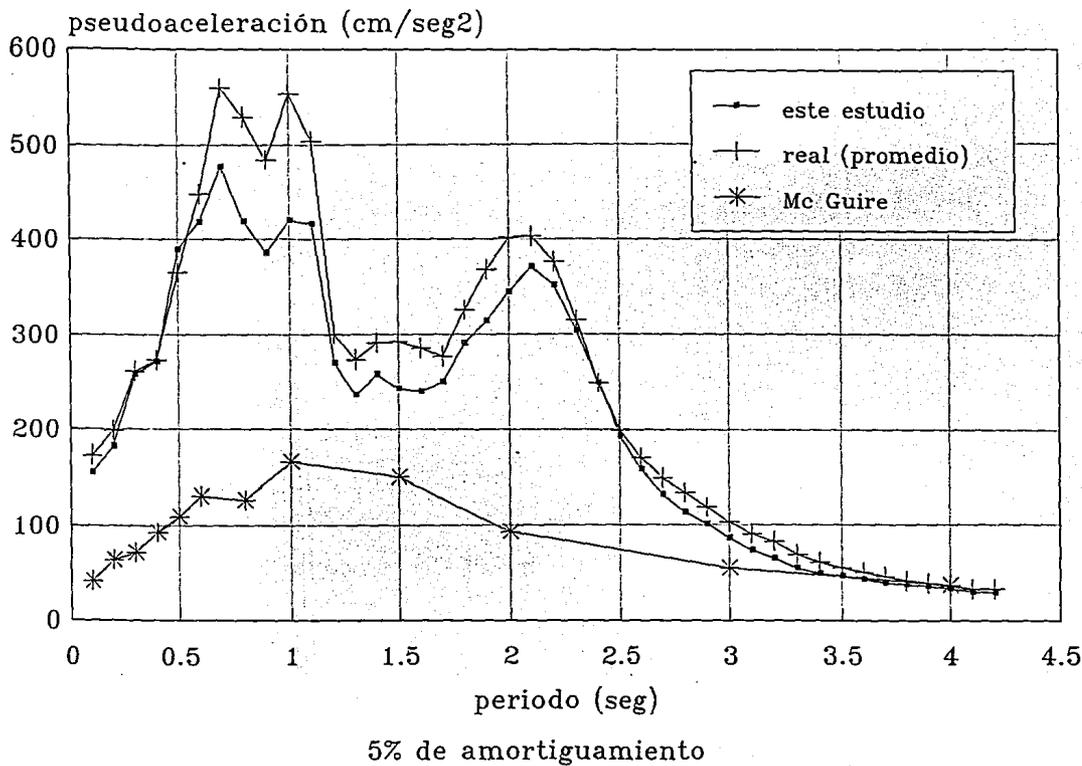


Figura 3.7
Comparación de espectros para el sismo del 19/IX/85 (Ms=8.1)

CAPITULO 4. PELIGRO SÍSMICO.

4.1 PLANTEAMIENTO DETERMINISTA.

4.2 PLANTEAMIENTO PROBABILISTA.

4.3 COMPARACION DE RESULTADOS DE ACCIONES
OPERACIONALES CON ACCIDENTALES.

La elección de espectros de diseño es un problema de criterio ingenieril en el cual resulta útil el empleo de diferentes enfoques para guiar el juicio. Los enfoques empleados en este trabajo incluyen acercamientos deterministas al escoger posibles escenarios que se definen con un sismo de magnitud y distancia al lugar de interés determinados, e incluyen además acercamientos probabilistas, a través del APS.

Los resultados de los enfoques anteriores generarán espectros de respuesta que se supone producirán las acciones. Éstos podrán construirse graficando la intensidad calculada con las leyes de atenuación contra periodo estructural, o bien suponiendo una forma predeterminada del espectro, a partir de las máximas intensidades del terreno obtenido de cada enfoque.

Las formas predeterminadas propuestas por Newmark-Hall (ref. 5) originan espectros suavizados asociando las pseudoaceleraciones de periodos bajos (altas frecuencias) a las aceleraciones máximas del terreno (A), las de periodos altos (bajas frecuencias) al desplazamiento máximo del terreno (D) y para periodos intermedios se asocian las ordenadas a la velocidad máxima del terreno (V). Las relaciones se dan a través de factores de amplificación en función del porcentaje de amortiguamiento crítico a considerar, obtenidos al haber analizado sismos de California. La construcción del espectro suavizado se lleva a cabo conforme al siguiente procedimiento.

- 1) Se forma una poligonal en una escala tetralogarítmica con los valores máximos A, V y D del terreno.
- 2) Se aplican a estos máximos valores los factores de amplificación en función del valor de amortiguamiento elegido. Para nuestro caso (5% de amortiguamiento del crítico) son: para aceleración: 2.6, para velocidad: 1.9, y para desplazamiento: 1.4. Con estos nuevos valores se forma una poligonal amplificada.
- 3) Se forma el espectro de respuesta suavizado con los valores máximos A, V y D amplificados, suponiendo el siguiente comportamiento: Para periodos altos (>10seg, de escaso interés práctico) la respuesta se aproxima a la asociada al desplazamiento máximo. La velocidad permanece paralela a la velocidad del terreno. Para aceleración consideramos tres partes: i) una recta paralela a la de aceleración del terreno desde la frecuencia f_1 donde intersectan las líneas de aceleración y velocidad amplificadas hasta una

frecuencia de $4f_1$ (o un periodo $1/4f_1$); ii) una recta desde ese punto hasta el nivel de aceleración máxima del terreno en $10f_1$; y iii) para frecuencias mayores a $10f_1$ se considera la misma aceleración que la del terreno.

Para construir pseudoespectros consideramos las relaciones entre las pseudovelocidades y las pseudoaceleraciones con el desplazamiento:

$$\begin{aligned} S_a &= \omega S_v = \omega^2 D, & \omega &= 2\pi/T \\ S_a &= 2\pi S_v / T = 4\pi^2 D / T^2 \end{aligned}$$

En la figura 4.1a y 4.1b dibujamos el espectro suavizado calculado para los parámetros del terreno observados en el sitio para el sismo del 19 de septiembre de 1985, dirección T, en escala tetralogarítmica y lineal, respectivamente.

En la figura 4.2 reproducimos los espectros en escalas lineales para todos los sismos, calculados con los máximos valores observados de A, V y D del terreno para la dirección L.

Tradicionalmente los espectros de formas predeterminadas se empleaban para parámetros diferentes del terreno, escalando el espectro para un nivel propuesto de aceleración máxima del terreno. En nuestro caso, al haberse calculado leyes para velocidad y desplazamiento, se puede también calcular el espectro suavizado para el movimiento del terreno calculado con las 3 leyes y con los parámetros del escenario.

Al comparar la figura 4.2 con las figuras 3.2 a 3.11, los criterios de Newmark-Hall parecen no aplicarse adecuadamente a nuestro caso en particular. Como ejemplo tenemos también la figura 4.1b. La forma de obtener probabilísticamente los parámetros del terreno para aplicarlos en la construcción de espectros suavizados se discute en la sección de planteamiento probabilista.

4.1 Planteamiento Determinista.

Un criterio muy empleado en el ámbito de las compañías aseguradoras es el de definir una máxima pérdida probable. Esto equivale a cuantificar los

efectos del evento más desfavorable que razonablemente pueda considerarse que ocurra. El hecho de determinar un posible peor escenario redondea el acercamiento al problema de determinar parámetros de diseño, sensibilizando al responsable de la elección.

4.1.1. Posible Peor Escenario.

Por su ubicación, así como por su sismicidad (fig. 2.4 y figs. 2.6 a 2.11), la zona SSSO es la de mayor influencia sobre el peligro sísmico de Chilpancingo. Se sabe que el evento sísmico esperado en un futuro relativamente próximo es el correspondiente a la liberación de energía acumulada en la brecha de Guerrero, ubicada en esta zona sísmogénica.

Se consideró que la definición del evento más desfavorable en cuanto a magnitud se refiere, la daría un sismo correspondiente al rompimiento total de la brecha. La distancia a considerar sería la del sitio al punto medio de la brecha (fig.4.3), pues se considera que se rompe simultáneamente toda.

Para el tamaño del sismo más desfavorable consideramos los siguientes criterios (ref. 7):

a) Momento sísmico acumulado. Este criterio considera que el momento sísmico de la falla (M_o) está en un proceso de liberación limitado por envolventes. El déficit actual estimado puede considerarse entre 15 y 20×10^{27} dina-cm. También se puede intentar calcular M_o con la relación:

$$\log T_R = \frac{1}{3} \log M_o - 7.5$$

para cuyo caso, suponiendo un periodo de retorno T_R de 80 años tendríamos un momento sísmico acumulado de 16×10^{27} dina-cm. Así, usando la relación entre magnitud de momento, M_w , con el momento sísmico promedio (ref. 17):

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_o - 10.7$$

donde M_w es la magnitud de momento y M_o es el momento sísmico de la falla, se obtiene $M_w = 8.1$, que puede considerarse igual a M_s para

magnitudes $M_w > 6$.

b) Extensión de la brecha. Una estimación de la extensión de la brecha de Guerrero considera 230km como máximo. Si se considera un ancho de la falla de 80 km, el área máxima a romperse en un terremoto es de 18,000km² aproximadamente. Una relación empírica que relaciona M_s con el área de ruptura es (ref. 7):

$$M_s = 0.877 \log A + 4.532$$

la cual nos arroja $M_s = 8.3$ para el rompimiento.

Comparando ambos resultados anteriores y la ubicación del sitio respecto del punto medio de la brecha, el peor escenario que se juzgó conveniente considerar es $M = 8.2$, y $R = 130$ km.

4.1.2 Cálculo de Máximas Intensidades Espectrales Posibles.

Con la definición de los valores de M y R para el peor escenario posible, y empleando las leyes de atenuación del capítulo anterior, se construyó un espectro de respuesta con base en los valores calculados para cada periodo (fig.4.4). Obviamente no se tomó en cuenta el parámetro asociado a la dispersión por ser una estimación determinista, sino el valor esperado de la intensidad espectral ($E[c_d]=0$).

