

Capítulo 3

Daños provocados por licuación en diferentes sismos

3.1 Importantes fenómenos de licuación en México

3.1.1 Zonas susceptibles de licuación

México es uno de los países del mundo con mayor actividad sísmica. Según datos estadísticos, se registran más de 90 sismos por año con magnitud superior a cuatro grados en la escala de Richter (*Crónicas de desastres, N°3, Terremoto de 1985, Organización Panamericana de la Salud*). Los estados con mayor riesgo y donde ocurren sismos de gran magnitud (superiores a 7 grados en escala Richter) son: Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Puebla y el Distrito Federal. Otras entidades donde también se presentan sismos de gran magnitud, aun que con menor frecuencia, son: Chiapas, Estado de México, la Península de Baja California, y Sonora.

A partir de los sismos registrados a lo largo de los años, se ha detectado la presencia en algunos casos del fenómeno de licuación de suelos. Dicho fenómeno está vinculado con las zonas de riesgo por sismo que tienen su ocurrencia a lo largo de la República Mexicana. Dichas zonas dividen al país de acuerdo a la intensidad de sus eventos suscitados prácticamente en las costas del océano pacífico.

Las fallas geológicas localizadas en las costas del pacífico causantes de la mayoría de los fenómenos sísmicos, representan la fuente principal de la licuación de suelos, ya que dicho fenómeno ha golpeado de manera espontánea algunos sitios susceptibles a fenómenos sísmicos.

Algunos eventos de gran trascendencia, idóneos para el estudio exhaustivo en materia sísmológica, ya sea para mecánica de suelos, estructuras, riesgo o cualquier tipo de aplicación en diversos campos de la ingeniería se mencionan en este capítulo, haciendo énfasis en la licuación de suelos como fenómeno que afecta de manera directa cualquier tipo de estructura.

Los mapas de riesgo por licuación de suelos generan un panorama objetivo de las zona en las que es posible y factible la ocurrencia de este fenómeno, ya que están basados en estudios geológicos y litológicos que muestran zonas de susceptibilidad a lo largo del país propensas a licuación y en algunos otros casos hasta tsunamis debidos a la actividad sísmica ocurrida.



