

# 9. Aspectos fundamentales de la geología y la sismología para la microzonación sísmica

WALTER W. HAYS

U.S. Geological Survey Reston, Virginia

## 1. LA PELIGROSIDAD SISMICA

Un terremoto es ocasionado por la liberación abrupta, repentina de la energía de deformación que se ha venido acumulando lentamente a lo largo de una falla, una superficie o una zona de fracturación en la corteza terrestre. Cuando se rompe o fractura una falla, las ondas sísmicas se propagan en todas las direcciones desde la fuente (Figura 1). A medida que las ondas *P*, *S*, Love y Rayleigh inciden en la superficie de la Tierra, hacen vibrar el terreno a frecuencias que oscilan entre unos 0.1 y 30 hertzios. También hacen vibrar a los edificios horizontal y lateralmente como consecuencia de la amplitud, la composición espectral y la duración del temblor de tierra. Si el edificio no está diseñado y construido de forma que soporte las fuerzas dinámicas que acompañan a estas vibraciones, sufre daños. Las ondas de compresión (*P*) y transversales (*S*) ocasionan, principalmente, vibraciones de alta frecuencia (mayores de 1 hertzio), que son más eficaces que las ondas de baja frecuencia para hacer vibrar a los edificios bajos. Las ondas Rayleigh y Love ocasionan, principalmente, vibraciones de baja frecuencia (menos de 1 hertzio), que son más eficaces que las ondas de alta frecuencia para hacer vibrar a los edificios altos.

Para un diseño resistente a los terremotos, se necesita evaluar los fenómenos primarios y secundarios que acompañan al sismo a fin de definir las fuerzas que ha de resistir un edificio. Estos fenómenos, llamados peligrosidad sísmica, son clasificados como temblores de tierra, ruptura por falla de superficie, cesión de tierra inducida por el terremoto (cesión por deslizamiento de terreno, licuefacción, compactación, cabeceo y cesión por sedimentación o asentamiento de los cimientos), deformación tectónica regional y (en algunas zonas costeras) tsunamis. Cada uno de estos peligros

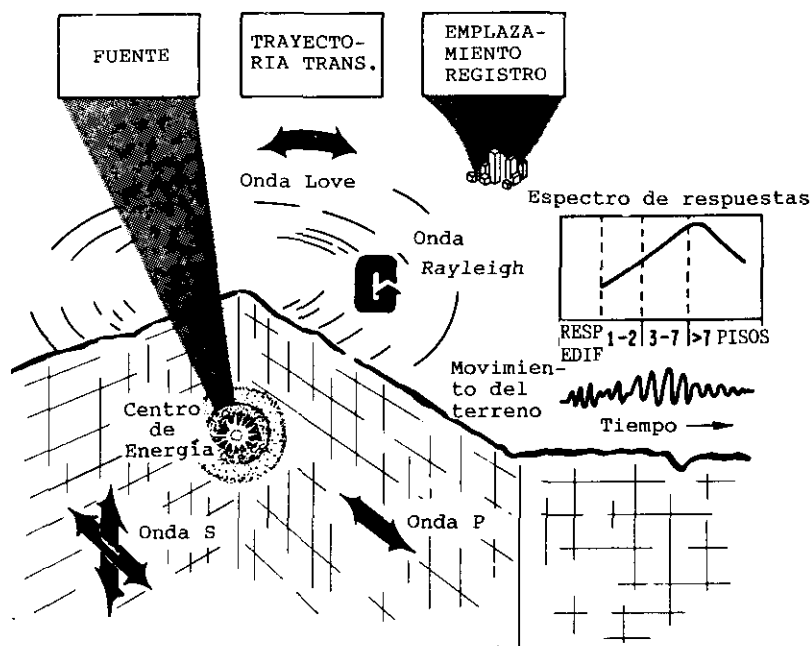


Figura 1.—Esquema de la propagación de ondas sísmicas desde la fuente y movimiento del terreno.

puede ocasionar daños a los edificios e instalaciones, pérdidas económicas y pérdida de vida (Figura 2). Estos peligros también pueden desencadenar incendios e inundaciones. Los temblores secundarios o réplicas del terremoto pueden durar de meses a varios años, según la energía liberada en el temblor principal y pueden reactivar cualquiera o todos estos fenómenos físicos, ocasionando daños o pérdidas adicionales.

La evaluación de la peligrosidad sísmica para fines de diseño resistente a los terremotos es una labor compleja (Figura 3). Se necesita un grupo multidisciplinario de científicos e ingenieros para realizar un amplio abanico de análisis técnicos. Estos análisis se efectúan en tres escalas: a) *mundial* (a una escala aproximada de 1:7.500.000 o mayor), b) *regional* (a una escala aproximada de 1:250.000 o mayor) y c) *local* (a una escala aproximada de 1:25.000 o menor). Los estudios mundiales proporcionan un «cuadro extenso» de las fuerzas tectónicas que entran en juego. Los estudios regionales proporcionan los parámetros físicos requeridos para definir el potencial sísmico de una región. Los estudios locales definen los parámetros físicos dominantes que controlan las características del peligro para lugares específicos. Todos estos estudios tratan de dar contestación a las siguientes preguntas técnicas:

- ¿Dónde ocurren ahora los terremotos? ¿Dónde ocurrieron en el pasado?
- ¿Por qué ocurren?
- ¿Con cuánta frecuencia ocurren terremotos de una cierta intensidad (magnitud)?
- ¿Qué magnitud (gravedad) han tenido los efectos físicos en el pasado? ¿Qué magnitud pueden tener en el futuro?
- ¿Cómo varían los efectos físicos espacial y temporalmente?

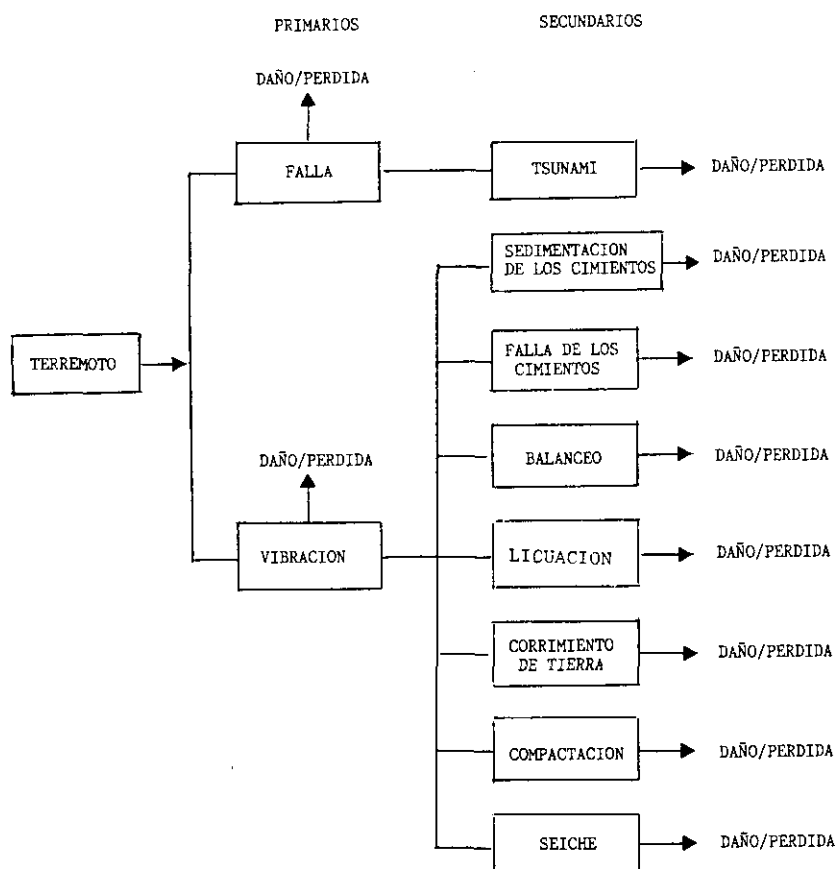


Figura 2.—Efectos primarios y secundarios que acompañan a un terremoto.

Las respuestas a estas preguntas se utilizan para definir los parámetros de diseño sísmico (Figura 4). Aun cuando estas preguntas parecen simples, las respuestas requieren una investigación y enjuiciamiento técnico considerables.

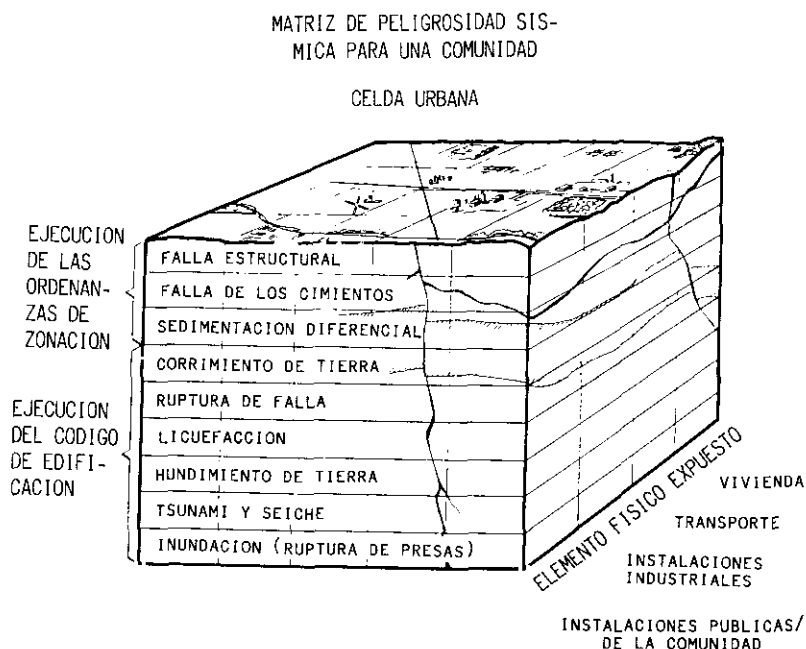


Figura 3.—Elementos que intervienen en la evaluación del riesgo geológico.

## 2. MICROZONACION SISMICA

La microzonación sísmica, división de una región en zonas geográficas que se prevé experimentarán la misma gravedad relativa de un peligro sísmico (por ejemplo, temblor de tierra, ruptura por falla de superficie, cesión de tierra inducida por el terremoto, deformación tectónica o inundación por tsunami), es una parte importante del proceso de evaluación de la peligrosidad sísmica. Los mapas de microzonación pueden utilizarse para planificar la construcción y el desarrollo urbano y para guiar el diseño resistente a los terremotos de los edificios nuevos y reforzar los edificios e instalaciones existentes.

La microzonación sísmica es una tarea compleja que requiere las siguientes clases de estudios técnicos:

1) *Evaluación de la peligrosidad sísmica a escala regional* (una escala cartográfica de 1:100.000-1:250.000, aproximadamente). Esta parte de un estudio de microzonación establece los parámetros físicos de la región que se requieren para evaluar los peligros sísmicos de temblor de tierra, ruptura por falla de superficie, deformación tectónica e inundación por tsunami. Incluye los pasos siguientes:

1. Compilación de un catálogo y mapa de sismicidad histórica.
2. Realización de estudios neotectónicos (planimetría, datación absoluta y determinación de fosas) para ampliar la información sobre periodicidad derivada de datos sobre sismicidad histórica.
3. Preparación de un mapa fotogeológico.
4. Preparación de un mapa sismotectónico que indique la situación de fallas activas.
5. Preparación de un mapa que indique las zonas sísmógenas, especificando la magnitud del terremoto máximo y la frecuencia de incidencia de terremotos en cada zona sísmógena.
6. Especificación de las características del movimiento de tierra de campo cercano (amplitud máxima y composición espectral).
7. Especificación de las leyes regionales para atenuación de ondas sísmicas, incluyendo su incertidumbre.

