

SISMOS



SERIE
Fascículos



CENAPRED
CENTRO NACIONAL
DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN



- 1a. edición, octubre 1990
- 2a. edición, 1995
- 2a. reimpresión de la segunda edición, 1996
- 3a. edición, mayo 1997
- 4a. edición, diciembre, 2001

©Secretaría de Gobernación
Abraham González No. 48,
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,
C. P. 06699, México, D. F.

©Centro Nacional de Prevención de Desastres
Av. Delfín Madrigal No. 665,
Col. Pedregal de Santo Domingo,
Deleg. Coyoacán, C. P. 04360, México, D. F.
Teléfonos:
(55) 54 24 61 00
(55) 56 06 98 37
Fax: (55) 56 06 16 08
e-mail: editor@cenapred.unam.mx
www.cenapred.unam.mx

©Autores:
M. en C. Carlos Gutiérrez Martínez, M. en C. Miguel A. Santoyo G. Galeano,
M. en I. Roberto Quaas Weppen, Dr. Mario Ordaz Schroeder
Ing. Enrique Guevara Ortíz, Dr. David Muriá Vilá y Dr. Shri Krishna Singh

Diseño:
Demetrio Vázquez Sánchez
Susana González Martínez

Edición a cargo de:
Susana González Martínez

Responsable de la Publicación
M. en I. Tomás A. Sánchez Pérez

ISBN: 970-628-613-6

Derechos reservados conforme a la ley.
Impreso en México. Printed in Mexico

Distribución Nacional e Internacional:
Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

SERIE Fascículos

SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Lic. Santiago Creel Miranda
Secretario de Gobernación

Lic. María del Carmen Segura Rangel
Coordinadora General de Protección Civil

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE
DESASTRES

M. en I. Roberto Quaas Weppen
Director General

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Coordinador de Investigación

M. en I. Enrique Guevara Ortíz
Coordinador de Instrumentación

M. en I. Tomás A. Sánchez Pérez
Coordinador de Difusión

Lic. Gloria Luz Ortiz Espejel
Coordinadora de Capacitación

Profra. Carmen Pimentel Amador
Secretaría Técnica

Sismos

3	Introducción
4	Constitución interna de la Tierra Corteza Manto Núcleo externo Núcleo interno
6	Deriva de los continentes
8	Relación entre la tectónica de placas y la sismicidad mundial
9	Ondas sísmicas
11	Tipos de sismos Sismos naturales Sismos artificiales
13	Maremotos
14	Escala de intensidad y magnitud
16	Escala de intensidad Mercalli modificada abreviada
17	Zonas sísmicas en el mundo
18	Sismicidad en México
21	Regionalización sísmica
22	Brecha Sísmica de Guerrero
23	Instrumentación sísmica Instrumentos de registro Redes de observación sísmica Sistema de alerta sísmica Red de observación sísmica del CENAPRED
31	Conclusiones
32	Glosario
35	Bibliografía

Introducción

Por su ubicación geográfica, México se encuentra sujeto a diversos fenómenos naturales que pueden derivar en casos de desastre; entre las calamidades a las que mayormente está expuesto el territorio nacional resaltan los sismos, que en el transcurso de la historia han sido de significación especial, tanto por su frecuencia como por los daños que han ocasionado, particularmente los ocurridos en la ciudad de México en septiembre de 1985.

En la dinámica de la naturaleza de nuestro país, la presencia de fallas geológicas activas y la acción de las placas tectónicas son factores siempre presentes. En la ciudad capital, y en otras ciudades del país, a estos elementos se adicionan características adversas del subsuelo y gran densidad poblacional, que propician riesgo sísmico.



Figura 1. El sismo del 19 de septiembre de 1985, produjo el colapso parcial o total de edificios en la Ciudad de México



Figura 2. Los sismos de junio y septiembre de 1999 afectaron a cientos de inmuebles históricos e iglesias que forman parte del patrimonio cultural de Oaxaca y Puebla



Figura 3. La solidaridad mostrada por la población como respuesta a la tragedia provocada por los sismos de 1985, reflejó la necesidad de contar con instituciones dedicadas al estudio y prevención de los desastres

Ante tales hechos, la acción gubernamental se orienta a informar y capacitar a los ciudadanos para enfrentar eficazmente los fenómenos sísmicos |, con base en conocimientos objetivos. De ahí que el propósito particular de este fascículo sea presentar la información sísmica más reciente y contribuir a la consolidación de la **cultura de protección civil**, sobre la cual se habrán de sustentar las acciones en pro de la prevención de desastres.

En búsqueda de una percepción de conjunto, en cada artículo de esta edición se abordan temas distintos y complementarios acerca de la dinámica de nuestro planeta que, estamos seguros, habrán de redundar en una mayor cultura de protección civil en México.

Constitución interna de la Tierra

El conocimiento actual acerca del interior de la Tierra es resultado de numerosos estudios científicos, en su mayoría basados en la propagación de las ondas sísmicas a través del propio material terrestre. De esta manera ha sido posible determinar su composición y dividirla en varias capas concéntricas; del exterior al interior, son: corteza, manto, núcleo externo y núcleo interno (fig.5).

Para el estudio de la actividad sísmica, es de particular importancia la cubierta rígida de nuestro planeta, constituida por la corteza y la parte superior del manto. A esta cubierta se le denomina litosfera; el promedio de su espesor es de 100 km.

Corteza

Se inicia en la superficie y llega hasta una profundidad promedio de 35 km. En algunas zonas continentales como las cadenas montañosas, puede ser mayor; en otras, bajo los océanos, su espesor es menor: unos 10 km. La corteza es completamente sólida y fracturable.

Manto

Comprende desde la parte inferior de la corteza hasta aproximadamente 2 900 km de profundidad. Debido a las condiciones de temperatura y presión imperantes en el material de esta capa, su estado físico oscila entre sólido y plástico.

Núcleo externo

Su espesor es de unos 2 300 km, comprendidos entre los 2 900 y los 5 200



Figura 4. Fotorelieve del continente americano donde se observa la textura de la corteza terrestre

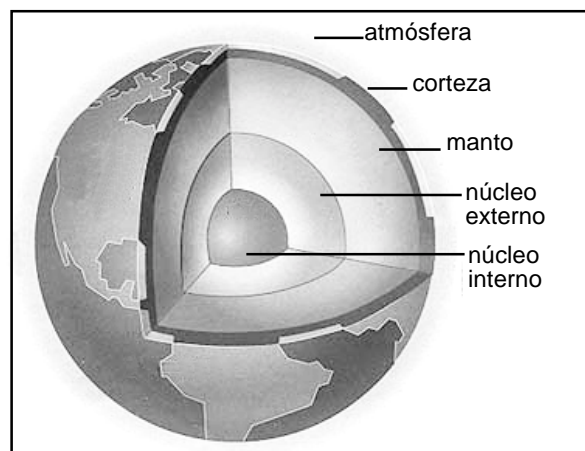


Figura 5. Corte de la Tierra en el que se muestra su estructura interna

km de profundidad. Con base en datos sismológicos se ha podido inferir que es líquido. Esto se puede deber a condiciones de temperatura elevada.

Núcleo interno

Éste es el centro de la Tierra; su diámetro es de 2 340 km. Según se ha calculado, se encuentra en estado sólido.

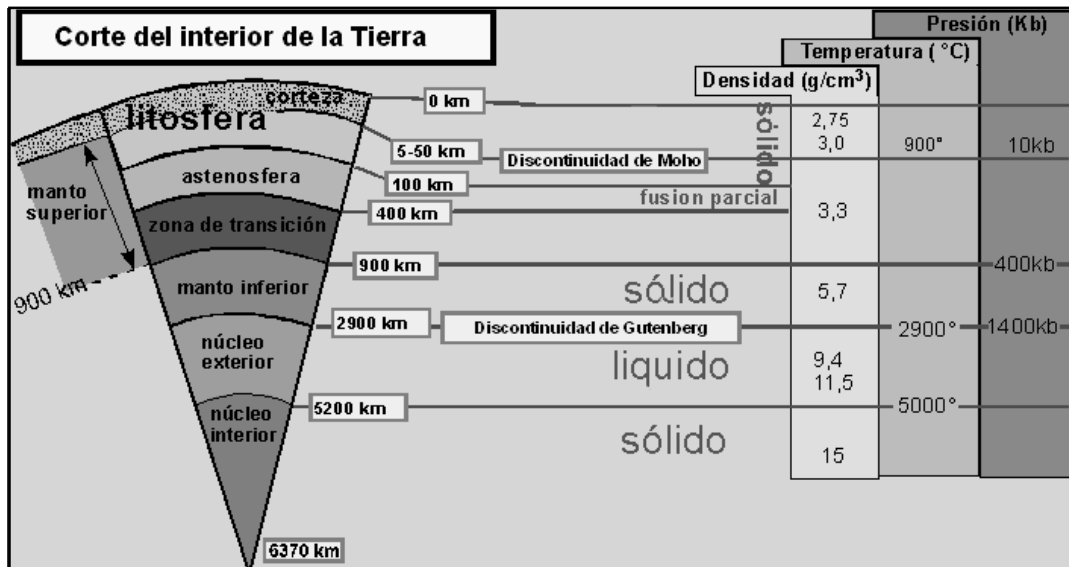


Figura 6. Distribución de las capas internas del planeta y algunas de sus características físicas

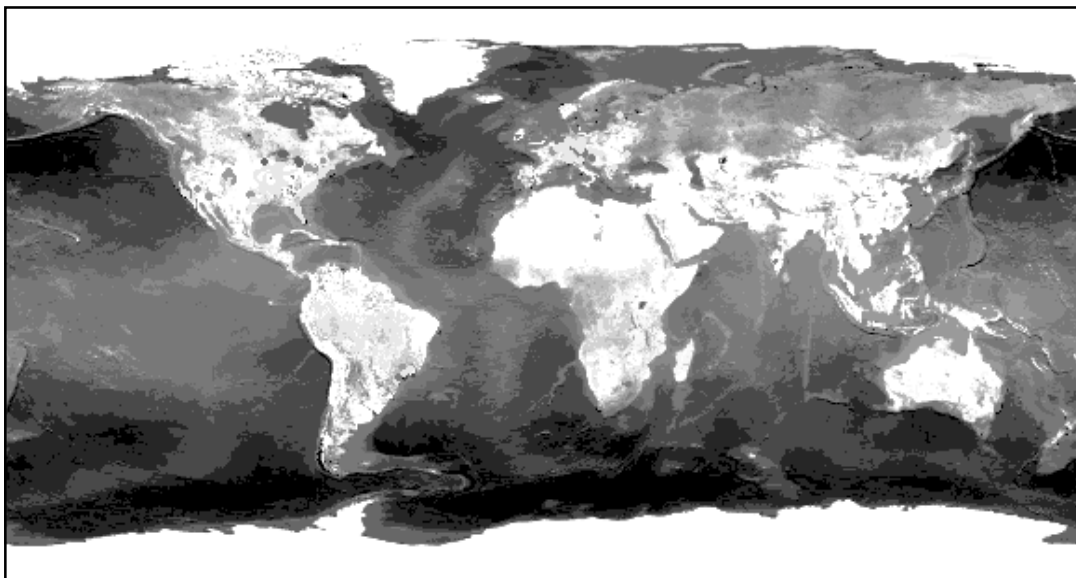


Figura 7. Mapa de la Tierra mostrando la distribución actual de los continentes

Deriva de los continentes

En 1620, Sir Francis Bacon reconoció claramente que existe correspondencia en la forma de las líneas de la costa atlántica de América y las de África Occidental. Con esta base, en 1912 Alfred Wegener desarrolló la teoría de la deriva continental; en ella se afirma que, hace 200 millones de años, los continentes actuales integraban un supercontinente denominado Pangea (fig. 8). Al moverse constantemente sobre un supuesto sustrato viscoso, los continentes llegaron a ocupar su posición actual (fig. 9).



