

CAPÍTULO 2

SISMICIDAD Y AMENAZA SÍSMICA

La probabilidad de que ocurran terremotos está determinada por la sismicidad de la región. Las amenazas sísmicas locales o propias de un sitio dependen de la estructura geotécnica del área. Existen cinco amenazas sísmicas que pueden poner en peligro los sistemas de abastecimiento de agua:

- vibración del terreno
- licuefacción
- asentamiento, densificación y agrietamiento
- deslizamientos
- ruptura por falla.

Los tsunamis (maremotos) y rebalses (oscilación de la superficie de un lago o bahía) pueden representar una amenaza en las regiones costeras bajas.

La vibración del terreno puede causar daños significativos a las plantas de tratamiento, estaciones de bombeo y tanques, y daños menores a las tuberías enterradas, particularmente en áreas de suelos no compactos. La falla puede producir un daño significativo a las tuberías enterradas a pocos cientos de pies de la ruptura; sin embargo, cuando ocurre la licuefacción, generalmente los daños se extienden a las tuberías enterradas y a otras instalaciones.

Debido a que estas amenazas sísmicas locales afectan directamente la extensión del daño por el sismo, el mapeo de amenazas sísmicas es una herramienta crucial para minimizar sus consecuencias. Por lo tanto, este documento presta especial atención al mapeo de las amenazas sísmicas.

La colocación cercana de líneas vitales representa una amenaza en sí misma por la posible interacción entre ellas, ya que la falla de una podría dañar la otra línea vital.

Sismicidad

Los sismos son provocados por el movimiento de las diferentes placas tectónicas que forman el planeta. En particular para la mayoría de los países en Latinoamérica y el Caribe los sismos son atribuibles al movimiento de las Placas de Cocos, Placa Caribe, Placa de Nazca, Placa Sudamericana, Placa Antártica y Placa Scotia, las cuales se distribuyen según lo que se muestra en la figura 4.

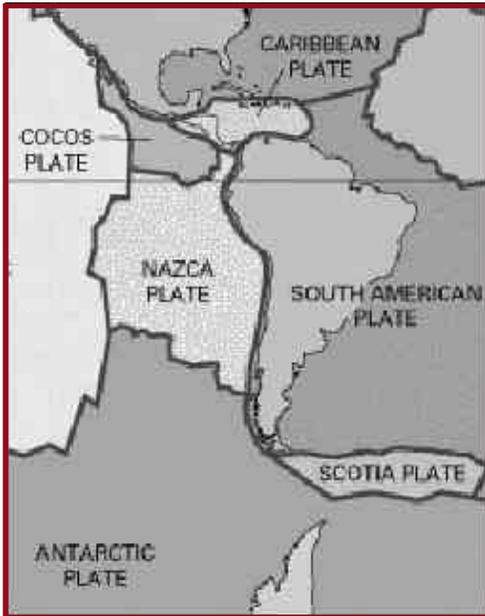


Figura 4: Tectónica de placas en Latinoamérica.

Cada una de estas placas poseen actividades diferentes, por ejemplo la placa Sudamericana colinda al occidente con la placa Nazca, de manera que la primera se desplaza en una dirección de oriente occidente y la segunda en sentido contrario con velocidades relativas de unos pocos centímetros al año (9 cm. al año en el caso de la Placa Nazca con respecto a la placa sudamericana). En este choque se producen fuerzas de fricción y deformaciones de las placas. Al deformarse la placa acumula energía lentamente, sin embargo llega el momento en que las fuerzas de fricción no logran sostener la fuerza con que son empujadas las placas y se rompe el equilibrio, liberándose la energía súbitamente y generando el sismo. Este tipo de terremoto es denominado sismo de subducción, característico en toda la costa del Pacífico desde Venezuela hasta Chile y atribuible al movimiento de la placa Nazca debajo de la placa Sudamericana; un ejemplo de este tipo de evento son los sismos de Nazca 1996 (Perú) y Atico 2001 (Sur de Perú y Norte de Chile).

Sin embargo existen eventos sísmicos producidos por el desplazamiento relativo horizontal de las fallas, a los que se le denomina sismos intraplaca (que se producen en el interior de las placas). Ejemplo de este tipo de evento es el sismo de Guatemala de 1976 causado por el desplazamiento de la falla de Motagua.

