

# Capítulo 1

## Generalidades

### *1.1 Introducción*

Costa Rica a lo largo de su historia, ha sido sacudida frecuentemente por grandes sismos debido a que se encuentra ubicada en una de las regiones más sísmicas del mundo, el "Cinturón de Fuego del Pacífico". Algunos ejemplos de estos sismos que han afectado el territorio nacional son: Cartago en 1910, Cóbano en 1991, Limón en 1991 y Alajuela en 1992.

Es importante mencionar que la mayoría de daños que sufren las estructuras durante los eventos sísmicos, se deben al mal comportamiento de estas, lo cual causa un fuerte impacto en la economía de un país debido a las pérdidas que se generaran.

Por lo anterior se considera de vital importancia los estudios de vulnerabilidad sísmica para nuestro país, encontrándose Costa Rica en la imposibilidad financiera para afrontar los costos de reconstrucción generados por los daños ante un terremoto. Un estudio de riesgo sísmico reducirá notablemente los impactos que podría causar un evento sísmico mediante el mejoramiento de prácticas de diseño y construcción en las zonas clasificadas de alto riesgo y servirá para implementar programas apropiados, que instruyan a las personas ubicadas en estas zonas, tendientes a lograr un comportamiento humano adecuado ante el evento.

El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) sostiene que un terremoto de magnitud cercana a 7,5 podría producirse frente a las costas de la Península de Nicoya en los próximos 10 años. El movimiento telúrico sería generado por la subducción de la placa Cocos en la Placa del Caribe, y se ubicaría aproximadamente frente a la costa, en las cercanías de playa Sámara.

Para esto, el OVSICORI se basa en un estudio del comportamiento sísmico durante el presente siglo (Ref. 22), el cual divide en tres ciclos de aproximadamente 10 años donde han producido eventos que han iniciado en Golfito y finalizado frente a las costas de Nicoya. El primer ciclo se inició en 1916 y el segundo en 1941. Según ese

# Capítulo 1

## Generalidades

### *1.1 Introducción*

Costa Rica a lo largo de su historia, ha sido sacudida frecuentemente por grandes sismos debido a que se encuentra ubicada en una de las regiones más sísmicas del mundo, el "Cinturón de Fuego del Pacífico". Algunos ejemplos de estos sismos que han afectado el territorio nacional son: Cartago en 1910, Cóbano en 1991, Limón en 1991 y Alajuela en 1992.

Es importante mencionar que la mayoría de daños que sufren las estructuras durante los eventos sísmicos, se deben al mal comportamiento de estas, lo cual causa un fuerte impacto en la economía de un país debido a las pérdidas que se generaran.

Por lo anterior se considera de vital importancia los estudios de vulnerabilidad sísmica para nuestro país, encontrándose Costa Rica en la imposibilidad financiera para afrontar los costos de reconstrucción generados por los daños ante un terremoto. Un estudio de riesgo sísmico reducirá notablemente los impactos que podría causar un evento sísmico mediante el mejoramiento de prácticas de diseño y construcción en las zonas clasificadas de alto riesgo y servirá para implementar programas apropiados, que instruyan a las personas ubicadas en estas zonas, tendientes a lograr un comportamiento humano adecuado ante el evento.

El Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI) sostiene que un terremoto de magnitud cercana a 7,5 podría producirse frente a las costas de la Península de Nicoya en los próximos 10 años. El movimiento telúrico sería generado por la subducción de la placa Cocos en la Placa del Caribe, y se ubicaría aproximadamente frente a la costa, en las cercanías de playa Sámara.

Para esto, el OVSICORI se basa en un estudio del comportamiento sísmico durante el presente siglo (Ref. 22), el cual divide en tres ciclos de aproximadamente 10 años donde han producido eventos que han iniciado en Golfito y finalizado frente a las costas de Nicoya. El primer ciclo se inició en 1916 y el segundo en 1941. Según ese

estudio el tercer ciclo se inició en 1983. pero no se ha cerrado aún, y deberá hacerlo con otro movimiento en Nicoya.

De acuerdo con el comportamiento de la liberación de energía en nuestro país, el sismo conclusivo deberá suceder en Nicoya en los próximos años, pues el proceso de carga y descarga es de  $35 \pm 7$  años. De acuerdo con observaciones realizadas por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), la placa Cocos se mueve aproximadamente 9 cm por año por debajo de la placa Caribe, debido al proceso de subducción. En la zona de Nicoya no se ha presentado un sismo de gran magnitud desde 1950, lo cual hace suponer que existe una gran cantidad de energía no liberada.

El daño ocasionado por un terremoto con estas características, sobre las estructuras de los centros educativos y de salud pueden crear grandes conflictos debido a que estas estructuras son componentes claves para enfrentar una emergencia de este tipo.

Los centros educativos son edificaciones que debido a su función, se encuentran distribuidas en las diferentes poblaciones de una determinada zona. Por otro lado, es muy común que después de un evento sísmico, las escuelas y colegios que se encuentren en las zonas afectadas, sirvan de refugio masivo para brindar techo y alimento a las personas cuyas viviendas resultaron destruidas o declaradas inhabitables debido al sismo.

