



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**“Estimación de desplazamiento lateral y vertical del terreno
debido a licuación inducido por sismo en México”**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

ZAPATA OSORIO CARMEN MAGALI

DIRECTOR:
DR. EDUARDO REINOSO ANGULO

Octubre de 2012





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/129/12

Señorita
CARMEN MAGALI ZAPATA OSORIO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. EDUARDO REINOSO ANGULO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

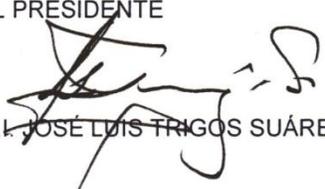
"ESTIMACIÓN DE DESPLAZAMIENTO LATERAL Y VERTICAL DEL TERRENO DEBIDO A LICUACIÓN INDUCIDO POR SISMO EN MÉXICO"

- INTRODUCCIÓN
- I. LICUACIÓN
- II. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE CASOS DE LICUACIÓN EN MÉXICO
- III. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE LICUACIÓN
- IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 3 de septiembre del 2012.
EL PRESIDENTE


M. I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Soy de las que piensan que la ingeniería y la ciencia tienen una gran belleza. Un ingeniero no es sólo un técnico: es también como un niño colocado ante fenómenos naturales que le impresionan como un cuento de hadas.

Marie Curie

Dedicatoria

En este momento, que me encuentro ante uno de mis más grandes sueños, momento en que por fin después de una larga espera visualizo la conquista de mi Título; no caben en mi corazón y mente más que alegrías, orgullo y agradecimientos.

La alegría de poder compartir este triunfo y momento con mis seres queridos, orgullo de haber logrado pese a los malos momentos alcanzar esta meta.

Agradecimientos tengo muchos, pero principalmente a mis padres: Brígida Osorio Gutiérrez y Sergio Zapata Santillán, quienes a lo largo de mi camino me han apoyado con consejos, abrazos, mimos y regaños; porque de ellos es también este logro.

A mis hermanos: Roció, Araceli, Carlos y Enrique, que me han brindado apoyo comprensión y paciencia; a mis sobrinos: Raúl, Saúl, Viridiana, Carlos y Karla, gracias pequeños por llenar mi vida de alegrías. A mi familia en general por que han estado presentes y he recibido su apoyo incondicional.

A mis amigos, seres queridos y quienes han formado parte importante de mi vida, porque han estado presentes de una forma u otra, dándome consejos y palabras de aliento que me ayudaron a seguir este camino.

Sin más, quiero agradecerles por que han esto presentes en mi vida, de verdad gracias.

Agradezco:

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por que siempre estaré agradecida y orgullosa de pertenecer a ella.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al Dr. Eduardo Reinoso por brindarme la oportunidad de desarrollar este tema.

Al Dr. Miguel A. Jaimes por tenerme paciencia y apoyarme, por que a pesar de los tropiezos confió en mí.

Al Dr. Mauro P. Niño por brindarme apoyo y ayudarme a resolver dudas.

A mis sinodales:

M.I. Agustín Demeneghi Colina

Dr. Rigoberto Rivera Constantino

M.I. Miguel Angel Rodríguez Vega

Por tomarse el tiempo de leer y revisar este trabajo.

Al Dr. José Alberto Escobar Sánchez por que con sus palabras me exhorto a obtener mi Título.

Índice

Introducción	1
I. Objetivo	2
II. Alcances	2
III. Organización y contenido	2
Capítulo 1.....	4
Licuación.....	4
1.1 Concepto de licuación	4
1.1.1 Proceso de licuación.....	5
1.2 Susceptibilidad de los suelos a licuación.	6
1.2.1 Factores históricos	6
1.2.2 Factores geológicos	6
1.2.3 Factores de composición y estado del suelo (geotécnicos).....	8
1.3 Fallas por licuación	8
1.3.1 Fallas por flujo y deslizamientos	8
1.3.2 Desplazamientos laterales	8
1.3.3 Pérdida de capacidad de carga y soporte por desplazamientos verticales	9
1.3.4 Oscilación y volcanes de arena.....	9
1.4 Parámetros que definen los movimientos laterales inducidos por licuación 10	
1.4.1 Parámetros sismológicos	10
1.4.2 Parámetros topográficos y geométricos	14
1.4.3 Parámetros geotécnicos.....	15
1.5 Parámetros que definen los movimientos verticales inducidos por licuación.	19
1.5.1 Parámetros sismológicos.....	20
1.5.2 Parámetros geotécnicos.....	20

Capítulo 2.....	25
Recopilación de información de casos de licuación en México	25
2.1. Costa de Oaxaca (1870)	29
2.1.1. Geología.....	29
2.1.2. Descripción del evento	29
2.1.3. Evidencias de licuación	30
2.2. Bavispe, Sonora (1887)	31
2.2.1. Geología.	31
2.2.2. Descripción del evento	32
2.2.3. Evidencias de licuación	32
2.3. Mexicali, Baja California (1915)	34
2.3.1. Geología.....	34
2.3.2. Descripción del evento	34
2.3.3. Evidencias de licuación	35
2.4. Jaltipán, Veracruz (1959)	36
2.4.1. Geología.....	36
2.4.2. Descripción del evento	36
2.4.3. Evidencias de licuación	37
2.5. Chiapa de Corzo, Chiapas (1975)	39
2.5.1. Geología.....	39
2.5.2. Descripción del evento	40
2.5.3. Evidencias de Licuación.....	40
2.6. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1979)	44
2.6.1. Geología.....	44
2.6.2. Descripción del evento	44
2.6.3. Evidencia de licuación	45
2.7. Mexicali (1980)	46
2.7.1. Geología.....	46
2.7.2. Descripción del evento	46
2.7.3. Evidencia de licuación	46

2.8. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1981)	49
2.8.1. Geología.....	49
2.8.2. Descripción del evento	49
2.8.3. Evidencia de licuación	49
2.9. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1985)	51
2.9.1. Geología.....	51
2.9.2. Descripción del evento	51
2.9.3. Evidencia de licuación:	51
2.10. Jalisco y Colima (1995)	53
2.10.1. Geología.....	53
2.10.2. Descripción del evento	53
2.10.3. Evidencia de licuación:	53
2.11. Tlaxcala y Puebla (1999)	55
2.11.1. Geología.....	55
2.11.2. Descripción del evento	55
2.11.3. Evidencia de licuación:	56
2.12. Colima (2003)	57
2.12.1. Geología.....	57
2.12.2. Descripción del evento	57
2.12.3. Evidencia de licuación:	57
2.13. Baja California (2010)	60
2.13.1. Geología.....	60
2.13.2. Descripción del evento	60
2.13.3. Evidencia de licuación:	61
Capítulo 3	63
Metodología para la estimación de la demanda de licuación	63
3.1. Descripción	63
3.1.1. Determinar la susceptibilidad del suelo a licuarse	64
3.1.2. Probabilidad de que un evento sísmico desencadene el fenómeno de licuación	64

3.1.3. Estimación de demandas en términos del desplazamiento lateral del terreno. 65	
3.2. Metodología para la obtención de mapas de desplazamiento horizontal del suelo debido a licuación	74
3.3. Metodología para la obtención de mapas de desplazamiento vertical del suelo debido a licuación.	75
Capítulo 4	77
Aplicación de la metodología propuesta y análisis de resultados	77
4.1. Mapa de desplazamiento lateral del suelo debido a licuación	77
4.2. Mapa de desplazamiento vertical del suelo debido a licuación	81
4.3. Análisis de resultados	83
4.3.1. Costa de Oaxaca (1870)	83
4.3.3. Mexicali, Baja California (1915).....	85
4.3.4. Jaltipán, Veracruz (1959)	85
4.3.5. Chiapa de Corzo, Chiapas (1975)	86
4.3.6. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1979)	88
4.3.7. Mexicali, Baja California (1980).....	88
4.3.8. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1981)	90
4.3.9. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1985)	90
4.3.10. Jalisco y Colima (1995)	91
4.3.11. Tlaxcala y Puebla (1999).....	92
4.3.12. Colima (2003).....	92
4.3.13. Mexicali, Baja California (2010).....	93
Conclusiones y recomendaciones	95
• Conclusiones	95
• Recomendaciones	97
ANEXOS	i
Referencias	x

Introducción

Es en 1964 cuando comienza el desarrollo de metodologías enfocadas a la evaluación del potencial de licuación de los suelos, debido a los graves daños provocados por la presencia de licuación y desplazamientos laterales durante los sismos de Alaska, USA y Niigata, Japón. Luego de observar el poder destructivo del fenómeno de licuación durante estos eventos se desencadenó el interés y la necesidad de analizar y predecir el fenómeno de licuación y las fallas por desplazamiento lateral y vertical. Los estudios sobre el fenómeno y la falla por desplazamientos se han enfocado en la prevención y predicción, es decir, generar mecanismos o técnicas que ayuden al suelo a mejorar su comportamiento durante eventos de licuación o conocer las características que influyen en el aumento del potencial de licuación de un suelo.

Dentro de los estudios de desplazamientos por licuación existen metodologías para estimar los desplazamientos laterales y verticales, éstas se pueden dividir en tres categorías: modelos de elementos finitos, modelos de análisis simplificado y modelos empíricos, estos últimos considerados como los más fiables y simples ya que hacen uso de parámetros fácilmente estimables. Estas metodologías no predicen el lugar o el momento de ocurrencia de una falla de este tipo, sólo dan un valor numérico a los posibles desplazamientos laterales o verticales en una región.

En el caso de las metodologías enfocadas a la predicción, ingenieros reconocen que la habilidad de poder pronosticar los movimientos del suelo inducidos por licuación resulta de gran aplicación para evaluar el peligro sísmico de estructuras y líneas vitales. Los desplazamientos son una de las fallas por licuación que genera más pérdidas económicas, esto debido a que con poca magnitud pueden provocar un daño considerable en las tuberías de agua potable, aguas residuales, y demás líneas vitales que se encuentren enterradas. Otra razón del daño ocasionado por los desplazamientos se debe a que existen asentamientos urbanos en zonas de alta susceptibilidad, como son las orillas de ríos o zonas cercanas al mar.

En México el fenómeno de licuación se ha hecho presente, en Jaltipán (1959), Colima (2003) y el caso más reciente en Mexicali (2010), donde se presentaron desplazamientos verticales y horizontales, así como presencia de volcanes de arena, que causaron grandes pérdidas económicas. El fenómeno de licuación se ha presentado durante eventos sísmicos en zonas de la República con características geológicas específicas, estas características sumadas a la alta sismicidad del país, crean zonas con alta susceptibilidad a desarrollar el fenómeno de licuación y por lo tanto a presentar desplazamientos laterales y verticales inducidos por este fenómeno.

La alta sismicidad del país esta ligada a la interacción de cinco placas tectónicas: Cocos, Pacifico, Norteamericana, Caribe y Rivera. Cada año se registran más de 90 sismos con magnitudes mayores a los 4 grados en la escala de Richter (Bitran, D. B., 2001). Estados como: Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Puebla y el Distrito Federal son los estados con mayor incidencia de eventos sísmicos de gran magnitud (más de 7 grados en la escala Richter), sin embargó estados como Chiapas, el estado de México y la península de Baja California también han presentado sismos de gran magnitud aunque con menor frecuencia.

Estados con alta sismicidad poseen gran parte de las zonas susceptibles de licuarse, y en estas zonas existen asentamientos humanos e infraestructura civil que se han visto afectados por los desplazamientos laterales y verticales inducidos por el fenómeno de licuación, haciendo evidente el poder destructivo del fenómeno y el riesgo que representara en eventos futuros. Evaluar el potencial de licuación de los suelo se hace necesario y evidente, para conocer el posible riesgo de una región frente al fenómeno, así como las regiones donde es posible la presencia de licuación, como son los mapas de peligro de licuación de arenas inducida por sismo.

I. Objetivo

El objetivo de esta tesis es proporcionar y analizar una metodología para la elaboración de mapas de peligro de licuación inducida por sismo en México a nivel regional, a partir de la estimación de desplazamientos laterales y verticales del suelo. Haciendo uso de modelos empíricos como el EPOLLS y Método de Tokimatsu y Seed.

II. Alcances

1. Describir el fenómeno de licuación de arenas.
2. Analizar y describir los parámetros involucrados en el análisis de desplazamientos laterales y verticales inducidos por licuación.
3. Recabar información histórica sobre eventos de licuación en México.
4. Recopilar de datos de valores geotécnicos basados en literatura conocida o en estudios de mecánica de suelos disponibles.
5. Establecer una metodología para la estimación de desplazamientos laterales y horizontales inducidos por licuación.
6. Elaborar mapas de peligro de licuación.

III. Organización y contenido

La tesis está conformada por dos secciones: la primera de carácter teórico presenta información recopilada que se usará en la aplicación de la metodología propuesta, esta sección está integrada por los capítulos 1-4; la sección de aplicación está integrada por el capítulo 5, sección que presenta la aplicación de las metodologías y los resultados obtenidos. En las siguientes líneas se hará un breve resumen de los capítulos.

Introducción, Breve reseña del contenido, motivaciones, objetivos y alcances del estudio.

Capítulo 1: **Licuación**, en este capítulo se describe el fenómeno de licuación, características, proceso, parámetros que influyen en su desarrollo, mecanismos de falla

que puede provocar, así como parámetros relacionados con los desplazamientos laterales y verticales.

Capítulo 2: **Recopilación de información de casos de licuación en México**, como su nombre lo indica, es un compendio de datos sobre eventos sísmicos que muestra las características o manifestaciones del fenómeno de licuación ocurridas en la República Mexicana.

Capítulo 3: **Metodología para la estimación de la demanda de licuación**, es una breve explicación sobre las clasificaciones y grados de aplicación de las metodologías y modelos que existen para la estimación de desplazamientos laterales y verticales, así mismo, se describe la metodología usada en este trabajo.

Capítulo 4: **Aplicación de la metodología propuesta y análisis de resultados**, en este capítulo se realiza una breve descripción de la aplicación de la metodología y un análisis comparativo entre los resultados arrojados por la metodología propuesta y los datos de eventos históricos de licuación.

Conclusiones y Recomendaciones: se integra por conclusiones y propuestas para estudios futuros.

Capítulo 1

Licuación

1.1 Concepto de licuación

La licuación es un fenómeno que provoca la pérdida de resistencia y rigidez de un suelo durante un periodo de tiempo muy corto, aunque lo suficientemente largo para hacer que la licuación cause fallas, muertes e importantes pérdidas económicas.

Comúnmente la licuación es asociada con la pérdida de resistencia en depósitos de arenas y limos libres de arcilla saturados a causa de un aumento en la presión de poro cuando estos son sometidos a una acción dinámica, como lo son las ondas sísmicas, principalmente las ondas de cortante. Una definición más precisa es dada por Salden (1985):

“La licuación es un fenómeno que sucede cuando una masa de suelo pierde un gran porcentaje de su resistencia a cortante, cuando se sujeta a cargas monótonas, cíclicas o de choque, y fluye de manera semejante aun líquido hasta que los esfuerzos tangenciales que actúan sobre la masa son tan bajos como la reducción en la resistencia al corte.”

En forma más general la licuación se ha definido como la transformación “del estado sólido al líquido como consecuencia de un aumento en la presión de poro y una reducción de los esfuerzos efectivos”. La licuación es resultado de la tendencia de los suelos a disminuir su volumen durante la aplicación de cargas (monótonas, cíclicas o de choque), provocando que los granos en el suelo se acomoden de manera más compacta, disminuyendo el espacio entre ellos, como consecuencia, el agua en los espacios se ve forzada a salir por el aumento en la presión (Rauch, 1997).

Una definición más formal utilizada para describir la licuación está dada por National Research Council’s Committee on Earthquake Engineering (1985), como “todo fenómeno que da lugar a una pérdida de la resistencia al cortante o al desarrollo de esfuerzos efectivos como consecuencia de repetidas o transitorias perturbaciones en suelos cohesivos y saturados”.

Para terminar de dar una definición del fenómeno de licuación, resulta importante hablar de la resistencia al esfuerzo cortante y la relación de vacíos crítica, esta última es la relación de vacíos con la cual las arenas no cambiarían su volumen al ser sometidas a un esfuerzo cortante, la importancia de la relación de vacíos crítica aparece cuando se considera la resistencia al esfuerzo cortante de las arenas finas saturadas, quedando expresada la resistencia al cortante de la siguiente forma:

$$s = (\sigma'_v - u_n) \tan \phi = \bar{\sigma} \tan \phi \quad (1.1)$$

Expresión dada por Terzaghi en 1925, donde σ es el esfuerzo total, u_n es la presión de poro, σ'_v es el esfuerzo efectivo y ϕ es el ángulo de fricción interna del material. En la expresión 1.1 se toma en cuenta la influencia del contenido de agua en las arenas, ejemplo, una arena suelta saturada al deformarse tiende a compactarse, lo que aumenta la presión en el agua, si no existe un buen drenaje, el agua se ve obligada a tomar presiones muy por encima de la presión hidrostática. Este aumento en la presión de poro disminuye la presión efectiva y la resistencia al esfuerzo cortante hasta que la diferencia $(\sigma'_v - u_n)$ llegue a anularse, provocando así una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante hasta valores nulos, presentándose así el fenómeno de licuación.

1.1.1 Proceso de licuación.

Este fenómeno ha sido descrito por diversos investigadores, cada uno ha dado su interpretación sobre el proceso, un modo sencillo de describirlo y comprender el proceso de licuación: En su estado inicial en un depósito de suelo las partículas se encuentran en contacto, este contacto genera entre ellas fuerzas que dan equilibrio, estabilidad y resistencia al suelo. Durante un terremoto, la propagación de las ondas sísmicas genera esfuerzos de tensión y tensiones cíclicas, entonces los granos del suelo suelto y saturado se reacomodan para lograr un arreglo más denso y estable, provocando que el agua en los poros salga. Si se impide el drenaje del agua, la presión de poro se incrementa progresivamente. Esta presión se transfiere a la estructura del suelo haciendo que disminuya el esfuerzo efectivo y la resistencia a cortante en el suelo. Si la resistencia por cortante de un suelo disminuye demasiado, el suelo sufrirá deformaciones que se conocen como licuación. Fig 1.1

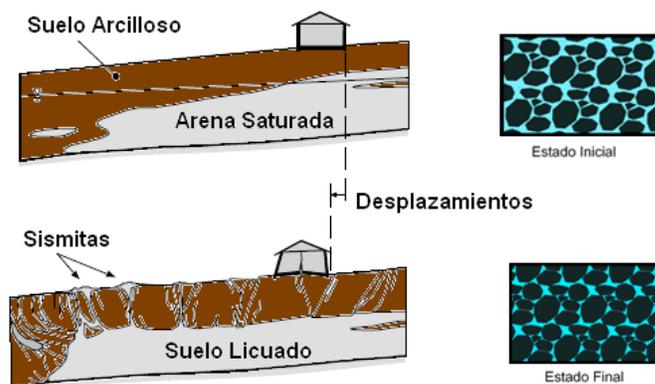


Fig 1. 1 Proceso de licuación

1.2 Susceptibilidad de los suelos a licuación.

La licuación esta asociada con la tendencia de los granos a reacomodarse cuando estos son sujetos a esfuerzos cortantes; la susceptibilidad a la licuación se considera como la capacidad del suelo de resistir el reacomodo, donde las características de los granos del suelo (distribución, forma, composición y estado) controlan la susceptibilidad de los estos a licuarse. El conocimiento de la susceptibilidad a la licuación de los suelos es el punto de partida para determinar la probabilidad de ocurrencia de licuación. Para su evaluación se deben tomar en cuenta factores de tipo histórico, geológico, de composición y estado (geotécnicos).

1.2.1 Factores históricos

El estudio de Youd (1984) revelo que en eventos sísmicos donde se ha presentado el fenómeno de licuación existe una alta posibilidad de la recurrencia del fenómeno en una misma zona, su estudio mostro que el fenómeno puede repetirse cuando las condiciones del suelo así como los niveles freáticos permanecen iguales ó en suelos de características semejantes. Estas condiciones se ven afectadas por dos factores importantes la compactación y el cortante, mismos que influyen en el desarrollo y recurrencia de los eventos de licuación:

Generalmente la licuación de los suelos ocurre de la parte superior de la capa hacia el fondo de la misma y la compactación se desarrolla del fondo de la capa a la parte superior, este proceso se lleva a cabo durante un tiempo considerable, lo cual llega a generar zonas pobremente compactadas sobre la superficie de la capa de suelo; y la licuación se repetirá hasta que la compactación se haya completado. Por su parte el esfuerzo cortante producto de desplazamientos del suelo puede dilatar y empobrecer los suelos granulares en las zonas de cortante, generando en estas una alta o permanente susceptibilidad a licuación.

La recopilación de información de los eventos históricos, permite la localización de zonas con fallas por eventos de licuación para generar mapas de zonas donde la susceptibilidad de licuación es elevada.

1.2.2 Factores geológicos

Youd y Perkins (1978) refieren que la susceptibilidad de los suelos a fallar o licuarse se ve afectada cualitativamente por factores como el proceso de sedimentación, la edad del depósito, la historia geológica, el nivel de aguas freáticas, pendiente del suelo y densidad. Observan que varios de estos factores afectan cualitativamente la susceptibilidad de estos a fallar o licuarse, Youd y Perkins (1978) apartir del estudio realizado por Youd y Hoose (1977), generan la Tabla 1.1.

Tabla 1. 1 Estimación de susceptibilidad en depósitos sedimentarios a licuación durante movimientos sísmicos fuertes. Youd y Perkins (1978)

Tipo de depósito	Distribución general de los sedimentos poco cohesivos en depósitos	Probabilidad de que los depósitos poco cohesivos, saturados, sean susceptibles de licuación (por edad geológica)			
		< 500 años	Holoceno	Pleistoceno	Pre pleistoceno
(a) Depósitos continentales					
Canal del río	Localización variable	Muy alta	Alta	Baja	Muy Baja
Llanura de inundación	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Abanico y llanura aluvial	Extendido	Moderada	Baja	Baja	Muy Baja
Terrazas Marinas y llanuras	Extendido	---	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Deltas y deltas abanico	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Lacustre y playa	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Coluvial	Variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Talud	Extendido	Baja	Baja	---	Muy Baja
Dunas	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Loess	Variable	Alta	Alta	Alta	---
Till glaciár	Variable	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Tova	Poco comunes	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Piroclasto	Extendido	Alta	Alta	---	---
Sólidos residuales	Poco comunes	Baja	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Sebka	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
(b) Zona de costa					
Delta	Extendido	Muy alta	Alta	Baja	Muy Baja
Estuario	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Playa					
Alta energía olamotriz	Extendido	Moderada	Baja	Muy Baja	Muy Baja
Baja energía olamotriz	Extendido	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Sedimentos de lagunas	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
Costa	Localización variable	Alta	Moderada	Baja	Muy Baja
(c) Artificial					
Rellenos no compactados	Variable	Muy alta	---	---	---
Rellenos compactados	Variable	Baja	---	---	---

Como se observa en la Tabla 1.1 los autores basan la susceptibilidad de los suelos a licuarse en la edad geológica y en el tipo de depósito, ya que los procesos geológicos por

los cuales se generan suelos sueltos o de granulometría uniforme, dan como resultado suelos potencialmente licuables. Estos autores observaron que los depósitos jóvenes (menos de 500 años) y aquellos correspondientes al Holoceno, presentan una mayor susceptibilidad que aquellos del Pleistoceno o Pre-pleistoceno, coincidiendo en que los depósitos aluviales y fluviales con niveles freáticos muy superficiales cuentan con una mayor susceptibilidad de licuarse. En base a esta información se generan mapas de susceptibilidad a licuación tomando en cuenta las características de sedimentación del suelo.

1.2.3 Factores de composición y estado del suelo (geotécnicos).

Como se mencionó antes, las características de los granos del suelo influyen en la susceptibilidad a la licuación. Arenas y gravas cuyos granos son redondeados y de tamaño uniforme se consideran altamente susceptibles a licuación, debido a que existe poca fricción entre granos y su acomodo es poco estable, por el contrario, suelos con granos de formas angulosas y bien graduados tienen mayor fricción entre partículas y un mejor arreglo entre granos debido a la diversidad de tamaños, lo que hace de estos suelos más estables y menos susceptibles a licuación.

El contenido de finos, especialmente los de tipo plástico genera en los granos de suelo suficiente adhesión que limita su capacidad de generar un arreglo más denso, con lo cual hace a los suelos menos susceptibles a la licuación.

El estado inicial del suelo, establecido por la densidad relativa y relación de vacíos, interviene en la susceptibilidad de los suelos a licuarse. Si el suelo cumple con todas las características mencionadas anteriormente, (factores históricos, geológicos y de composición), ocurrirá licuación si y solo si su estado inicial cumple con las características para el inicio de la misma.

La relación de vacíos y la densidad relativa de los suelos están ligadas a la deformación volumétrica y a la relación esfuerzo-deformación del suelo. En arenas sueltas (suelos con relaciones de vacíos grandes), cuando tiende a ocurrir un desplazamiento, las partículas no se traban entre sí, por lo que la resistencia que se opone a la deformación es solo de fricción. Por el contrario en arenas compactas (con relaciones de vacíos pequeñas), la resistencia que se opone a la deformación es la fricción más todo el conjunto de efectos debidos a la trabazón de los granos entre sí, que se oponen a la tendencia al movimiento de los granos o al reacomodo de estos.

Zonas con suelos granulares que reúnen las características geológicas (edad, tipo de emplazamiento y NAF), de composición, (con granulometrías uniformes, formas redondeadas y con bajo contenido de material fino) y que además tienen las características de estado inicial necesarias para el desarrollo de licuación, se pueden considerar como de alta susceptibilidad a licuación.

1.3 Fallas por licuación

La licuación es un fenómeno que generalmente va acompañado por fallas del suelo o desplazamientos del mismo, estas fallas son las que generan la mayor parte del daño cuando se presenta el fenómeno de licuación en una región. Dentro del campo de la ingeniería, se hace importante conocer la capacidad y gravedad de los daños causados por licuación. Las fallas provocadas por licuación pueden tomar diferentes formas: fallas por flujo o deslizamientos, desplazamientos laterales y verticales, pérdida de capacidad de carga, así como oscilación del suelo y presencia de sismitas (volcanes de arena).

1.3.1 Fallas por flujo y deslizamientos

Estas fallas comúnmente desplazan grandes masas de tierra decenas de metros, en algunos casos, grandes masas de tierra viajan decenas de kilómetros por una pendiente prolongada. Los flujos pueden estar compuestos de suelo completamente licuado o bloques de material intacto sobre una capa de suelo licuado Fig 1.2. Estos flujos se desarrollan en arenas sueltas saturadas o limos en pendientes relativamente fuertes, por lo general con pendientes no mayores de 3 grados. Este tipo de falla es considerada una de las más catastróficas.