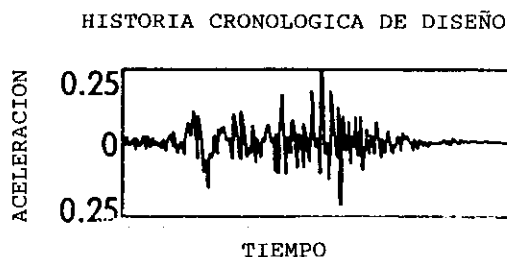
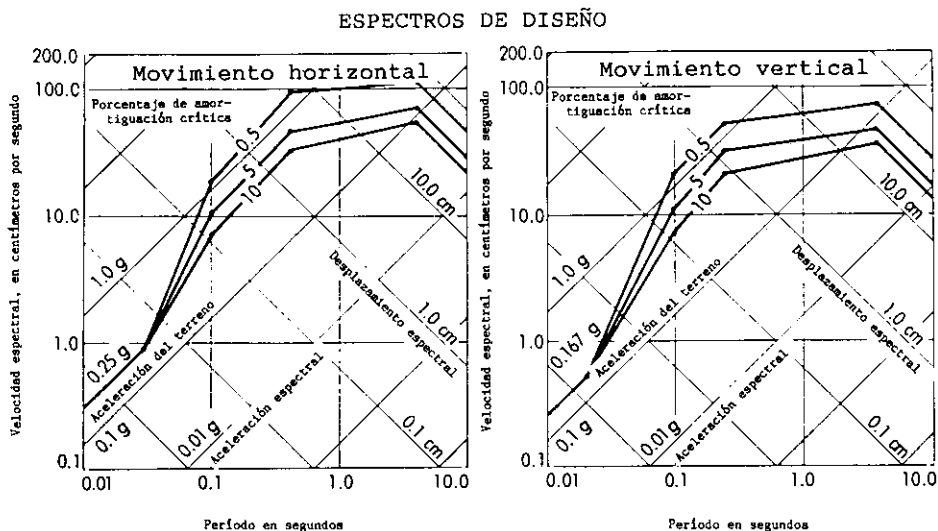


Figura 4.—Espectros utilizados para definir los parámetros de diseño.

8. Preparación de mapas probabilísticos de peligrosidad por temblores de tierra en términos de aceleración máxima del suelo, tiempos de exposición y probabilidad de no superación.
9. Creación de bases de datos regionales (por ejemplo, fotografía aérea, hidrogeología, mapas de características distintivas y registros de perforaciones) y documentación de programas de ordenadores para análisis de los datos.

2) *Evaluación de la peligrosidad sísmica a escala urbana* (una escala cartográfica de 1:5.000-1:25.000, aproximadamente). Esta parte del estudio de microzonación integra las datos sismotectónicos y otros datos físicos obtenidos en el estudio regional (Parte 1) con los datos específicos para emplazamientos obtenidos en la zona urbana a fin de producir mapas de microzonación sísmica. Los pasos técnicos principales comprenden lo siguiente:

10. Adquisición, síntesis e integración de los datos geológicos, geofísicos y geotécnicos nuevos y existentes para caracterizar el suelo y roca en la zona urbana en términos de sus propiedades físicas y la respuesta prevista para distintos niveles de temblor de tierra.
11. Estimación de las funciones empíricas de transferencia del suelo en cada zona urbana con consideración de la amplitud, frecuencia, composición y nivel de aceleración máxima del terreno.
12. Preparación de mapas probabilísticos de la peligrosidad de temblores de tierra para cada zona urbana en términos de los tiempos de exposición a la aceleración máxima del terreno y la probabilidad de no superación. Estos parámetros pueden correlacionarse con el código actual de edificación y los planes para el uso de la tierra.
13. Especificación de los factores de amplificación dinámica para columnas de tierra que son típicas de cada zona urbana.
14. Preparación de un mapa que presente el potencial de ruptura por falla de superficie en cada zona urbana.
15. Preparación de un mapa que indique el potencial de licuefacción en cada zona urbana.
16. Preparación de un mapa que indique el potencial de deslizamientos de terreno en cada zona urbana.
17. Preparación de un mapa que indique los posibles efectos secundarios (por ejemplo, inundaciones) en cada zona urbana.
18. Preparación de un mapa que presente, en forma resumida, todos los peligros sísmicos posibles en cada zona urbana.
19. Evaluación de la distribución del daño en terremotos pasados.

3) *Evaluación del uso de la tierra, códigos de edificación, prácticas de construcción y otras cuestiones afines*. Esta parte de un estudio de microzo-

nación utiliza análisis y síntesis de los datos físicos (Parte 1) y los mapas de microzonación sísmica elaborados para una zona urbana (Parte 2) a fin de producir recomendaciones específicas. Entre las tareas figuran las siguientes:

20. Evaluación del código actual de edificación, identificación de las opciones para modificación que incorporen las lecciones científicas y técnicas aprendidas en terremotos destructivos pasados.
21. Evaluación de prácticas regionales y urbanas de uso de la tierra, identificando opciones para alternativas a prácticas actuales que pudieran reducir la peligrosidad.
22. Evaluación de las prácticas de construcción de edificios nuevos, especificando opciones para alternativas a prácticas actuales que pudieran ser más eficaces para asegurar una alta calidad.
23. Evaluación de las prácticas actuales para reparar y reforzar edificios existentes, indicando opciones para alternativas a prácticas actuales que pudieran ser más eficaces.

### 3. ZONACION DE LA PELIGROSIDAD DE TEMBLORES DE TIERRA

La zonación de la peligrosidad sísmica de temblores de tierra —la división de una región en zonas geográficas que tienen una gravedad o respuesta relativa análoga a los temblores de tierra— ha sido una meta en Estados Unidos y otros países del mundo durante unos cincuenta años. En este tiempo, se han elaborado dos clases de mapas de peligrosidad de temblores de tierra. La primera clase resume la observación de terremotos pasados y adopta la hipótesis de que, salvo en lo que respecta a diferencias de escala, en terremotos futuros ocurrirán aproximadamente los mismos efectos. La segunda clase incorpora conceptos probabilísticos y efectúa una extrapolación de regiones que han tenido terremotos en el pasado y de regiones que tienen fuentes sísmicas posibles. La confección de mapas de zonación a escala tanto regional como urbana requiere una investigación innovadora y buenos datos para resolver cierto número de cuestiones técnicas controvertidas. Se ha progresado, pero queda mucho por hacer debido a que ningún mapa de zonación está totalmente libre de controversias.

Un buen mapa (o mapas) de peligrosidad por temblores de tierra presenta la variación espacial y la gravedad relativa de un parámetro físico tal como la aceleración o intensidad máximas. Dicho mapa divide una región en áreas o zonas geográficas, cada una de las cuales tiene una respuesta análoga en toda su extensión al temblor de tierra producido por un terremoto. Una vez que se han definido los efectos posibles del temblor de tierra para todas las zonas de una región, puede formularse una política

pública que contribuya a mitigar sus efectos mediante acciones apropiadas tales como: evitar determinadas zonas, planificar el uso de la tierra, adoptar diseños de ingeniería y distribuir las pérdidas mediante el seguro (Hays, 1981).

La construcción de un mapa de zonación de la peligrosidad de temblores de tierra entraña cierto número de problemas técnicos. La zonación a nivel tanto regional como local requiere la mejor información posible sobre: 1) sismicidad, 2) la naturaleza de la zona sismógena, 3) la atenuación de las ondas sísmicas y 4) la respuesta del terreno.

*Historia de la zonación sísmica en los Estados Unidos.* La confección de mapas de zonación de la peligrosidad por temblores de tierra ha proseguido lentamente, debido principalmente a que se ha necesitado una investigación considerable para resolver la controversia acerca de las cuestiones técnicas asociadas con cada mapa. La zonación sísmica en Estados Unidos tiene una historia de unos 50 años. El primer mapa de zonación de la peligrosidad por temblores de tierra para Estados Unidos fue preparado por Ulrich en 1948. Con anterioridad al mapa de Ulrich, sólo se habían preparado unos cuantos mapas para varias ciudades y zonas geográficas. El mapa de Ulrich dividía a Estados Unidos en cuatro zonas numeradas de 0 a 3, con una zona 3 considerada como la de mayor posibilidad de experimentar daños. Ese mapa fue adoptado en 1949 por la Conferencia Internacional de Funcionarios de la Edificación para su inclusión en el Código Uniforme de Edificación, y a pesar de algunos problemas en relación con su interpretación, siguió apareciendo en ediciones del Código Uniforme de Edificación hasta 1970. La edición de 1970 del Código Uniforme de Edificación utilizó un mapa de zonación (Figura 5) formulado por Algermissen (1969) que tenía el mismo esquema de numeración (zona 0 a 3) que el mapa de Ulrich. El mapa de Algermissen se basaba principalmente en el valor máximo de intensidad Mercalli Modificada observado históricamente en zona, pero también incluía cierta generalización para tomar en cuenta fallas activas y la estructura geológica regional. La Conferencia Internacional de Funcionarios de Edificación no utilizó la información sobre frecuencia de incidencia sísmica que acompañaba al mapa de Algermissen; por tanto, las disposiciones sobre fuerzas laterales especificadas en California también fueron especificadas para algunas zonas de la región oriental de Estados Unidos, ocasionando controversia y resistencia a su puesta en práctica. Las ediciones de 1976 y 1979 del Código Uniforme de Edificación contenían una versión modificada del mapa de zonación de 1970. Determinadas porciones de la zona 3, situada principalmente en California, fueron cambiadas a una nueva zona 4 para indicar mayores posibilidades de daños debido a la mayor frecuencia de incidencia sísmica y a la mayor magnitud máxima de los terremotos en California.