De acuerdo a lo anterior, junto con lo que se puede observar en la figura 6, las zonas más expuestas a sismos en la Región de Latinoamérica y el Caribe corresponde a la costa pacífico del continente, donde se presentan la mayoría de sismos de magnitud importante, los cuales se producen hasta a una profundidad de más de 100 kms. De igual manera, existen zonas de varios países del Caribe y continentales, que se ven expuestos a riesgo sísmico generado por sistemas de callamiento local y actividad volcánica.

La sismicidad en un lugar de un determinado país, dependerá de su proximidad a las fuentes tectónicas y en algunas oportunidades estará disponible en mapas de riesgo sísmico en base a información probabilística, que generalmente son elaborados por instituciones de investigación o se incluyen dentro de las normativas de diseño sismorresistente de estructuras.

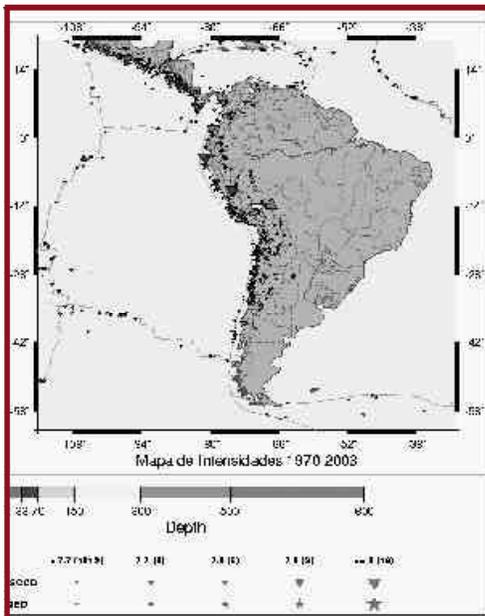


Figura 5: Intensidades sísmicas en latinoamérica de sismos de intensidades mayor a IV entre 1970 y 2003.

Parámetros sísmicos

Los terremotos y sus efectos se miden de diferentes maneras. La magnitud describe el tamaño de un sismo y expresa la cantidad de energía liberada. La magnitud de Richter es una escala logarítmica: por cada incremento de 1 en la magnitud de Richter, se libera 33 veces más de energía. La liberación de energía depende de la ruptura de la falla y de la distancia del desplazamiento.

La intensidad describe los efectos de la vibración o la extensión de los daños en un lugar o sitio específico. La intensidad en un sitio está determinada por la magnitud del sismo, la duración de la vibración, la distancia desde el sitio hasta el epicentro del sismo o la superficie de ruptura y las condiciones geológicas locales. La duración del sismo depende de la longitud de la falla y, por tanto, de la cantidad de energía liberada.

La escala de la Intensidad de Mercalli Modificada (IMM) comúnmente se usa para medir la intensidad y se compone de 12 categorías de intensidad del movimiento del terreno: desde I (no se siente, excepto por algunas personas) hasta XII (daño total). Generalmente, el daño estructural se inicia para intensidades de IMM VII para estructuras mal construidas. Las intensidades IMM XI y XII son extremadamente raras. La escala de la Intensidad de Mercalli Modificada es subjetiva; es decir, depende de la interpretación personal y está determinada, en cierto grado, por la calidad de la construcción en el área afectada. La Intensidad de Mercalli Modificada también depende de si el suelo se licua y causa daños a las estructuras.

Otros parámetros sísmicos relacionados con la vibración son la aceleración máxima del suelo (PGA) y la velocidad máxima del suelo (PGV). Ambas pueden usarse para describir la amplitud de la vibración. La respuesta y el daño a estructuras rígidas y pequeñas están directamente relacionados con la PGA, mientras que el comportamiento de edificaciones más flexibles está directamente asociado a la PGV.

El movimiento lateral/vertical real o esperado causado por la licuefacción, el asentamiento o los deslizamientos, se conoce como deformación permanente del suelo (DPS).

