

C O .  
R 12.208  
N J . 9457

**ESTUDIO TECNICO ASEGURADOR  
DE LOS RIESGOS DE LA  
NATURALEZA EN ESPAÑA**

**MAPFRE  
CENTRO  
DE  
DOCUMENTACION**

**LUIS DE MINGO CACHON  
MARIA TERESA PISERRA DE CASTRO  
CARLOS BUSON BUESA**  
*Octubre 1991*



## PROLOGO

La FUNDACION MAPFRE ESTUDIOS tiene, entre otros objetivos fundacionales, el de fomentar la investigación y la difusión y adaptación al mundo empresarial de técnicas y conocimientos relacionados con el seguro privado. A este respecto, y en el marco de su Programa de actividades para 1991, su Patronato decidió promover la realización de un Estudio Técnico Asegurador sobre Riesgos de la Naturaleza en España, considerado de gran trascendencia en el sector asegurador español, tras la liberalización del seguro de Riesgos Extraordinarios por parte del Consorcio de Compensación de Seguros, según Ley 19-12-90 promulgada en cumplimiento de la normativa comunitaria respecto a la supresión de monopolios, carácter que aquel Organismo había disfrutado hasta esa fecha en la cobertura de los riesgos extraordinarios.

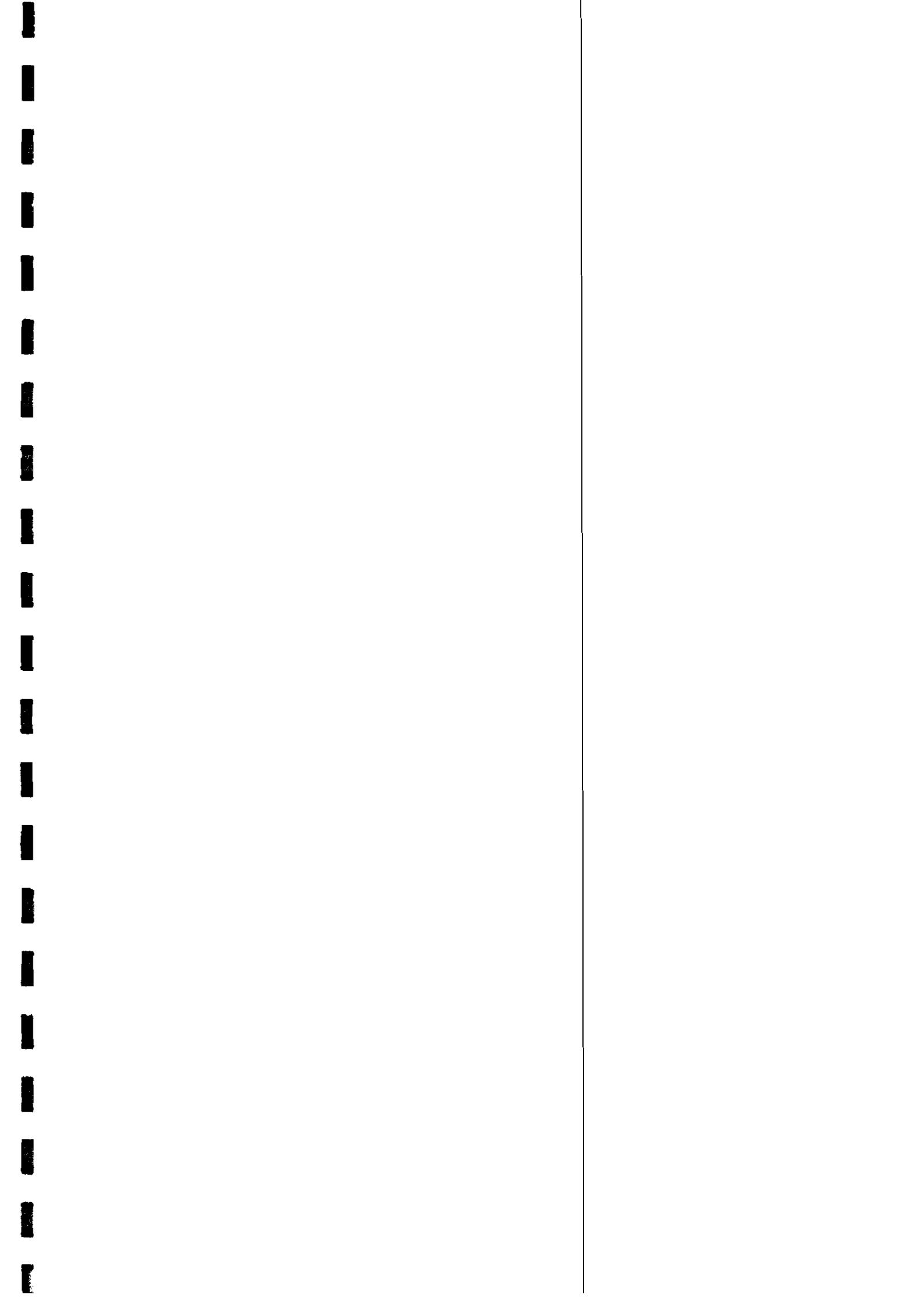
A este efecto, la Fundación se hizo eco de la necesidad de tal análisis técnico sobre riesgos de la naturaleza enfocado desde la perspectiva aseguradora que permitiera la adecuada evaluación de los riesgos más significativos -al nivel de ámbito geográfico más reducido posible, municipio o código postal, al menos-, así como el estudio de zonas de acumulación para cada evento junto a otros datos técnicos locales de interés para la suscripción de pólizas de seguros para grandes empresas.

Para la realización de este Estudio, la Fundación designó como Director del mismo a D. Luis de Mingo Cachón, Ingeniero Técnico con una amplia experiencia en el campo asegurador y reasegurador, con la colaboración directa de la Licenciada en Geología, D<sup>a</sup>. María Teresa Piserra de Castro, experta en análisis y control de riesgos de la naturaleza.

Asimismo, la Fundación contactó con instituciones y organismos públicos vinculados a los campos científicos correspondientes, así como del mundo del seguro, al objeto de obtener la máxima aportación de información ya existente y la validación de los avances que se fueran obteniendo por parte de las Comunidades Científicas y Aseguradora. En este sentido, también se mantuvieron contactos con las instituciones aseguradoras de mayor relieve internacional, fundamentalmente entidades reaseguradoras, para hacerles partícipes de este proyecto sobre el que mostraron un claro interés por lo que habría de suponer de mejora del conocimiento técnico sobre estos fenómenos en España; país en el que el mundo asegurador internacional tiene grandes intereses económicos y éstos con carácter creciente.

El Estudio que aquí se presenta ha sido fruto, por una parte, de la voluntad de la FUNDACION MAPFRE ESTUDIOS firmemente interesada en su desarrollo y, por otra, del gran esfuerzo de un equipo humano con el que ha colaborado un nutrido grupo de







especialistas aseguradores y científicos de los distintos campos analizados, básicamente: Riesgos Sísmicos, Inundaciones y Vientos Huracanados. El Trabajo es, sin duda, un importante documento para cuantos deban tomar decisiones o asumir responsabilidades en la suscripción de riesgos de la naturaleza en España, ya sea a través de mecanismos aseguradores o reaseguradores, aun cuando algunas parcelas son de tal complejidad que habrán de requerir sucesivas aportaciones de otros especialistas o instituciones interesadas en su desarrollo. Es previsible que la misma FUNDACION promueva análisis complementarios en un futuro no muy lejano, si bien se ha querido cerrar este primer Estudio en la fecha establecida inicialmente, 9 de Octubre de 1991, en la que se culminaría una primera etapa que se considera suficientemente fecunda para los objetivos establecidos. En esta fecha, el Estudio se ha presentado públicamente ante la propia Fundación y representantes de entidades aseguradoras, instituciones científicas, organismos públicos y profesionales interesados en esta materia, haciendo coincidir el día por el señalado por las Naciones Unidas como Día de celebración de la Década 1991-1999 para la Reducción de Desastres de la Naturaleza.

La Fundación considera cumplido su primer objetivo de contribuir de forma desinteresada y sin fin de lucro al fomento de la investigación, en este caso sobre los riesgos de la naturaleza en España, y deja abierta la puerta a futuras ampliaciones del mismo, con el deseo de que todo ello pueda ser útil a la Sociedad en general.

La Fundación, asimismo, agradece profundamente a todos quienes han intervenido en este trabajo y, de forma especial, a los Directores del mismo y al becario Carlos Busón Buesa por su entusiasta dedicación y aportación, así como a cuantas personas e instituciones dedicaron su tiempo, experiencias o estudios ya realizados que han constituido los pilares esenciales de estas páginas.

Agradecemos la colaboración que nos han prestado para la realización de este Estudio a:

- \* Agroseguro.
- \* Asociación ICEA.
- \* Asociación Meteorológica Española (A.M.E.).
- \* Compañía Nacional de Reaseguros.
- \* Compañía Europea de Reaseguros.
- \* Comité Geofísico de la U.R.S.S.

- \* Consorcio de Compensación de Seguros.
- \* Dirección General de Obras Hidráulicas (M.O.P.T).
- \* Dirección General de Protección Civil.
- \* Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.
- \* Instituto de Energías Renovables. (C.I.E.M.A.T.)
- \* Instituto Geográfico Nacional.
- \* Instituto Nacional de Meteorología.

y a todos aquellos que hayamos podido omitir involuntariamente.

FUNDACION MAPFRE ESTUDIOS

## SECCION I. Introducción

1.	Justificación y objetivos del estudio . . . . .	1
2.	Estructuración . . . . .	2
3.	Consideraciones actuariales . . . . .	3
3.1	Métodos de evaluación de los Riesgos de la Naturaleza . . . . .	3
3.2	Graduación y evaluación de riesgo en la técnica actual . . . . .	4
3.3	Información técnica necesaria para el análisis actuarial . . . . .	5
3.4	Deficiencias derivadas del tipo de información . . . . .	6
4.	Consideraciones aseguradoras y reaseguradoras . . . . .	7
4.1	Introducción . . . . .	7
4.2	Cobertura de terremoto . . . . .	11
4.3	La pérdida máxima probable (PML) . . . . .	13
4.4	Ejemplo práctico para terremoto . . . . .	14
4.5	Otros peligros . . . . .	20
4.6	Zonificaciones . . . . .	23
4.7	Control de cúmulos . . . . .	25
5.	Desarrollo del Estudio . . . . .	25
6.	Conclusiones del Estudio . . . . .	26

## SECCION II. Terremotos

Introducción . . . . .	31	
1.	Dinámica terrestre . . . . .	35
1.1	Tectónica Global . . . . .	35
1.2	España en el contexto de la Tectónica de Placas . . . . .	36
2.	¿Qué son los terremotos? . . . . .	41
2.1	Causas de los terremotos . . . . .	41
2.2	Tipos de terremotos . . . . .	42
2.2.1	Causas naturales . . . . .	42
2.2.2	Causas antrópicas . . . . .	44

2.3	Clasificación de los terremotos según sus características . . . . .	47
2.4	Las fallas y su relación con los terremotos . . . . .	48
2.5	Mecanismo de disparo de los terremotos . . . . .	49
2.6	Profundidad del foco sísmico . . . . .	49
3.	¿Cómo se observan los terremotos? . . . . .	55
3.1	Instrumentación . . . . .	55
3.1.1	Instrumentación con fines sismológicos . . . . .	55
3.1.2	Instrumentación aplicada a la ingeniería sísmica . . . . .	56
3.2	Ondas sísmicas . . . . .	57
3.2.1	Ondas internas . . . . .	57
3.2.2	Ondas superficiales . . . . .	58
3.3	¿Cómo se interpreta un sismograma? . . . . .	58
3.4	Comportamiento de las ondas sísmicas en el subsuelo . . . . .	58
3.5	Atenuación de las ondas sísmicas . . . . .	59
3.6	¿Cómo se localiza un terremoto? . . . . .	60
3.7	Duración de los terremotos . . . . .	60
4.	Tamaño de los terremotos . . . . .	65
4.1	Escalas de intensidad . . . . .	65
4.2	Escalas de magnitud . . . . .	66
4.3	La energía de los terremotos . . . . .	67
4.4	Aceleración máxima del terremoto . . . . .	68
5.	Efectos de los terremotos . . . . .	71
5.1	Tsunamis . . . . .	71
5.1.1	Red de alerta de tsunami . . . . .	73
5.1.2	Seiches . . . . .	74
5.1.3	Tsunamis en España . . . . .	74
5.1.4	Recomendaciones de Protección Civil Española en caso de maremoto o tsunami . . . . .	75
5.2	Deslizamientos y avalanchas . . . . .	76
5.3	Incendios . . . . .	76
5.4	Daños en las edificaciones . . . . .	77

6.	Predicción de los terremotos . . . . .	83
6.1	Objetivo de la predicción . . . . .	83
6.2	Métodos de predicción sísmica . . . . .	83
6.2.1	Predicción temporal . . . . .	84
6.2.2	Predicción estadística . . . . .	86
6.2.3	Lagunas sísmicas . . . . .	87
7.	Prevención de los terremotos . . . . .	91
7.1	Relación entre los terremotos y la población mundial . . . . .	91
7.2	Protección Civil como herramienta de prevención . . . . .	93
7.3	Diseño antisísmico . . . . .	96
8.	Terremotos en España . . . . .	99
8.1	Regiones sísmicas en la Península Ibérica . . . . .	99
8.2	Terremotos destructores en España . . . . .	106
8.3	Sistema de previsión de terremotos en España . . . . .	113
8.4	Escala de intensidades sísmicas usadas en España (M.S.K.) . .	118
9.	Zonificaciones . . . . .	137
9.1	Zonificación de niveles de peligrosidad por terremoto . . . . .	137
9.2	Compatibilización del mapa de peligrosidad sísmica con una división territorial . . . . .	139
9.3	Control de acumulación: justificación de la metodología utilizada . . . . .	140
9.4	Mapa de control de acumulación y criterios de realización . . .	140
9.5	Futuras opciones de zonificación en consonancia C.R.E.S.T.A	141
10.	El seguro de terremotos . . . . .	143
10.1	La actual cobertura por el Consorcio de Compensación de Seguros . . . . .	143
10.1.1	Modalidad de cobertura . . . . .	143
10.1.2	Exclusiones . . . . .	143
10.1.3	Franquicias . . . . .	144
10.2	La cobertura en México . . . . .	144
10.2.1	Modalidad de cobertura . . . . .	144
10.2.2	Exclusiones . . . . .	144

10.3	La cobertura en Japón . . . . .	145
10.3.1	Modalidad de cobertura . . . . .	145
10.4	La cobertura en Italia . . . . .	146
10.4.1	Modalidad de cobertura . . . . .	146
10.4.2	Exclusiones . . . . .	146
10.4.3	Franquicias . . . . .	147
11.	Riesgo de terremoto. Pautas básicas de evaluación y tarificación . . . . .	149
11.1	Análisis de peligrosidad . . . . .	149
11.2	Análisis de exposiciones y localización . . . . .	149
11.3	Análisis de vulnerabilidad . . . . .	150
11.4	Análisis de evaluación y riesgo . . . . .	150
11.5	Criterios de suscripción . . . . .	152

### SECCION III. Inundaciones

Introducción . . . . .	153
1. Geodinámica externa: generalidades . . . . .	155
1.1 El agua en la Tierra . . . . .	155
1.2 El ciclo hidrológico . . . . .	155
1.3 Redes de drenaje y cuencas hidrográficas . . . . .	156
1.4 El perfil logitudinal de un río . . . . .	156
1.5 Interacción hombre-sistema fluvial . . . . .	157
2. Avenidas e Inundaciones . . . . .	159
2.1 Definición . . . . .	159
2.2 La llanura de inundación . . . . .	159
2.3 Tipos de avenidas . . . . .	159
2.3.1 Avenidas permanentes, continuas o de desbordamiento . . . . .	160
2.3.2 Avenidas transitorias, momentáneas o discontinuas . . . . .	160
2.4 Causas de las Avenidas . . . . .	160
2.4.1 Causas naturales . . . . .	160
2.4.2 Causas antrópicas . . . . .	161
2.5 Efectos geológicos de las avenidas . . . . .	162
2.6 La intervención del hombre . . . . .	163

2.7	Medidas de defensa frente a las inundaciones . . . . .	164
2.7.1	Métodos preventivos estructurales . . . . .	164
2.7.2	Métodos preventivos de gestión . . . . .	165
2.7.3	Procedimientos de emergencia . . . . .	166
3.	Las inundaciones en España . . . . .	173
3.1	Influencia del relieve en las inundaciones en España . . . . .	173
3.2	Influencia del clima en las inundaciones en España . . . . .	174
3.2.1	Lluvias de origen frontal . . . . .	174
3.2.2	Tormentas térmicas . . . . .	174
3.2.3	Temporales de Levante y gotas frías . . . . .	175
3.3	Influencia del fenómeno "El Niño" sobre las inundaciones en España . . . . .	176
3.3.1	Definición del fenómeno . . . . .	176
3.3.2	Relación entre el fenómeno de "El Niño" y las inundaciones en Levante . . . . .	177
4.	Análisis de las Cuencas Hidrográficas de España . . . . .	179
4.1	Contenidos . . . . .	179
4.2	Antecedentes de los Planes Hidrológicos del M.O.P.U. 1988 . . . . .	179
4.3	Estructuración del análisis de las cuencas hidrográficas . . . . .	181
Capítulo	4.1 Cuenca Norte. Plan Hidrológico I. . . . .	183
"	4.2 Cuenca Norte. Plan Hidrológico II. . . . .	191
"	4.3 Cuenca Norte. Plan Hidrológico III. . . . .	199
"	4.4 Cuenca del Duero . . . . .	209
"	4.5 Cuenca del Tajo . . . . .	221
"	4.6 Cuenca del Guadiana. Plan Hidrológico I . . . . .	233
"	4.7 Cuenca del Guadiana. Plan Hidrológico II . . . . .	244
"	4.8 Cuenca del Guadalquivir . . . . .	250
"	4.9 Cuenca del Guadalete y Barbate . . . . .	268
"	4.10 Cuenca del Júcar . . . . .	274
"	4.11 Cuenca Sur . . . . .	290
"	4.12 Cuenca del Ebro . . . . .	294
"	4.13 Cuenca del Segura . . . . .	304

5.	Zonificaciones . . . . .	310
5.1	Zonificación de niveles de riesgo de inundación . . . . .	310
5.2	Compatibilización de los niveles de riesgo del M.O.P.U con una división territorial . . . . .	316
5.3	Control de acumulación: justificación de la metodología utilizada . . . . .	317
5.4	Mapa de control de acumulación y criterios de realización . . .	317
5.5	Futuras opciones de zonificación en consonancia con C.R.E.S.T.A . . . . .	318
6.	El seguro de inundaciones . . . . .	322
6.1	La actual cobertura por el Consorcio de Compensación de Seguros . . . . .	322
6.1.1	Modalidad de cobertura . . . . .	322
6.1.2	Exclusiones . . . . .	322
6.1.3	Franquicias . . . . .	323
6.2	La cobertura en Francia . . . . .	323
6.2.1	Modalidad de cobertura . . . . .	323
6.2.2	Exclusiones . . . . .	324
6.2.3	Franquicias . . . . .	324
6.3	La cobertura en Italia . . . . .	324
6.3.1	Modalidad de cobertura . . . . .	324
6.3.2	Exclusiones . . . . .	324
6.3.3	Franquicias . . . . .	325
7.	Riesgo de inundación. Pautas básicas de evaluación y tarificación . . .	326
7.1	Análisis de peligrosidad . . . . .	326
7.2	Análisis de exposiciones y localización . . . . .	326
7.3	Análisis de la vulnerabilidad . . . . .	327
7.4	Análisis de evaluación del riesgo . . . . .	327
7.5	Criterios de suscripción . . . . .	328

## SECCION IV. Vientos

Introducción	330
1. ¿Qué son los vientos?	332
1.1 Cómo se determina el viento	332
1.2 Fuerzas que producen los vientos	335
1.3 Estructura del viento	336
1.4 Rafagosidad y turbulencia del viento	336
2. Circulación general de la atmósfera	342
2.1 Introducción	342
2.2 Modelos de circulación general de la atmósfera	343
2.3 Vientos locales	344
2.3.1 Brisas marinas y terrestres	345
2.3.2 Brisas de montaña y valle	345
2.4 La corriente en chorro	346
2.5 Centros de presión en el Hemisferio Norte	347
3. Dinámica atmosférica	352
3.1 Masas de aire	352
3.2 Frentes cálidos y frentes fríos	354
3.3 Ciclogénesis	355
3.4 Centros de acción	356
3.4.1 Depresiones	357
3.4.2 Anticiclones	357
4. Fenómenos atmosféricos excepcionales	362
4.1 Ciclones tropicales	362
4.1.1 Formación	363
4.2 Ciclones extratropicales	364
4.3 Tornados	365
4.3.1 Formación	365
4.3.2 Efectos	366
4.3.3 Localización	367

4.4	Trombas marinas . . . . .	368
4.4.1	Efectos . . . . .	368
4.4.2	Localización . . . . .	368
4.5	Tempestades de polvo . . . . .	368
4.5.1	Efectos . . . . .	369
4.5.2	Formación . . . . .	369
4.5.3	Localización . . . . .	370
5.	Efectos de los vientos huracanados . . . . .	376
5.1	Construcciones . . . . .	376
5.2	Comunicaciones . . . . .	379
5.3	Agricultura . . . . .	382
6.	La Península Ibérica y su relación con los vientos violentos . . . . .	384
6.1	Factores climáticos . . . . .	384
6.2	Masas de aire que afectan a la Península . . . . .	386
6.2.1	Masas de aire frío . . . . .	386
6.2.2	Masas de aire cálido . . . . .	388
6.3	Discontinuidades frontales que afectan a la Península . . . . .	389
6.4	Centros de acción que afectan a la Península . . . . .	390
6.4.1	Anticiclones . . . . .	390
6.4.2	Depresiones . . . . .	391
6.5	Vientos huracanados en España . . . . .	392
6.5.1	Temporales mediterráneos . . . . .	393
6.5.2	Temporales atlánticos . . . . .	395
6.5.3	Torbellinos locales . . . . .	398
6.6	Toponimia de los vientos peninsulares . . . . .	399
6.7	Consejos de Protección Civil en caso de vientos fuertes . . . . .	404
7.	Zonificaciones . . . . .	410
7.1	Zonificación de niveles de riesgo por viento . . . . .	410
7.2	Compatibilización del mapa de riesgo de vientos fuertes con una división territorial . . . . .	415
7.3	Control de acumulación: justificación de la metodología utilizada . . . . .	415
7.4	Mapa de control de acumulación y criterios de realización . . . . .	416

7.5	Futuras opciones de zonificación en consonancia con C.R.E.S.T.A . . . . .	416
8.	El seguro contra el viento . . . . .	418
8.1	La actual cobertura por el Consorcio de Compensación de Seguros . . . . .	418
8.1.1	Modalidad de cobertura . . . . .	418
8.1.2	Exclusiones . . . . .	418
8.1.3	Franquicias . . . . .	418
8.2	La cobertura en el Reino Unido . . . . .	419
8.2.1	Modalidad de cobertura . . . . .	419
8.2.2	Exclusiones . . . . .	419
8.2.3	Franquicias . . . . .	419
8.3	La cobertura en Italia . . . . .	419
8.3.1	Modalidad de cobertura . . . . .	419
8.3.2	Exclusiones . . . . .	420
8.3.3	Franquicias . . . . .	420
9.	Riesgo de vientos. Pautas básicas de evaluación y tarificación . . . . .	422
9.1	Análisis de peligrosidad . . . . .	422
9.2	Análisis de exposiciones y localización (categorías de riesgo) . . . . .	422
9.3	Análisis de vulnerabilidad . . . . .	423
9.4	Análisis de evaluación del riesgo . . . . .	423
9.5	Criterios de suscripción . . . . .	424

## SECCION V. Apéndice Informático

1.	Necesidad de diseñar un programa informático . . . . .	426
2.	Objetivos a cubrir por el programa informático . . . . .	427
3.	Entrada de datos: Inputs . . . . .	427
4.	Salida de datos: Outputs . . . . .	431
5.	Información técnica complementaria . . . . .	431

6.	Criterios de suscripción . . . . .	434
7.	Esquema de funcionamiento del programa informático: Organigrama .	435
<b>SECCION VI. Glosario . . . . .</b>		<b>438</b>
<b>SECCION VII. Bibliografía . . . . .</b>		<b>462</b>

## I. INTRODUCCION

### 1. JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

La Ley 21/1990 de 19 de Diciembre, dictada para adaptar el Derecho Español a la Directiva 88/357/CEE, sobre libertad de servicios en seguros distintos al de Vida, y de actualización de la legislación de Seguros Privados, contiene en su artículo 4º un nuevo Estatuto Legal del Consorcio de Compensación de Seguros.

Este Estatuto reconoce al Tomador del Seguro la facultad de contratar la cobertura de Riesgos Extraordinarios sobre las personas y los bienes con Entidades Aseguradoras que reúnan las condiciones exigidas por la legislación vigente. Dicha cobertura era hasta ese momento competencia exclusiva del Consorcio de Compensación de Seguros en régimen de monopolio.

La Disposición Final Segunda de la misma ley autoriza al Gobierno para que, a propuesta del Ministerio de Economía y Hacienda, dicte las disposiciones necesarias para el desarrollo y ejecución del antes mencionado Estatuto Legal del Consorcio, facultándole además, para introducir en la normativa vigente de aplicación al Consorcio de Compensación de Seguros las modificaciones que resulten procedentes en función de las que la propia ley ha introducido.

Todo ello sitúa al Sector Asegurador Español ante la necesidad de realizar los estudios necesarios para afrontar este tipo de cobertura tan especial, en condiciones distintas a una cobertura pública, donde el Estado, en nombre de la sociedad, afronta el riesgo social sobre el fundamento de la solidaridad nacional. Así, los ciudadanos se encuentran amparados por una mutualidad organizada por el Estado que mediante una participación financiera de cada uno de sus miembros, reparte las sumas entre las víctimas de las catástrofes, creando un sistema de compensación en el cuerpo social. El Estado se ve abocado a jugar el papel técnico de un Asegurador bajo la forma mutualista, donde su principal preocupación es la de mantener el necesario equilibrio entre los ingresos (las primas) y los gastos (los siniestros).

La iniciativa privada, en cambio, se sitúa en la necesidad de incorporar esta cobertura a sus sistemas ordinarios de operación:

- Seguro voluntario.
- Sometimiento a un contrato de adhesión.
- Precio discriminado en función de la exposición real al riesgo.
- Costes de gestión variables.

Sin embargo, la iniciativa privada, dentro de la necesidad de realizar la asunción de estos riesgos dentro de los esquemas técnicos propios de toda operación de seguros, se encuentra con tres dificultades inherentes a la cobertura de riesgos catastróficos:

- Conseguir un número de expuestos al riesgo suficiente y equilibrado.
- Establecer una tarificación basada en técnicas actuariales.
- Controlar los cúmulos y disponer de una capacidad financiera suficiente.

Todo lo anteriormente expuesto lleva a considerar que el sistema más adecuado de tratamiento de estos riesgos universales es una síntesis de los esfuerzos de los poderes públicos y del sector asegurador privado con el fin de crear un sistema integrado y armonioso de indemnización, por el que se proporcione a los asegurados un verdadero seguro de catástrofes en nombre de la solidaridad nacional y basado en las técnicas aseguradoras.

Por tanto el objetivo general de este Estudio es aportar a este sistema propuesto los elementos técnico-aseguradores necesarios para el tratamiento de los riesgos de la naturaleza en dos de las tres dificultades que plantea la cobertura privada: La suscripción fundada en criterios técnicos y el análisis y control de los cúmulos producidos, en base, ambos postulados, a los datos proporcionados por la comunidad científica española, convenientemente adaptados y simplificados a las necesidades operativas aseguradoras.

## 2. ESTRUCTURACION

El presente texto queda estructurado en siete bloques que corresponden a:

Sección I	: Introducción
Sección II	: Terremotos
Sección III	: Inundaciones
Sección IV	: Vientos
Sección V	: Aplicaciones informáticas
Sección VI	: Glosario
Sección VII	: Bibliografía

### 3. CONSIDERACIONES ACTUARIALES.

#### 3.1 METODOS DE EVALUACION DE LOS RIESGOS DE LA NATURALEZA

Con carácter general, los muchos estudios existentes sobre evaluación de riesgos de la naturaleza presentan distintas acotaciones, en orden al enfoque y aplicación que sustenta la evaluación. Con frecuencia, esas acotaciones circunscriben el objetivo de la evaluación a hechos y criterios diferenciales, cuyas derivaciones más importantes se refieren a:

##### Medición del riesgo

La evaluación puede concretarse en la medición de distintos impactos o efectos acontecidos por la manifestación de un determinado suceso.

Así, en el caso de terremoto, por ejemplo, la evaluación del riesgo sísmico puede extenderse a las pérdidas de vidas humanas, los daños en edificios y propiedades, las pérdidas en obras de infraestructura, cosechas y riqueza natural, etc.

Existe, por tanto, la necesidad primaria de definir el objetivo de la evaluación, amparado en el fin que se persigue con la misma. Tales fines pueden hacer discurrir la evaluación hacia análisis puramente cuantitativos de pérdidas materiales de bienes, estimaciones de necesidades de medios técnicos y humanos para prever planes de evacuación, coste económico y social de las catástrofes potenciales, medida económica de acciones preventivas, etc.

##### Peligrosidad del riesgo

En general, en la manifestación de un riesgo de la naturaleza concurre la asociación simultánea de distintos sucesos, con consecuencias de pérdidas directas debidas al suceso primario y pérdidas consecuenciales indirectas producidas por sucesos secundarios o peligros inducidos.

En el caso de terremoto, por ejemplo, el peligro primario (sacudida del terreno) está relacionado con situaciones de peligro potencial derivadas de la manifestación de sucesos secundarios, como los Tsunamis, la inundación por desvío de los cauces naturales de los ríos, el deslizamiento y corrimiento de tierras por transformación de la orografía, o el incendio y la explosión de los edificios por la destrucción de canalizaciones de gas, electricidad, etc.

En inundación, el peligro primario (desbordamiento de los cauces naturales de agua) puede estar relacionado con sucesos secundarios, como la avalanchas por rotura de presas, el desbordamiento de canalizaciones y cauces artificiales, la formación súbita de torrentes por precipitaciones de lluvia, el deslizamiento de tierras o la destrucción de bienes y propiedades por fenómenos de viento

y lluvia simultánea a la propia inundación.

Resulta preciso, por tanto, acotar y definir la peligrosidad del riesgo en torno a sucesos primarios y secundarios que incidan en la posible evaluación del riesgo.

Ambas consideraciones sitúan convenientemente algunas de las precisiones necesarias que, con carácter básico, deben darse en todo contexto de estudio o análisis actuarial sobre evaluación de riesgos de la naturaleza.

### 3.2 GRADUACION Y EVALUACION DEL RIESGO EN LA TECNICA ACTUAL

El uso de la técnica actuarial y su aplicación al seguro ofrece, en estos casos, tan sólo una visión particular y restringida de la evaluación de los riesgos de la naturaleza, sujeta a los objetivos y condicionamientos propios de la función aseguradora. Tales objetivos, limitan el análisis actuarial a una especial "graduación y evaluación del riesgo" derivada de los componentes básicos que conforman un programa de cobertura aseguradora. Tales componentes se refieren a:

- **Peligrosidad**, distinguiendo entre sucesos primarios y secundarios objeto de cobertura.
- **Exposición**, referida al valor de los elementos objeto de cobertura (bienes, propiedades, etc.).
- **Localización**, relativa a la situación geográfica y posición de las exposiciones en relación al suceso o peligro cubierto.
- **Vulnerabilidad**, como expresión de la sensibilidad o cuantificación del grado de pérdidas esperadas en las exposiciones por la ocurrencia e intensidad del suceso cubierto y por la localización geográfica de las exposiciones en relación a la manifestación de tal suceso.

**Medición y evaluación del riesgo**, en orden a las estimaciones de pérdida media esperada anualmente por elemento asegurado (prima pura de riesgo) y de siniestro máximo esperado (cúmulo potencial por la afectación de muchos elementos asegurados derivada de un mismo evento), en relación todo ello con las condiciones de aseguramiento, tales como la contratación obligatoria y uniforme de cobertura frente a la arbitrariedad de contratación de la misma,

la existencia de franquicias o deducibles, la definición de unidad de siniestro (delimitación temporal de las consecuencias de un evento), la existencia de límites de indemnización por suceso, etc.