Fig 1. 2 Ejemplo Alaska (1964) y esquema de falla de flujo

1.3.2 Desplazamientos laterales

El desplazamiento se produce en respuesta a la combinación de fuerzas gravitatorias y las fuerzas de inercia generadas por un terremoto. Los desplazamientos laterales ocurren en bloques extensos de suelo, como resultado de la licuación de una capa profunda. Se desarrollan en taludes de no más de 3 grados, y se mueven hacia una cara libre, ver Fig 1.3. La tierra desplazada normalmente se rompe internamente, causando grietas, escarpes y fosas que se forman en la superficie de falla. Los desplazamientos horizontales son bastante extensos y afectan con mayor severidad a tuberías, cimentaciones y puentes.

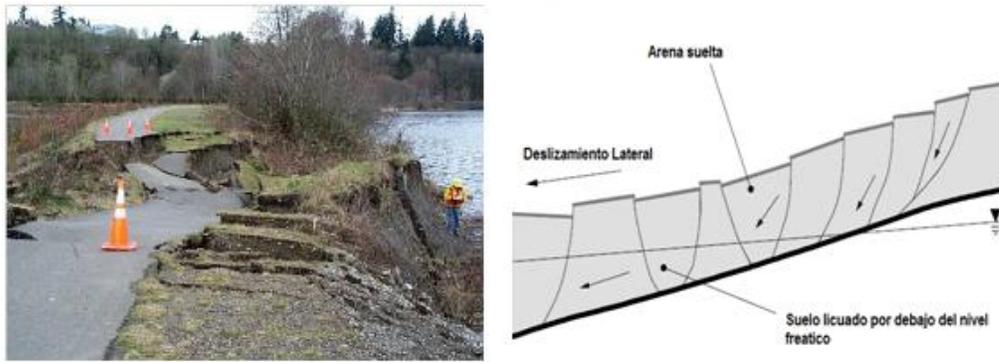


Fig 1. 3 Ejemplo en terraplén de vía de acceso próxima al Capitol, Alaska (1964) y esquema de deslizamiento lateral

1.3.3 Pérdida de capacidad de carga y soporte por desplazamientos verticales

Ocurre cuando el suelo que está soporta un edificio o una estructura sufre licuación, éste pierde resistencia y grandes deformaciones, las cuales pueden provocar el volcamiento de la estructura o solo asentamientos diferenciales o totales.

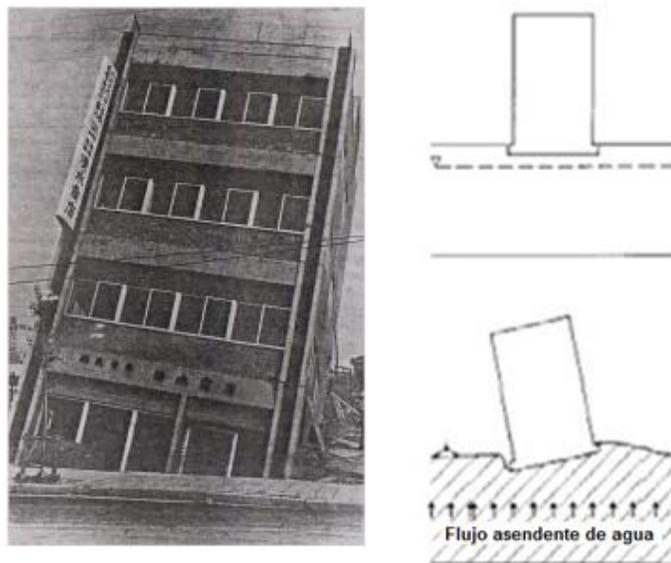


Fig 1. 4 Ejemplo volcamiento del edificio durante el terremoto de Niigata, Japón, en 1964 y esquema de pérdida de capacidad de carga

1.3.4 Oscilación y volcanes de arena

Este tipo de falla ocurre donde el terreno es plano o su pendiente es casi nula, la licuación profunda provoca que las capas de suelo se desacoplen por movimientos hacia arriba y hacia abajo, hacia adelante y hacia atrás, como simulando ondas sísmicas, estas oscilaciones provocan fisuras en la superficie del suelo. También hay ocurrencia de volcanes de arena o sismitas que son flujos de agua con sedimentos que suben hacia la superficie como una forma de disipar el aumento en la presión de poro del suelo.

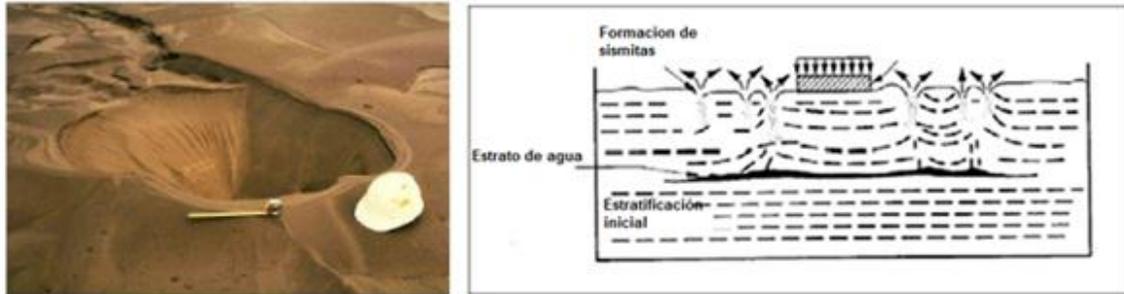


Fig 1. 5 Volcán de arena durante terremoto de Loma Prieta en E. U. (17/10/1989) y esquema de generación de volcanes de arena

1.4 Parámetros que definen los movimientos laterales inducidos por licuación

En sismos de gran magnitud, es probable encontrar desplazamientos laterales como resultado del fenómeno de licuación; estos mecanismos de falla provocan daños graves y altamente perjudiciales, las instalaciones subterráneas resultan ser generalmente las más afectadas.

Lo anterior hace necesaria la estimación desplazamientos laterales, conociendo las características que hacen probables los desplazamientos y los parámetros cuantitativos que definen sus características. El estudio de casos históricos de licuación hace posible la determinación de estos parámetros, permitiendo separarlos en tres grandes grupos:

- Parámetros sismológicos
- Parámetros topográficos y geométricos
- Parámetros geotécnicos

1.4.1 Parámetros sismológicos

Estos representan las características de la fuente del sismo, como son la magnitud y aceleración del suelo; también representa las características del epicentro, ejemplo, la distancia del sitio del desplazamiento al epicentro, en general son parámetros que describen las características del sismo que generó el fenómeno de licuación.

- Magnitud del sismo M_w y magnitud de ondas de superficie M_s

Definición:

Un sismo tiene una forma única de liberación de energía, a través del tiempo se ha buscado la forma en que puede cuantificarse esta energía, la magnitud evalúa de manera cuantitativa el tamaño de un sismo, fue Richter en 1932 quien definió una escala estrictamente cuantitativa para medir la magnitud de un sismo, de la siguiente manera:

$$M_L = \log A - \log A_0 \quad (1.2)$$

Donde M_L es la magnitud local o magnitud de Richter, A es la amplitud registrada por un sísmógrafo de torsión Wood-Anderson (amplificación 2800 y periodo 0.85 s) y A_0 la amplitud, a la misma distancia de un terremoto tomado como patrón (Kramer, S., 2000), esta escala de magnitudes funciona bien para sismos locales (distancias epicentrales menores de 600 km en el sur de California), sísmólogos se dieron a la tarea de desarrollar factores que permitieran su uso sin que la localización sea una limitante, lo que da lugar a la siguiente expresión:

$$M = \log A_2 + 3 \log(8\Delta t) - 2.92 \quad (1.3)$$

Donde M es la magnitud, A_2 amplitud en milímetros medida directamente en el registro del sísmógrafo. El tiempo Δt en segundos. Científicos concuerdan en que deben pasar varios días para llegar a una mejor estimación del valor de la magnitud de un sismo. (Louie, J., 1998).

Se han definido varios tipos de magnitudes, dentro de ellas la Magnitud de Momento Sísmico M_w y la Magnitud de Ondas Superficiales M_S , parámetros importantes para la estimación de desplazamientos laterales.

El parámetro de Magnitud de Momento Sísmico que fue desarrollado por Hiro Kanamori del California Technological Institute (1978) como una nueva escala de magnitud, se define de la siguiente forma:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_o - 10.7 \quad (1.4)$$

Donde, el momento sísmico M_o se expresa como:

$$M_o =: \varpi \kappa \quad (1.5)$$

Donde: ϖ es el desplazamiento promedio de la falla en cm, κ es el área de ruptura expresada en cm^2 y “:” es la rigidez de la roca en dinas/cm^2 .

La Magnitud de Ondas Superficiales M_S , permite medir eficientemente sismos a grandes distancias, utilizando ondas superficiales, de largo periodo, y esta definido como:

$$M_S = \log(\Lambda/T) + 1.66 \log \Psi + 3.3 \quad (1.6)$$

Donde Λ es la máxima amplitud horizontal del terreno de la componente vertical de las ondas superficiales con rango de periodo T , medida en micrómetros, T es el periodo en segundos y Ψ , la distancia epicentral en grados geocéntricos (ángulo estación – epicentro) y rango entre 20° y 160° .

- Profundidad del foco (***Prof. Epic.***)

Es la profundidad a la que se encuentra el hipocentro del sismo, es decir, la profundidad del lugar donde se originó el temblor, medida en kilómetros. (Fig. 1.6)

- Distancia Epicentral o Distancia más corta de la ruptura de la fuente al sitio (***R***)

Es la distancia más corta entre el epicentro y la estación de registro, es decir, la distancia horizontal entre la proyección del hipocentro o foco del sismo y la estación de registro, medida en kilómetros. (Fig. 1.6)

- Distancia Hipocentral (***Dist. Hipo.***)

Es la distancia más corta del hipocentro o foco del sismo a la estación de registro medida en kilómetros (Fig. 1.6). La distancia hipocentral se calcula como:

$$Dist. Hipo. = \sqrt{(R^2) + (Prof. Epic.^2)} \quad (1.7)$$

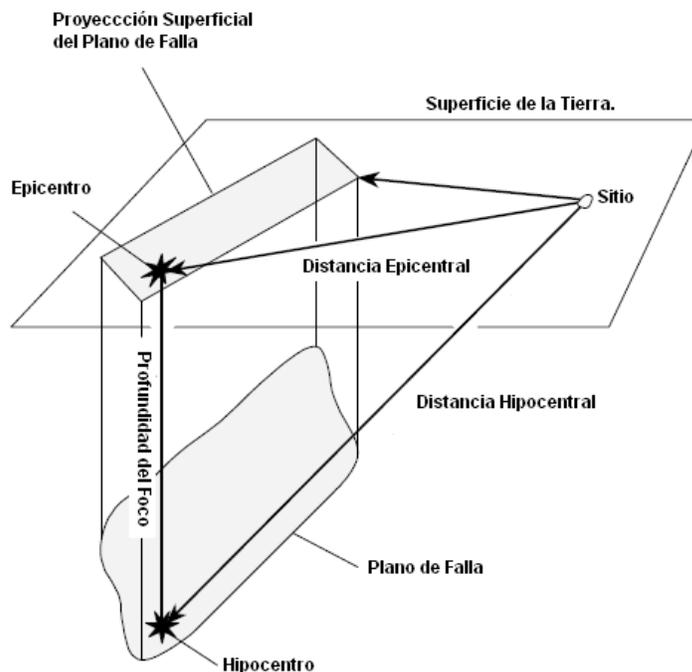


Fig 1. 6 Parámetros Sismológicos (Rauch, 1997)

- Aceleración máxima del suelo, ***PGA*** o ***a_{máx}***

Es la aceleración máxima producida en la superficie de la tierra cuando en el sitio existe ausencia de altas presiones de poro o licuación generados por terremotos. De forma más sencilla podemos decir que una partícula de tierra durante un terremoto se “acelera” hacia los lados. La forma ideal de obtener registros de PGA debe ser tomando estos al lado de lugares donde ocurren los deslizamientos laterales, aunque en la mayoría de los casos no

es posible contar con registros, así que se toman datos pico de los registros de zonas cercanas al mismo y se realiza una estimación, ajustándolo con la distancia al sitio de ruptura.

A lo largo de los años, los sismólogos han estado desarrollando numerosas estudios y relaciones matemáticas para poder estimar la **PGA**. Para los sismos ocurridos en América del Norte se utiliza una ecuación dada por Boore (1993), para sitios donde en los primeros 30 m se tienen velocidades de 180 y 360 m/s de onda de corte.

$$\log(PGA) = 0.229(M_w - 6) - 0.778 \log(\sqrt{R^2 + 5.57^2}) + 0.146 \quad (1.8)$$

Donde: R distancia al epicentro. Sus unidades son “%g”.

Haciendo uso de leyes de atenuación se puede estimar la aceleración del suelo de acuerdo al tipo de sismo, para sismos interplaca se puede usar la expresión desarrollada por Arroyo *et al.* (2010), definida a partir de datos de sismos históricos que van de 1985 a 2004 en una franja que comprende la zona costera entre los estados de Colima y Oaxaca.

$$SA(T) = \alpha_1(T) + \alpha_2(T)M_w + \alpha_3(T) \ln \left[\frac{E_1(\alpha_4(T)R) - E_1\left(\alpha_4(T)\sqrt{R^2 + r_0^2}\right)}{r_0^2} \right] \quad (1.9)$$

Donde $\alpha_1(T)$ es el coeficiente determinado mediante la un análisis de regresión, R es la distancia más cercana a la superficie de falla y $r_0^2 = 1.4447 \times 10^{-5} e^{2.3026M_w}$.

Para el caso de sismos de profundidad intermedia, se emplea un modelo de atenuación desarrollado por García *et al.* (2005). Desarrollado a partir de una base de datos de 16 sismos con $5.2 \leq M_w \leq 7.4$ y profundidades entre 35 y 138 km.

$$\log PGA = 1.76 + 0.3 M_w - 0.0031R - \log R \quad (1.10)$$

Donde PGA esta dado en cm/s^2 , R es la distancia media a la superficie de falla.

La ley de atenuación que se emplea para sismos transcúrreres y superficiales, tanto los que ocurren en el Eje Neovolcánico como los que se presentan en la parte noroeste del país, es la construida con datos registrados en California (Abrahamson y Silva, 1997).

- Duración de la fase intensa en el sitio D.

Se refiere al tiempo en segundos durante el cual el sitio está sometido a fuertes movimientos de tierra ocasionados por sismo. Se mide como el tiempo transcurrido entre la primera y última ocurrencia de una aceleración del suelo superior a 0.05 g. Para la estimación de este parámetro también es necesario tener registros de los lugares cercanos al sitio, cuando no se cuenta con ello, existen relaciones que permiten estimar este parámetro:

Para terremotos en la margen de la placa o plataforma con una profundidad de foco $\leq 19\text{km}$ se tiene que:

$$\log(D) = -2.06 + 0.43M_w + 0.6\log(01R_H) \quad (1.11)$$

Para terremotos en zona de subducción con una profundidad de foco $\geq 20 \text{ km}$

$$\log(D) = -2.36 + 0.43M_w + 0.3\log(01R_E) \quad (1.12)$$

Otra manera de estimar la duración para cada escenario sísmico considerando el tipo de sismo de subducción y profundidad intermedia, utilizar la expresión propuesta por Reinoso y Ordaz (2001) que depende de la magnitud, distancia y periodo predominante del sitio, T_s ; para suelo firme $T_s=0.5 \text{ s}$

$$D = 0.01e^M + (0.036M - 0.07)R + (4.8M_w - 16)(T_s - 0.5) \quad (1.13)$$

La duración correspondiente a la ecuación anterior corresponde al durante el intervalo de tiempo donde se desarrolla el 2.5 y 97.5% de la intensidad de Arias. Para los sismos de falla transcurrete se usa la expresión propuesta por Trifunac and Novikova (1995).

$$D = 1.28 + 0.014 \times 10^{0.4M} + 0.062R \quad (1.14)$$

1.4.2 Parámetros topográficos y geométricos

Estos representan las dimensiones, las características geométricas y topográficas del desplazamiento lateral.

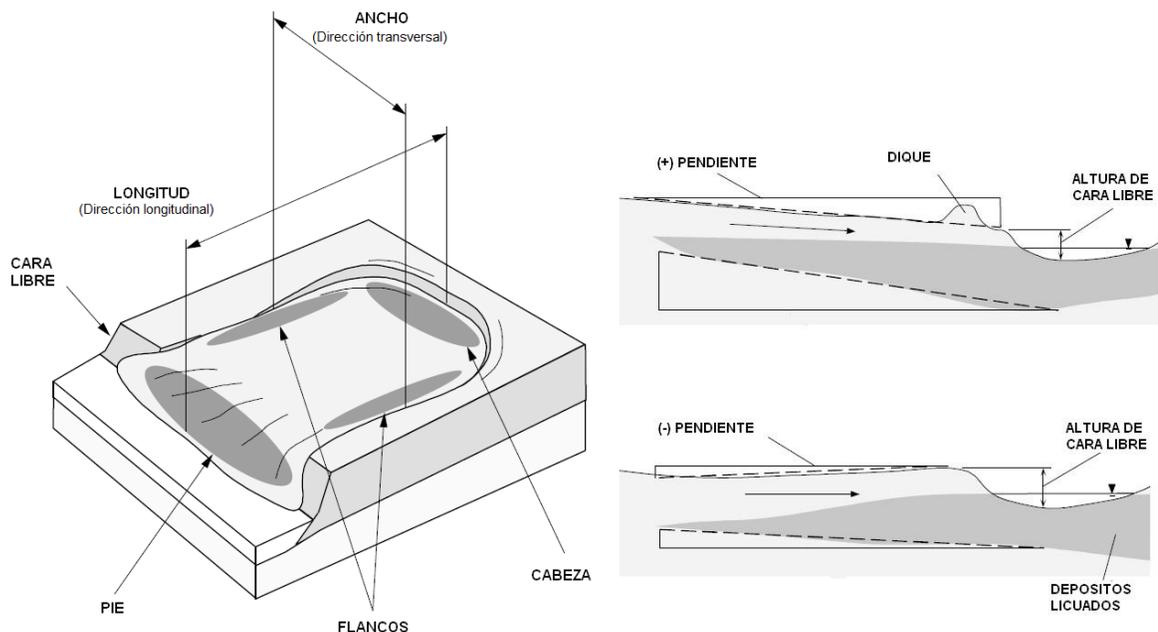


Fig 1. 7 Parámetros Topográficos y Geométricos (Rauch, A., 1997)

- Área del deslizamiento lateral

Es la superficie del desplazamiento lateral medido en planta, es decir el área que comprende toda la masa que se desplazó visto en planta y medido en metros cuadrados, ver Fig 1.7.

- Longitud máxima del desplazamiento. (L_{SLIDE})

Se considera como la distancia longitudinal medida en metros comprendida desde el principio del desplazamiento o cabeza hasta la parte final de la misma o pie, medido en la dirección del desplazamiento. Cuando el desplazamiento ocurre en las márgenes de ríos se toma como distancia la longitud entre la cabeza y el centro del cauce, ver Fig 1.7.

- Dirección del deslizamiento.

Se mide como el ángulo de un plano horizontal ubicado entre la dirección predominante del movimiento y la pendiente máxima del deslizamiento, la línea de la pendiente máxima se dibuja perpendicular a una cara libre o las curvas de nivel topográficas, medido en grados.

- Altura de cara libre. (H_{Face})

La altura de cara libre se define como la longitud vertical del pie a la cresta del desplazamiento, si la cara libre forma parte de la margen de un río se mide desde la punta sumergida hasta la cresta. (Fig 1.7)

- Pendiente promedio. (S_{Top})

Esta consiste en el cambio de elevación que existe a lo largo de la distancia horizontal comprendida entre la cabeza y el pie del desplazamiento lateral. Cuando existen valores negativos de la pendiente estos hacen referencia a que la superficie se inclina lejos o al lado opuesto del movimiento del desplazamiento, este tipo de pendientes negativas son comunes en las márgenes de los ríos. (Fig 1.7)

1.4.3 Parámetros geotécnicos

Representan las condiciones en las que se encuentran los depósitos de suelos licuados localizados debajo de desplazamientos laterales, los parámetros se calculan utilizando los registros de pruebas de penetración aplicadas como son la Prueba de Penetración Estándar (SPT).

Como se menciona al inicio del capítulo estos parámetros son calculados mediante registros obtenidos por pruebas de penetración mecánicas realizadas en los suelos, la prueba de penetración estándar SPT es una de las más usadas para la caracterización de arenas.

- Prueba de penetración estándar SPT

La prueba de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés) ayuda a estimar la resistencia al esfuerzo cortante del suelo y obtener muestras inalteradas para identificar los suelos del sitio. Permite conocer las condiciones estratigráficas del sitio, aprovechando las muestras para determinar las propiedades índice mediante correlaciones empíricas con el número de golpes.

En términos generales, consiste en hincar el penetrómetro de acero de 45 cm, mediante impactos con un martinete de 64 kg, dejándolo caer libremente de una altura de 75 cm (ver Fig 1.8). Se cuenta el número de golpes que corresponden a cada uno de los avances de 15 cm. La resistencia a la penetración estándar será el número de golpes N , requeridos para penetrar los últimos 30 cm. Esta prueba es útil en suelos granulares, los resultados más comunes obtenidos de esta prueba son: perfil estratigráfico, resistencia a la penetración y resistencia al cortante. (Legorreta, H., 2001)

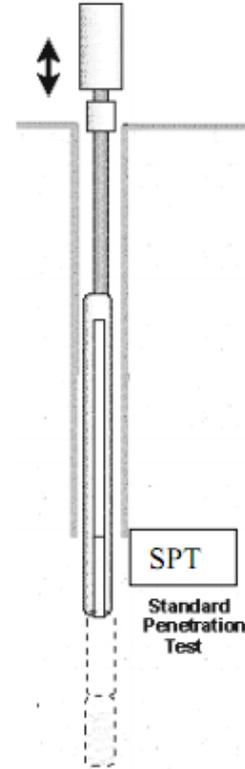


Fig 1. 8 Martillo para prueba SPT

- Promedio del valor $(N_1)_{60}$

El $(N_1)_{60}$ representa el número de golpes normalizado al esfuerzo vertical de 100kPa y a la energía del martillo con eficiencia de 60%. Durante años, una gran cantidad de ingenieros geotécnicos se han dado a la tarea de buscar formas de normalizar y corregir el valor del número N . En 1986, Skempton propuso un criterio para normalizar el valor N , el cual denominó N_{60} , este valor se determina como:

$$N_{60} = \frac{E_m C_B C_S C_R N}{0.60} \quad (1.15)$$

Donde E_m es la eficiencia del martillo, C_B corrección del diámetro de la perforación, C_S corrección de la longitud de la columna de las barras, C_R corrección de barril de la muestra y N el número de golpes registrados en el campo. (Santoyo E., 2010)

Las investigaciones mostraron otros factores que influyen en los resultados de la SPT como el contenido de finos y las características de los granos para la evaluación de este parámetro, es por eso que la ecuación de Skempton se modifica de la siguiente manera:

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_S C_R \quad (1.16)$$

Donde C_E factor de reducción de energía de martillo (E_m), que cae sobre el muestreador de la SPT. El usual E_m es de 60%, resultando ($C_E = E_m / 60$), C_B corrección del diámetro de la perforación, C_S factor de corrección para los muestreadores con y sin ademe, C_R es el factor de corrección por la longitud de la barra, N_m el número de golpes registrados en

el campo y C_N [Seed, Idriss (1982)] factor de normalización del esfuerzo efectivo vertical de referencia de 100 kPa.

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \quad (1.17)$$

Donde C_N [Seed, Idriss (1982)] factor de normalización N_m a un esfuerzo cortante efectivo σ'_{vo} de aproximadamente 100 kPa (1 atm) Pa. $C_N < 1.7$ (MAX = 2.0, National Center for Earthquake Engineering Research, NCEER, Youd e Idriss, 1997, pero se reduce a 1.7)

$$C_N = \frac{2.2}{\left(1.2 + \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right) \right)}, \text{ modificado en 1997} \quad (1.18)$$

Tabla 1. 2 Factores de corrección propuestos por Skempton 1986 (Youd e Idriss, 2001)

Factor	Equipo	Coficiente	Corrección
Presión vertical normal efectiva	-- --	C_N	$(P_a/\sigma'_{vo})^{0.5}$ CN < 1.7
Energía del martillo	Martillo original Martillo de seguridad Martillo automático	E_m	0.5-1.0 0.7-1.2 0.8-1.5
Diámetro de perforación	65– 115 mm 150 mm 200 mm	C_B	1.00 1.05 1.15
Longitud de las barras	3– 4 m 4– 6 m 6– 10 m 10– 30 m > 30 m	C_R	0.75 0.85 0.95 1.00 <1.0
Tipo de muestreador	Tubo estándar Tubo con camisa	C_S	1.00 1.1-1.3

- Nivel aguas freáticas (NAF)

Como su nombre lo indica, es el nivel al cual se encuentra localizada la superficie de las aguas freáticas, éste se mide de manera vertical desde la superficie en metros.

- Profundidad a la capa superior de licuación (Z_{liq})

Es la distancia de la superficie del sitio hasta la capa superior del suelo licuado, es decir, es equivalente al grosor de la capa de suelo que deslizó encima de la zona licuada. En la mayor parte de los casos de desplazamiento lateral, la capa superior de la zona licuada coincide con el nivel freático. Este parámetro se determina en metros. (Fig. 1.9)

- Profundidad a la parte inferior el depósito licuado (Z_{Bliq})

Es la distancia vertical de la superficie del suelo a la parte baja o inicial del depósito licuado, es decir, la profundidad máxima del suelo licuado, medida en metros. (Fig. 1.9)

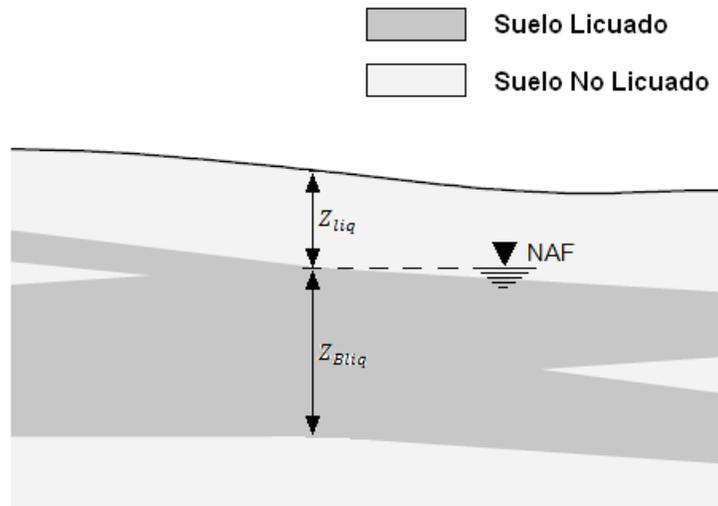


Fig 1. 9 Espesores de estratos licuados y no licuados. (Rauch, 1997)

- Espesor del depósito licuado

Existen diferentes maneras de definir el espesor del suelo licuado, una de ellas es considerando el espesor bruto de la capa licuada o como la diferencia que existe entre la profundidad de la parte inferior del depósito licuado y la profundidad de la parte superior del mismo.

$$\text{Espesor Lic.} = Z_{Bliq} - Z_{liq} [m] \quad (1.19)$$

- Factor mínimo de seguridad contra licuación. (FS_{\min})

Representa la menor resistencia al corte en suelos susceptibles de licuación, se determina por medio de una prueba de penetración estándar SPT y es el factor mínimo de seguridad.

