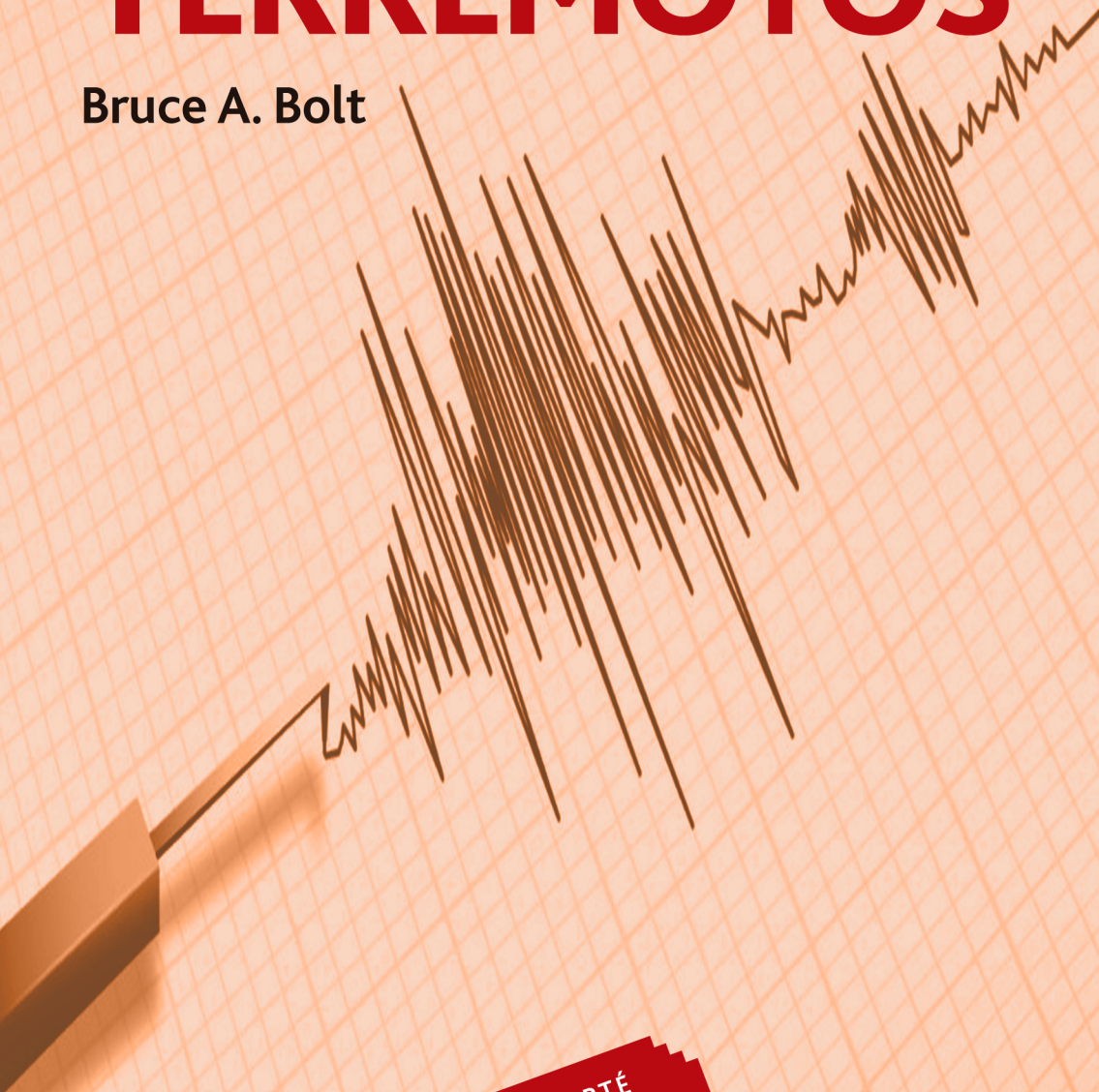


Serie Reverté ciencias y sociedad

TERREMOTOS

Bruce A. Bolt

A stylized illustration of a seismograph. A horizontal line extends from the left, ending in a vertical pen arm. The pen arm is tilted, and a series of sharp, jagged lines representing seismic waves are drawn from its tip, extending diagonally upwards and to the right. The background is a light orange grid.

EDITORIAL REVERTÉ

Terremotos

Bruce A. Bolt

University of California, Berkeley



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

Título de la obra original:

Earthquakes

A PRIMER

Edición original en lengua inglesa publicada por:

W. H. Freeman and Company, New York, U.S.A.

Copyright© W. H. Freeman and Company

Edición en español

© EDITORIAL REVERTÉ, S. A., 1981

Edición en papel:

ISBN: 978-84-291-4602-8

Edición ebook (PDF):

ISBN 978-84-291-9083-0

Versión española por:

Enrique Banda Tarradellas

Elisa Bufoñ Peiró

Dolores Muñoz Sobrino

Emma Suriñach Cornet

Bajo la dirección de:

Agustín Udías Vallina

Cátedra de Geofísica, Universidad Complutense de Madrid

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Dedicado a:

Gillian

Robert

Helen

y

Margaret

que se criaron en un país de terremotos.

Índice analítico

CAPÍTULO 1	
Dónde ocurren los terremotos	1
Los terremotos en el pasado	1
Observatorios para estudiar terremotos	3
El mosaico terrestre de terremotos	4
Profundidades de los terremotos	8
Modelos tectónicos y zonas de tranquilidad en zonas sísmicas	11
CAPÍTULO 2	
Qué sentimos en un terremoto	17
El terremoto de San Francisco de 1906	17
El terremoto del Viernes Santo de 1964 en Alaska	23
Tipos de ondas sísmicas en un terremoto	25
CAPÍTULO 3	
Fallas en la Tierra	33
Cómo reconocer una falla geológica	33
El terremoto de Mino-Owari (Japón) de 1891	38
El gran terremoto de Guatemala de 1976	40
Deslizamiento y relleno de fallas	45
CAPÍTULO 4	
Las causas de los terremotos	51
Tipos de terremotos	51
Refuerzo lento de energía	55