En 1976, Algermissen y Perkins publicaron un mapa probabilístico de peligrosidad por temblores de tierra para Estados Unidos. La escala del



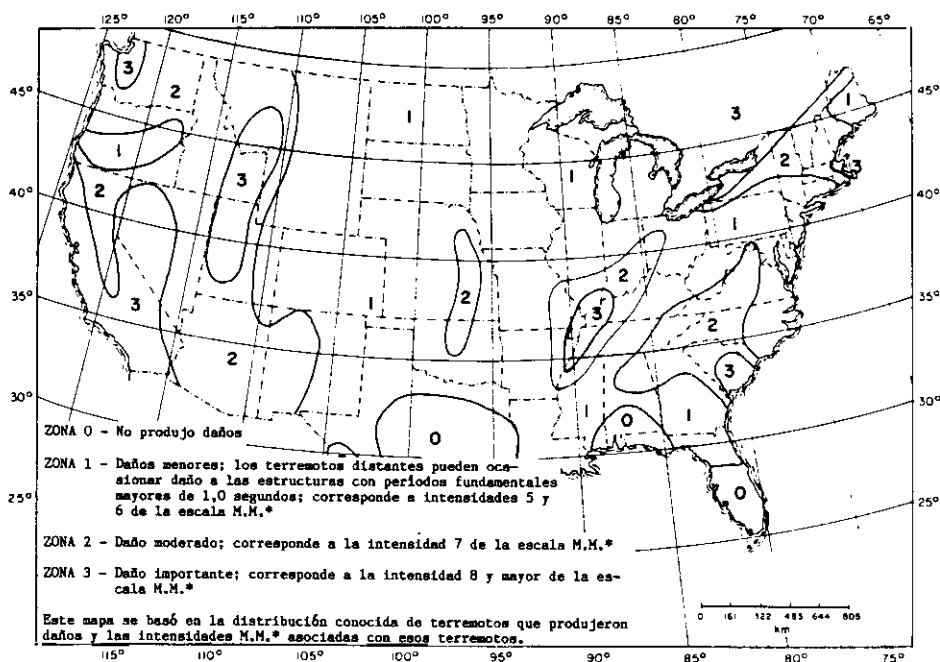


Figura 5.—Mapa de zonación del Código Uniforme de Edificación de 1970 (Algermissen, 1969).

mapa fue de 1:7.500.000 o unas 123 millas por pulgada. Al contrario de mapas anteriores que se habían basado en un trazado de los datos de intensidad Mercalli Modificada (o alguna otra escala de intensidad), su mapa (Figura 6) ilustraba la aceleración máxima en roca que se estimaba ocurría con un 90 por ciento de probabilidad de no ser superada en un periodo de 50 años. Algermissen y Perkins advirtieron que los valores de la aceleración máxima pueden ser mayores en lugares que tienen sedimentos subyacentes débiles o saturados de agua en vez de roca. El término roca se definió como un material sólido expuesto a la superficie o el suelo subyacente y que tiene una velocidad de ondas transversales de al menos 765 m/s en deformaciones pequeñas (10 por ciento). El mapa de zonación de Algermissen y Perkins fue incluido en el informe de 1978 del proyecto ATC-3 por el Consejo de Tecnología Aplicada (ATC). También figuraban en el informe dos nuevos mapas nacionales de peligrosidad por temblores de tierra, de aceleración máxima efectiva y de velocidad máxima efectiva. El mapa ATC-3 de aceleración máxima efectiva (Figura 5) es muy similar al mapa de aceleración máxima de Algermissen y Perkins, con la excepción de que los valores mayores de aceleración indicados en el mapa ATC-3 fueron 0,4 g en California, mientras que, el mapa Algermissen-Perkins presentaba valores de aceleración de hasta 0,8 g en California a lo largo



siguientes preguntas representativas, que generalmente no pueden contestarse con un simple sí o no, ilustran la controversia asociada con los mapas de peligrosidad de temblores de tierra a una escala tanto regional como urbana.

### 1) *Sismicidad*

- ¿Permitirá la incertidumbre inherente en el uso de catálogos de terremotos instrumentalmente registrados y detectados, que representan un corto intervalo de tiempo y una zona regional amplia, especificar con exactitud la frecuencia de incidencia de terremotos importantes a una escala local?
- ¿Puede determinarse con precisión el ciclo sísmico de sistemas de falla individuales y, en caso afirmativo, puede especificarse su situación en el ciclo?
- ¿Puede especificarse con exactitud el emplazamiento y magnitud del terremoto mayor que es posible físicamente en un sistema de fallas dado o en una provincia sismotectónica? ¿Puede especificarse la frecuencia de este acontecimiento?
- ¿Pueden identificarse lagunas sísmicas y evaluarse con exactitud su potencial sísmico?
- ¿Pueden reconciliarse las discrepancias entre la evidencia geológica para la incidencia de importantes movimientos tectónicos en el pasado geológico y la evidencia proporcionada por patrones actuales e históricos de sismicidad en una región geográfica?

### 2) *La naturaleza de la zona sismógena*

- ¿Pueden definirse con exactitud las zonas sismógenas sobre la base de la sismicidad histórica? ¿Sobre la base de la geología y las placas tectónicas? ¿Sobre la base de la sismicidad histórica generalizada por las datos geológicos y tectónicos? ¿Qué metodología es la más exacta?
- Al evaluar la peligrosidad sísmica por temblores de tierra para una región, ¿puede asignarse con precisión la magnitud al terremoto mayor que se prevé ocurra en un determinado período de tiempo en un sistema de fallas o zona sismógena en particular?
- ¿Pueden cuantificarse e incorporarse a mapas de zonación los efectos físicos de los parámetros de fuentes sísmicas, tales como la caída de esfuerzos y el momento sísmico?

### 3) *Atenuación de las ondas sísmicas*

- ¿Pueden modelizarse los detalles complejos de la ruptura de falla sísmica (por ejemplo, las dimensiones de la ruptura, el tipo de falla: velocidad de desplazamiento de falla, transposición de falla) con precisión suficiente para proporcionar estimaciones exactas de las caracte-

risticas de amplitud y frecuencia del movimiento de tierra cerca de la falla? ¿Lejos de la falla? ¿Se saturan los parámetros de movimiento del suelo máximos a grandes magnitudes?

#### 4) *Respuesta del terreno local*

- ¿Hay una gama discreta de valores de movimientos de suelo y niveles máximos de deformación por deslizamiento dinámico de capas donde la respuesta del terreno (definida por una función de transferencia del emplazamiento) es repetible y esencialmente lineal? ¿Hay una gama en la que dominan los efectos no lineales?
- ¿Pueden modelizarse con exactitud los efectos 2-D y 3-D de propiedades físicas (por ejemplo, grosor, litología, geometría, contenido de agua, velocidad de las ondas transversales y densidad) que controlan la variación espacial, la duración y la amplitud y características espectrales de la respuesta del terreno en una región geográfica?
- ¿Puede modelizarse con exactitud la variación del movimiento de tierra con la profundidad por debajo de la superficie?
- ¿Hay incertidumbre asociada con la constante de la función de transferencia de un emplazamiento? ¿Es ésta pequeña?

### 5. FUNCIONES DEL GEOLOGO Y EL SISMOLOGO

El geólogo y el sismólogo trabajan en cooperación con el ingeniero. Tienen la función importante de proporcionar información que pueda ser correlacionada con la amplitud, composición espectral y duración del temblor de tierra, los tres factores más importantes que han de incorporarse en el diseño resistente a los terremotos de un edificio o instalación. El geólogo proporciona información sobre las tres escalas (mundial, regional y local), estudiando: 1) las placas tectónicas, 2) las fallas, 3) la paleosismicidad, 4) el potencial sísmico, 5) las zonas sísmógenas y 6) las características específicas del emplazamiento y la columna de roca subyacente al emplazamiento. Además de estas tareas, el sismólogo proporciona información sobre: 1) funciones de atenuación de las ondas sísmicas y 2) los parámetros del diseño sísmico. Cada tarea se describirá en las secciones que aparecen a continuación:

*Placas tectónicas.* Cada año, se producen en el mundo varios millones de terremotos. La mayoría de estos terremotos ocurren a lo largo de los límites de una docena de placas o segmentos rígidos de la corteza terrestre de 80 km (50 millas) a 100 km (60 millas) de grosor y el manto superior que se desplazan lenta y continuamente sobre el interior de la tierra (Figura 7). Estas placas colisionan en algunas zonas y se separan en otras, desplazándose con una velocidad de movimiento relativo entre las placas que oscila entre menos de 1 cm (fracción de una pulgada) y unos 10 cm

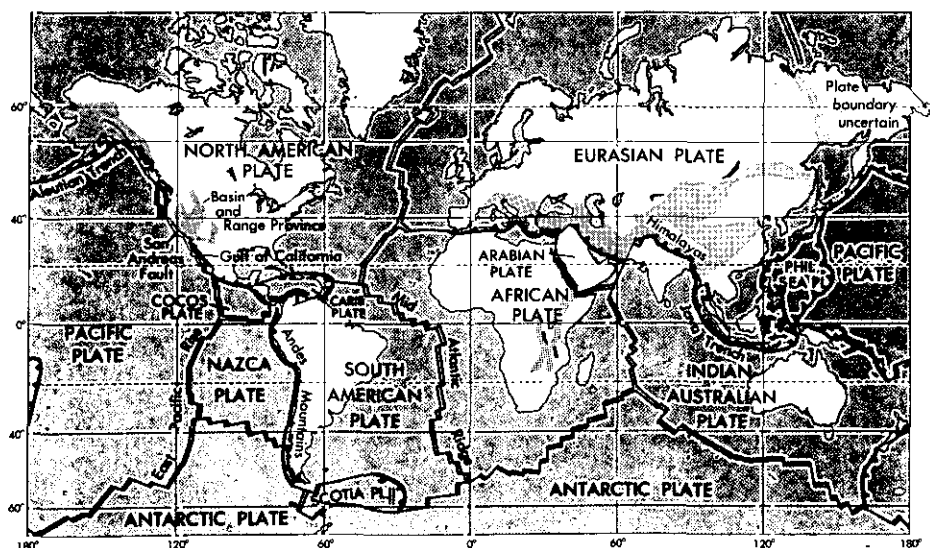


Figura 7.—Distribución de placas tectónicas.

(unas 5 pulgadas) por año. Aunque estas velocidades parecen bajas, pueden ascender a más de 50 km (30 millas) en sólo un millón de años, un intervalo corto geológicamente. A medida que se mueven estas placas, se acumula tensión. Con el tiempo, las fallas a lo largo de las márgenes de las placas o cerca de ellas se desplazan abruptamente y se produce un terremoto. Entonces, comienza de nuevo el ciclo sísmico.

*Estudio de las fallas.* El estudio de las fallas es sumamente importante para comprender *dónde* son susceptibles de ocurrir terremotos, *cuál* será probablemente su intensidad, y *con qué frecuencia* puede esperarse que ocurran. La energía liberada durante los terremotos grandes hace que la falla se rompa a través de una fracción importante de su longitud. Los datos de observación de terremotos históricos en todo el mundo indican que incluso un terremoto moderado, de magnitud 6, requiere una longitud de ruptura de falla de 5-10 km (3-6 millas) y que los terremotos grandes, de una magnitud de 8 y mayor, pueden tener una longitud de ruptura de hasta 1.000 km (600 millas).

Los mayores desplazamientos de fallas horizontales y verticales observados en la superficie terrestre durante terremotos históricos son, respectivamente, 11,5 m (38 pies) durante el terremoto de Assam en 1897 y 9,9 m (33 pies) durante el terremoto de Mongolia en 1957 (Allen, 1984). Las observaciones geodésicas indican que han ocurrido en profundidad desplazamientos notablemente mayores.

Los geólogos en todo el mundo han identificado y estudiado muchas

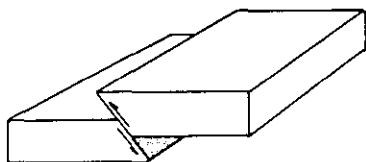
fallas que se extienden hasta la superficie del terreno. Los estudios de las fallas han producido las siguientes reglas generales:

- Casi todos los terremotos grandes han ocurrido en fallas ya existentes que habían tenido una historia anterior de desplazamientos sísmicos en el pasado geológico reciente, de ordinario, dentro de las últimas decenas de miles de años.
- Se requieren fallas largas para producir terremotos grandes.
- Las fallas largas se producen con el alargamiento y unión paulatinos de fallas pequeñas que se rompen en terremotos de pequeños a medios a través de un período de millones de años. Así pues, una falla larga, tal como la de San Andreas, *no* fue producida durante un solo terremoto en el pasado sino que, más bien, es el resultado de muchos terremotos más pequeños.
- Si puede determinarse la frecuencia de movimientos en una falla durante el pasado geológico reciente, pueden hacerse estimaciones fiables acerca de la probabilidad de ruptura de la falla en un terremoto futuro durante un intervalo de tiempo específico.