Figura 8. El supercontinente llamado Pangea

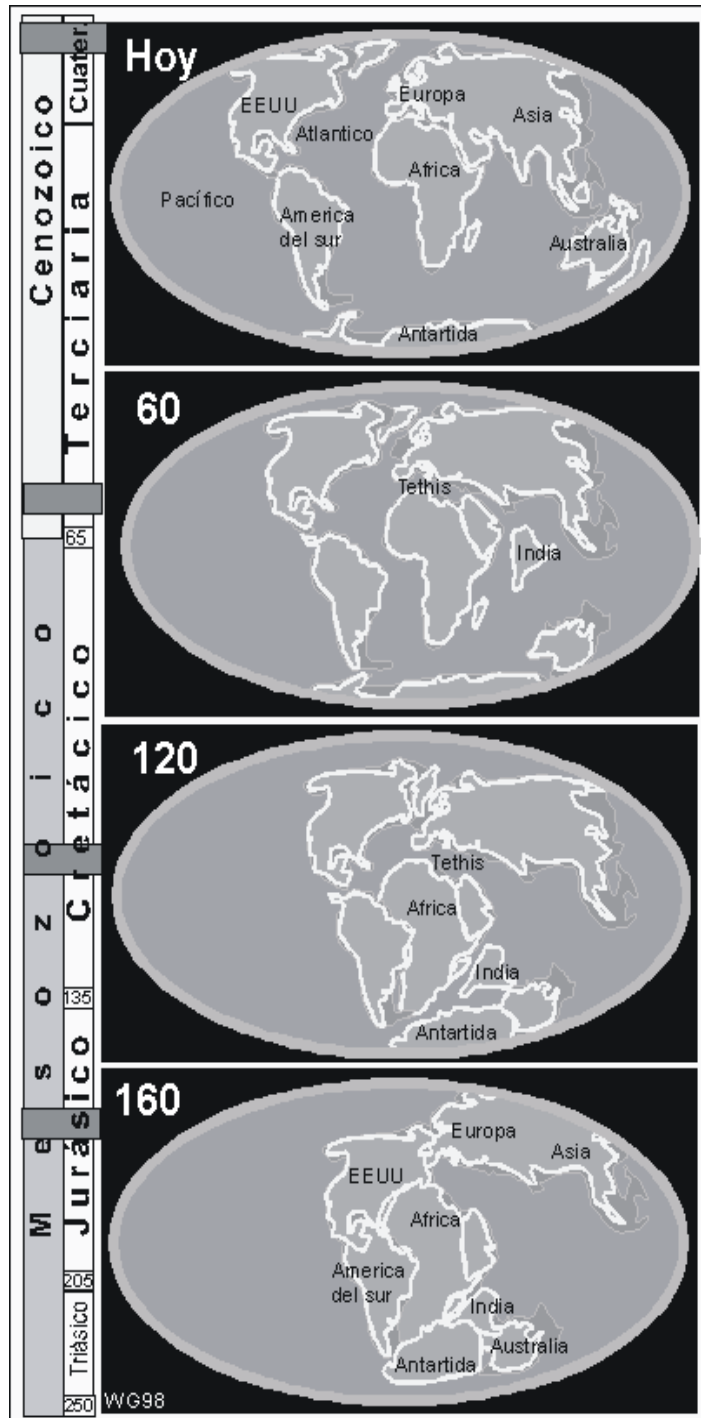


Figura 9. El desplazamiento de los continentes durante diferentes épocas de la Tierra (en millones de años)

Posteriormente, con base en la teoría elaborada por Wegener y numerosas contribuciones de geólogos y geofísicos, se desarrolló la teoría de tectónica de placas. En ella se postula que la litosfera está dividida, formando una especie de mosaico de sectores rígidos, conocidos como placas, las cuales se mueven entre sí, y cuyos desplazamientos promedio son de 2 a 12 centímetros por año.

Para entender el mecanismo que impulsa las placas se presenta la figura 10; en ella se muestra que, debido al arrastre provocado por corrientes de convección, los fragmentos de litósfera se desplazan sobre la parte viscosa del manto. Estas corrientes transportan el material caliente hacia zonas poco profundas mientras que el material con menor temperatura, y mayor densidad, es llevado a mayores profundidades.

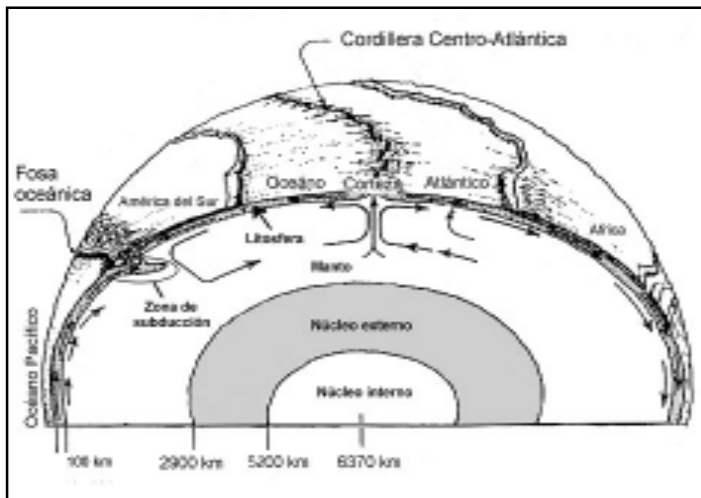


Figura 10. Dinámica de la Tierra, representada en sección transversal. Las placas tectónicas formadas por la corteza y parte del manto superior, se desplazan lateralmente sobre la capa del manto inferior, a mayor temperatura tal vez parcialmente fundida. El material fundido asciende por debajo de las crestas de las cordilleras oceánicas; al solidificarse da lugar a nueva corteza. (Fuente: Deriva continental y tectónica de placas, selecciones de Scientific American)

No hay coincidencia entre los límites de las placas y los continentales; una sola placa puede contener completa o parcialmente continentes y áreas oceánicas. Los límites o márgenes entre las placas pueden ser de tres tipos (fig. 11):

a) Divergentes: donde las placas se están separando; un ejemplo son las cordilleras oceánicas.

b) Convergentes: una de las placas se introduce abajo de otra, o bien, dos placas chocan entre sí. Ilustración del primer caso es la penetración de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica, en la costa occidental de nuestro país. El efecto más representativo del segundo caso es la colisión entre las placas Indoaustraliana y Euroasiática, cuyos resultados son los plegamientos de grandes proporciones que constituyen la cadena montañosa de los Himalaya.

c) De transformación o transcurrentes: dos placas se mueven entre sí lateralmente; ejemplo: la falla de San Andrés, que cruza el estado de California en los Estados Unidos y que llega a afectar la parte norte de la península de Baja California. Esta falla no se prolonga en la región del Mar de Cortés ni en la costa occidental de México.

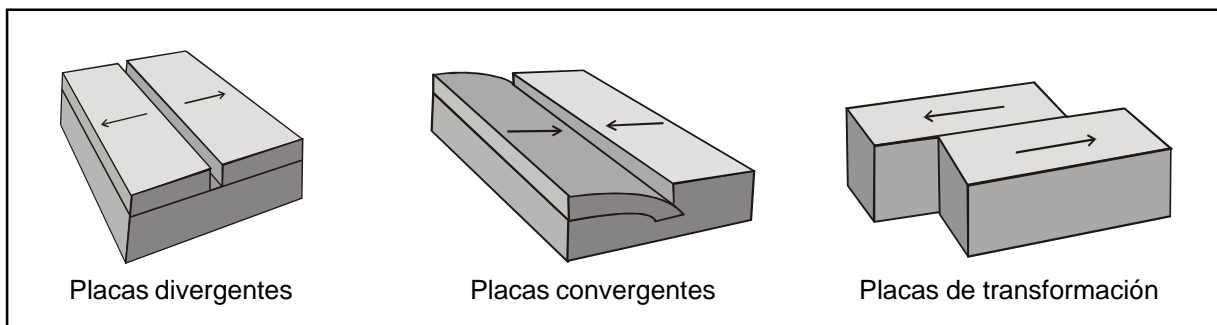


Figura 11. Tipos de límites entre las placas tectónicas

Relación entre la tectónica de placas y la sismicidad mundial

Como ya se mencionó, la litósfera está dividida en varias placas (fig. 12), cuya velocidad de desplazamiento es del orden de varios centímetros por año. En los límites entre placas, donde éstas hacen contacto, se generan fuerzas de fricción que impiden el desplazamiento de una respecto a la otra, generándose grandes esfuerzos en el material que las constituye (fig. 13). Si dichos esfuerzos sobrepasan la resistencia de la roca, o se vencen las fuerzas friccionantes, ocurre una ruptura violenta y la liberación repentina de la energía acumulada. Desde el foco (o hipocentro), ésta se irradia en forma de ondas que, a través del medio sólido de la Tierra, se propagan en todas direcciones. Se les conoce como ondas sísmicas.

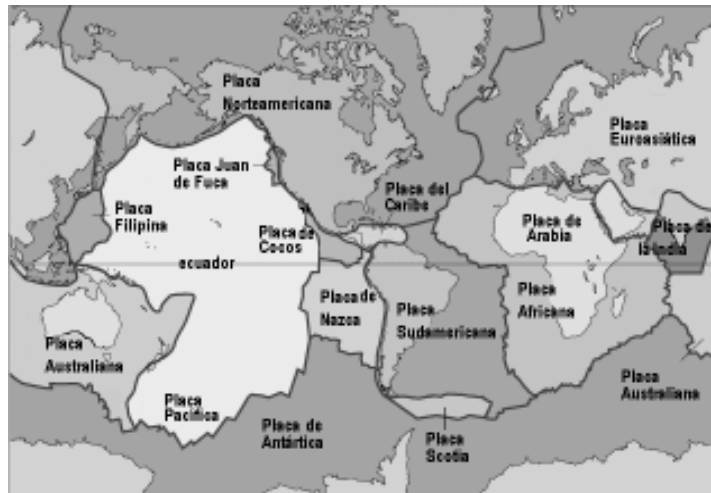


Figura 12. Distribución actual de las placas tectónicas

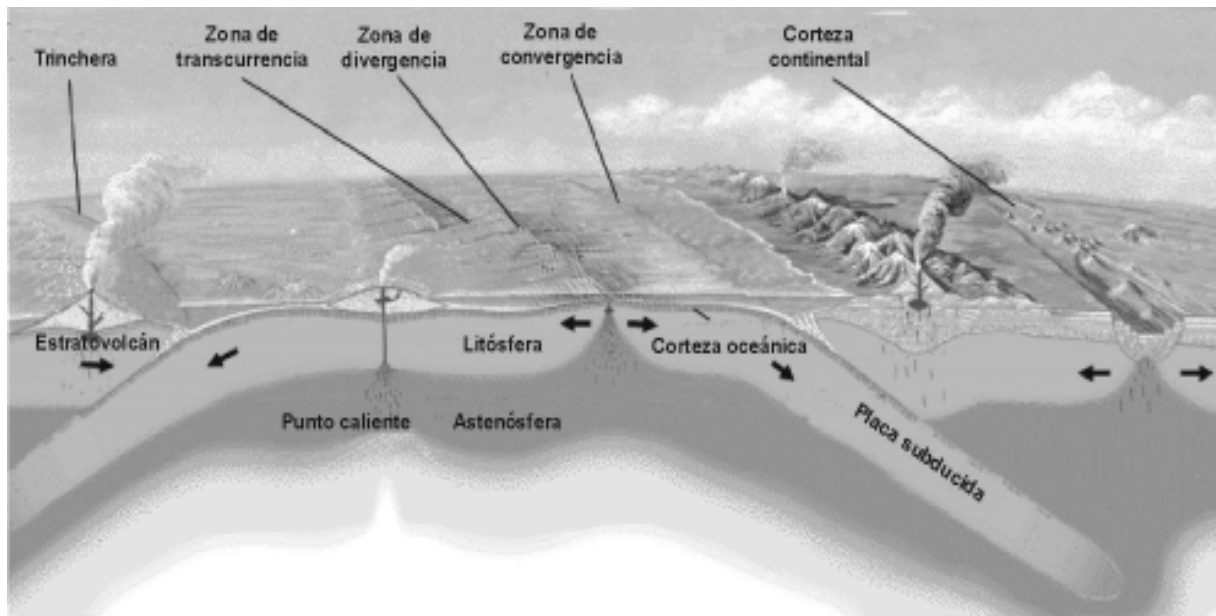


Figura 13. Formas de desplazamiento típicas de las placas tectónicas

Ondas sísmicas

Al ocurrir un sismo, tres tipos básicos de ondas producen la sacudida que se siente y causa daños; sólo dos se propagan en todas direcciones en el interior de la Tierra; por ello se les denomina ondas internas. La más rápida de éstas es la onda primaria u onda P, cuya velocidad varía dependiendo del tipo de roca, entre 1100 y 8000 m/s

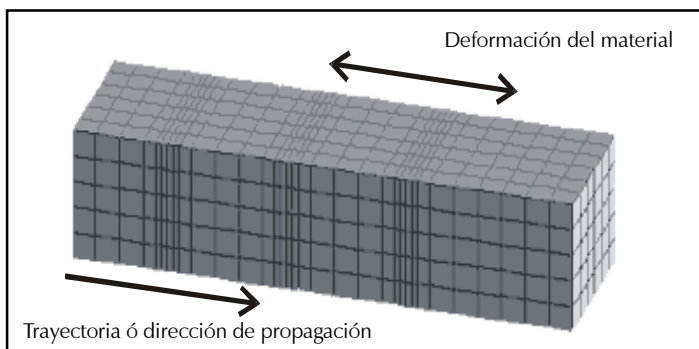


Figura 14. Representación de la onda sísmica tipo P

La característica principal de esta onda es que alternadamente comprime y expande la roca, en la misma dirección de su trayectoria. Es capaz de propagarse a través de rocas (sólidos) y de líquidos; por ejemplo, el magma y los océanos. Además, se puede transmitir a través de la atmósfera; en ocasiones, personas y animales la perciben como un sonido grave y profundo.

La segunda onda, llamada secundaria u onda S, viaja a menor velocidad que la P (normalmente entre 500 y 4,400 m/s). Mientras se propaga, deforma el material lateralmente respecto de su trayectoria. Por esta razón no se transmite en fluidos (líquidos y gases).

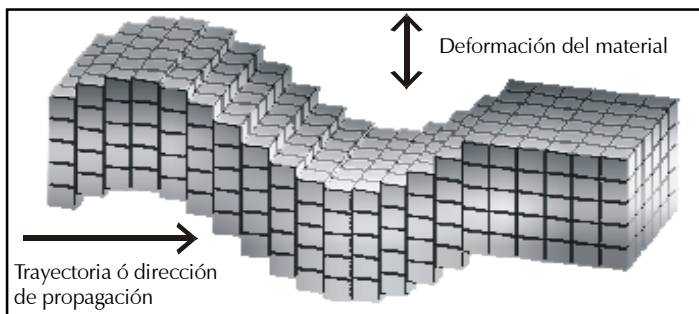


Figura 15. Representación de la onda sísmica tipo S

Cuando ocurre un terremoto primero se siente, en un sitio a cierta distancia del epicentro, la onda P, con un efecto de retumbo que hace vibrar paredes y ventanas. Unos segundos después llega la onda S, con movimiento vertical de arriba hacia abajo -y viceversa- y de lado a lado, de tal manera que sacude la superficie del terreno vertical y horizontalmente. Este es el movimiento responsable del daño a las construcciones, en zonas cercanas al epicentro e incluso a distancias considerables.