Luego de la ocurrencia de un sismo de gran magnitud, los centros de salud juegan un papel de gran importancia. Esto debido a que la preocupación principal durante la emergencia es la de salvar vidas, y esta actividad se centra en los hospitales y clínicas. Por lo anterior es de vital importancia tomar las medidas necesarias para procurar que dichas estructuras presenten un adecuado comportamiento sísmico y mantengan su funcionalidad.

La Comisión Nacional de Emergencia (CNE) decidió financiar el estudio del efecto nocivo que tendría un eventual terremoto en la Península de Nicoya, por medio del proyecto del Programa de Ingeniería Sísmica del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). El presente proyecto de graduación forma parte de dicho programa, y se centra en la predicción y evaluación de los posibles daños causados en las estructuras de los Centros Educativos y de Salud ante la ocurrencia del sismo que pronostica el OVSICORI.

## **1-2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General.**

Realizar un Análisis de Riesgo Sísmico (ARS) sistémico, basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG), cuyo resultado sirva como instrumento de apoyo en la toma de decisiones para la planificación de las políticas de reforzamiento estructural de los Centros Educativos y de Salud ubicados en la zona de estudio.

### **1-2.2 Objetivos Específicos.**

- Determinar el efecto que provoca el tipo de suelo de la zona sobre el comportamiento de estructuras, ante la ocurrencia de un sismo específico, incluyendo las posibles amplificaciones que puedan sufrir las ondas sísmicas.
- Hacer un análisis del daño causado en las estructuras de escuelas, colegios y hospitales de la zona por el terremoto máximo creíble, para determinar su vulnerabilidad sísmica.
- Determinar la distribución espacial en la zona de estudio de los daños sobre la estructura de escuelas, colegios y hospitales, de acuerdo con la magnitud de éstos.

### ***1-3 Alcance del proyecto.***

- La zona de estudio comprende gran parte de la provincia de Guanacaste, toda la Península de Nicoya y la parte norte de la provincia de Puntarenas. El límite norte de la zona de estudio queda delimitado por la Ruta Provincial 914 pasando por el poblado de Cuajiniquil, hasta llegar a la Ruta Nacional 1. Luego se extiende hacia el sur paralelo a la Ruta Nacional 1 a una distancia de 10 kilómetros de esta, hasta la intersección de la Ruta Nacional 1 con la Ruta Nacional 17. Luego de esta intersección el límite continúa paralelo a la costa, a una distancia de 15 kilómetros de la misma hasta llegar al río Tulín, donde finaliza.
- El proyecto estudia el daño que causará un terremoto de magnitud 7.5 causado por subducción, de acuerdo con las características que sugiere los estudios del OVSICORI. Los resultados no son aplicables a un sismo con diferente ubicación del epicentro, magnitud, tipo de fuente, u otros.
- El estudio es de tipo determinístico, en el sentido de que parte de un terremoto específico, por lo que no se harán estudios probabilísticos de los sismos de la región, ya que quedan fuera del alcance de este proyecto.
- Se considerarán los daños causados en las estructuras de centros educativos y de salud que son de vital importancia ante la ocurrencia de un sismo. Esto incluye las principales escuelas y colegios (aquellas que tengan matrícula superior a 500 estudiantes para el período lectivo de 1997), así como los hospitales y las clínicas de la Caja Costarricense del Seguro Social presentes en el área en estudio. Quedan excluidas del estudio cualquier otro tipo de infraestructura de la zona.
- Para correlacionar las características estructurales de las obras y las condiciones de suelo locales los daños esperados, se utilizarán tecnologías recientemente desarrolladas tales como las derivadas por el Risk Management Solutions, Federal Emergency Management Agency (FEMA), National Institute of Building Sciences (NIBS) y el Applied Technology Council (ATC)- para la región de California, Estados

Unidos. Dichas metodologías ya fueron aplicadas en nuestro país para el terremoto de Limón ocurrido en abril de 1991 y los resultados obtenidos se ajustan satisfactoriamente a los daños reales de los puentes de la zona. En ese sentido y para este estudio se supondrá que al igual que para puentes, dichas metodologías son aplicables a edificios para la zona en estudio.

#### ***1-4 Antecedentes teóricos y/o prácticos del problema.***

El 25 de marzo de 1990 un terremoto de magnitud  $M_w = 7.0$  ocurrió en la entrada del Golfo de Nicoya, produciendo daño considerable en la parte central de Costa Rica. A partir de este momento la preocupación del riesgo sísmico en la Península de Nicoya ha aumentado. he aquí la importancia del proyecto, la que radica en determinar los posibles daños que pueden sufrir la infraestructura de los centros educativos y de salud, para poder afrontar la emergencia.

A pesar de que no es sino hasta hace poco que los estudios de vulnerabilidad sísmica se han venido realizando mediante el empleo de Sistemas de Información Geográfica (Refs. 4 y 9), se ha dado un gran auge en el empleo de estas metodologías, debido a los éxitos obtenidos. Esto gracias a las grandes ventajas que presenta en cuanto a la facilidad de manejo de datos para obtener daños esperados ante un evento sísmico. Además estas metodologías presentan gran adaptabilidad a la hora de presentar los resultados del análisis, así como modificar y actualizar la información de las bases de datos. Es por esta razón que diferentes gobiernos alrededor del mundo han estado adoptando estas metodologías para el estudio del impacto sísmico en diversas zonas sísmicamente activas (Refs. 1, 6, 7, 8 y 15).