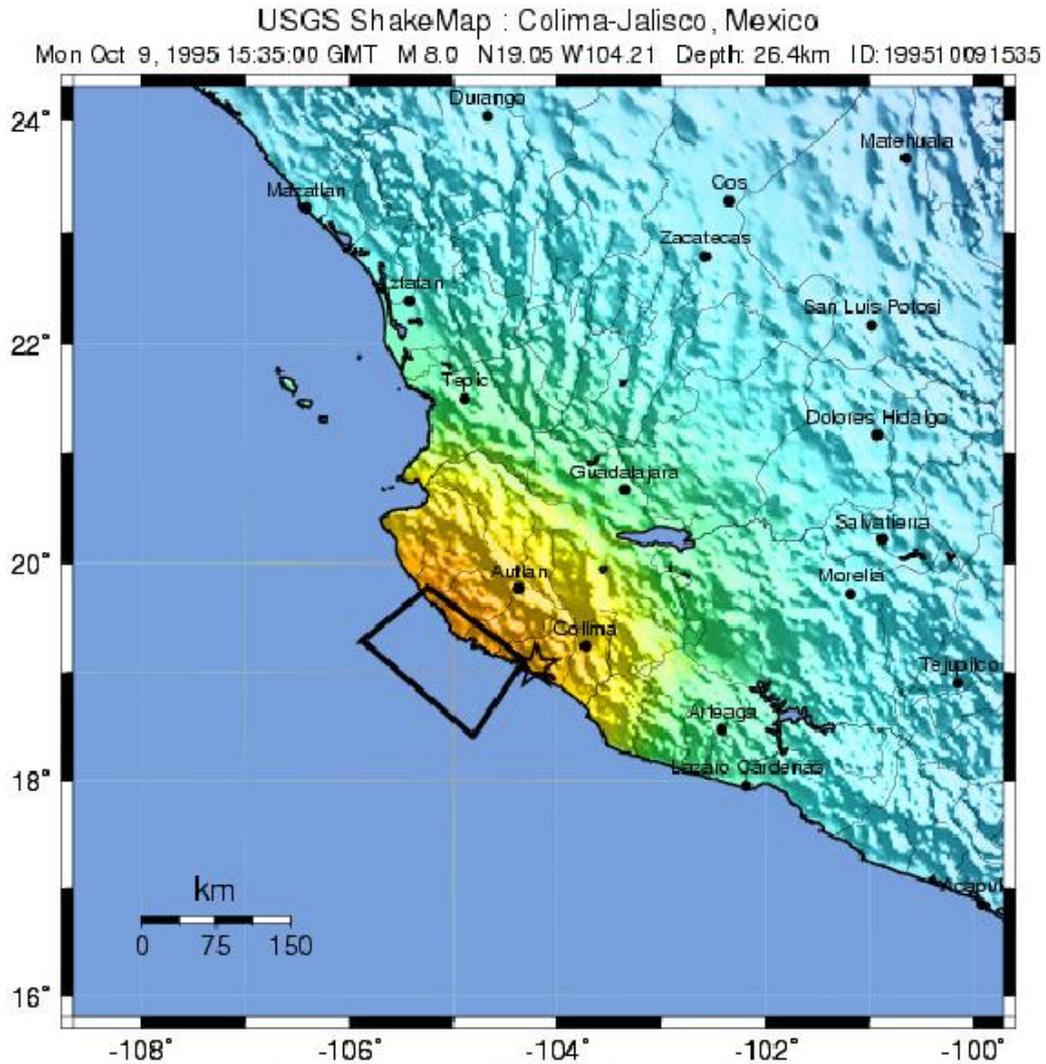
Figura 3.1 Mapa de licuación de suelos de la República Mexicana.

A lo largo del tiempo se han registrado algunos eventos relacionados con licuación de suelos ocurridos en la república Mexicana. Tomando en cuenta la magnitud de estos fenómenos y haciendo énfasis en dos de los eventos registrados en años pasados, como es el estado de Colima y el estado de Baja California, Mexicali, que presentaron el fenómeno de licuación de suelos y generaron pérdidas materiales, mismas que se citan en este capítulo.

3.2 Manzanillo, Colima, 1995.

3.2.1 Ubicación del sismo

En 1995, el estado de Colima vivió un sismo de 7.3° de magnitud Richter con un epicentro localizado en 19.05°N y 104.21°O que pegó en las áreas suroeste de Jalisco y el norte de Colima, figura 3.2.



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC. ($\%g$)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL. (cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Figura 3.2 Mapa Manzanillo, Colima, 1995.

En diferentes lugares de los estados de Jalisco y Colima, los daños causados por el movimiento, el tsunami que se originó minutos después y la licuación resultantes se reportaron a lo largo de 120 km de costa en la región epicentral, cerca de 17 000 estructuras sufrieron daños considerables y a su vez a 45 000 habitantes sin hogar.

3.2.2 Geología y sismicidad

La región epicentral se localiza en la porción norte de la placa de Norteamérica, cercana a la trinchera de la zona de subducción, en la subplaca conocida como bloque de Jalisco. Este bloque está definido por el desarrollo de un punto triple en la vecindad de Guadalajara, el cual se localiza en la intersección de un sistema triple de fallas normales y de graben, como lo indicó *Luhr et al, 1985*.

Las velocidades de colisión entre el bloque de Jalisco de la placa Norteamericana y la placa Rivera, se consideran cercanas a los 2 cm/año, según *Nixon (1982)*, quien considera que el bloque de Jalisco se está uniendo a la placa del Pacífico. Estas velocidades son bajas si se les compara con las de 6 cm/año y 9 cm/año que se presenta en la zona de subducción de la placa de Cocos (*Drummond, 1986*). El sismo de Manzanillo se cree que ocurrió en esta zona de subducción del bloque de Jalisco, y por el resultado de estas colisiones de 2cm/año que ocurren en la zona.