Rebote elástico	57
Cambios en las rocas	62
¿Qué produce las ondas sísmicas?	63
CAPÍTULO 5	
Terremotos, volcanes y maremotos	69
Erupciones en Hawaii	69
Maremotos o tsunamis	75
Alertas de maremoto	81
La tragedia de Crescent City, California, 1964	82
La Atlántida y Santorin	83
CAPÍTULO 6	
Medición de terremotos	87
Sismógrafos sensibles y de movimientos fuertes	87
Cómo comprender los sismogramas	91
Cómo localizar un terremoto	94
CAPÍTULO 7	
El tamaño de un terremoto	99
Intensidad de la sacudida	99
Cómo calcular la magnitud sísmica	104
Energía de los terremotos	108
Aceleración de la sacudida del suelo	108
Sacudida vertical	112
CAPÍTULO 8	
Excitación de terremotos por agua	117
El efecto del agua en rocas debajo de la superficie	117
Seguridad en presas y terremotos	121
El terremoto de Oroville, California, de 1975	125
Lunamotos	130
CAPÍTULO 9	
Sucesos que preceden a un terremoto	135
Esfuerzos hacia la predicción de terremotos	135
Indicios para reconocer terremotos inminentes	142
Terremotos y predicción en China	151
CAPÍTULO 10	
Autoprotección en un terremoto	157
Tipos de riesgos	157

<i>Indice analítico</i>	IX
Medidas para reducir peligros en casas	167
Seguro de terremotos	169
CAPÍTULO 11	
Estudios ambientales para diseños resistentes a terremotos	177
Mejoras en la planificación	177
El terremoto de Rumanía del 4 de marzo de 1977	182
Obras de ingeniería importantes y riesgo sísmico	185
Seguridad en hospitales y escuelas	188
APÉNDICE A	
Terremotos en América Central y del Sur	195
Distribución de terremotos	195
México y América Central	197
La región del Caribe	202
Los países andinos	204
APÉNDICE B	
Terremotos en España	207
La región sísmica desde las islas Azores al Mediterráneo	207
Terremotos destructores	209
Terremotos medianos y pequeños	213
APÉNDICE C	
Terremotos del mundo	217
APÉNDICE D	
Escala de intensidad Mercalli modificada abreviada	223
Escala de intensidad Mercalli modificada (versión de 1956)	226
APÉNDICE E	
Escala de intensidad sísmica MSK	228
Efectos que definen los grados de intensidad MSK	228
Tipos de construcciones	228
Descripción de los grados de intensidad MSK	229
APÉNDICE F	
Instrumentación sísmica de grandes estructuras	233
Instrumentación para movimientos fuertes	233
La red sísmica local	235
APÉNDICE G	
Cálculo sencillo de las magnitudes y de la energía de un terremoto	239

APÉNDICE H

Movimiento ondulatorio	243
-------------------------------	-----

APÉNDICE I

Escala de tiempo geológico	245
-----------------------------------	-----

Cuestionario sobre terremotos	247
--------------------------------------	-----

Respuestas al cuestionario	252
----------------------------	-----

Glosario	253
-----------------	-----

Bibliografía	259
---------------------	-----

Índice alfabético	263
--------------------------	-----

Prólogo a la edición española

Como dice el Profesor Bolt en su prólogo, gran parte del primer borrador de este libro se escribió durante su estancia en Barcelona en el verano de 1976, y ya desde entonces surgió la idea de su traducción al castellano. Esta obra responde a una verdadera necesidad de proporcionar al público en general una información al mismo tiempo concisa y completa sobre el fenómeno de los terremotos, sus causas, efectos, consecuencias materiales y sociales, etc., enfocados desde el punto de vista de los últimos adelantos de la sismología. Creo que el autor, director durante 15 años del Observatorio Sismológico de la Universidad de California, Berkeley, ha sabido conjugar la difícil tarea de presentar una base sólida de conocimientos técnicos y al mismo tiempo hacer su lectura amena y asequible.

La falta de obras de este tipo en español y la necesidad de difundir estos conocimientos entre el público español y latinoamericano, este último tan cercano a la trágica experiencia de los grandes terremotos, nos animó a reali-

zar esta traducción. No ha sido tarea fácil llevarla a cabo. Hemos procurado buscar la mejor equivalencia para los términos técnicos, muchos de ellos todavía no muy usados en nuestra lengua. Para adaptar el libro a las necesidades de su nuevo público hemos añadido dos apéndices sobre terremotos en España y en América Central y del Sur.

Queremos agradecer a todos los que han intervenido en la traducción, a los Drs. Julio Mezcuca y Alfonso López Arroyo, del Instituto Geográfico Nacional, su trabajo de revisión y a la Editorial Reverté S.A., su interés en esta obra.

Agustín Udías
Madrid, Marzo 1981

Prólogo

Aunque parezca extraño, sentí mi primer terremoto en 1959 en Coogee, un suburbio de Sydney en Australia, mientras estaba tranquilamente sentado en mi estudio. Lo que sorprende fue el lugar, ya que Australia no es una región sísmicamente muy activa, aunque es verdad que de tiempo en tiempo suceden terremotos en diversas zonas de este gran continente. En aquel día de septiembre de 1959, tuvo lugar un brusco movimiento de la corteza terrestre cerca de la Montaña Snowy, al sur de New South Wales, a unos 350 kilómetros de distancia de Sydney.

Desde esa fecha, he sentido muchos terremotos, bastantes en mi propia casa en Berkeley, California. Entre otros he experimentado las réplicas del terremoto de San Fernando, California, en 1971, y muchos terremotos del enjambre de cientos de miles que ocurrieron en Matsushiro, Japón, en 1967. He sentido las sacudidas de terremotos en Tokyo, en los Andes venezolanos, en Seattle, en Rumania y otros muchos lugares, aunque hasta la fecha no he experimentado ningún terremoto destructor.