Uno de los primeros proyectos en emplear estas metodologías fue el realizado por el Departamento de Conservación del Estado de California en Estados Unidos en 1987. Este trabajo determinó el posible daño que un sismo de magnitud 7.5 en la escala de Richter podría producir en la infraestructura más importante de la ciudad de Oakland al producirse la ruptura de la falla Hayward en una longitud de aproximadamente 100 kilómetros. Se analizaron separadamente los efectos del evento sísmico sobre las autopistas, puentes, aeropuertos, ferrocarriles, líneas de conducción eléctrica, de agua

potable, agua residual, gas e infraestructura portuaria. Además se estudió el comportamiento esperado de edificaciones que cumplirían una función durante y después del evento sísmico: las escuelas y hospitales.

Trabajos similares se han venido desarrollando en diferentes urbes alrededor del mundo en las cuales existe un alto riesgo sísmico. Este es el caso de la ciudad de Tokio en Japón, una de las zonas más densamente pobladas del mundo, donde los científicos han calculado que existe una probabilidad de 93% de que antes del año 2009 ocurra un terremoto de 7.4 en la escala de Richter (Ref. 7).

A pesar de las limitaciones financieras que tienen los países latinoamericanos en vías de desarrollo para destinar fondos a proyectos de investigación, recientemente se han realizado estudios en el campo de la estimación de daños y la prevención en algunas de estas naciones. Este es el caso de Ecuador, donde la fundación "Geo Hazards International" realizó en 1995, un estudio destinado a determinar la vulnerabilidad sísmica de las escuelas públicas en la ciudad de Quito .

Una situación similar, pero en esta ocasión preocupada por la mitigación de la amenaza sísmica hacia los centros de salud, se ha venido desarrollando por parte de la Organización Panamericana de la Salud (Ref. 20), quienes han implementado programas de investigación en muchos países ubicados en zonas sísmicamente activas. Tal es el caso de México, Colombia, Guatemala, Panamá, Perú y El Salvador, entre otros.

Como se ha explicado, actualmente se está trabajando en muchos lugares del mundo en determinar la vulnerabilidad sísmica de diferentes tipos de estructuras que de una u otra forma deben conservar su funcionamiento, pues de ellas depende la capacidad de respuesta de la comunidad ante la ocurrencia de un sismo de altas proporciones.

Recientemente Bravo y Calvo (Ref. 4) realizaron una evaluación de los daños que podría producir un terremoto sobre las vías principales y los puentes de la zona, como parte del proyecto antes mencionado. Además se aplicó la metodología al terremoto de Limón de 1991 con el propósito de comparar los daños que el método predice con los que realmente ocurrieron. Esta fue la primera vez en que se aplicó el método en Costa Rica y los resultados obtenidos fueron bastante satisfactorios, ya que acertaron en el nivel de daño en 8 de cada 10 puentes analizados, mientras que en los que no acertaron, fue solamente por un rango en los niveles de daños.

## Capítulo 2

### Antecedentes

#### *2.1 Aspectos Generales sobre desastres naturales*

Un desastre puede definirse como un evento o suceso que ocurre en la mayoría de los casos en forma repentina e inesperada causando sobre los elementos sometidos alteraciones intensas, representadas en la pérdida de la vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y daños severos en el medio ambiente. Esta situación significa la desorganización de los patrones normales de vida generando adversidad, desamparo y sufrimiento en las personas, efectos sobre la estructura socioeconómica de una región o un país y la modificación del medio ambiente, lo cual determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata (Ref. 21).

Los desastres pueden ser originados por la manifestación de un fenómeno natural, provocados por el hombre o como consecuencia de una falla de carácter técnico en sistemas de industrias o bélicos.

Algunos desastres de origen natural corresponden a amenazas que no se pueden neutralizar debido a que difícilmente su mecanismo de origen pueda ser intervenido. Algunos ejemplos de estos tipos de desastres son: terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis y huracanes.

##### **2.1.1 Efectos de los desastres**

Los efectos que puede causar un desastre varían dependiendo de las características propias de los elementos expuestos y de la naturaleza del evento sísmico. El impacto puede causar diferentes tipos de alteraciones. En general pueden considerarse como elementos bajo riesgo: la población, el medio ambiente y la estructura física representada por la vivienda, la industria, el comercio y los servicios públicos.

En un amplio número de países en desarrollo, como los países de América Latina, se han presentado desastres en los cuales han muerto miles de personas, y se han perdido cientos de millones de dólares en veinte o treinta segundos. Cifras en muchos casos



incalculables en eventos cuyos costos directos y también indirectos pueden llegar a un inmenso porcentaje de su Producto Interno Bruto. Debido a la recurrencia de diferentes tipos de desastres, en varios países del continente, se puede llegar a tener un significativo porcentaje promedio anual en pérdidas por desastres naturales con respecto al Producto Nacional Bruto. Situación que, como es obvio, se traduce en empobrecimiento de la población y estancamiento, puesto que implica llevar a cabo gastos no previstos que afectan la balanza de pagos y en general el desarrollo económico de los mismos.