Con los parámetros del peor escenario ($M=8.2$, $R=130$ km), y con la ley de atenuación correspondiente se encontró una aceleración máxima del terreno. De esta manera el espectro que se podría proponer como referencia sería la envolvente de los espectros suavizados (fig. 4.2) escalados al nivel de aceleración máxima encontrado (fig 4.5).

Como elemento adicional en la toma de decisiones conviene considerar además el máximo escenario del cual se tiene información completa; éste es el que correspondió al sismo del 19 de septiembre de 1985. El sólo hecho de considerar sus espectros de respuesta (dos direcciones ortogonales) es útil para calibrar las expectativas que se tiene en cuanto a las acciones a considerar para diseño. Se muestran estos espectros en comparación con el espectro calculado

para el posible peor escenario espectral (fig.4.4).

4.2 Planteamiento Probabilista.

El espectro de respuesta mencionado en el inciso anterior parte de suponer relaciones deterministas, tanto de la distancia como de la magnitud del sismo a ocurrir así como de las leyes de atenuación. Con el acercamiento probabilista se hace intervenir las incertidumbres que se tienen en cuanto a la distribución espacial y temporal de los eventos, sus magnitudes y el efecto que pueda tener un evento en el sitio, descrito por las leyes de atenuación.

4.2.1. Probabilidades de Excedencia..

Al mostrar un espectro calculado con características probabilistas, éste ha de caracterizarse con la probabilidad de excedencia con la que se le asocia. Surge entonces la pregunta de cuál es la probabilidad de excedencia más adecuada. Al hablar de una cierta probabilidad de excedencia deberá mencionarse el periodo de observación que se considera. Un periodo de observación empleado comunmente en reglamentaciones modernas corresponde al de la vida útil de las estructuras, cuya manera de fijar es de cierta manera arbitraria. Otra forma de caracterizar las probabilidades de excedencia es a través de periodos medios de retorno, cuyo inverso corresponde a la probabilidad de ocurrencia anual, si el periodo de retorno se da en años.

Ha sido común establecer en algunos códigos modernos que las acciones accidentales han de corresponder a probabilidades de excedencia pequeñas en la vida útil de las construcciones, por ejemplo, del orden del 2% al 5%. Éstas corresponden a periodos medios de retorno, T, de 2500 y 1000 años respectivamente (probabilidades anuales de excedencia de .04% y 0.1% respectivamente), si se considera una vida útil de 50 años (fig. 4.6), calculados al despejar T de la relación (ref. 8):

$$P_{vu} = 1 - (1 - 1/T)^{vu}$$

donde P_{vu} es la probabilidad de ocurrencia de un temblor de periodo medio

de retorno T (probabilidad anual constante de $1/T$) en una vida útil VU . Evidentemente, no es de esperarse que en la actualidad se cuente con información precisa correspondiente a tales periodos de retorno.

A manera de ejemplo tenemos la definición del reglamento de construcciones para el D.F. de 1976, la cual define una probabilidad de 2% en la vida útil para acciones accidentales (ref. 23). También, en la referencia 22, se propone para probabilidades de excedencia asociadas a este tipo de acciones sobre edificaciones un rango entre 6 y 22% aproximadamente, también en la vida útil.

Contra poniéndose a esas definiciones de acciones accidentales, los parámetros de diseño sísmico que se propondrán aquí, en verdad se asocian a altas probabilidades de excedencia en la vida útil de las estructuras. Éstas son probabilidades de 64% y 92% en una vida útil de 50 años, y que corresponden a periodos medios de retorno de 50 y 20 años respectivamente (2% y 5% de probabilidad anual de excedencia, respectivamente) (fig. 4.6). Esto es, las acciones aquí consideradas accidentales se asocian a bajas probabilidades *anuales* de excedencia, y no a bajas probabilidades en la vida útil. Cabe hacer notar que el actual Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero (referencia 18), tomada del código actual para el D.F., considera un periodo de recurrencia de 50 años para acciones accidentales (con lo que se define una probabilidad de excedencia anual, como $1/T$), lo que corresponde a aproximadamente 64% de probabilidad en una vida útil de 50 años.

Por otro lado, si observamos la tasa de excedencia de magnitudes para la zona SSSO (fig. 2.11) notamos que ocurren sismos importantes de magnitudes medianas, alrededor de $M_s=7$, a razón de 0.5 eventos al año aproximadamente, esto es, eventos que ocurren con periodos de retorno alrededor de 2 años. Para acciones asociadas a periodos tan pequeños es obvio que debe mantenerse íntegra la operabilidad de cualquier estructura sujeta a ellas. Es por eso que se espera que el desempeño del inmueble para este caso esté limitado al rango elástico. Se ha elegido para representar este caso (acciones que se han denominado operacionales) periodos medios de recurrencia entre 1.6 y 2 años, que corresponden a probabilidades anuales de excedencia de 50% y 64%.

En este trabajo se consideraron dos probabilidades de interés. Una asociada con la ocurrencia de sismos de magnitud moderada, pero que ocurrirán con alta probabilidad anualmente, a los que se han llamado sismos de operación. La otra probabilidad considerada es la que se asocia con eventos de gran tamaño pero de ocurrencia esporádica que fueron denominados sismos accidentales.

En la referencia 9 se ha propuesto niveles de desempeño esperados para instalaciones hospitalarias en Venezuela, para diferentes probabilidades de excedencia en la vida útil. Los niveles de desempeño allí propuestos implicarían costos muy elevados si quisieran adoptarse para nuestro sitio en particular (tabla 4.1a), dados los altos niveles de diseño que exigirían (ver adelante). En la tabla 4.1b se propone una tabla similar para los dos casos de desempeño propuestos en este trabajo. Los niveles de desempeño implican en el diseño que han de cumplirse bajo acciones que se consideran para los periodos medios de retorno indicados. En el inciso 4.3 se propone una alternativa que conduce a una sola revisión o diseño, satisfaciendo ambos niveles simultáneamente.

La justificación del orden de las probabilidades a considerar para una región determinada no puede darse a priori. La validez de las probabilidades aquí consideradas puede darse con la observación de los resultados que se discutirán en el capítulo 5. Además, se comprobó la inconveniencia de emplear los niveles de probabilidad más bajos; en paralelo a los cálculos efectuados para acciones que en este trabajo se consideraron accidentales y operacionales, descritos en la siguiente sección, se generaron resultados para aquéllos. Por ejemplo, para periodos entre 0.6 y 0.9seg, periodos representativos del primer máximo observado en los espectros de respuesta que generaron las leyes de atenuación, se encontraron intensidades (S_a) extremadamente altas que evidencian la imposibilidad de aceptarlos para considerarlos en cualquier diseño. Se obtuvieron ordenadas del orden de 3.4g para probabilidades de excedencia del 2% en una vida útil arbitraria de 50 años, de 2.7g para 5%, y 1.4g en 30% (estas son probabilidades anuales de excedencia de 0.4%, 0.1% y 0.7% respectivamente). Cualquier cálculo para probabilidades menores a 30%, lógicamente arrojarían intensidades mayores a 1.4g.

4.2.2. Análisis de Peligro Sísmico.

La integración de la información de sismicidad y de la de atenuación considerándola en su marco estocástico se hizo con el programa EQRISK de R.K. M^cGuire (ref. 10). La teoría en la cual se basa el programa fue desarrollada por C.A. Cornell. A continuación se describe brevemente el funcionamiento del programa (ref.10).

La manera de considerar el carácter aleatorio de todas las variables es mediante el teorema de la probabilidad total:

$$P(A) = \iint P(A|M \text{ y } R) f_M(M) f_R(R) dM dR.$$

En la expresión anterior P es la probabilidad total, A es el evento cuya probabilidad se busca, y M y R son variables aleatorias independientes que influyen en A. Para nuestro caso, el evento es que un valor específico de la intensidad (intensidad espectral, aceleración máxima del terreno, etc.) sea excedido en el sitio, dado un temblor de magnitud M y distancia hipocentral R. La probabilidad total es entonces el producto de la probabilidad condicional de A dados M y R, por las probabilidades independientes de M y R, integrando sobre todos sus posibles valores.

En este trabajo, dada la forma funcional elegida para las leyes de atenuación, A representa el logaritmo natural de las pseudoaceleraciones espectrales, o de las amplitudes máximas del terreno (A, V y D).

La probabilidad condicional de que la variable aleatoria I exceda un valor i en el sitio, dados M y R se considera con distribución normal. El valor esperado de la variable I está dado por:

$$\underline{I}(M,R) = c_1 + c_2M + c_3\ln(R+25)$$

donde \underline{I} representa el logaritmo natural de alguna intensidad; c_1 , c_2 y c_3 son las constantes de las leyes de atenuación obtenidas en el capítulo 3.

La desviación estándar de la intensidad, σ_i se considera constante para cada ley de atenuación, esto es, independiente de M y R. Así, tenemos:

$$P[I > i | M \text{ y } R] = \Phi^* ((i - c_1 - c_2 M - c_3 \ln(R+25)) / \sigma_1)$$

donde Φ^* es la probabilidad complementaria de la distribución normal.

La función de densidad de probabilidades de la variable M es exponencial truncada entre los valores extremos de cada una de las rectas que definen las tasas de excedencia de magnitudes, mostradas en el capítulo 2. Esto es al suponer que las magnitudes de eventos sucesivos en el área generadora son independientes (proceso de Poisson). Las rectas mencionadas, como habíamos explicado, son descritas por la relación de Gutenberg-Richter.

Sustituyendo las probabilidades $P(A | M \text{ y } R)$ y $f_M(M)$ (descrita en el capítulo 2) en la ecuación que define la probabilidad total, tenemos:

$$P[I > i] = \int_R \int_{M_0}^{M_u} \Phi^* ((i - c_1 - c_2 M - c_3 \ln(R+25)) / \sigma_1) \beta k \exp(-\beta(M - M_0)) f_R(R) dM dR.$$

Se hace una transformación algebraica para realizar analíticamente la integración sobre magnitud, obteniéndose $P[I > i]$ como integral sólo de R .

La función de densidad de la distancia R depende de la relación espacial entre la fuente y el sitio. Esto es, para un intervalo de distancias dado dentro de cierta región sismogénica, la probabilidad asociada a él es la razón del área comprendida en el intervalo al área total de la región. Así, el programa calcula numéricamente la integral mencionada, para obtener el riesgo asociado a una intensidad i , para cada una de las fuentes.