El modelo EPOLLS usa este parámetro a través de la profundidad al factor mínimo de seguridad contra licuación $Z_{FS_{\min}}$, que se define como la profundidad en la cual se determinó el FS_{\min} , este parámetro se mide en metros.

- Tamaño promedio de grano. (D_{50})

Es el diámetro promedio de grano tal que el 50% del peso de la muestra de suelo, sea de igual o menor diámetro. De forma sencilla, es el tamaño de apertura de la malla a través de la cual pasa el 50% de los granos de la muestra de suelo. Es un indicativo de la rugosidad de los granos en el depósito de suelo licuado.

- Coeficiente de uniformidad. (C_u)

Es una medida simple de la uniformidad del suelo, propuesto por Allen Hazen, que realmente mide la *no uniformidad*, ya que su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta. La uniformidad nos dice como es la distribución de tamaños de grano en un suelo, es decir, que si un suelo es uniforme este tiene una distribución de tamaños bastante mala, los tamaños de grano son muy similares.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1.20)$$

Donde D_{60} es el tamaño tal, que el 60% del peso de la muestra sea de igual o menor tamaño, y D_{10} llamado por Hazen diámetro efectivo; es el diámetro tal que él 10% del peso de la muestra sea de igual o menor diámetro. (Juárez, B., 2009)

- Contenido de finos.

El contenido de finos es el porcentaje en peso de la muestra de suelo que pasa por la malla No. 200 (0.075mm). Este parámetro da la posibilidad de indicar de manera relativa la resistencia y rigidez del estrato, así como la facilidad con la que la presión de poro podrá disiparse.

- Contenido de arcillas.

El contenido de arcilla se define como el porcentaje en peso de la muestra de que pasa por la malla de 0.05 mm.

1.5 Parámetros que definen los movimientos verticales inducidos por licuación.

En los depósitos de arenas sujetos a movimientos sísmicos existe la tendencia a asentarse y densificarse, más aun si el depósito está saturado y no tiene posibilidad de drenaje, es decir, que se encuentra confinado. El movimiento sísmico provocará que la presión de poro en el depósito aumente, después la presión de poro tenderá a disiparse lo que provocara asentamientos.

Se ha observado que los depósitos de arena tienen ciertas características que los hacen susceptibles a este tipo de fenómenos. Estas características o parámetros para estimar la posibilidad de que ocurran los asentamientos pueden dividirse en dos categorías:

1.5.1 Parámetros sismológicos.

Los parámetros sismológicos utilizados para definir los desplazamientos verticales se definen de igual manera que para los desplazamientos laterales.

- Magnitud del sismo M_w .
- Aceleración máxima del suelo PGA.

1.5.2 Parámetros geotécnicos.

Para cualquier estudio que haga referencia a los suelos es necesario conocer las características de éste, ya que proporcionan información que ayuda a determinar las propiedades mecánicas del mismo, como se mencionó en el capítulo anterior, muchas de las características del suelo pueden ser medidas a través de los registros proporcionados por pruebas de penetración en suelos, como la SPT descrita en el capítulo anterior y la prueba de penetración con cono CPT.

- Prueba de penetración con cono, CPT

La prueba CPT ha demostrado ser una excelente herramienta para determinar de manera satisfactoria las características estratigráficas de un sitio con respecto a la profundidad, esto particularmente para arenas poco densas y suelos blandos (Santoyo E., 2010). Esta prueba consiste en hincar en el suelo un cono con un diámetro de 1.4 in. (35.6 mm) de donde se obtiene la resistencia a la penetración de la punta y la fricción del cono q_c en kg/cm^2 (ver Fig 1.10).

Las principales ventajas de este procedimiento es que proporciona datos mucho más rápidamente que la SPT, además proporciona un registro continuo de la resistencia a la penetración, y es menos vulnerable a los errores del operador. Su principal desventaja es no proporcionar una relación entre los datos obtenidos en la prueba y las características de los suelos licuados, haciendo que no se pueda estimar la posibilidad de licuación en un sitio.

Existe una relación que aproxima los valores de la prueba CPT con el valor N:

$$q_c = 4 \text{ a } 5 N \text{ para arenas limpias} \quad (1.21)$$

$$q_c = 3.5 \text{ a } 4.5 N \text{ para arenas limmosas} \quad (1.22)$$

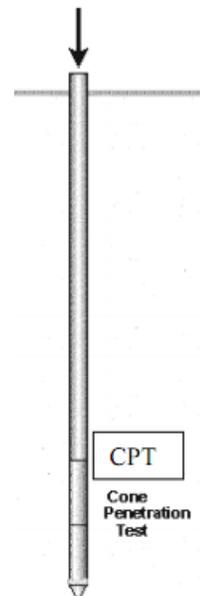


Fig 1. 10
Martillo para
prueba CPT

- Promedio del valor (N1)60
- Nivel de aguas freáticas (NAF)
- Densidad relativa o Compacidad relativa o Densidad relativa (C_r ó D_r)

Terzaghi introdujo una relación empírica para medir la compacidad de un suelo de estructura simple (Juárez, B., 2009), es decir, la densidad relativa, ésta mide el grado de acomodo de las partículas del suelo (Fig 1.11). Esta propiedad índice se aplica principalmente a los suelos gruesos. Es una relación de importancia para la ingeniería ya que es empleada en fórmulas para la estimación de posibles asentamientos de edificaciones cimentadas sobre suelos granulares.

$$C_r(\%) = D_r(\%) = \frac{e_{m\acute{a}x} - e_{nat}}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \quad (1.23)$$

Donde: $e_{m\acute{a}x}$; relación de vacíos correspondiente al estado más suelto del suelo, $e_{m\acute{i}n}$; relación de vacíos correspondiente al estado más compacto del mismo, e_{nat} ; relación de vacíos de la muestra en estado natural.

La complejidad en la estimación de dicho índice radica en la obtención de e_{nat} , ya que en ocasiones el manto en estudio no es fácilmente accesible o imposible si es que éste está demasiado profundo o bajo el nivel freático, en tales casos, se debe obtener la información de una prueba SPT.

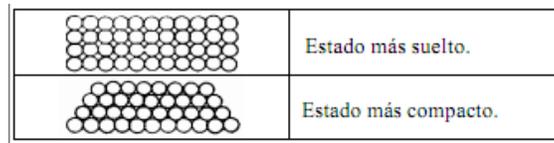


Fig 1. 11 Compacidad Relativa

Con el valor N obtenido de la SPT y con el valor q_c obtenido de la CPT se puede obtener el valor de la densidad relativa. De acuerdo a las prácticas en Japón se encontró una relación para estos parámetros proporcionada por Meyerhof (1957):

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N_j}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (1.24)$$

Donde σ'_v es la presión de sobrecarga efectiva en $\frac{kg_f}{cm^2}$, N_j es el valor N medido según los estándares japoneses. De la expresión anterior, se expresa como N_j el valor de N_1 correspondiente a la sobrecarga de presión de $1 \frac{kg_f}{cm^2}$, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N_1}{1.7}} = 16 \sqrt{N_1} \quad (1.25)$$

Donde N_1 se obtiene según Tokimatsu y Yoshimine (1983) de la siguiente forma:

$$N_1 = C_N N = \frac{1.7}{\sigma'_{v0} + 0.7} N \quad (1.26)$$

De forma similar, Tatsuoka *et al.* (1999) desarrollaron una relación entre el valor de la densidad relativa y el q_c obtenido por la CPT.

$$D_r = -85 + 76 \log \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{v0}}} \right) = -85 + 76 \log q_{c1} \quad (1.27)$$

Dónde, como se puede observar:

$$q_{c1} = \frac{1}{\sqrt{\sigma'_{v0}}} q_c = C_N \cdot q_c \quad (1.28)$$

- Relación de esfuerzos Cíclicos (CSR)

La relación de esfuerzo cíclico (CSR) se define como:

$$CSR = \left(\frac{\tau_{SV}}{\sigma'_{v0}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{m\acute{a}x}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) r_d \quad (1.29)$$

Donde: $a_{m\acute{a}x}$ es la aceleración máxima del suelo en el sitio, g es la aceleración de gravedad, σ_{v0} es el esfuerzo vertical total referido a la superficie del suelo, σ'_{v0} es el esfuerzo vertical efectivo referido a la superficie del suelo. y r_d es un factor de reducción de esfuerzos, que se puede obtener utilizando la grafica de la Fig 1.12 (Kramer, S.,2000). El método más usado en la ingeniería para la estimación de esfuerzos cíclicos es el método simplifico.

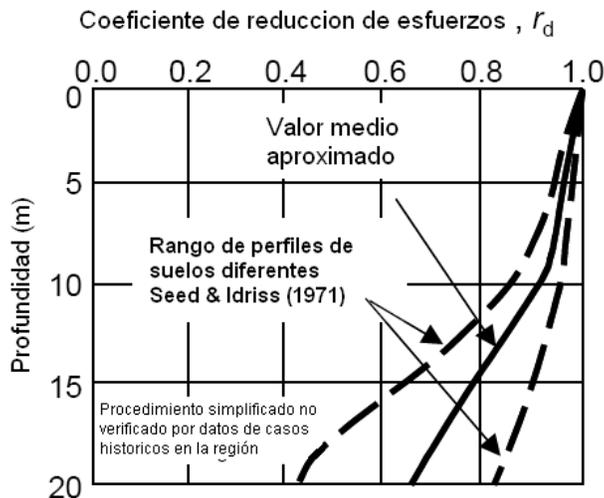


Fig 1. 12 Variación del factor de reducción de la profundidad, r_d , para el método simplificado de tensión cíclica. (Kramer, S., *et al.*, 2000)

- Deformación volumétrica (ξ_v)

Los suelos, así como los diversos materiales que existen en el planeta se deforman cuando se les sujeta a una modificación de su estado de esfuerzos natural, salvo que para la mayoría de los materiales, las condiciones de esfuerzo-deformación son fácilmente comprensibles a partir de pruebas de laboratorio.

Los suelos actúan de manera diferente a la mayoría de los materiales, ya que:

- Para grandes deformaciones son necesarias pequeñas cargas.
- La deformación pueden ocurrir a largo plazo.
- Tienen deformaciones tanto en la forma como en el volumen.

Así que existen dos tipos de deformaciones, la deformación desviadora y la deformación volumétrica, esta última también es conocida como compresión o expansión, Fig 1.13, ésta se debe a cambios de volumen, es decir, que su volumen varía cuando se expone a una carga pero su forma no, es decir, “la distancia entre las partículas cambia pero mantiene su posición relativa” (Juárez, B., 2009).

El porqué de los cambios en el volumen de suelo se debe principalmente: a cambios en el volumen de las partículas o un cambio en el volumen de vacíos, un cambio en el volumen de agua o aire contenido en el suelo. El problema principal radica en las arenas finas saturadas, ya que más que sufrir asentamientos, éstas son propensas al fenómeno de licuación, cuando se encuentra en zonas con condiciones de sismicidad o en zonas propensas a inundación.

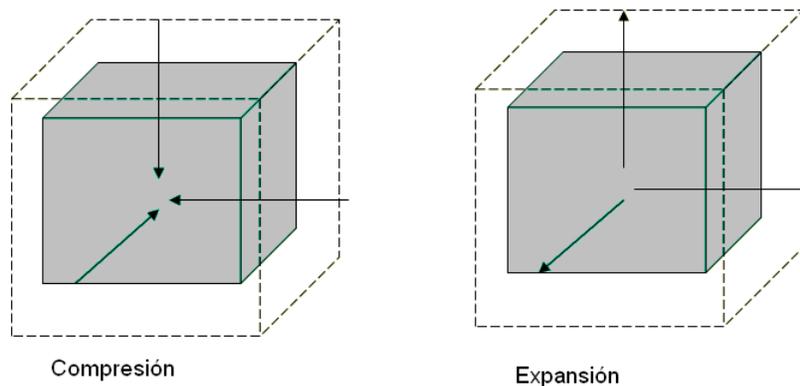


Fig 1. 13 Esquema deformación volumétrica

- Factor de seguridad contra licuación (F_l)

Ishihara (1985, 1993), Seed y Harder (1990) definen el factor de seguridad contra licuación como:

$$F_l = \frac{CRR \text{ cuando la presión de poro es } 1}{CSR \text{ inducido por el sismo}} = \frac{CSR_l}{CSR_e} \quad (1.30)$$

donde; CSR_l es la relación de esfuerzo cíclico cuando la presión de poro es 1 y CSR_e es la relación de esfuerzo cíclico inducida por el propio sismo. Este factor es calculable para cualquier punto en el estrato, dividiendo la resistencia en el suelo entre el promedio cíclico inducido por el sismo. De forma simplificada(Suarez , 2009):

$$F_l \leq 1.0 \text{ habra licuación y } F_l > 1.0 \text{ no hay licuación} \quad (1.31)$$

Cuando $(N_1)_{60}$ en arenas limpias es mayor a 30, así como para suelos no saturados o con alta plasticidad, se consideran como suelos **no licuables**.

Capítulo 2

Recopilación de información de casos de licuación en México

México es un país con gran actividad telúrica, según datos estadísticos, se registran más de 90 sismos por año con magnitud superior a cuatro grados en la escala de Richter (OPS, 1985). En el siguiente Mapa (Fig 2.1) se muestran epicentros de sismos registrados en la República Mexicana.

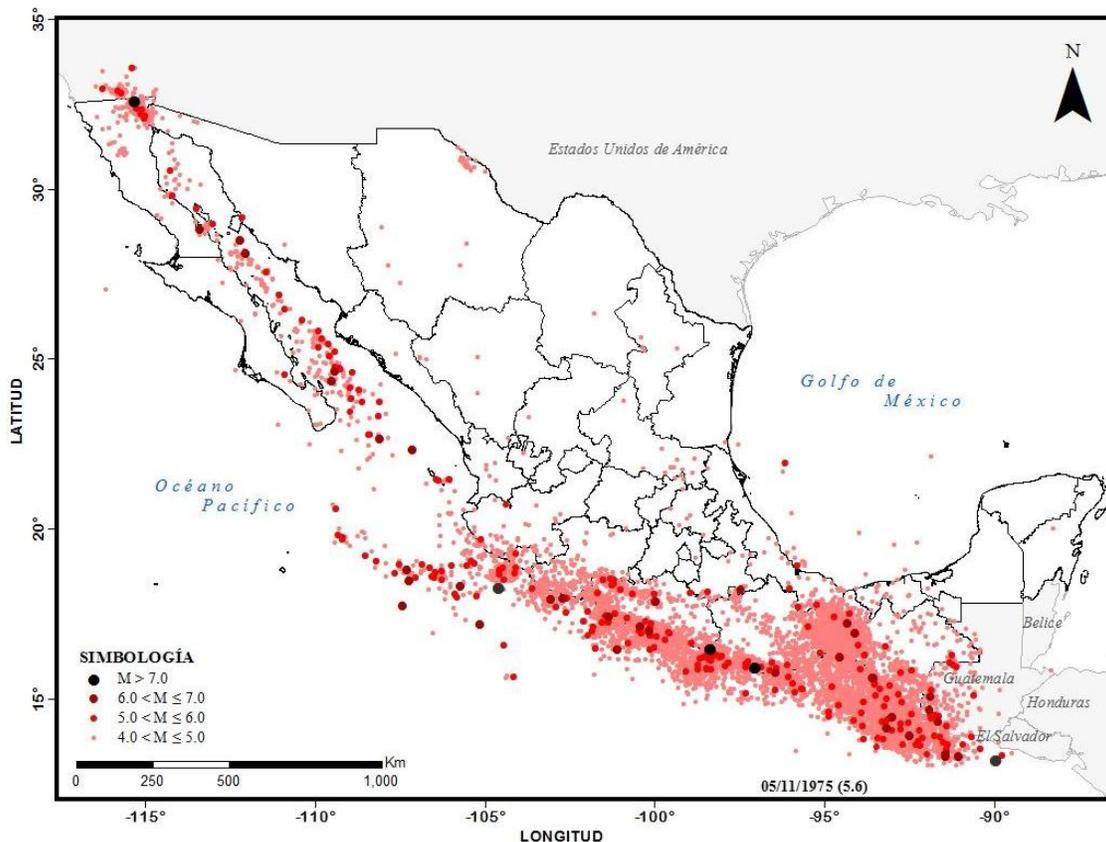


Fig 2. 1 Sismos registrados en la República Mexicana de 2000-Mayo 2012. (Información del SSN)

Los registros de sismos de gran magnitud en el país provienen principalmente de las costas del Pacífico, a lo largo de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas, del centro y sur de Veracruz y Puebla, norte y centro de Oaxaca y Chiapas,

Estado de México y la península de Baja California, debido a su ubicación con respecto a las placas tectónicas (ver Fig 2.2) así como a las condiciones geotécnicas y geológicas de estas zonas, las hacen propensas al fenómeno de licuación.

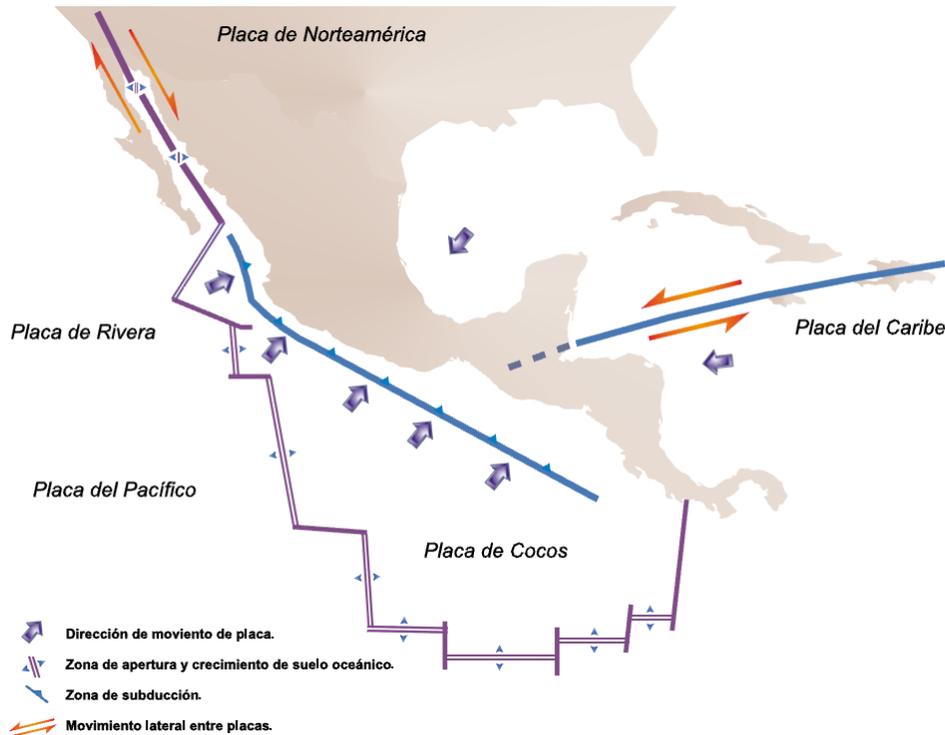


Fig 2. 2 Configuración de las placas tectónicas, las flechas indican el movimiento relativo de las principales placas (CENAPRED, 2001)

En la República existen zonas con características geológicas que las hacen susceptibles a desarrollar el fenómeno de licuación, las zonas más propensas a presentar el fenómeno de licuación son aquellas con formaciones de suelos jóvenes (menos de 500 años) y las pertenecientes al Holoceno. El mapa de la Fig 2.3, mapa se generó a partir de información geológica de la República obtenida en el INEGI y tomando como base el estudio de Youd y Perkins (1978), descrito en el Capítulo 1.

Con esta información se hace notorio que existen en la República zonas con las características geológicas necesarias para generar el fenómeno de licuación durante un evento sísmico, y que estas mismas características en eventos sísmicos anteriores provocaron la ocurrencia de licuación.

En México este fenómeno ha causado daños muy severos en obras de ingeniería, infraestructura y vivienda, dentro del historial sísmológico del país se han observado registros de falla consistentes con fallas provocadas por licuación, Fig 2.4, el fenómeno de licuación de suelos tiene un potencial destructivo muy alto, ya que es una de las principales causas de destrucción de estructuras e instalaciones. Los casos ocurridos en la República Mexicana se enlistan en la Tabla 2.1 y describen a lo largo de este capítulo.

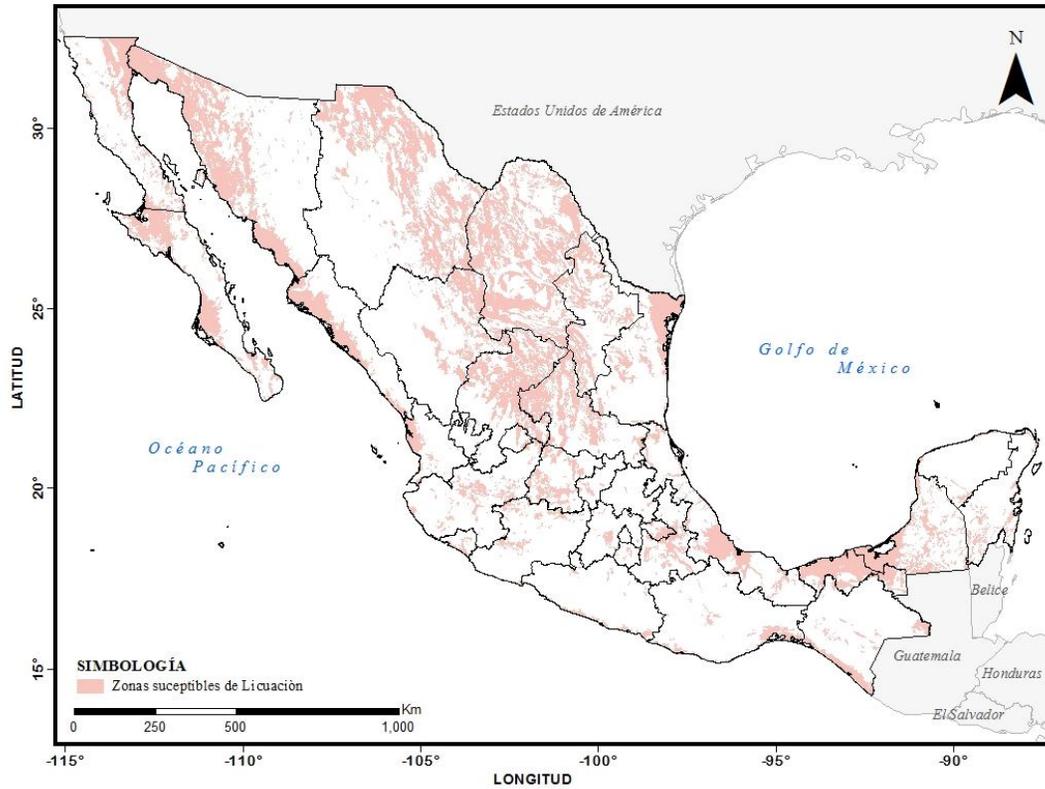


Fig 2. 3 Mapa de zonas correspondientes a la época del Holoceno obtenido a partir de información de INEGI en SIG

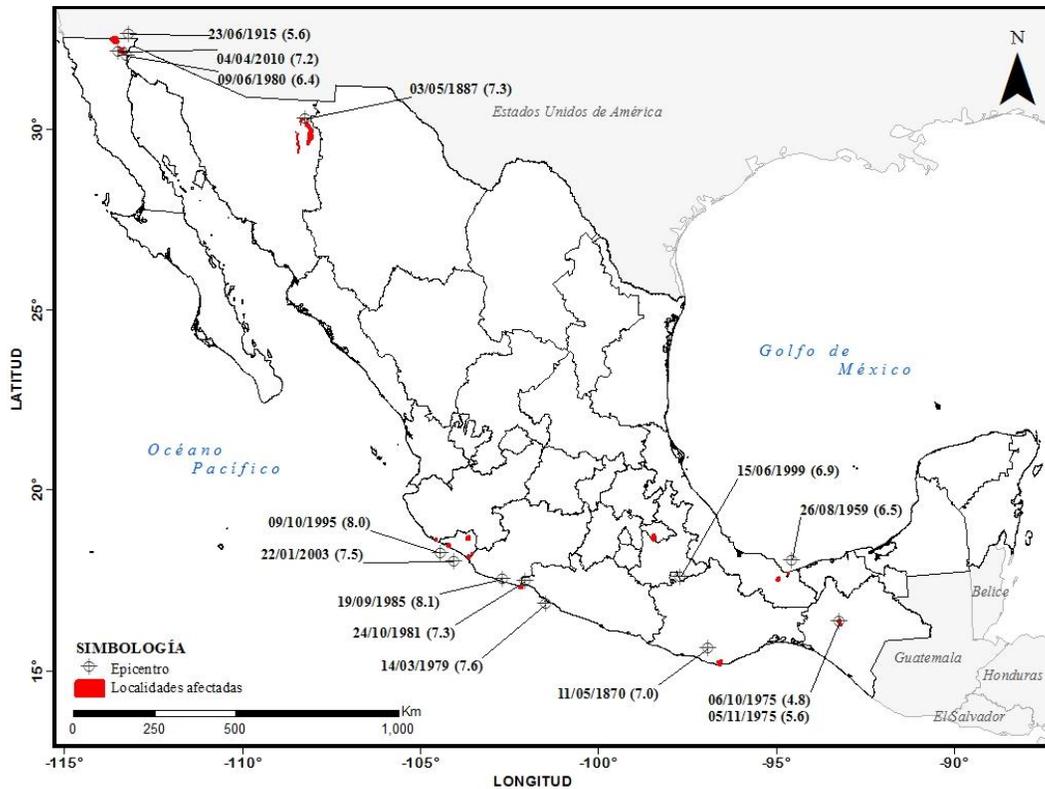


Fig 2. 4 Localización de Eventos de Licuación Registrados

Capítulo 2 Recopilación de información de casos de licuación

Tabla 2. 1 Eventos sísmicos y municipios donde se ha presentado el fenómeno de licuación

ID	Fecha	M	Lat.	Long.	H Km	Dist (km)	A _{max} (g)	Municipios y estados del país afectado por licuación
1	11/05/1870	7.0	16.13°	96.8°				San Pedro Pochutla y Santa Maria Tonameca, Oax.
2	03/05/1887	7.3	30.81	109.1	18	25	-	Bavispe, Bacerac y Oputo, Sonora
3	23/06/1915	5.6	32.8	115	-	>40	-	Mexicali, Baja California
4	26/08/1959	6.5	18.45	94.27°	21	35	0.2	Jaltipán, Veracruz
5	05/10/1975	4.8	16.7°	93°00'	5	<10	0.3	Chiapa de Corzo, Chiapas
5	06/10/1975	5.6	16.7°	93°00'	5	<10	0.3	Chiapa de Corzo, Chiapas
6	14/03/1979	7.6	17.46°	101.46°	20	<60	0.3	Lázaro Cárdenas, Michoacán
7	08/06/1980	6.4	32.22°	114.99°	12	<10	0.4	Mexicali, Baja California.
8	24/10/1981	5.6	32.79	-115	21	>20		Lázaro Cárdenas, Michoacán
9	19/09/1985	8.1	18.14°	102.71°	17	<60	0.4	Lázaro Cárdenas, Michoacán
10	09/10/1995	8.0	18.85°	104.53°	27	<60	0.3	Jaluco, Jalisco y Manzanillo, Colima
11	15/06/1999	6.9	18.13°	97.54°	61	140	0.28	Tlaxcala y Puebla
12	22/01/2003	7.5	18.62°	104.12°	10		0.3	Manzanillo y Villa de Álvarez, Colima
13	04/04/2010	7.2	32.29°	115.28°	10	<26	>0.4	Mexicali, Baja California.