### 3.3 INFORMACION TECNICA NECESARIA PARA EL ANALISIS ACTUARIAL

Todos estos componentes derivan en una casuística, que es preciso identificar para satisfacer ciertos requerimientos básicos de información sobre el riesgo y determinación de métodos de evaluación del riesgo en un análisis actuarial enfocado a coberturas de seguro. Tales requerimientos se refieren principalmente a los aspectos siguientes:

- \* La posibilidad de identificar los factores esenciales y primarios de la manifestación de los fenómenos naturales:
  - Características físicas y geológicas de los sucesos (terremoto, inundación, viento, etc.).
  - Localización de focos o puntos geográficos posibles de manifestación de los sucesos, así como la necesidad de conocer las relaciones o leyes de propagación y alcance de sus efectos.
  - Condiciones locales geográficas que inciden sobre la mayor o menor intensidad de los sucesos.
  - Circunstancias orográficas y factores físicos de interacción de sucesos simultáneos.
  
- \* La posibilidad de disponer de registros históricos sobre la manifestación de sucesos, suficientemente amplios en cuanto al período de observación y homogéneos en el tratamiento de datos, que permitan inferir:
  - La vulnerabilidad de las exposiciones ante sucesos de una intensidad dada.
  - Las características de las exposiciones afectadas por sucesos de una intensidad dada y su vulnerabilidad en orden a factores de

construcción, altura, distancia del origen del suceso, actividad, etc.

- Número y distribución espacial de las exposiciones (concentración y dispersión geográfica de los elementos expuestos al riesgo) en las distintas observaciones de sucesos ocurridos.
- \* La necesidad de establecer criterios y métodos de evaluación ajustados a las características de los sucesos.

El empleo de las técnicas actuariales clásicas, basadas en la experiencia pasada de pérdidas en cortos períodos de tiempo para la estimación del riesgo presente y futuro, no parece el método más adecuado, como única metodología de evaluación, para estimar las pérdidas debidas a fenómenos naturales. Se precisa de métodos probabilísticos y de simulación, que proyecten hacia el futuro escenarios posibles de la manifestación de estos sucesos.

#### 3.4 DEFICIENCIAS DERIVADAS DEL TIPO DE INFORMACION

Con frecuencia, la información disponible al uso no satisface los requerimientos aludidos, por lo que resulta más bien un ejercicio teórico, a modo de inventario, sobre el avance en el tipo de información mínimamente precisa a efectos de evaluación con fines aseguradores.

Junto a esto, el estado de la técnica actuarial no está exenta de limitaciones importantes, debido a la implementación de técnicas y modelos de evaluación sujetos a grandes incertidumbres que han de ser cuantificadas. Tales incertidumbres se refieren principalmente a:

- \* Incertidumbre sobre la ocurrencia de sucesos de diferente intensidad, así como sobre la expansión geográfica de sus efectos.
- \* Incertidumbre sobre la localización de sucesos posibles.
- \* Incertidumbre sobre la vulnerabilidad de las exposiciones (grado de pérdida) en función de la intensidad del suceso y distancia al punto de manifestación.

En torno a estas incertidumbres, el análisis actuarial de los riesgos de la naturaleza requiere un enfoque multidisciplinar, en el que se conjuguen los distintos grados de técnica, conocimiento e información sobre el comportamiento y manifestación de los fenómenos naturales objeto de estudio.

Dichas técnicas deben permitir acotar tales incertidumbres y servir de base a las limitaciones y estimaciones contenidas en todo análisis en relación a la peligrosidad del riesgo y la vulnerabilidad de las exposiciones. Ambos aspectos constituyen el eje fundamental de la evaluación del riesgo, junto a los otros dos componentes, de consideraciones más prácticas y operativas para el asegurador, como son el valor de las exposiciones y la localización geográfica de las mismas.

Los objetivos básicos de todo análisis actuarial deben tender a las estimaciones de primas equitativas y suficientes, en orden a las clases de exposiciones y factores de riesgos, así como a la estimación de la pérdida máxima esperada, compatible con un cierto nivel de confianza, de acuerdo a los objetivos de solvencia del asegurador.

Dentro de ese contexto, es obvio que el análisis de evaluación del riesgo requiere un modelo de gestión absolutamente dinámico, en el que se conjuguen las informaciones precisas de las cuatro componentes básicas de la evaluación (peligrosidad, vulnerabilidad, exposición y localización), de cara al refinamiento de la tarificación y estimación de la pérdida máxima esperada.

#### 4. CONSIDERACIONES ASEGURADORAS Y REASEGURADORAS

##### 4.1 Introducción

El incremento de la riqueza de los países, la evolución de los riesgos existentes y la aparición de nuevas tecnologías incrementan tanto los valores expuestos a cúmulos catastróficos que pone en dificultades, y aún superan, el potencial financiero de los aseguradores y reaseguradores. Todo ello necesita un perfeccionamiento de las bases científicas y técnicas del seguro para lograr un paraguas protector óptimo.

Ello exige, fundamentalmente, que los costes de las exposiciones sean calculados fiable y fielmente, sin que este tipo de riesgos entren en la espiral de feroz competencia desatada en casi todos los ramos del seguro en nuestros días.

Para que este tipo de riesgos catastróficos sigan siendo asegurables no existe más camino que una política técnica de suscripción que respete los parámetros intervinientes: tarifas, coberturas y reservas.

Un diagrama esquemático de la interrelación asegurador-reasegurador puede representarse según la fig. I.1 (tomado de Munich Re, 1991.)

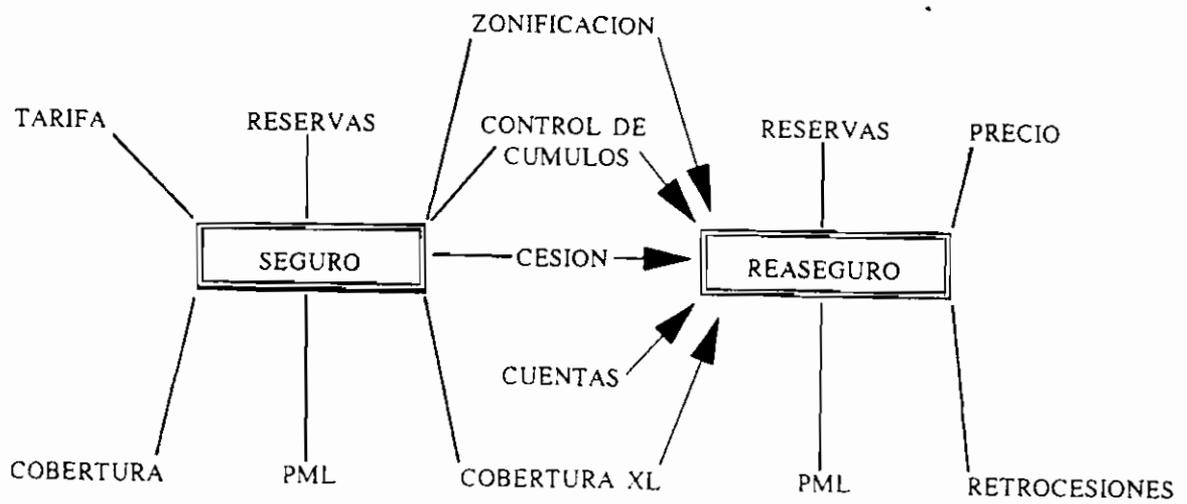


Fig. I.1 Interrelación asegurador-reasegurador. Tomado de Munich Re. 1981.

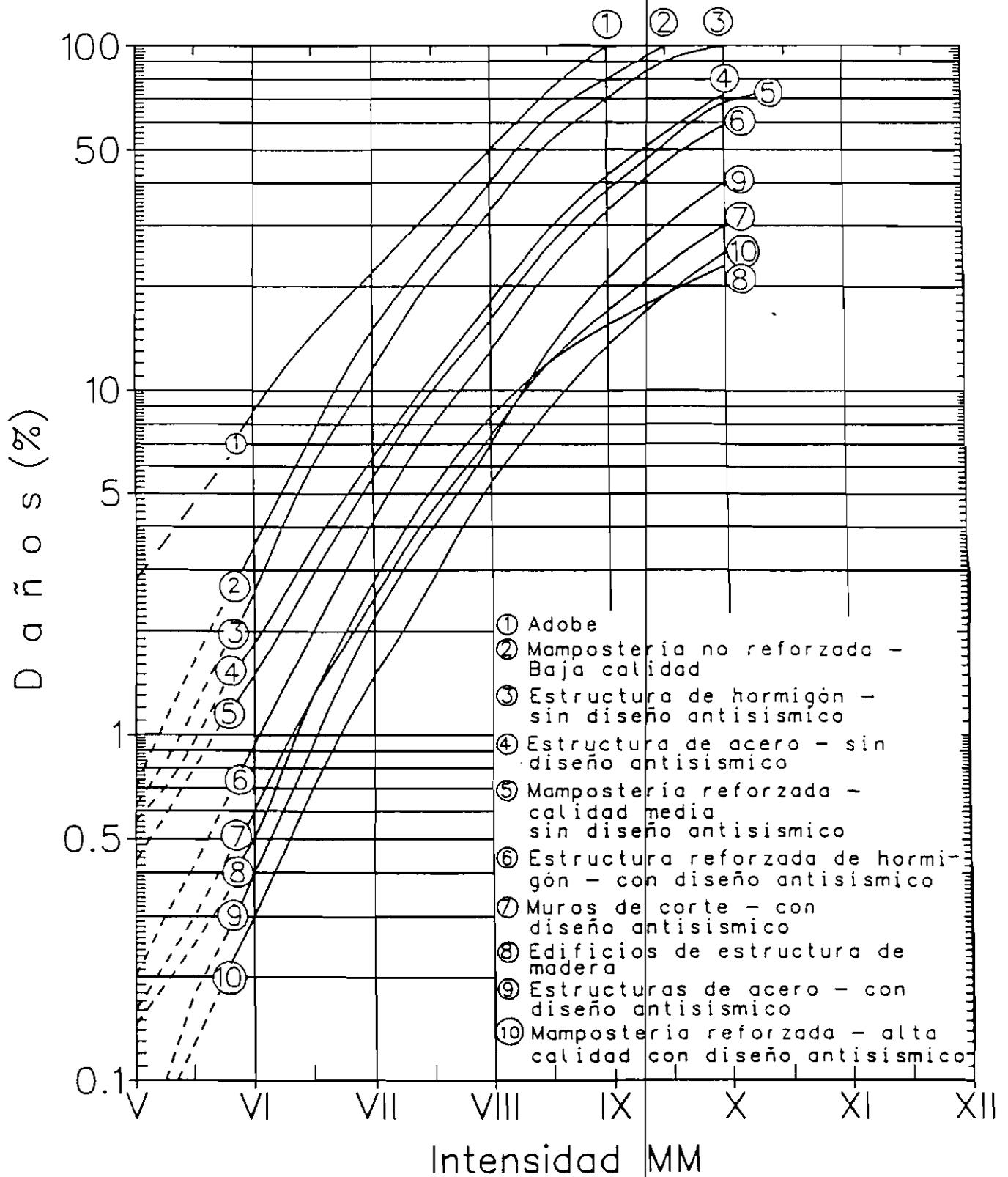


Fig. I.2 Tasas de daño promedio para edificios. Según Shah y Sauter. 1978.

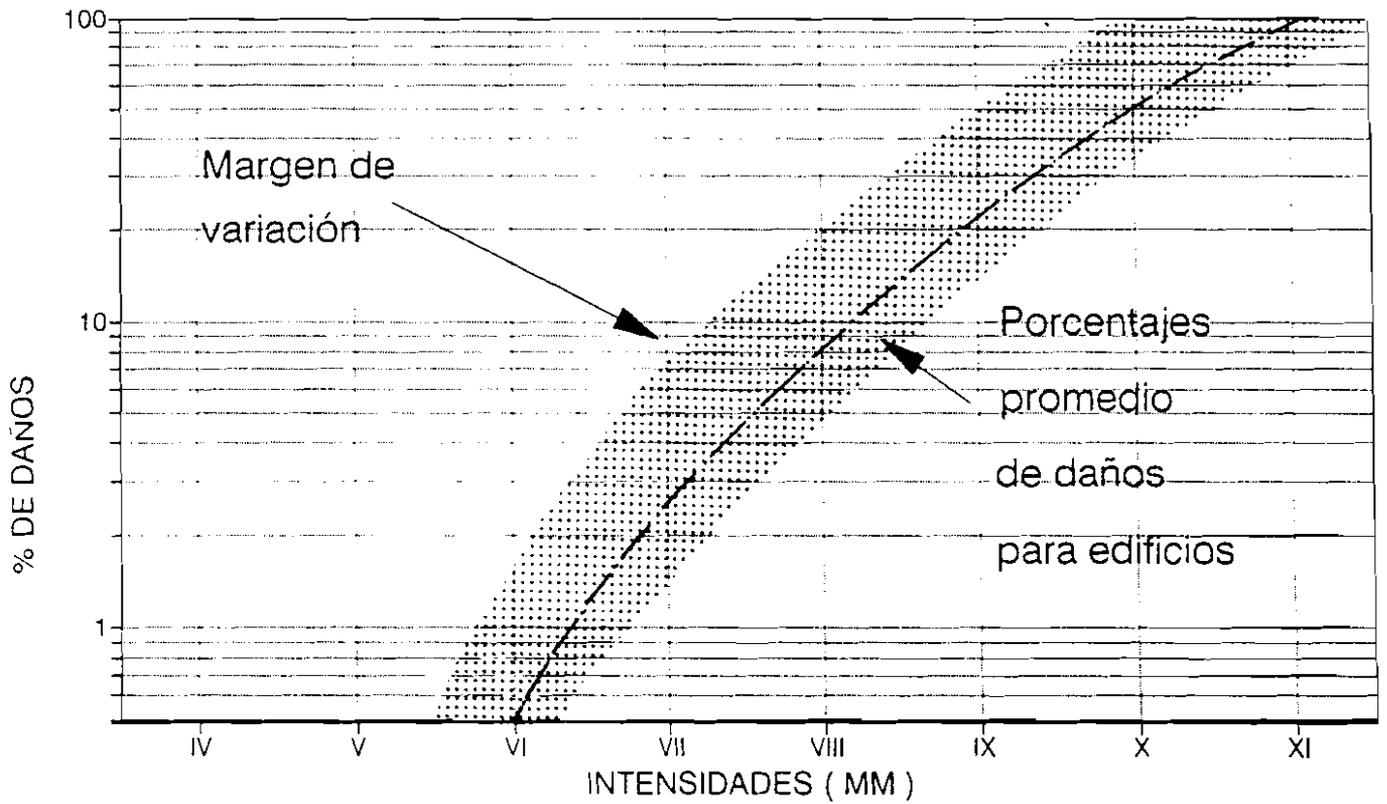


Fig. I.3 Representación del margen de variación de porcentajes de daños por terremoto. Tomado de Munich Re. 1991.

#### 4.2 Cobertura de terremoto

El fenómeno de terremoto es el más ampliamente analizado, ya que aproximadamente desde 1900 se dispone de registros científicos, pero algunas consideraciones de este fenómeno son igualmente válidas para otros eventos.

Esta historia científica permite cuantificar la vulnerabilidad de edificaciones en forma de daños promedio. Las curvas de Shah y Sauter así lo manifiestan (ver fig. I.2) o bien, de forma más simplificada como lo muestra la fig. I.3.

En base a estos datos y a los períodos de recurrencia estimados es relativamente fácil calcular la prima para una Zona y Categoría de Riesgo dada:

ZONA DE RIESGO SISMICO: 2				
CATEGORIA DE RIESGO: EDIFICIOS				
Intensidad (escala MM)	VI	VII	VIII	IX
Período de recurrencia (años)	25	70	200	350
Daño promedio esperado para la categoría de riesgo considerada	0,5%	2,5%	9%	20%
Costo promedio anual de daños	0,5 / 25	2,5 / 70	9 / 200	20 / 350
Prima de riesgo neta anual	0,1580% = 1,580‰			
<small>(sin considerar franquicias, recargos, gastos de adquisición y administración, recargos para fluctuaciones y beneficio)</small>				

Tabla I.4 Cálculo de la prima para una Zona y Categoría de Riesgo.

Si además se quieren incorporar ciertos factores correctores, y eligiendo un período de 50 años como vida útil promedio, puede estimarse, para una país subdividido en zonas, la tarifa siguiente:

Zona 0 = Intensidad máxima probable en MM	≤ V
Zona 1 =	= VI
Zona 2 = " " " "	> VII
Zona 3 = " " " "	= VIII
Zona 4 = " " " "	≥ IX

1. Prima de riesgo neta				
Categoría de riesgo	Zonas de riesgo sísmico			
	1	2	3	4
Viviendas				
Edificios	A ‰	B ‰	C ‰	D ‰
Contenido	E ‰	F ‰	G ‰	H ‰
Edificios comerciales				
Edificios	I ‰	J ‰	K ‰	L ‰
Contenido	M ‰	N ‰	O ‰	P ‰
Edificios industriales				
Edificios	Q ‰	R ‰	S ‰	T ‰
Contenido	U ‰	V ‰	X ‰	Y ‰
2. Factores de recargo				
2.1	Altura del edificio			
	1-6 pisos	1,00	1,00	1,00
	7-14 pisos	1,ab	1,ac	1,ad
	15- pisos	1,ba	1,bc	1,bd
2.2	Edad del edificio			
	anterior a 1950	1,ba	1,bc	1,bd
	1950-1970	1,ab	1,ac	1,ad
	posterior a 1970	1,00	1,00	1,00
3. Participación del asegurado				
3.1	Franquicia	x ‰		
3.2	Coaseguro	y ‰		

Tabla I.5 Cálculo de tarifa de terremoto.

Llevando las anteriores escalas gráficas a valores numéricos, tomando valores promedio y en función de determinados ajustes específicos, la siguiente tabla puede indicar los porcentajes de daño esperado en función de la Intensidad (MM), al margen del tipo de construcción:

Categoría de riesgo	Intensidad (MM)				
	VI	VII	VIII	IX	X
Viviendas y Oficinas					
Edificios	0,4%	1,7%	6%	17%	42%
Contenido	0,05%	0,3%	2%	10%	35%
Comercios					
Edificios	0,8%	3,5%	11%	27%	60%
Contenido	0,4%	2,0%	7%	23%	60%
Industrias					
Edificios	0,1%	0,7%	3%	11%	30%
Contenido	0,1%	0,7%	3%	11%	30%
Pérdida de Beneficios	0,5%	2,5%	20%	50%	80%

Tabla I.6 Porcentajes de daño por terremoto en edificaciones en función de la Intensidad.

Si el control de cúmulos no es demasiado preciso puede aplicarse un esquema más simplificado:

Categoría de riesgo	Intensidad (MM)				
	VI	VII	VIII	IX	X
Edificios	0,5%	2,5%	9%	20%	45%
Contenido	0,2%	1,3%	5%	17%	45%
Pérdida de Beneficios	0,5%	2,5%	20%	50%	80%

Tabla I.7 Porcentajes de daño por terremoto en edificaciones en función de la Intensidad sin diferenciar Edificios y Contenidos.

#### 4.3 La pérdida máxima probable (PML)

También conocida como Siniestro Máximo Estimado (SME), puede definirse como la pérdida esperada ante un evento de período de recurrencia determinado.

En primer lugar el PML de un cúmulo puede ser diferente para cada cartera de seguros, aun ante un mismo evento, pues como se ha visto anteriormente,

es función directa del tipo de riesgo, y la distribución geográfica. La adopción de un PML de "mercado" puede estar sujeta a graves errores.

En general los factores determinantes son:

- \* La distribución geográfica de los riesgos.
- \* El tipo de riesgo (sencillo, comercial, industrial).
- \* El interés asegurado (edificio, contenido, pérdida de beneficios).
- \* Factores de suscripción: franquicia y coaseguro.
- \* Y por fin lo más importante, decidir qué probabilidad de ocurrencia (período de recurrencia) corresponde a una determinada intensidad.

Los criterios de decisión pueden ser variados:

- \* En base al evento histórico máximo conocido.
- \* En base al evento más severo esperado, según consideraciones científicas.
- \* En base a la probabilidad de ocurrencia determinada, por ejemplo períodos de recurrencia de 100, 500 ó 1.000 años.

Para una cartera concreta puede determinarse el PML en función de diversos períodos de recurrencia (ver fig. I.8).

#### 4.4 Ejemplo práctico para terremoto (Tomado de Swis Re. 1989)

- \* Cartera: Pólizas de Edificios.
- \* Construcción: Hormigón (Curva 6 de Shah/Sauter).

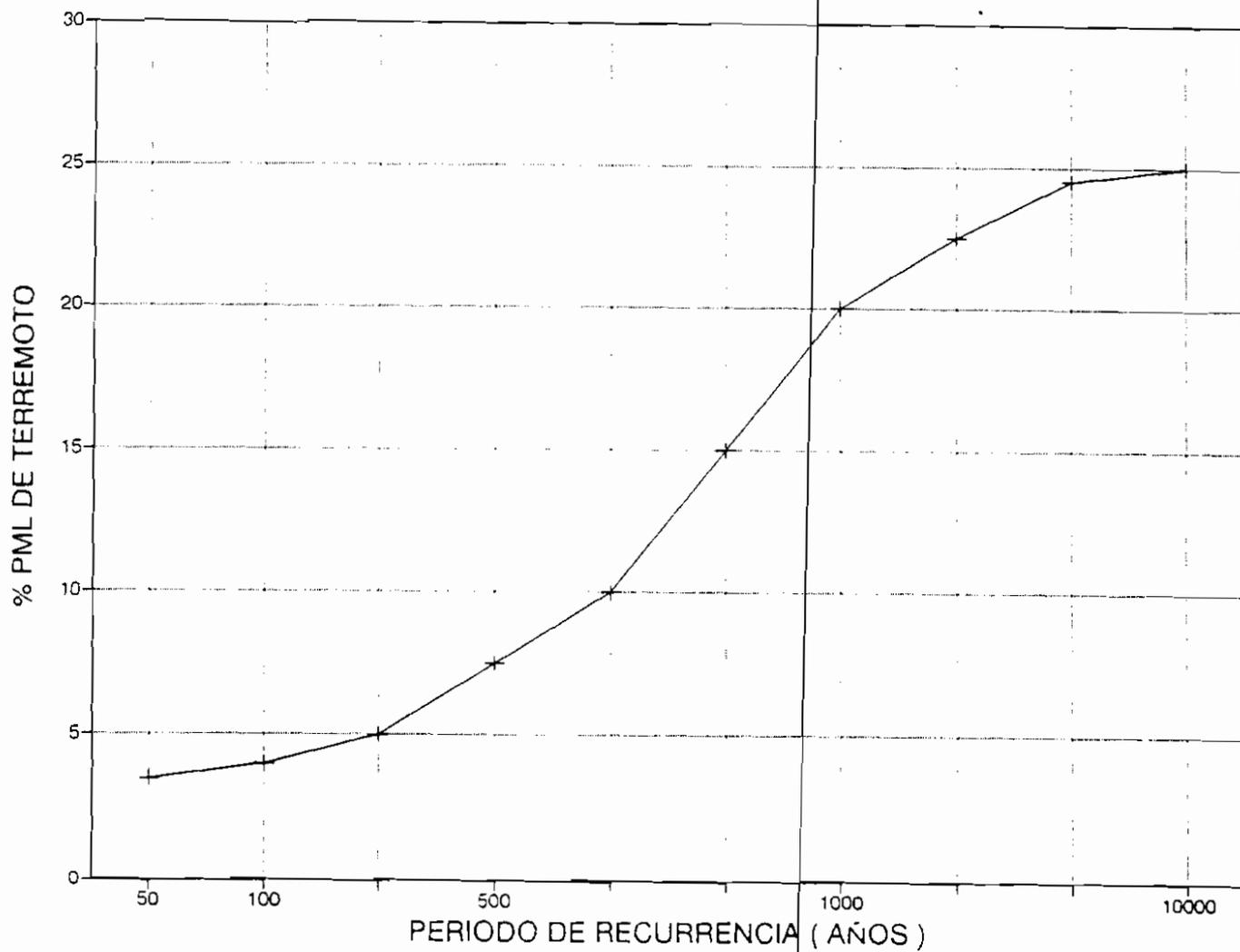


Fig. I.8 Esquema general de la relación entre el período de recurrencia y el PML por terremoto. Tomado de Munich Re. 1991.

Zona	Ciudad	% Distribución	Períodos de recurrencia en años (MM)				
			VI	VII	VIII	IX	X
1	A	15	12	36	110	340	1300
2	B	20	6	20	60	180	650
3	C	40	9	27	80	250	900
4	D	15	8	24	100	300	1100
5	E	10	10	30	90	250	800

Intensidad (MM)	VI	VII	VIII	IX	X
% de daño promedio	1	4	13	33	60

Ya se ha determinado la tasa de prima para una zona, por ejemplo para la Zona 3:

$$\text{Tasa neta de riesgo: } 1/9 + 4/27 + 13/80 + 33/250 + 60/900 = 0,62\%$$

y así igualmente para cada zona.

#### Calculo del PML

En el cálculo de PML por terremoto, como en todo cálculo de PML, es preciso imaginar un modelo de actuación.

Supongamos un terremoto de Intensidad (MM) IX con epicentro en Zona 2 (Ciudad B). Afectaría con Intensidad VIII a Zona 3 (Ciudad C) e Intensidad VII a Zona 1 (Ciudad A).

El daño total sería:

Ciudad	Intensidad	% Daño promedio	% Distribución	Total(T <sub>i</sub> )
B	IX	33	20	6,6
C	VIII	13	40	5,2
A	VII	4	15	0,6

$\Sigma T_i = 12,5$
---------------------

Este método puede repetirse cuantas veces se desee, tanto para otros escenarios, como magnitudes y epicentros. Asimismo se puede modelizar sobre el peor evento posible (histórico o científico).

Sin embargo un elemento definitivo y decisivo del cálculo de daños es la curva Siniestros - Frecuencia, puesto que la variable que no se ha tenido en cuenta en todos los cálculos anteriores es la probabilidad de que ocurra un evento determinado en un momento dado.

Para el ejemplo anterior y para total país, se tiene:

Probabilidad (H) de que ocurra un evento de Intensidad X

$$1/1300 + 1/650 + 1/900 + 1/1100 + 1/800 = H = 0,00125$$

Probabilidad (I) de que ocurra un evento con Intensidad IX

$$H + 1/340 + 1/180 + 1/250 + 1/300 + 1/250 = I = 0,00400$$

Probabilidad (J) de que ocurra un evento con intensidad VIII

$$I + 1/110 + 1/60 + 1/80 + 1/100 + 1/90 = J = 0,0111$$

Probabilidad (K) de que ocurra un evento con Intensidad VII

$$J + 1/36 + 1/20 + 1/27 + 1/24 + 1/30 = K = 0,0333$$

Representando en un diagrama de escala logarítmica estas probabilidades (frecuencias) y los daños esperados para una correspondiente Intensidad (MM), se puede obtener la fig. I.9.

Si por siniestro medio se elige aquel que se puede esperar cada 100 años (Intensidad MM VIII), resultaría una tasa de daños del 7%, pero con una probabilidad del 0.01 de que en el curso de un año puede producirse un evento de mayores proporciones.

Tal como se observa, no existen puntos de vista "correctos" o "incorrectos" sino decisiones empresariales "prudentes" o "arriesgadas". Si en lugar de 0.01 se elige una frecuencia menor (Intensidad mayor), por ejemplo 0.002, es decir una vez cada 500 años, el daño medio resultará del 13%, por lo que se necesitará más protección y el costo será mayor.

Este concepto, definido para el peligro de terremoto es igualmente aplicable a otros peligros de la naturaleza.

En resumen, el concepto de daño medio (PML o SME) puede venir configurado por el esquema de la fig. I.10.

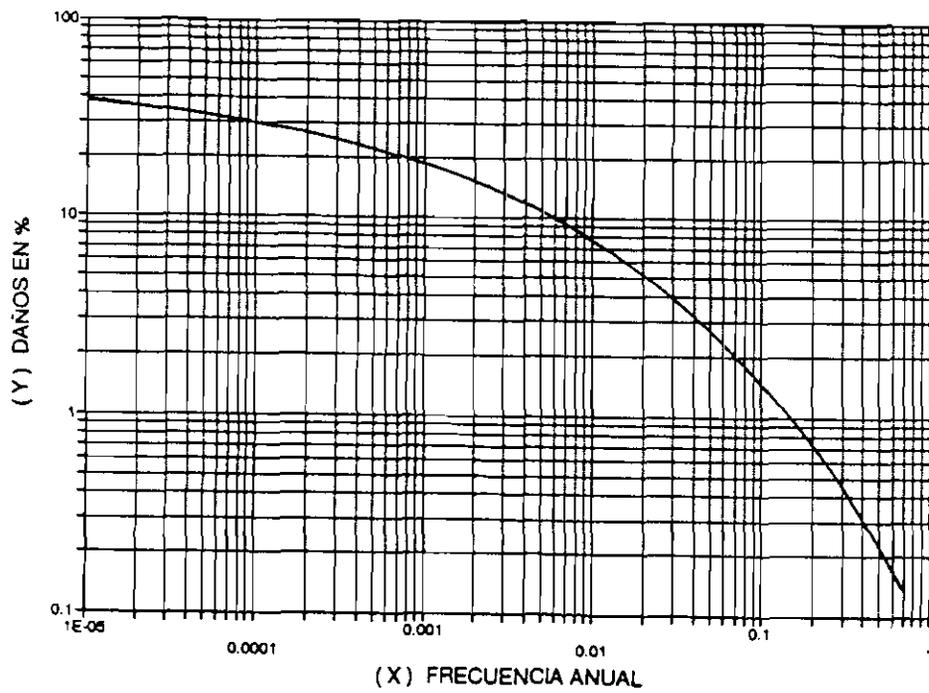


Fig. I.9 Curva de siniestros-frecuencia para el ejemplo del texto.  
 x = Frecuencia anual para alcanzar un determinado importe siniestral.  
 y = Daños en % de los valores totales asegurados.

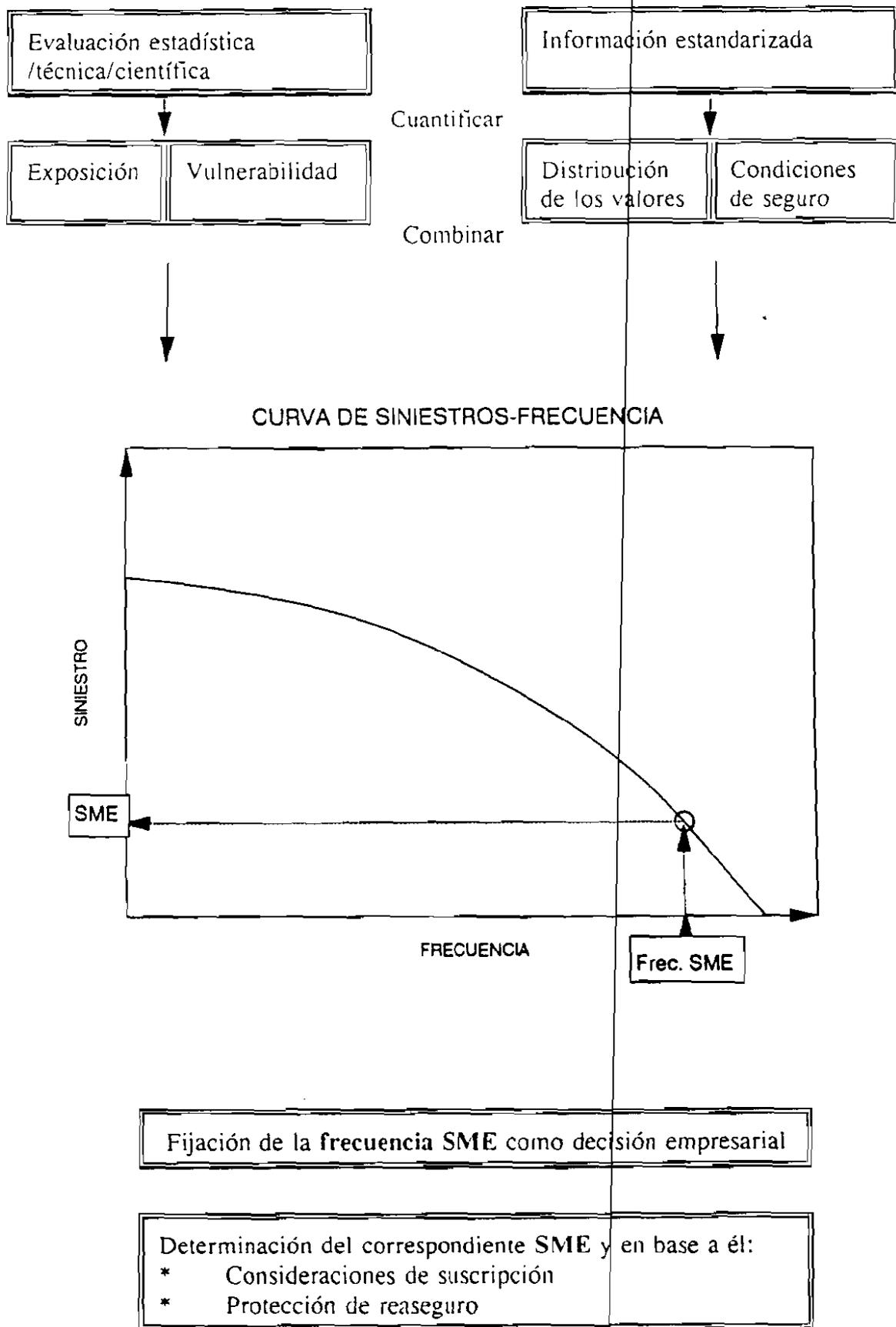


Fig. I.10 Representación esquemática del concepto de Siniestro Máximo Esperado para peligros de la Naturaleza. Tomado de Suiza de Reaseguros, 1989.