La Sismología es una ciencia realmente internacional. Mientras daba los últimos toques al manuscrito de este libro, sucedía en Rumania un trágico terremoto. A las 9:30 de la noche, el día 4 de marzo de 1977, un terremoto de magnitud 7,2 se extendía desde su centro bajo las Montañas de los Cárpatos y causaba grandes daños en varias ciudades rumanas, entre ellas Bucarest y Ploesti. Probablemente fue el terremoto más fuerte que haya ocurrido en Europa Central en nuestro tiempo. Se sintió tan lejos como Roma y Moscú y los daños se extendieron hasta Yugoslavia y Bulgaria. Cerca de 2000 personas perdieron la vida. En un esfuerzo para aprender de este desastre, para poder reducir los riesgos de futuros terremotos, un grupo de sismólogos e ingenieros, entre los que me encontraba, salió de Estados Unidos para Rumania unos días después del terremoto. Algunas de las lecciones que aprendimos se incorporarán al conocimiento sismológico y se irán aplicando en el futuro.

La misión de un sismólogo es el estudio de todos los aspectos de los terremotos, sus causas, su ocurrencia y sus propiedades. El sismólogo también emplea las ondas sísmicas producidas por un terremoto para estudiar el interior de la Tierra, para la prospección de minerales y petróleo y para detectar explosiones nucleares subterráneas a grandes distancias. Por supuesto, profesiones tales como ingenieros, arquitectos, urbanistas e incluso políticos, tienen gran interés en los terremotos. Hasta entre el público en general los terremotos ejercen una extraña fascinación no sólo en países sísmicos como California, Nueva Zelanda y Japón donde son frecuentes, sino también en regiones donde nunca se han experimentado.

A pesar de la continua demanda por escuelas, universidades, profesionales y el público en general, de libros asequibles sobre terremotos, hay muy pocos que se puedan leer fácilmente por personas con curiosidad, pero con poco o ningún conocimiento sobre las ciencias de la Tierra. El fin de este libro es proporcionar una descripción corta, simple y moderna de nuestro conocimiento sobre los terremotos que sea de interés general para personas de varios países. He usado algunos de los estudios más interesantes de terremotos como ilustraciones y no requieren para su comprensión ningún conocimiento técnico o matemático especial. Naturalmente, en muchos casos me baso en mi propia experiencia de quince años como director de la Estación Sismográfica de la Universidad de California en Berkeley. Aunque en este Observatorio Sismológico se trabaja en investigaciones muy especializadas sobre terremotos, también tiene la importante responsabilidad de proporcionar detalles y datos sobre la sismicidad de California. Numerosas solicitudes de información sobre terremotos nos llegan cada semana, algunas por cartas, otras personalmente por visitantes. En particular, los estudiantes nos escriben pidiendo ayuda para sus proyectos escolares.

Después de acabar este libro, el lector será capaz de contestar muchas preguntas sobre las causas de los terremotos, dónde y cuándo suceden, y sobre qué medidas protectoras se pueden tomar contra ellos. Como ejemplo de estas preguntas, una lista de cuestiones viene dada al final del libro. Las res-

puestas a estas preguntas se encuentran a lo largo de este libro. Los términos técnicos más importantes están definidos en el glosario y una lista de lecturas se da en la bibliografía. Los apéndices proporcionan detalles útiles y más especializados de ciertos aspectos de la Sismología.

Un gran número de colegas y amigos me han proporcionado fotografías, referencias, ejemplos y críticas. A todos ellos mis más sinceras gracias. En particular quiero hacer constar mi agradecimiento al Dr. P. Byerly, Dr. D. Boore, Dr. L. Weiss, Dr. L. Drake, S.J., Dr. F. Wu, Dr. D. Tocher, y Mr. T. R. Monteath por material, o por leer y corregir partes del manuscrito y por sus interesantes sugerencias.

Gran parte del borrador de este libro lo escribí durante mi visita al Departamento de Física de la Tierra y del Cosmos, de la Universidad de Barcelona. Estoy muy agradecido al Prof. A. Udías, S.J., por su hospitalidad y comentarios. En el trabajo de preparar las figuras y tablas ayudaron Mr. R. Miller y Mr. R. McKenzie. Mrs. A. McClure y Mrs. L. Martin mecanografiaron y corrigieron el manuscrito. Finalmente, mi esposa la Dra. Beverly Bolt y mi hija Gillian ayudaron en la composición del índice de materias.

Bruce A. Bolt
Berkeley, California

Terremotos



El Dios Supremo del Templo de Kashima, Japón, manda al *daimojin* que incruste una gran piedra en la cabeza del *namazu* (siluro) del terremoto de Yedo (Tokyo) para escarmiento de otros terremotos. Cada uno de los *namazus* que están observando la escena representa un terremoto histórico. De izquierda a derecha los terremotos representados son los de Kwanto, Osaka, Kyushu, Echigo, Odawara y Sado.

"Dicen que la Tierra tenía fiebre y que tembló".

— SHAKESPEARE, *Macbeth*, II. 3.



Capítulo 1

Dónde ocurren los terremotos

Los terremotos en el pasado

Los terremotos pueden ser violentos y, hasta ahora, no se han podido predecir. A menudo sus convulsiones han dejado al hombre tan desamparado que siempre los ha temido. En muchos países las leyendas populares atribuían los terremotos a monstruos grotescos que estaban en la Tierra. Por ejemplo, en el antiguo folklore japonés, un gran siluro (namazu) yacía bajo la Tierra y al agitar su cuerpo producía los terremotos (ver la lámina de la cubierta). La actividad del namazu era controlada por un dios (daimyojin) que manejaba un gran mazo de piedra. Pero cuando el daimyojin se distraía, el namazu se movía y el suelo temblaba.

El primer tratamiento sistemático y no mítico de los terremotos viene de Grecia, cuya población experimentó los volcanes Egeos y los terremotos a lo largo del Mediterráneo, a veces acompañados de olas de "marea" (maremo-

tos). Algunos filósofos griegos dieron explicaciones mecánicas para estos acontecimientos naturales. Estrabón, por ejemplo, reparó en que los terremotos ocurrían más frecuentemente a lo largo de las costas que tierra adentro. El, al igual que Aristóteles, sugirió que los terremotos eran causados por vientos subterráneos que encendían los materiales combustibles del subsuelo.