¹ Figueroa, 1975

² Dubois y Sbar, 1981 y

Aguilera, 1888

³ Santoyo y Montañez, 1976

⁴ Marsal, 1961

⁵ Dawson *et al.*, 1977

⁶ Jaime *et al.*, 1979

⁷ Anderson y Simons, 1982

⁸ Rocha, 1982

⁹ IG-II UNAM, 1985

¹⁰ Juárez *et al.*, 1995

¹¹ Pestana *et al.*, 1999

¹² Alcocer *et al.*, 2003

¹³ EERI, 2010

2.1. Costa de Oaxaca (1870)

2.1.1. Geología

La naturaleza geológica del estado de Oaxaca es compleja ya que se encuentra conformada por diversos tipos de roca: metamórficas, sedimentarias marinas y continentales, ígneas intrusivas y volcánicas. En los municipios de San Pedro Pochutla y Santa María Tonameca las formaciones geológicas que predominan son del Jurásico (95.42% y 82.23%, respectivamente), Cretácico (3.00%) y Cuaternario (1.58% y 11.95%, respectivamente) (INEGI, 2009). Los depósitos del cuaternario están formados principalmente por formaciones aluviales y litorales, dunas, gravas, arenas y arcillas depositadas por el ambiente deltaico; a su vez, los depósitos litorales están caracterizados por arenas de origen marino.

2.1.2. Descripción del evento

El 11 de mayo de 1870, se registró un sismo en Oaxaca a las 11:30 pm de magnitud 7.0 en la escala de Richter, con epicentro en 16°08'N 96°48'W, Fig 2.5. El sismo es descrito como un macrosismo con intensidad IX (en la escala de Mercalli), que afectó diversas localidades del estado de Oaxaca, entre ellas, las localidades de Puerto Ángel, Zapotengo y Pochutla municipio de San Pedro Pochutlá y en Santa María Tonameca, donde se manifestaron fenómenos que evidenciaron la licuación del terreno.

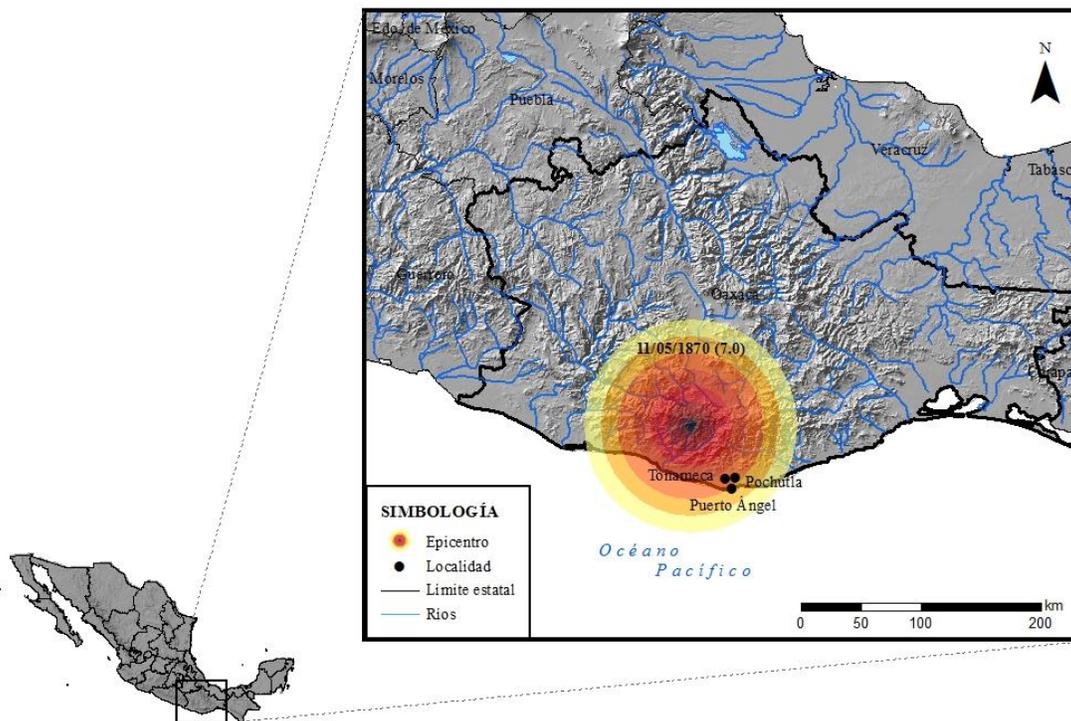


Fig 2. 5 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Oaxaca, 1870

*Nota: La representación gráfica del epicentro usada en los mapas, muestra únicamente la localización del mismo, la imagen usada en la simbología tiene como único fin resaltar de manera didáctica su importancia y localización, de ninguna forma representa la zona de influencia o magnitud del sismo.

2.1.3. Evidencias de licuación

“En el distrito de Pochutla, además de las pérdidas de los templos y casas de la mayoría de las poblaciones, se observaron los fenómenos siguientes: ... hendiduras de terreno, con grietas de 7 a 8 pulgadas de ancho y gran profundidad una de ellas en Puerto Ángel, arrojó columnas de aire caliente,..., en las grietas que se abrieron en Tonameca brotó agua hirviendo, en los arroyos secos corrió gran cantidad de agua fresca y turbia un tanto, en Puerto Ángel en el momento del temblor se vió hervir a borbotones el agua y la arena de mar...” (Figueroa J., 1975)

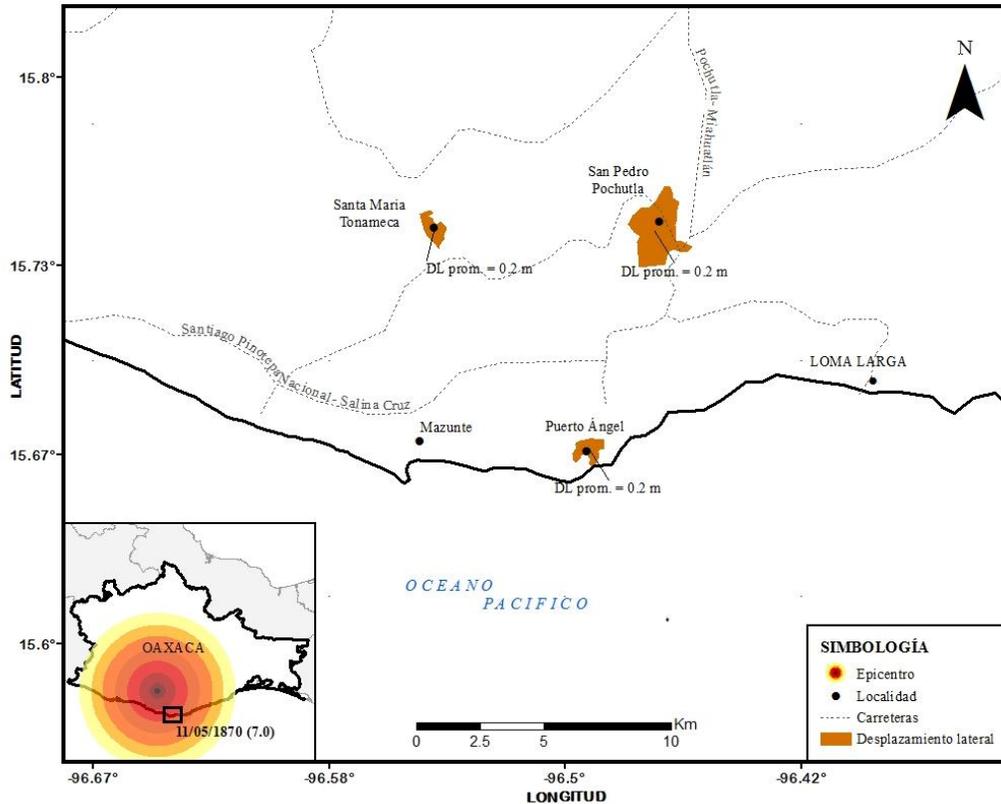


Fig 2. 5 Mapa de desplazamientos laterales registrados durante el evento del 11/05/1870

En la Fig 2.6 se muestran las localidades afectadas por el fenómeno de licuación, tomando el ancho de grieta que se generaron por la licuación como desplazamientos laterales del terreno.

2.2. Bavispe, Sonora (1887)

2.2.1. Geología.

INEGI describe la geología del municipio de Bavispe de la siguiente manera: Formaciones geológicas: Terciario (54.01%), Neógeno (25.36%), Cuaternario (14.91%), Pérmico (2.33%), Paleógeno (2.29%), Cretácico (1.10%) y suelos de tipo aluvial (4.90%). (INEGI, 2009)

Aguilera (1888) describe las formaciones geológicas encontradas: el valle que comprende el norte de Granados y Oputo, ver Fig 2.7, esta formado por capas de aluvión y arcillas del cuaternario reciente, las inferiores a estas son conglomerados de guijarros y cantos rodados que disminuyen su tamaño a medida que se acercan a la superficie, que van de capas de gravas pequeñas a arenas sueltas, sobre las cuales se encuentran lentes de arenas y margas arcillosas.

El valle de Huachinera y Bacerac esta conformado también por conglomerados y una formación denominada por Aguilera como “del diluvio” formada por acarreo y arcillas producto del cauce del río en época de lluvias. El valle de Bavispe está formado por inmensas cantidades de guijarros, arena y grava. El fondo del valle está formado por capas de arcillas compactas. En zona donde el río cambia de dirección existen capas de espesor variable de tobas y conglomerados que alternan con capas de areniscas de grano grueso y sobre éstas capas, de arcillas y acarreo del valle.

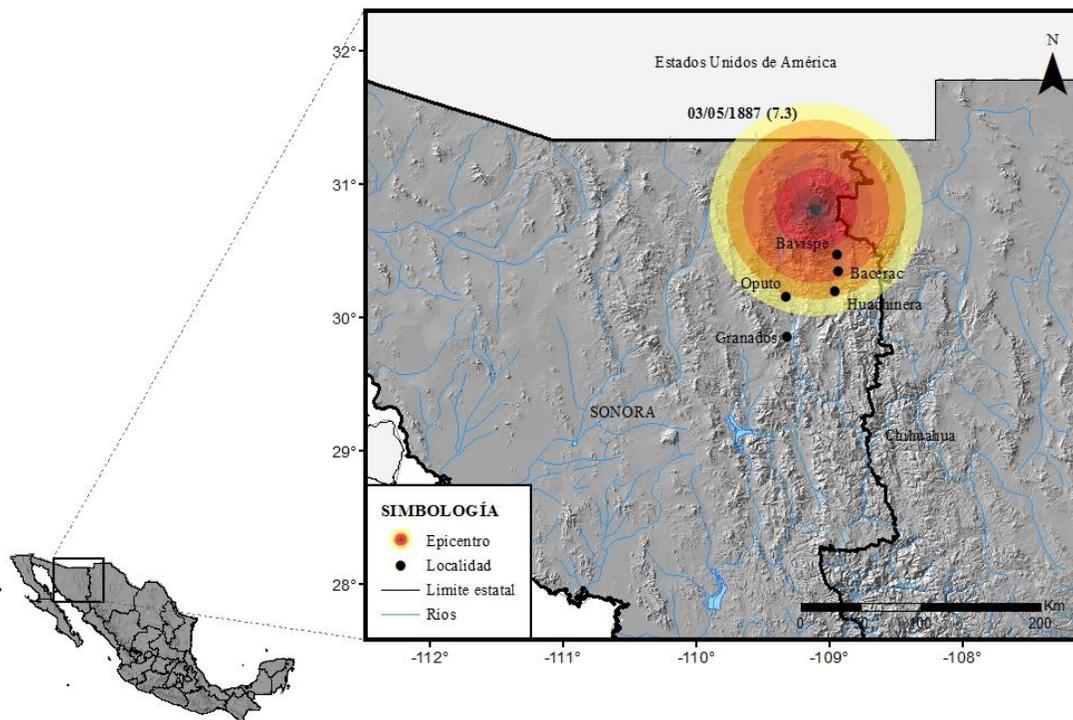


Fig. 2. 7 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Sonora, 1887

2.2.2. Descripción del evento

El 3 de mayo de 1887 a 25 km de la localidad de Bavispe se generó un fuerte sismo con una magnitud de 7.3, de acuerdo a Dubois y Sbar (1981) $7\frac{1}{4}$ grados de magnitud, su epicentro se localizó en 30.8067°N 109.0986°W , Fig 2.7. En los reportes de Aguilera (1888) y Dubois y Sbar (1981) se describe como un evento sísmico devastador que provocó en un corto periodo la destrucción de Bavispe y la muerte de 49 personas.

2.2.3. Evidencias de licuación

En el norte de Granados se formaron varias grietas, dos de ellas de gran magnitud; una de 180 m de longitud, con un ancho de 0.02-1.0 m y una profundidad de 2.25 m; la segunda de 70 m de longitud y un ancho de no más de 50 cm y con una profundidad menos a los 2.25 m. Entre la Loma del Burro y el Río Bavispe se formaron grietas con más de 100 m de longitud y anchos de hasta 5 m y profundidades de 3 m.

Al este de Bavispe se formaron numerosas grietas y tres grandes cuarteaduras localizadas en lo que se conocía como la Hacienda de la Galera, repartidas en fajas de 15 m de ancho con un hundimiento de 60 cm. Las grietas fueron localizadas sobre el valle de aluvión y arcillas del diluvio. Según los reportes de habitantes de las localidades afectadas, todas las grietas vomitaban agua, acompañada de un sarro fino de color amarillento (arena sumamente fina idéntica a la del río más cercano Aguilera, 1988).

En el Valle de Huachinera, Bacerac y Bavispe se observaron grietas grandes y profundas una de ellas de 270 m de largo y 4 m de ancho con profundidad de 3m. Se formaron grietas consideradas de mayor importancia cerca del río a menos de un kilómetro de distancia, con hundimientos en aumento a medida que se acercaba al río, formando una especie de gradería, no se reporta magnitud del deslizamiento lateral y vertical. Los habitantes reportaron también la creciente inesperada y repentina de afluentes así como la aparición y desaparición de otros, en una temporada en que el agua escasea en esta zona, que provocaron pequeñas inundaciones.

Se reportó licuación generalizada, ruptura del suelo y hundimiento de canales en la región epicentral (San Bernardino, Fronteras, Bavispe, y otros valles de Sonora)... Dubois y Sbar, 1981. En el mapa siguiente, Fig 2.8, se representan estas evidencias de licuación.

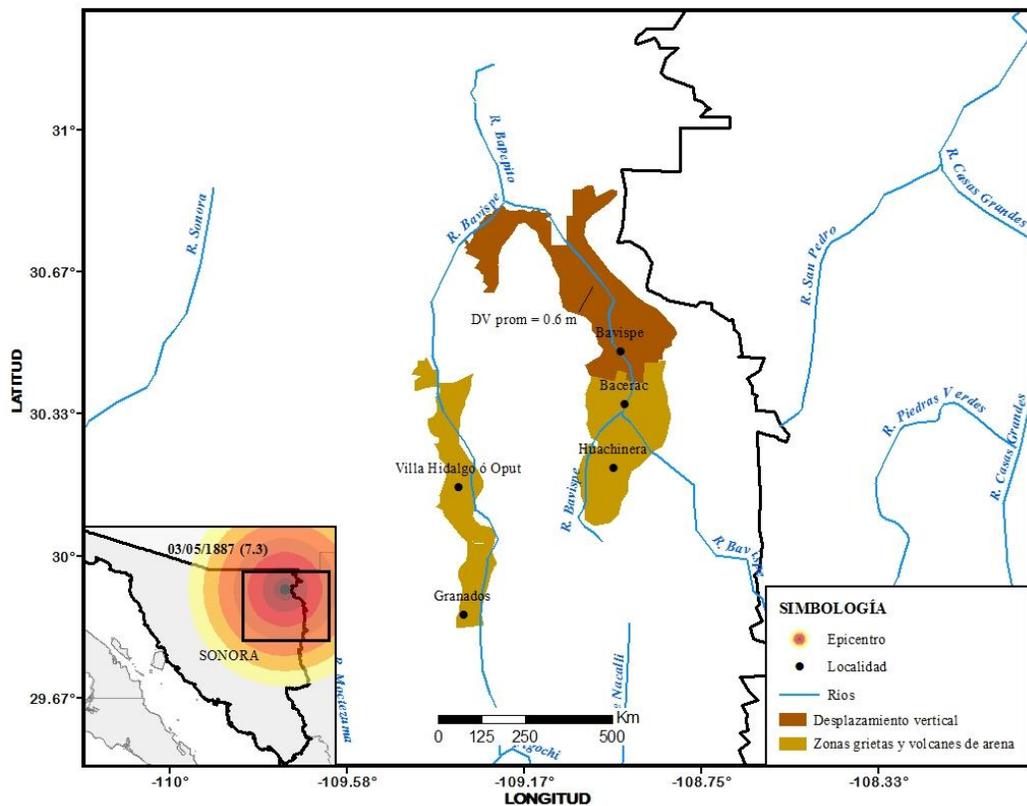


Fig 2. 8 Mapa de desplazamientos verticales registrados durante el evento del 03/05/1887

2.3. Mexicali, Baja California (1915)

2.3.1. Geología

La capa superficial del valle de Mexicali está compuesta de sedimentos aluviales y deltaicos de edad reciente -Plio-cuaternarios (Qal)- que fueron aportados principalmente por el Río Colorado. Estos sedimentos están compuestos por conglomerados y depósitos no consolidados de arena, grava, arcilla, limo y cantos rodados que en conjunto alcanzan un espesor de 2500 metros (Lira, 2005).

Con base en la información obtenida con la perforación de 321 pozos desde 1958 hasta el 2004 en el Campo Geotérmico de Cerro prieto, se definen cinco unidades litológicas que conforman el subsuelo: Basamento, Lutita Gris (LG), Lutita Café (LC), Lodolitas y sedimentos clásticos no consolidados (SCNC). (Lira, 2005)

2.3.2. Descripción del evento

El 23 de junio de 1915 se registró un sismo de magnitud 5.6, aproximadamente a las 3:57 hrs. (UTC) a una distancia aproximada de más de 40 km de Mexicali y con epicentro $32.8^{\circ}\text{N } 115.0^{\circ}\text{W}$ como se puede observar en la Fig 2.9.

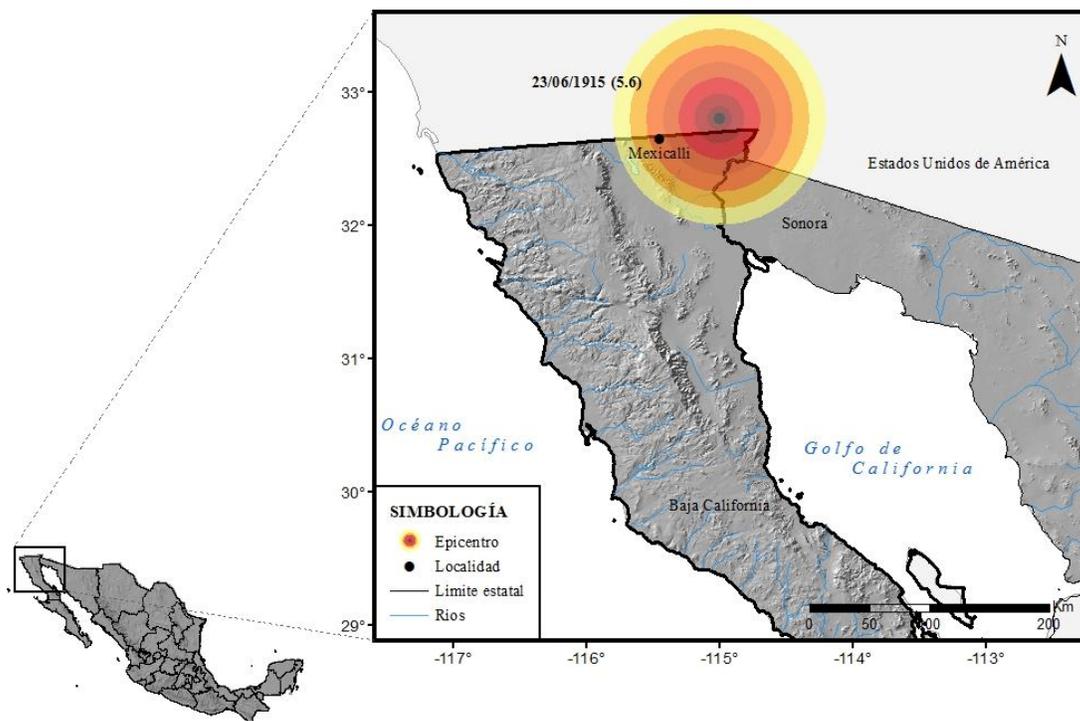


Fig 2. 9 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Mexicali, 1915

2.3.3. Evidencias de licuación

“... Estuvo compuesto de dos movimientos separados por un lapso de 57 minutos, y grandes áreas de irrigación se hundieron desde centímetros hasta 0.5 m, abriéndose grietas por donde brotó el agua. En Mexicali seis personas perecieron...”,(Santoyo y Montañez, 1976). La Fig 2.10 muestra la zona afectada por el fenómeno de licuación.

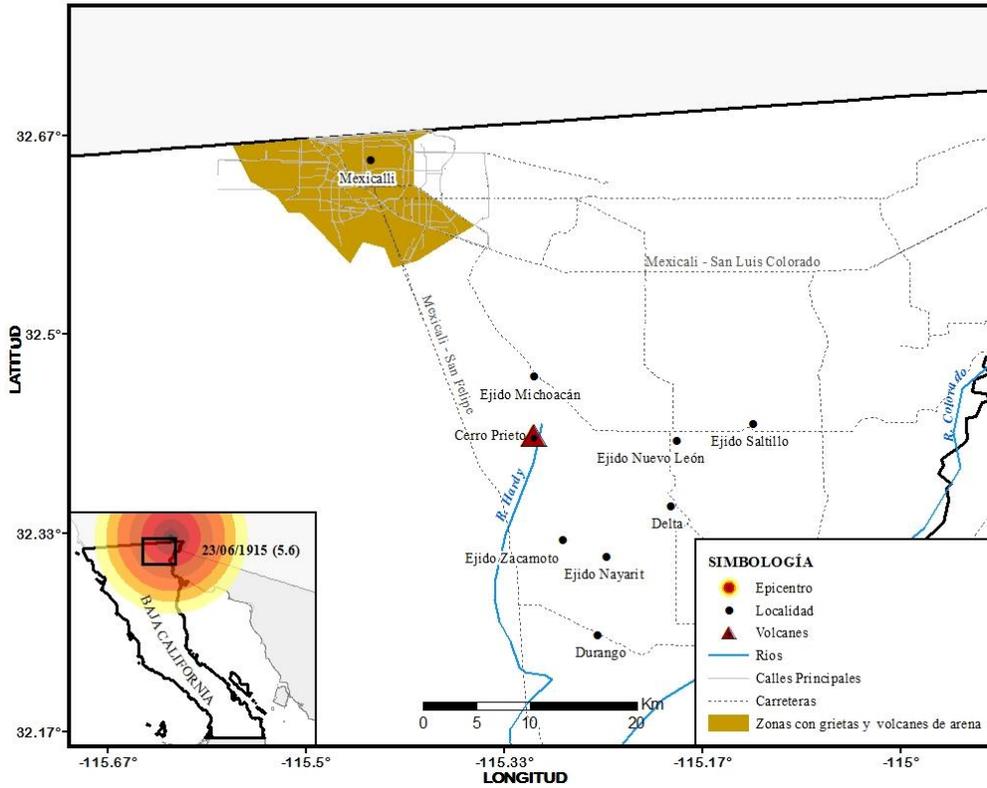


Fig 2. 6 Mapa de daño por licuación registrado durante el evento del 22/06/1915

2.4. Jaltipán, Veracruz (1959)

2.4.1. Geología

En la zona costera de Veracruz abundan suelos profundos formados por material depositado por los ríos, en los municipios de Coatzacoalcos y Jaltipán las formaciones geológicas que predominan son del Neógeno (41% y 57%) y Cuaternario (26% y 35%), con suelos: aluviales (11% y 24%), eólicos (11% en el primero) y palustres (4% y 3%). (INEGI, 2009)

Tabla 2. 1 Resumen de propiedades del suelo en Coatzacoalcos, Veracruz.

PROF. (m)	TIPO DE SUELO	FACTOR ó PROPIEDAD	DIMENSIÓN
0.0 – 2.5	Capas de arena limpia mediana a fina	Relación de vacíos	≈ 0.6
		Humedad (w)	20% <w< 25%
		Gravedad específica (Gs)	2.66
2.5 – 6.7	Capa uniforme de arena pobre	Relación de vacíos	≈ 1.0
		Humedad (w)	30% <w< 40%
		Gravedad específica (Gs)	2.70
		Resistencia a la compresión simple	0.2 < qu < 0.6 (kg/cm ²)
6.7 - 9.0	Arenas limosas	Relación de vacíos	1.1 <e< 1.2
		Humedad (w)	45%
		Gravedad específica (Gs)	2.66
		Límite líquido	≈ 45%
		Límite plástico	30%
	Resistencia a la compresión simple	0.2 < qu < 0.7 (kg/cm ²)	
9.0 - 9.9	Arena limpia media		
9.9 - 17.8	Arenas limosas y arcillosas	Humedad (w)	50% <w< 75%
		Gravedad específica (Gs)	2.70
		Límite Líquido LL	≈ 90%
		Límite plástico LP	> 40%
	Resistencia a la compresión simple	0.2 < qu < 0.8 (kg/cm ²)	
< 17.8	Arenas compactas y areniscas de origen marino.		

* Datos obtenidos de pruebas realizadas cerca de Coatzacoalcos, Marsal (1961), Anexo 1.