Las medidas de prevención contra los efectos de los desastres deben considerarse como parte fundamental de los procesos de desarrollo integral a nivel regional y urbano, con el fin de reducir el nivel de riesgo existente. Dado que eventos de estas características pueden causar grave impacto en el desarrollo de las comunidades expuestas, es necesario enfrentar la ejecución de medidas preventivas versus la recuperación posterior a los desastres, e incorporar los análisis de riesgo a los aspectos sociales y económicos de cada región o país.

### **2.1.2 Definiciones**

- Amenaza o peligro: definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado.
- Vulnerabilidad: como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia un evento desastroso, expresada en una escala de 0 o sin daño a 1 o pérdida total. Puede entenderse como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas, y por lo tanto su evaluación contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso.
- Riesgo: o daño, destrucción, o pérdida esperada obtenida de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas, matemáticamente expresado como la probabilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en un cierto sitio y en un cierto período de tiempo.

### 2.1.3 Amenaza y Riesgo Sísmico

Los sismos consisten en liberaciones súbitas de energía de deformación de la tierra, acumulada durante años en los sitios de la corteza terrestre en los cuales tiene lugar esa deformación. Las causas principales de las deformaciones de la corteza se encuentran en las fuerzas que arrastran a los sectores de los que está compuesta (las llamadas placas tectónicas), y a las que se oponen fuerzas contrarias en las placas adyacentes.

Los siguientes factores pueden influir sobre el impacto de los sismos en las ciudades:

- La amplificación de las ondas sísmicas por parte de los suelos.
- Licuación de suelos: fenómeno por medio del cual las arenas y limos pierden temporalmente su resistencia y se comportan más bien como un líquido viscoso en lugar de un sólido. Esto ocurre debido a que las ondas sísmicas, principalmente las de corte aumentan la presión de poro, hasta anular las presiones efectivas y causar el colapso de las estructuras del suelo.
- Movimientos en masa: deslizamientos o derrumbes.
- Asentamientos del suelo.
- Tsumanis o maremotos.
- Peligros indirectos: falla de presas, contaminación en plantas industriales, etc.

Los hospitales y en general las instalaciones de salud son elementos expuestos que pueden sufrir graves daños como consecuencia de la ocurrencia de sismos intensos. En otras palabras, el riesgo sísmico de las instalaciones de salud puede llegar a ser muy alto, razón por la cual es necesario construir las nuevas edificaciones con requisitos sismo-resistentes adecuados de acuerdo con la amenaza sísmica de cada zona y también es necesario evaluar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones existentes, con el fin de identificar sus debilidades y diseñar y construir las intervenciones físicas o reestructuraciones que sean necesarias.

## ***2.2 Peligros Geológicos***

Los procesos que han formado la tierra actúan continuamente sobre y debajo de su superficie. El movimiento de las placas en la corteza terrestre y las concentraciones locales de calor son una fuente continua de peligros para las personas y sus estructuras.

### **2.2.1 Visión General de los peligros geológicos y el proceso de la planificación para el desarrollo.**

Los peligros geológicos son responsables de grandes pérdidas de vidas y de destrucción de propiedades. En el siglo veinte más de un millón de personas en todo el mundo han sido víctimas sólo de los terremotos, y el valor de la propiedad destruida por terremotos asciende a decenas de millones de dólares.

Esta zona de volcanismo y terremotos, que involucra varias placas y fosas, se manifiesta en América Latina por las cordilleras de los Andes y su extensión hacia Centro América y México. Esta zona da la vuelta bordeando el Océano Pacífico y es conocida como el “Círculo de Fuego”. Los peligros geológicos, tales como los terremotos, los deslizamientos de tierra inducidos por éstos, entre otros, están concentradas en esta región, así como también las ondas oceánicas sísmicas. Condiciones geológicas similares se extienden al Caribe, región que es considerada como parte del “Cinturón de fuego” aunque no es parte de la cuenca del Pacífico.

Con el presente estado de la tecnología, la mayoría de los eventos geológicos, no pueden ser prevenidos ni pronosticados con alguna precisión. Los deslizamientos son una excepción: frecuentemente pueden ser prevenidos. Las áreas expuestas a tales eventos se pueden identificar como zonas de fallamientos sísmicos. Sin embargo, no todas las fallas sísmicas han sido identificadas. Las estimaciones de ocurrencia de un evento peligroso dado pueden ser probabilísticas, basadas en la consideración de la magnitud de un evento y su ocurrencia en tiempo y espacio. Otras medidas como la duración, extensión en área, velocidad del inicio, dispersión geográfica, frecuencia, se pueden anticipar aún con menos precisión.

Sin embargo, las medidas de mitigación apropiadas pueden reducir enormemente los daños ocasionados por los peligros geológicos tales como los terremotos.

Los terremotos destacan por su comienzo extremadamente rápido. A diferencia de las inundaciones o huracanes, cuyo impacto en determinado lugar puede ser pronosticado con horas o días de anticipación, los terremotos no dan aviso alguno.