A medida que se extendió el uso de la escritura los hombres empezaron a compilar descripciones de los terremotos graves. Las más antiguas son las descripciones chinas que datan de hace más de 3000 años. Se cree que este catálogo asombrosamente extenso documenta todos los terremotos entre moderados y grandes desde el año 780 a. C. hasta el presente. En Japón, el catálogo de terremotos destructores no es tan extenso, pero no tiene prácticamente lagunas desde aproximadamente el año 1600 d. C., y se dispone de listas menos fiables desde el año 416 d. C. Estos catálogos históricos son cruciales para nuestra comprensión de la relación entre los terremotos y los rasgos geológicos de nuestro planeta, y para la valoración del riesgo sísmico en grandes obras de ingeniería, tales como presas y reactores nucleares.

En el mundo occidental, hay una historia bien documentada de casi 17 siglos, correspondiente a la parte oriental del cinturón alpino, desde Grecia hasta Afganistán. Para épocas incluso más remotas, se pueden encontrar alusiones esporádicas a grandes terremotos en la región mediterránea en la Biblia y en los escritos árabes. Parece demostrado que la primera mención bíblica de un terremoto es la experiencia de Moisés en el Monte Sinaí. Referencias más definidas probablemente son la narración del colapso de las murallas de Jericó en torno al 1100 a. C. y quizás la de la destrucción de Sodoma y Gomorra. Los terremotos palestinos están asociados a las fallas geológicas de la fosa tectónica que va por el norte del Golfo de Eilat a través del Mar Muerto. Aunque en este siglo la fractura del valle del Jordán ha sido el emplazamiento de sólo unos pocos terremotos, entre pequeños y moderados, los estudios históricos indican que la totalidad del área sufre, en promedio, dos o tres terremotos destructores cada siglo*.

En las partes del mundo más recientemente habitadas, como son los Estados Unidos y el Canadá, las crónicas de los terremotos históricos son, naturalmente, más limitadas. Una de las primeras narraciones describe un terremoto que sacudió Massachusetts en 1638, que hizo caer las chimeneas de piedra al suelo. También, relatos algo más extensos, describen un gran terremoto canadiense en el área de los Tres Ríos, en una parte más baja del río San Lorenzo, el día 5 de febrero de 1663. En cuanto a California, contamos con descripciones anteriores a 1800 hechas por los Padres Franciscanos, que documentaron el desarrollo de las misiones españolas. Por eso sabemos que una serie de terremotos dañaron en 1800 la misión de San Juan Bautista, y que

* La actividad sísmica histórica ha sido frecuente cerca del monasterio de San Juan Bautista donde Jesús fue bautizado. Una gran sacudida local tuvo lugar el 23 de mayo de 1834.

1812 fue llamado “el año de los terremotos” debido a la gran cantidad de actividad sísmica que se sintió en ese año.

La investigación de terremotos ocurridos en un pasado lejano es un trabajo ingrato. Hay una anécdota del profesor George Louderback, geólogo de la Universidad de California en Berkeley, el cual tuvo gran interés en desenmarañar la historia de los terremotos del pasado en California. Los relatos históricos hablan de un terremoto en la mañana del 8 de diciembre de 1812 (un martes), que destruyó la Misión de San Juan de Capistrano, en el que murieron 40 indios que asistían a Misa. Louderback se preguntó: ¿por qué los indios estaban orando en martes? Determinó que aquel día era un día festivo, de forma que la asistencia a la iglesia era comprensible. Investigaciones posteriores mostraron, sin embargo, que aquél día en particular no se celebraba normalmente en Roma. ¿Por qué estaban entonces los indios en la iglesia en martes? Así pues, las investigaciones históricas conducen algunas veces a nuevos problemas.

A mediados del siglo XIX la documentación referente a California era bastante detallada. En el gran terremoto del 9 de enero de 1857, por ejemplo, se hicieron varias referencias independientes al enorme agrietamiento de la tierra en California Central, cerca del poblado de Fuerte Tejón. Este terremoto fue una de las primeras indicaciones de la ruptura de lo que ahora se denomina la falla de San Andreas. El temblor de Fuerte Tejón es el terremoto grande más reciente ocurrido en la parte sur de la falla de San Andreas.

Observatorios para estudiar terremotos

En los primeros años de este siglo fueron instaladas estaciones sismográficas en muchos puntos del mundo. En estas estaciones funcionan continuamente sismógrafos sensibles que registran pequeñas ondas de terremotos que han sido generadas en lugares lejanos. Por ejemplo, el terremoto de San Francisco de 1906 fue bien registrado en docenas de estaciones sismográficas en un gran número de países, incluyendo Japón, Italia y Alemania.*

La importancia de esta red mundial fue que la documentación sobre terremotos no quedase por más tiempo únicamente en informes subjetivos de efectos notados y vistos. Pronto se desarrolló un programa internacional de cooperación en el cual los informes de los terremotos podían ser intercambiados para ayudar a la exacta localización de los mismos. Por primera vez, aparecieron estadísticas de ocurrencia temporal de terremotos y su distribución geográfica, incluso en regiones no pobladas. Esta información se denomina la *sismicidad* de una región.

* En 1968, utilicé estos registros para calcular, con métodos modernos, la localización del punto de inicio del terremoto de 1906. ¡Fue solamente a pocos kilómetros del puente “Golden Gate” en la bahía de San Francisco!

En 1960, alrededor de 700 observatorios de terremotos estaban en funcionamiento en numerosos países, con una gran variedad de sismógrafos. La capacidad de localizar de modo uniforme terremotos de magnitud moderada en cualquier lugar de la superficie terrestre, fue subsecuentemente perfeccionada en gran manera por el establecimiento, por los Estados Unidos, de una red llamada la Red Estandarizada Mundial de Estaciones Sismográficas. En 1969, cerca de 120 de estas estaciones especiales fueron distribuidas en 60 países. En el mismo intervalo de tiempo, también en los países no participantes, se hizo un avance parecido en la tecnología de la observación de terremotos.