Fuente: National Earthquake Information Center

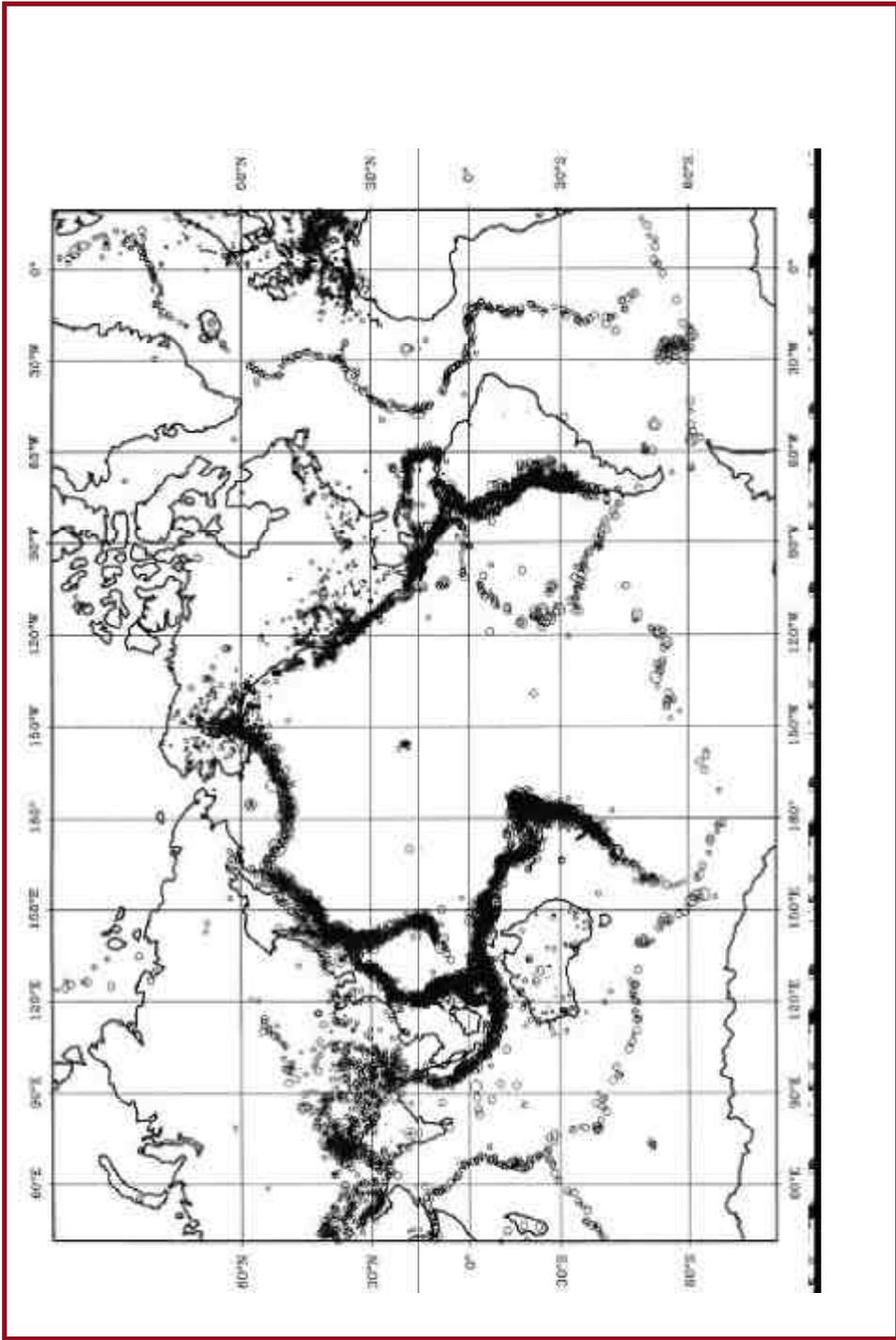


Figura 6. El mapa muestra la actividad sísmica entre 1990 y 1993 y confirma que los riesgos sísmicos se correlacionan en gran medida con las placas de subducción.

Vibración del terreno

La vibración del terreno es la amenaza sísmica más común y puede causar un daño aislado pero extendido (figura 7). La vibración del terreno incluye movimientos horizontales y verticales que pueden durar desde varios segundos hasta varios minutos en caso de terremotos severos y pueden ser destructivos a varios cientos de kilómetros de distancia, dependiendo de las condiciones locales del suelo.

Para mitigar los efectos de la vibración del terreno se deben diseñar instalaciones que resistan las fuerzas laterales y verticales producto de la vibración, o aislar la instalación de la vibración utilizando aisladores de base. Esto se considera ingeniería sísmica tradicional.