Figura 16. Colapso de un edificio de concreto reforzado causado por el sismo del 19 de septiembre de 1985, en la Ciudad de México

El tercer tipo de ondas sísmicas es el de las llamadas ondas superficiales, cuya característica es propagarse por la parte más superficial de la corteza terrestre; a medida que la profundidad aumenta disminuye la amplitud de su movimiento. Las ondas superficiales generadas por el terremoto se pueden clasificar en dos grupos:

Ondas Love, llamadas así en honor de su descubridor, el físico A.E.H. Love, deforman las rocas similarmente a las ondas S, aunque únicamente en dirección horizontal.

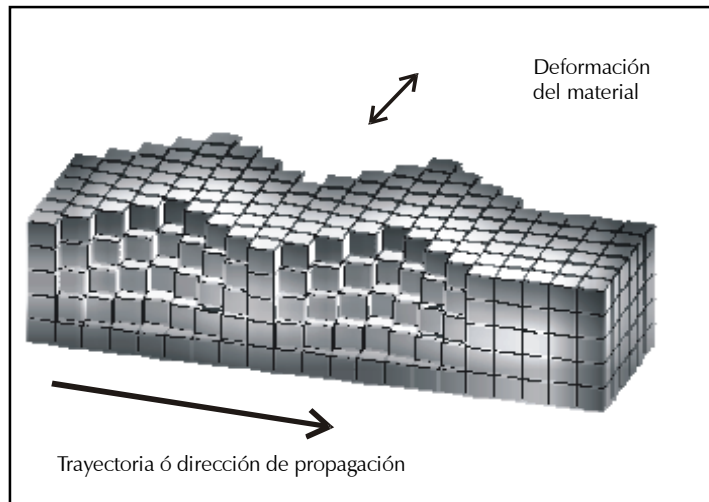


Figura 17. Representación de la onda sísmica tipo Love

Ondas Rayleigh, en honor de Lord Rayleigh, producen movimiento vertical, similar al de las olas marinas.

Las ondas superficiales viajan más despacio que las internas.

De las ondas superficiales, las Love son un poco más rápidas. Debido al componente vertical del movimiento de las Rayleigh, los cuerpos de agua, por ejemplo lagos, pueden ser afectados. A causa del movimiento lateral del sustrato rocoso de lagos y bahías, las ondas Love (que no se propagan en el agua) pueden afectar la superficie de estos cuerpos de agua.

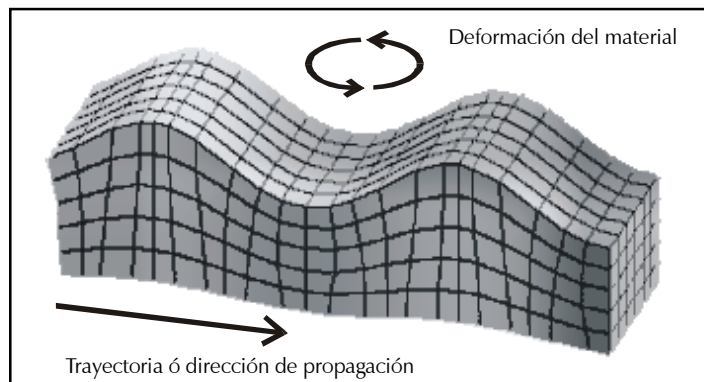


Figura 18. Representación de la onda sísmica tipo Rayleigh



Figura 19. El sismo del 19 de septiembre tuvo su origen en las costas de Michocán, produjo los daños mayores en la ciudad de México, donde cientos de edificios resultaron dañados

Dependiendo del tamaño del temblor y de la cercanía al punto de origen, las amplitudes de las ondas varían.

Pueden ser muy pequeñas imperceptibles por el ser humano, detectables sólo con instrumentos altamente sensibles, o bien tan grandes que pueden alterar de manera permanente deformando tuberías, vías férreas, etc.

Durante la ocurrencia de un gran temblor llega a ser posible observar como se deforma la superficie del terreno ante el paso de las ondas sísmicas.

Las ondas sísmicas de temblores moderado o grandes alcanzan a ser detectadas con claridad en observatorios de todo el mundo ya que se propagan a través del interior de la tierra y en la superficie de ésta, hasta por varias horas.



Figura 20. Colapso de un viaducto en Northridge, C.A., 1994



Figura 21. Colapso lateral del viaducto Hanshin, Japón, 1995



Figura 22. Durante el sismo de Kobe, Japón en 1995 se registraron intensidades sísmicas de grado XI en la escala de Mercalli

Tipos de sismos

Por su origen, los sismos se pueden clasificar como naturales y artificiales. En general, los de origen natural liberan mayor cantidad de energía; por tanto, sus efectos en la superficie son mayores.

Cabe aclarar que los términos sismo, terremoto y temblor son sinónimos.

Los sismos naturales

Sismos tectónicos

Se generan por interacción de placas tectónicas. De estos sismos se han definido dos clases: los interplaca, ocasionados por fricción en las zonas de contacto entre las placas, ya descrita, y los intraplaca, que se generan en la parte interna de las placas, aun en zonas donde se ha llegado a suponer un

nivel nulo de sismicidad. Estos terremotos, consecuencia de deformaciones continentales, menos frecuentes que los interplaca, pueden tener profundidades similares a éstos (15-30 km) o mayores, por ejemplo, 60 ó 70 km.

Un tipo particular de sismos intraplaca son los llamados locales, que son producto de deformaciones del material terrestre, debido a concentración de fuerzas en una región limitada.

Sismos volcánicos

Éstos son simultáneos a erupciones volcánicas; principalmente los ocasiona el fracturamiento de rocas debido a movimiento del magma. Aunque puede haber decenas de ellos en un día, no llegan a ser tan grandes como los anteriores.

Sismos de colapso

Se generan por derrumbamiento del techo de cavernas y minas. Generalmente ocurren cerca de la superficie y se sienten en un área reducida.

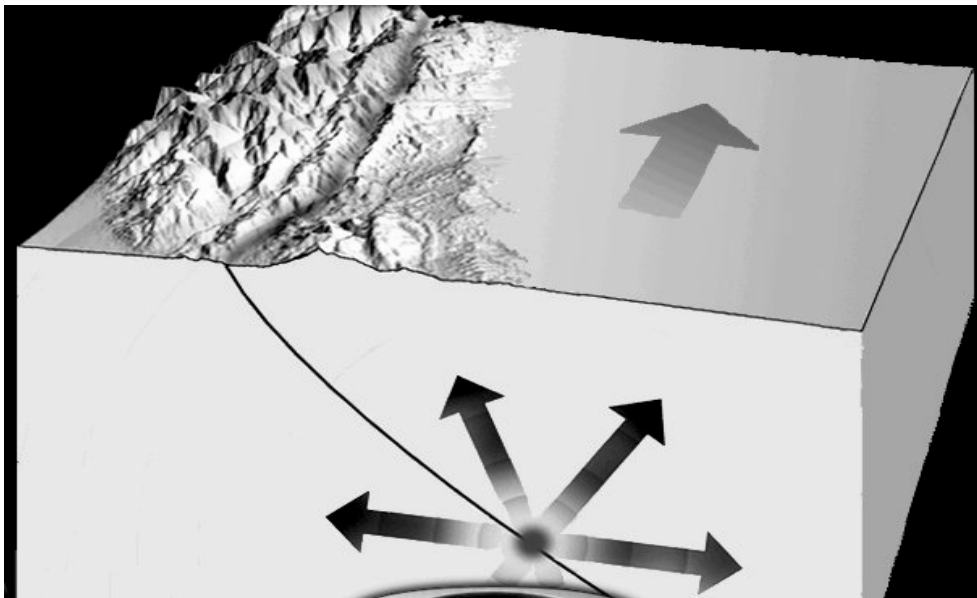


Figura 23. Ilustración alusiva a la generación de un sismo por interacción de placas tectónicas

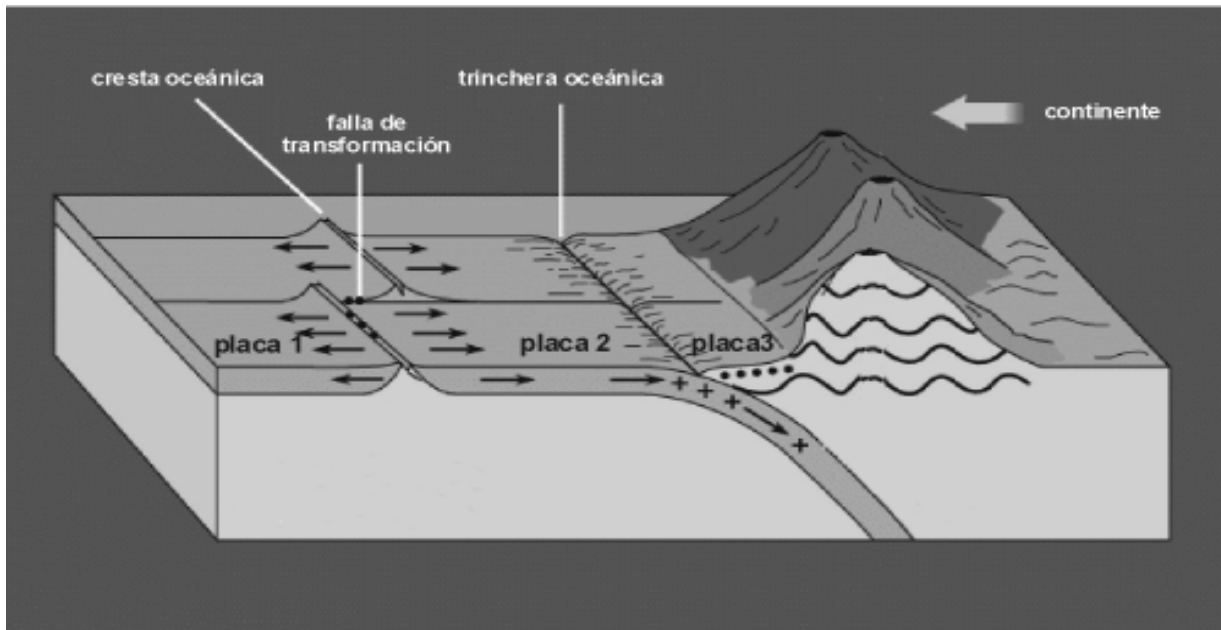


Figura 24. La teoría de placas indica que nuestro territorio está expuesto permanentemente a movimientos debido a que la Placa de Cocos se mueve horizontalmente y se introduce debajo de la Placa Norte Americana, ocasionando deformación y concentración de fuerzas. Cuando los esfuerzos exceden el límite, la presión liberada por un movimiento fuerte de la placa genera el terremoto.

Sismos artificiales

Son los producidos por el hombre por medio de explosiones comunes y nucleares, con fines de exploración, investigación, y explotación de bancos de material para la industria (por ejemplo, extracción de minerales). Ocasionalmente las explosiones nucleares son suficientemente grandes de modo que las detectan instrumentos en diversas partes del planeta, pero se sienten sólo en sitios cercanos al lugar de pruebas. La ocurrencia de sismos de gran magnitud y la actividad volcánica no están ligadas con las explosiones nucleares.



Figura 25. Las explosiones producidas por la actividad humana provocan sismos locales muy ligeros

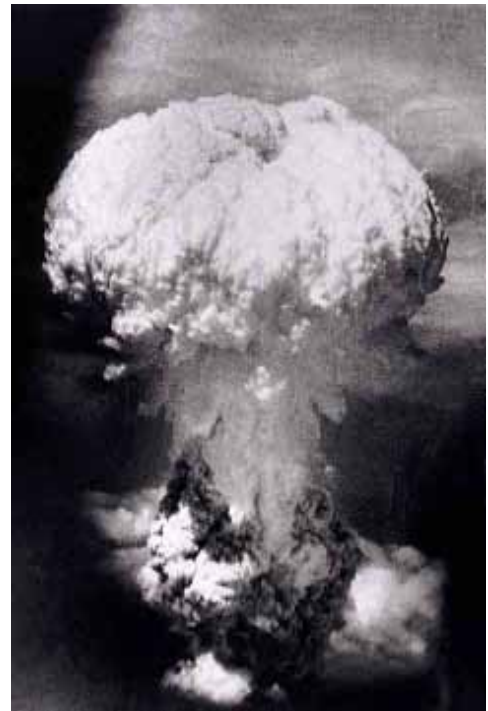


Figura 26. Las explosiones nucleares pueden ser detectadas por los instrumentos de medición en diversas partes del planeta, aunque no están ligadas a la ocurrencia de sismos de gran magnitud

Maremotos



Figura 27. Ilustración alusiva a un maremoto

Los maremotos, también conocidos como tsunamis, son consecuencia de sismos tectónicos bajo el fondo del océano. Debido al movimiento vertical del piso oceánico, el agua se mueve como si un gran remo la empujara. A partir de los alrededores de la fuente del terremoto, las olas provocadas se propagan a través del océano hasta que llegan a la costa. Allí, su altura puede llegar a ser hasta de 30 metros, como sucedió en Japón a finales del siglo XIX.



Figura 28. La gran ola de de Kanagagua, Japón representada en ornamentos y documentos diversos



Figura 29. Gente huyendo del maremoto que devastó el pueblo de Hilo, Hawaii



Figura 30. Ola sísmica marina en Hilo, Hawaii, el día 1° de abril de 1946. La ola devastó un almacén, segundos más tarde barrerá al hombre señalado por el círculo. Esta fotografía fue tomada desde la torre de un barco por el cuerpo de ingenieros de la Armada de los Estados Unidos.

Escala de intensidad y magnitud

Generalmente, al describir un gran sismo, además de su epicentro se mencionan valores de magnitud e intensidad; estos dos últimos términos aluden a fenómenos distintos y son frecuentemente confundidos.