El mosaico terrestre de terremotos

A partir de las ondas registradas en diferentes observatorios sismográficos, es posible calcular la posición del centro de un terremoto. De esta manera se obtiene una representación uniforme de la distribución de terremotos alrededor del mundo que se muestra en la figura 1. Lo que se observa es fascinante. Claros cinturones de actividad sísmica separan grandes regiones oceánicas y continentales, de por sí casi desprovistas de centros de terremotos. Otras concentraciones de focos de terremotos pueden observarse en áreas oceánicas, por ejemplo, a lo largo del centro de los océanos Atlántico e Indico. Estos son los emplazamientos de gigantescas cordilleras submarinas denominadas dorsales centrooceánicas. Estas dorsales sísmicamente activas se juntan unas con otras; la dorsal centroíndica rodea Australia por debajo para conectar con otra —la dorsal del Pacífico Oriental, que se extiende al Este hacia América Central y el Golfo de California. La inestabilidad geológica presente en todo este sistema mundial de dorsales se hace evidente por las grandes cumbres montañosas y las profundas fosas tectónicas. Las erupciones volcánicas son frecuentes y los terremotos originados a lo largo de estas dorsales ocurren a menudo en “enjambres”, de tal manera que muchos cientos de sacudidas se concentran en una pequeña área y en un corto tiempo.

Densas concentraciones de centros de terremotos coinciden también con arcos de islas perfectamente simétricos como los del Pacífico y los del Este del Caribe (figura 1). Uno de los mejores ejemplos de estas cadenas de islas es el arco de las islas Aleutianas en forma de media luna, que se extiende hacia el oeste desde Alaska al arco de Kamchatka. Las islas del Japón forman también un arco que se extiende hacia el sur desde la parte oriental de la URSS hasta el arco de las Marianas. Desde Indonesia hacia el sur del Pacífico, un gran número de arcos de isla activos rodea Australia como una “guirnalda” con la fosa de Tonga-Kermadec como su borde oriental.

Por el otro lado del Pacífico, toda la costa de América Central y del Sur es sacudida frecuentemente por terremotos grandes y pequeños. Un alto tributo en vidas humanas se ha pagado a consecuencia de los más grandes. La parte oriental de América del Sur, como contraste, está casi enteramente libre de terremotos, y puede ser citada como un buen ejemplo de país asís-

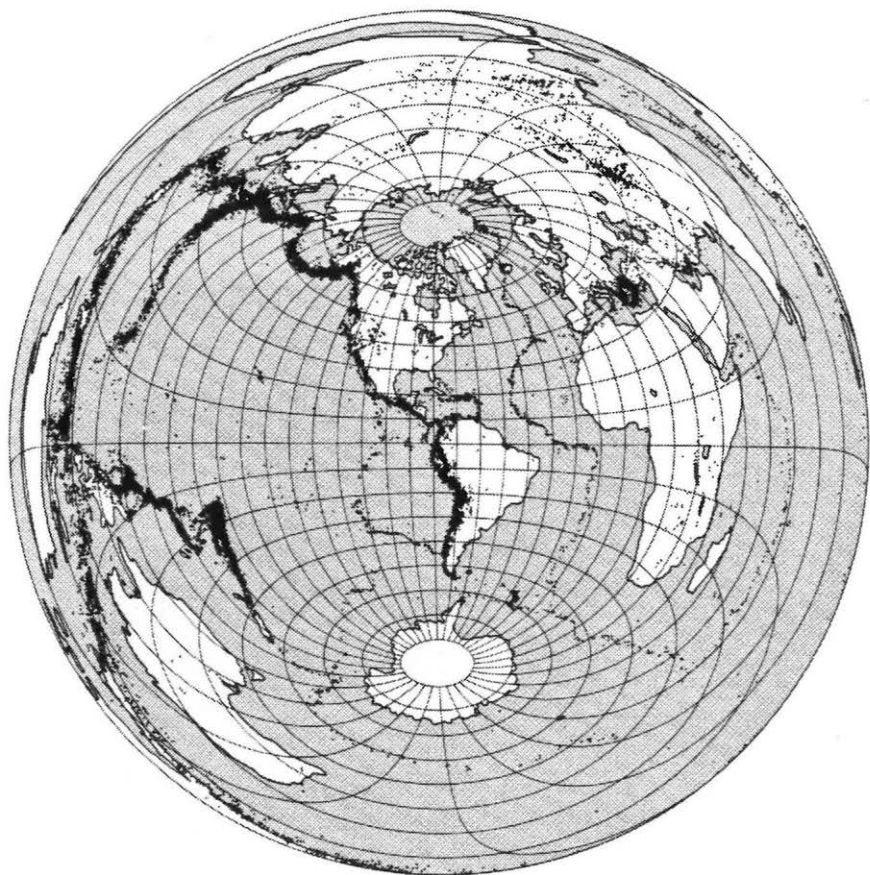


Figura 1. Sismicidad mundial. Están representados los epicentros de los terremotos de magnitud mayor o igual a 4,5 ocurridos entre 1963 y 1973. (Cortesía del Centro Nacional de Datos Geofísicos, NOAA.)

mico. Otras áreas continentales sísmicamente tranquilas pueden verse en la figura 1. Los terremotos casi nunca ocurren en las grandes áreas Norte y Central de Canadá, muchas de Siberia, oeste de África, o en grandes partes de Australia. Sin embargo, nótese la larga zona *trans-asiática* de alta sismicidad, que va aproximadamente de este a oeste desde Birmania*, a través de las montañas del Himalaya y Asia Central, hasta el Cáucaso y el Mediterráneo.

* El 8 de julio de 1975 un violento terremoto causó serios daños a muchos templos y pagodas de Pagan en Birmania. Inscripciones antiguas se refieren a restauraciones después de terremotos anteriores.