Licuefacción

La licuefacción es un fenómeno en el que suelos saturados, no consolidados y no cohesivos pierden su resistencia al corte debido a vibraciones del terreno y temporalmente se transforman a un estado licuado. En el proceso, el suelo experimenta una pérdida pasajera de resistencia que comúnmente hace que se produzca un desplazamiento o falla del terreno (figura 8). Existen cuatro tipos básicos de fallas del terreno asociadas con la licuefacción:

- **Flujos de tierra.** Los materiales del suelo se desplazan rápidamente cuesta abajo en un estado licuado.
- **Flujo lateral.** Desplazamiento limitado de las capas superficiales del suelo por pendientes suaves o hacia superficies libres, como márgenes del río.
- **Flotación.** Objetos enterrados menos pesados que el suelo licuado desplazado, como tanques, buzones o tuberías de gravedad, flotan en la superficie (figura 9).
- **Pérdida de resistencia de soporte.** Reducción de la capacidad de soporte de los cimientos debido al debilitamiento del material del suelo subyacente o adyacente que puede hacer que las estructuras se hundan (figura 10).

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 7. Colapso del Hotel Hyatt en Baguio, Filipinas.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 8. Flujo lateral en una carretera en Costa Rica.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 9. Buzón flotante como resultado de la licuefacción después del terremoto en Niigata, Japón.

Foto: D.B. Ballantyne



Figura 10. Vivienda asentada como resultado de la licuefacción en Dagupan, Filipinas.

La licuefacción a menudo ocurre en las capas subsuperficiales revestidas de suelos superficiales adecuados. Cuando estas capas más profundas se licúan, las capas superficiales del suelo a menudo se mueven lateralmente en bloques sólidos.

Uno de los factores perjudiciales del flujo lateral es la deformación permanente del suelo (distancia a la cual un punto se mueve permanentemente durante y después de un sismo). También se consideran los movimientos horizontales y verticales. Youd y Perkins han desarrollado una metodología para estimar las deformaciones máximas en un lugar específico (Youd and Perkins, 1987). El índice de intensidad de la licuefacción (LSI) de Youd y Perkins se usa algunas veces para estimar el daño esperado a las tuberías y sirve de orientación para el diseño de nuevas instalaciones.

Factores de la licuefacción

La experiencia ha demostrado que existen siete factores importantes para determinar el potencial de un suelo para licuarse:

- distribución del tamaño de los granos;
- profundidad a las aguas subterráneas;
- densidad;
- peso del recubrimiento y profundidad del suelo;
- amplitud y duración de la vibración del terreno;
- edad del depósito, y
- origen del suelo

Distribución del tamaño de los granos. La arena uniformemente graduada, con granos pocos finos o muy gruesos (arena limpia) tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuefacción bajo cargas cíclicas muy severas.

Profundidad de las aguas subterráneas. Puede ocurrir licuefacción si existe agua subterránea en el punto de la columna del suelo donde se está produciendo la densificación. Mientras menor sea la profundidad, menor será el peso del recubrimiento del suelo y el potencial de que ocurra densificación. Por tanto, mientras menor sea el nivel de las aguas subterráneas, mayor será la probabilidad de que ocurra licuefacción.

Densidad. La licuefacción ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos. Ese suelo puede densificarse cuando está sujeto a una carga cíclica. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua e incrementa la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando la presión intersticial se vuelve igual a la tensión media total, el suelo pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.

Peso del recubrimiento y profundidad del suelo. Las tensiones entre partículas aumentan a medida que se incrementa la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea la tensión entre las partículas, menor será la probabilidad de que ocurra la licuefacción. Por lo general, la licuefacción ocurre a profundidades menores de 30 pies (9 metros); rara vez ocurre a profundidades mayores de 50 pies (15 metros).

Amplitud y duración de la vibración del terreno. La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un sismo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, incluida tanto su amplitud como su duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar fallas. La licuefacción de suelos bajo condiciones de tensión provocadas por un terremoto puede ocurrir ya sea cerca del epicentro durante terremotos pequeños o moderados, o a cierta distancia en caso de terremotos moderados a severos.

Edad del depósito. Los suelos débiles y no cohesivos por lo general son jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo). Una regla general es que los depósitos anteriores al pleistoceno tardío (más de 500.000 años de antigüedad) tienen poca probabilidad de licuarse excepto si sufren una vibración bastante fuerte, mientras que los depósitos del holoceno tardío (menos de 3.000 años de antigüedad) tienen mayor probabilidad de licuarse.

Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales no compactados, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Una práctica común de décadas pasadas era la colocación de los rellenos hidráulicamente. Todos ellos se licuarán con facilidad. Por otro lado, los sedimentos depositados glacialmente, particularmente aquellos sobre los cuales ha pasado un glaciar, generalmente ya son bastante densos y tienen menor probabilidad de licuarse.

Medidas para mitigar la licuefacción

Las posibles medidas de mitigación de la licuefacción incluyen:

Evitar áreas donde pueda ocurrir la licuefacción y el flujo lateral.

- Cambiar el trazado horizontal de las tuberías.
- Cambiar el trazado vertical de las tuberías mediante el uso de la perforación direccional para que crucen los ríos por debajo de los materiales licuables.

Estabilizar el material licuable.

- Reemplazar el material con relleno compactado. Hay que observar el ancho adecuado para que resista el movimiento de los suelos licuables contiguos.
- Usar muros de contención.
- Compactación dinámica. Dejar caer pesos de 2 a 200 toneladas (1.800 a 180.000 kg) de alturas de hasta 120 pies (36 m).
- Vibroflotación. Usar un vibrador para realizar agujeros en el terreno con la ayuda de un chorro de agua a presión con espaciamientos entre 5 a 10 pies (1,5 a 3 m) y volver a llenar con arena luego de la extracción.
- Columnas de piedra. Usar un vibrador para realizar agujeros en el terreno con la ayuda de un chorro de agua a presión con espaciamientos entre 5 a 10 pies (1,5 a 3 m) y llenar con grava luego de la extracción. Las columnas de piedra proporcionan resistencia y drenaje.
- Inyección para impermeabilización. Llenar los vacíos con una lechada de cemento utilizando silicatos, cemento o productos químicos.
- Inyección para compactación. Expandir la cavidad de los huecos preperforados y bombear concreto líquido (aplicable a cimientos de construcciones *in situ*).
- Pilotes de compactación. El terreno se consolida durante la instalación de tuberías.
- Mezcla de suelo profundo. Aplicar a diámetros mayores en donde se bombea una mezcla de suelo y concreto líquido.
- Drenaje: Por gravedad o bombeo.

Colocar los cimientos por debajo del material licuable.

- Pilotes.
- Excavar hasta el material adecuado.

Agregar peso a la estructura para lograr una flotabilidad neutral.

- Agregar masa de concreto.

Usar material flexible al movimiento.

- Losa pesada, conexiones flexibles de tuberías.
- Tubería con uniones fijas, dúctiles y flexibles.

Aceptar el daño.

- Proporcionar válvulas de corte.

Asentamiento, densificación y agrietamiento

El asentamiento, compactación o densificación son similares a los fenómenos que ocurren en la licuefacción, pero sin la presencia de aguas subterráneas. Esto produce un asentamiento que generalmente es mínimo si se compara con la deformación permanente del suelo provocada por la licuefacción o el flujo lateral. El agrietamiento o fracturación es el desplazamiento lateral de los suelos hacia superficies libres, lo cual produce la formación de grietas. Puede ocurrir en áreas donde se produciría el flujo lateral, excepto que no hay agua subterránea presente.

Las medidas de mitigación para prevenir el asentamiento o densificación son similares a algunas medidas empleadas en la licuefacción para incrementar la densidad o resistencia del suelo.

Deslizamientos

Los deslizamientos pueden ser causados por sismos (figura 11) y se pueden categorizar en cuatro grupos:

- **Desprendimientos:** movimientos repentinos de material geológico causado por socavación.
- **Volcamientos:** rocas que caen hacia adelante, separándose de la masa principal.
- **Derrumbes:** movimientos a lo largo de una superficie de ruptura definida; incluyen derrumbes rotacionales, traslacionales y laterales.
- **Flujos laterales:** desplazamiento casi horizontal del material licuado (ver licuefacción).
- **Flujos:** incluye repteo, flujo de escombros, aluviones, desprendimiento de tierras, flujos de lodo o deslaves, lahares (residuos volcánicos más agua) y deslizamiento subacuoso.



Figura 11. Deslizamiento en Tacoma Narrows, Washington, después del terremoto de 1949.

Los mapas de deslizamientos se pueden preparar en los siguientes tres niveles: (1) inventario de los deslizamientos, (2) vulnerabilidad de los deslizamientos, y (3) mapas de las amenazas de deslizamientos.