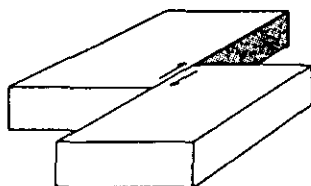
Las investigaciones de fallas en todo el mundo han demostrado que han ocurrido terremotos grandes en fallas de desplazamiento horizontal (por ejemplo, la falla de San Andreas) y fallas de corrimiento o inversas (por ejemplo, la zona de subducción por debajo de la región meridional de Chile). Estas dos clases de fallas y la falla normal (por ejemplo, la falla de Wasatch en Utah) se presentan esquemáticamente en la Figura 8. Las fallas de corrimiento, donde un bloque monta sobre otro bloque en un plano de falla ligeramente inclinado, son más difíciles de reconocer y evaluar en términos de su actividad que las fallas de desplazamiento horizontal o que las normales.

Un geólogo clasifica las fallas como «activas» o «inactivas», tomando como base el hecho de si han experimentado movimiento en un período de tiempo específico en las últimas decenas de miles de años. En la Figura 9 se ilustra este tipo de clasificación. Una falla muy activa, tal como la falla de corrimiento que marca la zona de subducción en la región meridional de Chile, tiene posibilidades de producir un terremoto de gran intensidad, como promedio, una vez cada 100 años; mientras que otras fallas, tales como la falla Oued Fodda en la región septentrional de Argelia, tienen un intervalo de periodicidad o tiempo de repetición más largo (una vez cada 450 años) para generar un terremoto de gran intensidad como el terremoto de El Asnam en 1980 que tuvo una magnitud de 7,3. El índice de actividad de la falla incide en el nivel de peligrosidad; representa un importante reto para el geólogo determinarlo con precisión.

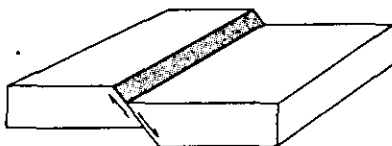
En algunos casos, la determinación del índice de actividad de una falla es muy difícil debido a que la falla no rompe en superficie. Un ejemplo de este caso es el terremoto ocurrido en 1886 en Charleston, Carolina del Sur; la falla causante de este terremoto no ha sido todavía identificada inequí-



FALLA DE DESPLAZAMIENTO INVERSO



FALLA DE DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL



FALLA DE DESPLAZAMIENTO NORMAL

Figura 8.—Distintos tipos dinámicos de fallas atendiendo al movimiento.

vocamente (Hays y Gori, 1983). Las investigaciones geofísicas (por ejemplo la reflexión sísmica) son muy importantes para identificar y evaluar la actividad de las fallas subterráneas, tanto en zonas costeras como tierra adentro.

*Paleosismicidad.* Recientemente, los geólogos han puesto a punto técnicas de campo para determinar las fechas de los terremotos prehistóricos en una determinada falla. Estas técnicas entrañan la determinación de fosas y la datación absoluta, de ordinario con el método de Carbono-14, de estratos subterráneos que datan de inmediatamente antes y después del terremoto histórico. Estas técnicas se denominan «paleosismicidad». El principio básico de la paleosismicidad se el siguiente:

- Los terremotos prehistóricos ocasionan deformación acumulativa en la superficie que se manifiesta en desplazamientos estratigráficos y topográficos. De ahí que una fosa que tenga una profundidad de sólo 5 m (16 pies) a lo largo de la falla de San Andreas puede

presentar deformación debida a terremotos prehistóricos durante los últimos 2.000 años.

La hipótesis fundamentales en la determinación de fosas son las siguientes:

- Evidencia de deformaciones notables en la corteza que pueden aislarse en lugares discretos de la superficie.
- Los movimientos de falla productores de terremotos duplican el patrón de deformación cerca de la superficie.
- Los materiales datables cerca de la superficie alrededor de una falla son conservados por periodos de tiempo más largos que los intervalos de periodicidad de movimientos de falla importantes.

Debido a que es probable que varios terremotos prehistóricos estén representados en una sola exposición en una fosa, las relaciones geológicas pueden ser muy complejas. La determinación óptima de la fecha del terremoto requiere la datación de los estratos *más antiguos* no rotos posteriores al terremoto y los estratos *más recientes* deformados previos al terremoto.

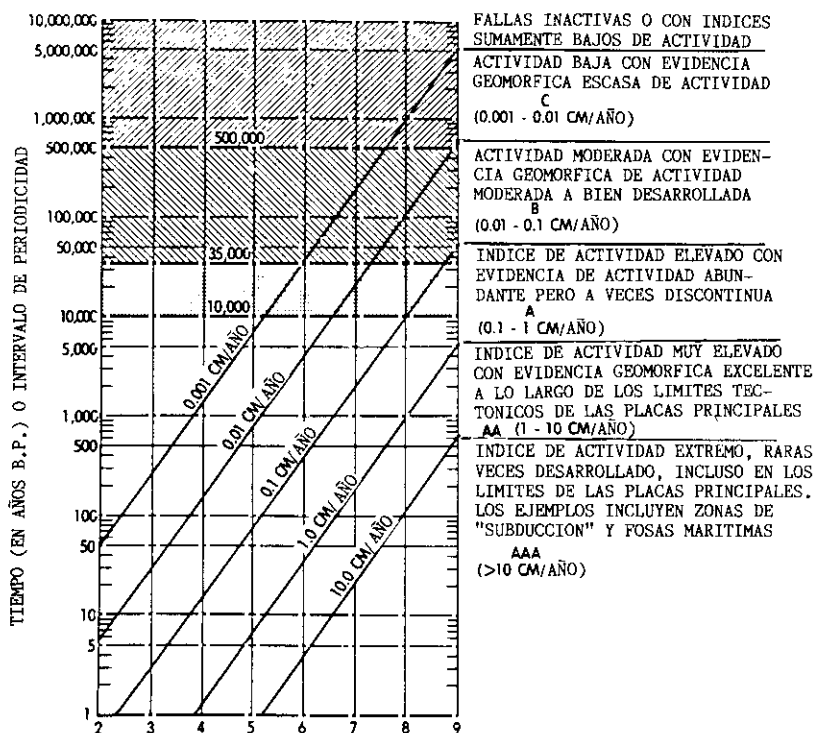


Figura 9.- Distintos tipos de fallas atendiendo a su actividad.



Se han formulado pruebas geológicas útiles para la paleosismicidad partiendo de la evidencia estratigráfica y geomórfica dentro de zonas de fallas activas en la región oeste de los Estados Unidos (Sieh, 1978; Schwartz y Coppersmith, 1984). Estas relaciones proporcionan estimaciones de los desplazamientos y periodicidad de eventos paleosísmicos individuales. En el este de los Estados Unidos, los estudios de la paleosismicidad también están comenzando a producir resultados útiles. Se han reconocido en la región de Nuevo Madrid, Missouri, terremotos prehistóricos del Holoceno Posterior (10.000 años B. P.) sobre la base de la licuefacción asociada con dos terremotos prehistóricos ocurridos en los últimos 2.000 años (Russ, 1982). Recientemente, se han reconocido en Hollywood, Carolina del Sur, cuatro terremotos grandes que ocurrieron antes de 1886 en los últimos 7.500 años, sobre la base de estudios de licuefacción (Obermeier, 1985).

*Estudio del potencial sísmico.* Una vez que se han identificado las características tectónicas, se determina su potencial para generar terremotos. Entre los procedimientos para evaluar el potencial sísmico figuran los siguientes:

- 1) Selección de las características físicas que permiten la diferenciación de las características tectónicas.
- 2) Comparación con otras características tectónicas que tienen características físicas especificadas.
- 3) Evaluación de la probabilidad de que una característica tectónica presente una determinada combinación de características favorables para la producción de terremotos.

En la Figura 10 se presenta una matriz que puede utilizarse para evaluar el potencial sísmico de una característica tectónica. Deberá utilizarse toda la información disponible para determinar, por inferencia, las características físicas con la mayor precisión posible. Se formulan preguntas como las siguientes:

- ¿Ha estado asociada la sismicidad histórica con la característica tectónica?
- ¿Existe evidencia de deformaciones recientes de la corteza?
- ¿Es favorable la geometría de la característica tectónica en relación con la orientación del campo de esfuerzos?
- ¿Existen pruebas de reactivación de una característica tectónica a lo largo de zonas de debilidad preexistentes?
- ¿Existen pruebas de que la característica tectónica amplifique el esfuerzo local sobre el nivel ambiente debido a las complejidades estructurales?
- ¿Tiene la característica tectónica una fuerza reducida de corteza o presenta cambios espaciales o temporales en la fuerza de la corteza?

<div>Sismicidad asociada</div> <div>Geometría relativa a epi-centro/ sentido de desplazamiento</div> <div>Amplificación del esfuerzo local</div> <div>Fuerza reducida o cambio de fuerza</div> <div>Reactivación geológica</div> <div>Deformación reciente</div>			Terremotos de moderados a grandes				Terremotos pequeños solamente				Ninguna sismicidad			
			Favorable		Desfavorable		Favorable		Desfavorable		Favorable		Desfavorable	
			Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No
Sí	Sí	Sí												
		No												
	No	Sí												
		No												
No	Sí	Sí												
		No												
	No	Sí												
		No												

Figura 10.—Matriz para evaluar el potencial sísmico de una característica tectónica.

Los dos primeros factores, asociación de la característica tectónica con la *sismicidad histórica* y pruebas de *deformación reciente de la corteza*, son, de ordinario, los mejores diagnósticos para definir el potencial sísmico.

*Estudio de las zonas sísmógenas.* El geólogo y el sismólogo trabajan a menudo juntos para definir las zonas sísmógenas, una región que tiene esencialmente características especialmente homogéneas de índices de incidencia y magnitud máxima de terremotos. Para delinear las zonas sísmógenas hay que integrar los datos tectónicos y la sismicidad. En la Figura 11 se ilustran las clases de modelos básicos de zonas sísmógenas: 1) zona sísmógena lineal, 2) zona sísmógena regional, 3) colección de zonas sísmógenas lineales y 4) una colección de zonas sísmógenas lineales abarcada por una zona sísmógena regional.

Pueden utilizarse los principios generales siguientes:

- Puede utilizarse un modelo de zona sísmógena lineal cuando los emplazamientos sísmicos están circunscritos a lo largo de una falla o zona de fallas identificada.
- Puede utilizarse una zona sísmógena regional cuando la sismicidad ocurre uniformemente a través de una región.