En Europa la actividad sísmica está ampliamente extendida. Al sur, Turquía, Grecia, Yugoslavia, Italia, España y Portugal están afectados por ella, y gran número de personas han muerto en desastres a lo largo de los años. Un terremoto del sudoeste de la Península Ibérica ocurrido el 1 de noviembre de 1755, produjo un gran maremoto, que causó, él sólo, muchas de las

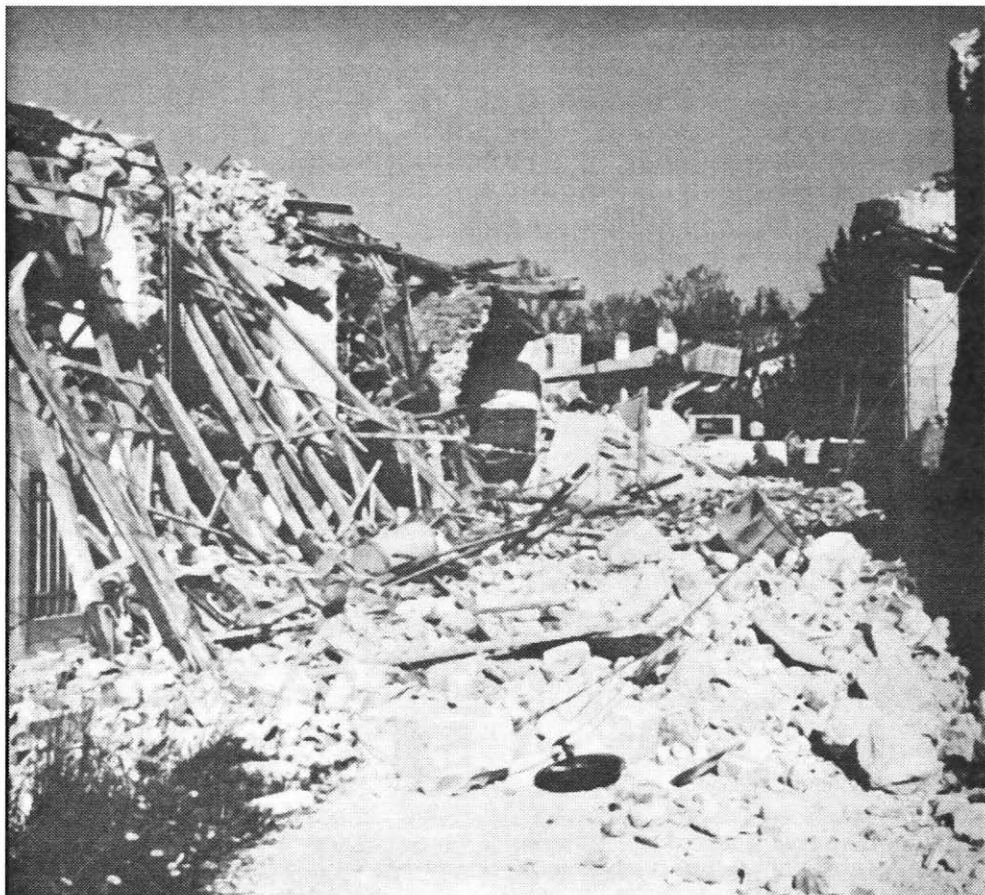


Figura 2. Daños en estructuras débiles de albañilería al norte de Italia ocasionados por el terremoto de Friuli del 6 de Mayo de 1976. (Cortesía de I. Finetti.)

50000 a 70000 víctimas ocurridas en Lisboa, Portugal, y áreas circundantes; la sacudida se sintió en Alemania y en los Países Bajos. En Alicante, España, el 21 de marzo de 1829 un terremoto causó 840 muertos y muchos cientos de personas más heridas. Más de 5000 casas fueron destruidas total o parcialmente en Torrevieja, Murcia y sus alrededores. El 28 de diciembre de 1908, un terremoto destructor sacudió Messina, Italia, causando 120000 víctimas y daños muy extensos. El terremoto más reciente, que ha afectado a este país, ocurrió el 6 de mayo de 1976, en la región de Friuli, cerca de Gemona, con 965 muertos y 2280 heridos (véase figura 2). El 27 de diciembre de 1939, en Erzincan, Turquía, se perdieron 23000 vidas a causa de un importante terremoto. Otros terremotos con gran número de víctimas han ocurrido recientemente en Turquía.

Al norte de la costa mediterránea, Europa es mucho más estable. Sin embargo, de vez en cuando ocurren terremotos destructores en Alemania, Austria y Suiza e incluso en la región del Mar del Norte y Escandinavia. Por ejemplo, el 8 de octubre de 1927 ocurrió un terremoto cerca de Schwadorf, en Austria, que causó daños en un área al sureste de Viena. Este terremoto se sintió en Hungría, Alemania y Checoslovaquia a distancias de 250 kilómetros del foco.

Incluso en Gran Bretaña han ocurrido terremotos destructores en tiempos históricos. El 17 de diciembre de 1896 ocurrió una serie de terremotos, el mayor de los cuales causó algunos daños en Hereford, una ciudad de 4565 casas. Cerca de 200 chimeneas tuvieron que ser reparadas o reconstruidas y la catedral fue dañada ligeramente. El área afectada fue un poco más de 1000 kilómetros cuadrados.

Los mapas de sismicidad del tipo del de la figura 1 se realizan a partir de los datos tomados en un período de tiempo relativamente corto. En consecuencia, si las conclusiones o predicciones acerca de la probabilidad de ocurrencia de terremotos en una región dada se basan sobre este tipo de mapas, éstas pueden ser desacreditadas por la ocurrencia anormal de un terremoto en un área que no se considera normalmente como sísmicamente activa.

Un ejemplo de sismicidad infrecuente y dispersa es la ocurrencia de terremotos en Australia. Hay buenas razones geológicas de por qué esto es así. Gran parte de la región oeste consiste en rocas antiguas del escudo precámbrico australiano y el continente como un todo está lejos de las dorsales oceánicas activas y de los arcos de isla que lo rodean (véase figura 1). Sin embargo, este país tiene algunas áreas de sismicidad actual significativa. Es de particular interés un terremoto destructor localizado cerca de Meckering, en la Australia Occidental, el 14 de octubre de 1968 y asociado con una falla superficial reciente de 30 kilómetros de largo, aproximadamente.