Una vez obtenido el riesgo asociado a un nivel de intensidad i en un sitio, dada la ocurrencia de un temblor de magnitud y ubicación arbitraria en una fuente generadora, se obtiene el número anual esperado de eventos de esa fuente que causen intensidades $I \geq i$. Esto se hace multiplicando el riesgo del evento simple (probabilidad total $P[I > i]$) por el número esperado de eventos durante un año. El número total esperado de eventos que producen una intensidad i o mayor en un sitio se obtiene sumando los números esperados de cada una de las áreas sismogénicas. Los riesgos (peligros) totales asociados a los niveles de intensidad elegidos se calculan suponiendo la ocurrencia de temblores como proceso de Poisson; esto es:

$$\text{riesgo} = 1 - \exp(-v)$$

donde $v(i)$ es el número total esperado de eventos que producen intensidades $I \geq i$ en el sitio, en un año. Esto es, $v(i)$ es la tasa de excedencia de intensidades, para el sitio.

El nivel de intensidad asociado a las probabilidades de excedencia escogidas para sismos de operación y accidentales se encuentra interpolando linealmente entre valores vecinos a estas probabilidades; de esta manera es que la experiencia de hacer varias corridas del programa permite elegir para cada periodo estructural las intensidades que mejor delimitarán aquella buscada. Con la intensidad interpolada, asociada a cada periodo, se grafica un espectro de peligro uniforme, esto es, una curva cuyas intensidades espectrales tienen la misma probabilidad de ser excedida. Se muestra en la figura 4.7 los espectros asociados al 64% y 50% de probabilidad anual de excedencia, y en la figura 4.8, los espectros para 5% y 2% de probabilidad anual de excedencia.

Como se mencionó en el capítulo 3, la aplicabilidad de las leyes de atenuación estrictamente abarca de la magnitud más pequeña a la más grande de los registros que dieron origen a los espectros de respuesta, cuyos datos se emplearon en la regresión, esto es, de $M_s = 6.9$ a $M_s = 8.1$. El riesgo está dado principalmente por los sismos que se originan en la fuente SSSO. De hecho más del 90% del riesgo, en promedio, proviene de esa fuente, al observar los archivos de resultados. Haciendo un cálculo simplista, suponiendo que $\sigma=0$ para las leyes de atenuación, y para un valor determinado de la distancia R , el número anual de veces en que se excede una cierta intensidad I , corresponde al número anual de veces en que la magnitud de un sismo es mayor que M , magnitud que sustituida en la ley de atenuación nos arroja I :

$$v(I) = \lambda(M), \text{ con } \ln I = c_1 + c_2 M + c_3 \ln(R+25)$$

$$R = \text{constante.}$$

Si buscamos construir espectros asociados a 5% de probabilidad de excedencia, o sea:

$$p = 5\% = 0.05 = 1 - \exp(-v) \Rightarrow v = -\ln(1-p) = 0.0513$$

necesitamos ubicar qué magnitud es la que arroja $\lambda(M) = 0.0513$. Para la gráfica de $\lambda(M)$ para SSSO, $\lambda=0.05$ corresponde a magnitudes un poco mayores a $M_s=8$. Si escogemos el 2% de probabilidad, serán sismos de magnitudes mayores los que ocurran con la tasa de excedencia asociada; no obstante, no se está considerando el carácter aleatorio, por lo que para 2%, realmente no tendremos magnitudes mucho más grandes. Para el otro extremo, $p=64\%$, se tiene $v=1.02$ que corresponde a sismos de magnitudes un poco abajo de $M_s=7.0$. Por esto último se concluye que en cuanto a las magnitudes no fue tan grave el haber generalizado su aplicabilidad. Los resultados del experimento mostraron además que las intensidades calculadas no son muy sensibles al valor de σ de las leyes de atenuación.

No obstante, debemos hacer notar que se debería obtener leyes de atenuación que abarquen magnitudes comprendidas entre los límites M_0 y M_u de todas las ramas de todas las fuentes generadoras, y distancias que puedan abarcar todos los puntos del área de las fuentes. Además, las leyes de atenuación surgen de datos de sismos originados en la fuente SSSO, que no tendrían porqué representar adecuadamente la respuesta surgida por la ocurrencia de sismos en otras fuentes; sin embargo, las leyes de atenuación obtenidas en el capítulo 3 se emplearon para representar la respuesta de sismos en cualquier fuente. Las leyes de atenuación propuestas se compararon con los espectros de respuesta que los originaron (resultando razonablemente adecuadas) y con lo que predecirían las leyes empleadas en la referencia 11 para Campeche. Estas últimas (fig. 3.7) subestiman en mucho la respuesta para los sismos estudiados, por lo que es razonable pensar que al utilizar las leyes obtenidas de sismos ocurridos en SSSO para representar las respuestas para eventos ocurridos en las otras zonas, se está siendo conservador en los espectros de peligro uniforme. No obstante, esta sobreestimación no es muy grande, hecho que se justifica al recordar lo importante que es la zona SSSO en el riesgo para Chilpancingo en particular.

4.3 Comparación de Resultados de Acciones Accidentales con Operacionales.

Para poder situar los casos deterministas con respecto a las dos consideraciones probabilistas, debemos hacer éstas últimas comparables entre sí. Para tal fin, se compararán los factores que intervienen en el diseño para cada caso, así como los comportamientos globales de la estructura que se

permite (tabla 4.1b).

El tipo de acciones que estamos considerando sobre las estructuras conlleva un nivel de desempeño esperado (tabla 4.1b). En cuanto a estructuras sujetas a cargas accidentales, se permite que éstas incurran en comportamiento inelástico, con lo que para este caso se aceptan reducciones de las fuerzas laterales mediante factores de comportamiento sísmico Q , hasta de $Q_a = 4$, por la disipación de energía que provoca su comportamiento dúctil. En cuanto a estructuras sujetas a cargas de operación, como lo son también las cargas muertas y vivas actuando verticalmente, el desempeño esperado incluye una respuesta elástica (tabla 4.1b), para la cual se considera un factor de comportamiento sísmico de $Q_o = 1$.

En el criterio de diseño basado en el método de resistencia última, se comparan las resistencias nominales de los elementos, multiplicados por un factor de reducción, con las acciones nominales, multiplicadas por un factor de carga FC. Para este criterio de diseño es usual considerar las acciones accidentales con un factor de carga $FC_a = 1.1$, mientras que las acciones operacionales se consideran afectándolas por un factor $FC_o = 1.4$. En el cómputo de las fuerzas laterales interviene el cálculo del peso estimado de la estructura en el cual se consideran también las cargas vivas. Para el análisis estructural tomando en cuenta cargas accidentales, estas cargas vivas se consideran menores que para la condición de cargas de operación. Por ejemplo, consideremos un edificio de cierto número de pisos. Para una carga muerta de 600kg/m^2 constante por nivel, y una carga viva de 90kg/m^2 para cargas accidentales, y de 170kg/m^2 para cargas operacionales (cargas vivas usuales para uso habitacional), tenemos una relación de pesos que a mayor número de pisos se aproxima a de $690/770 = 0.896$. Redondeando, podemos decir que el peso de alguna estructura, de cierto número de niveles, que se considere para analizarlo ante cargas laterales accidentales será del orden de 90% del peso de la estructura si se analiza para la condición de carga de operación.

Si llamamos a_o a la ordenada del espectro operacional para cierto periodo estructural, y a_a a la ordenada correspondiente del espectro accidental, se ha de comparar:

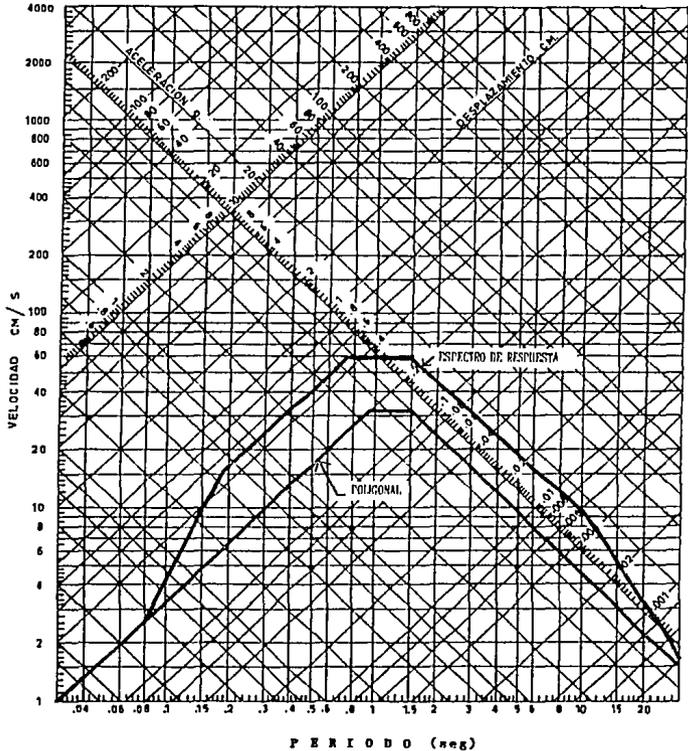
$$\begin{aligned} FC_o a_o(1.0) / Q_o &= 1.4 * a_o * 1.0 / 1.0 && \text{vs.} \\ FC_a a_a(0.9) / Q_a &= 1.1 * a_a * 0.9 / 4.0. \end{aligned}$$

Despejando la ordenada espectral a_a , las relaciones anteriores conducen a la comparación directa de a_a contra $5.7 \cdot a_0$.

De esta manera se construyen los espectros operacionales de 64% y 50% escalados en 5.7 veces, para poder compararlos con los espectros de peligro uniforme correspondientes a la consideración accidental, 5% y 2% de probabilidad de excedencia anual (fig.4.9).

Cabe hacer notar que para el comportamiento elástico esperado en el desempeño para cargas laterales de operación quizás resulte poco conservador el haber supuesto un comportamiento interno de las estructuras asociado a un amortiguamiento del 5% del crítico, el cual fue considerado implícitamente en las leyes de atenuación, pues recordemos que éstas surgieron de los espectros de respuesta calculados para este amortiguamiento. El considerar un amortiguamiento menor se reflejará en intensidades mayores predichas por las leyes de atenuación, pues los espectros de respuesta presentarán mayores ordenadas.