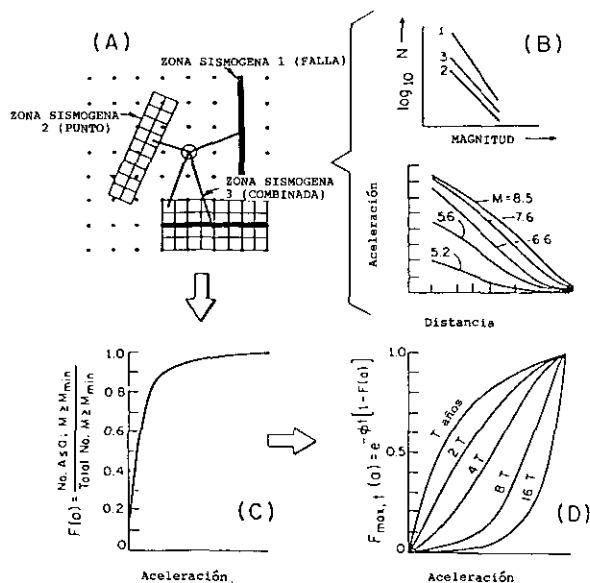


Figura 11.—Modelos básicos de zonas simogénica. Distribución de la sismicidad. Curvas de probabilidad.

- Puede utilizarse un juego de zonas simogénicas lineales para modelizar una zona grande de deformación cuando una ruptura sísmica tiene una orientación preferida, pero una incidencia fortuita.
- Puede utilizarse una colección de zonas simogénicas lineales rodeada por un área de zonas simogénicas cuando se supone que eventos grandes sólo ocurrirán en las fallas activas identificadas y eventos menores fortuitamente dentro de la región que las contiene.

*Estudio del suelo local y de la columna de roca.* El geólogo trabaja a menudo con el geofísico o el ingeniero geotécnico para definir la profundidad y las propiedades físicas del suelo y de la columna de roca subyacente al lugar de construcción (Figura 12). Fuertes contrastes en la velocidad de

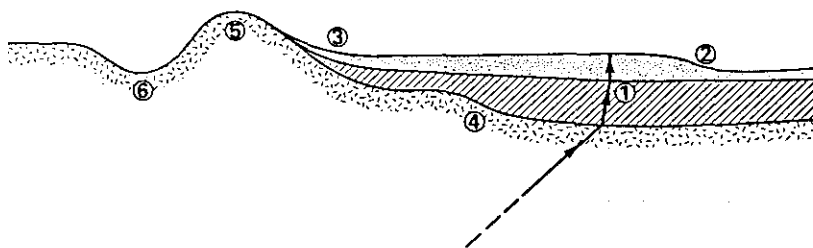


Figura 12.—Estructura geológica superficial.

las ondas transversales entre el suelo cerca de la superficie y la roca subyacente, que constituye los 30-60 metros superiores (100-200 pies), pueden hacer que el movimiento del suelo aumente en una gama estrecha de frecuencias. La composición espectral de amplitud máxima, y la duración del temblor, pueden aumentar notablemente cuando el contraste de velocidad llega hasta un factor de 2 y el grosor de la columna del suelo tiene hasta 10-30 m (30-100 pies) (Figura 13). Los científicos e ingenieros están trabajando, todavía, para resolver las cuestiones técnicas relacionadas principalmente con el hecho de si la respuesta lineal del terreno ocurre a niveles elevados de temblores de tierra y/o deformación por deslizamiento (Hays, 1983).

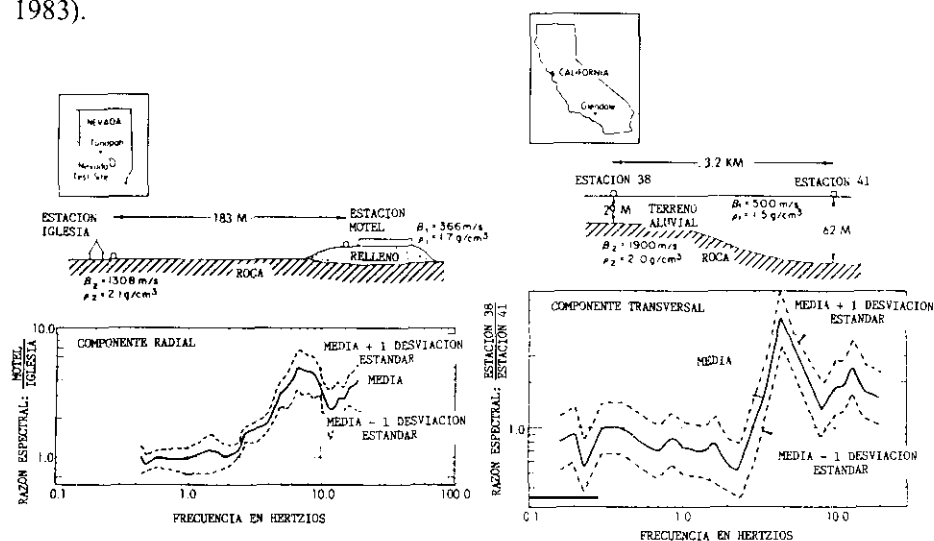


Figura 13.—Composiciones espectrales para distintas características geológicas y para distintas velocidades de propagación.

La determinación de las propiedades físicas de los materiales cerca de la superficie también es importante para evaluar el potencial de licuefacción. En la Figura 14 se proporciona un diagrama de movimiento que puede utilizarse para efectuar una evaluación preliminar. Si las evaluaciones preliminares indican que son necesarias, se realizan evaluaciones geotécnicas y perforaciones adicionales.

*Funciones de atenuación de las ondas sísmicas.* Es bien conocido que la amplitud, la composición espectral y la duración del movimiento ocasionado por un terremoto registrado en un emplazamiento son funciones del mecanismo de la fuente sísmica, de la distancia al epicentro y de la geometría y propiedades físicas de las estructuras geológicas atravesadas por las ondas que se propagan por la superficie y el interior de un cuerpo

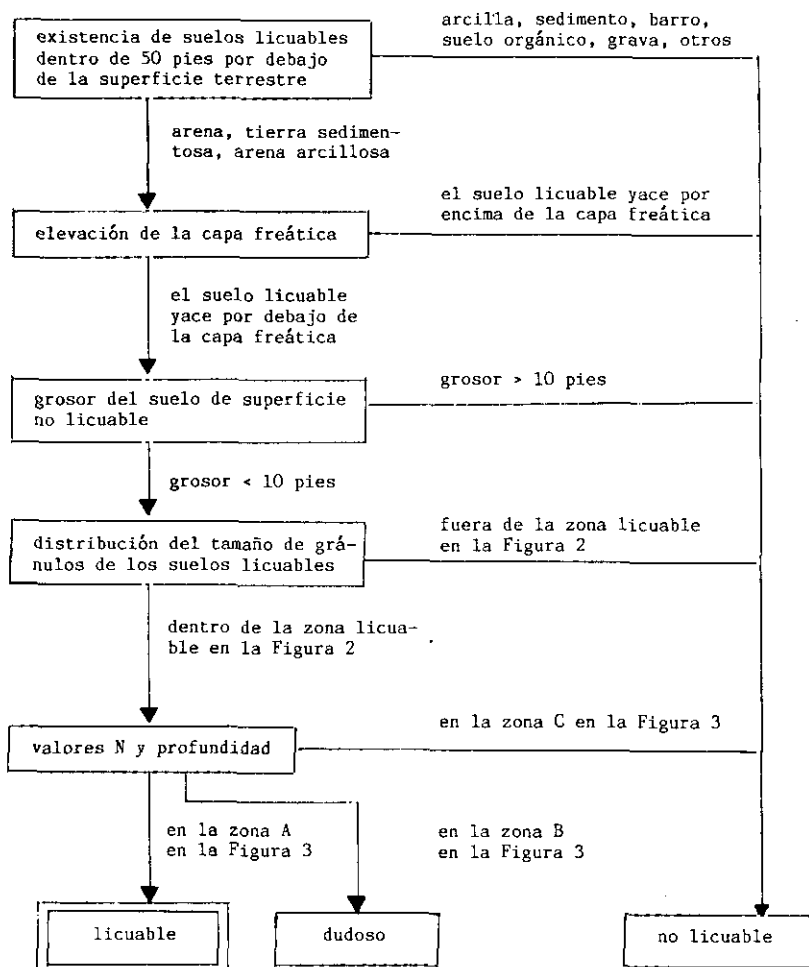


Figura 14.—Diagrama para evaluar preliminarmente el potencial de licuefacción de un terreno.

desde la fuente al emplazamiento. Las ondas transmitidas por el interior de un cuerpo están caracterizadas, generalmente, por altas frecuencias (2-10 hertzios) y, de ordinario, producen la aceleración máxima en el acelerograma. Las ondas de superficie se desplazan y atenúan más lentamente que las ondas transmitidas por el interior de un cuerpo y, generalmente, tienen frecuencias más bajas de vibración (por ejemplo, menos de 1 hertzio). Debido a su menor índice de atenuación y bajas frecuencias, las ondas de superficie pueden dañar a los edificios altos situados a alguna distancia del epicentro de un terremoto.

Las funciones de atenuación de las ondas sísmicas, para una región geográfica, son difíciles de cuantificar. Cuando no se dispone de datos sobre

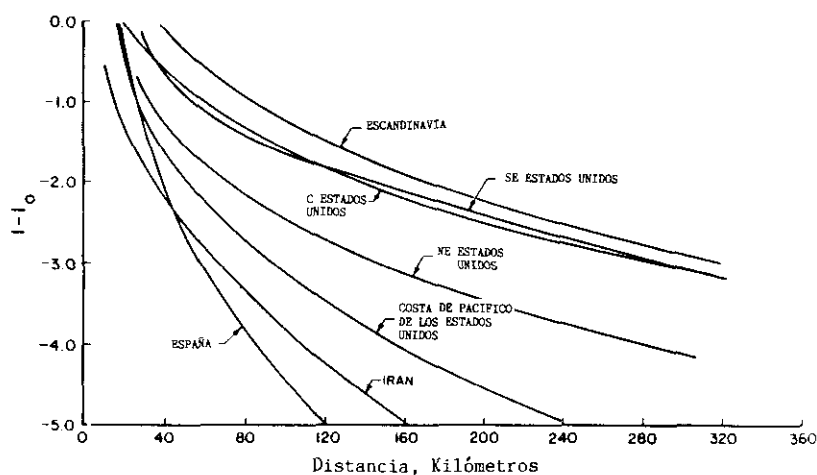


Figura 15.—Funciones de atenuación de la intensidad sísmica para distintas regiones.

movimientos fuertes del suelo, puede utilizarse un mapa isosísmico detallado para obtener una función de atenuación regional (Figura 15). Sin embargo, los mejores datos son los de movimientos fuertes del suelo registrados en terremotos pasados. Estos datos pueden utilizarse para obtener la función de atenuación de aceleración máxima del movimiento del suelo (Figura 16) o las funciones de atenuación de velocidad espectral (Figura 17). La especificación de la incertidumbre en el valor medio de la

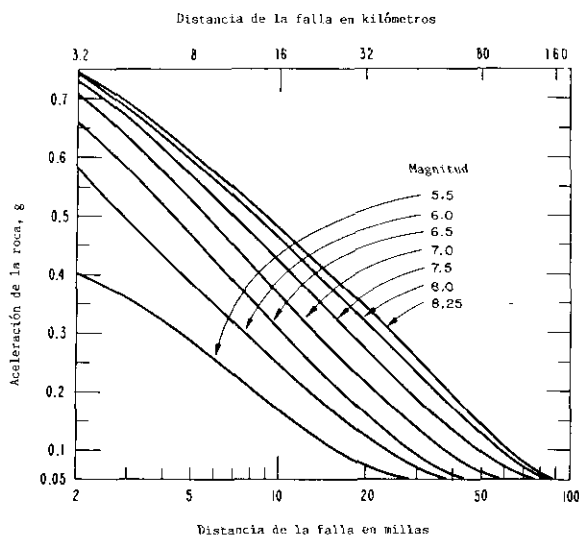


Figura 16.—Funciones de atenuación de la aceleración máxima del suelo.