#### 4.5 Otros peligros

##### **Huracanes**

Por sus características, las tempestades de viento (Huracanes) se comportan de manera similar al terremoto (ver fig. I.11).

En la medida en que se pueda determinar la distribución geográfica de la cartera se tiene la misma situación de partida que en terremoto. Así, mediante la curva de Siniestros - Frecuencia es posible obtener el SME para huracanes.

##### **Inundaciones**

También para el peligro de inundación puede aplicarse el mismo método, si bien al examinar más detenidamente los cuatro parámetros de partida se tropieza con obstáculos aun mayores que en el caso de peligro de tempestad. El problema es muy complejo, por lo que aquí se mencionará sólo algunos aspectos:

##### Exposición:

Las inundaciones pueden originarse de muy diversas formas, por ejemplo por crecidas de ríos por lluvias intensas y por embates de las olas en lagos y en el mar. De igual forma se presenta también muy complicado el problema de la estimación de la exposición. Para el caso de avenidas de ríos por ejemplo, pueden determinarse períodos de recurrencia de alturas de crecidas o de grandes precipitaciones. La modificación por la intervención del hombre en el curso del tiempo es sin embargo, un factor de gran importancia difícil de captar.

##### Vulnerabilidad:

Para un riesgo individual puede estimarse la vulnerabilidad en función de su utilización, materiales de construcción, aberturas en el edificio, particularidades del subsuelo sobre el que éste descansa, situación, contenido, etc. También para toda la cartera pueden reunirse todas estas informaciones y clasificarse en ciertas categorías, aunque ello sería muy oneroso.

##### Distribución de los valores:

Según las condiciones locales, la exposición puede ser muy diferente en un reducido espacio, por lo que las informaciones sobre la cartera asegurada deberán estimarse de forma detallada.

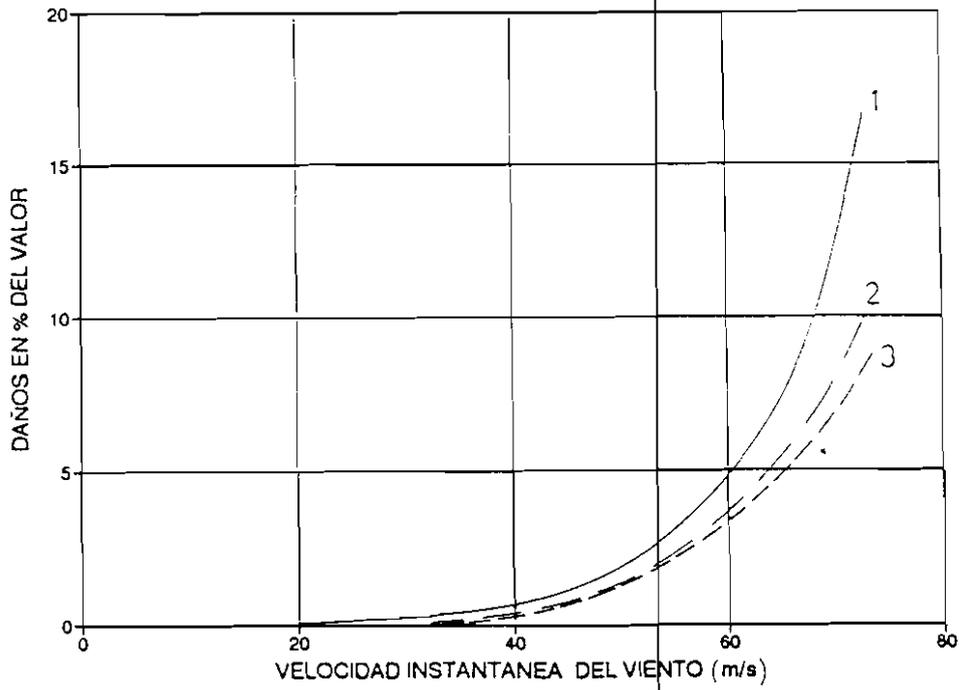


Fig. I.11 Vulnerabilidad a huracanes. Friedman 1984.  
 1 = casas unifamiliares.  
 2 = otras viviendas.  
 3 = otros edificios.

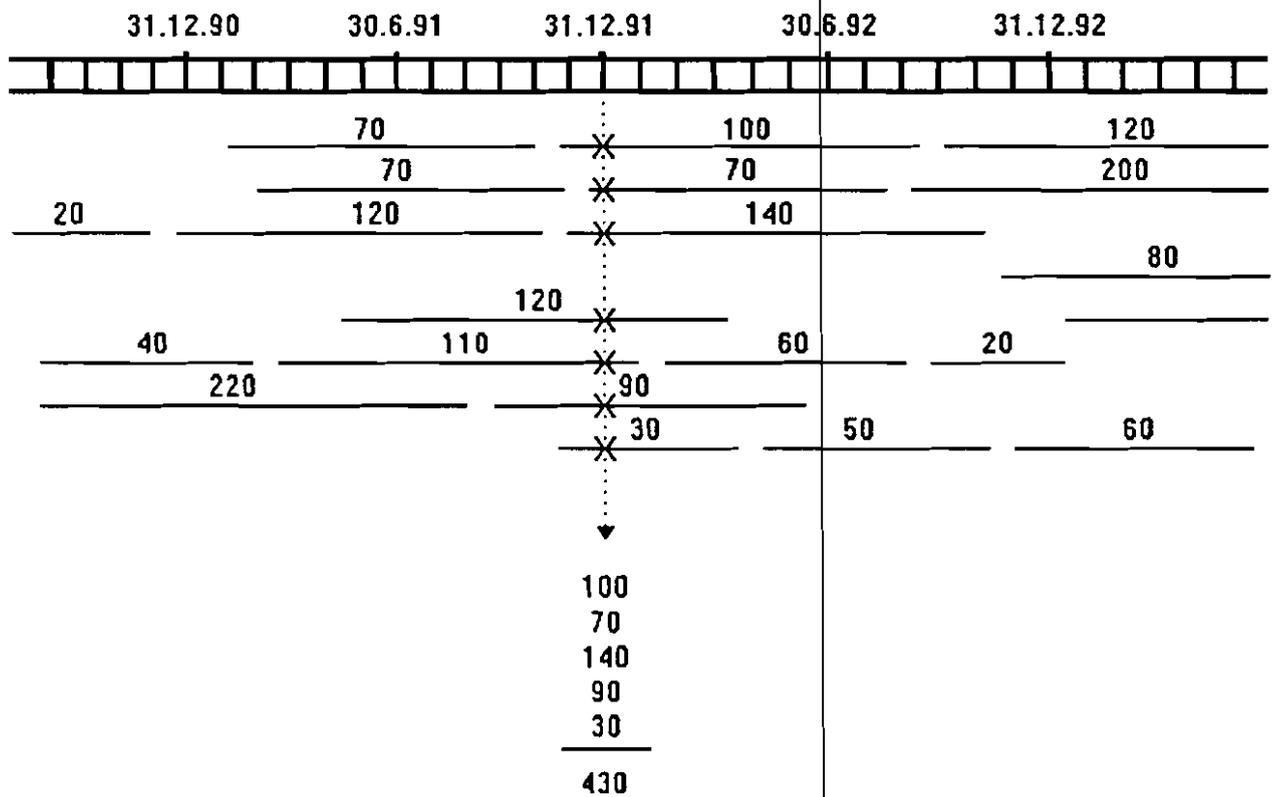


Fig. I.12 Ejemplo de control de cúmulos.

### Condiciones de seguro:

Si el seguro no es obligatorio, la antiselección desempeña un importante papel, con los efectos correspondientes en el importe de las primas de riesgo y en el potencial siniestral de un evento.

Si a pesar de estas dificultades se quiere estimar los daños de un evento siniestral, puede procederse del siguiente modo:

- \* Limitar una cuenca posiblemente afectada por una crecida de aguas.
- \* Estimar la vulnerabilidad de los intereses asegurados, a ser posible por categorías de riesgos.
- \* Evaluar datos y distribución de la cartera en base a estas categorías.
- \* Calcular con este material los daños correspondientes de un evento siniestral.
- \* En caso de ser posible, estimar una frecuencia para la crecida en cuestión.

### **Perspectivas**

Como resumen, se plantean las preguntas siguientes: ¿Cómo puede estimarse el potencial siniestral de los peligros de la naturaleza? ¿Cómo puede definirse y determinarse el PML o SME de un evento de la naturaleza?

Como se ha visto, para responder a estas cuestiones se ha de reducir a cifras los cuatro elementos principales: exposición, vulnerabilidad, distribución de valores y condiciones de seguro, para poder combinarlos entre sí. En el caso ideal se obtiene una relación que determina con qué frecuencia se habrá de contar con un evento siniestral de una cierta cuantía. Un valor SME derivado de esta base será una medida muy significativa, gracias a la clara situación de partida y a la frecuencia de ocurrencia determinada.

Para el peligro de terremoto puede aplicarse muy bien este concepto. De todos modos, la calidad de los resultados de éstos cálculos dependerá de la calidad de los datos de partida. En muchos mercados, las cifras de cúmulos de peligro de terremoto se estiman bastante inexactamente o de una forma incompleta; los períodos de recurrencia y las tasas de daño se basan en parte en informaciones o en experiencias insuficientes, y las condiciones de seguro en cuanto al peligro de terremoto son a menudo poco claras, pues apenas han sido sometidas a prueba en un "caso real". Por esta razón, para estimar aun mejor la exposición a terremoto en el futuro se procurará, dentro del concepto descrito, dotar de mayor solidez a las bases de partida.

En comparación con el peligro de terremoto, la estimación de los peligros de tempestad y de inundación está un paso más atrás. Los elementos de partida son menos calculables que en el caso de terremoto, y además algunos factores adicionales como las variaciones transitorias de la exposición desempeñan un papel esencial. La vinculación de los daños de eventos siniestrales a las frecuencias de suceso es sólo posible en una medida limitada. Así, también en este campo existen muchas posibilidades para futuros trabajos de desarrollo.

#### 4.6 Zonificaciones

En la práctica, suelen surgir errores de interpretación, por lo que es preciso diferenciar perfectamente los siguientes conceptos:

\* Zonas de riesgo / zonas de tarificación.

Son zonas de igual peligrosidad para las cuales básicamente rigen las mismas primas de riesgo.

\* Zonas de cúmulo por evento.

Area geográfica que se supone es afectada con daños por un evento hipotético y que se emplea para cálculos específicos de PML y acumulaciones.

\* Zonas de control de cúmulos.

Son zonas de pequeña extensión dentro de un país empleadas para el registro y control de las responsabilidades acumuladas.

\* Zonas de límite de cesión.

Son zonas para las cuales rigen los límites acordados en los contratos de reaseguro proporcional.

#### **Zonas de riesgo / zonas de tarificación**

Mediante la división de un territorio en zonas de riesgo se identifica la probabilidad de daños a largo plazo (períodos de recurrencia, intensidad, etc.). La zona de riesgo constituye un instrumento esencial para la tarificación.

En la práctica las zonas de tarificación suelen diferir ligeramente de las zonas de riesgo científicamente determinadas, dado que las primeras deben ajustarse

también a las estructuras organizativas de los aseguradores. Tales desviaciones pueden aceptarse si se trata de diferencias mínimas.

### **Zonas de cúmulo por evento**

Estas zonas corresponden a las regiones dañadas por posibles eventos. Su extensión se orienta en base a datos concretos de eventos anteriores y criterios científicos.

Para ello se toman en cuenta, sobre todo, las condiciones fenomenológicas dentro de una región determinada, así como los datos históricos.

En circunstancias favorables es posible establecer zonas de cúmulo por evento claramente definidas, ya sean en base a las condiciones existentes o por la concentración de valores asegurados en determinadas regiones.

En otros casos habrá que partir de diversos escenarios que, eventualmente, pueden producir zonas de cúmulo por evento que se intersecten entre sí.

De lo anterior pueden surgir evaluaciones muy diversas. Las evaluaciones se orientarán en cada caso por la composición de la cartera (distribución geográfica, tipo de riesgos, efectos sobre objetos determinados, p.ej..., el efecto sobre edificios de gran altura) y por la política, más o menos prudente, de suscripción del asegurador.

En la selección de las zonas de cúmulo el asegurador deberá prever suficiente flexibilidad para poder adaptarse a los cambios estructurales y de concentración de valores que puedan presentarse con el devenir del tiempo.

### **Zona de control de cúmulos**

Para poder controlar las responsabilidades dentro de las distintas zonas de cúmulo por evento, es necesario determinarlas por pequeñas regiones perfectamente delimitadas (zonas de control de cúmulos). Sólo la información así obtenida y actualizada periódicamente permite al asegurador calcular con exactitud la responsabilidad asumida dentro de la zona de cúmulo por evento por él definida y ajustar su política de suscripción a las realidades existentes.

Es muy importante que la división de un país en zonas de control de cúmulos sea lo más detallada posible, sobre todo en regiones con una elevada concentración de valores y responsabilidades. Para este fin pueden resultar útiles las divisiones políticas o administrativas del país o incluso sus códigos postales.

La subdivisión de un país en zonas de control de cúmulos permite formar cualquier zona de cúmulo por evento mediante la composición selectiva de tales zonas de control.

La elección de zonas pequeñas de control de cúmulos tienen la siguiente ventaja: en la estimación de la pérdida máxima probable correspondiente a una zona de cúmulo por evento, es factible llegar a una diferenciación del PML, teniendo en cuenta la distribución geográfica de los valores. Ello se obtiene en función de la supuesta distribución de intensidades de daño.

Un sistema unificado de zonificación cuya aplicación sea obligatoria a nivel general constituye la condición previa para el control de cúmulos en un mercado determinado. Su importancia es igualmente grande tanto para el asegurador directo como para el reasegurador.

### Zonas de límite de cesión

Siempre que en el reaseguro proporcional esté previsto un límite de cesión, habrá que definir exactamente la región a la cual se refiere dicho límite.

Frecuentemente, un país entero es considerado como una sola zona de límite de cesión. En países particularmente grandes o expuestos, en cambio, se practica una distribución en varias zonas: ello resulta de diferencias regionales en cuanto a la exposición o bien de alguna concentración especial de valores.

Las zonas de límite de cesión no coincidirán necesariamente con las zonas de cúmulo por evento.

#### 4.7 Control de cúmulos

De los diversos sistemas posibles: Cartera a la fecha de costes, Cartera a una fecha más nueva Producción menos Anulaciones, Idem más suplementos, el sistema más correcto es el de Cartera a la fecha de costes, tal como se indica en el Ejemplo (Munich Re. 1991).

## 5. DESARROLLO DEL ESTUDIO

El Estudio comenzó a desarrollarse a partir del 1 de Enero de 1991. La primera fase consistió en la búsqueda de fuentes de documentación y de bibliografía. A continuación se planificó la forma de adaptar la información científica a los objetivos y necesidades que plantea el seguro y el reaseguro. Seguidamente se comenzó a proyectar gráficamente en forma de mapas las primeras aproximaciones a la solución

de los problemas. Las fórmulas aseguradoras y las aplicaciones informáticas son consecuencia de las soluciones y decisiones adoptadas.

Durante la primavera se hicieron presentaciones del Estudio a nivel interno para comprobar que la trayectoria escogida seguía las líneas de trabajo del sector asegurador y reasegurador. En el período estival se realizaron sendas presentaciones ante el Comité Técnico de Corporación Mapfre, el plenario de la Unidad Reaseguro de Corporación Mapfre y el Grupo de Trabajo sobre el Proyecto del Nuevo Reglamento del Consorcio de Compensación de Seguros, con comentarios, en general positivos. En las jornadas del ENTRE 91 celebradas por el INESE, Luis de Mingo expuso las líneas generales del Estudio como una forma de planificación y control de los riesgos de la naturaleza en España.

El día 9 de Octubre de 1991, coincidiendo con el Día Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, se hace público el Estudio a la sociedad española, personificada en los agentes científicos y económicos, con el fin de que sea objeto de análisis, pauta, reflexión y punto de partida de cualquier camino o conclusión que se pretenda elegir para las resolución de los gravísimos problemas que plantean y plantearán los Riesgos de la Naturaleza en España.

El próximo objetivo alcanza los niveles internacionales, y será la aportación al MEETING CRESTA 92 en forma de comunicación, para que las propuestas que se hacen en el Estudio sean avaladas a nivel de la comunidad internacional de reaseguro.

## 6. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO

Las principales conclusiones de tipo **TECNICO** a las que se ha llegado tras la realización de este Estudio son:

1. Existe gran cantidad de información dispersa y heterogénea sobre los peligros de la Naturaleza que ha sido necesario recopilar, analizar y adaptar a los objetivos del Estudio.
2. El Estudio se centra en el análisis de los peligros de terremoto, inundación y viento, escogidos tras decidir cuales tienen mayor impacto económico y social en nuestro país.
3. La fuente principal de información técnica sobre terremotos en el territorio español es el Instituto Geográfico Nacional, a cuyo cargo está la vigilancia de la Red Sísmica Nacional y posee todos los datos disponibles sobre movimientos sísmicos en la Península Ibérica, Islas Baleares, Islas Canarias, Norte de Africa y Sur de Francia.
4. La fuente principal de información técnica sobre inundaciones en la Península Ibérica es la documentación que acompaña los Planes Hidrológicos

elaborados por la Dirección General de Obras Hidráulicas a través de sus Confederaciones Hidrográficas.

5. La fuente principal de información técnica sobre vientos en el territorio español es la base de datos del Instituto Meteorológico Nacional y del Instituto de Energías Renovables del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
6. A la vista de la información disponible, la máxima intensidad de terremoto (M.S.K.) que se puede registrarse en España oscila entre IX y X, y se localiza sobre la ciudad de Granada y parte de su provincia. Hay la posibilidad de que factores negativos locales (p.e. subsuelo) puedan agravar en algunas zonas las consecuencias de terremotos de las características citadas. Para un período de retorno de 100 años, la máxima intensidad esperable para esta misma zona está entre VII y VIII. Existen además otras regiones que, aunque están dentro de la sismicidad moderada que caracteriza a todo el territorio español, pueden sufrir los efectos de terremotos de entre V y VIII como es gran parte de Andalucía, Murcia y parte del Pirineo.
7. A la vista de los registros de inundaciones históricas, es evidente que tras la puesta en marcha de planes de prevención y construcción de grandes obras de infraestructura, los efectos de las inundaciones han sido sensiblemente reducidos. No obstante, el progreso ha introducido nuevos factores de riesgo, materializados principalmente en las nuevas vías de comunicación, ya que en algunos casos cruzan las vías naturales de evacuación y es precisamente en estos puntos donde normalmente surgen problemas. Existen además, cuencas fluviales que, por sus características morfológicas y algún factor añadido (condiciones meteorológicas locales, asentamientos poblacionales, etc) resultan prácticamente irregulables por medio de presas, embalse o diques (por ejemplo la cuenca del río Guadalentín, afluente del Segura).
8. Los datos de velocidades de viento obtenidos, permiten afirmar que no hay ninguna provincia en el territorio nacional exenta de riesgo de rachas de viento superiores a los 96 km/h. En cuanto a los observatorios continentales del interior, las máximas de viento se presentan en verano asociadas a fuertes turbonadas y rachas que acompañan a las nubes tormentosas. En los observatorios cercanos a la costa Cantábrica, los máximos suelen presentarse en invierno, mientras que en las zonas costeras del Mediterráneo, los máximos se registran en primavera y/o otoño.
9. Las limitaciones de la calidad de la información vienen dadas por las características de la información recogida. El Estudio ha aportado nuevas metodologías de trabajo y de tratamiento de datos útiles para las empresas aseguradoras y reaseguradoras.

Las principales conclusiones de tipo **ACTUARIAL** a las que se ha llegado hasta este momento son:

1. A los efectos de análisis y evaluación de riesgos es necesario un enfoque **interdisciplinario** que cubra las siguientes áreas de estudio:
  - \* Análisis de riesgos y evaluación
  - \* Condiciones de cobertura y tarificación
  - \* Control de pérdidas potenciales y acumulaciones
  - \* Evaluación de siniestros, prevención de pérdidas y recuperación rápida de actividades
  - \* Acciones preventivas
  
2. Con carácter general, los principales factores ambientales que inciden sobre la evaluación de riesgos, una vez conocido el tipo, número y distribución geográfica de los objetos o personas expuestos al riesgo, son:
  - \* Características físicas de los sucesos (terremoto, inundación, etc)
  - \* Condiciones geográficas locales
  - \* Grado de daño del objeto expuesto al riesgo ante un suceso
  
3. Los principales objetivos de la evaluación del riesgo son:
  - \* La cuantificación de la catástrofe potencial
  - \* La estimación de la pérdida máxima esperada probable
  
4. Los requerimientos principales para poder tarificar son:
  - \* Un período de observación amplio
  - \* Consideración de factores posicionales y estructurales para la evaluación del riesgo
  - \* Determinación de áreas de exposición al evento natural
  
5. Las dificultades principales que se encuentran al tarificar son:
  - \* Ausencia de una información completa y selectiva
  - \* Alteración con el tiempo de número de expuestos al riesgo e intensidad de los fenómenos
  - \* Alteración de las condiciones geográficas
  
6. Mantener un **modelo dinámico de gestión y evaluación** de los riesgos de la naturaleza implica las siguientes labores:
  - \* Control de acumulación, estimación de pérdidas y alimentación de bases de datos con información fiable y actualizada
  - \* Control sobre suscripción y retenciones

- \* Conocimiento de la experiencia de la siniestralidad y aplicación de la misma
- \* Evitar infratarificaciones durante períodos de bonanza de resultados
- \* Buen cálculo y gestión de la reserva de primas y siniestros
- \* Facilitar la información y explotación de datos con fines internos.



\*Cuentan que en una ocasión dos ingleses estaban durmiendo al raso cuando se produjo un violento temblor, pero ellos, sabedores de que no había peligro, no se levantaron, lo que provocó la indignación de la gente, la cual empezó a gritar: "Mirad a esos herejes: ni siquiera se levantan de la cama".

VIAJE DE UN NATURALISTA (1840-1846)  
CHARLES R. DARWIN.

## TERREMOTOS

### INTRODUCCION

Los terremotos han sido desde la más remota antigüedad uno de los mayores azotes del hombre. En el mundo antiguo los terremotos eran considerados como manifestaciones de la "ira de los dioses", que era necesario apaciguar mediante sacrificios, rezos y plegarias. Muy a menudo se consideraba que el Ser responsable de los terremotos vivía en las profundidades o era el que sostenía la Tierra. Según la mitología griega, Poseidón era el dios de las tempestades marinas que sacudían la Tierra. Para el filósofo griego Aristóteles, la explicación del origen de los terremotos es que estos eran provocados por los vientos retenidos en el interior de la Tierra. Ciertas creencias chinas concebían los terremotos como el balance de fuerzas entre el "Ying" y el "Yang". Los sismos eran provocados cuando el Yang era vencido por el Ying. En las islas Célibes creían que un inmenso cerdo ocasionaba los terremotos cuando se rascaba contra una gigantesca palmera, mientras que los Lamas de Mongolia creían que la Tierra descansaba en las espaldas de una gigantesca rana y los terremotos se producían cuando ésta se movía. En Japón se creía que los movimientos de la Tierra eran debidos a un gigantesco barbo llamado "Namazu". Algunas tribus hindúes creían que la Tierra estaba sostenida por elefantes que se apoyaban sobre una tortuga, encarnación del dios Visnhú, el cual descansaba sobre una cobra, símbolo del agua y los terremotos se producían cuando los elefantes perdían el apoyo (ver fig. 1.)

Sea cual fuese, todas las civilizaciones han buscado una u otra explicación para justificar la inestabilidad del suelo que se hallaba bajo sus pies. Hoy en día se cree en la inmovilidad y estabilidad pétreo del suelo, y sería impensable que al producirse un terremoto, el suelo empezase a temblar y quebrarse con todo lo que sustenta, destruyendo la concepción subconsciente estable del mundo. En breves instantes crearía un sentimiento de inseguridad que horas de reflexión no podrían producir. El hombre se siente débil e indefenso ante esta impresionante demostración de fuerza de la naturaleza. La destrucción que se produce en una sociedad puede llegar a ser total, ya que se sabe que desde tiempos históricos millones de personas han muerto no sólo por el terremoto en sí, sino además por sus efectos secundarios: tsunamis, incendios, epidemias y hambre que suelen seguir a la catástrofe.

En nuestros días, gracias a los avances de los sistemas de información, radio y televisión, son bien conocidos los efectos que sienten las poblaciones afectadas por tales catástrofes y la colaboración internacional que se les ofrece. Hoy en día se sabe, por las investigaciones científicas que se realizan, que existen zonas en nuestro planeta en las que el riesgo de que se produzca un terremoto es elevado, siendo habitualmente zonas con grandes concentraciones humanas y de bienes materiales. Un terremoto intenso puede llegar a

arruinar la economía de algunos países en breves instantes; por ello, son necesarios más y mejores estudios sobre este tema para intentar reducir el número de víctimas y daños materiales que se producirán en el futuro.

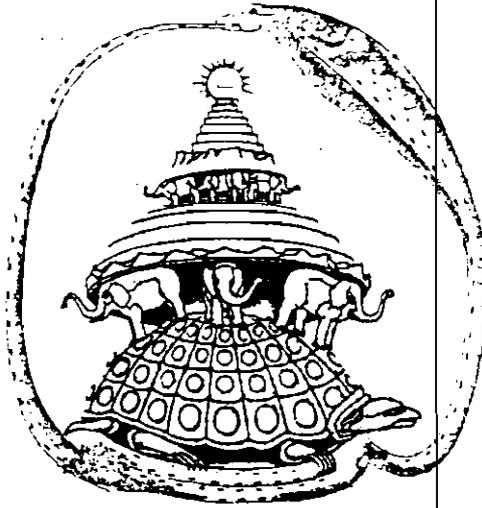


Fig. 1 Concepción de una tribu hindú sobre la tierra.



# TERREMOTOS

## CAPITULO 1. DINAMICA TERRESTRE

### 1.1. TECTONICA GLOBAL

La Tierra no es un cuerpo frío e inerte como el satélite terrestre, la Luna. La Tierra es un sistema activo que sufre deformaciones bajo la acción de las fuerzas que actúan sobre él. Constituye por sí mismo un sistema complejo que no cabe reducir a un esquema simplista de fuerzas elementales y grandes masas. Algunos científicos se sienten tentados a considerar la Tierra como un organismo vivo. En ella se ofrece una rica diversidad, tanto por aquello que se puede observar en la superficie del planeta como por lo que se intuye en su interior.

El modelo que intenta globalizar en la actualidad las teorías más recientes en Geología se denomina "Tectónica Global" y abarca los conceptos de Expansión de los Fondos Oceánicos, Deriva Continental y Tectónica de Placas. Esta hipótesis es muy reciente ya que no tiene más de treinta años, pero la idea es antigua pues el filósofo inglés Francis Bacon en 1620 hizo una de las primeras observaciones entre la gran similitud que existía a lo largo de los contornos de la costa Este del continente sudamericano y la del Oeste del continente africano. Estas observaciones, en su tiempo, no pasaron de ser meras curiosidades (ver fig. 1.1).

La teoría que precedió a la actual Teoría de la Tectónica Global fue propuesta en 1912 por un científico alemán, Alfred Wegener. Su teoría decía que los continentes se habían desplazado sobre la superficie de la tierra hasta encontrarse en sus posiciones actuales. En palabras del propio Wegener: *".... la primera idea del desplazamiento de los continentes se me ocurrió ... cuando, al estudiar el mapa de la Tierra, me impresionó la perfecta congruencia de las costas de ambos lados del Atlántico"* (A. Wegener 1924).

Wegener propuso que hace 180 millones de años durante el período Jurásico, existía un único continente, "Pangea" (en griego significa "todas las tierras"), rodeado de un único océano: el "Pantalassa". El ancestro del Mediterráneo era el Thetys; formaba entonces una gran bahía que separaba parcialmente Africa de Eurasia. Mediante un mecanismo que denominó Deriva Continental, Wegener explicaba cómo los continentes se desplazaron sobre la superficie del planeta hasta sus posiciones actuales (ver figs. 1.2, 1.2 y 1.4).

En 1930 en su cuarta expedición a Groenlandia, Wegener desapareció y con ello sus ideas cayeron en el olvido.

Tuvieron que pasar otros treinta años para que en la década de los 60 la idea de la Deriva Continental renaciera y cobrara fuerza con los últimos descubrimientos en geología. La Teoría de Tectónica de Placas propone un modelo dinámico según el cual la capa más externa de la Tierra (litosfera) está formada por una docena de placas que están en continuo movimiento unas con respecto a otras y en los límites de las placas se localizan la mayor parte de la actividad sísmica, tectónica y magmática del planeta (ver figs. 1.5 y 1.6).

La litosfera "flota" sobre otra capa: la astenosfera. La litosfera, o capa dura comprende la corteza y parte del manto superior. Tiene un espesor variable que depende de lo que se llama "equilibrio isostático", es decir, el nivel en el cual el peso de la litosfera está equilibrado con la presión del manto. Este espesor es variable, ya que va desde los 5 kilómetros bajo los océanos y alrededor de 100 kilómetros bajo los continentes.

La astenosfera, o capa blanda, es una capa de algunos centenares de kilómetros de espesor y es mucho más viscosa que la litosfera, pero parece ser que las propiedades de la astenosfera no son homogéneas y es preciso distinguir varias "capas" de propiedades ligeramente diferentes. De cualquier forma, el componente de la astenosfera reacciona de diferente forma que la litosfera ya que en ella no se producen roturas por su comportamiento dúctil.

La Tectónica de Placas establece que el movimiento de las placas es consecuencia del movimiento del manto, ya que se supone que existen en él corrientes convectivas que se encargan de la regeneración del manto. Los actuales estudios sísmicos proporcionan pruebas importantes a favor de la existencia de estos flujos.

Por muy académico que pueda parecer, no se debe despreciar la importancia del estudio de los movimientos de las placas corticales, ya que sirven para dar una visión esclarecedora del por qué de los terremotos y su distribución sobre el planeta.

Los terremotos no se encuentran al azar sino que se localizan en zonas muy concretas: **bordes de placas** (cinturón Pacífico y dorsal centrooceánica), **zonas de colisión intercontinental** (Himalaya) y **zonas intraplaca** (China). Es por tanto necesaria la confección de mapas sísmicos fiables que contribuyan al conocimiento de nuestro planeta.

## 1.2. ESPAÑA EN EL CONTEXTO DE LA TECTONICA DE PLACAS

La Península Ibérica se encuentra en la parte más occidental del continente Euroasiático. Por ello, la dinámica de la Península está afectada por los movimientos relativos de tres placas: la Americana, la Euroasiática y la Africana.

Entre la placa Euroasiática y la placa Africana existe una zona lineal de compresión desde Gibraltar a Sicilia, resultado del movimiento convergente entre ellas. Por lo tanto, España se puede englobar en un área de nivel moderado de sismicidad (Udías, 1983). La Península es una zona de peligro de terremotos importantes aunque sin llegar a alcanzar el nivel de otras zonas de Europa tales como Italia o Grecia. En España los terremotos destructores con intensidades mayores que VII no son muy frecuentes, siendo los más numerosos los de intensidad baja y media (III a IV).

Como se puede observar en la figura 1.7, la actividad sísmica en la Península Ibérica se concentra principalmente en el Sur, en los Pirineos y la región catalana. También se han registrado terremotos en otras zonas con menor frecuencia e intensidad. Se ampliará más información en el capítulo referente a la sismicidad en España.