El único efecto primario que se presentó fue la alta aceleración que se sintió en la zona epicentral, no se encontraron fracturas superficiales. Entre los efectos secundarios del sismo se presentaron derrumbes de taludes y desprendimiento de rocas, licuación, hundimientos, y un tsunami moderado.

3.2.3 Derrumbes

Los derrumbes y desprendimientos de roca se presentaron sólo en taludes, muchos de los cuales se precipitaron sobre carreteras que atraviesan la zona epicentral; no se encontraron ni se reportaron estructuras dañadas en este proceso.

3.2.4 Licuación y hundimientos

La licuación y los hundimientos se presentaron en algunos lugares bajos de la zona epicentral, esto ocurrió en rellenos sanitarios y en formaciones naturales, este fenómeno se presentó en Jalisco, Barra de Navidad, y en algunas áreas de la bahía, estas áreas sufrieron los mayores daños que son:

En este poblado la mayoría de las casas sufrieron daños producidos por licuación de arenas y por los hundimientos. Los hundimientos máximos observados fueron de cerca de 50 cm, que provocaron fuertes asentamientos diferenciales y graves daños estructurales. La mayoría de las losas de piso sin refuerzo, fueron empujadas por arriba del suelo que estaba licuándose, alcanzando alturas de un metro en algunos casos. Muchas estructuras resultaron dañadas por los grandes desplazamientos sufridos por las cimentaciones, lo que originó algunos colapsos. En la figura 3.3 se ilustra cómo los efectos de las altas aceleraciones en combinación con la licuación y el hundimiento del terreno provocaron daños severos en las estructuras.



Figura 3.3 Asentamiento causado por licuación.

3.2.5 Localidad Barra de Navidad

Se encuentra localizado a 10 km al sur de Jaluco, en una de sus colonias, Cabo Blanco, existen una serie de canales internos que conectan la bahía con las casas, estos canales se construyeron con rellenos, al igual que muchos de los terrenos donde se asentaron las construcciones de esta colonia. Algunos de los rellenos y de los depósitos de la laguna se licuaron, dejando daños considerables en las casas y en estructuras auxiliares (patios, pequeños embarcaderos, piscinas, etc.). Entre los daños se incluyen hundimientos, desplazamiento lateral y colapso de los bancos de relleno, inclusive se presentaron algunos colapsos parciales. En la colonia Barrio Nuevo, los depósitos naturales de suelo se licuaron, dejando daños importantes; el desplazamiento lateral fue mínimo en esta zona, sin embargo el hundimiento fue considerable, en algunos casos la losa del piso se fracturó y sobresalió de su nivel hasta un metro; los sucesos fueron similares a los ocurridos en Jaluco que se describieron previamente.

3.2.6 Casos estructurales

Las construcciones de la zona epicentral van desde casas de autoconstrucción de adobe, hasta edificios modernos de acero y de concreto reforzado. Algunas de las edificaciones modernas contaron con diseños adecuados, y supervisión durante su construcción, estas estructuras tuvieron un buen comportamiento sísmico.

Una gran variedad de estructuras de concreto, sobre todo en la zona turística; su desempeño durante el sismo fue el adecuado. Aquellos que presentaron daños importantes, carecían de un buen diseño y control de calidad. Los problemas que se presentaron más frecuentemente fueron los de planta baja flexible; configuración estructural inadecuada; mal detallado del refuerzo longitudinal y lateral, mal anclaje, sin traslape o separación excesiva de los estribos.

3.2.7 Infraestructura

La autopista 200 sufrió daños debidos a licuación y desplazamiento lateral del suelo, pero la operación se restableció en la mañana siguiente. Algunas otras instalaciones resultaron dañadas, incluida una hidroeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad en Manzanillo, donde las tuberías del sistema de enfriamiento del generador sufrieron daños, cuando la estructura que las soportaba se hundió debido a la licuación del terreno, dos semanas después del sismo las autoridades seguían trabajando en este problema.