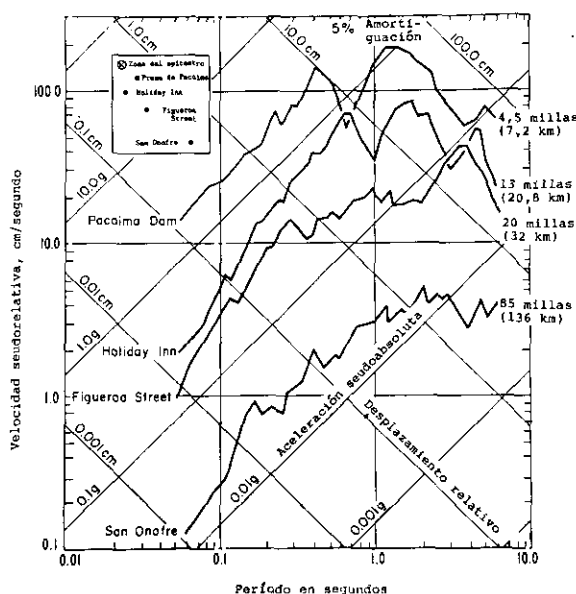


Figura 17.—Funciones de atenuación de la velocidad espectral.

función de atenuación del movimiento del suelo es muy importante, pero no siempre se hace.

*Selección de parámetros de diseño sísmico.* Para estructuras e instalaciones importantes, se utiliza el concepto de terremoto nominal. El terremoto nominal es un terremoto que puede esperarse, razonablemente, que ocurra durante la vida planificada de la estructura o instalación, y que produzca un movimiento del suelo máximo en el emplazamiento. La estimación de la amplitud, composición de frecuencias y duración del temblor de tierra es una tarea compleja, ya que el movimiento del suelo (Figura 18) es una superposición compleja de las ondas que se transmiten a través de un cuerpo y por la superficie, las cuales han seguido muchas trayectorias distintas entre la fuente y el lugar de construcción. Las características de la geología a lo largo de estas trayectorias introducen rasgos en el movimiento del suelo dependientes de la frecuencia.

Al seleccionar los parámetros del terremoto nominal, se sigue un procedimiento tal como el ilustrado en la Figura 19. Este procedimiento tiene por fin producir la mejor estimación de:

- la magnitud,
- la distancia menor desde la falla activa o característica tectónica más próxima,
- la intensidad del epicentro y, cuando sea posible, la aceleración

máxima (también la velocidad máxima y el desplazamiento máximo, cuando es posible),

- el espectro de respuesta desde niveles distintos de atenuación,
- la duración del temblor y
- los efectos dependientes de la frecuencia del suelo o columna de roca local.

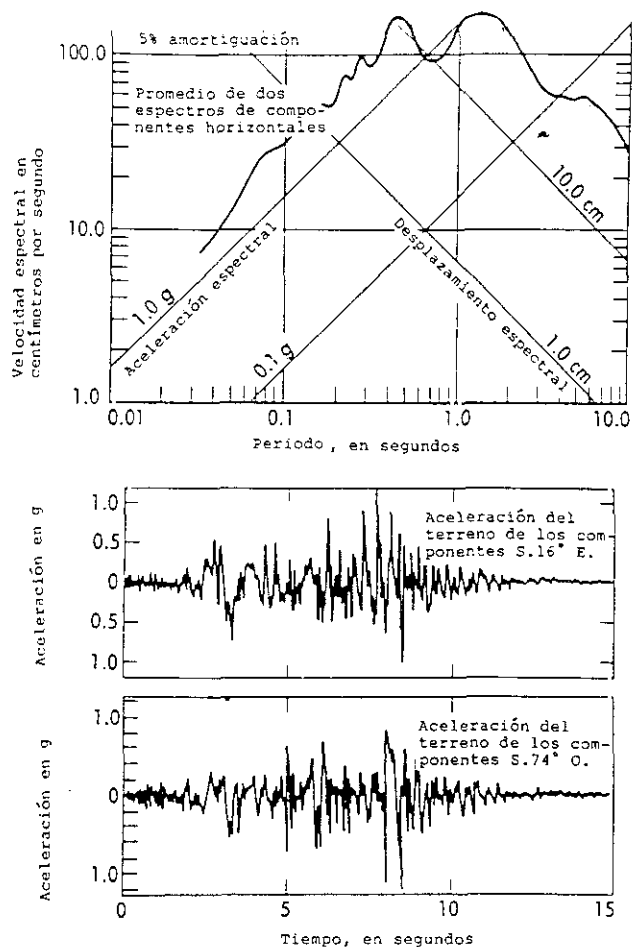


Figura 18.—Movimiento del suelo, registrado en aceleración, y espectro de respuesta.

Pueden utilizarse procedimientos tanto deterministas como probabilísticos. El proceso depende de la calidad de los datos geológicos, sísmológicos y geotécnicos. El producto último que se busca es una especificación de la curva de peligrosidad para el emplazamiento. Un tipo de represen-



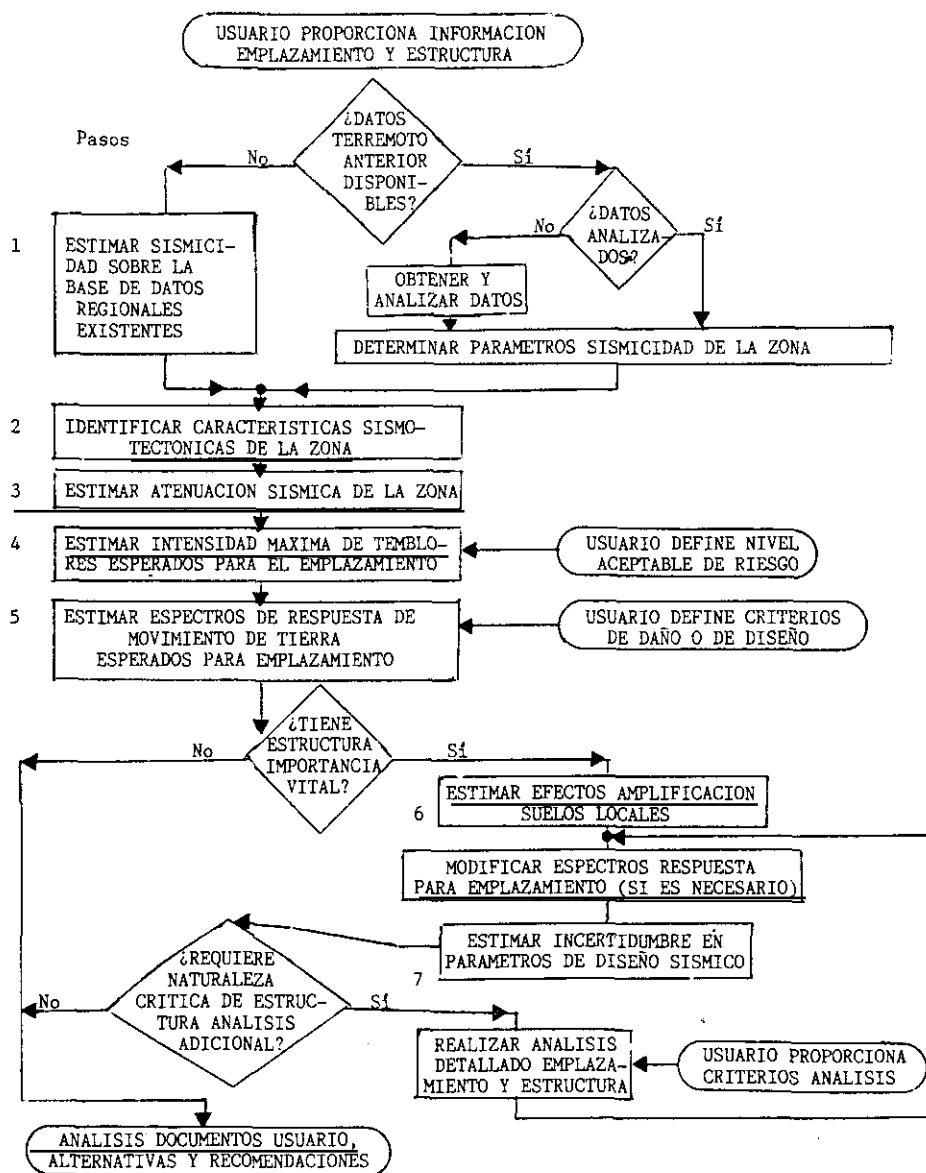


Figura 19.—Procedimiento a seguir para determinar el terremoto nominal.

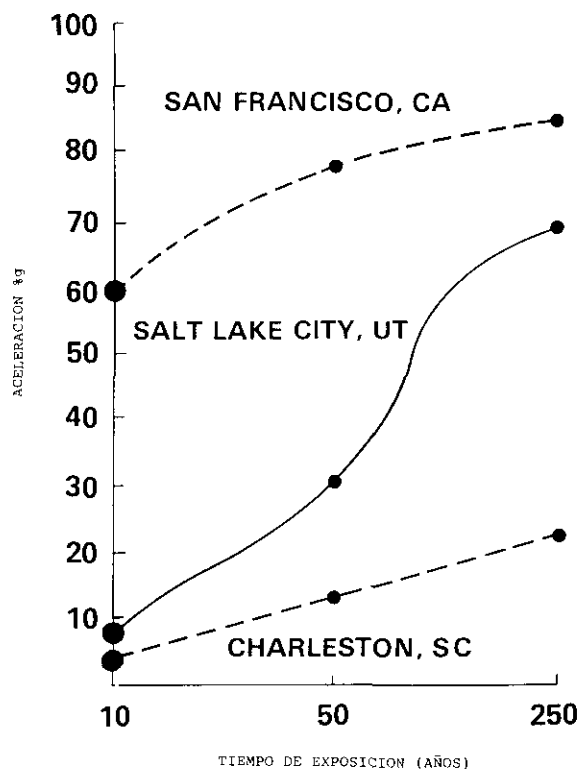


Figura 20.—Curvas de peligrosidad —aceleración de función de tiempo de exposición para distintas ciudades de Estados Unidos.

tación se ilustra en la Figura 20 donde la aceleración máxima se expresa como función el tiempo de exposición y la probabilidad de no superación. Dichas curvas de peligrosidad permiten una opción en el nivel aceptable de riesgo.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un estudio de microzonación sísmica en España producirá una mejor comprensión técnica de la peligrosidad sísmica y aumentará la capacidad de los científicos, ingenieros y planificadores españoles para incrementar y aplicar sus conocimientos técnicos. Proporcionará respuestas a las preguntas siguientes: 1) *¿Dónde han ocurrido en el pasado los terremotos?* 2) *¿Por qué ocurren?* 3) *¿Qué efectos físicos (peligros) están asociados con cada terremoto y cuál es su intensidad?* 4) *¿Con qué frecuencia ocurren?* y 5) *¿Cuáles son las opciones para reducir las pérdidas por estos peligros?*