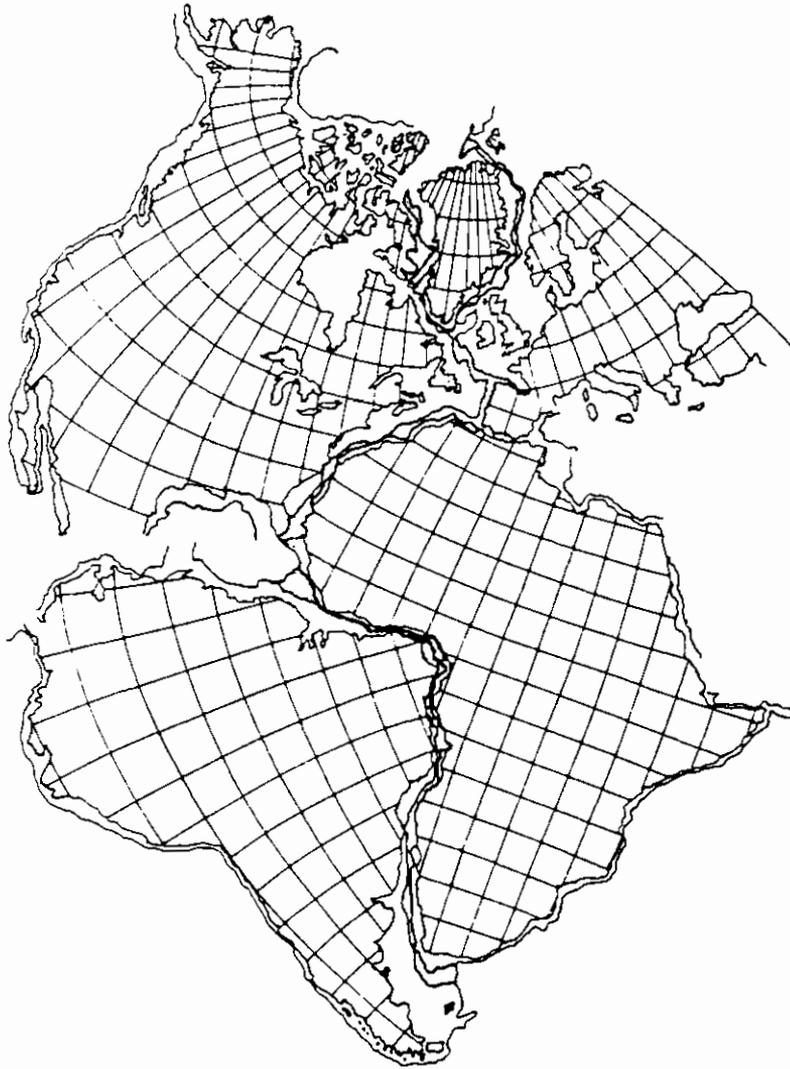


Fig. 1.1 Ajuste de los continentes antes que se abriera el Atlántico. Según Bullard.

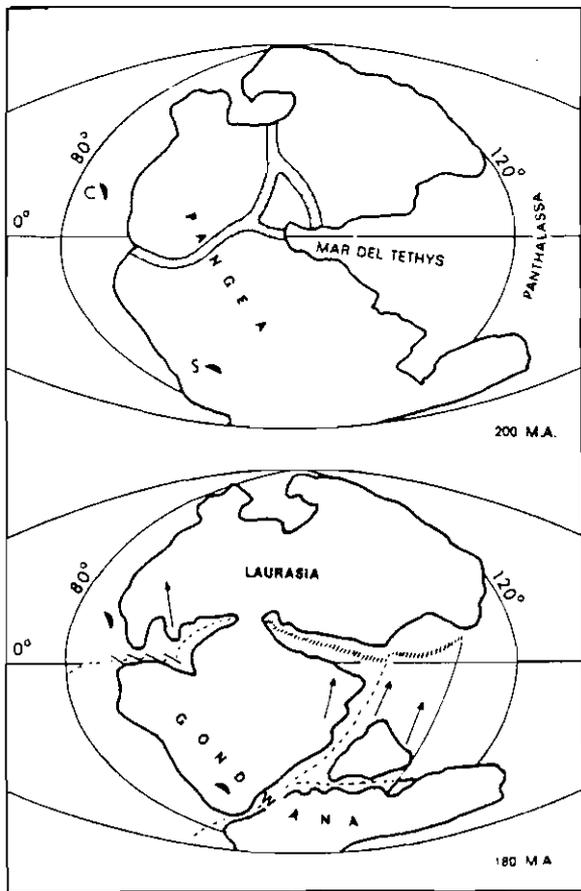


Fig. 1.2

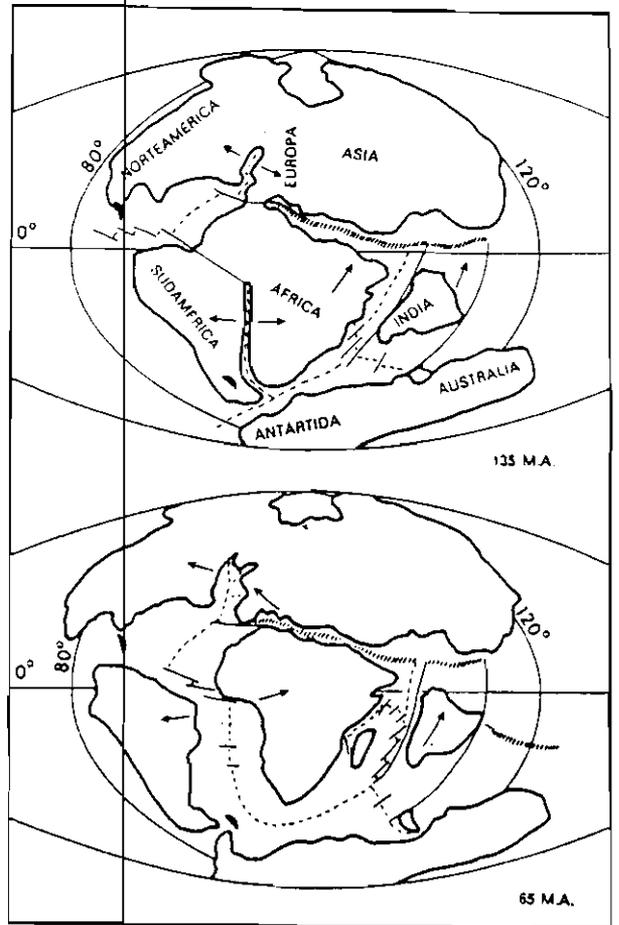


Fig. 1.3

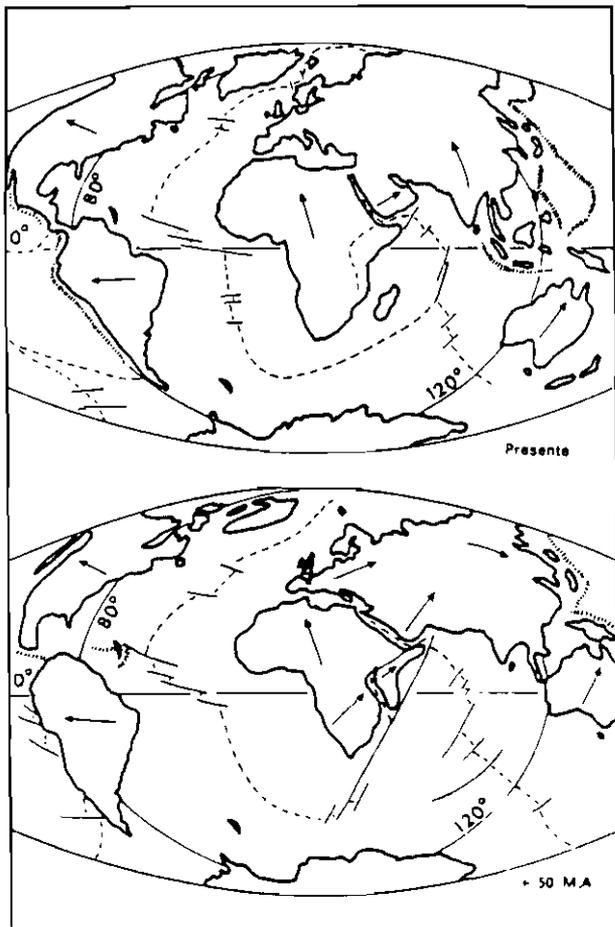
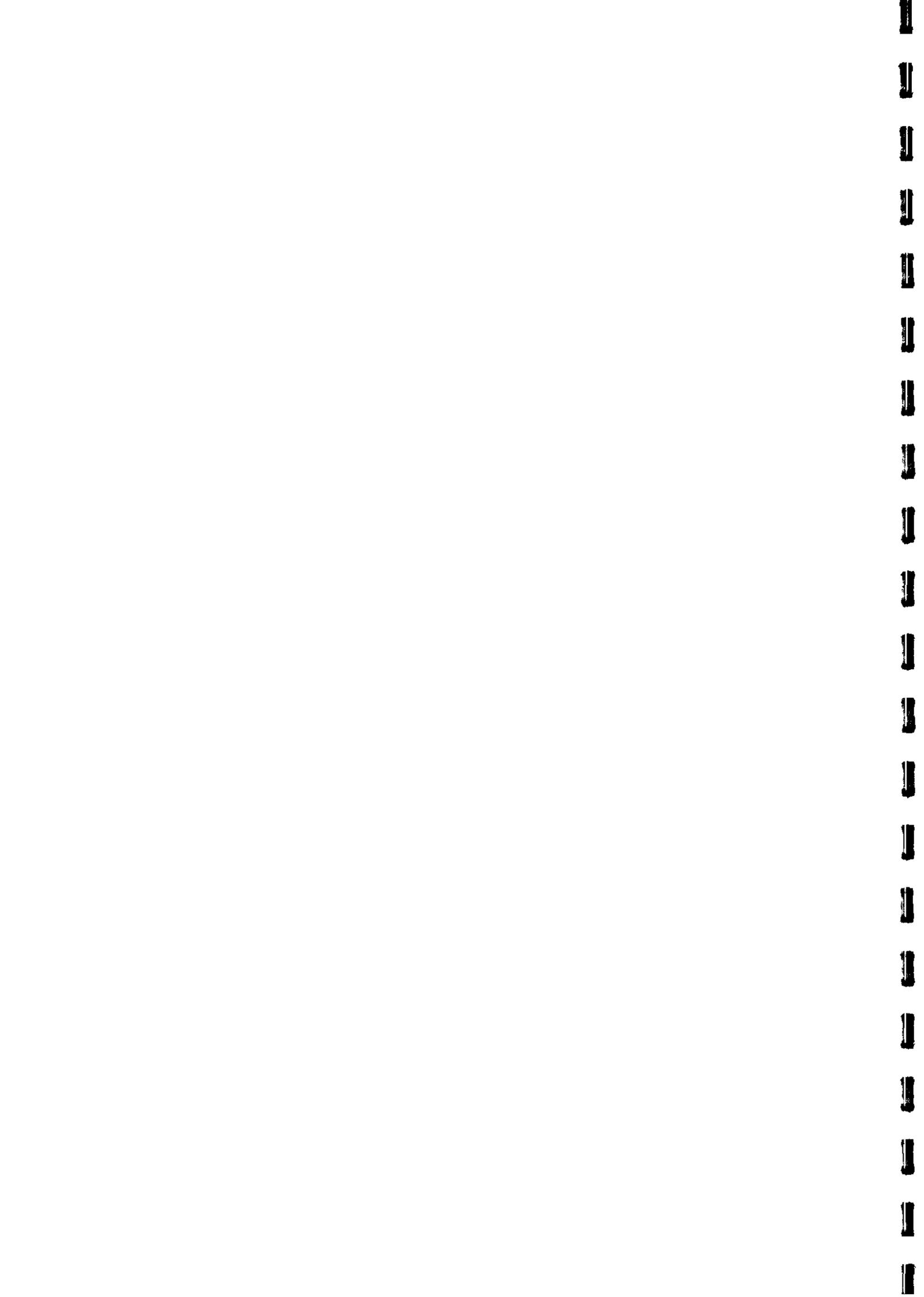


Fig. 1.4.

Diagrama representativo del desmembramiento del supercontinente Pangea hace 200 millones de años. C = Arco del Caribe, S = Arco de Escocia. Un primitivo *riting* a lo largo de la proto-dorsal medio-atlántica partió el Pangea en dos, Laurasia al norte y Gondwana al sur, hace 180 millones de años. Los actuales bloques continentales ya eran identificables hace 135 millones de años, en ese momento, África y Sudamérica empezaron a separarse y la India ya se había desajado de la parte meridional de Gondwana y había iniciado su migración hacia el norte. 65 millones de años atrás, la mayoría de los continentes ya se habían separado; Norteamérica y Eurasia aun permanecían unidas, pero un *riting* incipiente ya empezaba a separarlas. La India colisionó entonces con Asia, dando lugar a la formación del Himalaya; en la región mediterránea, unas colisiones similares dieron lugar a la formación de los Alpes. En el Caribe, las manifestaciones volcánicas provocaron la unión de Norteamérica y Sudamérica, mientras que el océano Atlántico continuaba ensanchándose a expensas del Pacífico.

Assumiendo que los continentes sigan desplazándose según sus direcciones actuales y a las mismas velocidades con que lo hacen hoy en día, se pueden calcular sus posiciones aproximadas en diferentes momentos del futuro. Dentro de 50 millones de años, Norteamérica y Sudamérica se habrán separado, mientras que Australia habrá chocado con Nueva Guinea. La progresión del *riting* a lo largo del valle del Rift africano hará que grandes segmentos de ese continente se desajen del mismo; el desplazamiento continuado de África hacia Europa hará que España y Portugal sean empujados hacia el norte hasta colisionar con el sur de Inglaterra; este hecho irá acompañado por terremotos y vulcanismo en el mar de Irlanda. (M.A. = millones de años.)



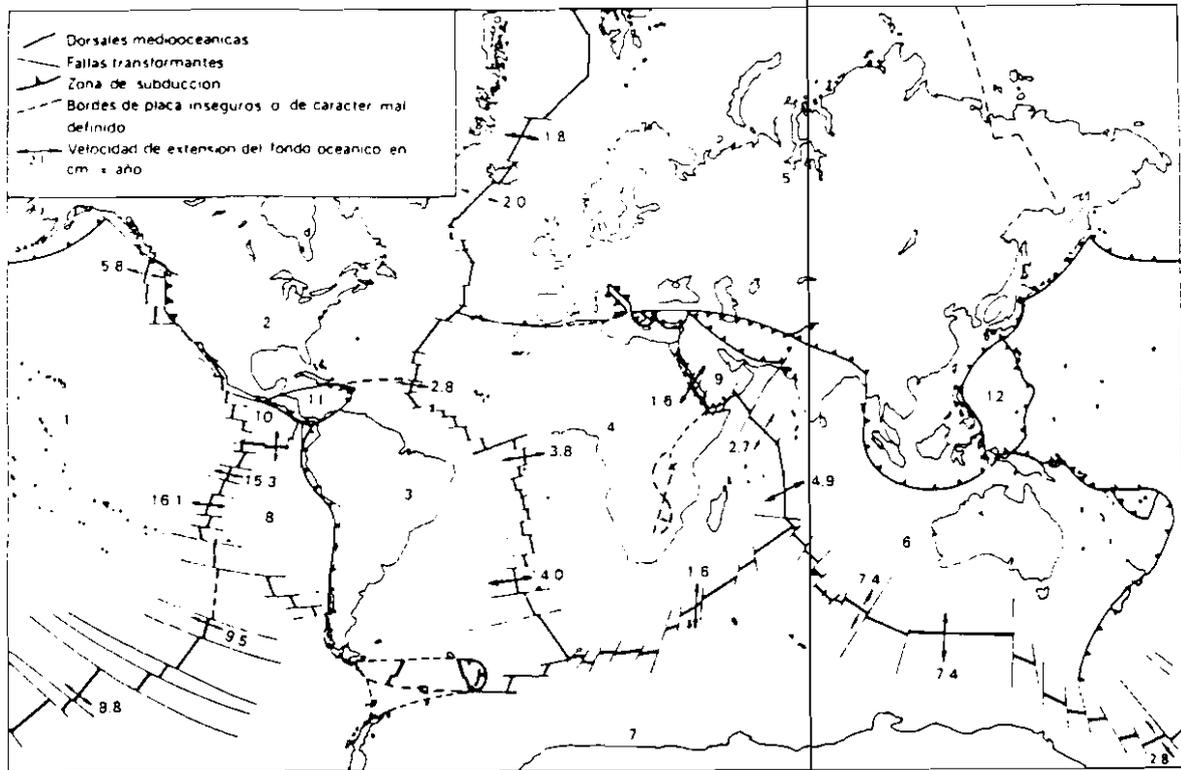


Fig. 1.5 Principales placas litosféricas: 1, Pacífica. 2, Norteamericana. 3, Suramericana. 4, Africana. 5, Euroasiática. 6, Australoíndica. 7, Antártica. 8, de Nazca. 10, de Cocos. 11, Caribe. 12, Filipina. Los principales problemas de límites son el contacto entre las placas norteamericana y euroasiática en Siberia, y la posible existencia de una placa de Scotia entre la suramericana y la antártica.

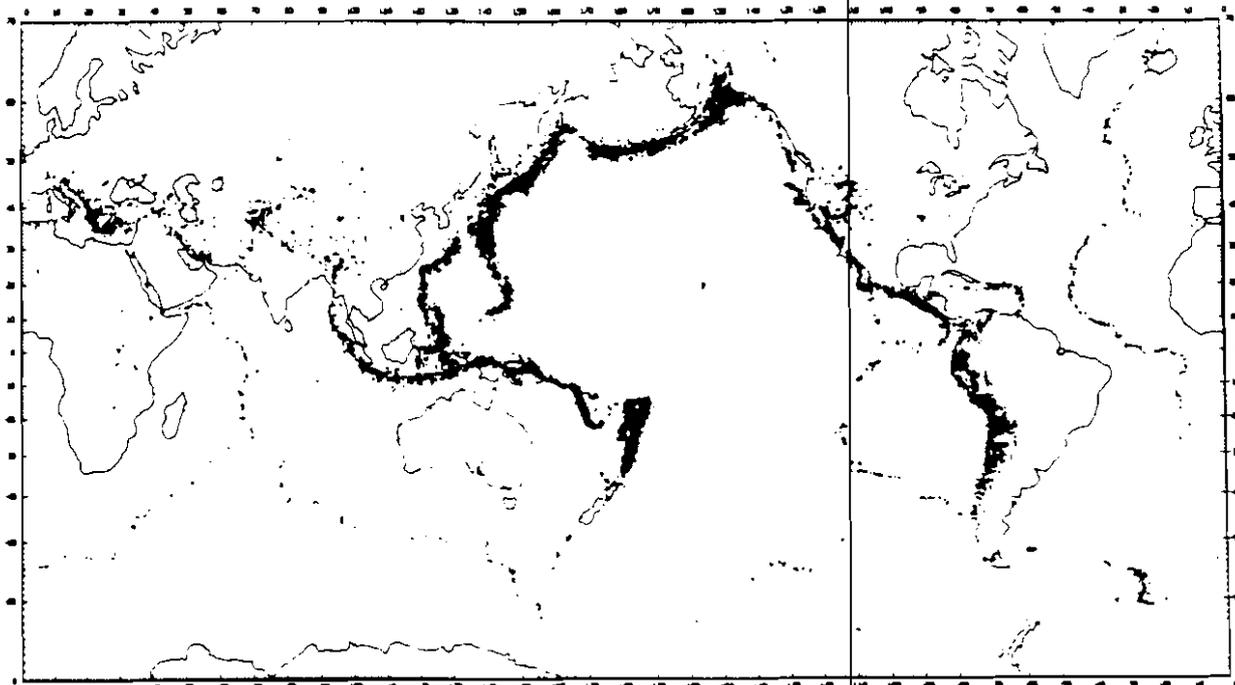


Fig. 1.6 Localización de los terremotos producidos en los años 1961-1967 registrados por U.S. Coast and Geodetic Survey. Según Barazangi y Borman.

# TERREMOTOS

## CAPITULO 2. ¿QUE SON LOS TERREMOTOS?

### 2.1. CAUSAS DE LOS TERREMOTOS

Las rocas de la corteza terrestre están permanentemente sometidas a fuerzas o perturbaciones que tienden a deformarlas.

La concepción más reciente de un terremoto consiste en una brusca sacudida del suelo, producida por una ruptura o desplazamiento en profundidad que se propaga en todas las direcciones en forma de ondas sísmicas.

La teoría más aceptada para explicar el origen de los terremotos fue propuesta en 1906 por Harry F. Reid. Estudiando las observaciones geodésicas realizadas antes y después del terremoto de San Francisco de 1906 observó que a lo largo de varios kilómetros de la falla de San Andrés, las carreteras y vallas que cruzaban la falla habían sido desplazadas hasta valores máximos de seis metros.

La teoría de Reid conocida como "Teoría del Rebote Elástico" (ver fig. 2.1) compara el comportamiento de las rocas con el de un muelle comprimido en el cual se puede acumular energía mecánica. Cuando el esfuerzo acumulado a lo largo del tiempo es mayor que la resistencia de la falla a la fricción, se rompe el equilibrio en el punto más débil y se produce la rotura. El esfuerzo acumulado es liberado en una fracción de segundo y comienza de nuevo la acumulación de esfuerzos. Tal comportamiento se denomina "strike - slip" o por saltos bruscos.

El punto localizado bajo la superficie donde se produce la rotura se conoce como "hipocentro" o foco sísmico. La proyección de este punto sobre la superficie terrestre se denomina "epicentro". (ver fig. 2.2)

La energía mecánica acumulada en las rocas se libera en forma de ondas sísmicas y de energía calorífica. La propagación de las ondas sísmicas constituye el terremoto en sí.

Un ejemplo bastante ilustrativo de este proceso es el propuesto por Bruce A. Bolt (1976):

*".... Hagamos un modelo de corteza elástica de gelatina, consistente en un molde poco profundo. Tiremos de los bordes de la gelatina en sentidos opuestos y hagamos un corte pequeño en la superficie de la jalea. La ruptura se extenderá a lo largo de un plano en la gelatina y los bordes de la gelatina retrocederán hasta que cese la ruptura. Mientras que la ruptura va rasgando de parte a parte la gelatina, ésta temblará con ondas elásticas que se propagarán a través de ella ...".*

## 2.2. TIPOS DE TERREMOTOS

Los terremotos pueden ser debidos a dos causas básicas: aquéllos que tienen su origen en causas naturales por la acción de la dinámica terrestre o extraterrestre y aquéllos provocados o inducidos por el hombre (causas antrópicas).

### 2.2.1 Causas naturales

**TECTONICA.** La gran mayoría de los terremotos que se producen en el planeta son debidos a causas de tipo tectónico. Tienen su origen en los procesos de rotura, colisión y reajuste de las placas continentales. Generan enormes cantidades de energía mecánica que producen tensiones en las rocas y van acumulándose poco a poco hasta que se alcanza el límite de rotura. En este momento se libera la energía acumulada en forma de sacudidas, es decir, los terremotos. Cuanto más largo sea el período de tiempo entre dos sacudidas, peores consecuencias ocasionará, ya que la energía acumulada será mayor. En la figura 2.4 se pueden observar los mayores terremotos producidos en nuestro planeta por causas tectónicas durante el período 1904 a 1976.

**POR COLAPSO.** Son terremotos pequeños que ocurren en regiones kársticas por el colapso de cavidades subterráneas o bien, por el hundimiento de galerías de minas (ver fig. 2.3). Estos terremotos ocurren cuando se produce un fallo estructural de la bóveda en un vacío subterráneo. En la figura 5 se puede observar las trayectorias de los esfuerzos en cavidades subterráneas. En España en 1688 en la localidad de Alcalá la Real se produjo un terremoto con intensidad VIII que fue provodado por el hundimiento de un monte donde se encontraba la fortaleza de la Mota.

Otro tipo interesante de terremotos de colapso son los relacionados con deslizamientos de tierra de millones de metros cúbicos de suelo y rocas. La energía gravitacional de esta masa se libera en forma brusca por el rápido movimiento a que es sometida, y se transforma en ondas sísmicas que serían equivalentes a terremotos de intensidad pequeña o media.

En España este tipo de deslizamientos son relativamente frecuentes. En 1783 un fuerte deslizamiento se produjo en la cercana de Alcira, provocado por unas fuertes lluvias y la crecida del río Júcar (López Marinas, 1976).

Otro deslizamiento que produjo un terremoto ocurrió en el municipio de Torre de Ribera (Huesca) en el día 22 de octubre de 1907. Según Munuera (1963) alcanzó una magnitud de 5,4 y una intensidad de grado VI.

**VOLCANICOS.** Aquí cabría distinguir dos tipos de terremotos volcánicos: aquellos debidos al movimiento del magma en la cámara magmática y los provocados por erupciones violentas. Los primeros sirven como sistema de predicción de una posible entrada en erupción del volcán (ver fig. 2.4). El número de sismos diarios con sus respectivas magnitudes nos indica la tasa de liberación de energía y nos sirve para determinar la cantidad de magma que está haciendo presión sobre las fracturas en su camino hacia la superficie. Casi todas las erupciones están precedidas de un incremento de la actividad sísmica (especialmente las violentas). Por ello es necesario mantener por lo menos un sismógrafo operando continuamente en cada volcán potencialmente peligroso. Si los registros son detallados y abarcan un largo período de tiempo, las posibilidades de hacer pronósticos fiables de una entrada en erupción de un volcán son elevadas.

Los terremotos provocados por una erupción volcánica son consecuencia de la erupción en sí. Son precedidos de explosiones dentro del cráter y detectados por los sismógrafos. En el caso de la erupción del Monte Santa Elena (estado de Washington, U.S.A.), expulsó 0,6 km<sup>3</sup> de magma y dejó un cráter de dos kilómetros de diámetro. En el momento de producirse la explosión se registró un terremoto de magnitud 5,1.

**CAUSAS EXTRATERRESTRES.** Son los menos frecuentes. Estos terremotos estarían provocados por el impacto de cuerpos extraterrestres tales como meteoritos y cometas contra la superficie terrestre. Se han reconocido unas 200 estructuras de impacto sobre la superficie de la Tierra. El hecho de que se aprecien pocos cráteres sobre nuestro planeta a diferencia de los demás cuerpos del Sistema Solar, es que en la Tierra la erosión ha borrado todos los cráteres con edad mayor de 4.000 millones de años y sólo se pueden apreciar unos pocos fuertemente erosionados con edad menor de 1.000 millones de años. El impacto catastrófico más reciente del cual se tiene noticia, se produjo el 30 de Julio de 1908 a orillas del río Tuguska en Siberia. El impacto meteorítico (posiblemente un cometa) provocó una explosión equivalente a una bomba atómica de 30 megatonnes. La explosión fue oída a 1000 km de distancia, los microbarógrafos y los sismógrafos localizados en Inglaterra registraron este impacto.

Según Rosenblueth (1971), los sismos por impacto meteorítico no contribuyen significativamente a la sismicidad para los intervalos usuales de períodos de retorno de 100 a 1.000 años. Pero para períodos de retorno de 10.000 años su contribución es del mismo orden que los sismos tectónicos.

**PRODUCIDOS POR EXPLOSIONES NUCLEARES.** Algunas explosiones nucleares subterráneas son lo bastante grandes para producir ondas sísmicas que se propagan por el interior de la Tierra. Suelen tener amplitudes equivalentes a los terremotos de magnitud 7 en la escala de Richter.

En los E.U.A. el 26 de Abril de 1968 se detonó un ingenio nuclear subterráneo denominado Boxcar, en el desierto de Nevada. La energía liberada por la explosión era equivalente a la de un terremoto de magnitud 6 y sus efectos fueron sentidos en la ciudad de Las Vegas a 50 km. de distancia. Su duración fue entre 10 y 12 segundos, no provocó daños de consideración.

Es interesante destacar que durante los años 60, después de la firma del Tratado de Prohibición Parcial de pruebas nucleares del 31 de Julio de 1963, las explosiones nucleares pasaron a ser subterráneas por los países que firmaron el acuerdo.

Después de este hecho significativo, la sismología recibió un fuerte apoyo por parte de los gobiernos de las superpotencias, cuando se dieron cuenta de que eran necesarias nuevas y mejores técnicas sísmicas para distinguir entre un terremoto natural de un terremoto ocasionado por un ensayo nuclear (fig 2.5). Gracias a todo ello hoy existe una amplia red de vigilancia sísmica que ha aportado valiosos datos para el conocimiento del interior de nuestro planeta.

**SISMICIDAD INDUCIDA POR EMBALSES.** Los terremotos provocados por el relleno y vaciado de embalses abarcan una amplia gama de magnitudes que van desde los microterremotos únicamente detectables con sismógrafos muy sensibles, hasta terremotos con magnitudes de 6,5. Este es el caso de la presa de Koyna (India), donde el 11 de diciembre de 1967 se produjo un movimiento sísmico que provocó 177 muertos y dañó seriamente la presa. Curiosamente la zona era considerada como de baja sismicidad. Como puede comprobarse, la energía liberada por este tipo de terremotos puede ser considerable.

Los mecanismos más aceptados para explicar el origen de dichos terremotos se basa en la disminución de la presión efectiva por aumento de la presión intersticial (entre los poros de la roca), y/o la introducción de flúidos en las grietas, hecho que disminuye el coeficiente de rozamiento entre los planos de fracturas y diaclasas.

Localización presa	Altura (m)	Capacidad m <sup>3</sup> x 10 <sup>6</sup>	Año de entrada en funcionamiento	Año del primer terremoto	Magnitud o intensidad	Efectos
L'Qued Fodda Argelia	101	0.228	1932	1933		
Hoover, USA	221	38.3	1935	1936	(M=5)	
Talbingo, Australia	162	0.92	1971	1972	(M < 3.5)	
Hsinfeugkiang, China	105	11.5	1959		(M=6.1)	
Grandval, Francia	78	0.29	1959	1961	Intensidad 5 en 1963	
Monteynard, Francia	130	0.27	1962	1963	(M=4.9)	
Kariba, Rodesia	128	160.0	1958	1961	(M=5.8)	
Vogomo, Suiza	230	0.08	1964	1965		
Koyna, India	103	2.78	1962	1963	(M=6.5)	177 muertos, cuantiosos daños
Benmore, Nueva Zelanda	110	2.04	1964	1965	(M=5.0)	
Kremasta, Grecia	160	4.75	1965	1965	(M=6.2)	1 muerto, 60 heridos
Nurak Tadzik, USSR	317	10.5	1972	1972	(M=4.5)	
Kurobe, Japón	186	0.199	1960	1961	(M=4.9)	
Oroville, USA	236	4.37	1968	1975	M=5.9	

Tabla 2.I. Presas con sismicidad inducida. Modificado de Bolt et al. (1977).

Estos mecanismos actúan como iniciadores de la actividad sísmica y el embalse ejerce el efecto de un "gatillo" (trigger). La posibilidad de que ocurren terremotos en un futuro inducidos por embalses es mayor a medida que pasan los años. Esto radica en la necesidad de construcción de grandes presas para potenciar el desarrollo económico, y una mala planificación territorial puesto que se localizan núcleos urbanos en las proximidades de dichas obras. Es por tanto imprescindible hacer estudios previos para conocer la geología y dotar a tales obras de equipos de vigilancia sísmica, ya que casi toda en su totalidad los terremotos principales fueron precedidos por sismos premonitores.

Presa	Año construcción	Altura (m)	Capacidad (hm <sup>3</sup> )	Año del terremoto más fuerte	M	I
Camarillas (Albacete)	1960	36	39.9	1961	4.8	VI
Almendra (Zamora)		202	2475	1972		
El Grado (Huesca)		88	400	1966		III-IV
La Cobilla (Santander)		116	12			
Fucosanta (Santander)	1973	75	230	1973		
Canciles (Lérida- Huesca)	1960	133	716	1962		V
Santa Ana (Lérida- Huesca)		101	237	1962		V
Ordunte		55	22	1966	3.8	VI

Tabla 2.II. Sismicidad inducida por embalses en España. Diversas fuentes.

**INYECCION DE FLUIDOS.** El hombre también puede provocar terremotos inyectando líquidos en pozos profundos. En Denver (Colorado) se inyectaron aguas residuales en un pozo de 3.670 m y se observó que en esta zona que era considerada de sismicidad baja, se empezaron a producir varios sismos con magnitudes comprendidas entre 0,7 y 4,3. La sismicidad decrecía cuando se suspendía la inyección de fluidos.

El Centro Nacional de Investigación para la prevención de Catástrofes (Japón) realizó en 1970 el experimento "Marsushiru". Consistió en perforar un pozo de 1.800 m e inyectar agua a una presión entre 19 y 50 bares. Se observó que en un período de tiempo entre 5 y 10 días después de la inyección de fluido, el número de terremotos se incrementó en diez veces por unidad de tiempo.