2.4.2. Descripción del evento

El 26 de agosto de 1959, un sismo de intensidad VII en la escala modificada de Mercalli, ocurre en la región de la costa sur del estado de Veracruz con una magnitud de 6.5 en la escala de Richter. El epicentro se localizó en el Golfo de México a 35 km. de Coatzacoalcos en 18°27'N 94°16'W, Fig 2.11, a una profundidad de 21 km, produciendo una aceleración máxima en la superficie del suelo de 0.07 a 0.2 g. (Marsal, R. J., 1961)

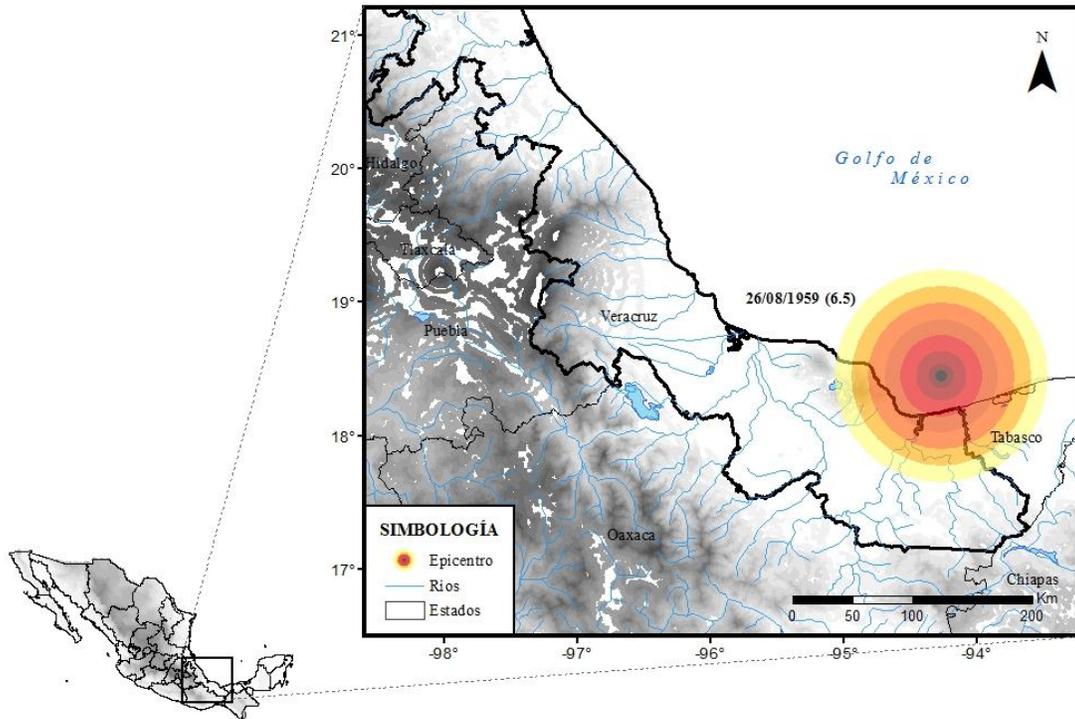


Fig 2. 7 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Veracruz, 1959.

2.4.3. Evidencias de licuación

Marsal (1961) explica que dos tipos de fallas observadas en Coatzacoalcos cerca del río fueron los indicadores de un proceso parcial de licuación en la zona, en las capas de suelo encontradas entre las profundidades de 2.5 – 6.7 m.

Marsal también señaló un asentamiento repentino del orden de un metro en columnas de las instalaciones de los astilleros de la Marina, Fig 2.12, y un desplazamiento horizontal relativo entre dos secciones de Puertos Libres, Fig 2.11. Llegando a la conclusión de que la falla en las cimentaciones durante este evento eran resultado de una licuación parcial inducida por la acción del sismo.

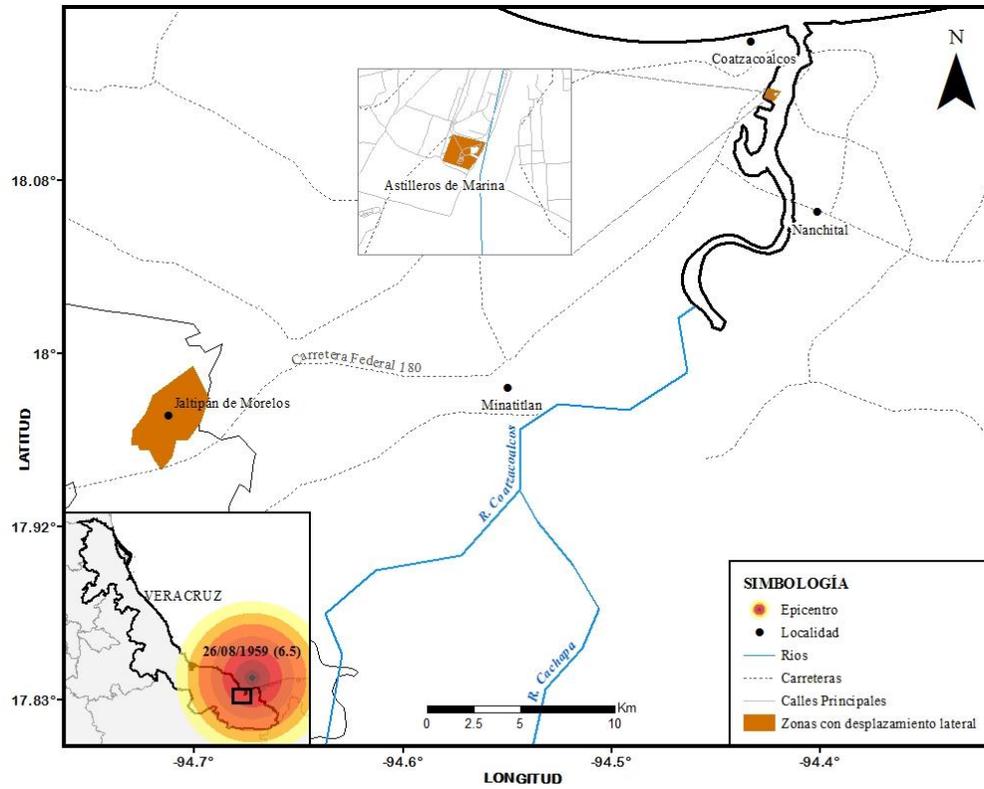


Fig 2. 8 Mapa de desplazamientos laterales registrados durante el evento del 26/08/1959

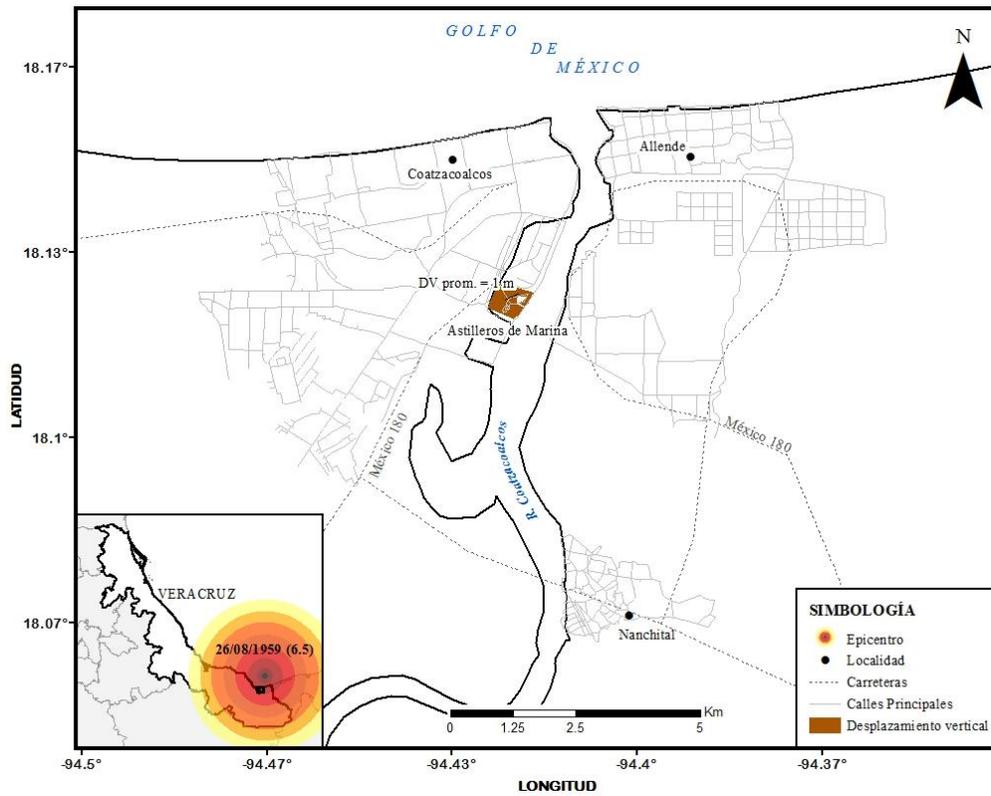


Fig 2. 9 Mapa de desplazamientos verticales registrados durante el evento del 26/08/1959

2.5. Chiapa de Corzo, Chiapas (1975)

2.5.1. Geología

En general geológicamente el suelo en la localidad de Chiapa de Corzo se encuentra constituido por capas de gran espesor de roca caliza y lutita, del paleoceno y eoceno. Los suelos de la región son típicamente productos de la intemperización residual. Durante los reconocimientos realizados por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para la realización del Estudio de Licuación de Arenas en Chiapas (1977), se encontraron depósitos aluviales recientes a orillas de los ríos.

El río de Santo Domingo que tiene un cauce regular durante todo el año, tiene un acarreo activo de arena mediana. El cauce y valle de Santo Domingo están confinados por una serie de terrazas antiguas compuestas de materiales muy firmes y compactos. En las áreas adyacentes al río y donde la topografía lo permitió, se fueron depositando aluviones recientes constituidos por arenas medianas. Fueron premisamente estas arenas aluviales las que sufrieron licuación durante estos sismos, los niveles del río eran de 1 a 2 metros por encima de los niveles del río, esto aunado a su alta permeabilidad provocaron que el nivel freático estuviera al mismo nivel del río. (Dawson A., et al., 1977)

Geología por sitios, tomando del estudio de Licuación de Arenas en Chiapas (Fig. 2.14):

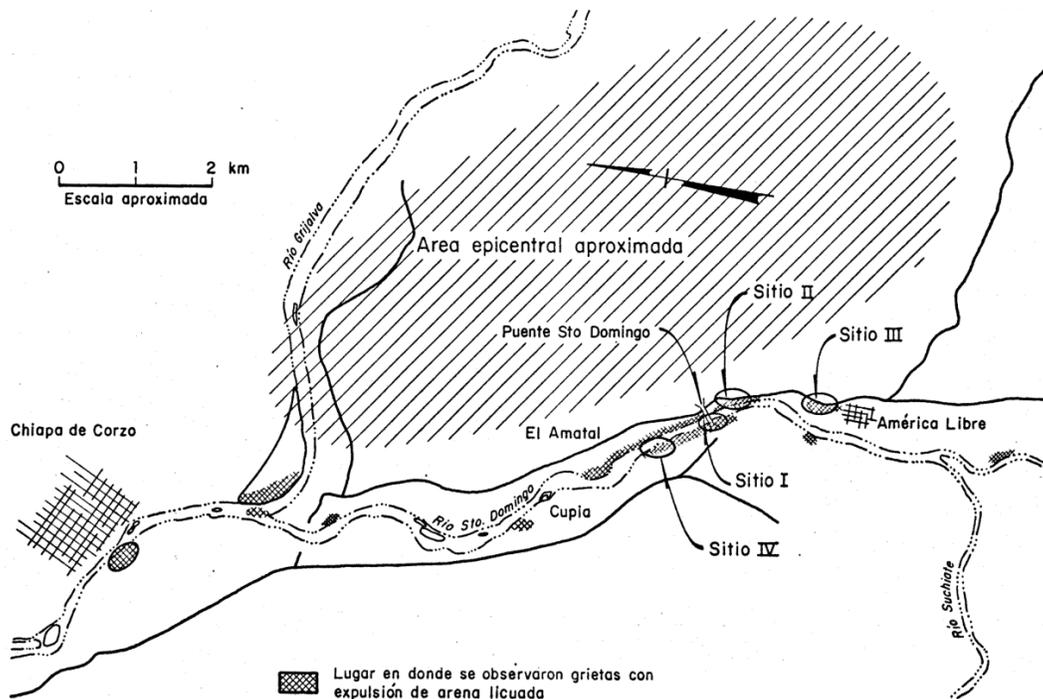


Fig 2. 10 Localización de sitios con manifestaciones más destacadas de licuación. (Dawson et al., 1977)

Sitio I

En este sitio la pendiente de los aluviones es casi nula, en comparación con el ancho del estrato de aluviones, la capa superior (manto cohesivo) es muy pequeña. Las arenas aluviales son de tamaño mediano, uniforme, con pocos finos y permeabilidad bastante alta. La resistencia a la penetración es alta, aunque existen lentes con valores bajos de resistencia a la penetración y potencialmente licuables, Anexo 2.

Sitio II

En el sitio debajo de las arenas aluviales recientes se encontró, una arcilla medianamente compacta con lentes de arena fina y arena fina limosa, de espesor muy reducido, Anexo 3.

Sitio III

Se observa un manto superficial cohesivo, de espesor reducido, debajo de estas arenas aluviales medianas, por encima de otra arena mejor graduada y con tamaños de mediano a grueso, Anexo 4.

Sitio IV

De acuerdo al reporte de Dawson, 1977, este sitio formaba parte del cauce del río, en muchas zonas del sitio no se encontró manto cohesivo superficial en su lugar una capa delgada de limo arenoso. Luego una capa de arena fina a mediana de muy baja compacidad.

Las conclusiones de los estudios geotécnicos realizados después de los eventos arrojaba que la compacidad relativa tenía una variación entre el 70 y 80% en las arenas aluviales cercanas a las “terrazas antiguas” (Sitio I y IV).

2.5.2. Descripción del evento

En 1975 se registraron una serie de eventos sísmicos ocurridos durante los meses de octubre y noviembre en Chiapa de Corzo, dos eventos sísmicos ocasionaron daños relacionados con el fenómeno de licuación, los ocurridos durante el 6 de octubre y 5 de noviembre, estos registraron magnitudes 4.8 y 5.6 en la escala de Richter respectivamente, a una profundidad ambos de 5 km aproximadamente, con distancias del epicentro menores de 10 km y ocasionando aceleraciones máximas en la superficie de 0.3g, la Fig 2.15 muestra la localización del epicentro y las localidades afectadas.

2.5.3. Evidencias de Licuación

Los eventos sísmicos ocasionaron licuación en arenas aluviales depositadas en caliza y lutita; el fenómeno se manifestó en la expulsión de arena y agua a través de volcanes (sismitas), y en desplazamientos laterales. En el estudio realizado por Dawson y su

equipo en 1975, se tomaron como puntos de observación cuatro sitios, donde se manifestó licuación.

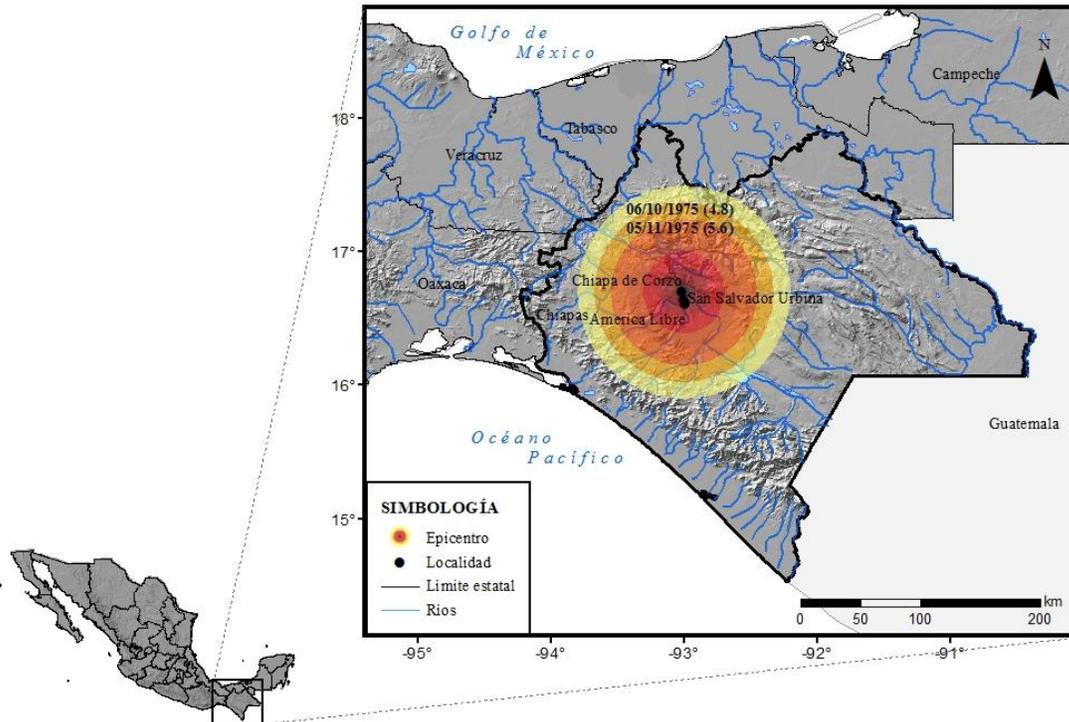


Fig 2. 11 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Chiapa de Corzo, 1975.

Sitio I

En este sitio se observaron grietas y fuera de estas se observó arena mediana muy húmeda, localizadas en el tercio medio del aluvión reciente, con longitudes que iban de 2 a 20 m. de acuerdo al estudio considerando una abertura promedio por grieta de 2 cm y cinco grietas en una sección transversal, se estima el desplazamiento promedio de la rivera hacia el río en 10 cm.

En este mismo sitio se pudieron observar alrededor de las pilas del puente, que se encuentran cimentadas a más de 20 metros de profundidad, los asentamientos que experimentó el suelo; después del temblor del 6 de octubre el asentamiento máximo de 3 cm y después del evento del 5 de noviembre los asentamientos aumentaron 5 cm más. Es considerado el sitio con mayor manifestación de licuación, de acuerdo a granulometrías de los sondeos S-2 y S-25 (Anexos 2 y 3) las arenas que sufrieron licuación van de uniformes a poco uniformes.

Sitio II

Solo se presentaron grietas con expulsiones de arena y agua cerca y paralelamente al contacto de los materiales compactos, no se presentaron grietas transversales ni presencia de volcanes de arena, estudios de granulometría realizados al material de

expulsado por las grietas y al encontrado en ellas indico que estos se licuaron durante el sismo de noviembre.

Sitio III

Sitio localizado cerca de una curva muy cerrada en la carretera, a 400 metros de América Libre, en el cual se encontraron solamente grietas con arena y agua expulsada a una distancia aprox. de 200 m del rio; estos fenómenos se desarrollaron durante ambos sismos.

Sitio IV

Localizada en el poblado de Salvador Urbina sobre la margen izquierda del Río, hubo presencia de grietas y volcanes de arena, de acuerdo a la geología del sitio es muy probable que la licuación tuviera origen en la zona superficial compuesta por arenas finas.

La información descrita sobre las fallas provocadas por el fenómeno de licuación de cada uno de los eventos se encuentra representada en las Fig 2.16 y 2.17.

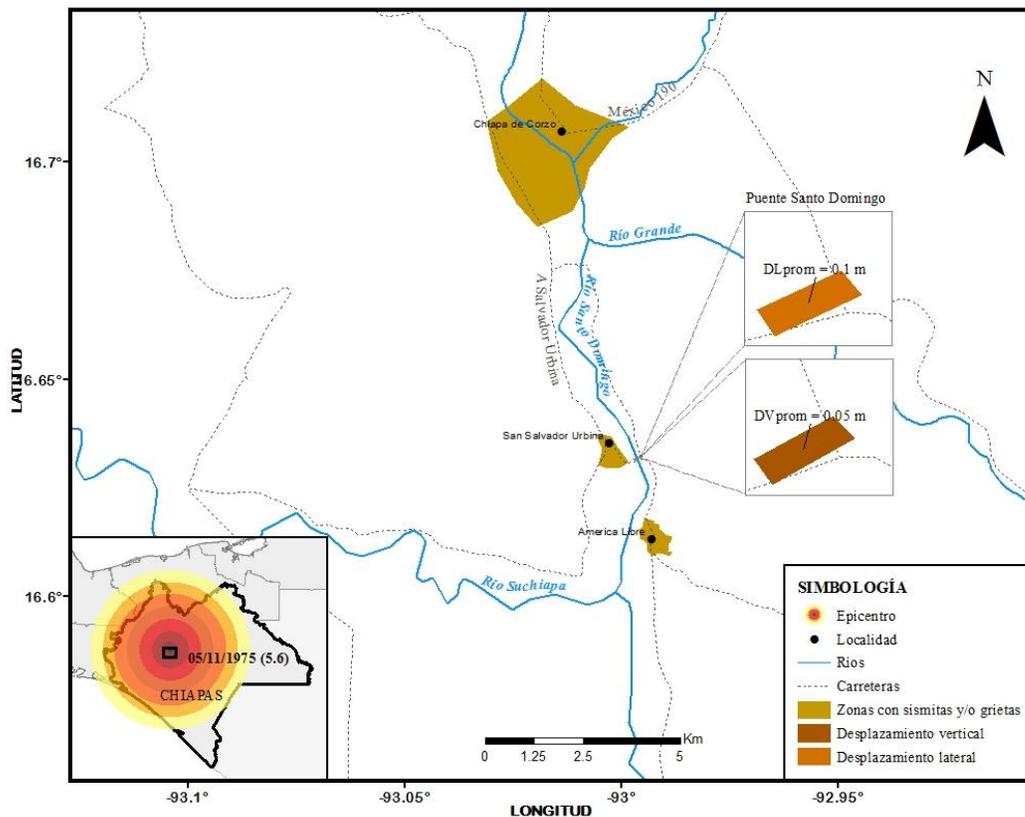


Fig 2. 12 Mapa de desplazamientos verticales y laterales registrados durante el evento del 06/11/1968

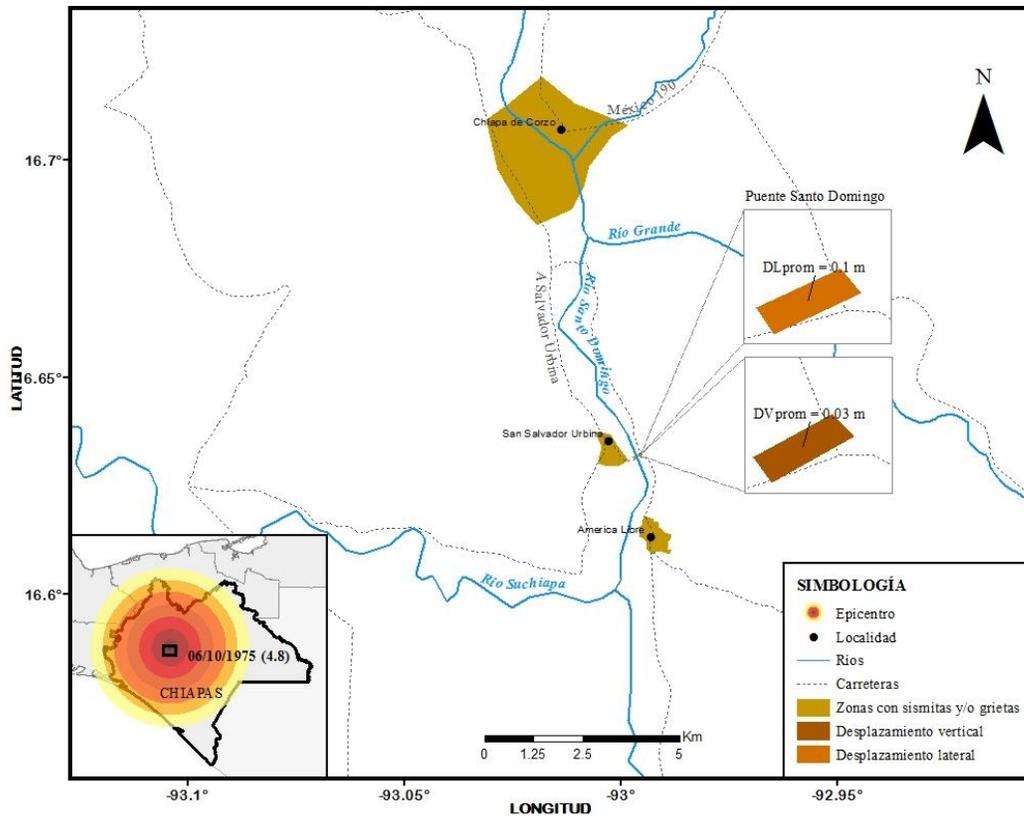


Fig 2. 13 Mapa de desplazamientos verticales y laterales registrados durante el evento del 05/11/1968

2.6. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1979)

2.6.1. Geología

Exploraciones realizadas en el área de FERTIMEX (Isla de Enmedio) por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en 1979, determinaron que el estrato de arena potencialmente licuable se localizaba a un nivel promedio de -0.25 msnm con un espesor medido de 3.4 m, en los cortes estratigráficos (Anexo 6 y 7) se muestra como capa superficial (0.70 m de espesor aproximadamente) compuesta principalmente por arcillas de alta plasticidad y un poco de limos que contenían materia orgánica. Luego de la capa de arena se presentaban mantos de gravas con arena y arenas con grava.

2.6.2. Descripción del evento

El 14 de marzo de 1979, a las 5:07 hrs ocurrió un sismo en la costa de Guerrero cerca de Petatlan, la magnitud del sismo fue de 7.6 en la escala de Richter, con epicentro en $17.46^{\circ}\text{N } 101.46^{\circ}\text{W}$, ver Fig 2.18, profundidad de 20 km, con una distancia de 50 km de Lázaro Cárdenas y una aceleración máxima de la superficie de 0.3 g.