En la figura 4.10 se muestran los espectros deterministas junto con los probabilistas, para su comparación. Se observa que el espectro asociado al posible peor escenario está muy por arriba de los espectros de peligro constante. No obstante, los espectros de respuesta correspondientes al sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 en las dos direcciones pudieron haber sido tomados en cuenta como primera aproximación del riesgo aceptable para Chilpancingo, pues resultaron ser comparables con los obtenidos por el APS, a manera de cota inferior.



TERRENO:	FACTORES:	AMPLIFICACIONES:	
$A_{max} = 187.33 \text{ cm/s}^2 = 0.19g$	2.6	0.497 g	T1 0.76s
$V_{max} = 31.06 \text{ cm/s}$	1.9	59.01 cm/s	T1 1.31Hz
$D_{max} = 7.86 \text{ cm}$	1.4	11.00 cm	T1/t 0.19m T1/10=0.08s

SISMO DEL 19/IX/1985.

DIRECCION T

Figura 4.1a
Espectro de respuesta suavizado (escala tetralogarithmica) para el sismo del 19/IX/85, direcci3n T

ESPECTROS DE RESPUESTA SUAVIZADOS

19/IX/1985 $M_s=8.1$ $R=348.5$

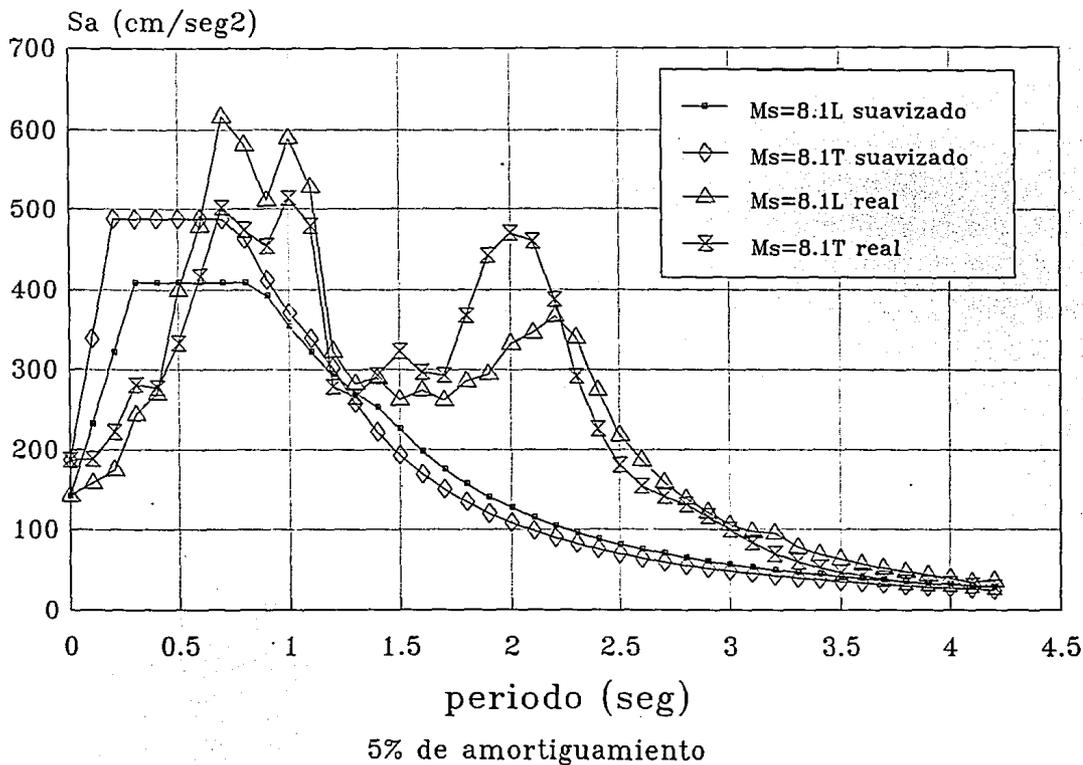


Figura 4.1b
Espectros de respuesta suavizados (escala lineal) para el sismo del 19/IX/85

ESPECTROS DE RESPUESTA SUAVIZADOS direccion L

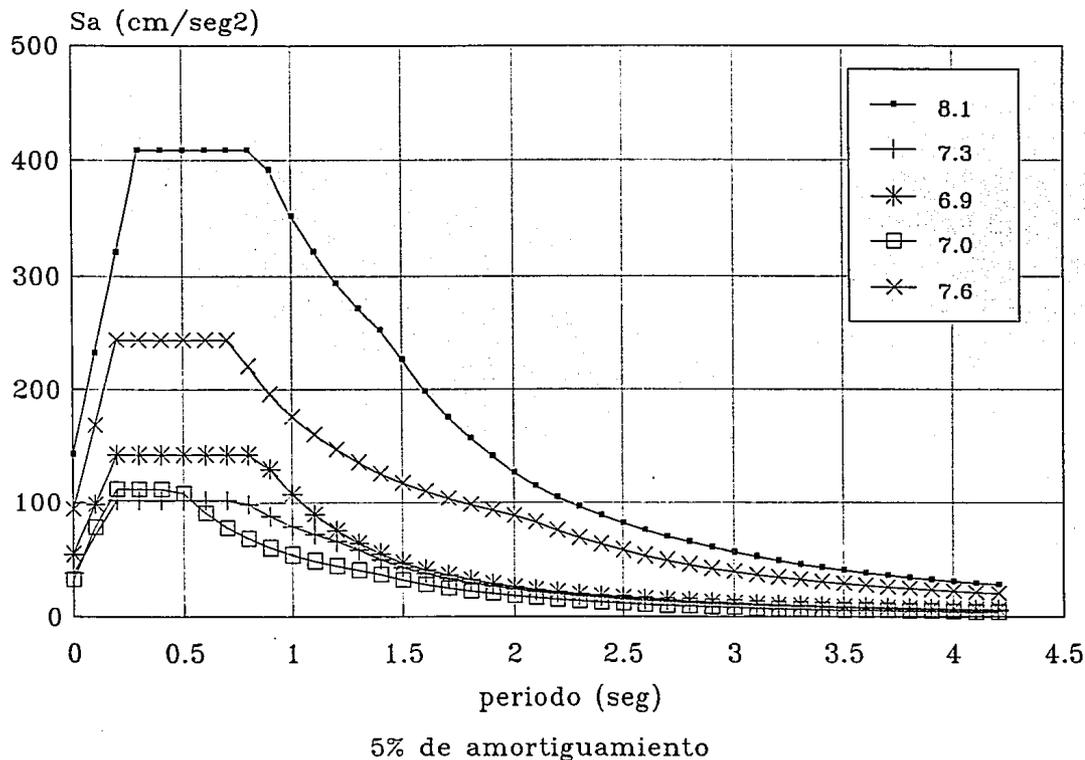


Figura 4.2
Espectros de respuesta suavizados (escala lineal). Dirección L.