Además de la velocidad de comienzo, los terremotos también tienden a tener impactos que cubren grandes áreas, por estas razones las medidas de mitigación no estructurales, tales como la zonificación para el uso del suelo, o el desarrollo de sistemas de monitoreo, tienden a ser particularmente efectivas.

### **2.2.2 Terremotos**

Un terremoto es causado por la súbita liberación de energía de las fuerzas elásticas que se acumulan lentamente a lo largo de una falla dentro de la corteza terrestre. Las áreas de superficie o subterráneas que se fracturan y que pueden experimentar terremotos, se conocen como zonas sísmicas de fallamiento. Un 15% de los terremotos del mundo ocurren en América Latina, concentrados principalmente en la cordillera occidental (Ref. 21).

#### *2.2.2.1 Efectos de los terremotos y el peligro que representan*

Según el tamaño y su ubicación, un terremoto puede causar los fenómenos físicos de sacudimiento del terreno, ruptura en superficie de una falla, fallamiento del terreno y los tsunamis en algunas áreas costeras. Ocurren réplicas sísmicas más pequeñas después del evento principal, a veces durante varias horas, días o meses, o aún años.

#### **1. Sacudimiento del terreno**

Es la causa principal del colapso parcial o total de todas las estructuras, es la vibración del terreno excitado por las ondas sísmicas durante un terremoto. Son cuatro los principales tipos de onda sísmica que se propagan a través del interior o sobre la superficie de la tierra, a diferentes velocidades; llegan a un lugar determinado en

diferentes momentos y hacen vibrar las estructuras de manera diferente. La primera onda que llega a la superficie de la tierra es la onda primaria u onda P y es la primera que hace vibrar a una construcción. Las ondas secundarias son las ondas de corte, ondas S, que causa que la tierra se mueva en ángulo recto de la dirección de la propagación de la onda y que las estructuras vibren de lado a lado. A no ser que la estructura sea diseñada y construida para resistir todas estas vibraciones, el sacudimiento del terreno puede causar graves daños. El tercer y cuarto tipos son ondas de superficie de baja frecuencia, cuya velocidad de propagación es menor, usualmente detectadas a mayores distancias del epicentro, y que causan la oscilación más lenta de estructuras y también olas en embalses de agua.

#### *2.2.2.2 Características*

Aquí se tratan las cuatro características principales que influyen sobre el daño que puede ser causado por el sacudimiento del terreno debido a un terremoto: magnitud, atenuación, duración y respuesta del sitio. Además existe un quinto parámetro, el potencial de falla del terreno (o sea la propensión de un lugar a la licuefacción o a deslizamientos). Estos factores están también relacionados con la distancia del lugar afectado hasta el epicentro del sismo (lugar de origen debajo de la superficie) (Ref. 21).

a. Severidad o tamaño del terremoto: se puede medir de dos maneras: por la intensidad o por la magnitud. La intensidad es el efecto aparente del sismo en un determinado lugar. La magnitud está relacionada con la cantidad de energía liberada en el lugar de origen.

La intensidad se mide con varias escalas, la que más se utiliza es la de Mercalli Modificada (MM), con la cual la intensidad es evaluada subjetivamente en base a la descripción de los daños.

La escala de Richter, que mide magnitud, es la que más frecuentemente utilizan los medios de comunicación para dar a conocer el tamaño de un terremoto. Es más fácil determinar magnitud que intensidad, pues es un parámetro que registran los instrumentos sísmicos, aunque presenta algunas dificultades. Mientras un terremoto puede tener una sola magnitud, las intensidades varían de acuerdo a los efectos en las diferentes

comunidades y a diferentes distancias del epicentro. Así, dos sismos con la misma magnitud Richter, pueden tener diferentes intensidades máximas en distintos lugares.

b. Atenuación: es la disminución en la fuerza de la perturbación sísmica a medida que se aleja del hipocentro. La atenuación depende del tipo de material y estructuras a través de los cuales se propaga la onda y de la magnitud del terremoto.

c. Duración: se refiere al período de tiempo durante el cual el movimiento del terreno, en un determinado lugar, exhibe ciertas características tales como sacudimiento violento, o durante el cual se exceda un nivel específico de aceleración medido como un porcentaje de la gravedad. Los terremotos más grandes son de mayor duración que los pequeños. Esta característica, así como la del sacudimiento más violento, explica el mayor daño causado por los sismos más grandes.

d. Respuesta del sitio: es la reacción de un punto específico sobre la tierra al sacudimiento del terreno. Esto también incluye el potencial de falla del terreno, que a su vez depende de las propiedades físicas de los suelos y de la roca que se encuentra debajo de la estructura y de la estructura misma. También son factores la profundidad de la capa del suelo, el contenido de humedad, y la naturaleza de la formación geológica subyacente. Si el período de la onda sísmica incidente está en resonancia con el período natural de las estructuras o del subsuelo sobre las cuales descansan, el efecto del movimiento del suelo puede ser amplificado.