Mapas sísmicos, como el de la figura 1, contruidos cuidadosamente por el esfuerzo colectivo de cientos de sismólogos, han contribuido en muchas maneras al conocimiento humano de nuestro planeta. Por ejemplo, como se verá más adelante, la distribución global de ocurrencia de terremotos nos ha ayudado a comprender la evolución de los sistemas montañosos, los conti-

nentes y los océanos. Asimismo, estos mapas deben ser necesariamente consultados por proyectistas, geólogos e ingenieros por cuanto la disminución del riesgo sísmico es un elemento a tener en cuenta en la construcción de grandes estructuras.

Profundidades de los terremotos

Los terremotos son simplemente temblores del suelo. Las ondas que genera el terremoto se denominan *ondas sísmicas*, y al igual que las ondas sonoras que emite un gong que ha sido golpeado, las ondas sísmicas se emiten a partir de una fuente de energía en algún lugar de la parte más superficial de la Tierra. Aunque en los terremotos naturales esta fuente se reparte en un cierto volumen de roca, con frecuencia es conveniente especificar la fuente de un terremoto como si fuera un punto, a partir del cual parten las ondas. Este punto se denomina *foco* del terremoto. En los terremotos naturales éste se encuentra evidentemente a cierta profundidad bajo la superficie terrestre. En los terremotos artificiales, tales como las explosiones nucleares subterráneas, el foco es esencialmente un punto cercano a la superficie de la Tierra. Es también conveniente asignar un nombre al punto de la superficie terrestre que se encuentra directamente encima del foco: este se denomina *epicentro* del terremoto.

¿A qué profundidad de la Tierra están los focos? Uno de los primeros e intrigantes descubrimientos de los sismólogos fue que, aunque muchos focos están situados a poca profundidad, en algunas regiones se encuentran a cientos de kilómetros. Tales regiones incluyen los Andes sudamericanos, las islas Tonga, Samoa, la cadena de las Nuevas Hébridas, el mar del Japón, Indonesia y las Antillas en el Caribe (véase figura 1); cada una de estas regiones está asociada a fosas oceánicas profundas. En general, la frecuencia con que ocurren los terremotos en estas regiones disminuye rápidamente para profundidades mayores de 200 kilómetros, pero algunos focos llegan a estar a 700 kilómetros. De forma bastante arbitraria, los terremotos con foco entre 70 y 300 kilómetros se denominan *focos intermedios* y los de mayor profundidad son denominados *focos profundos*. Algunos terremotos con foco intermedio y profundo se localizan lejos de la región del Pacífico, en el Hindu Kush, en Rumania, en el Mar Egeo y bajo España.

Cuando se comparan los focos de los terremotos próximos a los arcos de isla con sus profundidades, surge una distribución muy interesante. Consideremos la sección vertical de la Tierra en la parte superior de la figura 3, la cual se ha dibujado en ángulo recto al arco de Tonga en el Pacífico Sur. Al este de estas islas volcánicas se encuentra la fosa de Tonga, que en algunos lugares alcanza una profundidad de 10 kilómetros. En la parte inferior de la figura se representan las profundidades de los focos en función de su distancia a Niumate, un lugar de la isla de Tonga. Nótese que los focos se encuentran en una zona estrecha y muy bien definida, que buza o se inclina, desde cer-

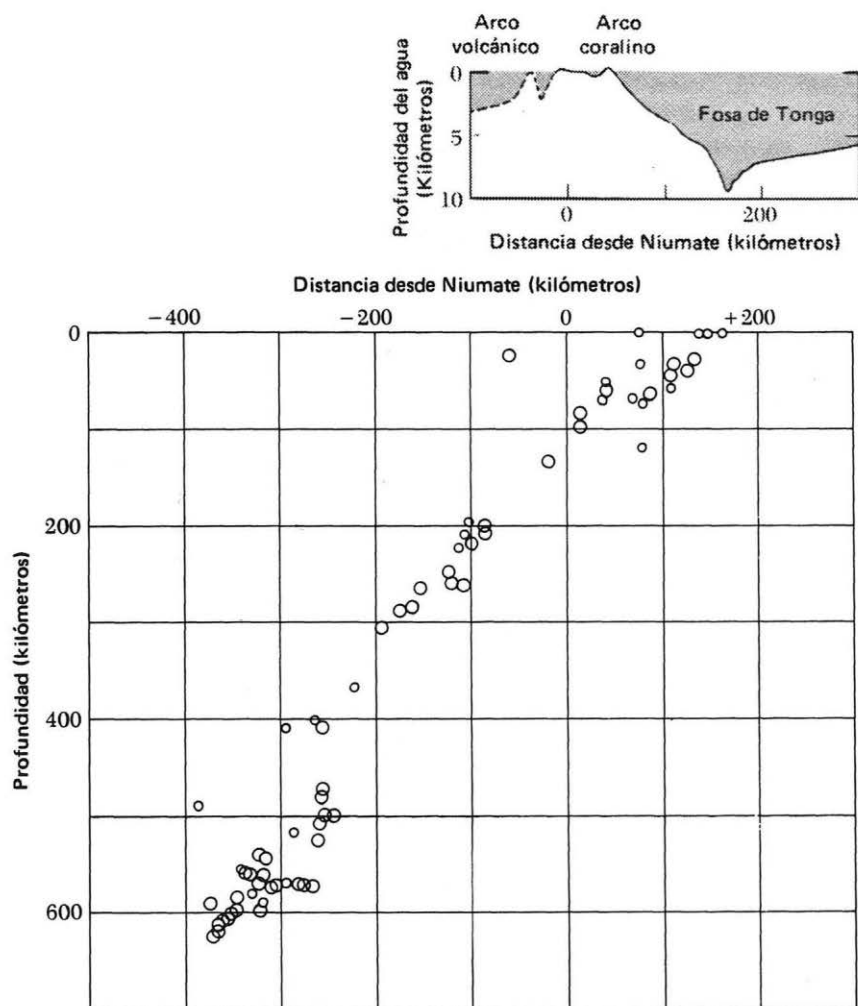


Figura 3. Focos de los terremotos ocurridos en 1965 bajo el arco de Tonga en el Pacífico del Suroeste. La sección vertical muestra que la mayoría de los centros de terremotos se agrupan a lo largo de una zona estrecha que empieza bajo la fosa y se inclina debajo de ella con un ángulo de 45° , aproximadamente, hasta profundidades de más de 600 kilómetros. (Cortesía de B. Isacks, J. Oliver, L. R. Sykes y *J. Geophys. Res.*)

ca de la fosa por debajo del arco de isla con un ángulo de aproximadamente 45° . Para profundidades mayores a 400 kilómetros, la zona activa aumenta de pendiente, con algunos focos situados a más de 600 kilómetros. En otras regiones de terremotos profundos se encuentra alguna variación en el ángulo de buzamiento y en la distribución de los focos, pero los rasgos generales de una zona sísmica buzante* son comunes a los arcos de islas. Más adelante en este capítulo discutiremos una explicación de este modelo universal y relativamente simple.