El U.S. Geological Survey en 1969, realizó un experimento en el campo petrolífero de Rangely, Colorado. Cuando la presión del líquido inyectado llegó a la presión de  $1,1 \times 10^4$  pascales, se incrementó la actividad sísmica, pero decrecía al bajar la presión.

En los tres casos los pozos penetraban en fallas existentes y la corteza había sufrido deformaciones tectónicas.

### 2.3. CLASIFICACION DE LOS TERREMOTOS SEGUN SUS CARACTERISTICAS

Newmark y Rosenblueth (1971) han dividido los terremotos en cuatro grupos según sean sus características:

a) **Terremotos de una sola sacudida.** Son producidos en focos a poca profundidad, se producen en terrenos firmes y a distancias epicentrales pequeñas.

Ejemplos de este tipo de terremoto son: Agadir (Marruecos) en 1960 con M 5,8 y Skopje (Yugoslavia) en 1963 con M 6,0.

b) **Terremotos de duración moderada y vibraciones irregulares.** Ocurren en terrenos firmes y las distancias epicentrales son moderadas. Casi todos los terrenos de este tipo ocurren en el cinturón Circumpacífico como los terremotos de la falla de San Andrés.

c) **Terremotos de larga duración y períodos dominantes.** Están provocados por ondas sísmicas filtradas a través de capas blandas del suelo. El terremoto de México de 1985 fue de este tipo y alcanzó una magnitud de M 8,1.

d) **Terremotos que producen deformaciones permanentes en el terreno.** Producen cambios en las trayectorias de los ríos, levantamiento de costas, etc. Algunos ejemplos son el terremoto de Anchorage (Alaska) en 1964 con M 8,4 y el terremoto de Niigata (Japón) en 1964 con M 7,5.

La clasificación propuesta por Mogi (1963) está en función de la secuencia de premonitorios, sismos principales y réplicas, dividiendo la misma en tres tipos:

a) **TIPO I.** No se registran premonitores. Se produce un sismo principal seguido de otro de menor magnitud, normalmente en materiales homogéneos y la distribución de las tensiones es uniforme. Como buen ejemplo será el terremoto de México 1985 en el que hubo un sismo principal seguido de una serie de réplicas.

b) **TIPO II.** Se registran premonitores y su número aumenta antes del principal. Ocurre en materiales heterogéneos y la distribución de las tensiones no es uniforme. Posteriormente al sismo principal se producen una serie de réplicas de menor magnitud. Este tipo de distribución es lo que más se adapta a la sismicidad inducida por embalses.

c) TIPO III. Se produce un enjambre de terremotos y no es posible distinguir un sismo principal. Se produce en materiales muy heterogéneos y se produce una acumulación de fuerzas no uniformes y muy concentradas (ver fig. 2.6).

#### 2.4. LAS FALLAS Y SU RELACION CON LOS TERREMOTOS

Se denominan fallas a unas fracturas en las rocas resultado de fuerzas que han sobrepasado el límite de elasticidad de los materiales que las integran, provocando un desplazamiento de los bloques resultantes, uno respecto a otro, en una dirección paralela al plano de fractura (ver fig. 2.7).

Las fallas no tienen una extensión indefinida, tienen extremos terminales en los cuales el desplazamiento es nulo.

Existen varios tipos de fallas según sea su desarrollo geométrico. Estas pueden ser básicamente de dos tipos: de **traslación** y de **rotación**. En la tabla 2.II se observan los distintos tipos de fallas.

La relación entre fallas y terremotos es que en ellas están localizados los hipocentros o focos de los sismos pero la formación de una falla no es producto de un único episodio violento y de corta duración.

Las fallas son activas durante largos períodos de tiempo, incluso millones de años. Valga como ejemplo la falla Alpina de Nueva Zelanda con edad aproximada de 100 millones de años y un desplazamiento diferencial a lo largo de falla de 1.200 kilómetros.

Los movimientos se realizan en períodos muy cortos, pero determinan la historia de una falla. El geólogo estudia su comportamiento y desarrollo a lo largo del tiempo con un trabajo parecido al de un detective que investiga los pormenores de un complicado crimen. Las fallas dejan su huella en la topografía, cursos de ríos, etc.

Mediante estudios detallados se puede determinar la historia de una falla, sus desplazamientos a lo largo del tiempo y con el auxilio de modernas técnicas geofísicas se pueden cartografiar la falla en profundidad y localizar fallas que están ocultas en superficie.

Cuando se produce un terremoto, aparte de los daños provocados por el movimiento del terreno, el movimiento de la falla mismo puede provocar serios daños en las edificaciones y obras que se asientan sobre ella o en sus proximidades. Estos daños se podrían reducir evitando la construcción en las proximidades de una falla activa que esté cartografiada en superficie o se sepa de su existencia en el subsuelo mediante estudios geofísicos. Tales áreas deberían de ser sometidas a estudios de ordenación del territorio para impedir las obras que supongan algún riesgo, así se evitarían daños

a la población y pérdidas económicas cuantiosas.

## 2.5. MECANISMO DE DISPARO DE LOS TERREMOTOS

Actualmente no existe una teoría precisa acerca de la génesis de los terremotos, es decir, el **mecanismo de disparo** que desencadena un sismo. Aunque se vienen haciendo múltiples investigaciones, no hay nada concluyente de las causas que los originan. Y solo existen ciertas teorías aún no totalmente probadas. Algunas teorías son: la influencia de los astros (Luna, Sol y los planetas), la atracción gravitacional de la Luna y el Sol sobre la Tierra, dando como resultado deformaciones o mareas terrestres que afectan a todo el planeta; otra teoría se basa en la fluctuación del eje de la Tierra. En otros casos se estudia la influencia de las condiciones atmosféricas como por ejemplo la presión atmosférica.

Todas estas fuerzas sólo, o en conjunto podrían ayudar a liberar la energía acumulada en las rocas en forma de terremoto, pero por el momento se encuentran sujetas a estudios y comprobaciones y no hay nada concluyente del mecanismo desencadenante.

También se están realizando investigaciones acerca de la presión intersticial sobre la formación de los sismos. Se ha observado una correlación entre la tasa de inyección de fluidos y la frecuencia de los terremotos (Evans, 1966; Headly et al, 1968), la presión intersticial es una variable que puede ser controlada hasta cierto punto por el hombre. Se consigue inyectando fluidos en pozos profundos (se han realizado experiencias en Denver - Colorado) y consecuentemente disminuye la resistencia a la cizalla de las rocas si éstas están sometidas a esfuerzos. El agua actúa como un **lubricante** y facilita el movimiento de los bloques de las fallas en forma de pequeños sismos. Se está investigando la forma de controlar la formación de un terremoto catastrófico produciendo pequeños terremotos que irían liberando poco a poco la energía acumulada en las rocas. Lo que no está claro es cuál será el resultado.

## 2.6. PROFUNDIDAD DEL FOCO SISMICO

El **hipocentro** o foco sísmico es aquel punto en el interior de la Tierra en el cual se origina el terremoto. Los terremotos según sea la profundidad del hipocentro pueden ser superficiales, intermedios o profundos:

Terremotos superficiales: Se producen en los primeros 70 km de profundidad. Liberan una mayor cantidad de energía, ya que se encuentran en el dominio frágil de la corteza y la posibilidad que tienen las rocas de acumular energía mecánica es mayor. Son los terremotos que originan un mayor daño.

Terremotos intermedios: Son aquéllos que se originan entre los 70 y 300 kilómetros de profundidad.

Terremotos profundos: Se originan a partir de los 300 kilómetros de profundidad hasta los 700 km, aunque se ha localizado un hipocentro de profundidad de 783 Km.

En un pueblo de Granada, Dúrcal, se registró el 23 de Marzo de 1954 el terremoto más profundo conocido en Europa. Según el Instituto Geográfico Nacional, el hipocentro estaba localizado a 657 km de profundidad, aunque el terremoto alcanzó en superficie una intensidad V (M.S.K.).

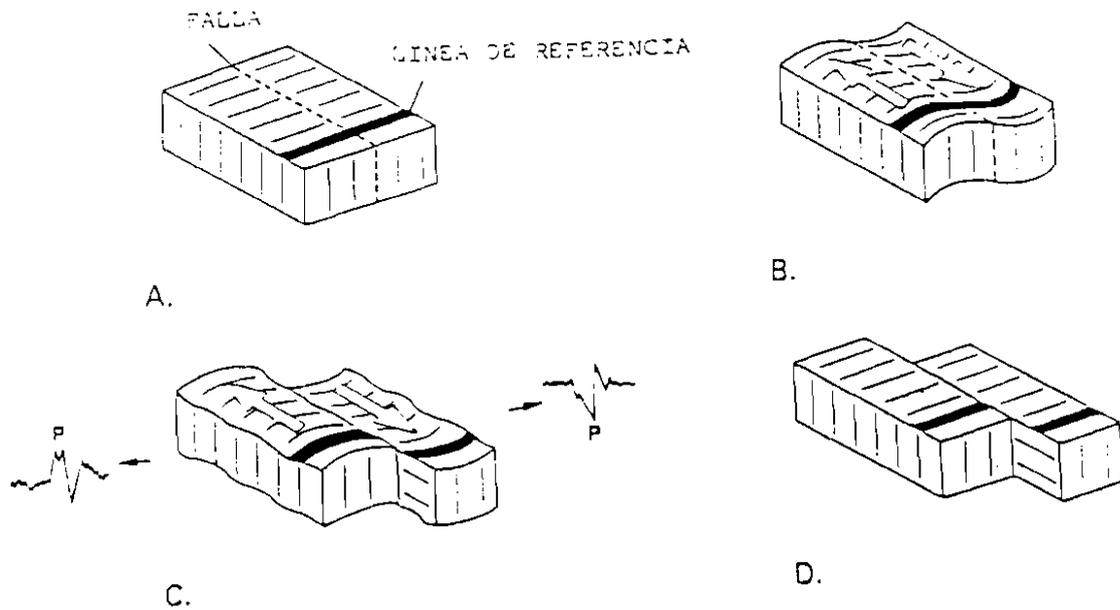


Fig 2.1 Teoría del rebote elástico propuesta por Reid: A. Estado inicial; B. Acumulación de esfuerzos; C. Rotura del terreno (terremoto); D. Estado final

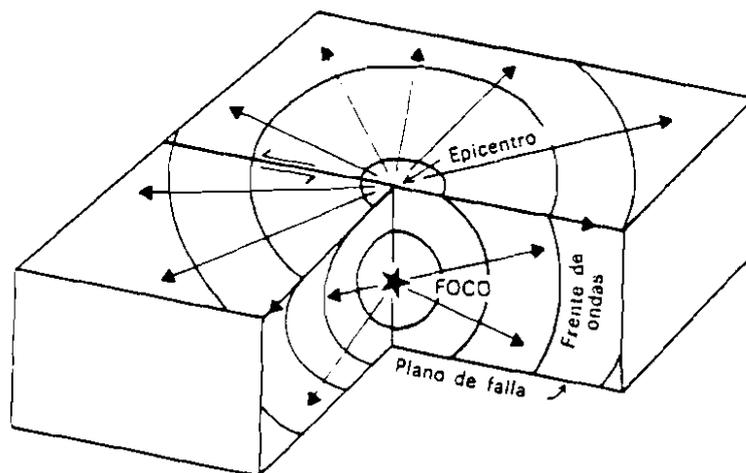


Fig 2.2 Esquema de un terremoto. Los movimientos corticales actúan sobre las rocas con esfuerzos muy elevados, cuando estos esfuerzos alcanzan un determinado límite, los bloques se rompen en un punto foco o hipocentro y se desplazan a lo largo de los planos de falla, este desplazamiento libera así la energía acumulada la proyección del foco o hipocentro sobre la superficie se denomina epicentro. Se irradian ondas sísmicas que son responsables de los daños a edificaciones.

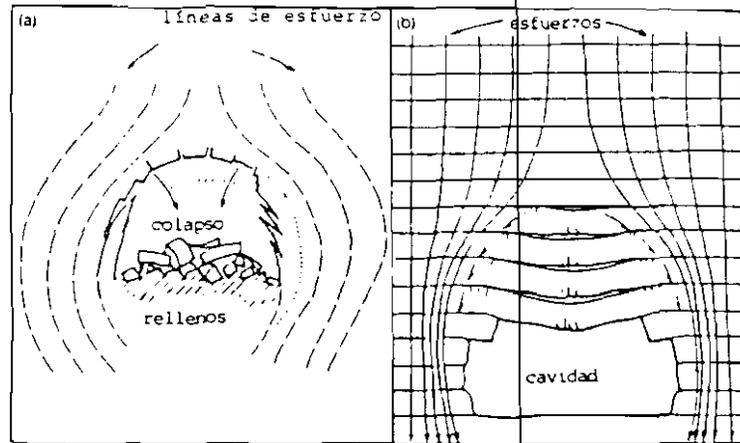


Fig 2.3 Comportamiento gomecánica del esfuerzo en secciones de cavidades karsticas. (A). Bajo alta presión litostática en profundidad, según TRIMMEL (1968). (B). En una cavidad superficial, según DAVIES (1951). (B). En una cavidad superficial, según DAVIES (1951). (En JENNINGS, 1985).

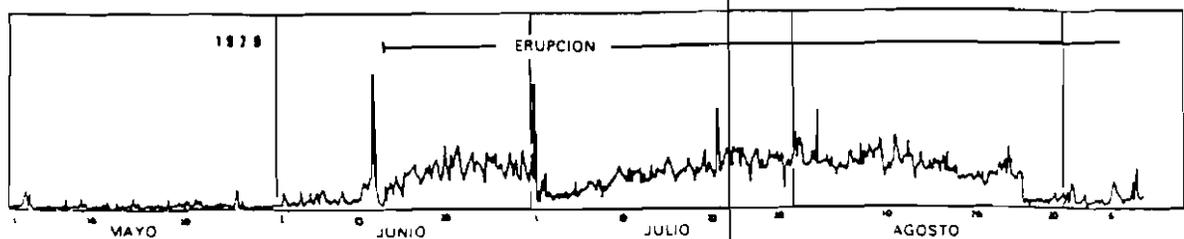


Fig 2.4 Sismicidad relacionada con la erupción de 1979 del volcán Aso. Observese como la amplitud de los términos fué maxima inmediatamente antes de la erupción, y se mantuvo a un nivel anormalo durante todo su desarrollo. Según Komiya (1979).

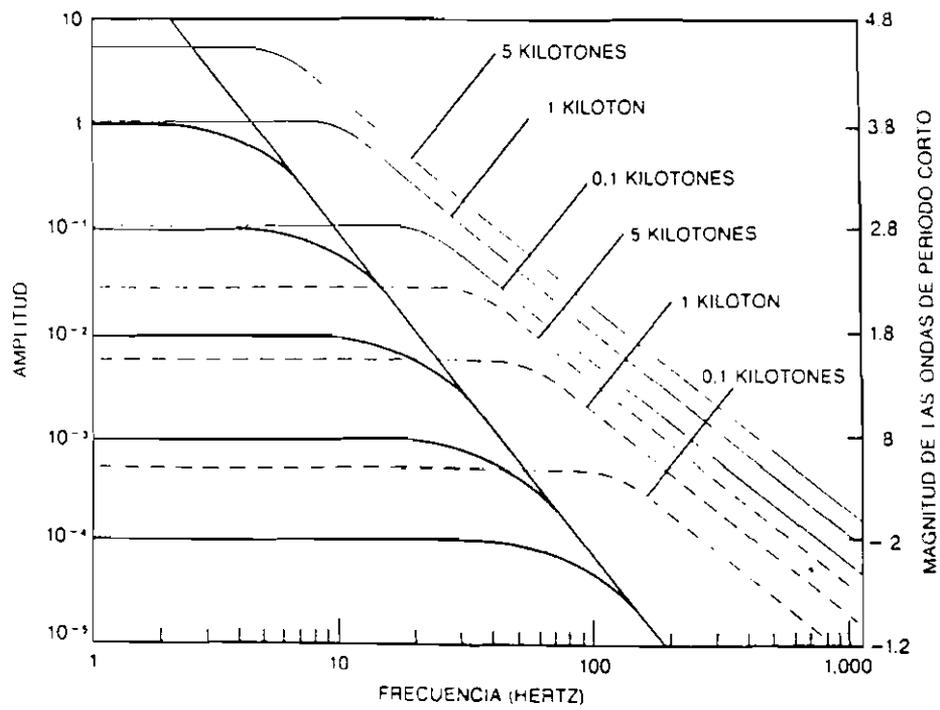


Fig 2.5 Capacidad de distinguir explosiones subterráneas de los temblores de tierra se ha afinado hasta el kilotón de potencia, e incluso menos, según muestra el gráfico, que funda en un trabajo previo de Jack F. Evermdem, del Servivio Geológico de los Estados Unidos. Las curvas en negro representan los terremotos producidos: las continuas en color, explosiones nucleares en hecho rocoso blando; y las líneas a trazos, explosiones nucleares "activadas" en cavidades minadas. Según Hafemeister et. al. (1985)

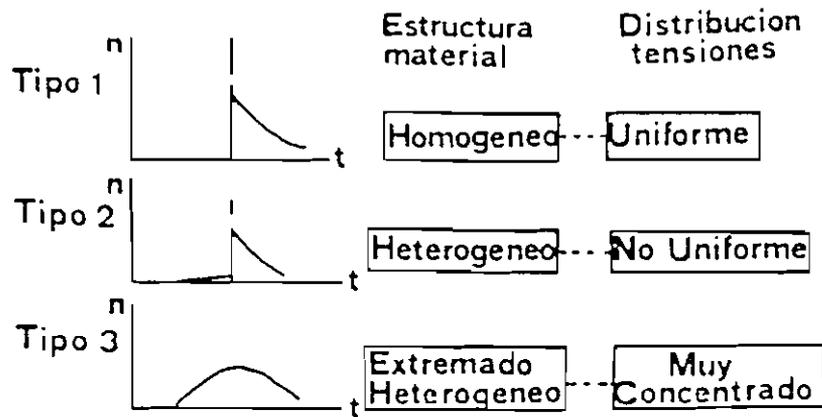


Fig 2.6 Clasificación de las series de premonitorios y réplicas, según Mogi (1963).

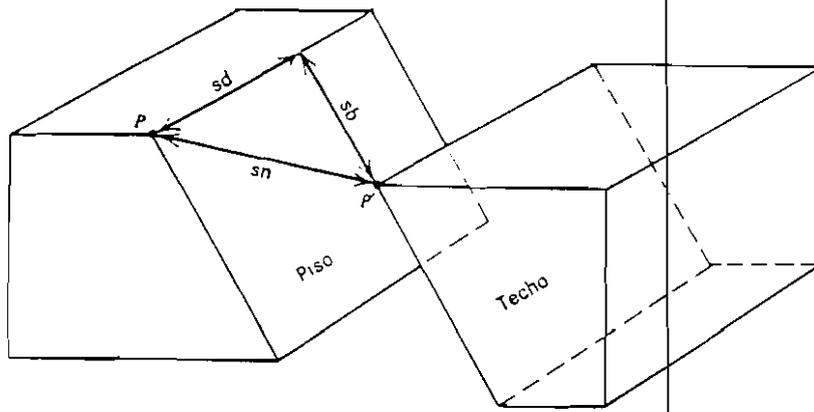


Fig 2.7 Terminología de saltos de falla. Salto neto (sn), salto según la dirección (sd), salto según el buzamiento (sb). Esta es una falla de salto oblicuo, con componentes normal y siniestra el salto según el buzamiento y salto según la dirección, respectivamente. Antes de que se produjera la falla los puntos P y P' coincidían. Según Hoobs (1981).

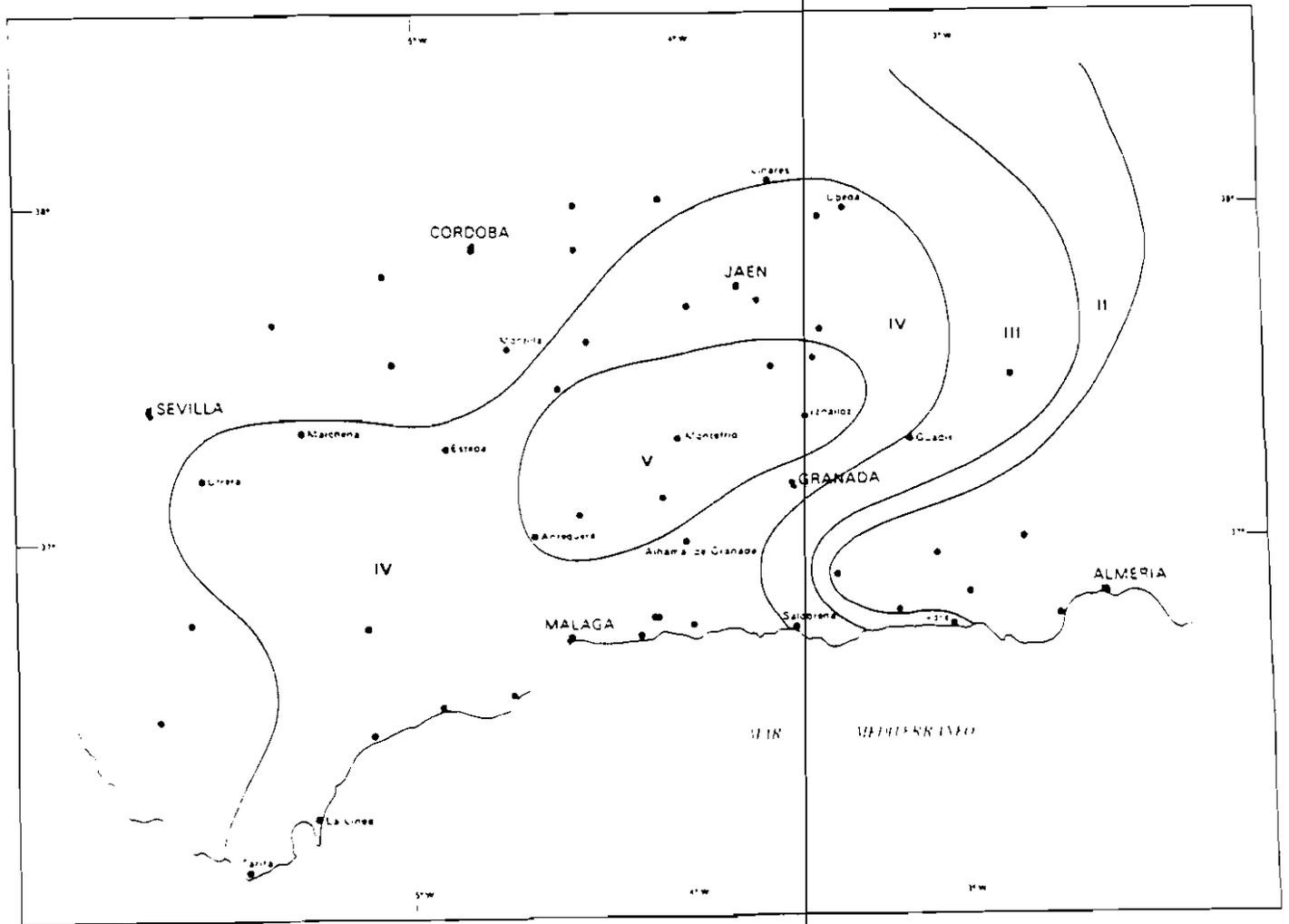


Fig 2.8 Terremoto Durcal (Granada) del 29 de marzo de 1954. Tomado del Catálogo Nacional de Isositas. I.G.N.(1982).

# TERREMOTOS

## CAPITULO 3. ¿COMO SE OBSERVAN LOS TERREMOTOS?

### 3.1 INSTRUMENTACION

Para determinar el movimiento del suelo cuando ocurre un terremoto se han diseñado diversos instrumentos que registran las ondas sísmicas. El primer instrumento del cual se tiene noticia fue inventado en China en el año 132 d.C. por el sabio chino Chang-Heng. Este instrumento rudimentario era un sismoscopio y solamente registraba la dirección del primer impulso.

El primer instrumento para medir con precisión las ondas sísmicas fue inventado en 1897 por el sismólogo inglés John Milne. Consistía en un péndulo suspendido por un marco apoyado en el suelo.

Cuando ocurre un terremoto el marco se mueve y el péndulo se queda estacionario por inercia de su masa. Este movimiento relativo es registrado por una plumilla (que está instalada en el péndulo) en una cinta de papel enrollado a un tambor que gira a una determinada velocidad. En la actualidad estos sismógrafos son electrónicos, el movimiento relativo entre el péndulo y el marco produce una señal eléctrica que se amplifica electrónicamente cientos de veces, para ser registrada en unas bandas de papel o bien en una cinta magnética (ver fig. 3.1).

Actualmente los instrumentos sísmicos se pueden dividir en dos grandes grupos: con fines sismológicos y con aplicación a la ingeniería sísmica.

Instrumentación con fines sismológicos	Sismógrafo convencional o de Wood Neuman
	Sismógrafo registrador de eventos
Instrumentación aplicada a la Ingeniería sísmica	Accelerógrafo
	Sismoscopio
	Registrador de máximos de aceleración
	Interruptor sísmico

Tabla 3.I. Esquema simplista de instrumentación sísmica

#### 3.1.1 Instrumentación con fines sismológicos:

Son aquellos instrumentos destinados a medir la sismicidad en general, nos sirven para determinar los parámetros focales del terremoto (tiempo, origen, magnitud, coordenadas hipocentrales, momento sísmico, etc. ...). Dentro de este grupo tenemos:

- a) Sismógrafo convencional o de Wood-Neuman (descrito anteriormente). Este instrumento mide de forma continua bien el desplazamiento, bien la velocidad del movimiento del suelo. El registro se efectúa sobre un tambor móvil en el cual va instalada una cinta de papel que registra las señales, también puede realizarse sobre una cinta magnética.
- b) Sismógrafo registrador de eventos. Es un instrumento electrónico digital que puede seguir de modo muy sencillo la evolución en el tiempo del nivel de sismicidad de un emplazamiento dado. Al ser los datos digitales, se pueden procesar con mayor facilidad que los analógicos convencionales.

Básicamente una estación sismológica consta de tres sismógrafos, uno montado verticalmente y los otros dos horizontalmente, en ángulo recto con respecto al primero (en las direcciones N-S y E-W).

### 3.1.2 Instrumentación aplicada a la ingeniería sísmica:

Además del instrumental convencional, una estación sismológica puede tener otros instrumentos para detectar los movimientos del suelo en el campo cercano al terremoto, de forma que pueden ser obtenidos datos de aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo. Se conocen como sismógrafos de "movimientos fuertes" o de "campo cercano" los que son utilizados para hacer estudios de ingeniería sísmica. Se usan para caracterizar el movimiento sísmico en el campo intermedio o próximo al epicentro (inferior a 100 km de distancia).

Cuando se realizan obras de ingeniería de cierta envergadura, como presas y centrales nucleares, los datos que aportan los acelerógrafos son de vital importancia a la hora de determinar la peligrosidad sísmica de la zona donde se ubican las obras, de forma que los ingenieros sísmicos y arquitectos utilizan los datos como base para calcular la respuesta espectral (es la respuesta de la obra a los movimientos sísmicos) en los proyectos antisísmicos contribuyendo así a la reducción del posible daño. A continuación se describen algunos de los instrumentos más usados en ingeniería sísmica:

- a) Acelerógrafo. Este es un instrumento que sirve para registrar la aceleración de un sismo en función del tiempo. Se registran las aceleraciones verticales y las horizontales del movimiento. El aparato tiene dos partes, que son un sensor triaxial y un sistema de discriminación y registro.
- b) Sismoscopio. El primer sismoscopio descrito data del año 132 d.C, se conoce como "Choko" y fue inventado en China. Es básicamente un péndulo compuesto invertido, que puede oscilar en cualquier dirección horizontal, con lo que puede leerse la aceleración en diferentes

direcciones. Es un instrumento de tipo pasivo (ver fig 3.2).

- c) Registrador de máximos de aceleración (o aceleración pico). Son instrumentos que registran la máxima aceleración que se alcanza en una dirección determinada, sea ésta horizontal, vertical o dispuestas en las tres direcciones. Es un instrumento pasivo de tipo mecánico.
- d) Interruptor sísmico. Tal y como su nombre indica, es un mecanismo que tal funciona como un interruptor. Si se sobrepasan valores prefijados de aceleración para cada uno de los ejes, se cierra un interruptor que dispara una señal eléctrica de alarma.

### 3.2. ONDAS SISMICAS

Cuando se produce un terremoto, la energía acumulada en las rocas se transforma en ondas internas superficiales y en calor. Las capas que constituyen la Tierra tienen ciertas propiedades elásticas, a causa de las cuales pueden transmitir las vibraciones que producen los terremotos.

Las ondas sísmicas pueden dividirse en: ondas **internas** (P, S) o aquellas que se propagan por el interior de la tierra; y en ondas **superficiales**, que son aquellas que se propagan por la superficie de la Tierra (Love, Rayleigh) (ver fig 3.3).

#### 3.2.1 Ondas Internas

**ONDAS P** (longitudinales o primarias). Son las más rápidas, con una velocidad de propagación entre 8 y 14 km/seg. A medida que viajan, las rocas se contraen y se dilatan en la dirección de propagación a la vez que modifican su volumen. En las otras direcciones la roca permanece inalterable. Este tipo de ondas, gracias a sus comportamiento, puede propagarse tanto por líquidos como por los sólidos. Debido a que su movimiento es similar a las ondas sonoras, cuando las ondas P salen a la superficie una fracción puede transmitirse a la atmósfera en forma de ondas sonoras audibles a partir de los 15 ciclos por segundo.

**ONDAS S** (transversales o secundarias). Llegan después que las ondas P, con una velocidad de 4 a 7 km/seg. Se transmiten por las rocas perpendicularmente a la dirección de propagación del frente de onda. Las ondas no modifican el volumen de la roca, sólo cambian su forma. Este tipo de onda sólo puede transmitirse por sólidos ya que los líquidos si son deformados lateralmente no se recuperan inmediatamente (ver fig 3.4).

### 3.2.2 Ondas Superficiales

Son de largo período y se propagan a una una velocidad de 4 km/seg. Su movimiento está restringido a la superficie terrestre. Serían similares a las ondas que recorren un lago. Se pueden dividir en dos tipos: las ondas Love y las ondas Rayleigh.

ONDAS LOVE: son más rápidas que las ondas Rayleigh. Al paso de estas ondas, el suelo se mueve de un lado a otro en un plano horizontal paralelo a la superficie de la Tierra y no tienen movimiento en la vertical. Debido a las características de su movimiento, ejercen el efecto de cizalla y pueden dañar seriamente las construcciones.

ONDAS RAYLEIGH: tienen un movimiento vertical y horizontal según un plano vertical orientado en la dirección en que viajan las ondas. Una porción de roca se mueve según una elipse cuando pasa la onda y deforma volumétricamente la roca.

### 3.3. ¿COMO SE INTERPRETA UN SISMOGRAMA?

La primera impresión que se tiene al observar un sismograma es la de un complicado conjunto de líneas ondulantes que parecen no tener ningún sentido y se puede llegar a creer que sólo personas altamente especializadas pueden sacar alguna conclusión clara de todo ello. Sin embargo, como los principios básicos para comprender un sismograma están al alcance de cualquiera, si se examina un sismograma con detalle se puede encontrar tres tipos de ondas: las primarias P y S y las secundarias.

Cada onda afectará al período del sismógrafo de diferente forma según sea la frecuencia, velocidad y amplitud con la que llegan las ondas y tiene su reflejo en el sismograma. La primera onda registrada por el sismógrafo es la P, seguidamente llegan las S y, por último las ondas secundarias.

### 3.4. COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS SISMICAS EN EL SUBSUELO

La propagación de las ondas internas (P y S) depende de las propiedades elásticas de las rocas que atraviesen. Cuando el medio en que se propagan las ondas no es homogéneo, tal y como es el planeta Tierra, se producen una serie de fenómenos tales como refracción, reflexión, difracción y dispersión.

En base a los resultados obtenidos de la observación de estos fenómenos, se pueden detectar cambios de velocidad de las ondas que estarían provocados por variaciones en las propiedades de los materiales del interior de la Tierra. Estas variaciones responden a diferentes comportamientos físico/químicos de los materiales en profundidad (ver fig 3.6).

Los límites se conocen con el nombre de "discontinuidades". La primera fue detectada por un sismólogo yugoslavo, Mohorovičić cuando en 1909 estudiaba un terremoto en los Balcanes. Tal discontinuidad se conoce hoy en día como discontinuidad de Mohorovičić. La capa que se encuentra por encima se conoce como corteza y la capa que se encuentra debajo se denomina manto.