La intensidad de un sismo se refiere a un lugar determinado; se asigna en función de los efectos causados en el hombre, en sus construcciones y, en general, en el terreno del sitio. Esta medición resulta un tanto subjetiva, debido a que la manera de cuantificación depende de la sensibilidad de cada persona y de la apreciación que se haga de los efectos.



Figura 31. Sala dedicada a Giuseppe Mercalli en el Museo Venusiano, Italia.

En 1883, S. de Rossi y F. Forell propusieron la primera escala de intensidad, con grados de 1 al 10. En 1902, Giuseppe Mercalli propuso otra escala, de doce grados, modificada en 1931 por H. Hood y F. Newmann, para construcciones más modernas. A ésta se le conoce como Escala de Mercalli Modificada, que ahora se utiliza profusamente.

Actualmente, puede tenerse una medición indirecta de la intensidad, de una manera instrumental, a través de valores de aceleración del terreno producto de los acelerógrafos.

Con el objetivo de comparar el tamaño de los terremotos en todo el mundo, se necesita una medida que no dependa, como la intensidad, de la densidad de población ni del tipo de construcción. La manera de evaluar el tamaño real de un

sismo, está relacionada con la cantidad de energía liberada, que es independiente de la ubicación de los instrumentos que los registran.

En 1932, Charles Richter desarrolló una escala estrictamente cuantitativa, aplicable a sismos ocurridos en regiones tanto habitadas como no pobladas, utilizando las amplitudes de las ondas registradas por un sismógrafo. Precisó la escala de magnitud (M), basada en evaluación de numerosos sismos en la costa de California. Hoy el uso de la magnitud ha trascendido estos modestos comienzos. La conveniencia de designar los efectos de un terremoto mediante números (magnitud), ha requerido que el método se amplíe a otros tipos de sismógrafos por todo el mundo. Consecuentemente, hay varias escalas de magnitud. Éstas no tienen límite superior ni inferior; aunque en el extremo superior, el terremoto está limitado por la resistencia de las rocas de la litósfera.

En el siglo pasado, los terremotos de mayor magnitud ocurrieron en Chile, en 1960 ($M = 9.5$), y Alaska, en 1964 ($M = 9.2$).



Figura 32. Giuseppe Mercalli.



Figura 33. Charles Richter

En ocasiones, para referirse a un temblor cuya magnitud supera los 7 grados se habla de un macrosismo.

Una diferencia de un grado de magnitud entre dos sismos cualesquiera implica, en términos de energía liberada, una diferencia de 32 veces. Así, un sismo de magnitud 8 equivale, de manera aproximada, en términos de energía liberada, a:

- 32 sismos de magnitud 7
- 1000 sismos de magnitud 6
- 32,000 sismos de magnitud 5
- ó 1´000,000 de magnitud 4.

Por tanto, es fácil notar que un sismo de magnitud 4, como los que llegan a ocurrir varias veces por semana a lo largo de la costa occidental de México, no es la mitad de uno de magnitud 8, cuyo periodo de repetición en una determinada región puede ser de varias décadas.

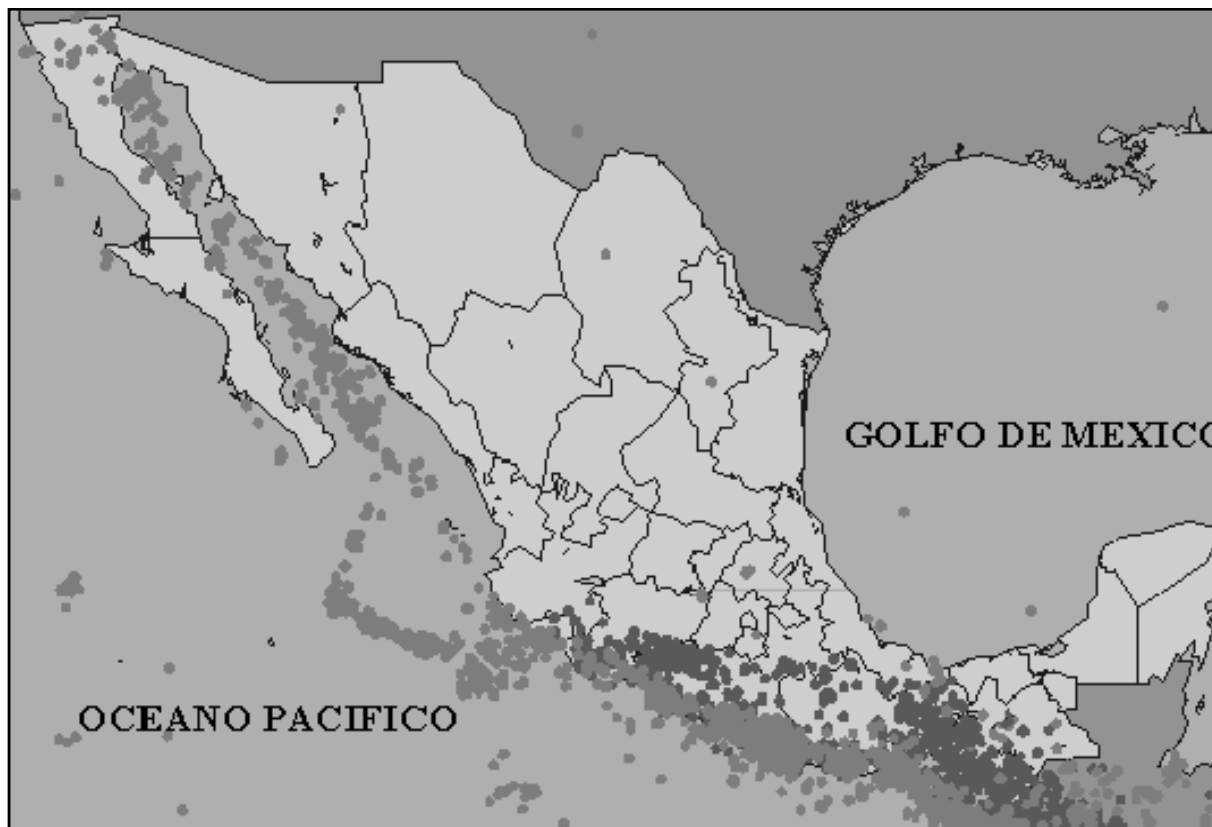


Figura 34. Epicentros de sismos con magnitudes mayores o iguales a 4.5, localizados en la República Mexicana entre 1964 y 1995. Los puntos claros representan sismos superficiales (profundidades menores a 50 Km), mientras que los puntos oscuros representan sismos con profundidades mayores a 50 Km. (Fuente: Servicio Sismológico Nacional, UNAM)

Escala de intensidad Mercalli modificada abreviada

Escala	Descripción
I.	No es sentido, excepto por algunas personas bajo circunstancias especialmente favorables.
II.	Sentido sólo por muy pocas personas en posición de descanso, especialmente en los pisos altos de los edificios. Objetos delicadamente suspendidos pueden oscilar.
III.	Sentido claramente en interiores, especialmente en pisos altos de los edificios, aunque mucha gente no lo reconoce como un terremoto. Automóviles parados pueden balancearse ligeramente. Vibraciones como al paso de un camión. Duración apreciable.
IV.	Durante el día sentido en interiores por muchos; al aire libre por algunos. Por la noche algunos despiertan. Platos, puertas y ventanas agitadas; las paredes crujen. Sensación como si un camión pesado chocara contra el edificio. Automóviles parados se balancean apreciablemente.
V.	Sentido por casi todos, muchos se despiertan. Algunos platos, ventanas, y similares rotos; grietas en el revestimiento en algunos sitios. Objetos inestables volcados. Algunas veces se aprecia balanceo de árboles, postes y otros objetos altos. Los péndulos de los relojes pueden pararse.
VI.	Sentido por todos, muchos se asustan y salen al exterior. Algún mueble pesado se mueve; algunos casos de caída de revestimientos y chimeneas dañadas. Daño leve.
VII.	Todo el mundo corre al exterior. Daños insignificantes en edificios de buen diseño y construcción; leve a moderado en estructuras comunes bien construidas; considerables en estructuras pobremente construidas o mal diseñadas; se rompen algunas chimeneas. Notado por algunas personas que conducen automóviles.
VIII.	Daño leve en estructuras diseñadas especialmente para resistir sismos; considerable, en edificios comunes bien contruidos, llegando hasta colapso parcial; grande en estructuras de construcción pobre. Los muros de relleno se separan de la estructura. Caída de chimeneas, objetos apilados, postes, monumentos y paredes. Muebles pesados volcados. Eyección de arena y barro en pequeñas cantidades. Cambios en pozos de agua. Cierta dificultad para conducir automóviles.
IX.	Daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras bien diseñadas pierden la vertical; daño mayor en edificios comunes bien contruidos, colapso parcial. Edificios desplazados de los cimientos. Grietas visibles en el terreno. Tuberías subterráneas rotas.
X.	Algunos estructuras bien construidas en madera, destruidas; la mayoría de estructuras de mampostería y marcos, destruidas incluyendo sus cimientos; suelo muy agrietado. Rieles torcidos. Deslizamientos de tierra considerables en las orillas de los ríos y en laderas escarpadas. Movimientos de arena y barro. Agua salpicada y derramada sobre las orillas.
XI.	Pocas o ninguna obra de mampostería quedan en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el suelo. Tuberías subterráneas completamente fuera de servicio. La tierra se hunde y el suelo se desliza en terrenos blandos. Rieles muy retorcidos.
XII.	Destrucción total. Se ven ondas sobre la superficie del suelo. Líneas de mira (visuales) y de nivel deformadas. Objetos lanzados al aire.

Zonas sísmicas en el mundo

A finales del siglo XIX y a principios del XX, en varios países, incluido México, se establecieron estaciones sismológicas.

Mediante sismógrafos de diversos tipos se inició el registro instrumental de las ondas sísmicas generadas por terremotos, tanto de origen local como lejano. De manera relativamente precisa, esto permitió determinar la ubicación y la profundidad de los focos sísmicos.

Con el transcurso del tiempo se conformó un mapa bien definido de la distribución geográfica de los sismos. Desde el advenimiento de la sismología moderna a los investigadores les sorprendió que, en un mapa, al representar los focos de los terremotos registrados durante un período de tiempo dado, siempre éstos se concentraron a lo largo de franjas relativamente angostas, indicando zonas de alta sismicidad.

A su vez, estas franjas limitan o separan grandes regiones oceánicas y continentales de actividad sísmica escasa o nula.

Como se observa en el mapa de sismicidad mundial (Fig. 32), la distribución de los focos sugiere la división de la superficie terrestre en una serie de placas. Esto apoya la teoría de tectónica de placas, ya explicada.

Se observa que la franja de sismicidad más importante se encuentra en la periferia del Océano Pacífico. Comprende Patagonia y Chile en América del Sur, Centroamérica, parte occidental de México, Estados Unidos, Canadá y Alaska, atraviesa las Islas Aleutianas, continúa por la Península de Kamtchatka, Japón, Islas Filipinas y termina en Nueva Zelanda, en el sur. Además, esta zona sísmica se caracteriza por una actividad volcánica intensa. Por esto se le conoce como Cinturón de Fuego del Pacífico, o simplemente Cinturón Circunpacífico.

Es claro que, a escala mundial, la sismicidad se concentra en zonas bien delimitadas. En contraste, grandes regiones de la Tierra están libres de actividad sísmica de gran magnitud o en ellas casi nunca ocurren terremotos. Tal es el caso de Brasil, norte y centro de Canadá, Noruega, Suecia, oeste de África y gran parte de Australia.

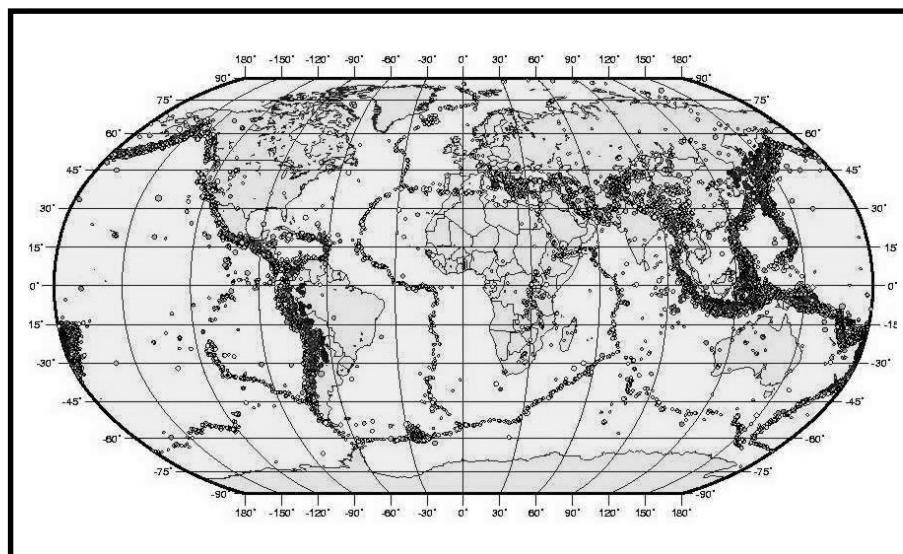


Figura 35. Mapa de la sismicidad mundial

Sismicidad en México

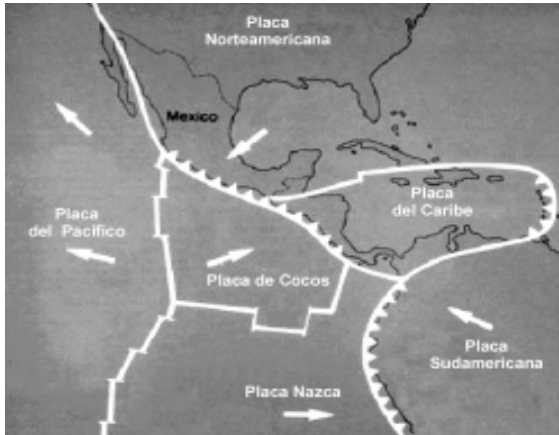


Figura 36. Ubicación del territorio Nacional con respecto a las placas tectónicas