Un estudio de microzonación sísmica puede proporcionar todos los beneficios siguientes:

1. La creación de un modelo regional mejorado de peligrosidad sísmica. Se identificarán las zonas sísmógenas así como las zonas de fallas «activas» y «activas inferidas».
2. El establecimiento del nivel máximo de aceleración máxima de tierra que se espera ocurra en España durante un tiempo de exposición de unos 50 años. Estos valores de aceleración máxima deberán tener una probabilidad de no superación de 90 por ciento en un período de 50 años. Criterios como éstos son utilizados típicamente en todo el mundo al formular disposiciones de diseño sísmico en los códigos de edificación. También deberán calcularse las aceleraciones máximas del terreno para dos períodos de exposición adicionales (10 y 250 años, aproximadamente) y una probabilidad de no superación del 90 por ciento, a fin de proporcionar una perspectiva adicional para evaluar la peligrosidad de los temblores de tierra para los edificios y otras instalaciones que tienen vidas útiles más cortas y más largas o distintos grados de importancia.
3. La confección de mapas de microzonación sísmica para las zonas urbanas de España producirá estimaciones pragmáticas de la gravedad relativa y variación espacial de los temblores de tierra, de las fallas inducidas por terremotos y de la ruptura por falla de superficie en función del tiempo de exposición.
4. La especificación de recomendaciones para mejorar los códigos de edificación y las prácticas de construcción y uso de la tierra.
5. La producción de una metodología técnica para la microzonación sísmica proporcionará aplicaciones que podrán realizarse juntamente con los resultados de otros estudios de microzonación que se realizan en todo el mundo. Estas metodologías proporcionarán una base técnica para estudios de microzonación sísmica en otras regiones de España y para identificar estudios específicos de investigación, que deberán emprenderse a fin de aumentar el estado de conocimiento sobre la materia en España.
6. Aumentar el conocimiento técnico de los científicos, ingenieros y planificadores españoles en materia de microzonación sísmica.
7. Asignaciones de recursos para adquirir y analizar datos sobre movimientos fuertes del suelo ocasionados por terremotos futuros que ocurran en España. Estos datos pueden aumentar la precisión del diseño resistente a los terremotos para edificios y otras instalaciones.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda adoptar las medidas siguientes:

1. Formación de asociaciones de trabajo entre científicos e ingenieros para la realización de los futuros estudios de microzonación.

2. Identificación de las regiones de España que necesitan microzonación e iniciación de la labor requerida de planificación y recopilación de datos.
3. Despliegue de una red de acelerógrafos de los movimientos fuertes para registrar los datos requeridos para resolver cuestiones técnicas relativas a atenuación, duración de temblores y respuesta del terreno. Dicha red deberá coordinarse con las redes de sismicidad.
4. Participación en investigaciones posteriores a los terremotos en otras partes de la región mediterránea para obtener experiencia e información.
5. Recopilación de información sismotectónica adicional en toda España y la región del Mediterráneo para definir la periodicidad de las fallas y las magnitudes máximas y periodicidad para zonas sísmogénas discretas.
6. Creación de una base nacional de datos que contenga todos los datos geológicos, sísmológicos y tectónicos requeridos para fines de microzonación sísmica.
7. Introducción de cambios, según proceda, en el código de edificación y las prácticas de construcción y uso de la tierra en España.
8. Iniciación de capacitación destinada a aumentar el número de científicos e ingenieros españoles expertos en microzonación sísmica.

La adopción de estas medidas servirá para poner a España en una posición de vanguardia en el campo de la microzonación sísmica.

## BIBLIOGRAFIA

- Allen, C. R. (1984): *Geologic and Seismological Considerations in Earthquake Engineering*. Speciality Seminar on Fundamentals of Geology and Seismology for Earthquake Engineering, Stanford University, julio de 1984, Publicación del Earthquake Engineering Research Institute, págs. 1-6.
- Algermissen, S. T. (1969): *Seismic risk studies in the United States*: Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica, 4.<sup>a</sup>, Santiago de Chile, Actas, vol. 1, 14 págs.
- Algermissen, S. T. y Perkins, D. M. (1976): *A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States*: *U.S. Geol. Survey Open-File Rept.* 76-416, 45 págs.
- Algermissen, S. T.; Perkins, D. M.; Thenhaus, P. C.; Hanson, S. L., y Bender B. L. (1982): *Probabilistic estimates of maximum acceleration and velocities in rock in the United States*: *Earthquake Notes*, vol. 53 (en imprenta).
- Ambraseys, N. N. (1973): *Dynamics and response of foundation materials in epicentral regions of strong earthquakes*: Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica, 5.<sup>a</sup>, Roma, Italia, Actas, v. 1, 10 págs.
- Applied Technology Council (1978): *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*. ATC-3-06, 514 págs.
- Borcherdt, R. D. (editor) (1975): *Studies for seismic zonation of the San Francisco Bay region*: *U.S. Geological Survey Professional Paper* 941-A, 102 págs.
- Blair, M. L., y Spangle, W. E. (1979): *Seismic Safety and land-use planning - selected examples from California*: *U.S. Geol. Survey Prof. Paper* 941-B, 82 págs.

- Bucknam, R. C., y Anderson, R. E. (1980): Late Quaternary faulting as a guide to regional variations in long-term rates of seismic activity: *U.S. Geog. Survey Open-File Rept.* 81-437, págs. 27-29.
- Electric Power Research Institute (1984): Tectonic Stress Regime/Potential Stress Concentrators and Approaches to Developing Tectonic Frameworks and Seismic Sources, Documentos de trabajo para los talleres 3 y 4, Palo Alto, California.
- Hays, W. W. (1980): Procedures for estimating earthquake ground motions: *U.S. Geog. Survey Prof. Paper* 1114, 77 págs.
- (1981): Facing geological and hydrologic hazards-earth science considerations: *U.S. Geog. Survey Prof. Paper* 1240-B, 108 págs.
- Hays, W. W., y Gori P. L. (editores) (1983): The 1886 Charleston, South Carolina Earthquake and its Implications for Today, Actas de la XX Conferencia, *U.S. Geological Survey Open-file Report* 83-843, 502 págs.
- Hays, W. W. (editor) (1983): Site-Specific Effects of Soil and Rock on Ground Motion and the Implications for Earthquake-Resistant Design, Actas de la XXII Conferencia, *U.S. Geological Survey Open-file Report* 83-845, 501 págs.
- Hays, W. W., Rogers, A. M., y King, K. W. (1970): Empirical data about local ground response: Earthquake Engineering Research Institute, Conferencia Nacional sobre Ingeniería Sísmica, 2.ª, Stanford, Calif., Actas, pp. 223-232.
- Obermeir, S. F. (1985): Distribution of Recurrence of Prehistoric Earthquakes near Charleston, South Carolina (Resumen), *Earthquake Notes*, v. 55, núm. 1, p. 25.
- Rogers, A. M., y Hays, W. W. (1978): Preliminary evaluation of site transfer function derived from earthquakes and nuclear explosions. Conferencia Internacional sobre Microzonación, 2.ª, San Francisco, Actas, v. 2, pp. 753-764.
- Russ, D. P. (1981): Model for assessing earthquake potential and fault activity in the New Madrid seismic zone. Earthquakes and earthquake engineering: the eastern United States: Ann Arbor, Mich., *Ann Arbor Science Publishers*, v. 1, pp. 309-336.
- (1982): Style and Significance of Surface Deformation in the Vicinity of New Madrid, Missouri, in McKeown, F. A., y Pakiser, L. C. (editores): Investigations of the New Madrid, Missouri Earthquake Region, *U.S. Geological Survey Professional Paper* 1236, pp. 95-114.
- Schnabel, P. B., y Seed, H. B. (1973): Accelerations in rock for earthquakes in the western United States: *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 62, pp. 501-516.
- Schwartz, D. P., y Coppersmith, K. J. (1984): Fault Behavior and Characteristic Earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones, *Journal of Geophysical Research*, v. 89, pp. 5681-5698.
- Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, J. y Idriss, I. M. (1976): Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes: *Bull. Seism. Soc. Am.*, v. 66, pp. 221-224.
- Sieh, K. E. (1978): Prehistoric large earthquakes produced by slip on the San Andreas fault at Pallett Creek, Calif.: *Jour. of Geoph. Res.*, v. 83, pp. 3907-3939.
- Sieh, K. (1978): Prehistoric Large Earthquakes Produced by Slip on the San Andreas Fault and Pallet Creek, California, *Journal of Geophysical Research*, v. 89, pp. 3907-3939.
- Singh, S. (1981): Regionalization of crustal Q in the Continental United States: St. Louis University, Tesis doctoral, 75 págs.
- Slemmons, D. B. (1977): Faults and Earthquake Magnitude, *U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station Miscellaneous Paper* S-73-1, Informe 6, 166 págs.
- Soto, A. (1984): Ground Failure in Puerto Rico, en Gori, P. L., y Hays, W. W. (editores): Geologic Hazards in Puerto Rico, Actas de la XXIV Conferencia, *U.S. Geological Survey Open-file Report* 84-761, pp. 96-100.
- Sykes, L., McCann, y W. R., y Kafka, A. (1982): Motion of Caribbean Plate During Last Several Years and Implications for Earlier Cenozoic Movements, *Journal of Geophysical Research*, v. 87, pp. 10656-10676.
- Ulrich, F. P. (1948): Zones of earthquakes probability in the United States: *Building Standards Monthly*, v. 17, núm. 3, pp. 11-12.

## APENDICE

*Glosario de términos para análisis probabilísticos  
de los riesgos y peligros sísmicos*

- ACELERACION NOMINAL O DE DISEÑO:** Una especificación de la aceleración del terreno en un emplazamiento, términos de un valor único, tales como máximo o rms; utilizados para el diseño resistente a los terremotos de una estructura (como base para derivar un espectro de diseño). Véase *Historia cronológica de diseño*.
- CARGA DE DISEÑO SISMICO:** La representación prescrita (historia cronológica, espectro de respuestas o desplazamiento de la base estática equivalente) de un movimiento sísmico del terreno que se utilizará para el diseño de una estructura.
- COEFICIENTE DE VARIACION:** La razón de desviación estándar de la media.
- CUADRADO MEDIO:** Valor esperado del cuadrado de la variable aleatoria. (El cuadrado medio menos el cuadrado de la media da la varianza de la variable aleatoria.)
- DAÑO:** Cualquier pérdida económica o destrucción ocasionada por los terremotos.
- DESVIACION ESTANDAR:** La raíz cuadrada de la varianza de una variable aleatoria.
- DURACION:** Una descripción cualitativa o cuantitativa de la duración de tiempo en el que el movimiento del suelo en un emplazamiento presenta ciertas características (perceptibilidad, temblores violentos, etc.).
- EFFECTOS DE CARGA DE DISEÑO SISMICO:** Las acciones (fuerzas axiales, deslizamientos o movimientos de flexión) y deformaciones inducidas en un sistema estructural debido a una representación específica (historia cronológica, espectro de respuestas o deslizamiento de la base) del movimiento del suelo de diseño sísmico.
- ELEMENTOS SUJETOS A RIESGO:** Población, propiedades, actividades económicas, incluyendo los servicios públicos, etc., sujetos a riesgo en una determinada zona.
- ESPECTRO DE DISEÑO:** Una serie de curvas para fines de diseño que proporcionan la velocidad, aceleración o desplazamiento (de ordinario, la aceleración absoluta, la velocidad relativa o el desplazamiento relativo de una masa en vibración) en función del período de vibración y amortiguamiento.
- ESPECTRO DE RESPUESTAS:** Una serie de curvas calculadas a partir de un acelerógrafo sísmico que proporciona valores de respuestas máximas de un oscilador lineal amortiguado, en función de su período de vibración y amortiguación.
- ESPERADO:** Medio, promedio, previsto.
- EVENTO NOMINAL O DE DISEÑO, EVENTO SISMICO NOMINAL O DE DISEÑO:** Una especificación de uno o más parámetros de fuentes de terremotos y del lugar de la liberación de la energía con respecto al punto de interés; se utiliza para el diseño resistente a terremotos de una estructura.
- EVENTO SISMICO:** La liberación abrupta de energía en la litosfera terrestre que ocasiona un terremoto.