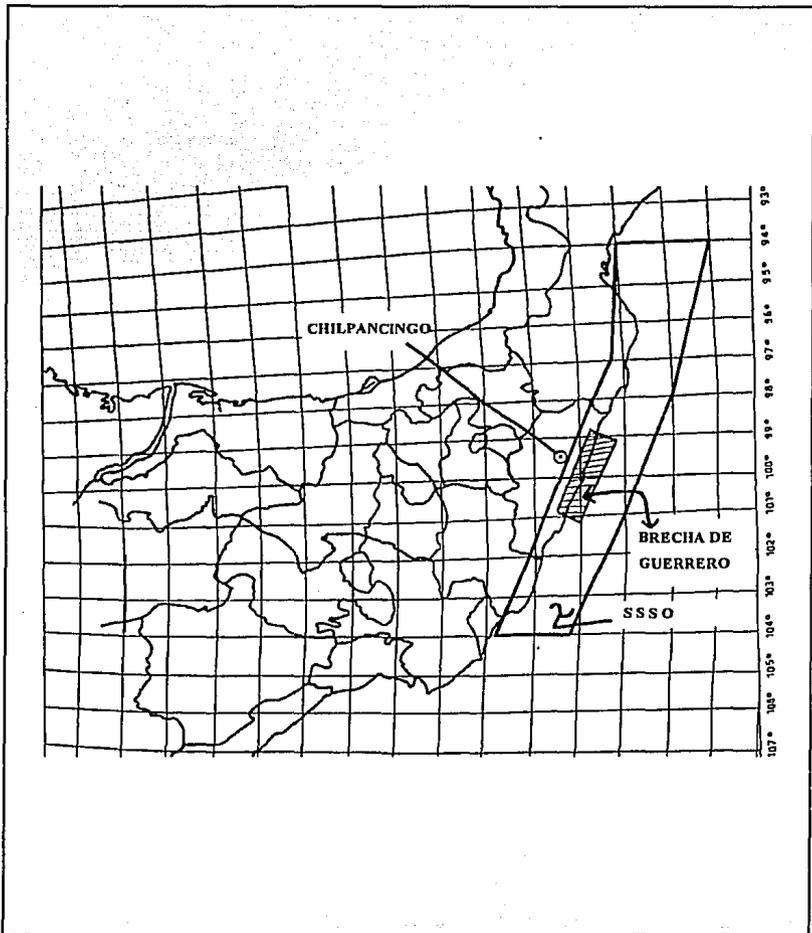


Figura 4.3
Brecha de Guerrero

ESCENARIOS DETERMINISTAS

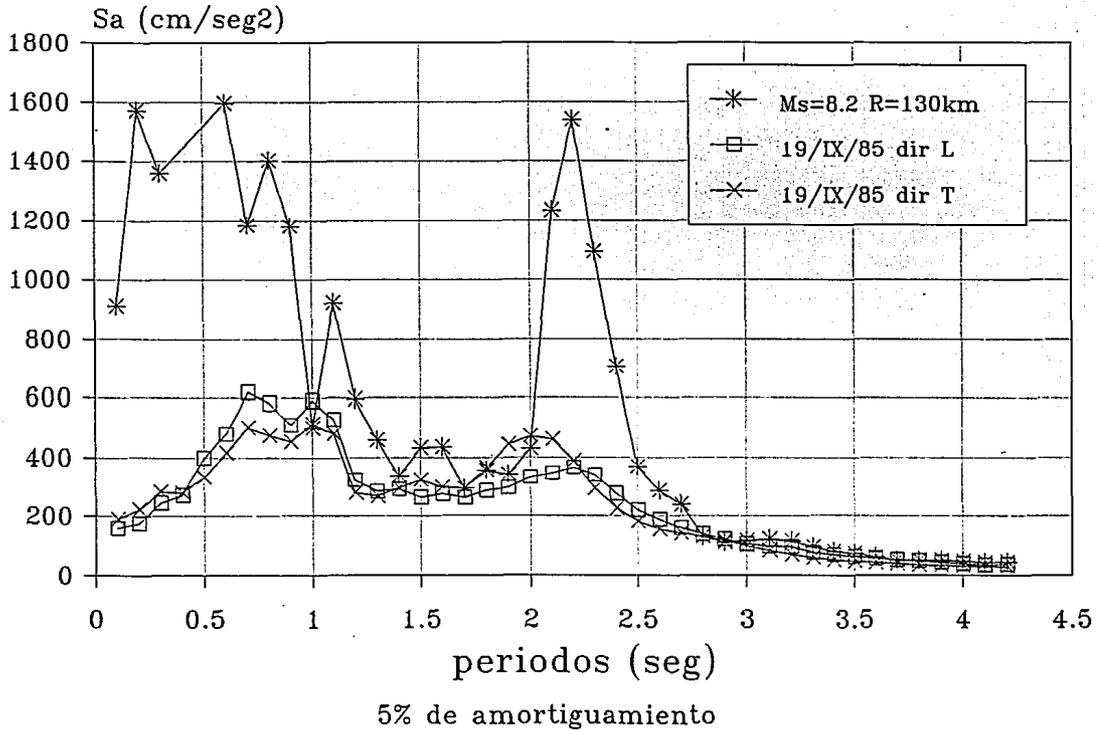


Figura 4.4
Escenarios deterministas

ESPECTROS DE RESPUESTA SUAVIZADOS ESCALADOS PARA POSIBLE PEOR ESCENARIO direccion L

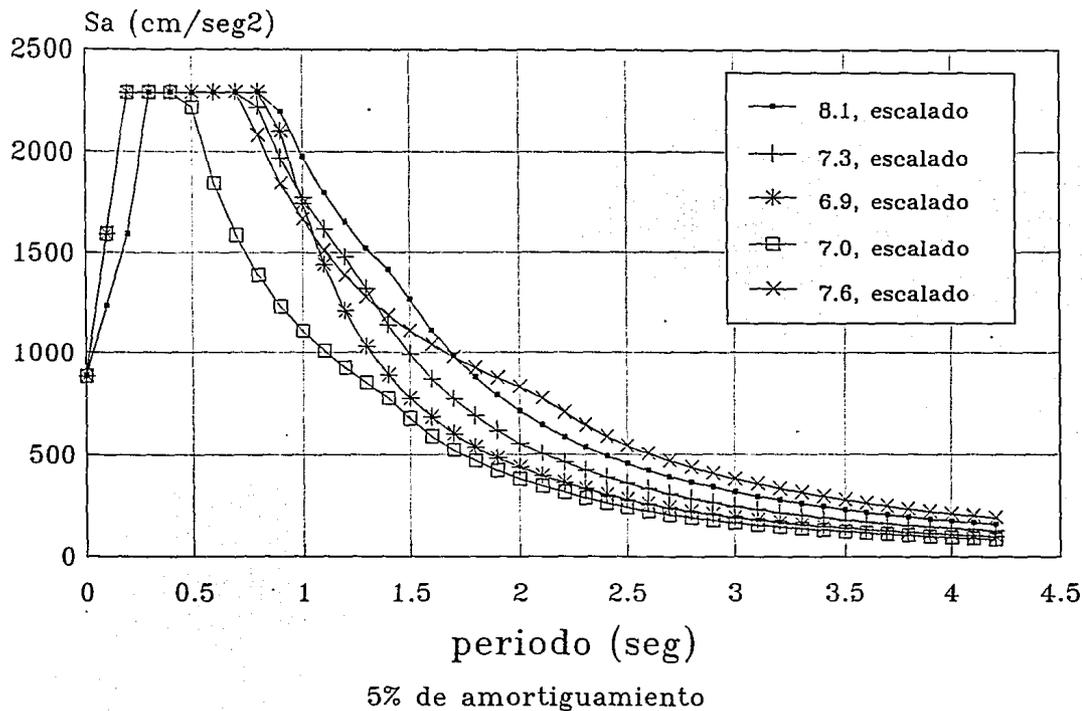


Figura 4.5
Espectros suavizados escalados

Probabilidades de Excedencia en la Vida Util, para diferentes periodos de retorno T.

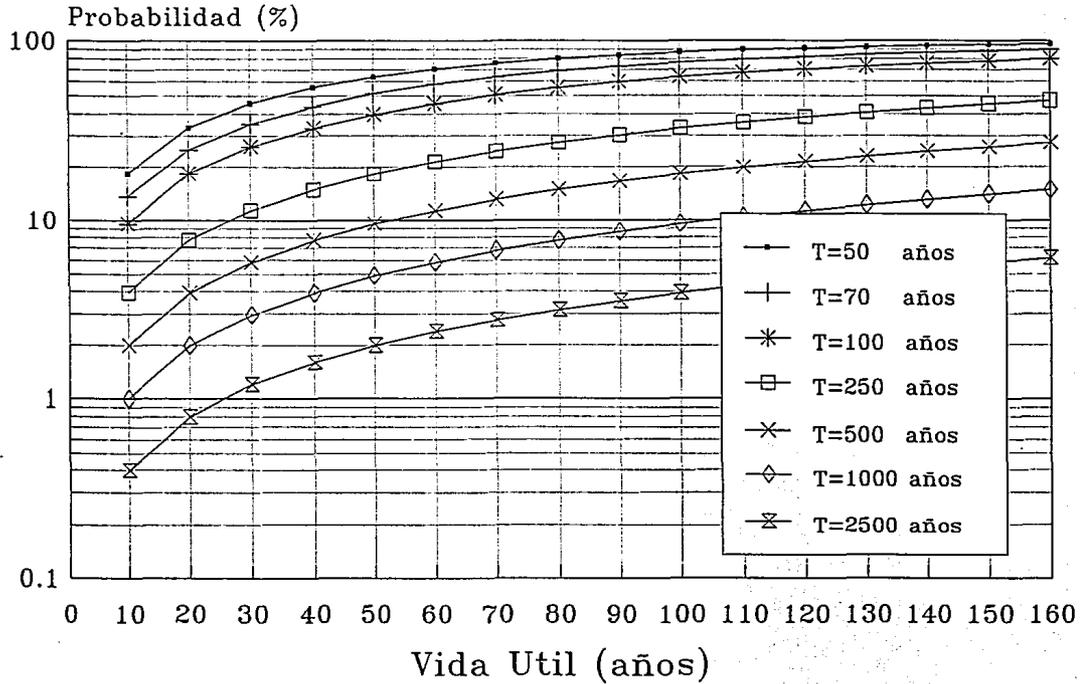
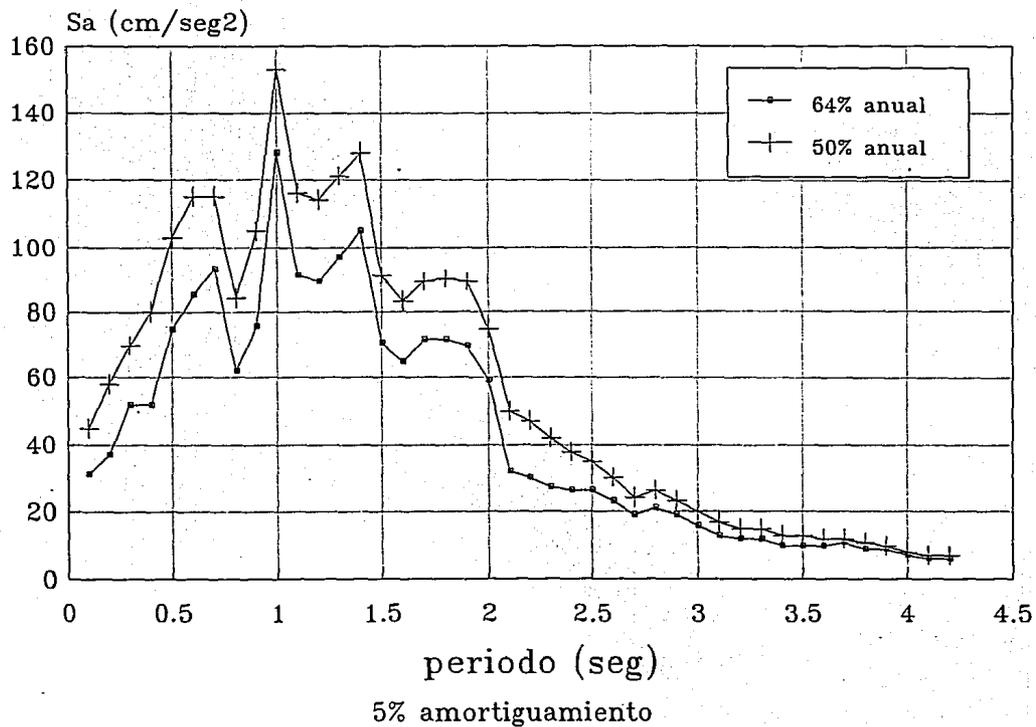