Tabla 1. Sismos ocurridos en México durante el siglo XIX con magnitud 7.0 o mayor

Fecha	Región	Magnitud
25 mar. 1806	Costa de Colima-Michoacán	7.5
3 may. 1818	Costa de Colima-Michoacán	7.7
4 may. 1820	Costa de Guerrero	7.6
22 nov. 1837	Jalisco	7.7
9 mar. 1845	Oaxaca	7.5
7 abr. 1845	Costa de Guerrero	7.9
5 may. 1854	Costa de Oaxaca	7.7
19 jun. 1858	Norte de Michoacán	7.7
3 oct. 1864	Puebla-Veracruz	7.3
11 may. 1870	Costa de Oaxaca	7.9
27 mar. 1872	Costa de Oaxaca	7.4
16 mar. 1874	Guerrero	7.3
11 feb. 1875	Jalisco	7.5
9 mar. 1879	Costa de Jalisco-Colima	7.4
17 may. 1879	Puebla	7.0
19 jul. 1882	Guerrero-Oaxaca	7.5
3 may. 1887	Bavispe, Sonora	7.3
29 may. 1878	Guerrero	7.2
6 sep. 1889	Costa de Guerrero	7.0
2 dic. 1890	Costa de Guerrero	7.2
2 nov. 1894	Costa de Oaxaca-Guerrero	7.4
5 jun. 1897	Costa de Oaxaca	7.4
24 ene. 1899	Costa de Guerrero	7.9

Tabla publicada por S.K. Singh et al., 1981

Se puede observar que nuestro país está integrado a una gran zona generadora de sismos, y que seguramente éstos han ocurrido durante millones de años.

Los epicentros de la mayor parte de los terremotos de gran magnitud (mayores de 7, por ejemplo), que ocasionan grandes daños, se ubican en la costa del Pacífico, a lo largo de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Sin embargo, también han ocurrido grandes sismos en el centro y el sur de Veracruz y Puebla, norte y centro de Oaxaca y Chiapas, Estado de México y la península de Baja California, especialmente en la zona fronteriza con los Estados Unidos.

En los estados de Zacatecas, Durango, Sinaloa y Sonora, la sismicidad es más bien escasa; a fines del siglo XIX, en este último estado ocurrió un sismo de magnitud 7.3. En los estados restantes no se han originado movimientos sísmicos de importancia, aunque algunos (p. ej. Nayarit, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Tlaxcala y Tabasco) llegan a ser afectados por los grandes sismos que se originan en otras regiones.

A continuación se listan los sismos de magnitud superior a 7 ocurridos en el país durante los siglos XIX (Tabla 1) y XX (Tabla 2).

Muy probablemente, la diferencia en número de sismos entre ambas listas se debe a escasez de datos del siglo XIX y no a una disminución real de la sismicidad.

Tabla 2. Sismos ocurridos en México durante el siglo XX con magnitud 7.0 ó mayor

Fecha	Latitud °N	Longitud °W	Profundidad km	M max	M s	Región
20 ene. 1900	20,000	105,000	33	7.4	7.3	Jalisco
8 dic. 1901	26,000	110,000	S	7.0	7.0	Golfo de California
16 ene. 1902	17,620	99,720	S	7.0	7.0	Guerrero
19 abr. 1902	14,900	91,500	25	7.5	7.4	Guatemala. A 70 km de frontera con México
23 sep. 1902	16,500	92,500	25	7.7	7.7	Chiapas
12 dic. 1902	29,000	114,000	S	7.1	7.0	Baja California
14 ene. 1903	15,000	93,000	S	7.6	7.6	Costa de Chiapas
15 abr. 1907	16,700	99,200	33	7.6	7.6	Costa de Guerrero
16 oct. 1907	28,000	112,500	10	7.1	7.1	Golfo de California
26 mar. 1908	16,700	99,200	33	7.5	7.5	Costa de Guerrero
27 mar. 1908	17,000	101,000	33	7.0	7.0	Costa de Guerrero
30 jul. 1909	16,800	99,900	33	7.2	7.2	Costa de Guerrero
7 jun. 1911	17,500	102,500	33	7.6	7.6	Jalisco
16 dic. 1911	16,900	100,700	50	7.5	7.5	Costa de Guerrero
9 dic. 1912	15,500	93,000	S	7.0	7.0	Costa de Chiapas
30 mar. 1914	17,000	92,000	150	7.2		Chiapas
21 nov. 1915	32,000	115,000	10	7.0	7.0	Baja California Norte
2 jun. 1916	17,500	95,000	150	7.0		Sur de Veracruz
4 feb. 1921	15,000	91,000	120	7.4		
10 dic. 1925	15,500	92,500	S	7.0	7.0	Chiapas
22 mar. 1928	15,670	96,100	33	7.5	7.3	Oaxaca
17 jun. 1928	16,330	96,700	33	7.6	7.6	Oaxaca
4 ago. 1928	16,830	97,610	33	7.4	7.4	Oaxaca
9 oct. 1928	16,300	97,300	33	7.5	7.4	Oaxaca
15 ene. 1931	16,340	96,870	40	7.8	7.6	Oaxaca
3 jun. 1932	19,570	104,420	33	8.2	8.2	Jalisco
18 jun. 1932	19,500	103,500	33	7.8	7.8	Jalisco
30 nov. 1934	19,000	105,310	33	7.0	7.0	Costa de Jalisco
31 dic. 1934	32,000	114,750	S	7.1	7.1	Baja California Norte
14 dic. 1935	14,750	92,500	S	7.3	7.2	Costa de Chiapas
26 jul. 1937	18,450	96,080	85	7.3	7.2	Oaxaca
23 dic. 1937	17,100	98,070	33	7.4	7.3	Oaxaca
19 may. 1940	32,700	115,070	S	7.1	7.1	Baja California Norte
15 abr. 1941	18,850	102,940	33	7.6	7.5	Michoacán
6 ago. 1942	14,800	91,300	50	7.9	7.7	Guatemala a 80 km de l frontera con México
22 feb. 1943	17,600	101,100	33	7.4	7.3	Guerrero

Tabla 2 (continuación). Sismos ocurridos en México durante el siglo XX con magnitud 7.0 ó mayor

Fecha	Latitud °N	Longitud °W	Profundidad km	M max	Ms	Región
28 jun. 1944	15,000	92,500	S	7.1	7.1	Chiapas
6 ene. 1948	17,000	98,000	80	7.0	7.0	Oaxaca
29 sep. 1950	19,000	107,000	60	7.0	6.6	A 200 km de las costas de Jalisco
23 oct. 1950	14,300	91,800	33	7.2	7.2	Guatemala. A 50 km de frontera con México
14 dic. 1950	17,220	98,120	33	7.2	7.1	Oaxaca
12 dic. 1951	17,000	94,500	100	7.0		Oaxaca
29 abr. 1954	28,500	113,000	S	7.0	7.0	Golfo de California
28 jul. 1957	17,110	99,100	33	7.8	7.5	Guerrero
11 may. 1962	17,250	99,580	33	7.2	7.0	Guerrero
19 may. 1962	17,120	99,570	33	7.1	6.9	Guerrero
6 jul. 1964	18,030	100,770	55	7.2		
23 ago. 1965	16,178	95,877	12	7.6	7.6	Oaxaca
23 ago. 1968	16,600	97,800	16	7.3	7.2	Oaxaca
29 abr. 1970	14,463	92,683	44	7.3	7.1	Costa de Chiapas
30 ene. 1973	18,412	103,019	24	7.6	7.3	Costa de Michoacán
28 ago. 1973	18,248	96,551	82	7.3	7.1	Oaxaca - Veracruz
4 feb. 1976	15,262	89,198	13	7.5	7.5	Guatemala. A 150 km de la frontera con México
29 nov. 1978	16,013	96,586	23	7.6	7.6	Oaxaca
14 mar. 1979	17,750	101,263	25	7.4	7.4	Guerrero
24 oct. 1980	218,174	98,222	65	7.1		Oaxaca - Puebla
26 oct. 1981	18,088	102,061	21	7.3	7.3	Costa de Guerrero
7 jun. 1982	15,516	98,339	19	7.0	7.0	Oaxaca - Guerrero
2 dic. 1983	14,032	91,956	35	7.0		Guatemala. A 70 km de frontera con México
19 sep. 1985	18,419	102,468	15	8.1	8.1	Costa de Michoacán
21 sep. 1985	17,828	101,681	17	7.6	7.6	Costa de Michoacán
30 abr. 1986	18,361	103,045	22	7.0	7.0	Costa de Michoacán
10 sep. 1983	14,800	92,687	34	7.2	7.2	Costa de Chiapas
14 sep. 1995	16,752	98,667	21	7.3	7.2	Oaxaca - Guerrero
9 oct. 1995	18,993	104,245	25	8.0	7.3	Colima - Jalisco
21 oct. 1995	16,811	93,474	160	7.1	6.9	Chiapas
25 feb. 1996	15,880	97,980	15	7.1		Costa de Oaxaca
11 ene. 1997	18,340	102,580	40	7.1	6.9	Michoacán
15 jun. 1999	18,133	97,539	63	7.0	6.5	Puebla
30 sep. 1999	16,010	97,000	42	7.5	7.5	Oaxaca

Se presenta para cada evento el valor máximo de magnitud (M max) de una de las tres escalas más usadas en la investigación sismológica, mB (magnitud de ondas de cuerpo), Ms (magnitud de ondas superficiales) o Mw (magnitud de momento sísmico), de acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional. Además, se presentan de manera particular las magnitudes Ms para la mayoría de los eventos, en vista de que son las más utilizadas en estimaciones de riesgo sísmico y generalmente reportadas en los medios de difusión como valores de la escala Richter.

Debe tomarse en cuenta que pueden encontrarse diferencias menores en localización geográfica, profundidad o valores de magnitud con respecto a otros catálogos, sin que deban interpretarse necesariamente como errores. Los parámetros sísmicos, especialmente aquéllos de las primeras décadas, fueron determinados con un número escaso de instrumentos, que aún no contaban con todos los atributos tecnológicos actuales.

S significa *superficial*, es decir con profundidad menor de 40 km.

Las fechas corresponden a tiempo del meridiano de Greenwich (tiempo local + 6 horas; tiempo local + 5 en horario de verano)

Regionalización sísmica

El territorio mexicano está clasificado según el peligro sísmico al que están sujetas las construcciones. Se han delimitado cuatro zonas: A, B, C y D, cuyo peligro es de menor a mayor. Básicamente se determinaron en función de la sismicidad propia de cada región.

A esta clasificación se le conoce como regionalización sísmica y tiene como objetivo principal, junto con manuales de obras civiles, proporcionar a los diseñadores y constructores la información necesaria para el cálculo de valores para diseño de obras, de tal manera que resulten suficientemente seguras y su costo no sea excesivo. Se advierte que esta regionalización es aplicable a estructuras construidas en terreno firme; no se toma en cuenta el fenómeno de amplificación del movimiento sísmico por efecto de suelos blandos. Esto puede ser decisivo para el peligro sísmico de algunos lugares, como la ciudad de México.

Utilizando los datos del censo poblacional del año 2000 y la regionalización sísmica, puede tenerse una estimación del volumen de población más expuesto al fenómeno sísmico.

En las zonas C y D (de mayor peligro), que de juntas incluyen 1001 municipios de los 2443 que tiene la República Mexicana, se concentraron para entonces poco más de 24 millones de habitantes.

Si a éstos se agregan los 8.6 millones correspondientes al Distrito Federal, área donde la amplificación del movimiento sísmico en terreno blando implica un nivel de peligro alto, se tiene que cerca de 32.6 millones de un total al 97.4 millones de habitantes (aproximadamente el 33%) están expuestos a un nivel de peligro por sismo alto o severo.



Figura 34. Empleando los registros históricos de grandes sismos en México, los catálogos de sismicidad y datos de aceleración del terreno como consecuencia de sismos de gran magnitud, se ha definido la Regionalización Sísmica de México. La zona A es aquella donde no se tienen registros históricos, no se han reportado sismos grandes en los últimos 80 años y donde las aceleraciones del terreno se esperan menores al 10% del valor de la gravedad (g). Las zonas B y C, presentan sismicidad con menor frecuencia o bien, están sujetas a aceleraciones del terreno que no rebasan el 70% de g. En la zona D han ocurrido con frecuencia grandes temblores y las aceleraciones del terreno que se esperan pueden ser superiores al 70% de g.

Brecha sísmica de Guerrero

Se conoce como brecha sísmica aquel segmento de contacto entre placas en el que no se ha producido un temblor de importancia (magnitud mayor que 7 grados) en un lapso relativamente grande, que para México los investigadores han definido como de más de 30 años.

Cuando la brecha sísmica libera su energía (produciendo un temblor), es necesario un nuevo periodo de acumulación de energía, hasta que se rebasa la resistencia de las rocas o la fricción entre ellas y se origine en el lugar un nuevo temblor.