Se observó que, a una profundidad de 3.000 km, las ondas S no podían propagarse. Esto indica que por lo menos el comportamiento del núcleo interno es semejante al de un líquido. Las ondas P se propagan a través de sólidos y líquidos y puede proporcionar datos acerca del estado físico del núcleo, tales como densidad y presión en que se encuentra. Las propiedades que tienen las ondas sísmicas han permitido a los científicos conocer aquellas partes más profundas de nuestro planeta que nos son inaccesibles a la observación directa.

### 3.5. ATENUACION DE LAS ONDAS SISMICAS

Cuando se produce un terremoto es muy importante conocer cómo se atenúa con la distancia la energía liberada por el sismo, ya que así se conoce la peligrosidad sísmica de un lugar determinado según la fuente sismogénica.

La energía liberada en el terremoto se propaga en forma de ondas esféricas que atraviesan las diferentes capas que constituyen nuestro planeta y se comportan de diferente forma según los materiales atravesados. A medida que avanzan, se consume parte de la energía liberada en el foco sísmico. Cuando se produce el paso del frente de ondas, se produce una atenuación de las ondas sísmicas

La atenuación es una función matemática que relaciona ciertos parámetros de los terremotos (intensidad, aceleración del terremoto, etc. ...) con otras variables del medio de propagación.

Las ondas internas (P y S) están caracterizadas por tener frecuencias que oscilan entre los 2 y 10 hertzios. Las ondas superficiales (Love y Rayleigh) tienen frecuencias inferiores a 1 hertzio, por lo tanto se propagan y atenúan más despacio que las ondas internas y son capaces de dañar edificios altos situados lejos del epicentro del sismo.

### 3.6. ¿COMO SE LOCALIZA UN TERREMOTO?

Para conocer con exactitud la localización del foco del terremoto o hipocentro, son necesarios cuatro parámetros: tiempo (T), latitud (X), longitud (Y) y profundidad (Z). Pero estas variables no son suficientes, son necesarias tres o más estaciones sismológicas instaladas en distintos puntos para que mediante técnicas de triangulación se pueda determinar la latitud y longitud del foco origen.

En cada una de esas estaciones se determina el intervalo de tiempo que tarda en llegar las ondas P y S desde el origen hasta el sismógrafo. La diferencia entre las ondas P y S sirve de base para evaluar la distancia que han recorrido a partir de la columna de la izquierda del nomógrama (Grigas y Gilhrse 1983) (ver fig. 3.7). Para determinar la magnitud del terremoto se toma el valor de la diferencia entre P y S en segundos y se obtiene la distancia a la cual se encuentra el foco.

Una vez obtenidas para cada estación las distancias correspondientes al epicentro desde cada una de ellas, se traza un arco con centro en la estación y como radio la distancia respectiva. Se necesitan al menos tres arcos para determinar con cierta exactitud la localización del epicentro. La intersección de todos ellos es la situación aproximada del epicentro del terremoto (ver fig 3.8).

En la actualidad los datos de llegada de las ondas P y S se registran en varias estaciones y son procesadas por ordenadores que dan la localización exacta del epicentro con un margen de error muy pequeño.

### 3.7. LA DURACION DE LOS TERREMOTOS

La duración de un terremoto es crucial para entender las dimensiones de la fuente y para estimar su energía, ya que la relación entre daños y efectos originados por el sismo con su duración es esencial para conocer la intensidad de los daños. La duración depende principalmente de las dimensiones de una falla, ya que en fallas de grandes dimensiones se pueden dar una duración de tiempo de 5 a 6 minutos.

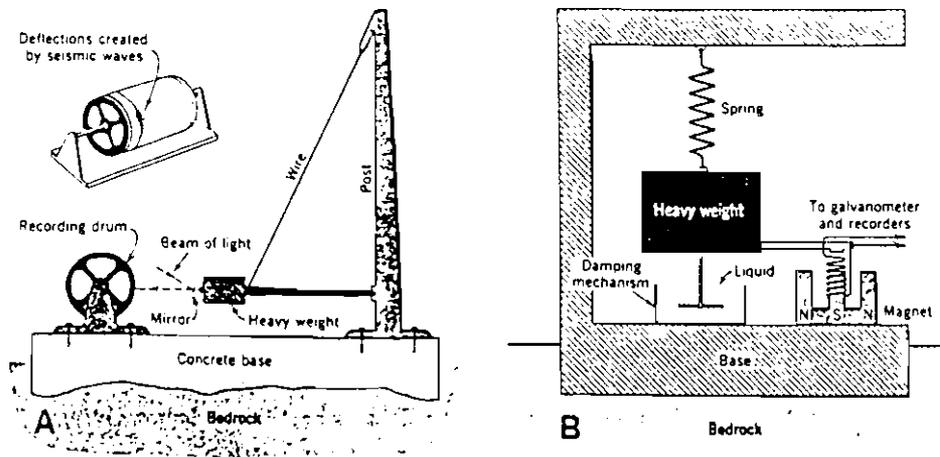


Fig 3.1 Tipos de sismógrafos vertical y horizontal. Un pesado péndulo, sostenido sobre un cable o muelle de un soporte traza los movimiento del otro armazón en la banda registradora del tambor giratorio, lo que permite determinar con exactitud la fuerza y duración del terremoto.

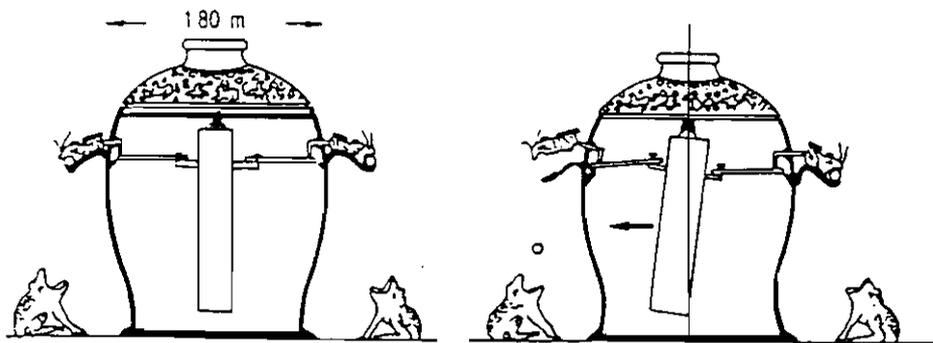


Fig 3.2 Sismoscopio de Chang Heng instalado en China en el año 132 a.c. Según Lomnitz (1975).

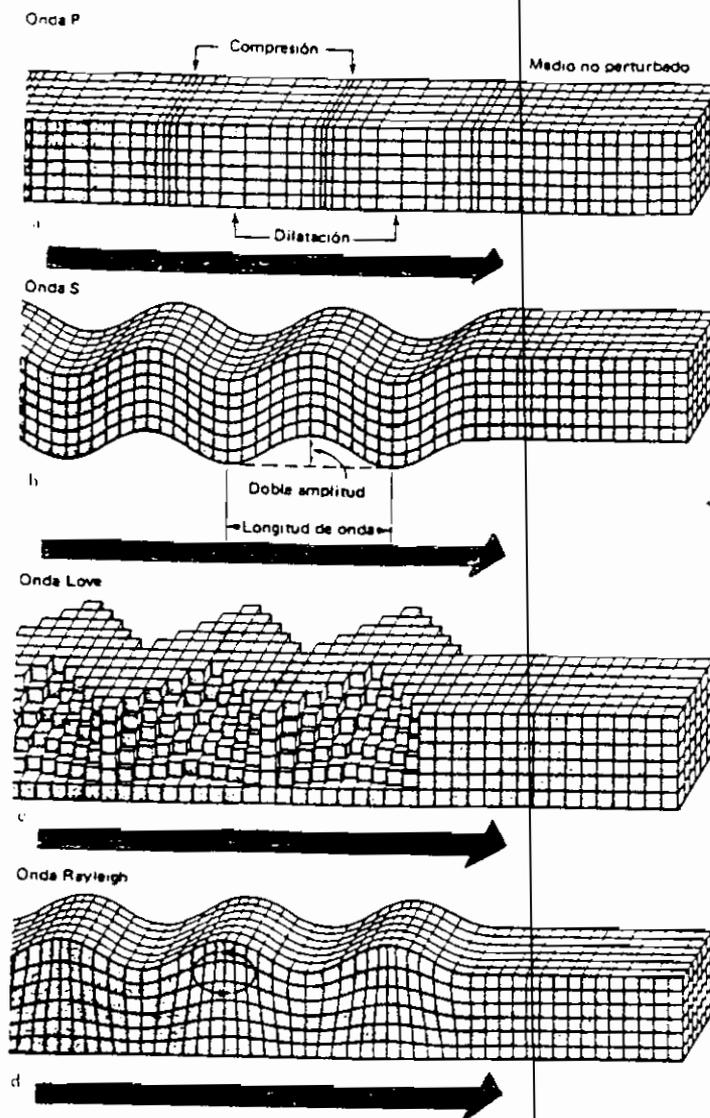


Fig 3.3 Diafragma simplificado ilustrando el movimiento del suelo cerca de la superficie. Modificado de Bolt et.al. 1976.

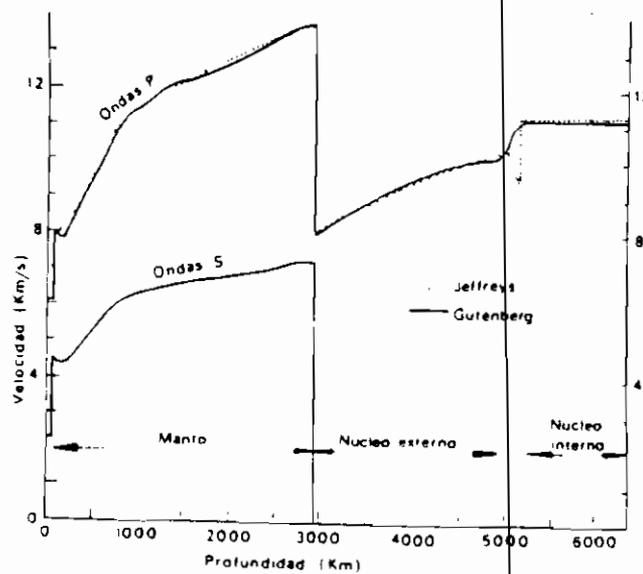


Fig 3.4 Distribución de la velocidad de propagación de las ondas P y S en el interior de la tierra. Según Gutenberg (1959) y Jeffreys (1939).

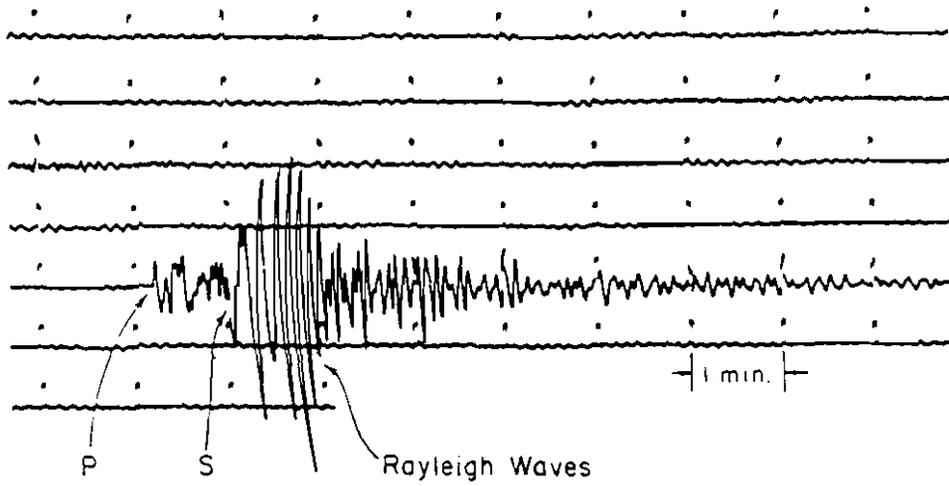


Fig 3.5 Componente vertical de un sismograma de un terremoto registrado en Berkeley 1960.  $M_L = 5.1$

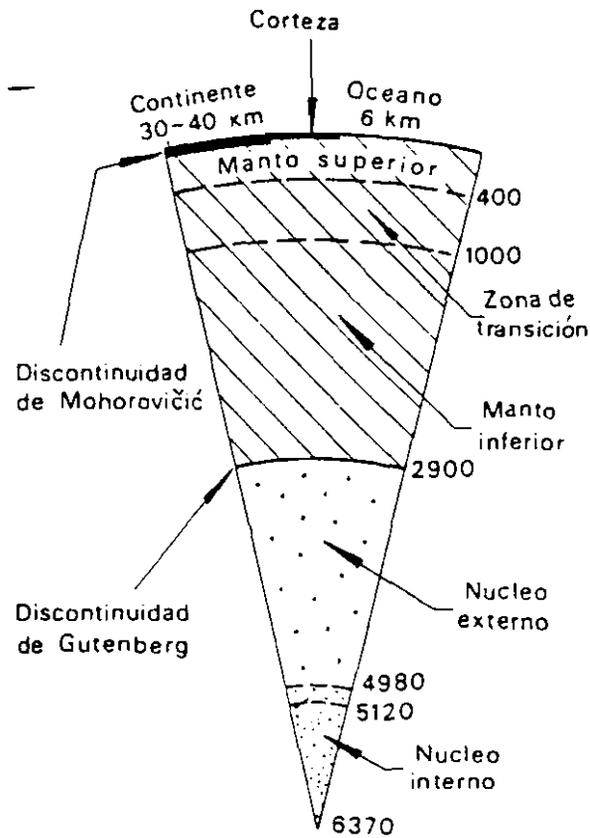


Fig 3.6 Estructura zonal de la tierra. Según Bullen (1963).

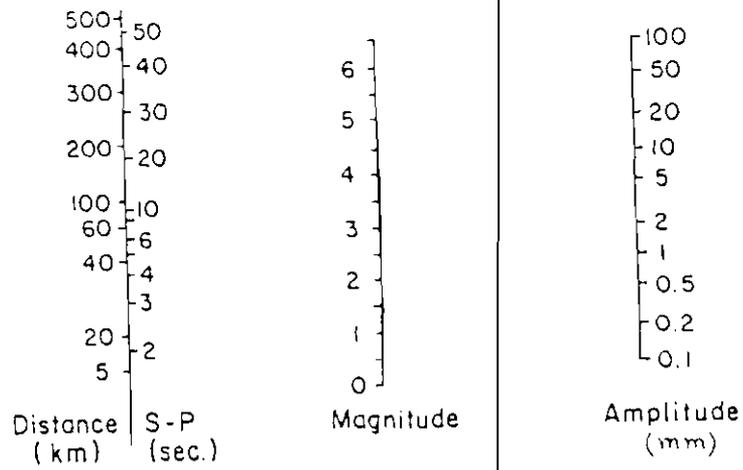


Fig 3.7 Nomograma utilizado para la determinación de la magnitud de un terremoto, según Griggs y Gilchirst (1983).

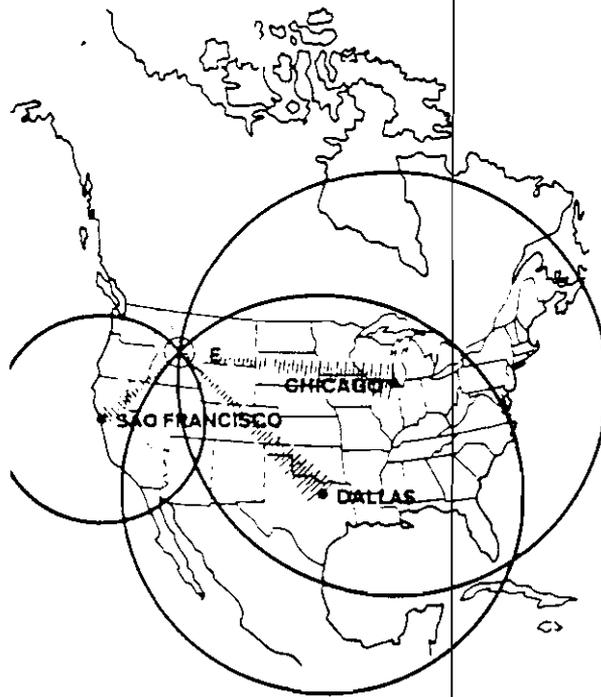


Fig 3.8 Para localizar el epicentro de un terremoto se utilizan tres o más estaciones sismológicas en diferentes puntos geográficos. Cada uno de ellos determina el intervalo de tiempo entre la llegada de las ondas P y S, en base a este intervalo se trazan círculos cuyos radios representan las distancias. La intersección de estos círculos nos dará la localización del epicentro.

# TERREMOTOS

## CAPITULO 4. EL TAMAÑO DE LOS TERREMOTOS

A lo largo de la historia, el hombre ha tenido la necesidad de cuantificar los terremotos y los daños que producen. Para conocer la severidad de los daños de los sismos por medios descriptivos, fueron confeccionadas escalas de intensidad basadas en medidas subjetivas de los daños sufridos. Posteriormente, con el desarrollo de la técnica, Charles F. Richter confeccionó en 1935 una Escala de Magnitud para poder clasificar un sismo, en base a la energía que libera independientemente del lugar de observación.

### 4.1. ESCALAS DE INTENSIDAD

La intensidad es una medida subjetiva de los efectos de los sismos sobre los suelos, personas y estructuras hechas por el hombre.

Se han diseñado varias escalas de intensidad para medir las sacudidas del terreno, que no están basadas en datos instrumentales, sino en observaciones hechas por el hombre de los efectos que produce el terremoto.

Desde el siglo XVI, con la Escala de Gastaldi de 1564, hasta 1964 con la Escala MSK, se han desarrollado 51 escalas diferentes, algunas para describir un sólo evento sísmico y otras para intentar clarificar el grado de destrucción para diferentes terremotos.

La escala de intensidades que precedió a las actuales fue desarrollada en 1857 por Robert Mallet en un estudio acerca de los efectos de un terremoto destructor en Napoles (Italia). Su método consistió en una representación detallada sobre un mapa de líneas de igual daño o igual intensidad (isosistas) y una tabulación de los efectos sentidos y daños, a los edificios y a la superficie de la Tierra.

Mallet observó que había una correlación entre los isosistas y los efectos sentidos, comprobando así que los efectos de las sacudidas de un terremoto disminuían con la distancia.

En el año de 1884 fue desarrollada por Rossi y Forel una escala con intervalos de valores desde el I al X, de menor a mayor intensidad de destrucción. El propósito de esta escala era poder comparar intensidades de terremotos diferentes. En 1902 un sismólogo y vulcanólogo italiano llamado Mercalli, propuso una escala de doce grados. Fue modificada en 1931 por H.O. Wood y Frank Neuman del Instituto Tecnológico de California para adaptarla a las condiciones de construcción en California.

Se conoce a la escala de Wood - Neuman como escala **Mercalli modificada** . Tiene doce grados y es la escala de intensidades sísmicas con mayor aplicación internacional.

Posteriormente, en 1951, las Agencias Meteorológicas de Japón proponen una escala de siete grados, y abarca desde sismos no percibidos por el hombre hasta terremotos devastadores. En la actualidad es la escala vigente en Japón. En la mayoría de los países europeos se utiliza la Escala M.S.K. propuesta en 1964 por S.V. Medveder, S. Sponhever y V. Karnik. Esta escala es la que se utiliza como escala oficial en España y se describe con mayor detalle en el punto 8.4.

Como norma general, las escalas de intensidad se basan en observaciones de los efectos sentidos como consecuencia de un terremoto. Son útiles para zonas del planeta altamente sísmicas que carecen de sismógrafos para medir los movimientos del terreno en lugares próximos al sismo. Asimismo, son válidas para cuantificar terremotos históricos.

#### 4.2. ESCALAS DE MAGNITUD

La **magnitud** es una medida instrumental objetiva de la energía de un sismo. La primera escala de magnitud fue ideada en 1935 por el sismólogo norteamericano Charles F. Richter, del Instituto de Tecnología de California, con el fin de clasificar un terremoto independientemente del lugar de observación. Esta magnitud, se conoce como Magnitud local ( $M_L$ ) y nos sirve para evaluar la energía liberada en un terremoto a partir de la amplitud máxima registrada en un sismógrafo convencional.

Magnitud es el logaritmo de la máxima amplitud de un sismograma registrado por un instrumento estándar a una distancia de 100 kilómetros del epicentro. Como la escala es logarítmica, el incremento en una unidad de magnitud equivale a multiplicar la amplitud registrada por diez (Raúl Husid 1975).

La magnitud local  $M_L$  presentaba ciertos problemas ya que se evalúa para distancias cortas desde la fuente sísmica y no especifica el tipo de onda a medir. Cuando se utiliza para distancias telesísmicas no resulta fiable, por lo que fueron apareciendo otros tipos de escalas de magnitud tales como  $m_b$  que mide la amplitud de las ondas P y la escala  $M_s$  que mide la amplitud de las ondas superficiales desarrolladas por Gutenberg y Richter (ver fig 4.1).

Otro parámetro fue propuesto en 1967 por el japonés Aki: el "**Momento Sísmico**" ( $M_0$ ). La aportación de este concepto en sismología fue una nueva medida para medir el tamaño de un terremoto, en función de las propiedades de las rocas y las dimensiones del área que sufre la ruptura.

Posteriormente Kanamori (1977) basado en el  $M_0$  de Aki, definió la "**Magnitud espectral**"  $M_w$ .

El concepto de magnitud, permite para clasificar los terremotos según sea su energía:

-	Terremotos grandes	$M \geq 7$
-	Terremotos moderados	$5 \leq M < 7$
-	Terremotos pequeños	$3 \leq M < 5$
-	Microterremotos	$M < 3$

#### 4.3. LA ENERGÍA DE LOS TERREMOTOS

Para conocer la Magnitud de un terremoto, como medida instrumental objetiva, se suele utilizar la escala Richter. Es una escala logarítmica, lo que significa que en caso de un terremoto de magnitud 8,6 no equivale a dos eventos sísmicos de magnitud 4,3 sino que es un valor mil veces más grande y la cantidad de energía es del orden de un millón de veces mayor (ver fig. 4.2).

Una sencilla relación empírica de Gutenberg y Richter relacionó la magnitud  $M$  de un terremoto con la energía producida en forma de ondas elásticas  $E_s$  (Udías 1983), de forma que:

$$\text{Log } E_s = 11,8 + 1,5 M.$$

Donde 11,8 y 1,5 son constantes y sustituyendo  $M$  por la magnitud de un terremoto dado se obtiene su energía equivalente en ergios.

Para hacerse con una idea más clara de la energía que libera un terremoto se podría comparar a la energía liberada por una explosión nuclear.

La primera explosión nuclear de una bomba de hidrógeno se realizó en el Pacífico en 1940 en el archipiélago de Bikini.

La potencia de esta bomba fue de 10 kilotones (aproximadamente 1 Kilotón equivale a la potencia explosiva de mil toneladas de T.N.T.) y liberó una energía de  $10^{19}$  ergios y sería equivalente a un terremoto de magnitud 5 en la escala de Richter (ver fig. 4.3).

Si se calcula la energía liberada por el terremoto de Arenas del Rey (Granada) en 25.12.1884, con una magnitud aproximada de 6,7 (I.G.N.) se tendría:

$$\text{Log. } E = 11,8 + 1,5 (6,7)$$

$$E = 7,07 \cdot 10^{21} \text{ Ergios.}$$

Por lo tanto, la energía liberada sería equivalente a una bomba de 708 kilotonnes o lo que es lo mismo, 707.945 toneladas de T.N.T.

En el mundo se consume aproximadamente  $10^{26}$  ergios al año y si se calcula la energía liberada en el mundo por todos los terremotos, resulta un valor entre  $10^{25}$  y  $10^{26}$  ergios.

Generalmente ocurre sólo un terremoto superior a magnitud 8 por año, unos 20 eventos sísmicos con magnitudes entre 7,0 y 7,9, unos 150 eventos con una magnitud entre 5,0 y 5,9, alrededor de 7.000 con magnitud entre 4,0 y 4,9 y más de 50.000 con magnitud entre 3,0 y 3,9 (Andrew Maskrey 1986).

#### 4.4. ACELERACION MAXIMA DEL TERRENO

Muchas de las personas que han padecido terremotos, han descrito que algunos de sus efectos se asemejaban a una aceleración o frenazo brusco de un coche, como si hubieran sido lanzados hacia arriba.

Los conceptos de aceleración, velocidad y desplazamiento del suelo se desarrollaron en los años sesenta con la finalidad de aplicar los conocimientos adquiridos en la ingeniería sísmica; por ello se construyeron unos nuevos sismógrafos que se han llamado **acelerógrafos**. Estos instrumentos están diseñados para conocer el movimiento fuerte del suelo y sólo se ponen en marcha cuando se produce la sacudida sísmica.

Las aceleraciones pueden ser horizontales o verticales. Normalmente las aceleraciones verticales son menores que las horizontales. Para registrar el movimiento son necesarios tres acelerógrafos dispuestos en las tres direcciones ortogonales, dos de ellos para registrar las aceleraciones horizontales, y uno dispuesto verticalmente para medir las aceleraciones verticales.

Las aceleraciones verticales fuertes son capaces de lanzar hacia arriba objetos y personas, pero no son tan peligrosas como las aceleraciones horizontales ya que éstas últimas son capaces de dañar o destruir las edificaciones por ejercer un efecto cizalla en sus estructuras. Para cuantificar las aceleraciones verticales y horizontales se miden como porcentaje de la gravedad terrestre (% g) siendo  $g = 980 \text{ cm/seg}^2$ .

Es importante que a la hora de proyectar una obra que está localizada en una zona de riesgo potencial de terremotos, el ingeniero o arquitecto disponga de datos precisos de las aceleraciones, fundamentalmente las horizontales, para poder así contrarrestar en el diseño de la obra, las posibles aceleraciones del terreno en el tiempo de vida útil que va a tener la edificación.

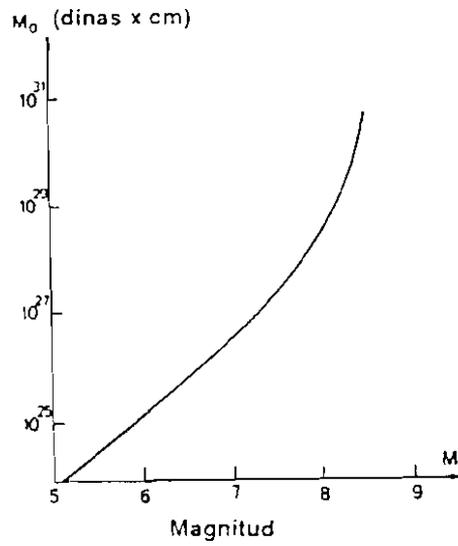


Fig 4.1 Relación entre magnitud y momento sísmico, según Rosenblueth (1975).

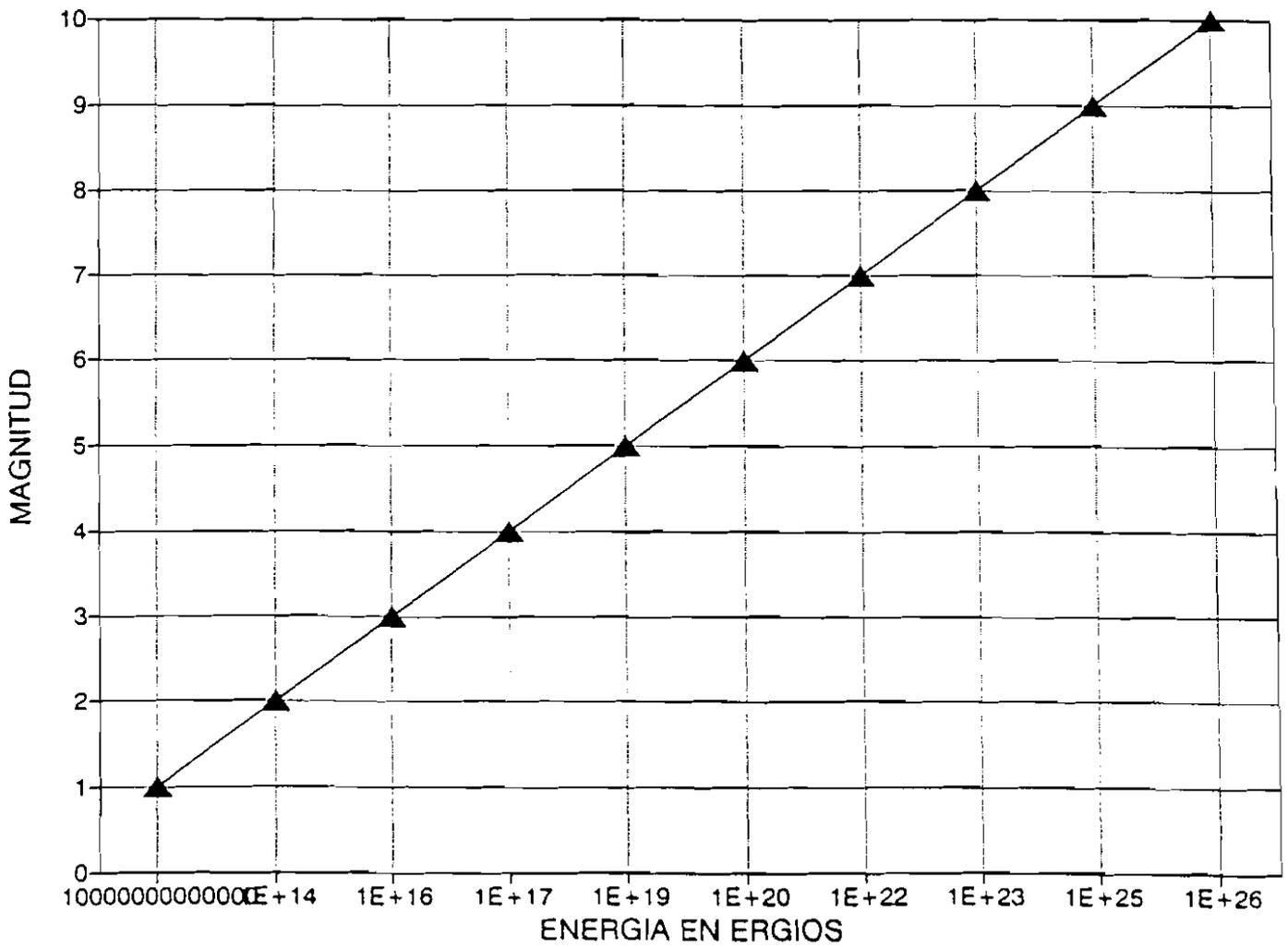


Fig 4.2 Relación entre la energía en Ergios y la magnitud de un terremoto.



# TERREMOTOS

## CAPITULO 5.- EFECTOS DE LOS TERREMOTOS

Las consecuencias y efectos de los sismos sobre las personas y las construcciones dependen de los distintos efectos sísmicos y podrían resumirse en:

- \* Vibración del suelo que afecta a los edificios con diferentes intensidades.
- \* Asentamientos diferenciales del suelo, deslizamientos, licuefacción y avalanchas.
- \* Desplazamiento del suelo a lo largo de las fallas.
- \* Inundaciones, como resultado de la ruptura de presas, canales, modificaciones del curso de los ríos, etc...
- \* Tsunamis.
- \* Incendios.

### 5.1 TSUNAMIS

Cuando se produce un terremoto submarino provocado por el movimiento de fallas verticales en el fondo del Océano, se ejerce un efecto de émbolo que impulsa el agua circundante produciéndose así un Maremoto o Tsunami. "Tsunami" es una palabra de origen japonés que significa "ola de marea"(ver fig. 5.1).

Los terremotos que originan tsunamis se conocen como terremotos tsunamigénicos, pero también pueden producirse maremotos por otras causas tales como deslizamientos en el fondo del mar, erupciones volcánicas, etc...

Los tsunamis son olas de enormes dimensiones con longitud de onda superior a los 100 km, y amplitudes en alta mar que no superan el metro. Viajan largas distancias a velocidades que oscilan entre los 700 y 1000 km/h, y ésta se puede calcular mediante la siguiente fórmula  $V_t = \sqrt{gL}$  siendo  $g$  la aceleración de la gravedad,  $L$  la profundidad del agua en la zona estudiada y  $V_t$  la velocidad del tsunami.

El terremoto ocurrido en Arauco (Chile) en 1960 alcanzó una magnitud de 8.5 y provocó un tsunami que arrasó a varios puertos a ambos lados del Pacífico, como el puerto japonés de Shiogahama que se encuentra a una distancia de 16.000 km de Arauco.