En este libro nos interesamos principalmente en los temblores de foco superficial, que se hallan justo debajo de la superficie de la Tierra. Los terremotos superficiales son los que producen la mayor devastación y los que contribuyen aproximadamente a las tres cuartas partes de la energía total liberada por terremotos en todo el mundo. En California, por ejemplo, todos los terremotos conocidos hasta la fecha han tenido focos superficiales. De hecho, ha sido demostrado que la gran mayoría de los terremotos que han ocurrido en la California central se originaron en focos situados en los primeros 5 kilómetros de la Tierra y sólo unos pocos a profundidades de hasta 15 kilómetros. Desafortunadamente, por varias razones, la determinación de la profundidad del foco de un terremoto no es tan precisa como la localización de su epicentro sobre la superficie. No obstante, la profundidad puede ser a veces de vital interés práctico, ya que el temblor del suelo puede afectar más fuertemente a un emplazamiento (por ejemplo, el de un reactor nuclear) cuando el foco está a una profundidad de 10 kilómetros que cuando está a 40.

La mayoría de los terremotos superficiales entre moderados y grandes son seguidos, en las horas posteriores e incluso en varios meses siguientes por numerosos terremotos menores en la misma zona. Estos terremotos son llamados *réplicas*, y los terremotos verdaderamente grandes son algunas veces seguidos por un increíble número de ellas. El gran terremoto de la isla de Rat, en las islas Aleutianas, del 4 de febrero de 1965, fue seguido, en los 24 días siguientes, por más de 750 réplicas, suficientemente importantes como para ser registradas por sismógrafos lejanos. Unos pocos terremotos son precedidos por premonitores más pequeños procedentes del área de origen, y se ha sugerido que éstos pueden ser utilizados para predecir la sacudida principal (véase el capítulo 9).

Algunas veces, si los focos pueden ser localizados con precisión, indican la forma y el tamaño de la región bajo la superficie que es la fuente de los terremotos. El hacer el mapa sismológico de las estructuras de rocas más profundas es un buen complemento de los métodos normales de campo utilizados por los geólogos para hacer el mapa de los rasgos de la superficie. En la figura 3 del capítulo 8 se muestra una demarcación afortunada de una zona de este tipo cercana a Oroville, California, para terremotos locales superficiales.

* Llamada *zona de Benioff* debido al famoso sismólogo californiano, profesor Hugo Benioff (1899-1968).

Modelos tectónicos y zonas de tranquilidad en zonas sísmicas

Una explicación reciente y bastante satisfactoria de la mayoría de los terremotos se basa en los términos de lo que se llama *tectónica de placas*. La idea básica es que la parte superior de la Tierra (llamada *litosfera*) está constituida por varios bloques amplios y bastante estables llamados *placas*. Las diez placas mayores están representadas en la figura 4.

Cada placa se extiende a una profundidad de 80 kilómetros aproximadamente; la placa se mueve horizontalmente en relación a las placas vecinas, sobre una capa de rocas más viscosas que se encuentran inmediatamente debajo. En el borde de una placa, donde existe el contacto entre placas adjuntas, actúan grandes esfuerzos deformantes (o *tectónicos*) sobre las rocas, causando cambios físicos e incluso químicos en ellas. En estos bordes de las placas la estructura geológica de la Tierra es la más afectada por las fuerzas de reacción entre placas, y es aquí donde tienen lugar los cambios geológicos masivos y radicales.

La evidencia geofísica sugiere que la estructura de las placas, tal como se muestra hoy en día en la figura 4, no es permanente, sino que experimenta cambios constantes y graduales. La lava fluye continuamente hacia fuera en las dorsales centrooceanicas. Esta roca se mueve lentamente sobre la superficie de la Tierra formando un nuevo suelo submarino a ambos lados de la dorsal. De esta forma, las placas se extienden y se mueven con velocidad uniforme en la superficie, como cintas transportadoras, enfriándose y envejeciéndose a medida que se alejan de las dorsales. Por esta razón las dorsales centro-oceanicas son llamadas *zonas de extensión*.

Las zonas de extensión han sido dibujadas en la figura 4. Nótese que ninguna de las líneas de epicentros aparece como una línea continua, sino que son interrumpidas por desviaciones horizontales intermitentes. Estas desviaciones coinciden con un tipo especial de deslizamiento horizontal (véase capítulo 3) entre dos bloques de la corteza. En ambos extremos, el deslizamiento es cambiado o "transformado" por la emergencia de suelo oceánico nuevo a lo largo de la dorsal. Tales deslizamientos son llamados fallas transformantes y a lo largo de ellas ocurren muchos terremotos.

Ahora bien, si constantemente se está creando una nueva placa, ¿qué ocurre con la antigua? Como la Tierra probablemente conserva su mismo tamaño desde hace bastantes períodos de tiempo geológico, grandes áreas de las placas móviles también deben ser absorbidas en algún lugar. Se cree que el cementerio de las placas son las fosas oceánicas asociadas a continentes que avanzan o a los arcos de isla. En estos lugares, llamados *zonas de subducción*, las capas superficiales de roca se sumergen en el interior de la Tierra (véase la figura 3 del capítulo 5). A grandes profundidades, la temperatura y la presión aumentan, y la litosfera que se hunde se transforma gradualmente hasta que llega a estar mezclada y absorbida por rocas más profundas.