Tabla # 2.1

Relación aproximada entre magnitud, intensidad, aceleración, liberación de energía e incidencia de un terremoto (Ref. 21)

| Escala de Intensidad Mercalli Modificada   | Aceleración del Terreno (cm/s <sup>2</sup> ) | Magnitud (M)   | Energía (Ergios)                     | TNT Equivalente (toneladas métricas) | Incidencia Anual Esperada |
|--|--|----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| I Detectado solo por instrumentos sensibles  |  |                |                                      |                                      |                           |
| II Percibido por unas pocas personas en descanso, especialmente en pisos altos; objetos livianos suspendidos pueden oscilar.   | 2<br>3                                       |                | 10 <sup>10</sup><br>10 <sup>15</sup> | 20                                   |                           |
| III Percibido notoriamente en el exterior pero no siempre reconocido como un temblor; los autos estacionados se mecen levemente; vibración como la que produce un camión   | 4<br>5<br>6                                  | M-3            | 10 <sup>16</sup>                     |                                      |                           |
| IV Percibido en interiores por muchos y en el exterior por pocos; algunos despiertan de noche; suenan ventanas, platos, puertas; los automóviles se mecen notoriamente.    | 8<br>9<br>10                                 | Clase E<br>M-4 | 10 <sup>17</sup>                     | 600                                  | 49000                     |
| V Percibido por la mayoría de las personas; rotura de algunos platos y ventanas; se raja el enlucido; algunos objetos altos son afectados                                  | 20<br>30                                     |                | 10 <sup>18</sup>                     |                                      | 6200                      |
| VI Percibido por todo el mundo; muchos salen fuera de la casa asustados; se desprende el enlucido de las paredes y techos, caen algunas chimeneas; daños en general leves. | 40<br>50<br>60                               | M-5            | 10 <sup>19</sup>                     | 20000                                |                           |
| VII Todos salen corriendo afuera; los daños a edificios varían según la calidad de la construcción; sentido por conductores de autos.                                      | 80<br>90<br>100                              | Clase D        | 10 <sup>20</sup>                     |                                      | 800                       |
| VIII Las paredes internas no portantes sufren daños; caen algunas paredes, monumentos y chimeneas; eyecciones de arena y lodo; los conductores de vehículos alterados      | 200<br>300                                   | M-6            |                                      | 600000                               |                           |
| IX Las construcciones se mueven sobre sus fundaciones; se rajan, quedan fuera de plomo; grietas en el terreno; ruptura de tuberías subterráneas.                           | 400<br>500<br>600                            | Clase C        | 10 <sup>21</sup>                     |                                      | 120                       |
| X La mayoría de las estructuras de albañilería y de pórticos destruida; el terreno agrietado; torcedura de rieles; y deslizamientos de tierra.                             | 800<br>900<br>1000                           | M-7<br>Clase B | 10 <sup>22</sup><br>10 <sup>23</sup> | 20.000.000                           | 18                        |

### *2.2.2.3 Efectos del sacudimiento del terreno*

Las construcciones, otros tipos de estructuras y la infraestructura, están todas expuestas a daños por colapso debido al sacudimiento del terreno. En general, las medidas estructurales tales como diseño sismorresistente, códigos de construcción y reforzamiento son efectivas. Las medidas menos costosas, no estructurales tales como la zonificación y restricción para el uso de tierras también puede reducir enormemente el riesgo.

### *2.2.2.4 Fallamiento en superficie*

El fallamiento en superficie es el desplazamiento o la ruptura de la superficie del terreno debido a un movimiento diferencial a lo largo de una falla durante un terremoto. Este efecto está generalmente asociado con magnitudes Richter de 5.5 o mayores en el área epicentral, y está restringido a determinadas áreas propensas a los terremotos. Los daños graves usualmente están restringidos a una zona angosta, de hasta unos 300 metros de ancho a lo largo de la falla, aunque rupturas subsidiarias pueden ocurrir hasta 3 ó 4 kilómetros distantes de la falla principal. La longitud de la ruptura en superficie puede ser hasta de varios cientos de kilómetros.

### *2.2.2.5 Fallas del terreno inducidas por los terremotos: deslizamientos de tierra y licuefacción*

Los deslizamientos ocurren en una gran variedad de formas. El enfoque de esta sección son aquellos deslizamientos inducidos por los terremotos pero que también pueden ser iniciadas por otros mecanismos. Los terremotos no sólo pueden iniciar los deslizamientos; también pueden causar que el terreno sufra licuefacción en determinadas áreas.

### *2.2.2.6 Deslizamientos inducidos por sismos*

Los deslizamientos inducidos por sismos ocurren bajo una amplia gama de condiciones: en terrenos con pendientes pronunciadas o prácticamente planos; en roca



firme, sedimentos no consolidados, relleno y acumulaciones de residuos de minas; bajo condiciones secas o muy húmedas. Los criterios principales para clasificar los deslizamientos son los tipos de movimiento y tipos de material. Los tipos de movimiento de deslizamiento que pueden ocurrir son:

- Deslizamientos
- Esparcimiento
- Flujos

Los materiales se clasifican como suelos de roca firme y de ingeniería (tierra y derrubios), el derrubio se caracteriza por ser una mezcla de diferentes tamaños de partículas y la tierra por ser de tamaños de partículas finas.

Algunos tipos de falla de flujo, agrupados como fenómenos de licuefacción, ocurren en material no consolidado, virtualmente sin contenido de arcilla. Otras fallas de deslizamiento y flujos son causadas por el resbalamiento sobre una capa húmeda o por arcillas que sirven de lubricante.