A medida que los tsunamis se acercan a la costa disminuye la profundidad del mar y aumenta el rozamiento de las olas con el fondo marino, así se reduce la distancia entre las crestas de las olas y aumenta su amplitud, que en algunos casos es superior a los 30 metros. La altura que puede llegar a alcanzar localmente un tsunami depende de la topografía del fondo marino y de las condiciones del relieve costero, factores que condicionan la gravedad de los daños. Se sabe que en playas bajas y llanas pueden llegar a alcanzar de 6 a 20 m de altura y más de 30 m en ensenadas en forma de uve.

Un tsunami no consiste en una ola simple, sino que está compuesto por varias olas, separadas por intervalos de tiempo de llegada que oscilan entre los 15 minutos a 1 hora. Generalmente la primera ola del tsunami no es la más importante y se diferencia muy poco de las olas ordinarias, pero después de la llegada de la primera se produce un impresionante descenso del nivel del mar, que deja varados en la playa miles de peces. El agua es succionada a medida que va llegando el primer gran valle de la ola y llega la primera ola gigantesca, seguida de otras más. El descenso brusco del nivel del mar ha sido la causa de que se hayan producido muchas víctimas mortales pues el falso alivio de que el peligro ha pasado hace que muchas personas vuelvan a sus casas para recuperar sus enseres o por simple curiosidad.

años	m	-1	0	1	2	3	4	Desconocida	Total
500 - 599						1			1
600 - 699								1	2
700 - 799				1	2	1	1		5
800 - 899				1					1
900 - 999					1				1
1000 - 1099									
1100 - 1199									
1200 - 1299				2					2
1300 - 1399					1	1			2
1400 - 1499				3		1			4
1500 - 1599				2	1				3
1600 - 1649				2	1+(1)	1	1		5
1650 - 1699				1	2	1		2	6
1700 - 1749				3		2	1	1	7
1750 - 1799				9	1	1	1		12
1800 - 1849				2	3				5
1850 - 1867					2	1	1		4
1868 - 1899	2	4	2	1			1		10
1900 - 1924	2	4	1	1					8
1925 - 1949	11	1	3	1		3			19
1950 - 1973	8	7	4	4			1	1	25
<b>Total</b>		23	16	36	22	13	7	5	122

Tabla 5.I. Frecuencia de Tsunamis clasificados según su magnitud (m=magnitud del tsunami)  
Tomado de ASADA et. al.(1982).

En Japón, país que ha sufrido los efectos de muchos tsunamis (122) desde el siglo VI (tabla 5.I) se ha propuesto adoptar una escala (tabla 5. II.) para medir los tsunamis producidos por terremotos. Es una escala similar a la utilizada para medir magnitudes de terremotos y se define como el logaritmo de la amplitud de la ola medida en la línea de costa en una estación de aforo estándar entre unos 10 y 300 km del origen del tsunami, según la ecuación:

$$m = 3.32 \log h$$

siendo "h" la altura máxima de la ola, en metros, medida en la costa.

Magnitud del tsunami M'	Energía (erg)	Altura de las ondas tsunami (h)
5	$25.6 \times 10^{23}$	>32
4.5	12.8	24 - 32
4	6.4	16 - 24
3.5	3.2	12 - 16
3	1.6	8 - 12
2.5	0.8	6 - 8
2	0.4	4 - 6
1.5	0.2	3 - 4
1	0.1	2 - 3
0.5	0.05	1.5 - 2
0	0.025	1 - 1.5
-0.5	0.0125	0.75 - 1
-1	0.006	0.50 - 0.75
-1.5	0.003	0.30 - 0.50
-2	0.0015	< 0.30

Tabla 5.II. Magnitud del Tsunami, altura y energía máxima de las ondas. Según LIDA (1963).

### 5.1.1 Red de alerta de tsunamis

La red de alerta de tsunamis fue creada en 1946 después del trágico maremoto que arrasó la ciudad de Hilo (Hawai) y varios puertos más del Pacífico (ver fig 5.2). El servicio Costero y Geodésico de los Estados Unidos, en colaboración con otros países, creó un sistema de alerta para predecir con eficacia los tsunamis con el fin de disminuir las víctimas y daños que producían (Hawai es afectado por un tsunami catastrófico cada 25 años).

En esta red están integrados varios países que rodean al Océano Pacífico, donde se han instalado estaciones de vigilancia y detectores que avisan la aparición de una ola producida por un sismo. Este instrumento (ver fig 5.3) fue inventado por el comandante C. K. Green, del Servicio Costero y Geodésico, y es capaz de distinguir las olas corrientes de las formadas por un terremoto.

El centro de control y proceso de datos de esta red está localizado en Honolulu (Hawaii). Cuando se detecta un terremoto en alguna zona del Pacífico que es susceptible de provocar un tsunami, se provoca la alarma y son avisadas todas las autoridades competentes para evacuar las zonas de riesgo potencial. Aunque se ha reducido el número de víctimas mortales, se siguen produciendo desgracias personales por la curiosidad, la ignorancia de las consecuencias y la indiferencia de algunas personas ante los avisos de evacuación, y optan por quedarse en la zona de riesgo para "ver" como llegan las olas como si de un espectáculo se tratara.

Aunque el sistema de alarma es eficaz, no es suficiente, pues existen áreas densamente pobladas que son muy vulnerables. Deberían de confeccionarse normas prohibiendo la construcción de casas en costas con un alto riesgo, pero el problema se va incrementado continuamente, el aumento de la población mundial y su alta concentración en zonas costeras indican que el mayor desastre producido por un tsunami aún está por llegar.

#### 5.1.2 Seiches

El profesor suizo F.A. Forel a finales del siglo pasado realizó un estudio del movimiento ondulatorio en los lagos suizos y observó que se producía un determinado tipo de oleaje al cual llamó seiche. Anders Kuales (1955) definió el término de "seiche sísmico" para describir las oscilaciones de los niveles de los lagos en Noruega e Inglaterra causadas por el terremoto de Assam (India) en 1950. La primera mención de este fenómeno fue descrita en 1755 en un artículo de la revista Scot's Magazine describiendo seiches en varios lagos escoceses incluyendo el Lago Ness que, en teoría, fueron producidos por el terremoto que destruyó Lisboa en 1755.

Se han observado olas de hasta 1,8 metros de altura en la costa del Golfo de México producidos por un terremoto a más de 4.000 Km de distancia.

#### 5.1.3 Tsunamis en España

España, aunque pueda parecer lo contrario, es un país susceptible de sufrir los efectos de tsunamis catastróficos, como quedó comprobado en el terremoto de Lisboa en 1755. Varias olas arrasaron muchas poblaciones del Golfo de Cádiz produciendo más de 2.000 víctimas mortales, miles de heridos y cuantiosos daños materiales.

El último tsunami que afectó a nuestras costas fue provocado por un terremoto ocurrido en el Atlántico el 7.7.1941 que afectó al Archipiélago Canario, sus efectos se pueden determinar con este fragmento de la prensa canaria:

" Poco después del medio día tuvo lugar un fenómeno que produjo gran alarma por lo imprevisto del caso. Tres grandes olas de unos 4 m de altura batieron con gran ímpetu sobre la entrada de la Avda. de José Antonio y arrancaron un buen trozo de las balaustradas de la misma, siendo lanzadas grandes piedras y cascotes contra el edificio del Cabildo. El agua inundó la explanada y penetró en la Comandancia de Marina alcanzando 1,50 de altura. Hubo varios heridos leves, se arrasó toda la mercancía depositada sobre el muelle, se produjeron grandes desperfectos en la carretera de S. Andrés y en el propio pueblo, en que el agua penetró por las calles" (La Tarde, 7 de Julio de 1941).

#### 5.1.4 Recomendaciones de Protección Civil Española en caso de maremoto o tsunami.

Las recomendaciones siguientes pretenden disminuir los daños que este fenómeno natural puede causar.

- Si vive en la costa y siente un terremoto lo suficientemente fuerte para agrietar muros, es posible que dentro de los veinte minutos siguientes, pueda producirse un maremoto o tsunami.
- Si es alertado de la proximidad de un maremoto o tsunami, sitúese en una zona alta de por lo menos 30 mts. sobre el nivel del mar en terreno natural.
- La mitad de los tsunamis se presentan primero como un recogimiento del mar, que deja en seco grandes extensiones del fondo marino; Corra, no se detenga, aléjese a una zona elevada, el tsunami llegará con una velocidad de más de 100 km/h.
- Si usted se encuentra en una embarcación, diríjase rápidamente mar adentro. Un tsunami es destructivo solo cerca de la costa. De hecho a unos 5.600 mts. de la costa y sobre una profundidad mayor a 150 mts. Ud. puede considerarse seguro.
- Tenga siempre presente que un tsunami puede penetrar, por rios, ramblas o marismas, varios kilómetros tierra adentro, por lo tanto aléjese de éstos.
- Un tsunami puede tener 10 ó más olas destructivas en 12 horas; procure tener a mano ropa de abrigo, especialmente para los niños.
- Tenga instruida a su familia sobre la ruta de huida y lugar de reunión posterior.
- Procure tener un aparato de radio portátil, que le permita estar informado, y pilas secas de repuesto.

## 5.2 DESLIZAMIENTOS Y AVALANCHAS

Los movimientos sísmicos pueden provocar, por las vibraciones del terreno, deslizamientos y desprendimientos en regiones sísmicas; estos fenómenos pueden afectar a pueblos y ciudades enteras.

En 1971 un terremoto provocó en los Andes Peruanos un desprendimiento en un Glaciar del Nevado de Huascarán, una montaña de 6.655 metros de altura. Se produjo un flujo de hielo, rocas y agua que se deslizó vertiente abajo a gran velocidad arrasando todo a su paso. Según descripción de un testigo presencial:

*"La superficie de la ola estaba curvada como si se tratase de una enorme ola marina rompiente; medía al menos 80 metros de alto. En Yungay, centenares de personas corrían alocadas, presas del pánico; algunos intentaban alcanzar la seguridad que ofrecía la colina del cementerio. El ensordecedor rugido era realmente terrorífico. Yo llegué a la cima de la colina justo a tiempo, en el momento en que la avalancha de derrubios chocó contra el pie de la misma. Tanto mis amigos como yo tuvimos que salvar nuestras propias vidas en tan sólo 10 segundos".*

Esta terrible avalancha causó la destrucción de dos ciudades y la muerte de cerca de 20.000 personas.

En España también se han registrado desprendimientos y deslizamientos como consecuencia de movimientos sísmicos. El último terremoto destructor que afectó a España en 1884, provocó numerosos desprendimientos en varios pueblos, siendo el más grave el ocurrido en la localidad de Tajo de Alhama que arrastró por un precipicio a varias casas, siendo la causa principal de daños y los 307 muertos registrados en este pueblo. También ocurrieron deslizamientos que arrastraron pueblos enteros, como Guevesar y Guajar Alto, asentados sobre terrenos margosos.

## 5.3 INCENDIOS

Los incendios que son consecuencia de terremotos han sido causa en algunas ocasiones de una enorme destrucción en ciudades afectadas por sismos, llegando incluso a provocar un mayor daño que el sismo en sí. Los terremotos de Lisboa (1755), San Francisco (1906) y Tokio (1923) provocaron incendios de impresionantes dimensiones que arrasaron a estas ciudades. En el caso de San Francisco, el incendio se prolongó durante tres días arrasando 508 manzanas de la ciudad. Murieron 700 personas y los daños oscilan entre los 350 y 1.000 millones de U.S. \$ de la época.

En Tokio, las consecuencias fueron más desastrosas: la destrucción casi completa de la ciudad, 156.693 víctimas y ninguna edificación escapó sin daño al terremoto o al incendio.

En las actuales urbes, los incendios producidos por terremotos son un riesgo potencial que pueden agravar de forma notable los efectos de un terremoto. Las

En la localidad de Anchorage (Alaska), se produjo un movimiento de tierra que penetró 300 metros en el mar a lo largo de 2.800 metros de costa, arrastrando consigo todo lo que estaba edificado.

Según Kuribajashi y Tatsouka (1975) a partir del grado de intensidad V (M.S.K.) se pueden observar efectos de licuefacción en las proximidades del epicentro. Existe una relación que indica que distancia puede ser afectada por fenómenos de licuefacción y la intensidad sísmica del epicentro.

$$D(\text{km}) = 10N^{-5}$$

D es la distancia afectada por fenómenos de licuefacción.

N es el grado sísmico en el epicentro.

La licuefacción de los suelos viene condicionada por el nivel freático. Se ha observado que este fenómeno ocurre cuando el nivel freático se encuentra a menos de 5 metros de la superficie y 10 metros como máximo, comprobándose así que cuanto mayor sea la intensidad de los terremotos más se ablanda el terreno perdiendo su consistencia.

En áreas geográficas muy pequeñas, como puede ser el caso de una ciudad, se pueden observar varios grados de diferentes intensidades; este hecho tiene que ver con la diferente distribución y origen del subsuelo. En el terremoto de Niigata (Japón) de 1964 se pudieron observar estas diferencias de intensidad (M.S.K.) en función de los terrenos así:

Tipos de terreno	Intensidad sentida (M.S.K.)
Terreno terciario	V
Aluvial y arena de duna	V
Arena y grava aluvial	V
Aluvial arcilloso (espesor de 60 m)	VI-VII
Rellenos	VIII

### Efecto de la topografía

La topografía juega un papel muy importante a la hora de considerar el emplazamiento de una obra en zonas sísmicas, ya que según las características fisiográficas de cada zona las ondas sísmicas variarán su comportamiento.

**Superficie libre plana:** Las ondas S se duplican, no existen variaciones locales causadas por la superficie.

Cordilleras: Se produce una amplificación de las ondas en las cimas.

Valle: Se produce una deamplificación de las ondas sísmicas.

Cañones: Se produce, según Serma (1985), una amplificación en el margen del cañón y una deamplificación en su base.

Cuencas sedimentarias: Se producen fenómenos de resonancia en la dirección lateral, se incrementan la amplitud y la duración del movimiento.

Las ondas sísmicas afectan a las estructuras en función de :

- \* Ondas de baja frecuencia y períodos largos hacen que los edificios altos entren en resonancia, no afectando a los bajos.
- \* Ondas de alta frecuencia y períodos cortos afecta a las casas bajas y no a las grandes estructuras.
- \* Período de resonancia del terremoto.
- \* Período fundamental de la estructura.
- \* El mayor daño se produce en terreno llano y menos en terreno duro.
- \* Los edificios altos sufren más daños que los bajos en suelos blandos y profundos.

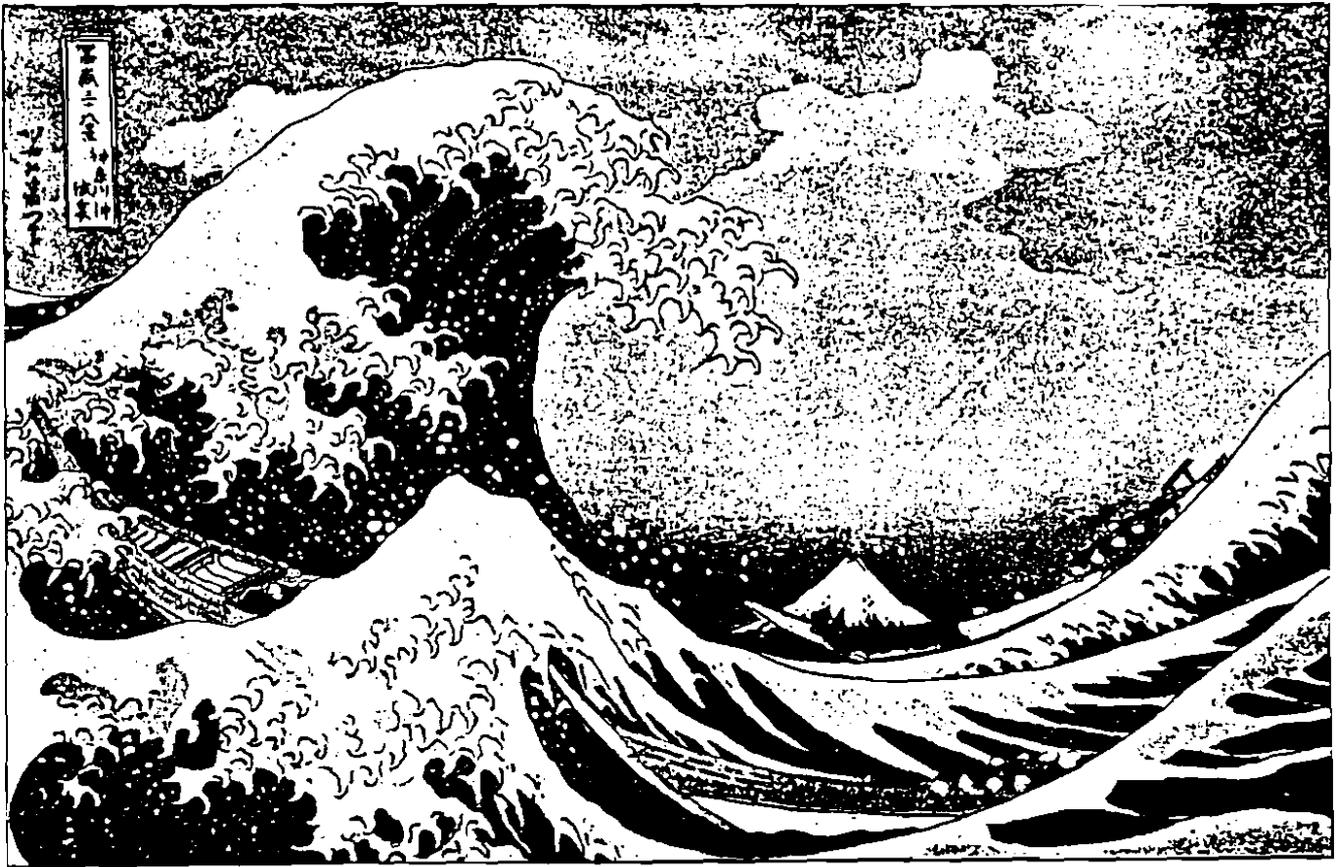


Fig. 5.1 Tsunami cerca de la costa del Japón, dibujado por Hokusai, gran pintor japonés del siglo XIX. El título (ángulo superior izquierdo) mas o menos veinte a decir: "La cresta de la gran ola de Kanagawa". Al fondo, el cono nevado del Fujiyama.

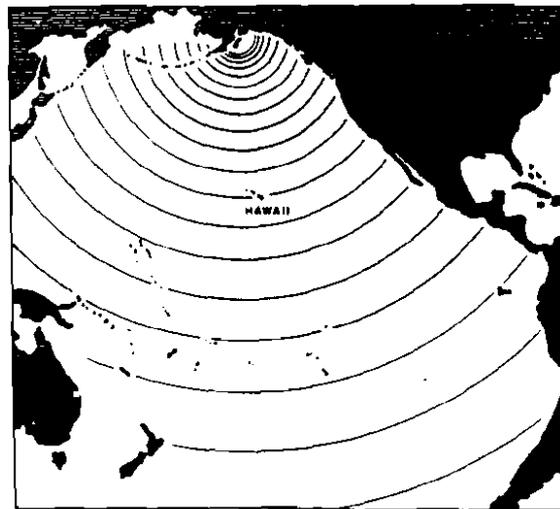


Fig. 5.2 En 1946, un tsunami cusado por un seismo submarino en las costas de Alsaka, atravesó el Pacífico a una velocidad de 900km/h, alcanzando en solo cuatro horas Hawaii, donde causó 173 víctimas. Según Agueda et. al. (1978)

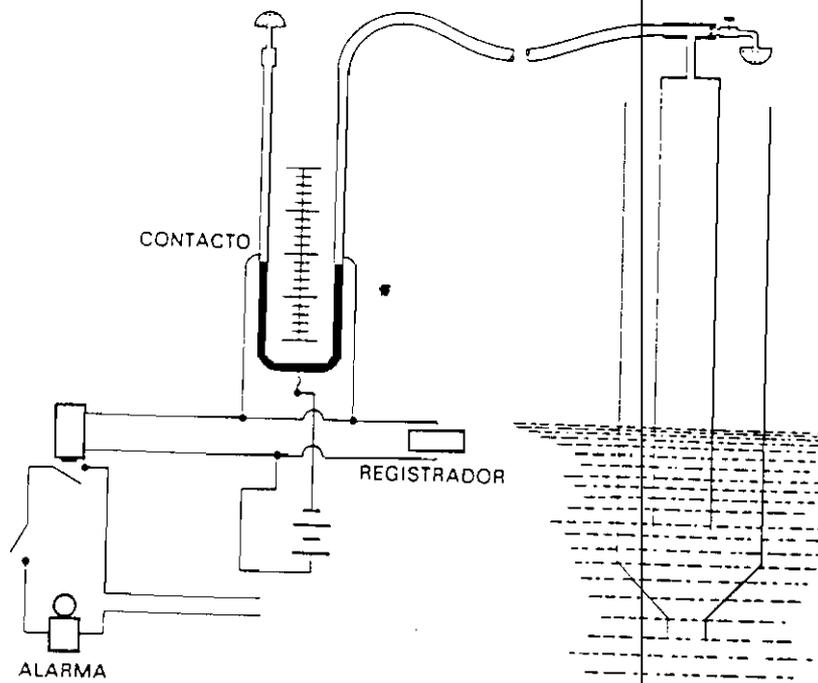


Fig. 5.3 Detector que señala la aparición de una ola producida por un sismo. Una columna de aire en el interior del tubo, a la derecha, se eleva y desciende con la marea. Una ola de magnitud suficiente aumenta la presión del aire, que hace moverse el mercurio, cerrando el circuito y sonando la alarma. Según Bernstein (1954).

# TERREMOTOS

## CAPITULO 6. PREDICCION DE LOS TERREMOTOS

### 6.1. OBJETIVO DE LA PREDICCION

Como se ha visto en el capítulo 1, existen ciertas zonas de nuestro planeta que están expuestas a sufrir terremotos. Al ser algunas de estas zonas lugares con elevadas concentraciones humanas, las consecuencias pueden ser desastrosas. Por ello, ciertos países que vienen padeciendo desde tiempos históricos los efectos de los sismos están investigando la forma de predecirlos. Japón, U.R.S.S, China y los Estados Unidos están a la cabeza en la investigación para determinar la forma de predecir con cierta antelación un terremoto destructor y poder así mitigar parte de sus consecuencias.

Los primitivos métodos de predicción eran muy variados. Aristóteles asociaba los días sofocantes y sin viento como días precedentes a un sismo. También se creía que el paso de un cometa era un aviso de un futuro terremoto (o cualquier otra catástrofe). Séneca en el año 60 de nuestra Era asoció el paso de un cometa con la destrucción de varias ciudades de Acaya y Macedonia (Grecia) por un sismo.

También se creía y se cree que los animales pueden predecir un terremoto y actualmente se efectúan estudios de su comportamiento antes de un terremoto.

Ultimamente se han desarrollado numerosas técnicas instrumentales que pueden medir pequeñas variaciones en las condiciones físicas de las rocas, sirviendo de base para poder determinar si se producirá o no un terremoto.

### 6.2. METODOS DE PREDICCION SISMICA

Desde mediados de este siglo se viene realizando un notable esfuerzo científico en materia de predicción sísmica y se han desarrollado técnicas y estudios que en un futuro podrán llegar a predecir de forma segura los terremotos (ver fig 6.1).

Se pueden distinguir dos tipos de predicción: predicción **temporal**, que daría el momento y punto exacto en el cual se producirá un terremoto, y la predicción **estadística** que utiliza datos históricos y técnicos estadísticos para predecir las intensidades máximas posibles, aceleraciones, etc.

Predicción temporal	Métodos instrumentales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modificaciones del nivel del suelo.</li> <li>- Resistividad eléctrica y magnética de las rocas.</li> <li>- Cambio de velocidad de las ondas sísmicas.</li> <li>- Emisión de Radón.</li> <li>- N° de terremotos.</li> </ul>
	Métodos alternativos	
Predicción estadística	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método determinista.</li> <li>Método probabilista.</li> <li>Método de valores extremos.</li> </ul>	
Lagunas sísmicas		

Tabla 6.I. Métodos de predicción sísmicos más conocidos.

### 6.2.1. Predicción Temporal

#### Métodos Instrumentales

Existen en la actualidad varios métodos que pueden valer para predecir futuros terremotos. Son métodos que necesitan un instrumental muy sofisticado y el apoyo logístico de muchos científicos. En realidad resultan caros y son necesarios altos presupuestos durante años para llegar a algo positivo. Los métodos más aceptados son:

**Modificación del nivel del suelo.** Se mide el grado de deformación del suelo mediante niveles y teodolitos. También se pueden medir cambios en la inclinación del suelo mediante inclinómetros.

**Resistividad eléctrica y magnética de las rocas.** Se observan modificaciones en la sensibilidad eléctrica de las rocas, ya que ésta disminuye bajo altas presiones antes de que las rocas se fracturen (ver fig. 6.2).

**Cambio de velocidad de las Ondas P Y S.** Se ha comprobado con sismógrafos que la velocidad de las ondas P disminuye antes de un terremoto.

**Emisión de Radón .** Los escintilómetros detectan cambios en la concentración de radón disuelto en aguas subterráneas. La concentración aumenta antes de que se produzca un terremoto.

**Número de terremotos.** Se ha observado que se produce una modificación en la sismicidad de la zona con anterioridad a una sacudida fuerte (ver fig. 6.3).

Desde 1965 en Japón se vienen acumulando numerosos datos de precursores sísmicos en un programa de predicción sísmica. Rikitake (1988) ha determinado la distancia media en la cual los precursores sísmicos son válidos para una magnitud dada. (ver tabla 6. II).

	D <sub>MAX</sub> (Km)						
	M=5.0	M=5.5	M=6.0	M=6.5	M=7.0	M=7.5	M=8.0
Observación Geodésica	10	17	27	46	69	117	190
Microterremotos	69	81	93	112	138	166	204
Inclinómetro (Péndulo)	37	60	93	144	234	363	501
Inclinómetro (Nivel de burbuja)	43	60	85	131	182	257	363
Esfuerzos (extensómetro)	102	138	190	282	398	589	813
Esfuerzos (deformómetro)	89	126	174	257	398	589	813
Campos Geomagnéticos	4.6	8.7	25	30	55	100	182
Corrientes terrestres	25	39	60	98	144	234	346
Resistividad (Variómetro)	158	245	380	562	912	1380	2040
Resistividad (Electrodos de larga distancia)	4.4	7.6	13	22	37	63	107
Radiación electromagnética	60	58	132	182	269	398	616
Radón y otros elementos geoquímicos	117	174	257	380	562	812	1150
Aguas subterráneas/ manantiales de agua caliente	21	39	72	151	282	589	1050

Tabla 6. II. Distancia de la detención de precursores para varias disciplinas (D<sub>max</sub>) según RIKITAKE, T. (1988).

### Métodos alternativos

Aparte de los métodos instrumentales de predicción sísmica se están investigando otros métodos basados en el comportamiento de distintos animales antes de los terremotos. Parece ser que las rocas cuando están sometidas a esfuerzos liberan ondas sonoras de altas frecuencias que están más allá del nivel de audición humana. Los animales poseen un oído más sensible que los humanos y quizás sean capaces de percibirlos. La República Popular China es pionera en este tipo de estudios. En Japón la creencia de que los barbos son capaces de detectar un sismo con anterioridad ha llevado a científicos a realizar investigaciones al respecto y han descubierto que estos peces son muy sensibles a perturbaciones del suelo y se agitan ante tales estímulos.

### 6.2.2 Predicción estadística.

Utilizando datos estadísticos e históricos de la sismicidad se pueden predecir con cierta probabilidad parámetros tales como intensidad, aceleración máxima, o períodos de retorno, entre otros. Tales informaciones son muy útiles en ingeniería sísmica, ya que proporciona datos con vistas al diseño de estructuras sismorresistentes.

Se pueden confeccionar mapas de peligrosidad sísmica para una región según cálculos estadísticos y probabilísticos de la sismicidad histórica. Para obtener estos datos se suele recurrir a los bancos de datos de sismicidad histórica que existen en cada país. En España el organismo encargado de recopilar y administrar esta información es el Instituto Geográfico Nacional, perteneciente al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (M.O.P.T.).

Algunos de los métodos de confección de mapas son:

#### Método determinista

Los métodos deterministas están basados en la premisa de que la sismicidad futura de una zona será igual a la del pasado. Los primeros métodos se desarrollaron en la U.R.S.S. (GORSHKOV, 1941) y en los Estados Unidos (RICHTER, 1959). El inconveniente de estos métodos es que supone que la sismicidad es estacionaria en el tiempo y que no van a producirse en el futuro terremotos mayores que los observados. Hay que tener en cuenta que los registros históricos sólo son precisos a partir de este siglo.

#### Método probabilista

Son métodos que están basados en cálculos probabilistas. Y requieren la utilización de teorías estadísticas de los datos. Se basan en el conocimiento de la sismicidad histórica, para establecer a continuación las leyes probabilistas que rigen los fenómenos sísmicos. Presentan ciertas ventajas si se comparan con los deterministas, como es el poder obtener la distribución de probabilidades asociadas a cada nivel de riesgo. También considera que la sismicidad se distribuye uniformemente dentro de cada fuente, por lo que no es necesario conocer con exactitud las localizaciones de los epicentros. Con este método se pueden obtener períodos de retorno y la probabilidad anual de que se produzca un sismo con una intensidad dada.

El periodo de retorno de un sismo fue definido por Gumbel y lo definió como el inverso de la probabilidad anual que se obtiene de la función para un período de n años.

$$\text{Probabilidad en } n \text{ años} = 1 - (1 - \text{prob. anual})^n$$

Por ejemplo, para un nivel de intensidad dado, si su período de retorno es de 100 años hay un 65% de probabilidad de que ocurra.

#### Método de valores extremos

Este método fue desarrollado por Gumbel en 1954 y consiste en dividir una muestra original en  $n$  intervalos de tiempo y tomar el máximo sismo de cada intervalo. El inconveniente de este método es que al tomar los valores extremos se puede perder información de los mismos con intensidades o magnitudes moderadas.

#### 6.2.3 Lagunas sísmicas

Un nuevo enfoque de predicción sísmica basado en datos históricos es el concepto de "lagunas sísmicas" o "seismic gaps". La idea fue desarrollada por Kerr (1979) y consiste básicamente en determinar las zonas incluidas en una región sísmica que no han experimentado terremotos importantes en un período de tiempo mayor que el intervalo histórico medido entre dos sismos, son zonas con una alta probabilidad que se produzcan terremotos (ver fig 6.4).

Se han obtenido hasta el momento siete resultados positivos, el más espectacular fue en Oaxaca (México) donde se predijo un sismo con magnitud  $7,5 \pm 0,25$ , y se produjo un terremoto de 7,7 con el epicentro a tan sólo 50 kilómetros del epicentro probable.

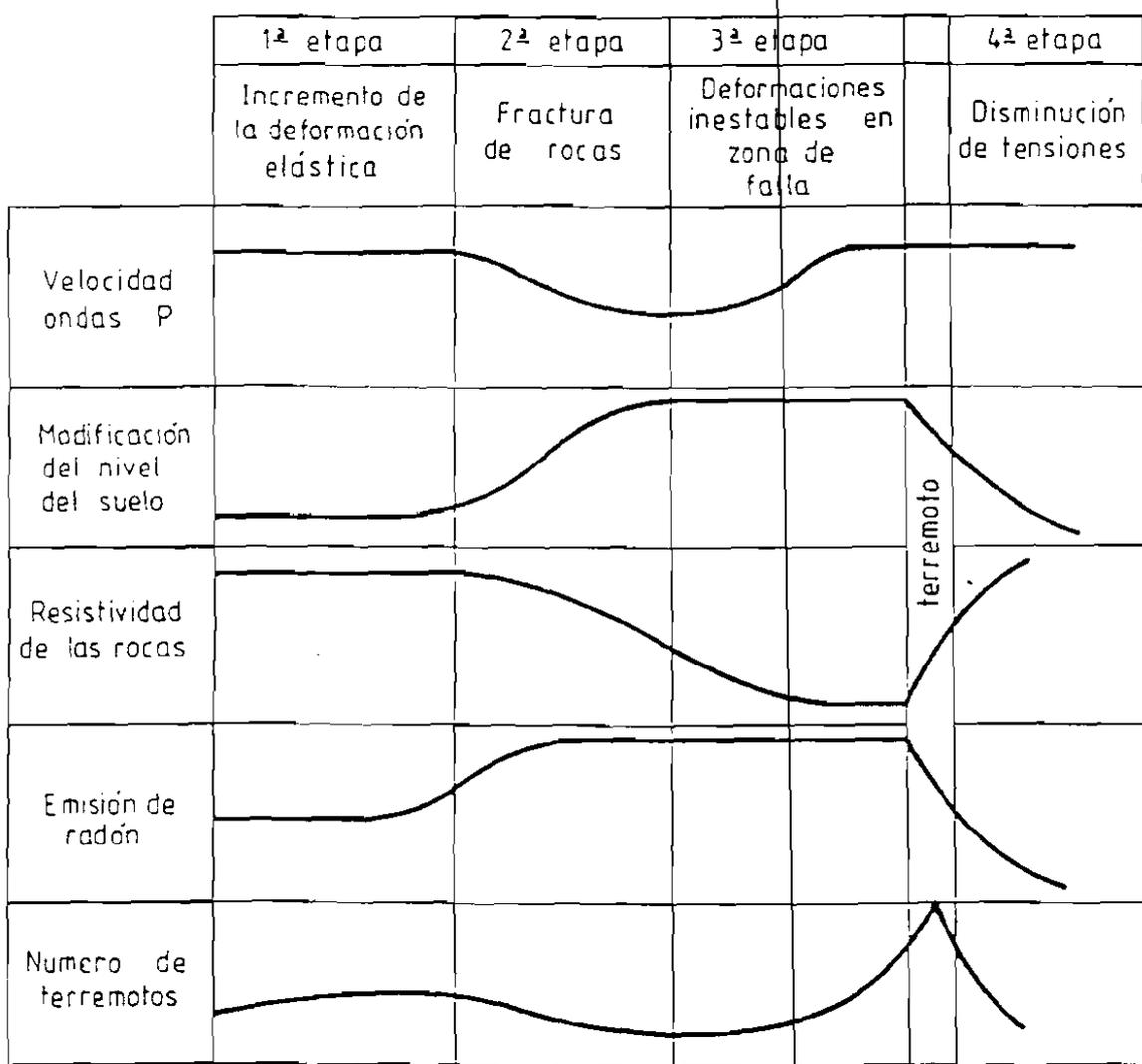


Fig. 6.1 Parámetros sísmicos usados en la predicción sísmica, según Bolt (1975).