Figura 4.6
Probabilidad de excedencia vs. Vida Util

ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME

Sismos Operacionales

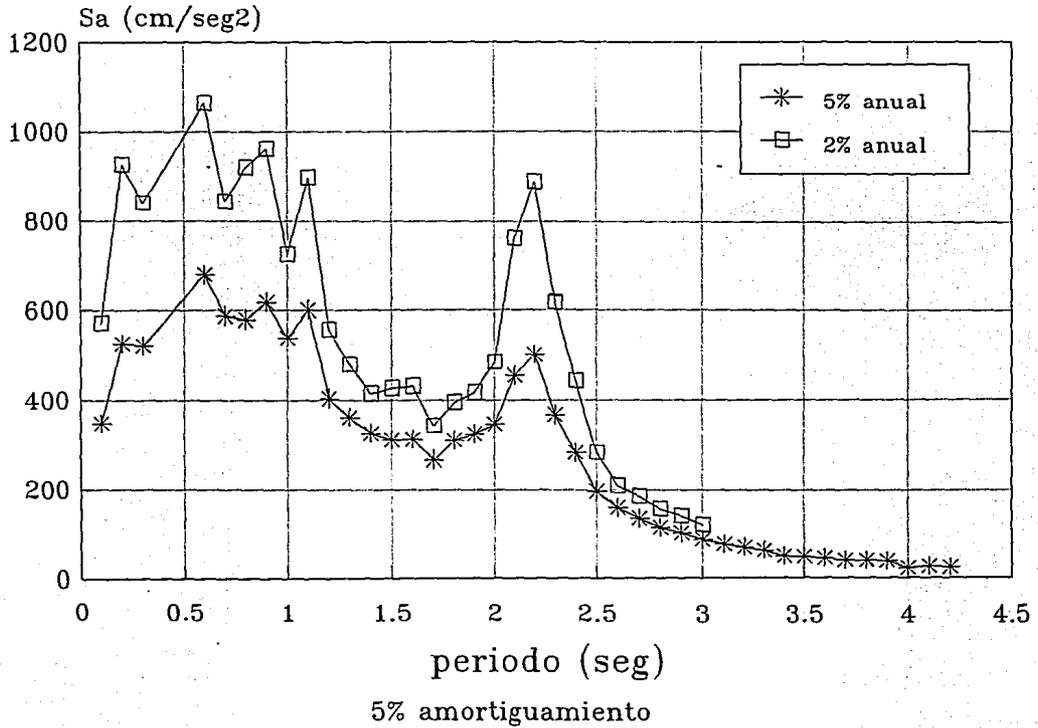


Espectros de peligro uniforme operacionales

Figura 4.7

ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME

Sismos Accidentales



Espectros de peligro uniforme accidentales.

Figura 4.8

ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME

Comparación

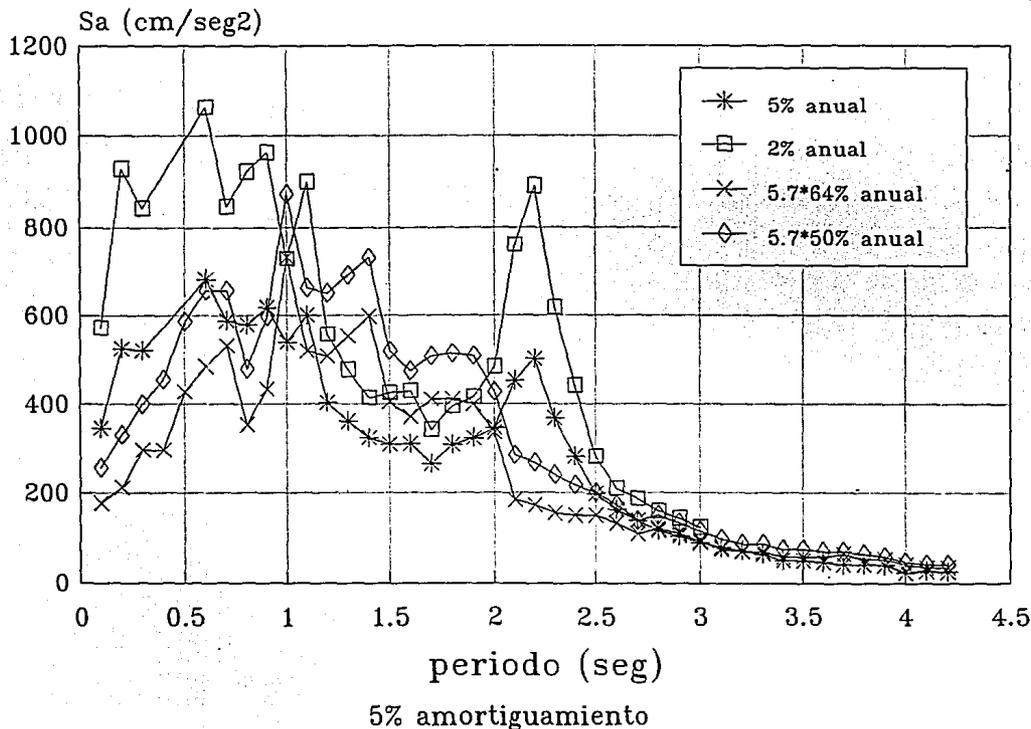


Figura 4.9
Comparación de espectros de peligro uniforme

COMPARACION DE ESPECTROS DETERMINISTAS Y PROBABILISTAS

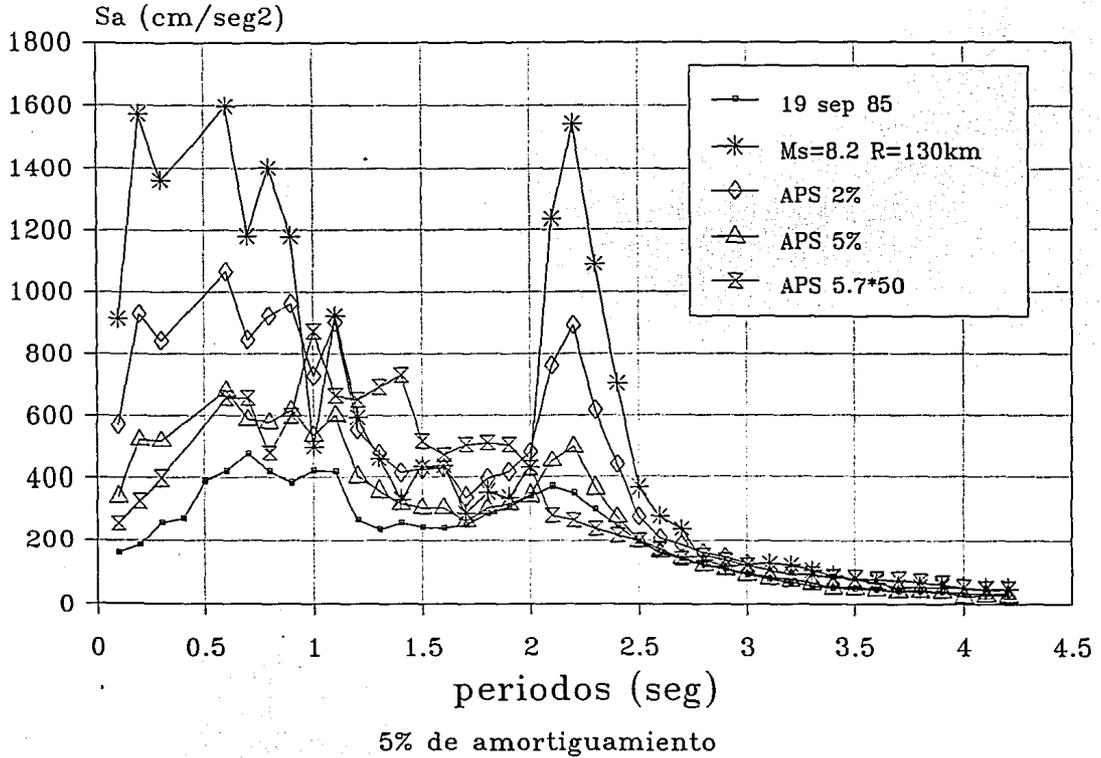


Figura 4.10
Comparación de espectros deterministas y probabilistas

5. ESPECTRO DE DISEÑO PROPUESTO

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, puede proponerse un espectro de diseño suavizado, construido con una ordenada de pseudoaceleraciones de alrededor de $800\text{cm}/\text{seg}^2$, constante desde el origen de las abscisas (periodo estructural), pues los espectros crecen rápidamente, hasta dos segundos, valor del periodo que sirve de envolvente. Esta ordenada cubre la consideración accidental asociada al 2% de probabilidad de excedencia anual para periodos aproximadamente entre 1 y 2seg, y está por encima del espectro de peligro constante para la del 5% y de las consideraciones tanto operacional como determinista (19 de septiembre de 1985) en todos los periodos considerados, excepto en un pico pequeño. Además, no está muy por debajo de las ordenadas que arroja la consideración accidental del 2% en ordenadas correspondientes a periodos menores a 1seg. Para periodos mayores a 2seg puede proponerse un decrecimiento más rápido que lo usual, que es una curva proporcional al inverso del periodo elevado a un exponente menor a la unidad (generalmente para este tipo de terreno un exponente de $2/3$), para no sobreestimar demasiado las ordenadas correspondientes. Se muestra en la figura 5.1a un espectro propuesto con ordenada en $800\text{cm}/\text{seg}^2$ en comparación con los espectros arrojados por el APS, y con el del escenario determinista del 19/IX/85.

No se muestra la curva calculada para el posible peor escenario, ya que presenta niveles de aceleraciones que económicamente serían poco aceptables debido al elevado costo que implicaría construir o reforzar estructuras para soportar las fuerzas correspondientes a estas aceleraciones. Para compararla con los otros espectros podemos asociar probabilidades a ciertos valores representativos de sus ordenadas, ya que no todas las ordenadas tienen la misma probabilidad de ser excedidas. Así, para el espectro del posible peor escenario, podemos identificar ordenadas representativas de los máximos del orden de $1400\text{cm}/\text{seg}^2$ (periodos entre 0.2 y 0.8 seg, y entre 2.1 y 2.2 seg). Este valor puede asociarse, en promedio para estos periodos, a una probabilidad anual de excedencia de 0.7%. Esto es, el posible peor escenario puede asociarse aproximadamente a una probabilidad de excedencia en una vida útil de 50 años de:

$$P_{50} = 1 - (1 - 0.007)^{50} = .3 = 30\%$$

En otras palabras, un espectro de diseño que se propusiera para un posible peor escenario que se asocie a una probabilidad alta de excedencia en la vida

útil, como lo es 30% (poco menos de 1/3), considerada adecuada en la referencia 23 para edificaciones, tendría un coeficiente sísmico alrededor de:

$$a/g = 1400 / 981 = 1.43$$

Huelga decir que efectivamente resulta ser un coeficiente muy elevado para ser considerado en el diseño.