Una de las brechas sísmicas que en México pueden generar uno o varios sismos de gran magnitud en un futuro cercano es aquella de la costa de Guerrero. En la comunidad científica existe consenso acerca de que actualmente la zona de mayor potencial sísmico en nuestro país es la Brecha de Guerrero. En su porción noroeste (Zihuatanejo-Acapulco), se originaron grandes sismos en 1899 (M 7.9), 1907 (M 7.6), 1908 (M 7.5, 7.0), 1909 (M 7.2) y 1911 (M 7.5); des-

de entonces no han ocurrido temblores importantes en esa zona. En la porción sureste de esta brecha (desde Acapulco hasta los límites con Oaxaca), no se han verificado eventos de importancia después de los terremotos de 1957 (M7.8), 1962 (M 7.2, 7.1) y 1989 (M 6.9).

De acuerdo con el tamaño de la brecha, la magnitud del sismo que se puede llegar a presentar puede ser superior a 8.0 grados; no obstante, existe la posibilidad que, en vez de un solo sismo grande, sucedan varios de menor magnitud en un periodo relativamente corto. Es necesario aclarar que no se puede precisar una fecha de ocurrencia del temblor; solamente se definen zonas con mayor probabilidad de ocurrencia.

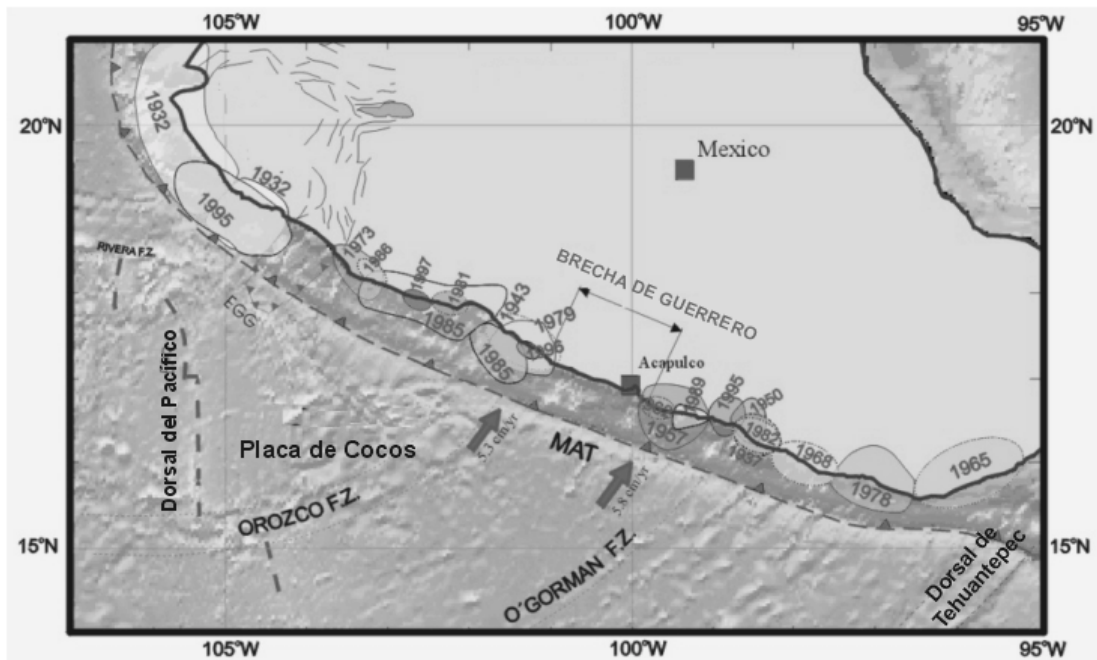


Figura 35. Localización de sismos importantes en México y de la Brecha Sísmica de Guerrero

Instrumentación sísmica

Instrumentos de registro

Para conocer las características de los temblores es necesario registrarlos, de manera que posteriormente se les pueda estudiar, con el fin de precisar su magnitud, localización, la duración del movimiento, sus direcciones principales, etc. Para ello se emplean principalmente sismógrafos y acelerógrafos, que registran el movimiento del terreno al paso de las ondas sísmicas. El principio de operación de ambos equipos es el mismo y consiste de una masa suspendida por un resorte y un amortiguador; este permite a la masa permanecer en reposo con respecto al movimiento del terreno. Si se sujeta a la masa suspendida un lápiz que pueda dibujar en un papel pegado sobre un cilindro que gira a velocidad constante, se obtiene así un registro del movimiento del suelo llamado sismograma o acelerograma.

Los sismógrafos modernos utilizan este mismo principio de operación, sólo que para su implementación utilizan componentes mecánicos y electrónicos para obtener una señal eléctrica proporcional al movimiento del suelo (velocidad), la cual puede almacenarse en forma local, convertida a un formato digital y/o ser transmitida por algún medio de comunicación (teléfono, radio, satélite, internet) hasta un centro de registro y evaluación.

El sismógrafo se caracteriza por su alta sensibilidad; es decir, tiene capacidad de ampliar decenas o centenas de miles de veces la velocidad de movimiento del terreno, ya sea a causa de un sismo cercano muy pequeño o de uno grande lejano.

El movimiento del terreno se mide usualmente en direcciones: vertical, norte-sur y este-oeste.

Sin embargo, cuando a corta distancia ocurre un sismo muy fuerte, el sismógrafo no es capaz de registrarlo íntegramente, pues por su gran sensibilidad produce un sismograma saturado. Para registrar estos movimientos fuertes de gran intensidad, se utilizan otro tipo de instrumentos llamados acelerógrafos.

A diferencia de los sismógrafos, independientemente de la magnitud del sismo, una característica de los acelerógrafos es la de registrar la aceleración del terreno, expresada como fracción de la gravedad terrestre.

Existen diversas modalidades de registro: tiras de papel, cintas magnéticas analógicas y digitales, y película; comúnmente las dos últimas se emplean en los acelerógrafos.

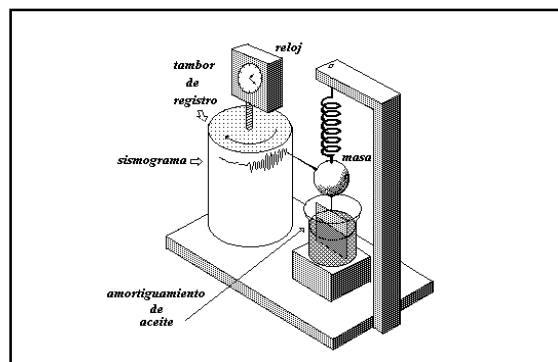


Figura 36. Elementos básicos de un sismógrafo



Figura 37. Sismógrafo moderno de 16 bits y pantalla de registro de 24 canales

Redes de observación sísmica en México

Al conjunto de instrumentos de registro sísmico (sismógrafos y acelerógrafos), distribuidos en determinada zona para analizar la sismicidad, local o regional, se le denominada red de observación sísmica. En México contamos con redes para el registro y análisis de sismos en las principales regiones sísmicas del país. También se cuenta con redes para el registro de sismos locales en torno a algunas presas y en la nucleoelectrica de Laguna Verde.

Los primeros sismógrafos en México fueron instalados en 1906 por el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Actualmente depende de la Universidad Nacional Autónoma de México y cuenta con una red de modernos sismógrafos distribuidos en gran parte del territorio nacional, siendo su principal objetivo el de proporcionar información oportuna sobre la ocurrencia de sismos en el país y determinar su localización (epicentro) y su magnitud.

Existen otras redes sísmicas locales operadas por diversas instituciones y universidades, como la red del Valle de México del Instituto de Geofísica, SISMEX del Instituto de Ingeniería, la Red Sísmica de Colima (RESCO) de la Universidad de Colima, la Red del Noroeste de México (RESNOR) del CICESE, la Red de Puebla de la BUAP, etc

En relación con las redes acelerográficas en México, también existen numerosas instituciones encargadas de su operación. En 1960 se instalaron en la Ciudad de México los primeros acelerógrafos. En los años posteriores, la red acelerográfica en México creció rápidamente, en particular después de los sismos de 1985. Para el año 2001, la red contaba con 547 instrumentos localizados principalmente en la ciudad de México y estados vecinos, a lo largo de la zona de subducción en la costa del Pacífico y el noroeste del país.

Cabe señalar que los instrumentos acelerográficos que registraron en el Distrito Federal los terremotos de los días 19 y 20 de septiembre de 1985 eran diez, todos a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM



Figura 38. Algunas instalaciones cuentan con redes locales de observación sísmica como lo son presas



Figura 39. Estación acelerográfica Zaragoza en la Ciudad de México



Figura 40. Vista interior de una caseta de registro sísmico

Con base en estos registros, fue posible adecuar en su momento el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, pues se incorporaron normas de diseño más estrictas que permiten construir estructuras más resistentes a sismos.

Sin embargo, puesto que la respuesta sísmica en diferentes zonas de la ciudad de México es variable, principalmente debido a las características del subsuelo, fue necesario extender y distribuir la Red Acelerográfica, en zonas de terreno duro (en el poniente de la ciudad), en áreas de terreno de transición y en zonas donde antiguamente se ubicaban los lagos de Texcoco y de Xochimilco, con suelos arcillosos blandos. Para ello la Fundación Javier Barros Sierra instaló 40 acelerógrafos y la Fundación ICA otras 30 estaciones acelerógrafos de superficie y 2 acelerógrafos subterráneos.

A finales de 1989, en la ciudad de México, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) inició la instalación de 10 estaciones acelerográficas con sensores de superficie y de pozo profundo.

A la fecha (noviembre de 2001), esta red de 108 aparatos de medición ha permitido conocer con mayor precisión la distribución de algunos parámetros de movimientos sísmicos: aceleraciones, velocidades, desplazamientos máximos, y la energía que afecta a las construcciones, y ha aportado datos, que los investigadores utilizan en nu-

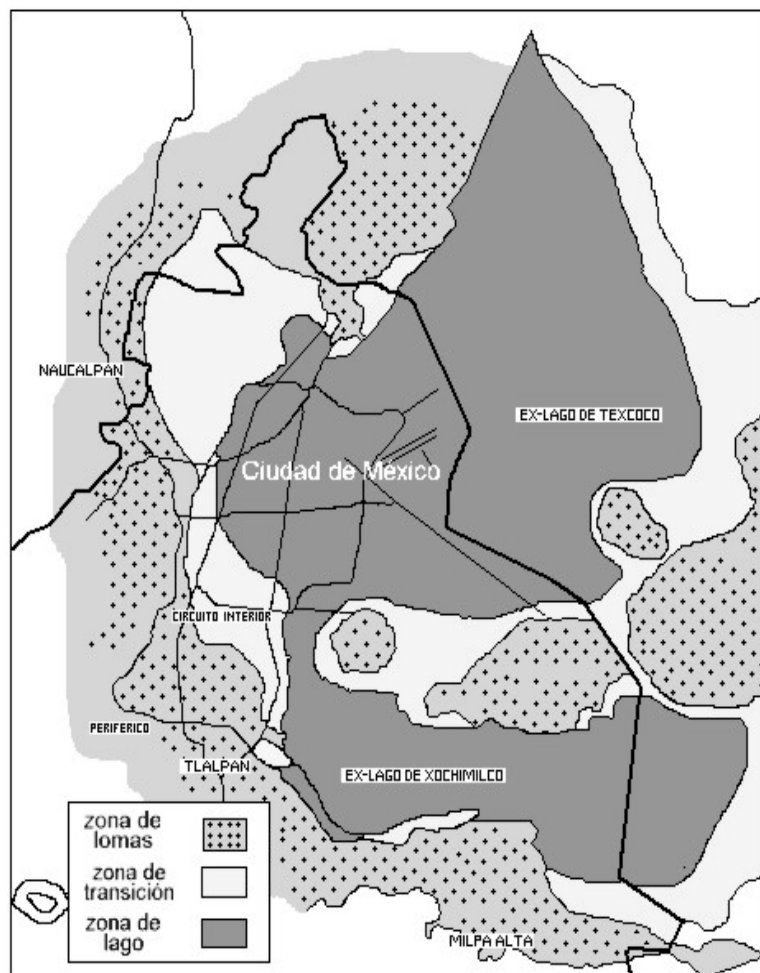


Figura 41. Mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de México

merosos estudios.

Adicionalmente, con la participación de diversas instituciones y centros de investigación algunos edificios y puentes del país fueron instrumentados para registrar y estudiar su comportamiento ante sismos de diferentes magnitudes, determinar las variaciones de sus propiedades dinámicas, estimar sus posibles pérdidas de rigidez de los elementos estructurales y los efectos de interacción suelo-estructura. Esto con el objetivo de contribuir a mejorar los criterios de análisis, diseño y evaluación estructural. La información derivada de registros sísmicos obtenidos en edificios instrumentados permite a inge-



Figura 42. Rehabilitación sísmica en un edificio de la Ciudad de México. Para estudiar su comportamiento se instalaron acelerógrafos en sus diferentes niveles

Figura 44.

En el puente vehicular y peatonal *Impulsora* se colocaron celdas de carga en pilotes, celdas de presión entre el suelo y la losa de cajón de cimentación, piezómetros en el subsuelo a diferente profundidad, bancos de asentamiento y acelerógrafos en el cajón de cimentación y campo libre

Proyecto conjunto CENAPRED-Instituto de Ingeniería, UNAM



Figura 43. El edificio «La Sosa» del Instituto Mexicano del Petróleo IMP se instrumentó con 4 acelerógrafos modelo SMAC-MD y sensores en la Base y Azotea del edificio, así como un sensor de pozo a 80 m.

nieros e investigadores mejorar las normas de diseño contenidas en el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, en cada una de las zonas, de acuerdo con su riesgo sísmico específico.

Actualmente, el número de edificios y puentes instrumentados en el país no excede de 25.

Con el objetivo de organizar y disseminar toda esta información sobre instrumentación y registros de movimientos fuertes, en 1992 varias instituciones, que operan redes de acelerógrafos y procesan datos, establecieron un acuerdo para comenzar de manera coordinada la creación de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes. En 1999 contaba ya con 13,545 registros de aceleración.