**EXPOSICION:** La pérdida económica posible para todas las estructuras o algunas de ellas como resultado de uno o más terremotos en una región. Este término se refiere, de ordinario, al valor asegurado de las estructuras que mantiene uno o más aseguradores. Véase «Valor en riesgo».

**FALLA ACTIVA:** Una falla que, tomando como base la evidencia histórica, sismológica o geológica, tiene una elevada probabilidad de producir un terremoto. (Alternativa: una falla que puede producir un terremoto dentro de un período de tiempo de exposición especificado, dadas las hipótesis adoptadas para un análisis específico del riesgo sísmico.)

**HISTORIA CRONOLOGICA DE DISEÑO:** La variación con el tiempo de movimiento de tierra (por ejemplo, la aceleración del terreno o velocidad o desplazamiento) en un lugar; se utiliza para el diseño resistente a terremotos de una estructura. Véase «Aceleración nominal o de diseño».

**INDICE DE ACTIVIDAD SISMICA:** El número medio por unidad de tiempo de terremotos con características específicas (por ejemplo, magnitud  $\geq 6$ ) que se origina en una falla o zona determinada.

**INTENSIDAD:** Una medida cualitativa o cuantitativa de la gravedad de un movimiento sísmico de tierra en un emplazamiento específico (por ejemplo, intensidad Mercalli Modificada, intensidad Rossi-Forel, intensidad Espectral Housner, intensidad Arias, aceleración máxima, etc.).

**INTERVALO MEDIO DE INCIDENCIA, INTERVALO DE INCIDENCIA PROMEDIO:** El tiempo promedio entre terremotos o eventos de falla con características específicas (por ejemplo, una magnitud de  $\geq 6$ ) en una región específica o en una zona de falla específica.

**LEY DE ATENUACION:** Una descripción del comportamiento de una característica del movimiento del suelo de un terremoto en función de la distancia de la fuente de energía.

**LIMITE SUPERIOR:** Véase «máximo posible».

**MAXIMO:** El valor mayor logrado por una variable durante un tiempo de exposición especificado. Véase «Valor máximo».

**MAXIMO CREIBLE, MAXIMO ESPERABLE, MAXIMO PREVISTO, MAXIMO PROBABLE:** Estos términos se utilizan para especificar el valor máximo de una variable, por ejemplo, la magnitud de un terremoto, que pudiera esperarse que ocurra razonablemente. *En opinión del Comité, son términos equívocos y no se recomienda su uso.* (El U.S. Geological Survey y algunos individuos y empresas definen el terremoto máximo creible como «el terremoto mayor que puede esperarse que ocurra razonablemente». La Oficina de Reclamación, el Primer Grupo de Trabajo Interministerial (septiembre de 1978), definió el terremoto máximo creible como «el terremoto que ocasionaría el movimiento de tierra vibratorio más agudo capaz de ser producido en el emplazamiento dentro del actual marco tectónico conocido». Es un evento que pueden apoyar todos los datos geológicos y sismológicos conocidos. El USGS define el terremoto máximo esperable o previsto como «el mayor terremoto que puede esperarse razonablemente que ocurra». El terremoto máximo probable es definido a veces como el peor terremoto histórico. Como alternativa, es definido como el terremoto que se reproduce periódicamente cada cien años o un terremoto que según la determinación probabilística de incidencia ocurrirá durante la vida de la estructura).

**MAXIMO POSIBLE:** El valor máximo posible para una variable. Sigue a una

hipótesis explícita de que no son posibles valores más grandes, o implícitamente a hipótesis en el sentido de que las variables o funciones relacionadas son limitadas en su alcance. El valor máximo posible puede expresarse determinista o probabilísticamente.

**MICROZONA SISMICA:** Una zona generalmente pequeña dentro de la que los requisitos de diseño sísmico para las estructuras son uniformes. Las microzonas sísmicas pueden presentar la amplificación relativa del movimiento del terreno debido a condiciones locales del suelo sin especificar los niveles absolutos de movimiento o peligro sísmico.

**MICROZONACIÓN SISMICA, MICROZONIFICACION SISMICA:** El proceso de determinar la peligrosidad sísmica absoluta o relativa en muchos emplazamientos, tomando en cuenta los efectos de la amplificación geológica o topográfica del movimiento y de las microzonas sísmicas. Como alternativa, la microzonación es un proceso para identificar características geológicas, sismológicas, hidrológicas y geotécnicas detalladas del emplazamiento en una región específica e incorporarlas en la planificación del uso de la tierra y el diseño de estructuras seguras a fin de reducir el daño a la vida humana y la propiedad como resultado de los terremotos.

**MOVIMIENTO DEL SUELO ESPERADO:** El valor medio de una o más características del movimiento del suelo en un emplazamiento para un terremoto dado (movimiento medio del terreno).

**PELIGRO GEOLOGICO:** Un proceso geológico (por ejemplo, corrimiento de tierra, suelos en licuefacción, falla activa) que durante un terremoto u otro evento natural puede producir efectos adversos sobre las estructuras.

**PELIGRO SISMICO:** Cualquier fenómeno físico (por ejemplo, temblor de tierra, falla de tierra) asociado con un terremoto que puede producir efectos adversos sobre las actividades del hombre.

**PERDIDA:** Cualquier consecuencia social o económica adversa ocasionada por uno o más terremotos.

**PERIODO DE RETORNO MEDIO:** El tiempo promedio entre incidencias de movimientos de tierra con características específicas (por ejemplo, aceleración horizontal máxima  $\geq 0,1$  g) en un emplazamiento. (Igual a la inversa de la probabilidad anual de superación.)

**PROBABILIDAD DE SUPERACION:** La probabilidad de que un nivel específico de movimiento del suelo o consecuencias sociales o económicas específicas de los terremotos sean superados en el emplazamiento en una región durante un tiempo de exposición específico.

**RAIZ CUADRADA MEDIA (rms):** Raíz cuadrada del valor cuadrado medio de una variable aleatoria.

**RIESGO ACEPTABLE:** Probabilidad de consecuencias sociales o económicas debidas a terremotos que es suficientemente baja (por ejemplo, en comparación con otros riesgos naturales o creados por el hombre), para que las autoridades pertinentes juzguen que representan un análisis pragmático para determinar requisitos de diseño para estructuras de ingeniería o para adoptar ciertas medidas sociales o económicas.

**RIESGO SISMICO:** La probabilidad de que las consecuencias sociales o económicas de los terremotos sean iguales o superen valores específicos en un emplazamiento, en varios emplazamiento o en una zona durante un período de exposición específico.



**TERREMOTO:** Un movimiento o vibración repentino de la tierra ocasionado por la liberación abrupta de energía en la litosfera terrestre. El movimiento de las ondas puede oscilar entre violento en algunos lugares e imperceptible en otros.

**TERREMOTO NOMINAL O DE DISEÑO:** Una especificación del movimiento sísmico del suelo en un emplazamiento; se utiliza para el diseño resistente a los terremotos de una estructura.

**TIEMPO DE EXPOSICION:** El período cronológico de interés para cálculos de riesgos sísmicos, cálculos de la peligrosidad sísmica o diseño de estructuras. Para las estructuras, el tiempo de exposición se selecciona a menudo de forma que sea igual a la vida de diseño de la estructura.

**VALOR B:** Un parámetro que indica la frecuencia relativa de incidencia de terremotos de distintas magnitudes. Es la pendiente de una línea recta que indica la frecuencia absoluta o relativa (trazada logarítmicamente) frente a la magnitud del terremoto o intensidad macrosísmica Mercalli Modificada. (El valor B indica la pendiente de la relación de periodicidad Gutenberg-Richter.)

**VALOR EN RIESGO:** La pérdida económica posible (asegurada o no) a todas las estructuras o cierto juego de estructuras como resultado de uno o más terremotos en una región. Véase «Exposición».

**VALOR EN RIESGO:** La pérdida económica posible (asegurada o no) a todas las estructuras o cierto juego de estructuras como resultado de uno o más terremotos en una región. Véase «Exposición».

**VALOR TOPE O MAXIMO:** El valor máximo de una variable dependiente del tiempo durante un terremoto.

**VARIABLE DE FUENTE:** Una variable que describe una característica física (por ejemplo, magnitud, descenso en esfuerzo, momento sísmico, desplazamiento) de la fuente de liberación de la energía que ocasiona un terremoto.

**VARIANCIA:** La desviación media al cuadrado de una variable aleatoria de su valor promedio.

**VULNERABILIDAD:** El grado de pérdida a un elemento dado sujeto a riesgo, o una serie de esos elementos, como resultado de un terremoto de una determinada magnitud o intensidad, que de ordinario se expresa en una escala de 0 (sin daño) a 10 (pérdida total).

**ZONA DE DISEÑO SISMICO:** Zona sísmica.

**ZONAS SISMOGENAS:** Un término anticuado. Véase «Zona sismogénica» y «Zona sismotectónica».

**ZONA DE RIESGOS SISMICOS:** Un término anticuado. Véase «Zonas sísmicas».

**ZONA SISMICA:** Una zona generalmente grande dentro de la cual los requisitos de diseño sísmico para las estructuras son constantes.

**ZONA SISMOGENICA, PROVINCIA SISMOGENICA:** Una representación planar de un ambiente de tres dimensiones en la litosfera terrestre en el que se infiere que los terremotos tendrán un origen tectónico análogo. Una zona sismogénica puede representar una falla en la litosfera terrestre. Véase «Zona sismotectónica».

**ZONA SISMOTECTONICA, PROVINCIA SISMOTECTONICA:** Una zona sismogénica en la que se han identificado los procesos tectónicos que ocasionan los terremotos. Estas zonas son, de ordinario, zonas de falla.

**ZONACION SISMICA, ZONIFICACION SISMICA:** El proceso de determinar la peligrosidad sísmica en muchos emplazamiento para fines de delineación de zonas sísmicas.

**ZONACION SISMOGENICA:** El proceso de delinear regiones que tienen un carácter tectónico y geológico casi homogéneo, para los fines de trazar zonas sismogénicas. Los procedimientos específicos utilizados dependen de las hipótesis y modelos matemáticos empleados en el análisis de riesgo sísmico y el análisis de peligrosidad sísmica.