Notamos en la figura 5.1b cómo se comparan los espectros del escenario real del sismo del 19/IX/85 al espectro de riesgo uniforme del 5% de probabilidad anual de excedencia. Para periodos menores a $T=0.7\text{seg}$ podemos asociar las ordenadas del escenario real a probabilidades mayores a 5%. No obstante, el resto de las ordenadas del espectro se apegan mucho a esta probabilidad.

Para proponer un espectro de diseño adimensional para el 5% del amortiguamiento crítico, correspondiente a la zona II de terreno definida en la referencia 19, dividimos las ordenadas entre la aceleración de la gravedad, con lo cual se puede definir con una ordenada a , expresada como fracción de g , dada por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} a &= c, \text{ si } T \leq 2.0\text{seg} \\ a &= qc, \text{ si } T > 2.0\text{seg} \\ q &= (2.0\text{seg} / T)^2 \\ c &= 0.82 \end{aligned}$$

donde T es el periodo estructural, expresado en segundos, y c es el coeficiente sísmico adimensional, correspondiente a la zona II de terreno.

Existen actualmente propuestas anteriores de espectros de diseño para Chilpancingo. Entre estas figuran:

- a) la mencionada del actual Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero, cuya cobertura es de carácter regional (ref. 18),
- b) la propuesta en la referencia 19, asociada exclusivamente al sitio, basada en estudios sobre daños reportados hechos por los sismos de 1985, y
- c) la propuesta en la referencia 12, con base en estudios de APS, para terreno firme.

En particular, la propuesta anterior c), está basada en la propuesta de la referencia 5 para construir espectros suavizados a partir de los movimientos máximos del terreno. Se construyó para un tipo de terreno considerado firme, por lo que para poder hacer la comparación de todos los espectros, se usaron las mismas propuestas de la referencia 5 para construir espectros en otros tipos de terreno (en nuestro caso terreno intermedio), a partir del que se tiene. La manera en que se generó fue la siguiente. Se considera que la relación entre el movimiento del terreno firme a intermedio es de 0.67 a 1 ($.67 : 1 = 1 : 1.5$). Dado que los valores del espectro de respuesta suavizado se obtiene de factorizar los parámetros del terreno, para amplificarlos en periodos mayores a $T=0$, el espectro correspondiente a terreno intermedio se encuentra multiplicando la propuesta por 1.5 (o dividiendo entre 0.67); los periodos T_a y T_b que delimitan el plato del espectro permanecen constantes.

Como se observa en la figura 5.2, los tres espectros anteriormente propuestos también muestran un coeficiente sísmico cercanos a 0.8. No obstante, subestiman la participación de periodos mayores a 1seg cuyas ordenadas resultaron importantes al tomar en cuenta las condiciones de operación así como al usar las leyes de atenuación propias que incluyen el efecto de las señales de origen, que genera altas ordenadas en un segundo pico de los espectros de respuesta, alrededor del periodo de 2seg.

La comparación del espectro sugerido con espectros anteriormente propuestos, incluido el del actual reglamento de construcciones, justifica la elección del orden de probabilidades empleado para el cómputo de espectros de peligro uniforme, si se considera que el nivel del coeficiente sísmico es adecuado para el sitio (del orden de 0.8). Desde este punto de vista, la presente propuesta en realidad aporta la sugerencia de ampliar la meseta del espectro de diseño, para uniformizar el nivel de peligro considerado adecuado. El nivel de diseño que ha de considerarse, ya sea explícitamente en el coeficiente sísmico, o implícitamente en la probabilidad de excedencia a elegir, principalmente será dictado por la capacidad real de una localidad para aceptarlo.

PROPUESTA DE ESPECTRO DE DISEÑO

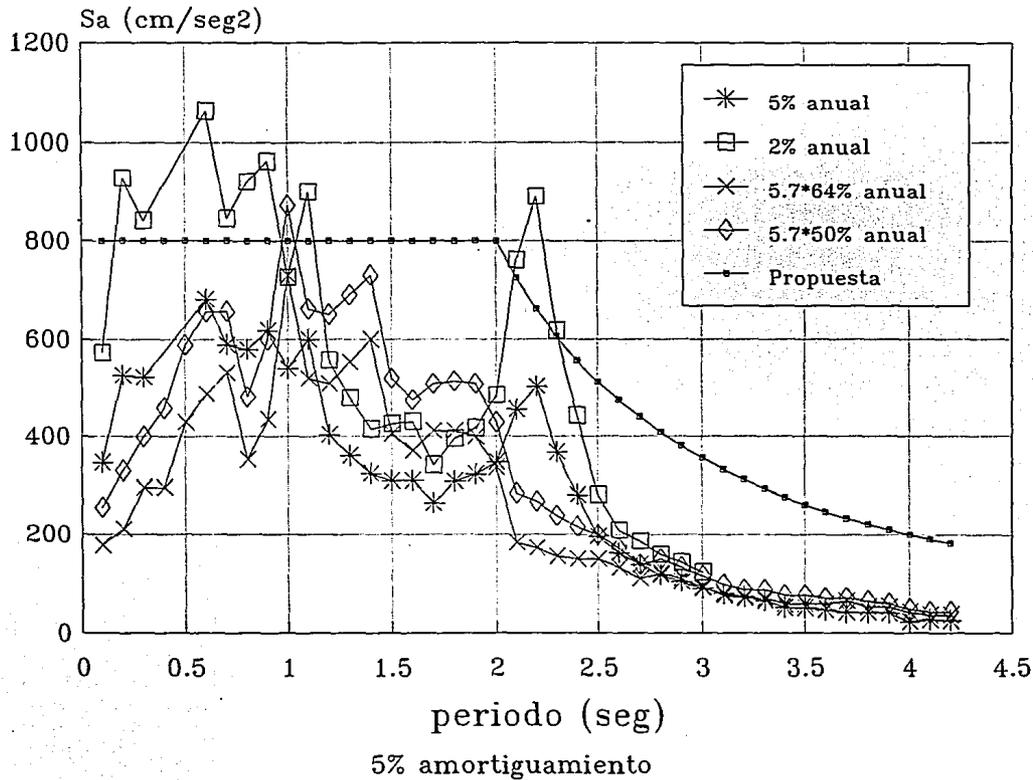


Figura 5.1a
Propuesta de espectro de diseño

COMPARACION DEL ESCENARIO REAL (19/XI/85) CON 5% DE PROBABILIDAD

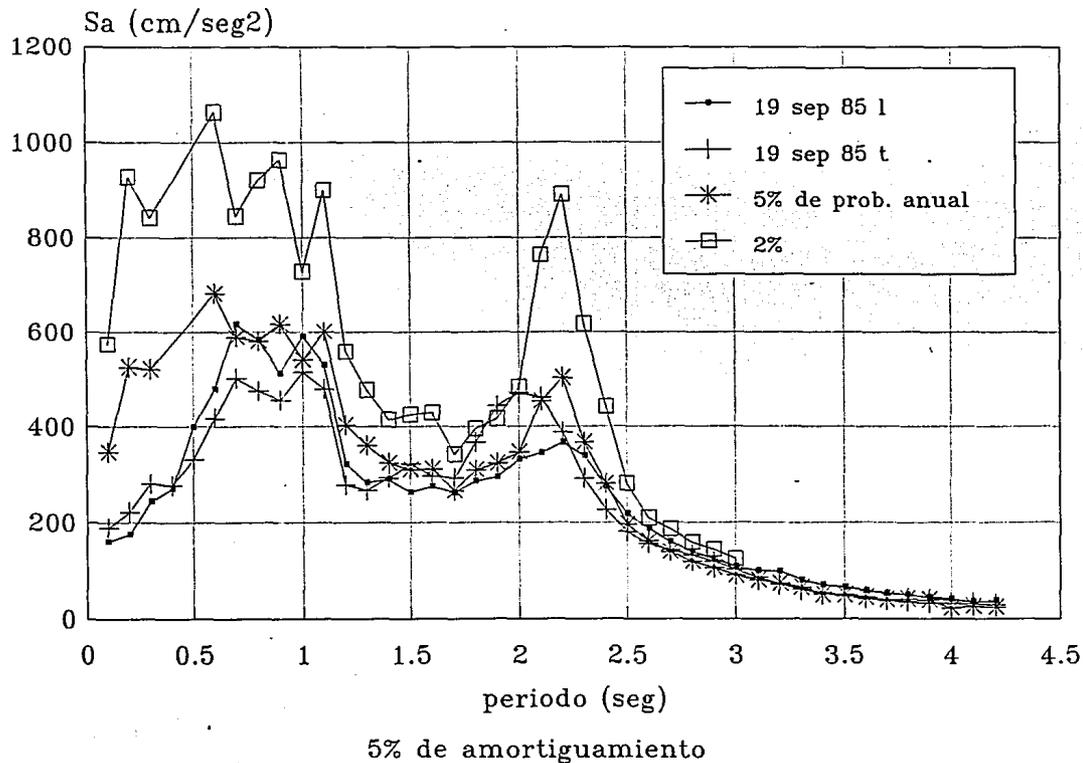
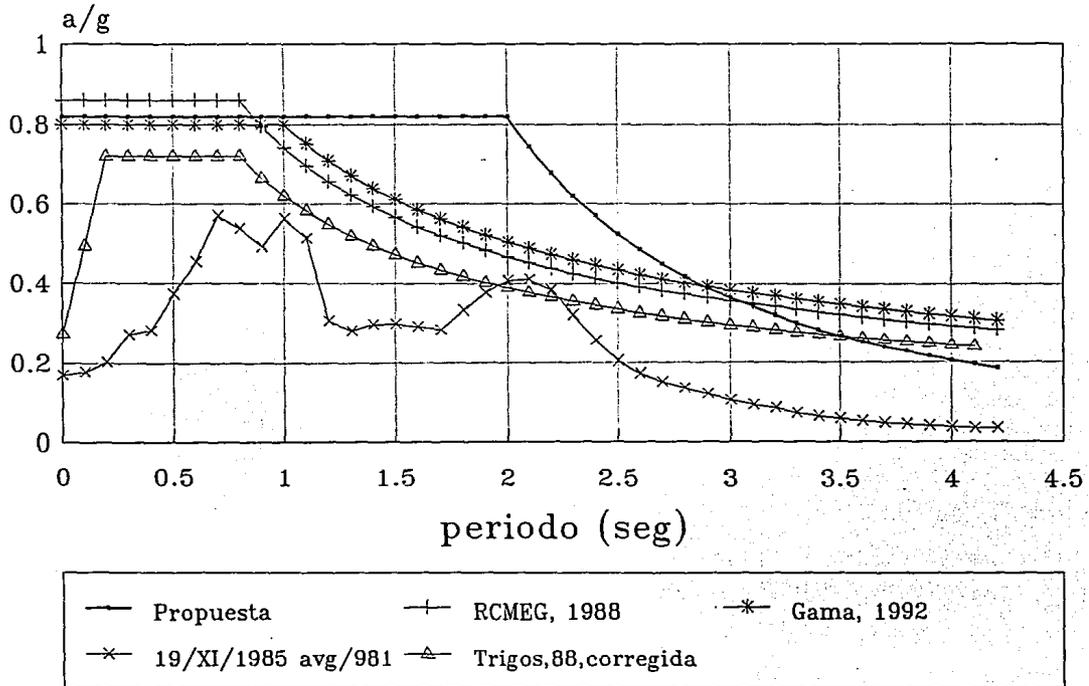