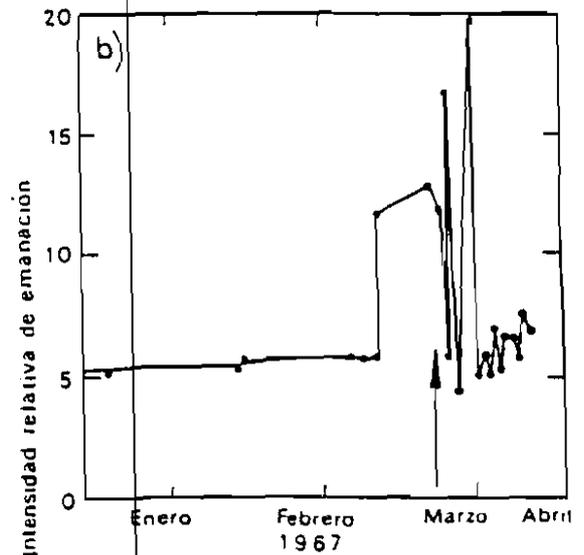
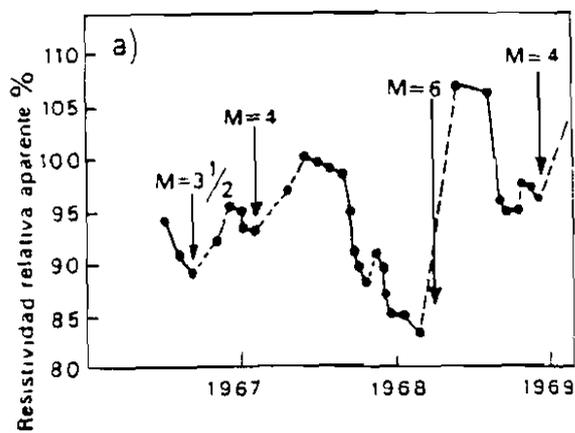


Fig. 6.2 a) descensos den la resisitividad eléctrica precediendo a cuatro seismos registrados entre 1967 y 1969 en Garm (URSS). b) elevación en la cantidad de radón en un pozo profundo cercano al hipocentro del seismo de Tashkent (URSS) en 1967. Según Scholz et. al. (1973).

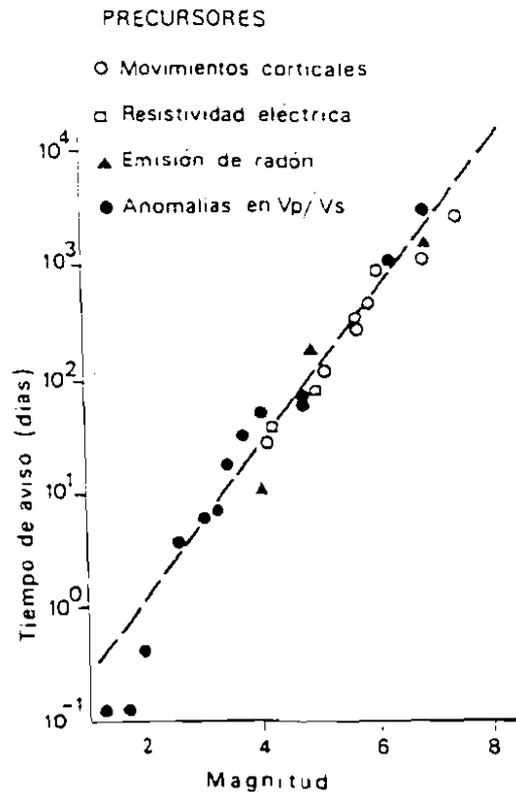


Fig. 6.3 Tiempo de aviso de distintos precursores sísmicos en función de la magnitud del terremoto subsiguiente. Los grandes seismos son delatados con varios meses de antelación. Según Scholz et. al. (1973).

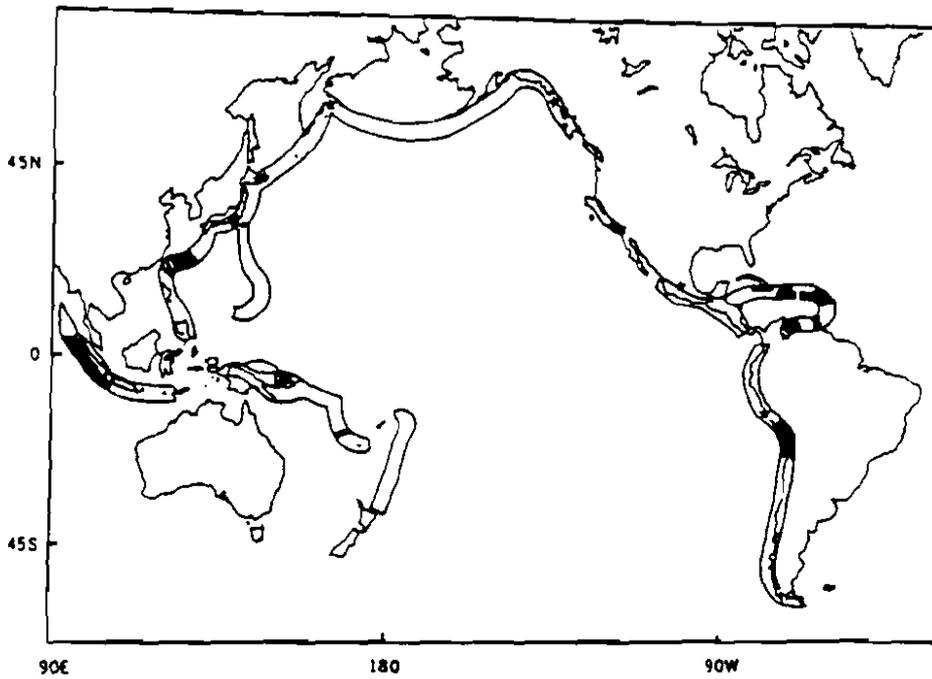


Fig. 6.4 Principales lagunas sísmicas (en negro) en las zonas circumpacíficas y del Caribe. Las estrellas marcan los lugares en los que tuvo lugar una predicción sísmica acertada. según Kerr (1979).



# TERREMOTOS

## CAPITULO 7 . PREVENCIÓN DE LOS TERREMOTOS

### 7.1 RELACION ENTRE LOS TERREMOTOS Y LA POBLACION MUNDIAL

Ya en 1798 Thomas Maltus en su obra "Ensayo sobre el principio y sus efectos en el futuro perfeccionamiento de la sociedad"; aseguraba que la población de la Tierra acabaría por exceder la capacidad mundial de producción de alimentos. Verdaderamente, se ha producido un notable incremento de la población mundial, hoy cercana a los 5.000 millones de habitantes. La población del planeta en 1950 era aproximadamente 2.500 millones de habitantes y pasará a más de 6.000 millones para el año 2.000 (ver fig. 7.1).

Como se ha visto en capítulos anteriores, existen zonas de nuestro planeta en las que la probabilidad de que ocurran terremotos es muy elevada, como por ejemplo el Cinturón de Fuego del Pacífico. Además, se está registrando un incremento de la población mundial en zonas de alto riesgo, como en San Francisco, Tokio y Los Angeles (ver mapa distribución terremotos en el cap. 1) con el consiguiente aumento de riesgo. Según Lechat (1980) se estima que a lo largo de la historia de la humanidad han perecido un total de víctimas que oscila entre los 10 y 15 millones de habitantes, siendo que en éste último siglo, aún sin finalizar, se supera ya el millón de muertos (ver fig. 7.2).

Según un informe de la UNDR0 (Ofina de las Naciones Unidas para ayuda en caso de catástrofes) de 1983 el número de víctimas mortales provocadas por catástrofes naturales fue cuatro veces superior en la década de los 70 que en la de los 60. En el caso de los terremotos, se han producido 781.893 víctimas mortales y unas pérdidas económicas superiores a los 20.000 millones de dólares (ver fig. 7.3).

Se viene observando desde la antigüedad, que el número medio de víctimas mortales provocada por terremotos aumenta de década en década. Esto no es debido a que se produzcan más terremotos en la actualidad que en el pasado, ya que incluso durante los años 70 el número de terremotos con magnitudes elevadas fue inferior al esperado; lo que ocurre es que, por el incremento de la población y asentamientos poblacionales en estas zonas de alta peligrosidad, han pasado a ser zonas de elevado riesgo potencial. Como ejemplo según estudios del Tokai Bank Limited, del Japón un terremoto catastrófico que con alta probabilidad afectase en los próximos años a Tokyo y Yokohama (en 1923 se produjeron 143.000 víctimas mortales provocadas por un terremoto de magnitud 8,2), causaría daños económicos de por lo menos 600.000 millones

de dólares y la reconstrucción del area afectada podría costar cerca de 900.000 millones de dólares por evento, la actual civilización, con todas sus sofisticadas tecnologías, es muy vulnerable a un terremoto catastrófico.

En 1980 la UNESCO propuso una expresión para relacionar todos los aspectos del problema:

$$\text{RIESGO} = \text{Peligrosidad} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Valor económico.}$$

La única salida posible es efectuar una prevención ante tales catástrofes, una correcta planificación territorial identificando el tipo de riesgo (intensidades máximas posibles, fallas, tipo de terrenos) en mapas de zonificación y microzonificación en zonas de alto riesgo; la obligatoriedad de construir utilizando las Normas Sismorresistentes en zonas de riesgo, y una educación a la población (objetiva) de los riesgos a que estan expuestos, informando y enseñando medidas a tomar en caso de que se produjera un sismo.

Los elementos más importantes a la hora de hacer estudios de prevención serían:

- 1) Elaboración de mapas de riesgo en base a datos históricos de terremotos, confeccionado mapas de zonificación en todo el territorio y microzonificaciones sísmicas en zonas densamente pobladas y con altas concentraciones de bienes materiales.
- 2) Elaboración de códigos de construcción adoptados a zonas con una alta sismicidad.
- 3) Creación de redes de vigilancia y alerta (estudiar los posibles precursores de un sismo).
- 4) Estudio de vulnerabilidad de la población y sus recursos, observar en que medida una población puede hacer frente a las catastrofes con los medios de que dispone. En las comunidades pobres esta vulnerabilidad nunca se podría reducir permanentemente
- 5) Elaboración de planes de emergencia.
- 6) Educación de la población. Son necesarios programas de información y formación con el fin de proporcionar las medidas a tomar antes, durante y después del terremoto.

## 7.2 PROTECCION CIVIL COMO HERRAMIENTA DE PREVENCION

En España la Dirección General de Protección Civil, dependiente del Ministerio del Interior es la encargada de la preparación y gestión en caso de catástrofes, y, naturalmente están incluidas aquéllas producidas por los terremotos.

La ley 2/85 sobre Protección Civil ha configurado un sistema integrado en planes territoriales de Protección Civil totalmente descentralizado, a nivel de Comunidad Autónoma, para hacer que la ayuda en caso de catástrofe esté más agilizada.

Se dispone que tanto los planes territoriales como especiales, establecerán los siguientes requisitos mínimos:

- a) Inventario de riesgos potenciales.
- b) Catálogo de recursos movilizables en caso de emergencia.
- c) Criterios sobre movilización y coordinación de recursos públicos y privados.
- d) Las directrices de funcionamiento de los distintos servicios que deben dedicarse a Protección Civil.
- e) La estructura operativa de los servicios que hayan de intervenir en cada emergencia con expresión del mando único de las operaciones.

Protección Civil en base a estos puntos ha confeccionado para aquellas provincias de un alto riesgo sísmico planes de emergencia sísmica. A este efecto, se han constituido diversos grupos de trabajo para formar una estructura operativa en caso de catástrofe sísmica (ver esquema del Plan Nacional de Ingeniería Sísmica).

Se han realizado estudios de las consecuencias de grandes terremotos y se ha observado que el número de heridos suele superar el de víctimas mortales en una proporción 3:1. Esto indica que es necesario que los planes de emergencia sísmica contemplen medidas de socorro a personas heridas y desabrigadas. Por ello los hospitales y demás centros necesarios para actuar en caso de catástrofe, edificios de bomberos, policía, etc..., deben estar contruidos según la normativa sismoresistente para resistir un terremoto destructor, ya que son obras cuya destrucción puede agravar notablemente los servicios de auxilio a la población afectada.

Protección Civil ha redactado una serie de recomendaciones en caso de terremotos que se describen a continuación:

ANTES:

1. En primer lugar revise detalladamente los posibles riesgos que pueden existir en su casa si acontece el terremoto en el salón-estar, cocina, comedor, dormitorio y demás dependencias de su casa
2. Aseguren al suelo, mediante soportes y otros artefactos, las conducciones y bombonas de gas, pues la avería o rotura de una conexión puede originar un incendio.
3. Coloque los objetos de gran tamaño y peso en el suelo y los cuadros a la menor altura posible del suelo.
4. Asegúrense debidamente las estanterías a las paredes.
5. Plantéese como reaccionaría usted y su familia en caso de un terremoto, de día o de noche, de acuerdo con las características de su hogar.
6. Enseñe a todos sus familiares cómo cortar la electricidad, el agua y el gas.
7. Tenga a mano una linterna y un transitor y pilas de repuesto para ambos.
8. Mantenga al día la vacunación de todos los miembros de su familia.
9. Sostenga conversaciones familiares en forma tranquila y serena acerca de los temblores y otros posibles desastres.
10. Piense lo que debe hacer cuando se encuentre en casa de unos amigos, en el trabajo o en una sala de espectáculos, etc.
11. Almacene agua en recipientes de plástico y alimentos duraderos.
12. Prepare ropas y mantas, sobre todo en tiempo frío.
13. Tenga a mano algo para cubrir su cabeza; casco, gorro acolchado, etc..

## **DURANTE:**

1. La primera y primordial recomendación es la de mantener la calma y extenderla a los demás.
2. Si está bajo techo tenga cuidado con la caída de ladrillos, artefactos de luz y otros objetos.
3. Manténgase alejado de ventanas, espejos y chimeneas.
4. En caso de peligro, protéjase debajo de una mesa, escritorio o cama; cualquier protección es mejor que ninguna.
5. Si está en un gran edificio, no se precipite hacia las salidas, ya que las escaleras pueden estar congestionadas de gente.
6. No salga por donde se están produciendo los desprendimientos.
7. Si está afuera, manténgase alejado de los edificios altos, postes de energía eléctrica y otros objetos que le puedan caer encima.
8. No utilice los ascensores, la fuerza motriz puede interrumpirse.
9. No deambule por las calles y diríjase a un lugar abierto, pero siempre con calma y serenidad.
10. Si va conduciendo, pare, no olvide que el terremoto solo dura unos segundos

## **DESPUES:**

1. No trate indebidamente de mover a los heridos con fracturas, a no ser que haya peligro de incendio, inundación, etc.
2. Si hay pérdidas de agua o gas, cierre las llaves de paso y comuníquelo a la compañía correspondiente.
3. No encienda fósforos, mecheros o artefactos de llama abierta, en previsión de que pueda haber escapes de gas.
4. Limpie urgentemente el derrame de medicinas, pinturas y otros materiales peligrosos.
5. No ande por donde haya vidrios rotos, cables de luz, ni toque objetos metálicos que estén en contacto con ellos.
6. No beba agua de recipientes abiertos sin haberla examinado y pasado por coladores o filtros correspondientes.

7. Compruebe si las condiciones de desagüe están en perfecto estado y permiten la descarga de agua en los inodornos.
8. No utilice el teléfono, ya que se bloquearán las líneas y sería imposible comunicarse para casos realmente urgentes.
9. No ponga en circulación simples rumores, ya que pueden ocasionar muchos daños después de un desastre, a causa del pánico.
10. No ande ni circule por los caminos y carreteras paralelas a la playa, ya que después de un terremoto pueden producirse maremotos.
11. Esté preparado para recibir sacudidas, que suelen producirse después del terremoto principal.
12. Infunda la más absoluta confianza y calma a todas cuantas personas tenga alrededor.
13. Corresponda a las llamadas de ayuda de la Policía, Bomberos, Protección Civil, etc...
14. Sepa que no hay reglas fijas que puedan eliminar todos los peligros que puedan originar un terremoto, pero los daños pueden reducirse considerablemente si se siguen estas normas y las que pueda recibir directamente de las autoridades.

### 7.3 DISEÑO ANTISISMICO

A lo largo de la historia en aquellas zonas del planeta sujetas a sufrir terremotos, el hombre ha ido construyendo mediante un mecanismo de selección natural, edificios más resistentes a los sismos y desechando aquellos cuyas estructuras no habían resistido.

La elaboración de Normas Sismorresistentes de obligado cumplimiento para obras en zonas de alto riesgo sísmico son propuestas en 1958 por C. Richter en su tratado "Elementary Seismology", ya que una medida preventiva para reducir el número de víctimas provocadas por un terremoto es hacer que los edificios puedan resistir los sismos sin derrumbarse sobre las personas que albergan en su interior.

Las Normas Sismorresistentes, debido a la complejidad del fenómeno sísmico no dan una garantía absoluta de que el edificio no vaya a ser afectado por el sismo pero sirven para evitar daños mayores tales como el colapso total. En un terremoto destructor la edificación puede ser un éxito de diseño y resistir

sin derrumbarse, sin provocar víctimas. Después del sismo el edificio podría estar tan dañado que habrá que derribarlo. Como se puede ver la función primordial del Diseño Sismorresistente es proteger a las personas.

La vulnerabilidad de un edificio a sufrir daños producidos en un sismo va a depender de la respuesta estructural del diseño resistente, del sistema constructivo, de los materiales y del comportamiento sísmico de la obra (F. Sauter 1988)

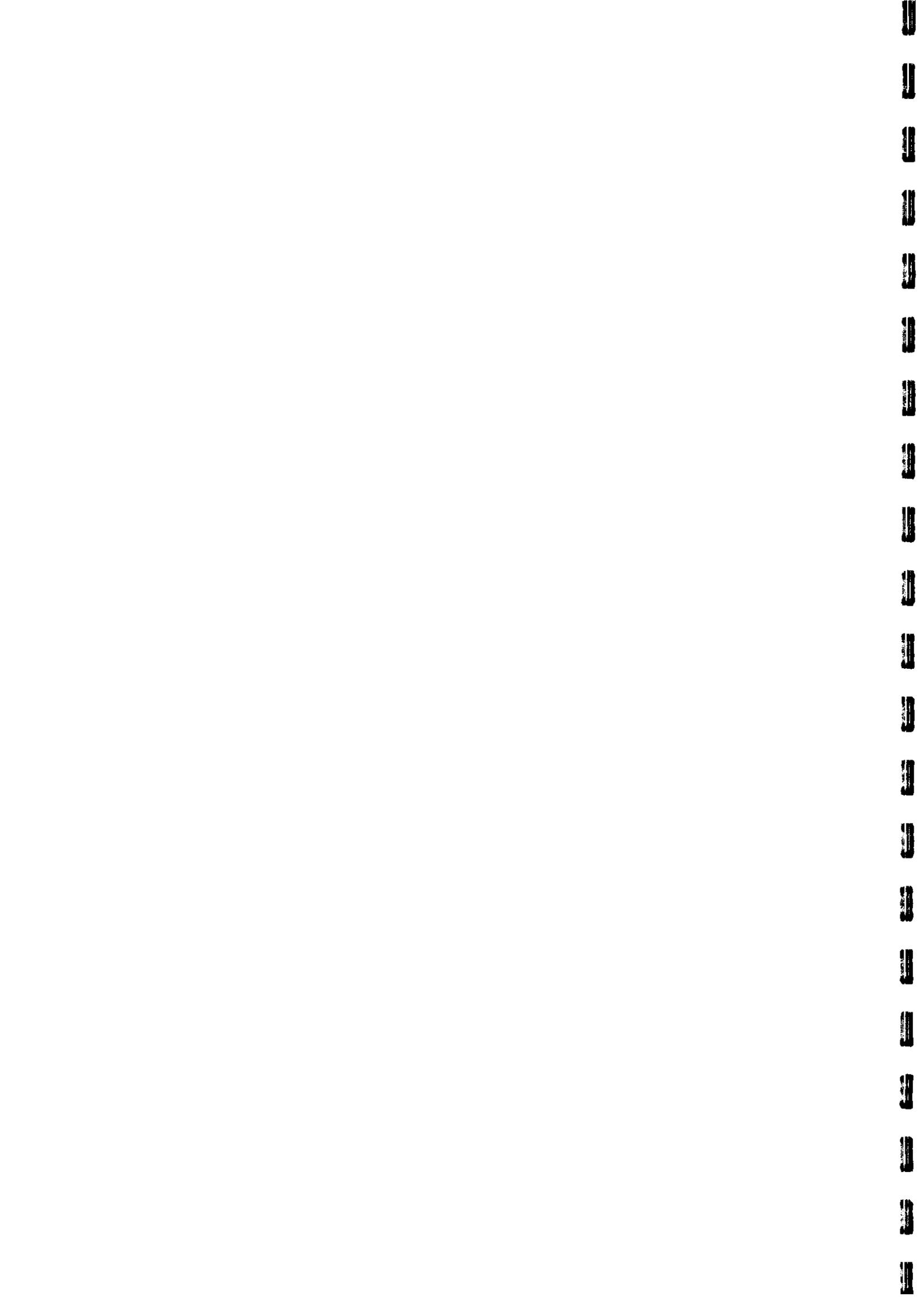
Es bien cierto que al incorporar un diseño antisísmico a una edificación encarecerá sus costes, pero evitará que se produzcan víctimas mortales, que no tienen precio.

La elaboración de una Norma Sismorresistente es bastante complicada y requiere una revisión periódica, con objeto de proponer las modificaciones necesarias de acuerdo con la experiencia adquirida. En la confección de la norma hay que considerar múltiples variables, el comportamiento del subsuelo y su relación con las estructuras vienen determinadas por distintos parámetros. Se ha observado que en una misma ciudad, en función del terreno se han producido diferencias de hasta tres grados de intensidad para un mismo terremoto y como es obvio, es muy distinto construir un edificio capaz de resistir intensidades de grado VI a uno capaz de resistir el grado IX.

Por todo esto, la aplicación de la Norma va a estar determinada por una clasificación del territorio en función de las intensidades máximas posibles.

En España la elaboración de Normativas Sismorresistentes data de 1969 y se han venido modificando con el paso de los años, adaptándolas a los nuevos conocimientos adquiridos en sismología e ingeniería. En el capítulo 8 se puede consultar la Norma actual vigente en España.





# TERREMOTOS

## CAPITULO 8. TERREMOTOS EN ESPAÑA

### 8.1 REGIONES SISMICAS DE LA PENINSULA IBERICA

En base a una tesis doctoral realizada por Antonio J. Martín Martín en 1984 titulada "Riesgo sísmico en la Península Ibérica" se ha realizado una síntesis y de las regiones de la Península Ibérica en donde se señalan las principales características sísmicas y tectónicas sin profundizar en ellas (ver fig. 8.1).

#### CADENA PIRENAICA

Corresponde a una de las áreas sísmicas más activas de la Península y comprende toda la cordillera Pirenaica. Geológicamente está formada por tres unidades tectónicas diferenciadas entre sí que son: la zona Norpirenaica o Septentrional, la zona Axial y la zona Surpirenaica o Meridional.

Según Gruishiani et al. (1987), las características que tienen en común los Alpes y los Pirineos que condicionan la localización de los terremotos son:

Importantes contrastes topográficos relacionados con conocimientos verticales, grandes heterogeneidades en profundidad y un alto grado de fracturación tectónica.

Los sismos se concentran principalmente en dos regiones: una al Oeste y otra al Este, ambas regiones tienen sismicidad histórica y actual. En los Pirineos Occidentales, alrededor del epicentro del terremoto de Arette y relacionado con la falla Nord-Pirenaica, la sismicidad está concentrada en una franja de 10 km de ancho por 20 km de profundidad. El último terremoto destructor registrado durante el siglo actual se registró el 13.8.1967 en la localidad de Arette (Francia) que alcanzó una intensidad de VIII y una magnitud de 5,5 (tabla 8.D).

La zona sísmica de los Pirineos Orientales es la región de Olot donde se registraron los máximos episodios sísmicos durante el período de 1427 - 1428, que se conoce como "serie olotina". Se registraron terremotos con intensidades mayores de X que produjeron la destrucción de amplias zonas, desde Puigcerda hasta Gerona.

N	FECHA	LATITUD	LONGITUD	MAGNITUD	INTENSIDAD
1	2.03.1427	42.2 N	2.5 E		X
2	2.02.1428	42.4 N	2.2 E		X
3	21.06.1660	43.1 N	0.1 E		VIII-IX
4	24.05.1750	43.1 N	0.0 E		VIII-IX
5	20.07.1854	43.0 N	0.1 W		VIII-IX
6	13.07.1904	42.8 N	0.0 E		VIII
7	24.07.1911	43.2 N	0.2 W	5.0	VII
8	19.11.1923	42.8 N	0.8 E	5.4	VIII
9	22.01.1924	43.2 N	0.7 W	5.3	VIII
10	13.08.1967	43.2 N	0.7 W	5.3	VIII
11	29.02.1980	43.1 N	0.4 W	5.1	VII

Tabla 8.I. Principales terremotos ocurridos en la zona de los Pirineos. Datos I.G.N.

En total, en la cadena Pirenaica se han producido desde el siglo XV un total de 17 eventos sísmicos con intensidades mayores que VIII y cuatro superiores a IX. La sismicidad de la región Pirenaica es moderada y los hipocentros se localizan en la corteza (Gruishiani et al. 1989).

### CORDILLERAS BETICAS

Se pueden distinguir dentro de este área dos grandes conjuntos de unidades geológicas: Las Zonas Internas y las Zonas Externas. La primera unidad está constituida por las unidades del Campo de Gibraltar y la zona Bética, mientras las Zonas Externas se encuentran formadas por la zona Penibética y la Subbética.

El Sistema Bético constituye una de las áreas de mayor sismicidad de la Península (tabla 8.II). Según el análisis de los datos sísmicos se pudieron distinguir algunas alineaciones de epicentros que están relacionados con la estructura geológica del área, cuya interpretación resulta bastante compleja.

Algunos de los terremotos históricos importantes ocurridos en la Península se han localizado en este área, como los de Vera (1518), Almería (1522), Torreveja (1829) y Arenas del Rey (1884). Todos ellos con intensidades superiores a IX.

Fecha	Hora origen	Latitud N	Longitud W	I <sub>s</sub>
1431, 24 abril		37.2	3.6	VIII Granada
1494, enero		36.7	4.4	VIII Málaga
1680, 9 octubre	07	36.7	4.4	IX Málaga
1804, 13 enero	17	36.7	3.5	VIII Motril
1806, 27 octubre	12	37.2	3.7	IX Santa Fe
1884, 25 diciembre	21: 08	36.9	4.0	IX Arenas del Rey
1911, 31 mayo	15: 13	37.2	3.7	VIII Santa Fe
1930, 5 julio	23: 11: 52	37.6	4.6	VIII Montilla
1951, 19 mayo	15: 54: 19	37.6	4.1	VII Alcaudete
1954, 29 marzo	06: 17: 05	37.0	3.7	V Dúrcal (profundo)
1956, 19 abril	18: 38: 50	37.2	3.7	VII Atarfe

Tabla 8.II. Terremotos más importantes ocurridos en la zona de las cordilleras Béticas. Datos de I.G.N.

### DEPRESION DEL GUADALQUIVIR

Corresponde a un área de sismicidad moderada, aunque se han producido algunos terremotos como el de Carmona (Sevilla) en 1504 en que se registró uno de los mayores terremotos de todos los ocurridos en la Península. Se cree que existen fallas que son susceptibles de producir terremotos de elevada magnitud, aunque parece ser que transcurren largos períodos asísmicos entre un terremoto y otro.

La proximidad la depresión del Guadalquivir a otras zonas de elevada sismicidad como la zona de la falla de Azores, Gibraltar y Sistema Bético hace que sea afectada por los grandes terremotos que se generan en el área circundante, como el terremoto de Lisboa de 1755.

### REGION SUROCCIDENTAL DE LA PENINSULA

Abarca todo el cuadrante suroccidental de la Península Ibérica y está formado por el Algarve, zona Sudportuguesa, zona de Sierra Morena, Cuenca del bajo Tajo y Sado, el batolito de Pedroches y la Orla Occidental. La sismicidad de este área esta distribuida en forma desigual mientras la zona de Algarve, Cuenca del bajo Tajo y Sado y Orla Occidental se han registrado varios terremotos de importancia con intensidades superiores a IX como de Vilafranca (1531), Tavira (1722), Setúbal (1858) y Benavente (1909). Las demás zonas son bastante asísmicas aunque se han registrado algunos terremotos de escasa importancia. Puede verse afectada por terremotos importantes ocurridos en otras regiones, como el terremoto de Lisboa en 1755.

## SISTEMA CENTRAL Y ZONA ASTURLEONESA

Incluye las zonas Norte y Noroccidental de la Península además del Sistema Central. Toda la zona es de muy larga sismicidad aunque se han registrado algunos sismos de mediana intensidad VII (M.S.K). En Septiembre de 1866 se registró un sismo de intensidad VII en La Coruña. En 1981 Johnson et al. confeccionarían mapas de riesgo sísmico de Galicia (tabla 8.III). que representaban el 10% de probabilidad de que las intensidades fueran superadas en 50 años. Esto equivale a un período de retorno de 475 años y los resultados obtenidos para las distintas capitales gallegas fueron:

			La Coruña	Lugo	Orense	Pontevedra
JOHNSON ET AL.(1981)			VI	V	VI	VII
PERIODO DE RETORNO 500 AÑOS	FRECUENCIA	1380-1980	V	IV	V	V
		INTENSIDAD	1915-1980	V	V	V
	GUMBEL I	1405-1980	IV	III	IV	IV
		1750-1980	IV	IV	IV	IV
		1800-1980	IV	IV	V	V
		1915-1980	IV	III	IV	IV
PERIODO DE RETORNO 1000 AÑOS	FRECUENCIA	1380-1980	V	V	VI	VI
		INTENSIDAD	1915-1980	V	V	V
	GUMBEL I	1405-1980	IV	IV	IV	IV
		1750-1980	V	IV	V	V
		1800-1980	V	IV	V	V
		1915-1980	IV	IV	V	IV

Tabla 8. III. Resultados obtenidos para distintos períodos de retorno para las capitales de provincias gallegas, según Johnson et al. (1976).

## CADENA COSTERO CATALANA Y DEPRESION DEL EBRO

Se ha delimitado una banda de máxima actividad sísmica de unos 20 km. de anchura, que se alinea con la dirección de la Cordillera Costero Catalana desde Gerona hasta Tarragona. En general, es una zona de baja actividad sísmica.

Localidad	Roca et al.	Método no zonificado 1915-1980		
		1000 años	500 años	100 años
Gerona	V	IV	IV	III
Barcelona	VII	VI	V-VI	IV-V
Zaragoza	VI	III	III	III

Tabla 8.IV Períodos de recurrencia de terremotos para distintas ciudades. Según Roca y Udías (1976).