El puerto de contenedores de Manzanillo sufrió daño moderado; la licuación del terreno provocó hundimientos diferenciales y movimiento lateral del terreno. Después del sismo el puerto sólo trabajaba al 20 % de su capacidad, debido a grietas graves en el patio de los contenedores; este agrietamiento provocó daño ligero en las grúas de carga.



Figura 3.4 Daños a infraestructura debido a hundimientos causados por licuación.

3.3 Tecomán, Colima 2003.

3.3.1 Ubicación del sismo

El fenómeno de licuación de arenas se presentó en la localidad de Tecomán en el estado de Colima en 2003. En este evento el epicentro se localizó por el Servicio Sismológico Nacional en 18.22° N y 104.6° O, frente a las costas de Colima, con magnitud 7.6 en la escala de Richter y profundidad de 10 km.

El movimiento fue sentido con gran intensidad en toda la región de Colima, produciendo daños importantes en viviendas, interrupción de servicios telefónicos y de suministro de energía eléctrica, así como un buen número de deslizamientos en laderas naturales y taludes en carreteras.

Este evento, considerado dentro del contexto sísmológico de nuestro país como de gran magnitud, se origina en la zona de subducción ubicada a lo largo de la costa del Pacífico, entre los estados de Jalisco y Chiapas donde tiene lugar la mayor parte de la sismicidad de la República Mexicana.

Colima tiene zonas susceptibles en licuación de suelos, mismos que han dado motivos para el estudio de este fenómeno a nivel estado y a nivel república mexicana, ya que dentro de esta zona se presentaron fallas por licuación a lo largo del puerto de Manzanillo y las zonas urbanas de Villa de Álvarez y Colima, sobre todo entre estas últimas dos en lugares inhabitados, disminuyendo las posibles pérdidas humanas y materiales.

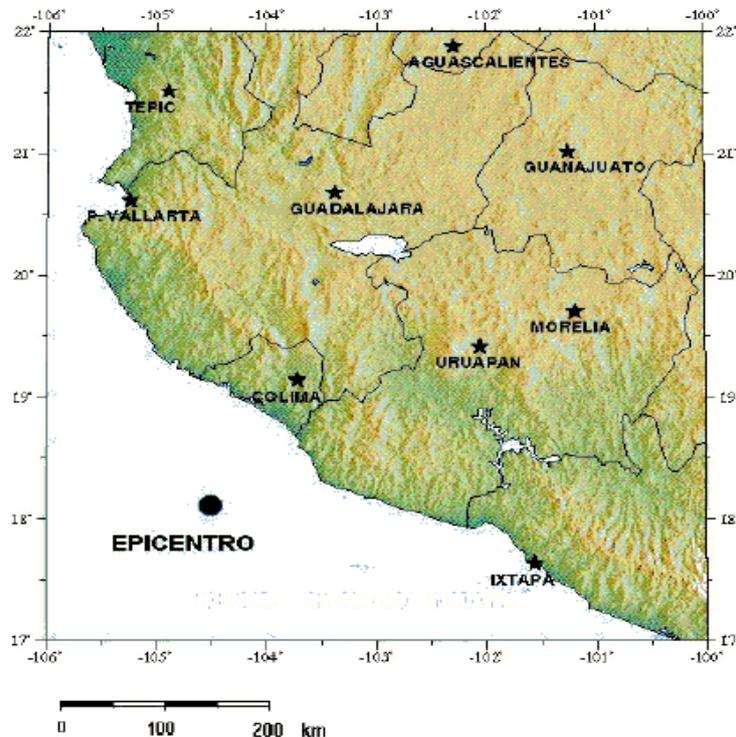


Figura 3.5 Sismo de Tecomán, Colima, 2003.