La tabla 2.2, contiene una clasificación simplificada de los deslizamientos inducidos por los sismos.

**Tabla # 2.2**

Relación entre el tipo de material y el tipo de movimiento(Ref. 21)

|                       | Tipo de material y contenido de humedad       |  |                                      |
|-----------------------|---|--|--------------------------------------|
|                       | Roca firme                                    | Suelo de ingeniería (tierra y derrubios)   |                                      |
| Tipo de movimiento    | Seco a húmedo                                 | Seco a húmedo  | Muy húmedo                           |
| Caídas                | Caída de rocas                                | Caída de terreno   |                                      |
| Deslizamientos        | Derrumbes de rocas<br>Deslizamientos de rocas | Derrumbe de Terreno<br>Deslizamientos de bloques de tierra<br>Deslizamiento de escombros |                                      |
| Esparcimiento Lateral |   | Esparcimiento lateral del terreno  |                                      |
| Flujos                |   | Flujos de arena seca<br>Flujos de loess  | Flujos de lodo<br>Flujos del terreno |
| Complejo              | Avalancha de roca                             |  |                                      |

### 2.2.2.7 Licuefacción

Ciertos tipos de esparcimiento y flujos son designados como fenómeno de licuefacción. El sacudimiento del terreno puede causar que los depósitos de suelos sin arcilla pierdan su resistencia temporalmente y se comporten como un líquido viscoso más

que como un sólido. En condición de licuefacción ocurre la deformación del suelo con muy poca resistencia a las fuerzas de corte. Una deformación suficientemente grande como para causar daños a obras construidas se considera como falla del terreno.

La ocurrencia de licuefacción está restringida a ciertos ambientes geológicos e hidrológicos principalmente en áreas con arenas recientemente depositadas y limos (usualmente con menos de 10000 años de antigüedad) y con niveles altos de las aguas subterráneas.

Las fallas del terreno agrupadas como licuefacción pueden ser subdivididas en varios tipos. Los dos más importantes son:

- Flujos plásticos del terreno: son lo más catastróficos. Grandes masas de terreno se pueden mover desde unas decenas de metros hasta varios kilómetros. Usualmente ocurren en arenas flojas saturadas o limos en pendientes de unos pocos grados.
- Esparcimiento lateral del terreno: usualmente ocurren en pendientes suaves de hasta tres grados. El movimiento es usualmente de pocos metros, pero a la vez puede ser de decenas de metros. Estas fallas del terreno quiebran los cimientos, rompen las tuberías. Los daños pueden ser serios con desplazamientos de uno a dos metros.

En general, la licuefacción puede ser evitada por técnicas de estabilización del terreno o soportadas mediante diseño apropiado de ingeniería, pero ambos son métodos de mitigación costosos. Evitar la zona es, por supuesto, el mejor método pero no siempre el más práctico o posible en áreas ya desarrolladas.

### **2.2.3 Predicción, Evaluación y Mitigación del peligro de terremotos**

Minimizar o evitar los riesgos de los terremotos corresponde a tres áreas. Primero se encuentra la posibilidad de predecir su ocurrencia. Mientras los científicos no puedan predecir rutinariamente los terremotos, esta es un área de creciente interés y puede ser un factor clave en la reducción de riesgos en el futuro. La segunda área es la evaluación del peligro sísmico, que permite a los planificadores identificar áreas con peligro de terremotos o de sus efectos. La tercera área es la reducción del riesgo sísmico, o sea la toma de medidas de mitigación.

**a. Predicción de terremotos:**

Se ha logrado algún proceso en la predicción regional a largo plazo y en los pronósticos. Se han identificado “brechas sísmicas” en las zonas de contacto de las principales placas, las cuales son las áreas con historia de grandes terremotos en el pasado, que no han sufrido un evento de esas magnitudes en los últimos 30 años. Los recientes estudios muestran que los principales terremotos no vuelven a ocurrir en el mismo lugar a lo largo de la falla, hasta que no haya pasado suficiente tiempo para que se acumulen las tensiones, generalmente después de varias décadas. En las principales regiones sísmicas, estas zonas “en silencio” presentan el mayor peligro de futuros terremotos. Confirmando la teoría de la brecha sísmica varias brechas, identificadas cerca de las costas de Alaska, México y América del Sur han experimentado grandes terremotos durante la última década. Es más, el comportamiento de algunas fallas parece ser sorprendentemente constante: hay áreas donde los terremotos ocurren en el mismo lugar, pero décadas aparte, y tienen prácticamente idénticas características. El monitoreo de estas brechas sísmicas, por lo tanto, es un componente importante respecto a los terremotos, su predicción y los preparativos para futuros eventos.

La predicción de un terremoto involucra el monitoreo de muchos aspectos de la tierra, incluyendo pequeños desplazamientos del terreno, cambios en los niveles de agua, emisiones de gas de la tierra, entre otros. Esta es aún una ciencia muy joven.