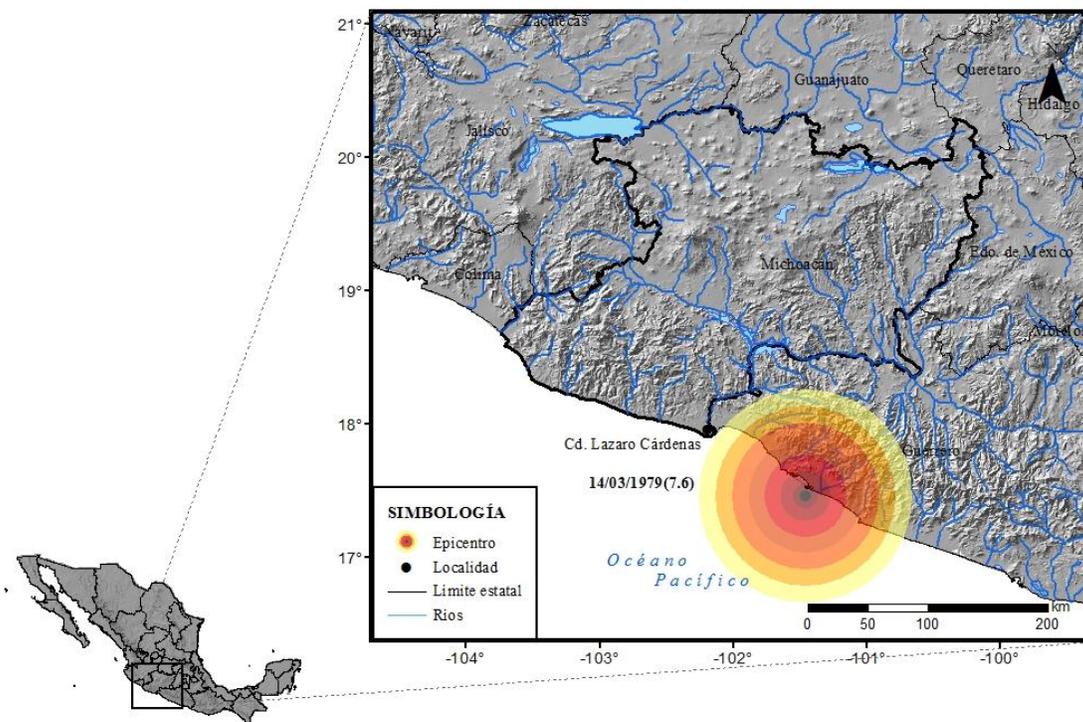


Fig. 2. 18 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Lázaro Cárdenas, 1979.

2.6.3. Evidencia de licuación

Los efectos principales del fenómeno en la Isla de Enmedio fueron la presencia de grietas, volcanes de arena y un posible asentamiento de entre 5 y 10 cm, Fig 2.19. Los volcanes presentaron expulsión de agua y arena que al inicio alcanzaron alturas de 2.0 con una duración aproximada de una hora y media; el diámetro de los volcanes variaba de entre 30 y 150 cm. (Jaime, A., et al., 1979)

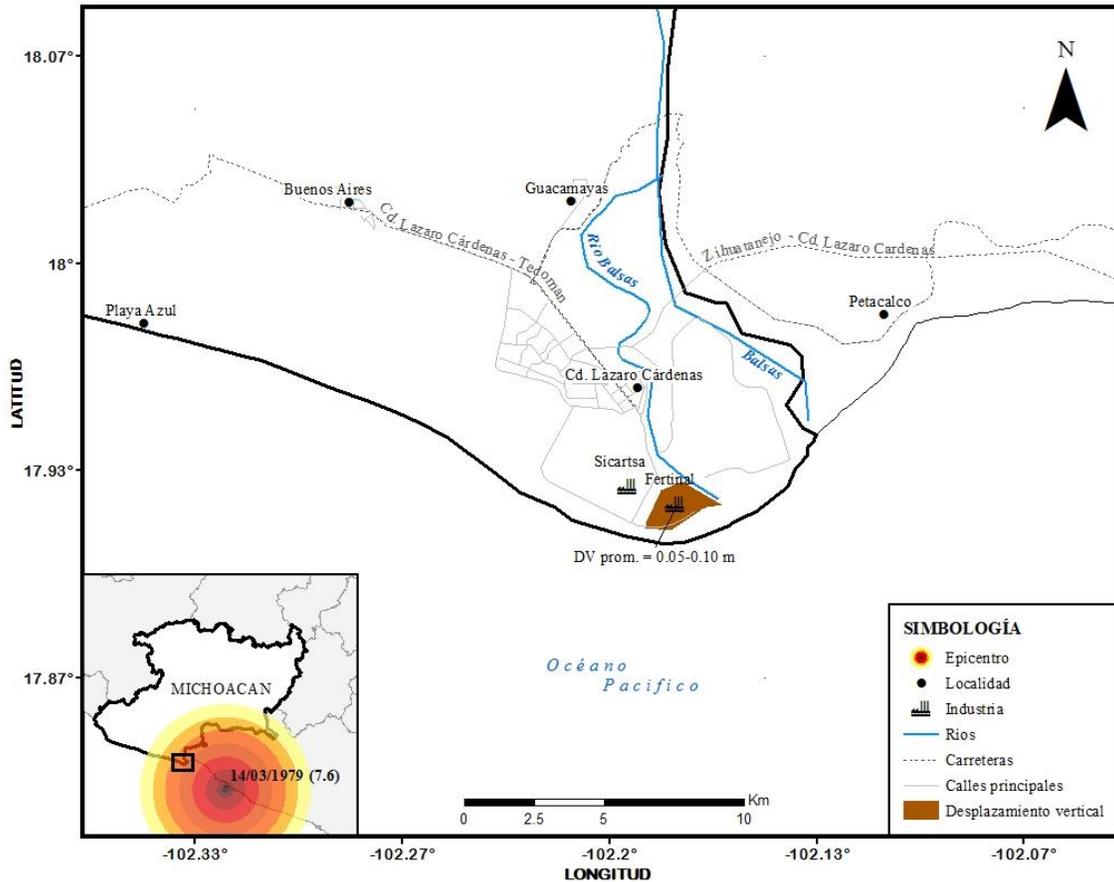


Fig 2. 19 Mapa de desplazamientos verticales registrados durante el evento del 14/13/1979.

2.7. Mexicali (1980)

2.7.1. Geología

Ver descripción del suelo en sección 2.3.1.

2.7.2. Descripción del evento

El 9 de junio de 1980, a las 8:25 pm aproximadamente, se registra un sismo de magnitud $M_L=6.1$, $m_b=6.4$ y $M_s=6.4$ en la en el Valle de Mexicali, Fig 2.20, con epicentro en $32.22^\circ N$ $114.99^\circ W$ a una distancia aproximada de 10 km de la Cd. de Guadalupe Victoria, con una profundidad de 12 km y una aceleración máxima de la superficie de 0.4 g.

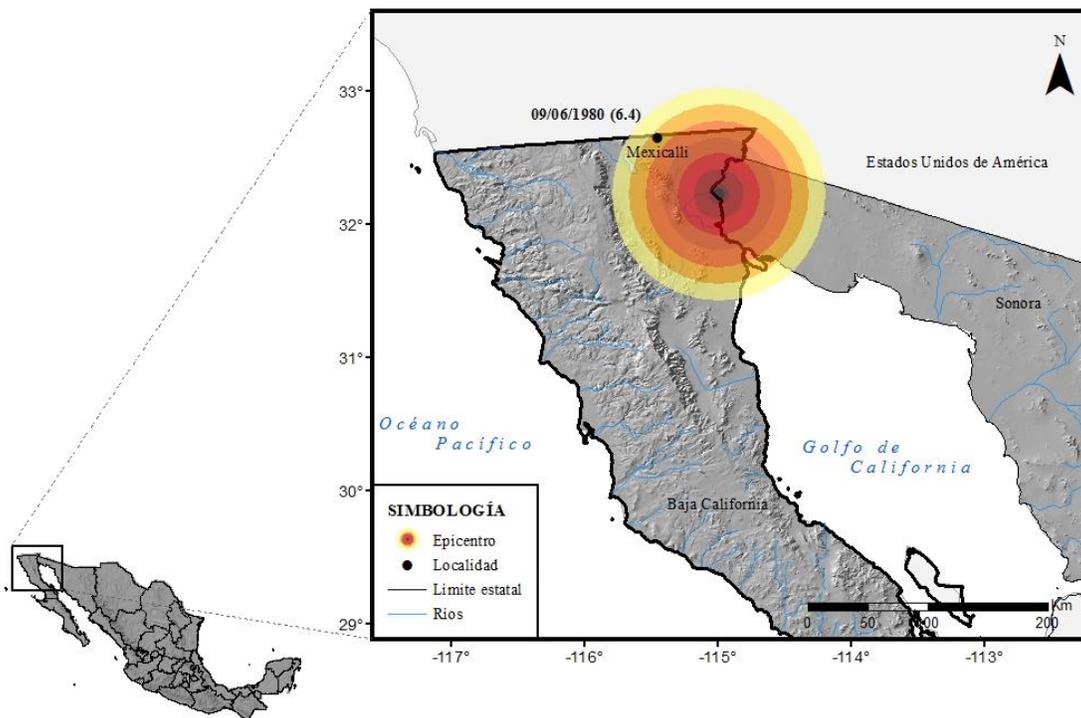


Fig 2. 14 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Mexicali, 1980.

2.7.3. Evidencia de licuación

Del artículo de Anderson et al. (1982), "The Mexicali Valley Earthquake of 9 de June 1980" se desprenden las siguientes evidencias de licuación:

En las localidades de Delta y Pescaderos se agrietó el terreno, sin dirección aparente. En Delta se generaron dos grietas de 100 m de longitud a unos 65 m una de la otra, el bloque de suelo que se encontraba entre estas grietas presentaba un asentamiento aproximado de entre 5 y 10 cm. Después del sismo se observaron deformaciones de las vías del ferrocarril.

Anderson et al., 1982, reporta más de 50 volcanes de arena generados por el fenómeno de licuación localizados en las cercanías de Delta, algunos de ellos seguían expulsando agua con arena 5 días después del sismo.

Días después del sismo en el Ejido de Saltillo se reportó un deslizamiento, en el que la componente vertical máxima medida fue de 16.5 cm y la horizontal de 10 cm, en algunas partes de esta zona la componente horizontal era mucho más pequeña y la vertical era muy cercana a cero. Grietas en sentido transversal fueron encontradas en el sureste de la localidad de ejido de Oaxaca, de su observación se concluyó que existía un desplazamiento lateral a la derecha de 2 cm con una componente vertical de 5 a 7 cm.

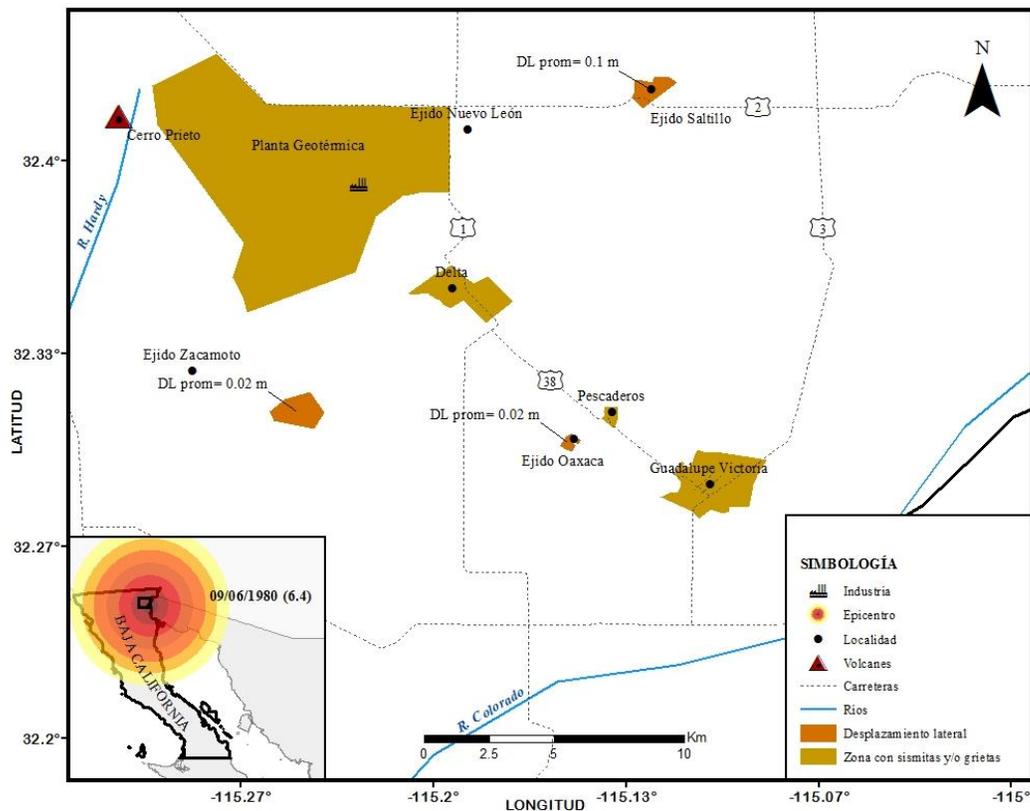


Fig 2. 15 Mapa de desplazamientos laterales registrados durante el evento del 09/06/1980

En las Fig 2.21 y 2.22 se muestran las zonas donde se presentaron los desplazamientos laterales y verticales y zonas donde solo hubo presencia de volcanes de arena y grietas como evidencia del fenómeno de licuación.

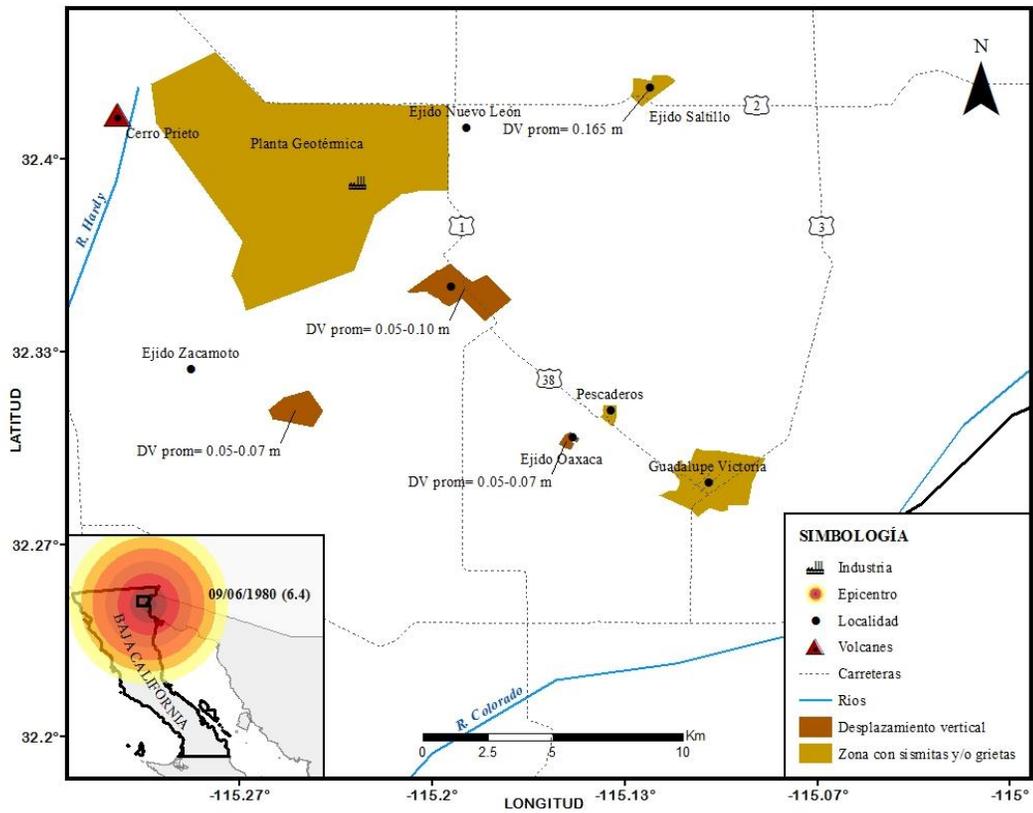


Fig 2. 17 Mapa de desplazamientos vertical registrados durante el evento del 09/06/1980

2.8. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1981)

2.8.1. Geología

Ver descripción del suelo en sección 2.6.1.

2.8.2. Descripción del evento

El 24 de octubre de 1981 a las 03:22:16 UTC se registro un sismo de magnitud 7.3 con epicentro 18.088N 102.061W a una profundidad aproximada de 21 km, afectando la zona de Lázaro Cárdenas en Michoacán localizada a menos de 25 km del epicentro, Fig 2.23.

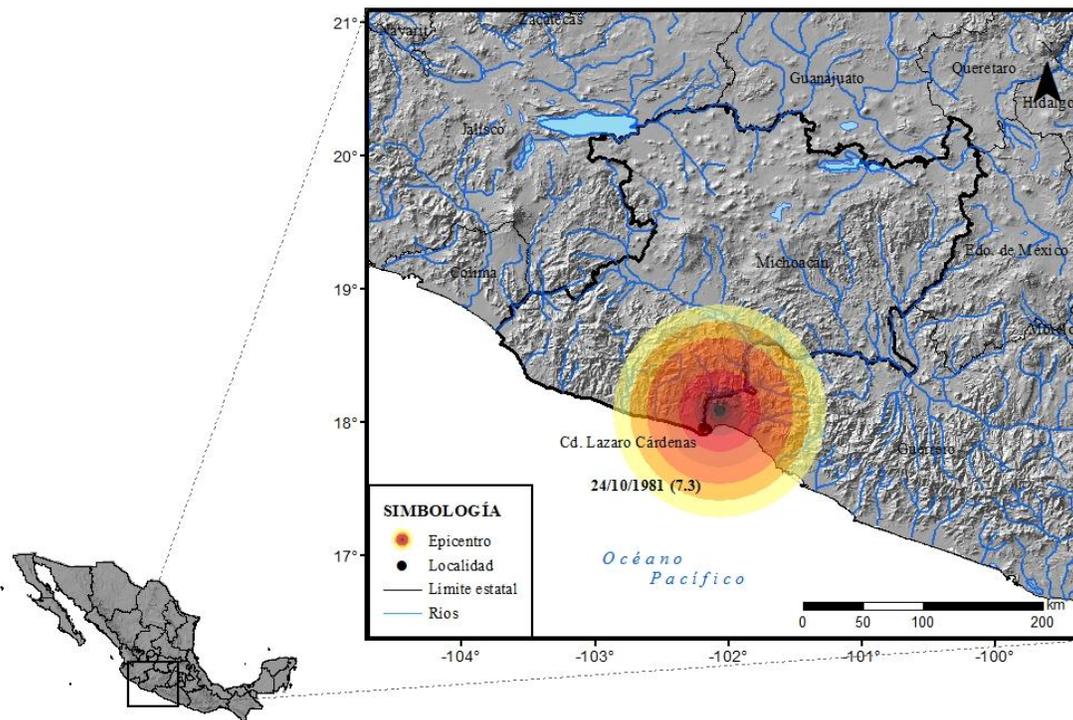


Fig 2. 23 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Mexicali, 1981

2.8.3. Evidencia de licuación

“...Durante los sismos ocurridos el 14 de marzo de 1979 y el 24 de octubre de 1981, pero especialmente en el primero, se presentaron evidencias locales del fenómeno de licuación en la isla de En medio sobre todo en la zona suroeste. Estudios específicos posteriores verificaron la ocurrencia del fenómeno y revelaron que este ocurrió en un estrato natural bajo los rellenos, compuesto por arena fina, suelta y saturada, misma que brotó a la superficie en pequeños borbollones.”(Rocha, 1982). En la Fig 2.24 se ubica el puerto de Lázaro Cárdenas y se remarca la zona correspondiente a la isla de Enmedio, donde se presentó el fenómeno de licuación.

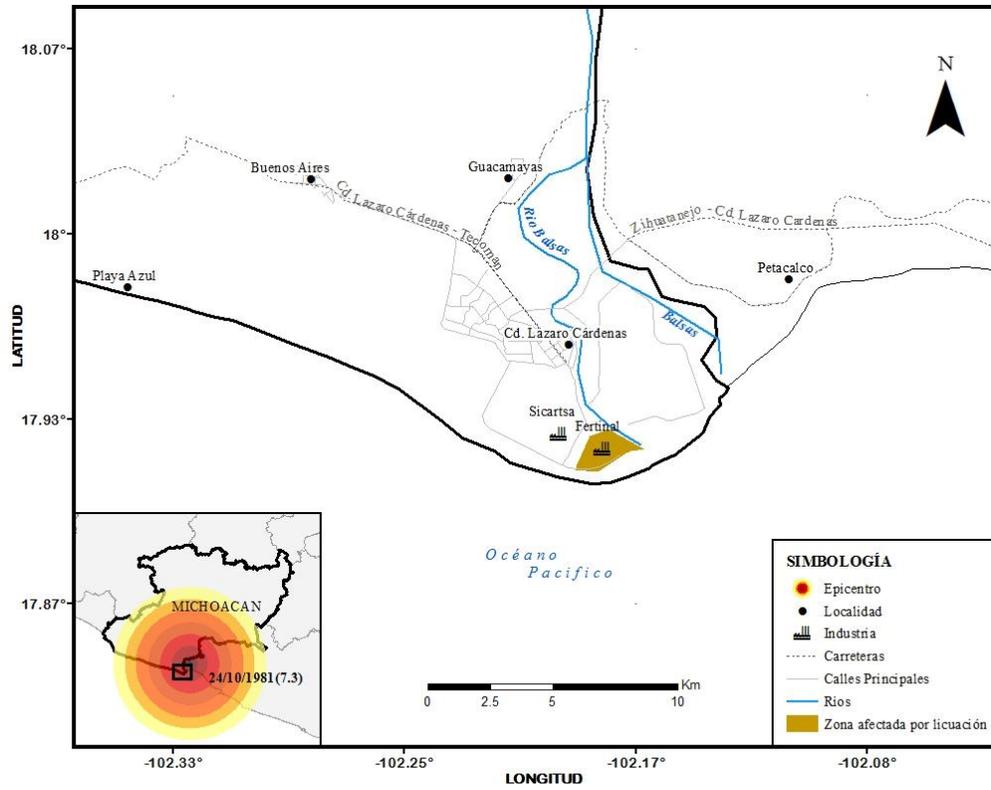


Fig 2. 19 Mapa de daño por licuación registrados durante el evento del 24/10/1981

2.9. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1985)

2.9.1. Geología

Ver descripción del suelo en sección 2.6.1.

2.9.2. Descripción del evento

El temblor del 19 de septiembre de 1985, se generó como resultado del movimiento de la placa de cocos con respecto a la norteamericana, de acuerdo con información del servicio sismológico nacional el epicentro del sismo fue localizado en 18.14 N y 102.71 W, Fig 2.25, frente a las costas de Michoacán, con una magnitud 8.1 grados de magnitud, a unos 17 km de profundidad y con una aceleración máxima de la superficie de 0.4g una de las características destacables de este sismo, es la generación de un maremoto, el primero en registrarse y observarse en el país.

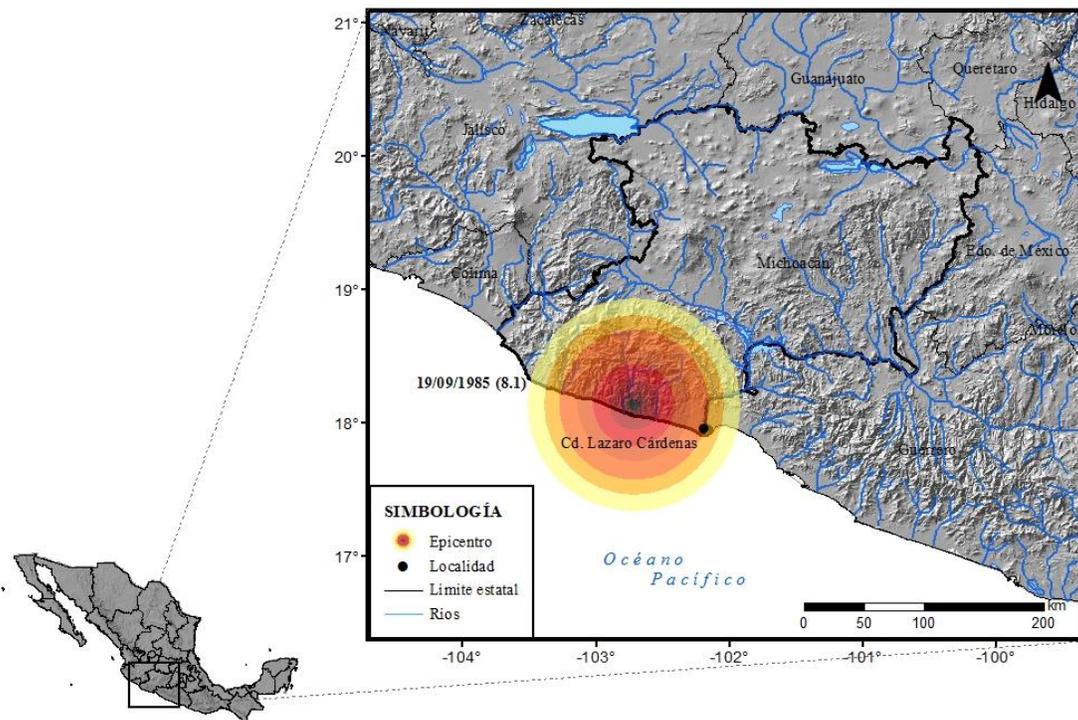


Fig 2. 20 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Michoacán, 1985.

2.9.3. Evidencia de licuación:

En la mayoría de los sitios que conforman el puerto industrial, la presencia de suelos granulares sueltos provocó deslizamientos horizontales y verticales la eventual licuación de depósitos areno-limosos saturados.

En la planta FERTIMEX se observaron ondulaciones en la superficie del terreno, así como pequeños volcanes típicos del fenómeno de licuación. El asentamiento regional del

terreno natural fue de aproximadamente 3 cm, en zonas sobre-elevadas con rellenos de material granular suelto, se observaron asentamientos máximos de 30 cm (Fig. 2.26). En la corona de La presa La Villita el asentamiento fue de aproximadamente 10 cm. En la planta de Sicartsa se incendió la planta cogenizadora y se desniveló la planta de laminación.

En cuanto a las vialidades se observaron agrietamientos longitudinales en los caminos de acceso a la isla del Cayacal, también en el puente de acceso a la isla del Cayacal se presentaron deslizamientos importantes del suelo; así como deformaciones en las vías del ferrocarril a la entrada de FERTIMEX.