Además de la red acelerográfica en la ciudad de México, existen redes en diferentes partes del país, principalmente en la zona de subducción a lo largo de las costas del Pacífico. El Instituto de Ingeniería de la UNAM, opera una red de acelerógrafos en Michoacán, Guerrero y Oaxaca, principalmente. La Red Interuniversitaria de Instrumentación Sísmica (IRIS), la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), la Red del Noroeste de México (RESNOR) del CICESE de Baja California y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuentan también con redes locales.

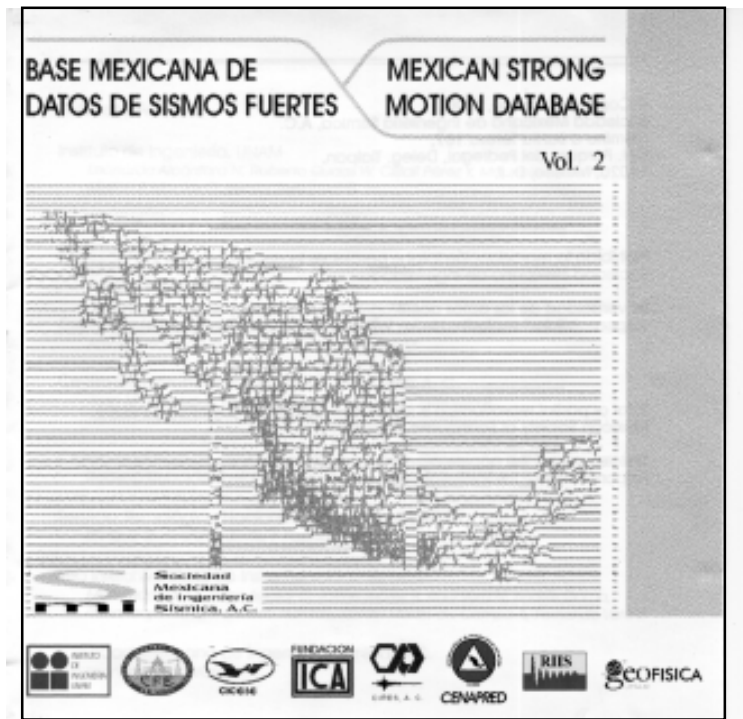


Figura 45. Base Mexicana de Sismos Fuertes, edición 2000

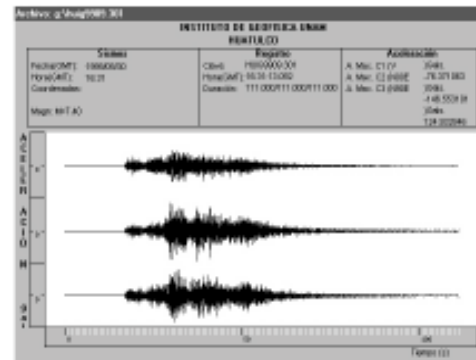


Figura 46. Registro sismografico del sismo de Oaxaca del 30 de septiembre de 1999 por las estaciones del SSN, UNAM



Figura 47. Sismo en Oaxaca, México, el 30 de septiembre de 1999

Sistema de Alerta Sísmica

En la ciudad de México opera desde hace cerca de diez años un Sistema de Alerta Sísmica, desarrollado por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra que es prácticamente único en el mundo. Se basa en el hecho de que los sismos que más afectan a la ciudad ocurren a gran distancia de la misma, en la costa del océano Pacífico, por lo que las ondas que producen la vibra-

ción del terreno y los daños, tardan más de un minuto en llegar a la ciudad, lo que permite instalar una red de instrumentos a lo largo de la costa, que detecte el sismo en el momento en que ocurre y envíe una señal de radio a una estación de control en la ciudad de México, que puede disparar una señal de alerta con cerca de 50 segundos de anticipación a que comience la sacudida en la ciudad. El sistema ha sido utilizado en planteles escolares y en algunos edificios públicos, donde se espera que la población desaloje rápida y ordenadamente los edificios y se reúna en las zonas de seguridad al escuchar la señal de alarma.

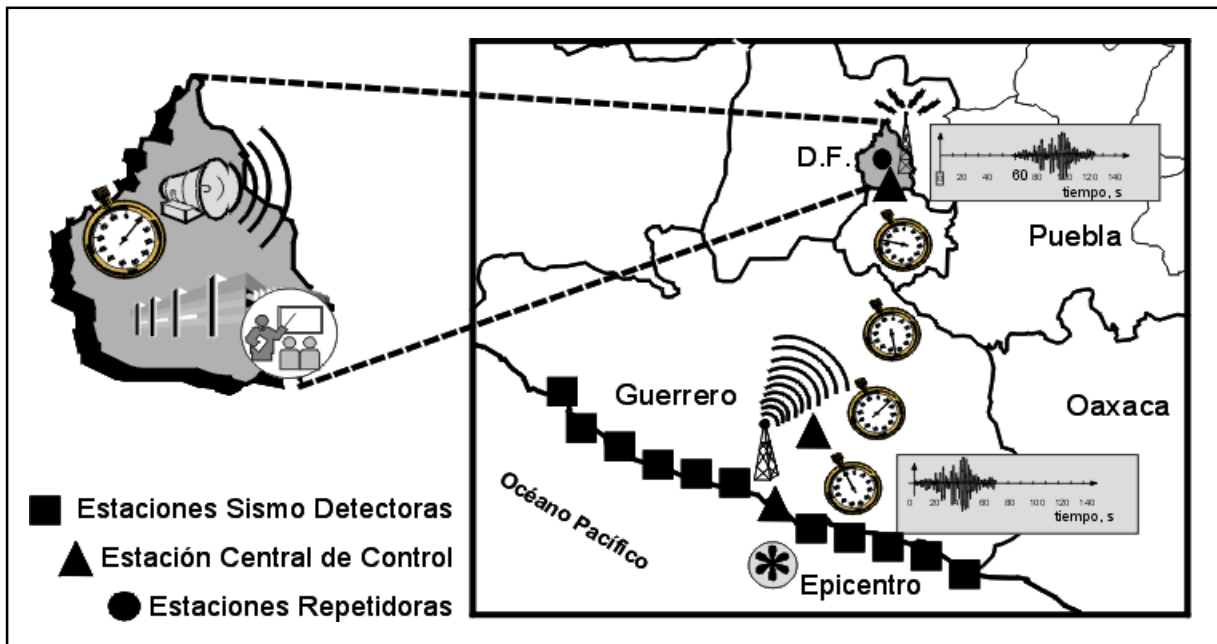


Figura 48. Con el propósito de contribuir en la mitigación de los efectos desastrosos en la Ciudad de México que lleguen a causar los sismos fuertes provenientes de la «Brecha de Guerrero», el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), A.C., creado en 1986, bajo el auspicio de la Fundación Javier Barros Sierra, obtuvo el apoyo económico de las autoridades del Gobierno de la Ciudad de México para diseñar y construir el Sistema de Alerta Sísmica (SAS)

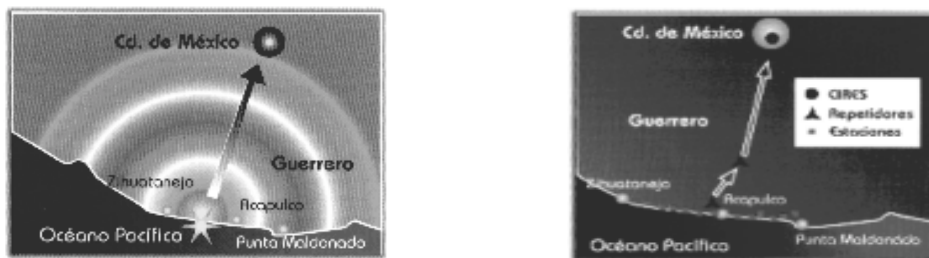


Figura 49. Sistema de Alerta Sísmica. www.cires.org.mx

Red de observación sísmica del CENAPRED

Esta red consta de 17 estaciones autónomas de registro y un puesto central de recepción y procesamiento de la información, ubicado en las instalaciones del CENAPRED. La red está dividida en dos subredes.

Subred Acapulco-México

Consta de cinco estaciones acelerográficas, uniformemente distribuidas entre Acapulco y México. El propósito fundamental de este sistema es el registro de los temblores en la zona epicentral de Guerrero, y el estudio de las características de propagación de las ondas sísmicas en su trayectoria hacia la ciudad de México.

Los instrumentos de medición son acelerógrafos digitales triaxiales de alta resolución, con registro local. Algunos de estos equipos están interconectados con el puesto central de registro en el CENAPRED, vía telefónica. Los equipos están instalados dentro de una caseta metálica y operan continuamente utilizando paneles con celdas solares y baterías, además cuenta con un sistema interno de posicionamiento global (GPS) que permite obtener un registro preciso del tiempo.

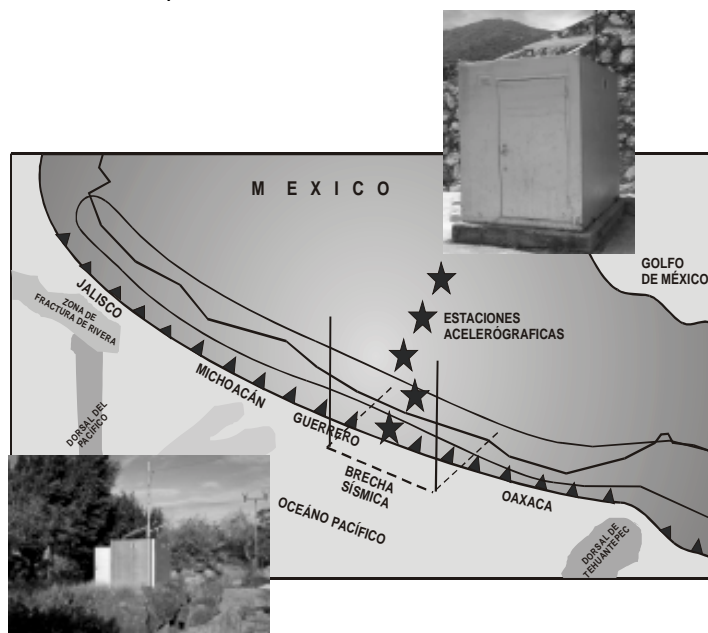


Figura 50. Estaciones acelerográficas de la Subred Acapulco-México

Subred de la Ciudad de México

Esta subred consta de 12 estaciones. La distribución de estaciones de esta subred se hizo con base en la zonificación geotécnica de la ciudad, acorde con el tipo de terreno por estudiar.

Los objetivos principales de este sistema son el estudio de las características de las ondas sísmicas incidentes en el valle de México provenientes de la costa del Pacífico, y el comportamiento de terrenos diversos bajo excitación sísmica.



Figura 51. Estación acelerográfica en el CENAPRED

Por esta razón, en la mayoría de las estaciones se instalaron no sólo acelerómetros en la superficie, sino también sensores triaxiales en pozos profundos a diferentes cotas. Los sensores de pozo menos profundos se localizaron a la mitad del primer estrato blando de arcilla; los sensores más profundos, a la mitad del estrato duro. Las estaciones están comunicadas al puesto central de registro mediante enlaces de telemetría por radio. El suministro de energía eléctrica se obtiene de la red comercial. Posteriormente, se incorporó a la red un edificio rehabilitado que fue instrumentado con 7 acelerógrafos, así como el puente vehicular *Impulsora*.

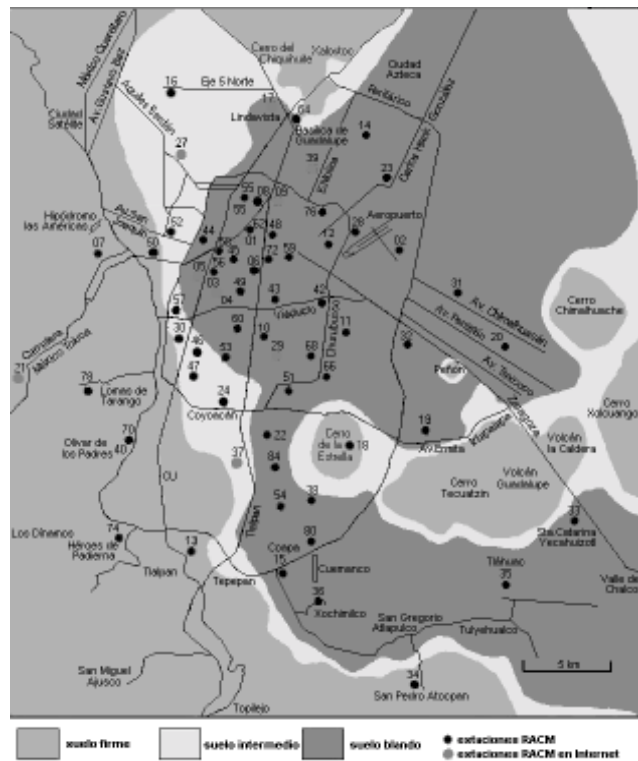


Figura 52. Estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México



Figura 53. Proyecto de instalación de una Red Sísmica Mexicana

Con el apoyo de la Coordinación General de Protección Civil, el CENAPRED promueve la modernización de los sistemas actuales de observación sísmica y la integración de los mismos en una Red Sísmica Mexicana.

Conclusiones

En el contexto de la sismicidad mundial México tiene, en buena parte de su territorio, un alto nivel de exposición al peligro sísmico por encontrarse asociado al Cinturón de Fuego del Pacífico, una de las más importantes zonas generadoras de temblores. Particularmente, la gran mayoría de los sismos mexicanos de gran magnitud tiene su origen relativamente cerca de la superficie (profundidades focales menores de 40 km) y frecuentemente sus epicentros se ubican cerca de áreas densamente pobladas.