Los inventarios se basan en la observación y reconocimiento de los lugares donde han ocurrido deslizamientos en el pasado. Los mapas de vulnerabilidad consideran áreas que tienen el potencial de deslizarse y correlacionan criterios tales como pendientes empinadas, unidades geológicas débiles, suelo mal drenado o rocas con antecedentes de deslizamiento. Los mapas de amenazas muestran el tamaño del área y la probabilidad de que ocurran deslizamientos y se pueden preparar para el ámbito regional, comunitario o para un sitio específico.

Mitigación de los deslizamientos

Los deslizamientos y derrumbes se pueden mitigar con la adopción de las siguientes medidas:

- drenaje;
- renivelación de la pendiente;
- construcción de estructuras de contención;
- vegetación, y
- endurecimiento del suelo.

Los flujos de escombros y avalanchas se pueden mitigar mediante la estabilización de la fuente o disipación de la energía. El daño producido por la caída de rocas se puede reducir mediante la estabilización de laderas o protección de las instalaciones que pudieran resultar afectadas.

Ruptura por falla

Una falla puede producir daños localizados a los componentes y estructuras del sistema de abastecimiento de agua que se encuentran cerca o que atraviesan las extensiones superficiales de la falla. El terremoto de Landers, California, de 1992, produjo desplazamientos horizontales de las fallas superficiales de hasta 24 pies (7 m). En un sistema de abastecimiento de agua, las tuberías enterradas son los componentes con mayor probabilidad de resultar afectados por el cruce de fallas. Para cuantificar la amenaza de ruptura por fallas se pueden usar las relaciones empíricas entre la magnitud del sismo y el desplazamiento horizontal de las fallas, como las propuestas por Slemmons (1977). Los desplazamientos horizontales permanentes de varios pies de longitud pueden cortar todas las tuberías, excepto las enterradas o las que van por encima del terreno que estén mejor diseñadas (figuras 12 y 13). Para mitigar ese riesgo, se deben evitar los cruces de fallas siempre que sea posible. Cuando las tuberías tienen que cruzar fallas conocidas, pueden emplear diseños especiales en el lugar donde se encuentran las rupturas por fallas históricas. La falla en dichas zonas no siempre debe ocurrir exactamente en el mismo lugar; sin embargo, dichas tuberías pueden aun estar amenazadas si el lugar de la ruptura y el desplazamiento exceden la longitud de la conexión flexible. Como mínimo, se deben instalar válvulas de corte a cada lado de la falla.

Foto: M. J. O'Rourke



Figuras 12 y 13. El movimiento a lo largo de la huella de esta falla en el terremoto de Landers (California) produjo la compresión telescópica de las tuberías de asbesto-cemento.

Ubicación de las líneas vitales

Las líneas vitales pueden tener los siguientes efectos una sobre otra:

- explosión de tuberías de gas natural o combustible líquido;
- inundación o socavación debido a tuberías rotas que transportan líquidos;

- falla o ruptura de una estructura destinada a un propósito primario, pero que también sirve de apoyo a otra línea vital, como el puente de una autopista que soporta una tubería;
- colapso de la estructura sobre una línea vital, como un edificio que cae encima de un hidrante, y
- daño ambiental debido a derrames asociados con tuberías rotas.

Información sobre amenazas sísmicas

La información sobre amenazas sísmicas, preparada por organismos federales, estatales, provinciales y locales, debe estar disponible en diferentes lugares. La información más útil se encuentra en los mapas sísmicos elaborados por diferentes instituciones académicas, de investigación o defensa civil, los que generalmente se pueden adquirir de manera gratuita o a precios razonables.

Dependiendo del nivel de avance de los estudios e investigaciones de la amenaza sísmica de un país o una determinada región, pueden encontrarse mapas que muestren la amenaza de licuefacción, el flujo lateral, la inestabilidad de laderas, la probabilidad de que ocurran deslizamientos, la amplificación sísmica y la ubicación de las fallas. En áreas donde no se ha recopilado información específica sobre amenazas sísmicas, se pueden usar mapas de suelos agrícolas y mapas geológicos para identificar áreas vulnerables a la licuefacción. Para obtener más información sobre amenazas locales y la sismología local, se puede recurrir a la oficina estatal pertinente.