Figura 5.1b
Probabilidad asociada al escenario real del sismo del 19/XI/85

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

ESPECTROS DE DISEÑO PROPUESTAS DE VARIOS AUTORES



5% de amortiguamiento

Figura 5.2
Propuestas de varios autores

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se ha propuesto un espectro de diseño para la zona II de Chilpancingo con base en escenarios deterministas y espectros de peligro uniforme tanto para el caso accidental como el de operación, construidos con leyes de atenuación propias. Es aún necesario complementar estos resultados con una propuesta de espectro para la zona de terreno firme. Se cree que el modelo estratigráfico empleado en el intento de utilizar los acelerogramas de la estación Petaquillas es bueno; con esto en mente, y dado que no existen muchos registros para el sitio, se piensa que la mejor manera de llegar a una propuesta para espectros de diseño para este tipo de terreno es generar registros para éste, empleando los que se tiene en terreno intermedio, desamplificándolos con el uso del modelo estratigráfico. Teniendo los registros para zona I, se puede rehacer el presente trabajo para terreno firme. El uso de los acelerogramas disponibles de la estación PET, asociados a terreno firme, no puede ofrecer resultados satisfactorios dada su escasez y dado que las magnitudes a las que se les asocia están por debajo del nivel que se ha considerado para el riesgo aceptable.

Al observar el comportamiento de los espectros de respuesta estudiados, se identifica una participación en las ordenadas alrededor de 2 seg. que tal vez pueda asociarse a la naturaleza de la señal en la fuente, hecho que genera la necesidad de mesetas más amplias para consideraciones de diseño, contraponiéndose a propuestas típicas para este tipo de suelo. Cabe añadir que el hecho de rehacer el trabajo para señales desamplificadas, muy probablemente arrojará para Chilpancingo espectros de diseño para terreno firme con mesetas también más amplias que lo usual puesto que las altas ordenadas seguirían apareciendo, si es que en verdad pertenecen a la señal en sí.

Se enfatiza la importancia de haber ampliado el panorama atacando el problema tanto determinista como probabilísticamente, en especial al destacar la importancia que tuvo el sismo del 19 de septiembre de 1985 como escenario determinista, a manera de cota inferior del riesgo aceptable.

Se hace notar que este trabajo se elaboró con bases simplistas, tanto en los modelos de sismicidad como en los de atenuación. Modelos actuales contemplan la inclusión de procesos con memoria para el caso de sismicidad. Además existen modelos más refinados de las formas funcionales de las leyes de atenuación. Tal vez el uso de ellos se refleje en reducciones de las

desviaciones estándar que se presentaron, al apearse mejor al comportamiento real de las señales de la fuente, y al de los efectos locales. Siempre podrá refinarse el estudio al contar con información más completa que lo justifique. Trabajos como éste podrán elaborarse para muchos sitios, proponiendo bases propias para diseño, a medida que se cuente con datos suficientes. Actualmente también, existe mejor definición de las zonas sísmogénicas y de sus respectivas tasas de excedencia de magnitudes, en trabajos conjuntos del Instituto de Geofísica e Ingeniería de la UNAM.

Se demostró la posibilidad de generar leyes de atenuación locales, aun con pocos datos, que representaron el comportamiento de la respuesta mucho mejor que leyes de atenuación de uso general. Además se destaca la importancia de no sólo tener a nivel nacional una más amplia red acelerográfica, tanto para mejorar el entendimiento de las respuestas locales, como para generar leyes de atenuación más precisas y completar catálogos de temblores existentes, sino de mejorar la calidad del conjunto de registros de movimiento fuerte mediante estandarizaciones pertinentes. Es importante mencionar la necesidad de que los catálogos y acelerogramas existentes sean también abiertos a revisión pública.

Es importante mencionar que una verificación que se deriva de los resultados obtenidos, ligados a su probabilidad de excedencia, es que a priori no puede fijarse una probabilidad a considerarse para la propuesta de niveles de diseño en una región o sitio determinado. En realidad el proceso se vuelve iterativo, en el que al final se ha de señalar que los niveles de diseño elegidos a través del juicio del ingeniero, corresponden a cierta probabilidad de ser excedidos, ya sea que se refiera anualmente, o en un periodo de observación correspondiente a cierta vida útil. De hecho, en la actualización de parámetros de diseño mediante herramientas probabilistas, para regiones que contaban con alguna reglamentación al respecto, el nivel de riesgo (peligro) aceptable a ser considerado puede inferirse analizando las propuestas anteriormente existentes. Para el caso particular de Chilpancingo, la población ha de enfrentarse a peligros tradicionalmente grandes, al aceptar la incapacidad de utilizar en sus diseños coeficientes sísmicos mucho mayores, y considerando adecuados los niveles actualmente empleados; esto es debido a que el sitio se encuentra muy cerca de una fuente tan importante de generación de sismos. De tal manera, podemos decir que el espectro propuesto mantendría a la población expuesta a probabilidades anuales de excedencia siempre menores al 5%, entre el 2%

y el 5% para periodos entre 0 y 1seg, menores al 2% para periodos entre 1 y 2 seg. aproximadamente, entre el 2% y el 5% para periodos entre 2 y 2.3 seg., y finalmente menores al 2% para periodos mayores a 2.3seg. (fig. 5.1b).

REFERENCIAS

- 1) Aki, K., 1967. Scaling Laws of Seismic Spectrum. *J.Geophys.Res* 72: 1217-1231.
- 2) Brune, J.N., 1979. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes. *J. Geophys. Res.* 75,4997-5009.
- 3) Campbell, K.W., 1985. Strong Motion Attenuation Relations: A Ten Year Perspective. *Earthquake Spectra*, V1, n4.
- 4) Strang, G., 1982. *Algebra Lineal y sus Aplicaciones*. Adison Wesley Iberoamericana.
- 5) Newmark, N.M., Hall, W.J., 1969. Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities. *Cuarto Congreso Mundial de Ingeniería Sísmica*, Chile.
- 6) EERI Committee on Seismic Risk, 1989. The Basics of Seismic Risk Analysis. *Earthquake Spectra*, V5, n4: 675 - 702.
- 7) Singh, S.K., Ordaz, M., 1990. *Sismicidad y Movimientos Fuertes en México: Una Visión Actual*. CENAPRED.
- 8) Benjamin, J.R., Cornell, C.A., 1970. *Probability, Statistics and Decisions for Civil Engineers*. McGraw-Hill Book Co. N. York.
- 9) Grases, J.G., 1990, *Desempeño de Instalaciones Hospitalarias Durante Sismos; Estrategia para la Reducción de la Vulnerabilidad*. VI Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente. México.
- 10) M'Guire, R.K., 1976. *EQRISK; Evaluation of Sites for Earthquake Risk*. United States Department of the Interior, Geological Survey, Open File Report 76-67.
- 11) *Proyectos Marinos, S.C.*, mayo 1982. *Bases del riesgo sísmico y espectros de riesgo uniforme de la Bahía de Campeche*. Informe preparado para el

Instituto Mexicano del Petróleo. (Ver además: Guzman, R., Sandoval, J., 1983. Espectros de Riesgo Uniforme en la Bahía de Campeche. Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica; Puebla: 99-110).

12) Trigos, J.L., 1988. Riesgo Sísmico, Construcciones y Reglamentos en México.

13) Rosenblueth, E., Ordaz, M., 1988. Métodos Empleados en la Evaluación de la Sismicidad. Estudios sobre Sismicidad en el Valle de México, DDF.

14) INEGI, FI-UNAM, 1984. Geología de la República Mexicana.

15) Bravo, H., Ponce, L., Suárez, G., Zúñiga, R., 1988. Potencial Sísmico de México; Estudios sobre Sismicidad en el Valle de México, DDF.

16) Esteva, L., 1970. Regionalización Sísmica de México para fines de Ingeniería. Informe 246, II UNAM.

17) Nava, A., 1987. Terremotos. La Ciencia desde México. FCE.

18) Reglamento de Construcciones de los Municipios del Estado de Guerrero, 1988. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guerrero; 27 de diciembre de 1988.

19) Gama, G.A., 1992. Propuesta de Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Chilpancingo, Guerrero. Tesis de Maestría, IPN.

20) Sarria, A., 1990. Ingeniería Sísmica. Ediciones Uniandes. Colombia.

21) Esteva, L., 1988. The Mexico Earthquake of September 19, 1985; Consequences, Lessons, and Impact on Research and Practice. Earthquake Spectra, V4, n3: 413 - 426.

22) Grases, J., 1993. Consideraciones sobre la Incorporación de la Peligrosidad Sísmica en Normativas y Especificaciones. Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-resistente y Primera Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural; Mérida, Venezuela.

23) Instituto de Ingeniería-UNAM, 1977. Requisitos de Seguridad y Servicio para las Estructuras. Informe 400, II-UNAM.