Es claro que la ocurrencia de este fenómeno natural, al igual que otros, no se origina por experimentos científicos o nucleares, variaciones climáticas, etc. ni es controlable a través de medios artificiales. Tampoco se cuenta actualmente con un procedimiento confiable para predecir su ocurrencia, indicando con suficiente anticipación la ubicación del epicentro, la magnitud y tiempo de origen.

Se debe considerar que la sismicidad es un proceso propio de la dinámica de nuestro planeta, presente desde épocas remotas, y que su estudio continuo nos permitirá estimar escenarios futuros y plantear estrategias para disminuir sostenidamente los efectos catastróficos.

De acuerdo con la experiencia a nivel mundial, la herramienta más útil para disminuir el riesgo por sismo es la correcta utilización de las normas de construcción sismorresistente. Paralelamente, el desarrollo constante de la cultura de protección civil tendrá como resultado una sociedad orientada hacia la acción preventiva, corresponsable en un sentido amplio y, en consecuencia, menos vulnerable.

Glosario

Acelerógrafo. Instrumento para medir aceleraciones del terreno en función del tiempo. Usualmente registra movimientos producidos por temblores fuertes o con epicentros cercanos. Al registro producido se le conoce como acelerograma. Los acelerógrafos también se colocan en estructuras para analizar su comportamiento en diferentes niveles de la construcción (cimientos, pisos intermedios, azotea).

Amplitud (de onda). Altura máxima de la cresta o del valle de una onda a partir del valor cero o línea base (aquella que corresponde a nula excitación sísmica).

Atenuación. Disminución de la amplitud de las ondas sísmicas a medida que aumenta la distancia a partir de la fuente. Se debe esencialmente a la fricción interna de los materiales terrestres sujetos al paso de las ondas, a la distribución de la energía sísmica en un volumen cada vez mayor, a partir de la fuente, y a refracciones y reflexiones múltiples en diversas capas de la litósfera.

Brecha sísmica. Segmento o área de contacto entre placas, particularmente de tipo de subducción (p.ej. costa occidental de México) o de movimiento lateral (falla de San Andrés), en el que no se ha presentado un sismo de gran magnitud (mayor o igual a 7) en al menos 30 años. Actualmente, la brecha sísmica más importante en México es la correspondiente a la costa de Guerrero, entre Zihuatanejo y Acapulco.

Caída de esfuerzos. Disminución repentina de los esfuerzos presentes en el plano de contacto entre dos placas tectónicas o bloques de una falla cualesquiera, como consecuencia de la ocurrencia de un temblor.

Corteza terrestre. Capa rocosa externa de la Tierra. Su espesor varía entre 10 y 70 km.

Efecto de sitio. Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida, con respecto al entorno regional. En otras palabras, podría decirse que el efecto de sitio es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas sin que haya una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica con la distancia. Un claro ejemplo de lo anterior se tiene en la zona de lago de la ciudad de México.

Enjambre (de terremotos). Serie de terremotos con epicentros en un área relativamente reducida, sin que uno de ellos llegue a tener una magnitud mucho mayor que lo distinga claramente del resto. Puede durar unos cuantos días o hasta varias semanas o meses. Pueden ser sentidos por pobladores cercanos sin que lleguen a representar un nivel alto de peligro.

Epicentro. Punto en la superficie de la Tierra resultado de proyectar sobre ésta el hipocentro de un terremoto. Se encuentran usualmente en un mapa, señalando el lugar justo sobre el origen del movimiento sísmico.

Esfuerzo. Medida de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo. En Física se expresa como fuerza por unidad de área.

Falla. Superficie de ruptura en rocas a lo largo de la cual ha habido movimiento relativo, es decir, un bloque respecto del otro. Se habla particularmente de falla activa cuando en ella se han localizado focos de sismos o bien, se tienen evidencias de que en tiempos históricos han habido desplazamientos. El desplazamiento total puede variar de centímetros a kilómetros dependiendo del tiempo durante el cual la falla se ha mantenido activa (años o hasta miles y millones de años). Usualmente, durante un temblor grande, los desplazamientos típicos son de uno o dos metros.

Foco. Punto de origen del sismo, en el interior de la Tierra. Lugar donde empieza la ruptura que se extiende formando un plano de falla. También nombrado como hipocentro.

Frecuencia (de una onda). Número de ciclos por segundo. Se expresa en unidades llamadas Hertz. La frecuencia es el inverso del periodo.

GPS (Sistema de Posicionamiento Global). Iniciales correspondientes a Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento

Global) que, con base en señales recibidas de satélites, permite determinar con gran precisión la ubicación de puntos en la superficie terrestre, diferencias de altura, etc. Utilizando sistemas GPS de alta resolución es posible determinar desplazamientos entre placas tectónicas, estructuras artificiales, etc.

Intensidad (sísmica). Número que se refiere a los efectos de las ondas sísmicas en las construcciones, en el terreno natural y en el comportamiento o actividades del hombre. Los grados de intensidad sísmica, expresados con números romanos del I al XII, correspondientes a diversas localidades se asignan con base en la escala de Mercalli. Contrasta con el término magnitud que se refiere a la energía total liberada por el sismo.

Isosistas. Líneas que separan áreas con distintos grados de intensidad sísmica.

Litósfera. Cubierta rígida de la Tierra. Está constituida por la corteza y la parte superior del manto; su espesor promedio no excede 100 km. Se encuentra dividida en grandes porciones móviles llamadas placas tectónicas.

Longitud de onda. Distancia entre dos puntos o fases sucesivos de una onda, por ejemplo crestas o valles.

Magnitud (de un sismo). Valor relacionado con la cantidad de energía liberada por el sismo. Dicho valor no depende, como la intensidad, de la presencia de pobladores que observen y describan los múltiples efectos del sismo en una localidad dada. Para determinar la magnitud se utilizan, necesariamente, uno o varios registros de sismógrafos y una escala estrictamente cuantitativa, sin límites superior ni inferior. Una de las escalas más conocidas es la de Richter, aunque en la actualidad frecuentemente se utilizan otras como la de ondas superficiales (M_s) o de momento sísmico (M_w).

Manto terrestre. Porción intermedia de la Tierra, cubierta por la corteza y que des-

cansa sobre el núcleo. Su espesor es de unos 2,850 kilómetros; está compuesto por rocas densas y dividido en varias capas concéntricas.

Mapa de intensidades sísmicas. Mapa que muestra la distribución geográfica de los efectos de un sismo de magnitud considerable, generado por un sistema automático, poco después de ocurrido el evento. Los efectos pueden estar representados por valores de aceleración del terreno (intensidad instrumental) que permiten identificar las zonas más afectadas y optimizar la respuesta por parte de los cuerpos de auxilio y la atención de la emergencia.

Núcleo terrestre. Parte central de la Tierra rodeada por el manto, compuesta de hierro y silicatos. Con base en el estudio de ondas sísmicas, se descubrió que consta de dos porciones concéntricas: una externa, que se comporta como un fluido, y una interna que es sólida.

Ondas sísmicas. Perturbaciones elásticas de los materiales terrestres. Se pueden clasificar en ondas de cuerpo (P y S) y superficiales (Love y Rayleigh). Las primeras se transmiten en el interior de la tierra, en todas direcciones. Las ondas S no se propagan en medios líquidos. Las ondas superficiales muestran su máxima amplitud en la interfase aire-tierra.

Periodo (de una onda). Intervalo de tiempo entre, por ejemplo, dos crestas o valles sucesivos. El período es el inverso de la frecuencia.

Placas (tectónicas). Porciones de la litósfera terrestre, de grandes dimensiones y espesor no mayor a 100 km, que también se caracterizan por su movilidad debido a fuerzas ejercidas desde el manto terrestre.

Plano de falla. Superficie de contacto entre dos bloques rocosos con movimiento entre sí.

Predicción (de terremotos). Determinación del lugar, fecha y magnitud de un terremoto, junto con los respectivos rangos de error. Hasta ahora no se cuenta con un procedimiento que defina con seguridad estos tres parámetros.

Premonitores. Terremotos de magnitud relativamente reducida que anteceden a un sismo principal o de gran magnitud.

Red instrumental. Grupo de instrumentos de registro sísmico distribuidos en un área determinada y que funcionan bajo una base de tiempo común. Se habla de una red local cuando ésta cubre un área de pocos kilómetros cuadrados, usualmente para monitorear objetivos específicos (p. ej. presas, zonas con enjambres sísmicos, etc.) Por otra parte, una red regional permite estu-

diar grandes extensiones territoriales como es el caso de aquella utilizada por el Servicio Sismológico Nacional.

Réplicas. Sismos menores que siguen a uno de magnitud grande o moderada. Se concentran en un volumen restringido de la litósfera y decrecen en tamaño y número a medida que pasa el tiempo.

Riesgo Sísmico. Producto de tres factores: El valor de los bienes expuestos (C), tales como vidas humanas, edificios, carreteras, puentes, tuberías, etc; la vulnerabilidad (V), que es un indicador de la susceptibilidad a sufrir daño, y el peligro (P) que es la probabilidad de que ocurra sismo en un lugar determinado de cierta intensidad un hecho potencialmente dañino; así $R = C \times V \times P$. El grado de preparación de una sociedad determina la disminución de la vulnerabilidad y, en consecuencia, del riesgo.

Sismo (Terremoto o temblor). Vibraciones de la Tierra ocasionadas por la propagación, en el interior o en la superficie de ésta, de varios tipos de ondas elásticas. La energía que da origen a estas ondas proviene de una fuente sísmica. Comúnmente se habla de que un sismo tiene carácter oscilatorio o trepidatorio. Ambos términos se derivan de la percepción que ciertas personas tienen del movimiento del terreno y no de un parámetro instrumental. El terreno, ante el paso de las ondas sísmicas, no se mueve exclusivamente en dirección horizontal (oscilatorio) o vertical (trepidatorio) sino más bien de una manera compleja por lo que dichos términos no son adecuados para caracterizar el movimiento del terreno.

Sismógrafo. Instrumento de alta sensibilidad para registrar los movimientos del terreno ocasionados por la propagación de las ondas sísmicas. Al registro producido se le conoce como sismograma, necesario para el cálculo de la magnitud (tamaño) de un sismo.

Sensor sísmico. Sistema mecánico o electromecánico, basado en un péndulo suspendido, que es excitado por el paso de las ondas sísmicas. Es utilizado en sismógrafos y acelerógrafos y se les llama sismómetros y acelerómetros, respectivamente.

Sismoscopio. Sismógrafo elemental que sólo deja constancia de un movimiento del terreno, relativamente intenso, sin que el registro tenga marcas de tiempo.

Tectónica de placas. Teoría que explica la dinámica de grandes porciones de la litósfera y su relación con la ocurrencia de sismos, volcanes y deformaciones corticales.

Tsunami (maremoto). Ola con altura y penetración tierra adentro superiores a las ordinarias, generalmente causada por movimientos del suelo oceánico en sentido vertical, asociado a la

ocurrencia de un terremoto de gran magnitud con epicentro en una región oceánica.

Zonificación sísmica. Clasificación de un territorio en función de diferentes niveles de peligro derivados de la actividad sísmica. La distribución geográfica de las fuentes sísmicas, sus rangos de profundidad y de magnitud así como la frecuencia de ocurrencia determinan esencialmente un cierto nivel de peligro. Una zonificación sísmica es empleada para orientar criterios de construcción sismorresistente, aunque no indica áreas con efectos de sitio. Cuando una clasificación de este tipo se lleva a cabo en un área específica, por ejemplo un valle aluvial o área urbana, se le conoce como microzonificación sísmica. En ese caso sí se tiene una caracterización del efecto de sitio.

Bibliografía

BOLT, Bruce A. Terremotos. Ediciones ORBIS, S.A. 1986.

BULLEN, K. An Introduction to the Theory of Seismology. Cambridge University Press. 1963.

Du BOIS S.M. and SMITH, A.W. The 1887 earthquake in San Bernardino Valley, Sonora: Historic Accounts and intensity patterns in Arizona. Special Paper No. 3. The University of Arizona, 1980.

PACHECO, J. And SYKES L. Seismic Moment Catalog of Large Shallow Earthquakes 1900-1989. Bull. Seism. Soc. Am. Vol.82, No. 3, 1992. pp 1306-1349.

RICHTER, C.F. Elementary Seismology. W.H. Freeman and Company. 1958

Servicio Sismológico Nacional UNAM. Catálogo Cien Años de Sismicidad en México. 2000.

Scientific American. Continents Adrift and Continents Aground. W. H. Freeman and Co. 1976.

SINGH, S.K., ASTIZ L. AND HAVSKOV, J. Seismic Gaps and Recurrence Periods of Large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone: A reexamination. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 71, No. 3, 1981. pp 827-843.

SINGH, S.K. Y ORDAZ, M. Sismicidad y Movimientos Fuertes en México: Una Visión Actual. CENAPRED, 1994.

TURCOTTE D. AND SCHUBERT G. Geodynamics. Application of Continuum Physics to Geological Problems. John Wiley & Sons. 1992.

"Fascículo Sismos"

Se terminó de imprimir en diciembre de 2001, en los Talleres Gráficos de México, Av. Canal del Norte N° 80, Col. Felipe Pescador, México, D.F. La edición en papel bond de 90 grs. en interiores y portada en cartulina sulfatada de 14 puntos, consta de 10,000 ejemplares más sobrantes para reposición.



**Coordinación General de Protección Civil
Centro Nacional de Prevención de Desastres**

Av. Delfín Madrigal No.665,
Col. Pedregal de Sto. Domingo,
Deleg. Coyoacán,
México D.F., C.P. 04360

www.cenapred.unam.mx