**b. Evaluación del riesgo sísmico:**

Existen cuatro pasos para llevar a cabo la evaluación del riesgo sísmico como lo son:

**1. Una evaluación de los peligros sísmicos y la preparación de mapas de zonificación del peligro:**

Esta evaluación la podemos dividir en varias etapas:

- Evaluación del potencial de sacudimiento del terreno: aunque el sacudimiento del terreno puede causar los daños más generalizados y destructivos relacionados con los terremotos, es uno de los peligros sísmicos más difíciles de predecir y cuantificar. Esto se debe a la amplificación de los efectos del sacudimiento por material no consolidado sobre la roca en el lugar y a la resistencia diferencial de las estructuras.

Debido a esto, la manera adecuada de referirse al sacudimiento del terreno es con base en la respuesta probable de diversos tipos de construcción. Estos son clasificados de acuerdo a si son estructuras de madera, albañilería de un solo piso, edificios bajos (de 3 a 5 pisos), moderados (de 6 a 15 pisos) o altos (de más de 15 pisos). Se pueden usar métodos alternativos para propósitos de planificación, anticipando donde será más severo el sacudimiento del terreno: la preparación de mapas de intensidad en base a daños de anteriores terremotos, el uso de un terremoto de diseño para calcular la intensidad, usar información sobre la falla causativa, la distancia a la falla y la profundidad de los suelos sobre roca firme.

- Evaluación del potencial de fallamiento de superficie: esto es relativamente fácil de hacer, dado que el fallamiento en superficie está asociado con zonas de fallas. Tres factores son importantes para determinar medidas adecuadas de mitigación: la probabilidad y la dimensión del movimiento durante un determinado período de tiempo, el tipo de movimiento (normal, inverso o deslizante), y la distancia del trazo de falla donde probablemente han de ocurrir daños.
- Evaluación del potencial de falla del terreno: está determinado en cuatro pasos: se prepara un mapa de sedimentos recientes distinguiendo las áreas propensas a la licuefacción y aquellas que no lo son; luego se prepara un mapa que muestra la profundidad de las aguas subterráneas; estos dos mapas son combinados para producir un mapa de susceptibilidad de licuefacción; finalmente se prepara un mapa de oportunidad de licuefacción combinando el mapa de susceptibilidad con datos sísmicos.

2. Un inventario de los elementos en riesgo, por ejemplo las estructuras y poblaciones:

Es la determinación de la distribución espacial de estructuras y poblaciones expuestas a los peligros sísmicos.

3. Una evaluación de vulnerabilidad.

Una vez que se tiene a disposición un inventario, se puede llevar a cabo una evaluación de la vulnerabilidad. Esta medirá la susceptibilidad de una estructura o clase de estructuras a daños.

#### 4. La determinación de los niveles de riesgo aceptables.

Teóricamente, es posible combinar la evaluación del peligro con la determinación de la vulnerabilidad de los elementos en riesgo, y llevar a una evaluación de la riesgo específico.

#### c. Medidas de mitigación de terremotos:

No hay duda que el daño causado por los terremotos se puede reducir. La cuestión es saber cuales técnicas y mecanismos son los apropiados en una situación dada y como se pueden aplicar. El rango de mecanismos incluye la zonificación para uso de tierras; métodos de ingeniería tales como códigos de construcción, reforzamiento de estructuras existentes, estabilización de terrenos no estables, redesarrollo; el establecimiento de sistemas de alerta y la distribución de pérdidas. En este punto también podemos encontrar varios aspectos como los son:

#### 1. Medidas de mitigación de sacudimiento del terreno: Mediciones para mitigación del fallamiento en superficie: En este aspecto se pueden incluir las siguientes características:

- Relacionar el potencial general del sacudimiento del terreno con la densidad permisible de ocupación de construcciones.
- Relacionar el diseño de la construcción y las normas de construcción con el grado de riesgo del sacudimiento del terreno.
- Adoptar reglamentos que requieren investigaciones geológicas y sísmicas del lugar antes de que se aprueben propuestas para el desarrollo.
- En áreas ya desarrolladas, la adopción de reglamentos para reducir la peligrosidad de construcciones.

#### 2. Medidas para mitigación del fallamiento en superficie: dado que las zonas con fallas son relativamente fáciles de identificar y demarcar, se prestan a una planificación efectiva del uso de tierras. Donde la evaluación de las consecuencias de ruptura en superficie indican una alta e inaceptable posibilidad de daños, varias medidas alternativas de mitigación se encuentran disponibles:

- Restringir los usos permisibles a aquellos usos compatibles con el peligro.
  - Establecer una zona de alivio que requiera retirarse a cierta distancia de los trazos de fallas activas.
3. Medidas para mitigación de falla del terreno: los usos de tierra pueden ser restringidos, se podrán necesitar investigaciones geológicas antes de autorizar el desarrollo y el diseño de pendientes y de cimentaciones se pueden reglamentar. Se pueden establecer categorías de estabilidad y uso de tierra.
4. Medidas Generales para uso de tierras: donde ya ha habido desarrollo dado en áreas propensas a los peligros de terremotos, se pueden adoptar medidas para identificar estructuras precarias, y ordenar su remoción, comenzando por aquellas que ponen en peligro el mayor número de vidas. Las políticas de renovación urbana deben restringir la reconstrucción en áreas peligrosas después de verificar el impacto del terremoto.