3.3.2 Levantamientos y hundimientos

El daño incluyó levantamiento, hundimiento y/o agrietamiento de bloques de concreto del piso; agrietamiento y/o deformaciones en pavimento y aceras y desplazamiento lateral, sobre todo en las estructuras residenciales.

Los habitantes locales reportaron que inmediatamente después del sismo se vieron ebulliciones de lodo y arenas en grietas del pavimento y bloques de concreto dañados, que es otra manifestación del fenómeno de licuación, figura 3.6.

En la costera de Manzanillo, consistente de bloques prefabricados, después del sismo se pudo ver la deformación causada por la propagación del movimiento lateral. Acorde con *Wartman, et al. (2003)*, la inclinación del suelo fue de aproximadamente 3% y el desplazamiento lateral del orden de 1 a 3 . Los daños por licuación se limitaron casi exclusivamente a dicha zona, incluyendo un camino cercano al centro y un paso del boulevard principal. La licuación ocurrió en áreas no significativas por lo que las operaciones del puerto no se vieron afectadas. Pero debido al crecimiento de la ciudad, esto puede ser un peligro para las futuras construcciones que se decidan hacer, por lo que debe ser considerado dentro de estudios futuros.



Figura 3.6 Desplazamiento lateral en pavimento en el puerto de Manzanillo. *Wartman, et al. (2003)*.

3.4 Valle de Mexicali, 2010.

3.4.1 Ubicación del sismo

El 4 de abril de 2010 a las 15:40 horas (tiempo local) a 47 km de Mexicali ocurrió un sismo de magnitud 7.2 en la escala de Richter (Munguía et al. 2010). Este evento causó la muerte a dos personas y cerca de cien lesionados, y provocó daños severos en la infraestructura de canales de riego, vivienda, carreteras, puentes, escuelas y hospitales, entre otros. Por otro lado, los daños en contenidos y caída de plafones generaron pérdidas que fueron graves en diversos inmuebles, por ejemplo, se tiene reportado que en un solo inmueble se tuvieron pérdidas económicas de casi 25 millones de dólares en contenidos.

El sismo afectó la población y la infraestructura de riego, vivienda y edificaciones en el valle de Mexicali, principalmente por efectos de licuación de arenas, la consecuente reducción de resistencias, corrimientos laterales y hundimientos del subsuelo. Estos fenómenos han ocurrido en otros sismos, como los de Alaska y Niigata, en 1964, donde hubo fallas asociadas a licuación, incluso el desplazamiento de taludes, fallas en cimentaciones de puentes y edificios, así como la emersión de estructuras enterradas.

Los efectos del sismo se sintieron en la región noroeste de México y en el sur de California, así como en Arizona y Nevada, Estados Unidos, a más de 400 km del epicentro. Se localizó en las coordenadas 32.32° de latitud norte y 115.27° de longitud oeste, con profundidad de entre 4 y 10 km sobre los depósitos aluviales del valle de Mexicali en la localidad del ejido Cucapah Mestizo, Baja California, figura 3.7.