En líneas de conducción de agua cruda SARH se presentaron desplazamientos horizontales y verticales que desacoplaron los tubos y en algunos casos provocaron que los motores de las bombas se inclinaran. (Tamez G., E., 1987)

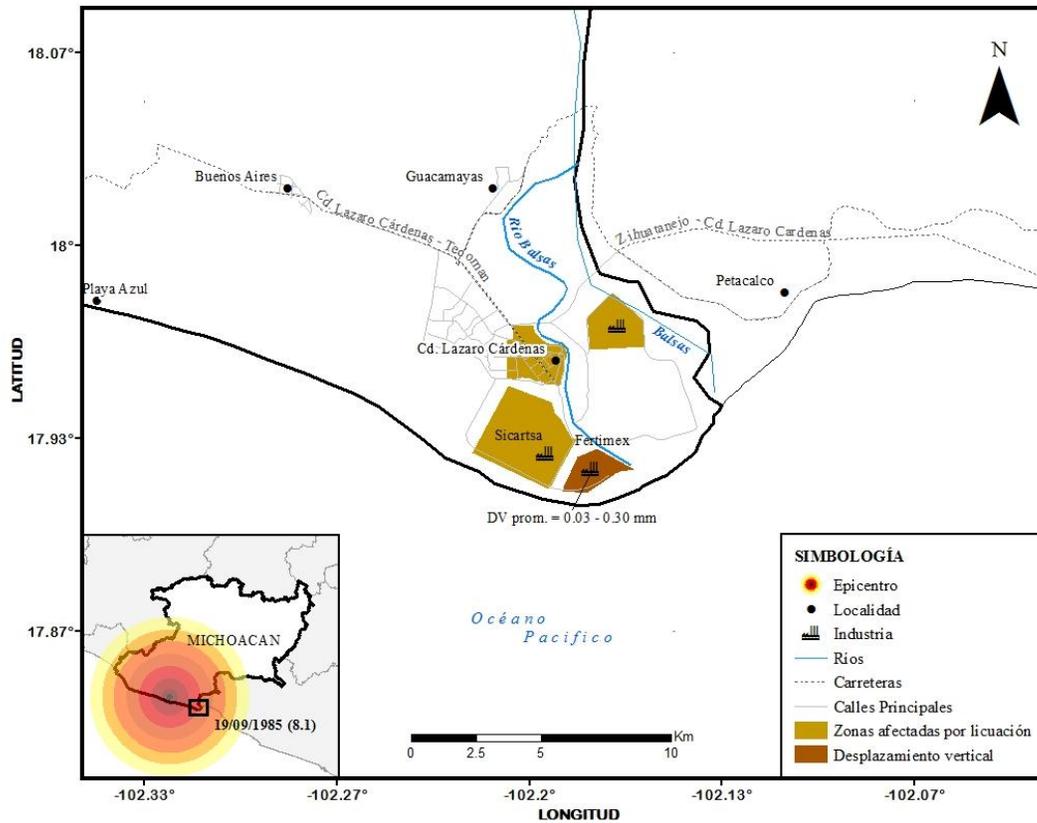


Fig. 2. 26 Mapa de desplazamientos verticales registrados durante el evento del 19/09/1985.

2.10. Jalisco y Colima (1995)

2.10.1. Geología

Las formaciones geológicas principales son: Cretácico (72.47%), Cuaternario (21.02%) y Paleógeno (0.17%). En la región epicentral, cercana a la costa, se encuentran rocas ígneas del cretácico superior. Los depósitos superficiales son principalmente del terciario superior (areniscas y conglomerados de origen lacustre) y cuaternario (depósitos aluviales, lacustres y eólicos) (INEGI, 2009).

2.10.2. Descripción del evento

El 9 de octubre de 1995, a las 9:36 am hora local, un sismo de magnitud $M_w=8.0$ y $M_w=7.6$ (SSN), con epicentro en 18.85 N 104.53 W, Fig 2.27, frente a las costas de Colima, con una profundidad de 27 km y una aceleración máxima de la superficie de 0.2g que se sintió en diferentes localidades de Jalisco y Colima.

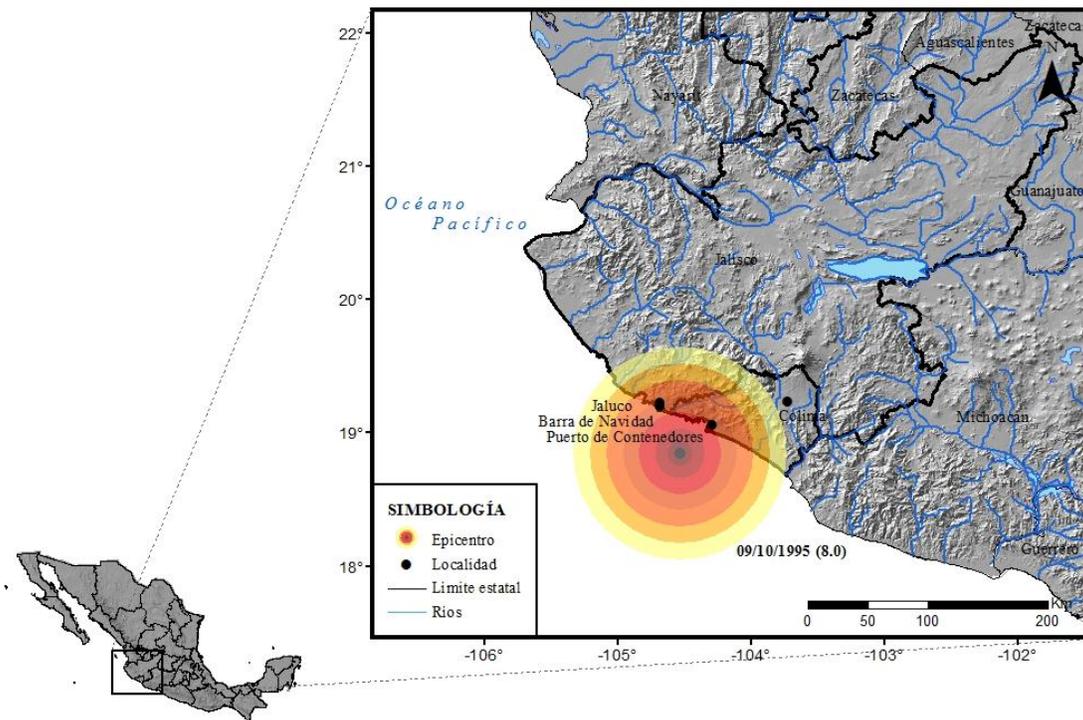


Fig 2. 22 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Colima y Jalisco, 1995

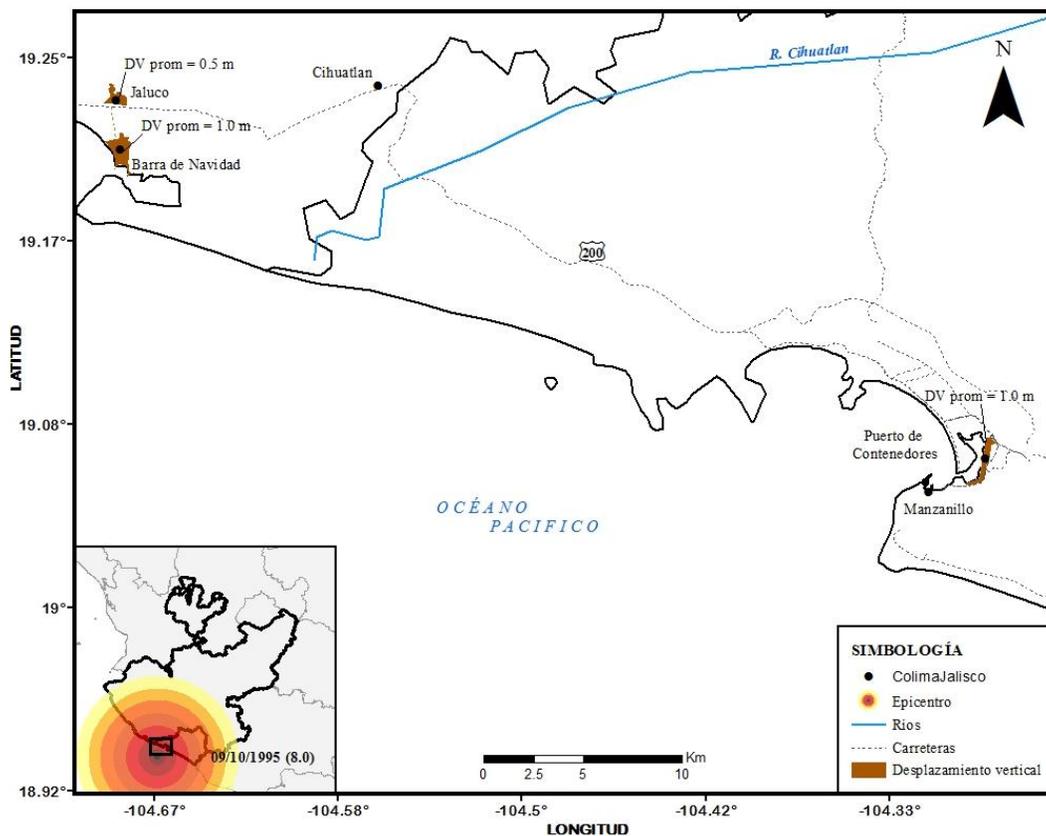
2.10.3. Evidencia de licuación:

Jaluco: la mayoría de los daños observados se debido a licuación y hundimientos, estos últimos alcanzaron magnitudes cercanas a los 50 cm. Losas de piso sin refuerzo fueron empujadas por arriba del suelo q estaba licuándose, alcanzando alturas hasta 1m.

Barra de Navidad: rellenos depósitos y rellenos de la laguna se licuaron, entre los daños se cuentan desplazamientos laterales, hundimientos y colapsos.

Otras zonas donde se observaron problemas por licuación fueron Boca de Iguanas y la Autopista 200, en la primera un restaurante se colapso parcialmente provocado por la licuación del suelo y en la autopista la licuación provocó desplazamientos laterales que originaron daño en la plantilla de la autopista.

En el puerto de contenedores de Manzanillo el fenómeno de licuación provocó hundimientos diferenciales así como movimientos laterales. En una estación hidroeléctrica de la CFE de Manzanillo las tuberías de enfriamiento del generador sufrieron daños debido a los hundimientos generados por la licuación. En la siguiente figura, Fig 2.28, se ubican las zonas donde se presentaron deslizamientos verticales.



2.11. Tlaxcala y Puebla (1999)

2.11.1. Geología

El basamento de la ciudad de Puebla está constituido por rocas calizas del Cretácico. Sobre estas rocas, se tienen series de depósitos volcánicos como tobas y sedimentos de origen aluvial. Hacia el sur y oeste de la ciudad se distinguen afloramientos de basalto y tobas. Diversos ríos cruzan la ciudad, que dejan a su paso depósitos aluviales con estratos de gravas y arenas limosas, de compacidad variable. Existen también estratigrafías que alternan depósitos lacustres con aluviones y tobas volcánicas. (Pestana, J. M., et al., 2002).

2.11.2. Descripción del evento

El 15 de junio de 1999, a las 15:41 hrs ocurrió un sismo de $M_w=6.9$ grados Richter, con epicentro de este evento en 18.13 N y 97.57 W, Fig 2.29, a una profundidad de entre 60 a 80 km con una distancia de 20 km de al sur-suroeste de la ciudad de Tehuacán, Puebla, con una aceleración máxima de la superficie de 0.28g. Datos obtenidos por el USGS dan como magnitud $M_w= 6.9$ y epicentro en 18.386 N 97.436 W.

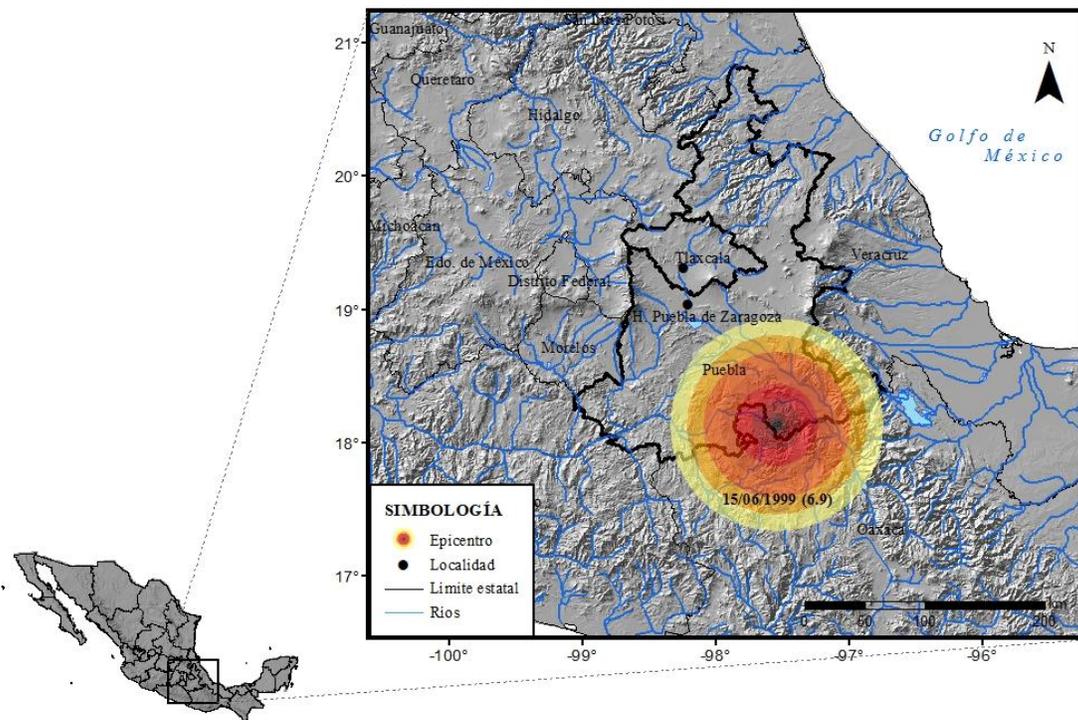


Fig 2. 24 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Tlaxcala-Puebla, 1999

2.11.3. Evidencia de licuación:

El fenómeno de licuación ocurrió en el altiplano de Tlaxcala, a unos 20 km de la ciudad de Puebla. Se observaron volcancillos de arena y grietas que expulsaron arena limosa de color oscuro (ceniza volcánica) se observaron en un campo de maíz. No existieron afectaciones a las estructuras producto de la licuación en las zonas afectadas por el sismo, importante mencionar que es la primera vez que se tienen reportes de licuación en el Valle de Puebla-Tlaxcala. En los reportes y artículos consultados no se hace referencia a la localidad o municipio en el que se presentó exactamente el fenómeno, por tanto y de acuerdo a las descripciones encontradas se tomó la zona que comprenden los cuatro municipios señalados en el siguiente mapa, Fig 2.30.

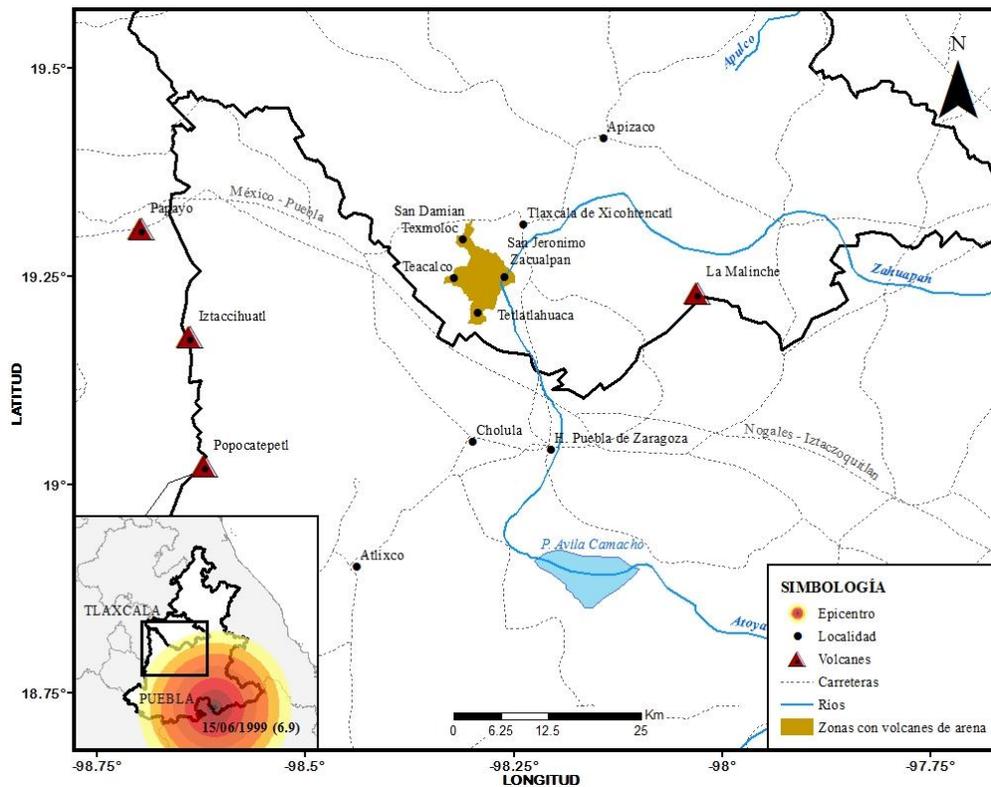


Fig 2. 25 Mapa de daño por licuación registrado durante el evento del 09/10/1999

2.12. Colima (2003)

2.12.1. Geología

La geología superficial de la ciudad de Colima y zona conurbada del municipio de Villa de Álvarez, comprende dos tipos principales de unidades litológicas: avalancha de escombros volcánicos y depósitos fluviolacustres. La primera consiste en un depósito formado por el colapso parcial de una estructura volcánica, esta formación cubre a los depósitos fluviolacustres que dominan el Valle y la ciudad de Villa de Álvarez. (Alcocer, S.M., et al., 2006)

De acuerdo a Tejada y Silva (2003) y Rangel (2003) la ciudad de Colima y sus municipios conurbados se tienen cinco zonas geotécnicas principales:

Zona aluvión-lacustre. Se caracteriza por la presencia de depósitos granulares, en ocasiones sueltos, intercalados con materiales finos.

Brecha andesítica. Aflora en la parte alta de la Cd. de Colima, en ella los depósitos de suelo tienen poco espesor y ocasionales afloramientos de roca.

Zona aluvial. Constituida por depósitos de ríos ya consolidados, y en algunos casos cementados.

Zona fluvial. Localizados a orillas de ríos o cauces abandonados, donde suelen encontrarse depósitos granulares o materiales sueltos medianamente compactos.

Zona de rellenos y minas. Rellenos formados por arenas limosas, limos arenosos, con o sin basura, mal compactados y de varios espesores.

Otro aspecto importante son las condiciones del acuífero, en general, el nivel de aguas freáticas varía entre 0.8 y 10 m de profundidad y tiende a ser más superficial en los depósitos fluviolacustres.

2.12.2. Descripción del evento

El sismo de Tecomán, Colima, ocurrido el 22 de enero de 2003, a las 20:06 hrs, localizado por el Servicio Sismológico Nacional en 18.62° N y 104.12° W, frente a las costas de Colima, Fig 2.31, con magnitud 7.5 en la escala de Richter y profundidad de 10 km, con una aceleración de la superficie de 0.3 g (SSN).

2.12.3. Evidencia de licuación:

En el malecón y muelle Fiscal del puerto de Manzanillo, se registro un asentamiento y desplazamiento del piso hacia el mar de 3 a 5 cm, provocado por la licuación de arenas debido a las aceleraciones del terreno. En el malecón el desplazamiento máximo observado fue de 2 cm.

Desplazamientos laterales dentro del terreno, zonas aledañas a las líneas de playa del Puerto de Manzanillo, principalmente en bordos libres y muros de contención con cara al

mar o lagunas costeras. Aunque las magnitudes fueron diferentes en cada sitio, esta oscilo entre 1 y 3 m. En el puerto de San Pedrito también se presento desplazamiento lateral. En los mapas de las Fig 2.32 y 2.33 se muestran las zonas donde se presentaron los desplazamientos verticales y laterales respectivamente, así como la magnitud de algunos de estos.

Flujos de agua y suelo atreves de las grietas, en calles y viviendas, en un área pequeña del municipio de Villa de Álvarez. En este mismo municipio se presentaron asentamientos súbitos y hundimientos en los patios de casas, localizadas en zonas donde antiguamente se hallaban viejas minas de arena.

En las poblaciones de Cerro de Ortega, Colima y Coahuayana, Michoacán. Los pobladores describieron: ruidos provenientes del subsuelo, con un repentino flujo de agua y suelo atreves de pequeños volcancitos y grietas que se formaron en el terreno.

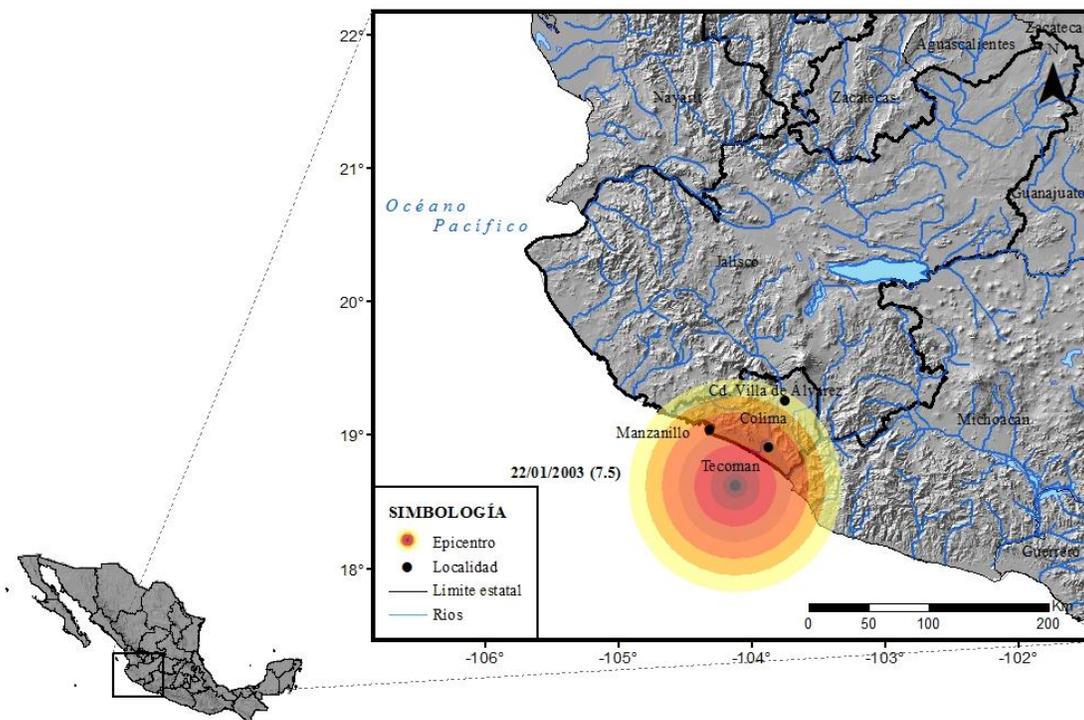


Fig 2. 26 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Colima, 2013

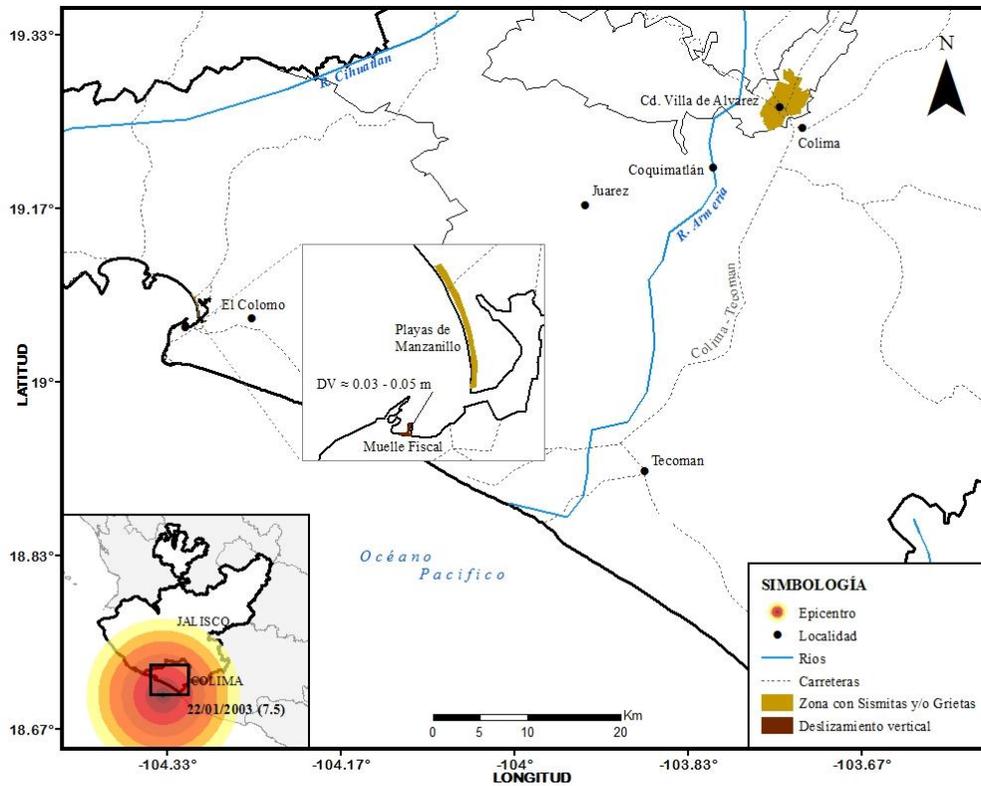


Fig 2. 27 Mapa de desplazamientos verticales registrados durante el evento del 22/01/2003

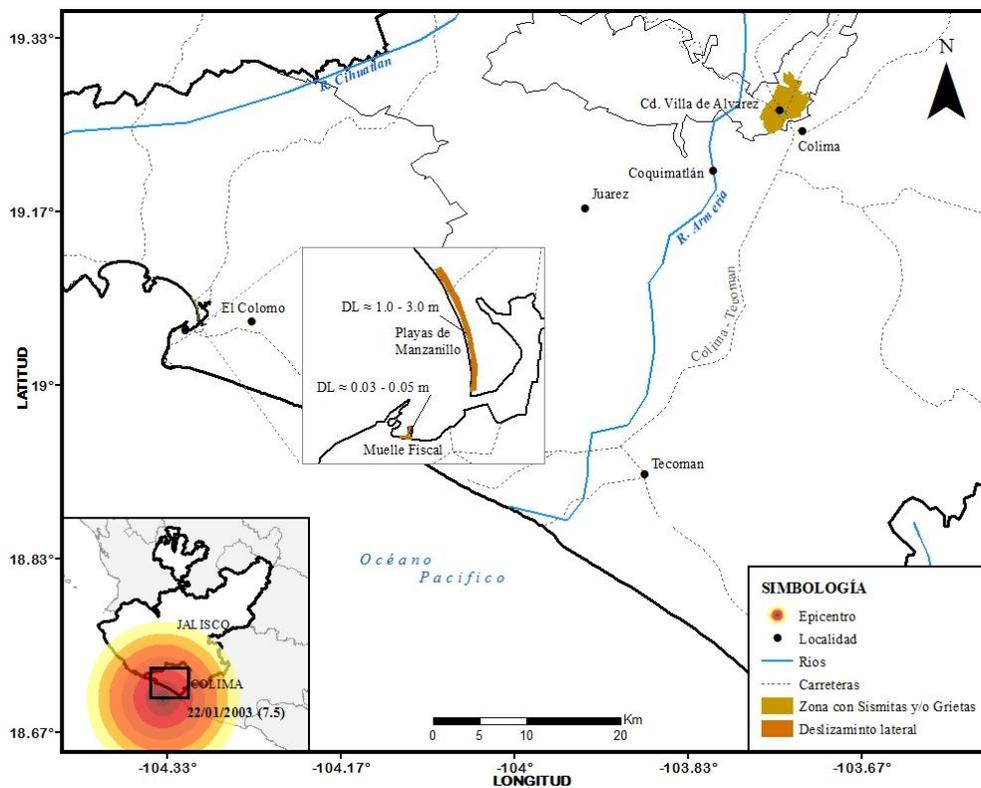


Fig 2. 28 Mapa de desplazamientos laterales registrados durante el evento del 22/01/2003.