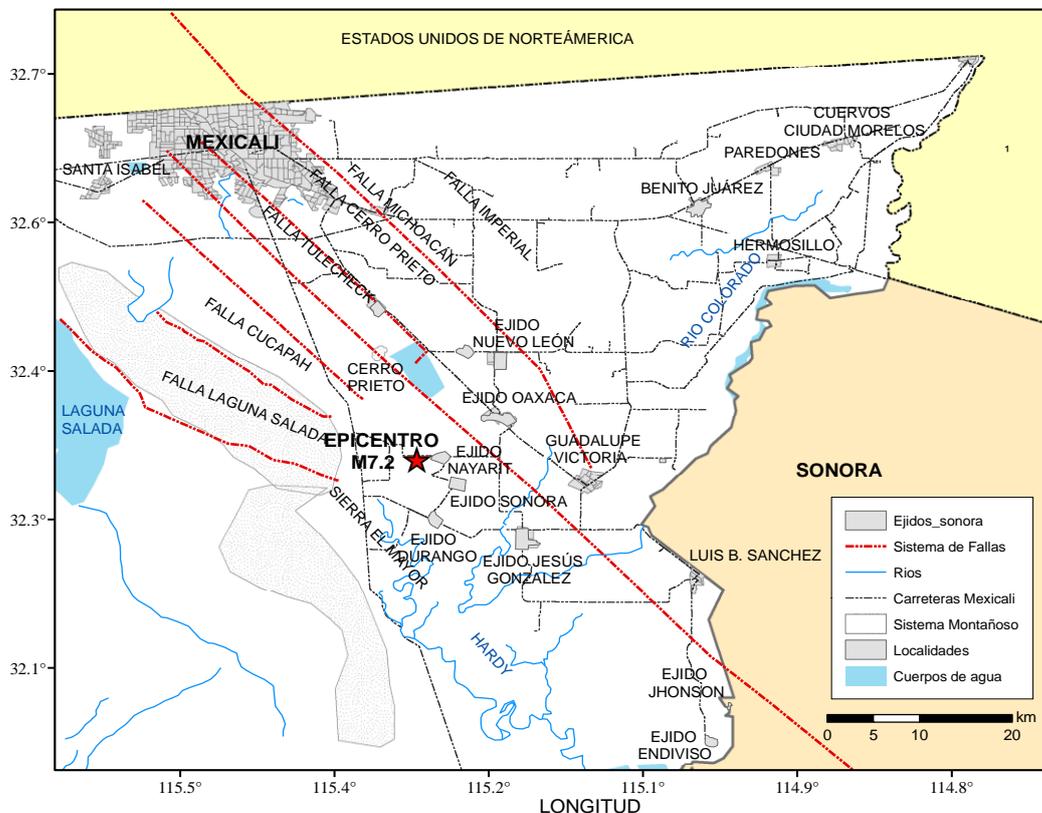


Figura 3.7 Epicentro y distribución del sistema de fallas San Andrés formado por fallas transcurrentes.

3.4.2 Sismicidad

La región donde ocurrió el sismo se ubica en la vecindad de la frontera entre las placas tectónicas del Pacífico y Norteamérica que se mueve hacia el noroeste a una velocidad de 45 mm/año. La interacción de estas placas ha dado origen a un complejo conjunto de fallas activas, como son la falla Imperial, de Cerro Prieto, de Michoacán, de Cucapah, de Pescaderos, de Borrego y de Laguna Salada. Las fallas se encuentran interconectadas con los sedimentos permeables e impermeables, donde el calor de origen magmático se disipa y mezcla con los acuíferos existentes provocando manifestaciones de vapor.

3.4.3 Geología Regional

El fenómeno de licuación se presentó de manera generalizada. La licuación ocurre en depósitos granulares geológicamente recientes (depósitos aluviales) donde el nivel de aguas freáticas (NAF) está a menos de 15 m de profundidad, lo que influye en el nivel de saturación del suelo y por lo tanto afecta los esfuerzos efectivos; en algunos sitios de esta región, se tiene reportado que el NAF se encuentra a menos de 5 metros. Este fenómeno genera pérdida de capacidad de soporte, asentamientos, desplazamientos laterales, agrietamiento del suelo y volcanes de arena, lo que ocasiona graves daños en inmuebles e infraestructura como se observó durante este sismo.

La región del Valle de Mexicali está dentro de la región fisiográfica del delta del Río Colorado. De acuerdo a las cartas publicadas por el Servicio Geológico Mexicano, la litología corresponde a sedimentos del Holoceno por lo que resulta ser una zona con alta susceptibilidad de presentar licuación del suelo, como lo evidenció el sismo. En la figura 3.8 se presentan cuatro sitios donde se puede observar el tipo de daños provocados por el fenómeno de licuación como fallas por capacidad de soporte y el correspondiente asentamiento de los cimientos y la eyección de arena licuada. Por otro lado, en el Parque Mexicali (localizado aproximadamente a 60 km del epicentro) se presentó desplazamiento lateral del suelo en los límites del lago de Mexicali, así como grietas y deformaciones del pavimento de estacionamiento vehicular en donde hubo eyecciones de arenas.

En todos los sitios inspeccionados en la zona de daño se manifestaron evidencias de licuación, mostradas por “volcanes” de arena en la superficie del terreno con expulsión de agua a presión, figura 3.8. La licuación de arenas y limos es consecuencia de la concentración de gradientes hidráulicos por el incremento súbito de presiones en el agua que satura los poros del suelo; se produce así la flotación y el arrastre de los granos del subsuelo arenoso y limoso hacia la superficie para formar los volcanes.



Figura 3.8 Daños provocados por el fenómeno de licuación.

3.4.4 Canales y drenes agrícolas

El canal Reforma es distribuidor principal de agua para riego y forma parte del acueducto Río Colorado-Tijuana. Durante el sismo, el canal Reforma tuvo una interrupción temporal por la falla de un tramo atribuida a hundimientos por falla de capacidad de carga y deslizamientos del terreno natural. Después de una reparación provisional entró en funciones de manera limitada por la pérdida de bordo libre, con un caudal de $7.7 \text{ m}^3/\text{s}$ de los $14 \text{ m}^3/\text{s}$ que conducía antes del sismo.

Los corrimientos laterales afectaron la estabilidad de drenes, cortes, taludes y terrazas aluviales aledañas a los meandros remanentes e inactivos del río Colorado, o zanjas de las regaderas derivadas de los canales principales.

Los drenes agrícolas fueron afectados principalmente por corrimientos y deslizamientos de talud que obstruyeron el flujo del agua. Para restaurar el drenaje tuvo que esperar a que el suelo disipara el incremento de presión de agua en el subsuelo, que elevaron temporalmente los niveles freáticos después del sismo. Las estructuras de compuertas (represas y obras de toma) no tuvieron daños estructurales significativos; sin embargo, es necesaria una verificación de la estabilidad sísmica, en particular para sismos de mayor magnitud.

3.4.5 Edificaciones y viviendas

Mediante la identificación del tipo de estructuración de viviendas y edificaciones dañadas y no dañadas en zonas rurales y urbanas en el valle de Mexicali, fue posible valorar el comportamiento dinámico-estructural y establecer un criterio de evaluación de predios para

reubicar a los damnificados. En general, las viviendas urbanas y rurales estructuradas con base en muros de carga (tabiques o bloques huecos rellenos de concreto) confinados con marcos de concreto no tuvieron daños estructurales graves; en algunas zonas donde persisten casas antiguas de adobe, éstas no resistieron el sismo y fueron las que más se dañaron y colapsaron.

3.4.6 Otras estructuras

En general otro tipo de estructuras como espigones, postes de luz, carreteras y vías de ferrocarril fallaron o se deformaron por los mecanismos mencionados anteriormente.

3.4.7 Soluciones

En los reglamentos de construcción se sugiere realizar espectros de sitio que consideren las características específicas del lugar. Para elaborar este espectro, se debe realizar un análisis probabilista de peligro sísmico en el sitio en roca o terreno firme y posteriormente tomar en cuenta las propiedades de amplificación dinámica del suelo mediante estudios de mecánica de suelos, geofísicos y de mediciones de vibración ambiental.

Es posible mejorar la estabilidad sísmica de estructuras mediante la construcción de drenes de alivio de subpresiones. Los sistemas de subdrenaje y drenes de alivio pueden desarrollarse dependiendo de la profundidad del nivel freático mediante perforaciones, o drenes verticales o zanjas, rellenas de grava-arena bien graduada (no arenas locales) que crucen el nivel freático y los estratos relativamente impermeables de arcilla y limos plásticos hasta penetrar los lentes subyacentes de arenas.