2.13. Baja California (2010)

2.13.1. Geología

La ciudad de Mexicali se encuentra enclavada en un amplio valle de origen tectónico formado por sedimentos producto del material depositado por el Río Colorado y los abanicos aluviales de la Sierra Cucapah, compuestos por gravas, arenas y arcillas que alcanzan una profundidad de hasta 2500 metros. Estos sedimentos descansan sobre un paquete arcilloso representado por lutitas grises con intercalaciones de areniscas, lutitas cafés del Terciario y lodolitas, con un espesor promedio de 2700 m, que subyacen sobre el basamento, el cual está compuesto por granitos del Cretácico (Lira, 2005). (CENAPRED, 2011)

2.13.2. Descripción del evento

El sábado 4 de abril de 2010, a las 3:40 pm hora local, un sismo de $M_w=7.2$ grados ocurrió en el norte de Baja California con epicentro en 32.259 N, 115.287W a una distancia de 47 km de Mexicali, Fig 2.34, con una profundidad de unos 10 km y una aceleración de la superficie del suelo mayor a los 0.4g. “El Sismo del Mayor Cucapah”, como se le denominó a este sismo, fue sentido en Baja California y en el sur de California, Nevada, Arizona, EUA.

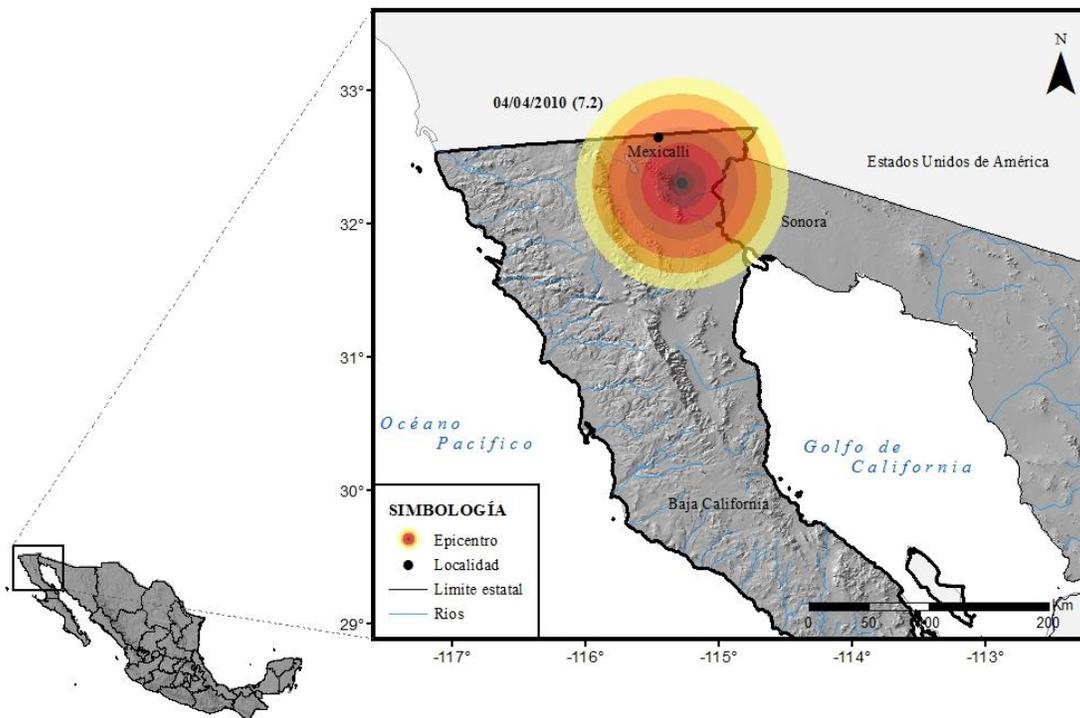


Fig 2. 29 Localización del epicentro y estados mexicanos colindantes, Mexicali, 2010.

2.13.3. Evidencia de licuación:

Los daños más significativos del sismo de EL Mayor-Cucapah fueron ocasionados por un extenso fenómeno de licuación en el valle de Mexicali. Las localidades principalmente afectadas fueron el Valle de Mexicali, Nayarit, Oaxaca, Zacamato, Cucapah, Nuevo Leon

En reportes elaborados por diversas dependencias (CENAPRED, ERN y EERI), se describen daños en carreteras, zonas agrícolas y canales, por grietas, volcanes, desplazamientos laterales y verticales inducidos licuación. Se reportaron daños por inundación debida a la expulsión de agua y arena por volcanes consecuencia de la licuación.

En el Valle de Mexicali grietas en las calles y carreteras mostraban desplazamientos de entre 0.5 y 1.0 m, Fig 2.35, en las instalaciones de la UABC losas de base se asentaron por debajo de las estructuras a razón de 0.1 a 0.5 m, Fig 2.36.

En el puente del ferrocarril que atraviesa el rio colorado las márgenes del rio se deslizaron hacia el interior del rio, la margen este 5m y la margen oeste 1m, Fig 2.35. Desplazamientos laterales y grietas en canales de riego, en Cucapah se observaron grietas de más de 1m, así como desplazamientos de aproximadamente 0.5 m en canales de Cucapah y Zacamato.

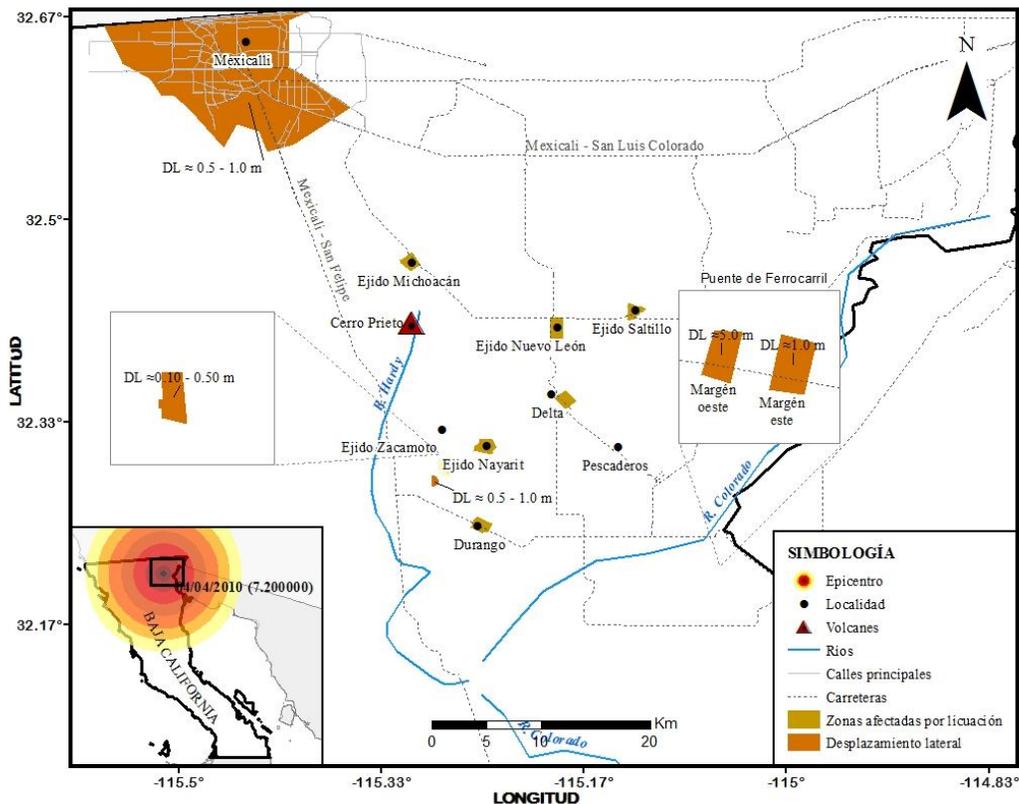


Fig 2. 30 Mapa de desplazamientos laterales registrados durante el evento del 04/04/2010

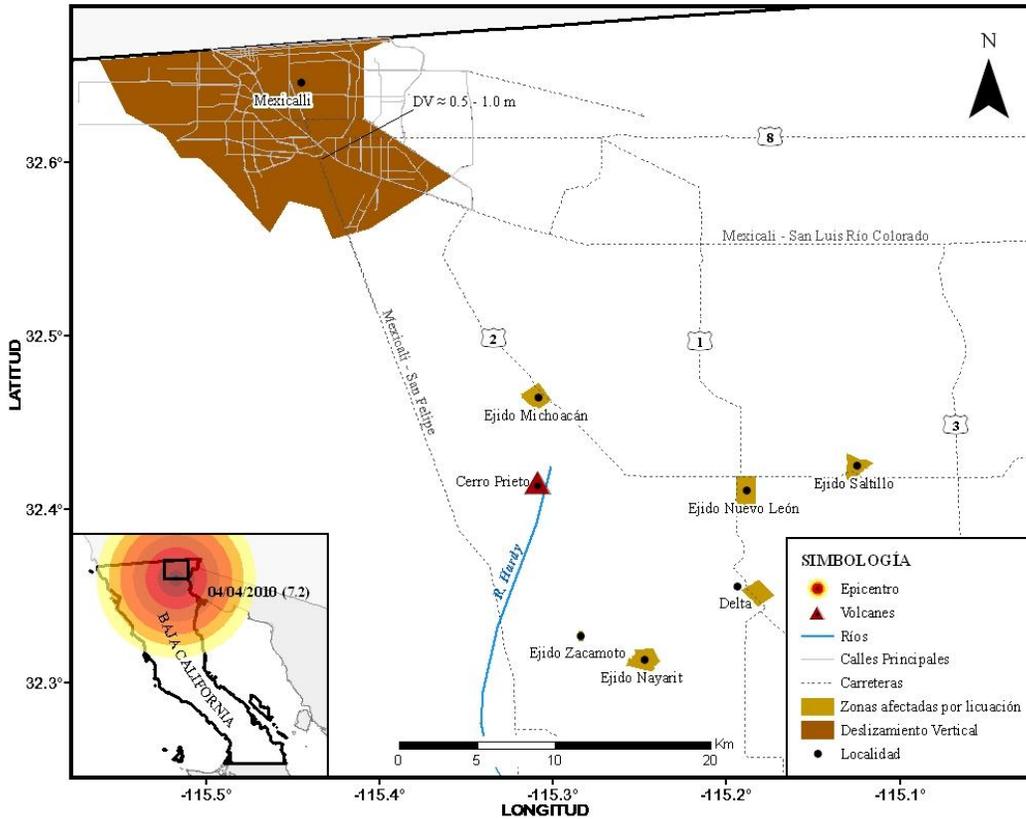


Fig 2. 31 Mapa de desplazamientos verticales registrados durante el evento

Los eventos de licuación descritos nos muestran la capacidad destructiva de este fenómeno en la República Mexicana, y los riesgos a los que se encuentran expuestas zonas donde se ha presentado licuación en más de una ocasión, haciendo evidente la necesidad de aplicar una metodología que nos permita conocer no solo la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, sino también las magnitudes probables de los desplazamientos laterales y verticales que inducidos por la presencia del fenómeno de licuación en el país.

Capítulo 3

Metodología para la estimación de la demanda de licuación

El impacto del fenómeno de licuación en la República Mexicana, a lo largo de su historia, refleja con claridad que existen zonas del país que tienen una elevada tendencia a repetir el fenómeno de licuación, mientras otras zonas tienen evidencias del fenómeno de poca magnitud. Esto implica que en la República Mexicana el fenómeno de licuación podrá presentarse en eventos sísmicos futuros con igual o mayor magnitud que en eventos anteriores, haciendo necesaria la estimación de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno, esto en términos de los posibles desplazamientos laterales y verticales que se puedan presentar en eventos futuros, a través de una metodología que nos permita estimarlos.

3.1. Descripción

Bird *et al.* (2006), mencionan que la estimación de pérdidas por sismo es un conjunto de procedimientos utilizado para cuantificar las pérdidas potenciales en una región determinada debido a sismos futuros, transportando esta afirmación a un fenómeno más específico como la licuación, indica que la estimación de pérdidas por licuación es una técnica para estimar las posibles pérdidas que generarán eventos de licuación producto de sismos futuros.

En general las metodologías para estimar las pérdidas por licuación están conformadas por tres etapas:

- Determinar la susceptibilidad del suelo a licuarse, haciendo uso de criterios cualitativos.
- La probabilidad de que un evento sísmico dado tenga las características necesarias para desencadenar el fenómeno de licuación.

- Determinar la demanda de licuación en términos del desplazamiento del suelo esperado.

3.1.1. Determinar la susceptibilidad del suelo a licuarse

El principal problema que se tiene para estudiar la amenaza de licuación es la falta de información detallada del sitio de interés, sin embargo, con la información disponible (carta geológica de México (SGM, 2007), y características geotécnicas del suelo), es posible tener estimaciones aproximadas que nos permitan identificar las zonas con alto riesgo. (Reinoso *et al.*, 2011).

Para generar un mapa de susceptibilidad del suelo a la licuación, se hace uso de un método cualitativo como el propuesto por Youd y Perkins (1978), que utiliza como base la tabla de Estimación de susceptibilidad en depósitos sedimentarios a licuación durante movimientos sísmicos fuertes (Tabla 1.1) y de mapas geológicos detallados, considerando que la susceptibilidad a la licuación es independiente de la sismicidad de la región. Los autores consideran esta metodología como una guía útil para la estimación preliminar y generalizada usada en la generación de mapas regionales de susceptibilidad a licuación.

En esta tesis se toma como base parte de la información de la Tabla 2.2 y la información obtenida de la carta de geológica de México (SGM, 2007), tomando en cuenta principalmente la edad de los suelos, depósitos de menos de 500 años y aquellos correspondientes al Holoceno, y el tipo de depósito, zonas de playa o depósitos de ríos de baja energía son más susceptibles a licuación. Tomando en cuenta esto, se utilizó información de la litología georreferenciada del país para tomar zonas correspondientes al Holoceno, específicamente suelos de Aluvión Cuaternario (Qhoal), en el mapa de la Fig.2.3 se observan las zonas de la República Mexicana con probabilidad de presentar licuación.

3.1.2. Probabilidad de que un evento sísmico desencadene el fenómeno de licuación

Tomando en cuenta el punto anterior, cuando una zona es susceptible a licuación, el siguiente paso es determinar la probabilidad de que un sismo dado tenga las características que permitan el desencadenamiento del fenómeno de licuación.

Actualmente no existe una metodología que pueda predecir un evento sísmico, por tal motivo, no es posible determinar la ocurrencia exacta de un evento de licuación producto de un sismo, pero es posible calcular un conjunto de escenarios estocásticos, con una frecuencia de ocurrencia determinada y correspondientes a un número significativo de sismos de diferente magnitud y con epicentros distintos (Jaimes *et al.*, 2011). Para esto se hace uso del programa CRISIS 2007 desarrollado por Ordaz *et al.*, (2000) que emplea

parámetros de sismicidad histórica registrada, cubriendo la totalidad de la República Mexicana conservando condiciones de sismicidad y variación regional.

3.1.3. Estimación de demandas en términos del desplazamiento lateral del terreno.

Al cumplirse los puntos anteriores, que el terreno sea susceptible y que exista una posibilidad de que un evento sísmico desate el fenómeno de licuación, es necesario aplicar un método que permita determinar el potencial de licuación de una zona.

Para determinar las demandas de licuación, es necesario establecer los términos en los que quedarán expresadas dichas demandas, es decir, la cantidad de daños o pérdidas generadas por licuación, expresadas en términos de deformaciones permanentes del suelo como desplazamientos laterales y verticales, es decir que se requiere de un método que permita estimar la magnitud de estos desplazamientos.

3.1.3.1. Métodos para la estimación de las demandas de licuación

Los métodos para la estimación de la demanda de licuación usan diferentes enfoques y variables inciertas, pero ninguna de estas es rotundamente superior o más eficaz que las otras, debido a la existencia de diversos mecanismos que pueden llegar a detonar el inicio del fenómeno de licuación.

En general, los métodos más usados se basan en el uso de datos empíricos y no permiten el análisis de grandes deformaciones, debido a que son sensibles a las pequeñas variaciones en los parámetros de entrada. Algunos de los métodos que se basan en el uso de datos empíricos tienen como ventaja la fácil obtención de algunos de sus parámetros, así como la facilidad de inferir otros. Una desventaja de estos métodos se encuentra en el límite de aplicación, ya que son válidas únicamente en las zonas en las que se realizó el análisis inicial.

La manera de elegir el método a usar es tomando en cuenta las necesidades del proyecto, lugar e información con la que se cuenta, el "*Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*", (Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1993), proporciona una clasificación de los métodos existentes dividiéndolos en tres grados, los cuales tienen como base los parámetros utilizados en estas, sus aplicaciones y sus desventajas.

GRADO I

Basados en datos preexistentes de fuentes publicadas. Se clasifico a su vez en dos tipos:

- i) Evaluación de la extensión máxima de la superficie susceptible de licuación. Las metodologías se basan en el uso de la relación entre la magnitud y la distancia máxima a la fuente del sismo.

- Youd y Perkins (1978). Distancia horizontal de la fuente del sismo a la ubicación más alejada, definida por ellos como la zona donde la licuación ha causado un daño significativo (100 mm de desplazamiento).
 - Ambraseys (1988). Distancia horizontal desde la zona de la falla hasta la última manifestación de licuación.
- ii) Estimación de la susceptibilidad a la licuación basándose en datos preexistentes. Ésta a su vez utiliza dos criterios para su valoración.
- Criterio geológico y geomorfológico, basado en un análisis muy somero de las formaciones existentes en la región a estudiar.
 - Liquefaction Severity Index (LSI) es una medida de la intensidad o daño potencial de los efectos del fenómeno de licuación, en particular de depósitos del Holoceno tardío, de pendiente suave en llanuras de inundación, depósitos fluviales o deltas. En síntesis el LSI es el máximo desplazamiento horizontal en un deslizamiento lateral medido en pulgadas (25 mm). (Youd y Perkins, 1987)

GRADO II

A diferencia de los de GRADO I, estos también incluyen datos de fuentes privadas, es decir, datos no publicados. Como información adicional manejan fotografías aéreas, estudios de campo y entrevistas. El criterio usado principalmente por estas metodologías es:

- i) Geológico y geomorfológico para la estimación del potencial de licuefacción, este criterio permite identificar áreas con alto potencial de licuación, acorde con la información obtenida de investigaciones geológicas y geomorfológicas de un sitio específico, tomando en cuenta los siguientes puntos:
- La correlación entre las unidades geomorfológicas y las propiedades geotécnicas del suelo.
 - La identificación de los antiguos cauces.
 - Las condiciones del agua subterránea, como el nivel de aguas freáticas.

Youd y Perkins (1978) es un ejemplo de esta tipo de métodos.

GRADO III

Basados en estudios geotécnicos de sitio y apoyados en modelos de grado I y II. Son mucho más específicos y minuciosos ya que toman en cuenta las características de sitio, basándose en dos criterios:

- i) Evaluación in situ, tomando como base, la información la obtenida de pruebas de penetración:
- SPT, Procedimiento simplificado de Seed e Idriss (1971). Procedimiento simplificado adoptado Japanese Highway Bridge Code, Criterio Chino para la evaluación de licuefacción.
 - CPT
- ii) Evaluación de efectos de licuación, de acuerdo a dos criterios.
- Daños presentes en una capa superior no licuable o en la corteza
 - Liquefaction potential index (Iwasaki *et al.*, 1982)

Capítulo 3 Metodología para la estimación de la demanda de licuación

La clasificación anterior permite hacer un reconocimiento general de los métodos para poder localizar los que de acuerdo a su grado se ajustan a nuestro análisis; tomando en cuenta esta clasificación y la siguiente tabla 3.1, donde se describen de manera somera algunos métodos empíricos que son considerados confiables (Bird *et al.*, 2006), podemos elegir el método más adecuado.

Tabla 3. 1 Selección de métodos para determinar deformaciones permanentes del suelo inducidas por licuación. (Bird *et al.*, 2006)

Referencia	Descripción	Variables de parámetros de entrada
I. Deformación lateral del suelo		
Zhang y Zhou, 2005	Predicción empírica de deslizamientos laterales inducidos por licuación	
Youd <i>et al.</i> , 2002	Ecuación obtenida de regresiones lineales múltiples con datos empíricos.	M, R, T15, (N1)60, FC, D50
Bardet <i>et al.</i> , 2002	Regresión lineal múltiple de datos empíricos.	M, R, T15, slope (S)
Youd y Perkins, 1978	Ecuación del índice de intensidad de licuación (LSI), definido como el máximo desplazamiento lateral en pulgadas, $0 < LSI < 100$	M, R
Rauch y Martin, 2000	Predicción empírica del desplazamiento lateral por licuación, EPOLLS (Empirical Prediction of Liquefaction Lateral Spreading)	i) M, R, PGA, duración. ii) M, R, PGA, duración, Lslide, Stop, Hface, iii) M, R, PGA, duración, Lslide, Stop, Hface, ZFSmin, Zliq
II. Asentamientos		
Takimatsu y Seed, 1987	Resultado de pruebas de laboratorio y datos empíricos	(N1)60, CSR, FC
Ishihara y Yoshimine, 1992	Relación entre el factor de seguridad F1, la densidad y la deformación volumétrica.	F1, N1, FC
III. Combinación de movimiento lateral y vertical		
Shamoto <i>et al.</i> , 1998	Deformación volumétrica y cortante	T/σ' , Na, FC

Dentro de las metodologías de la tabla anterior se encontró que por sus ventajas y por su precisión los modelos EPOLLS (2000), los métodos de Tokimatsu y Seed (1987) e Ishihara y Yoshimine (1992) son las más viables para la estimación de desplazamientos

Bird *et al.*, (2006), destaca como ventajas de la metodología EPOLLS, los tres niveles de relaciones empíricas o niveles de conocimiento, estos niveles se relacionan con la cantidad de información con la que se cuente para realizar la estimación y la obtención de un promedio del desplazamiento máximo; en cuanto a las metodologías de Tokimatsu y Seed (1987) e Ishihara y Yoshimine (1992), éstas se basan en la estimación de desplazamientos verticales por cambios de volumen debido a disipación de la presión de poro del agua; una ventaja de éstas la una precisión con un factor de dos a tres que se obtiene.

Es importante notar que no existe dentro de las metodologías anteriores un procedimiento 100% confiable para la estimación de desplazamientos laterales o verticales, por lo tanto

como se mencionó antes se toman las metodologías que más se adecuan a las necesidades, características y cantidad de información.

3.1.3.1.1. Método EPOLLS (Empirical Prediction of Liquefaction Lateral Spreading)

El modelo Predicción empírica del desplazamiento lateral por licuación EPOLLS fue desarrollado para la predecir la magnitud de las deformaciones del suelo debidas a un desplazamiento lateral por licuación inducido por un sismo. Aclarando que este modelo no debe ni puede usarse para predecir donde ocurrirá o si se desarrollara un deslizamiento lateral. (Rauch y Martin, 2000)

El modelo EPOLLS da una definición de deslizamiento lateral a la cual se puede aplicar, como un movimiento de bloques del suelo sobre capas de suelo licuado con una pendiente de menos del 5%, excluyendo fallas del suelo producto de la licuación que generan patrones similares en la superficie del suelo. Ejemplos, fallas por hundimiento en aceras o carreteras provocadas por licuación, producen deformaciones laterales que a menudo son identificadas como desplazamientos laterales. También entre las fallas no incluidas se encuentran las fallas de flujo profundas, rotación de muros de contención, provocadas por licuación.

Los deslizamientos potenciales se pueden estimar para un sismo dado, con base en la topografía y geología del sitio, haciendo uso de parámetros de tipos sismológico, topográfico y geológico, aunque no requiere de un amplio conocimiento de las condiciones del sitio para la estimación de los desplazamientos del suelo (capítulo 2).

EPOLLS predice el promedio del desplazamiento horizontal en un sitio, esto es el promedio del movimiento de la superficie dentro de los límites dados por el desplazamiento lateral. Sus predicciones no son para un punto específico del desplazamiento.

El primer paso para el uso del EPOLLS es la evaluación del potencial de licuación de una zona de suelo para un evento sísmico, basado en el conocimiento de sus condiciones geológicas, luego si la licuación se espera sobre un área y sus condiciones topográficas permitirán el desarrollo de un desplazamiento lateral, la metodología se puede aplicar.

El modelo emplea tres ecuaciones complementarias correspondientes a modelos específicos basados en tres diferentes niveles de información del sitio. Para la estimación de desplazamientos horizontales potenciales, estos niveles permiten que con una cantidad de datos disponibles sea posible realizar la estimación, en el caso de poder obtener datos adicionales, la predicción será mejor, es decir, que el modelo mejora la estimación proporcionalmente a la cantidad de información que se tenga del sitio (Figura 3.1). Los componentes utilizados por el EPOLLS son:

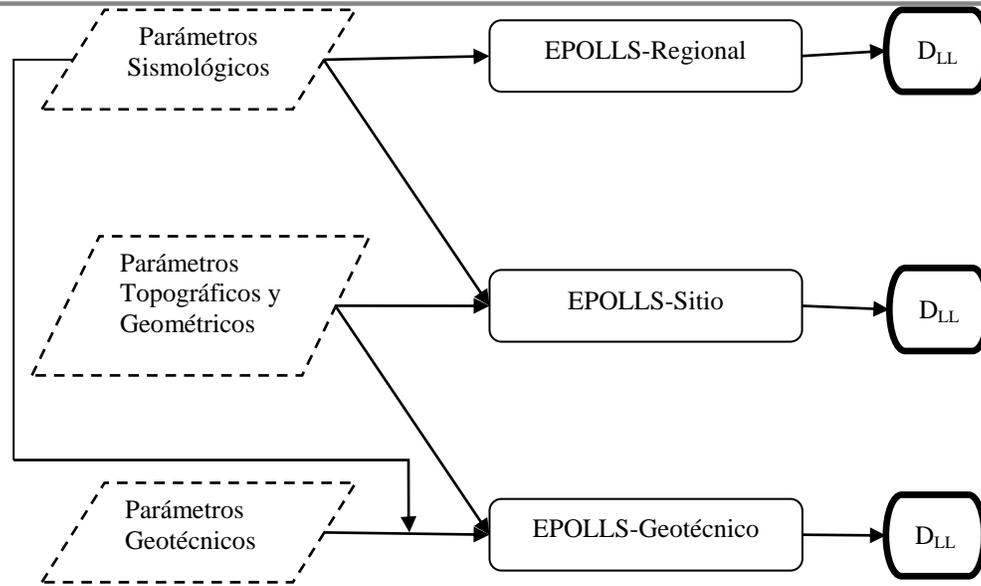


Fig 3. 1 Diagrama de flujo de los datos de entrada usados en cada componente del modelo EPOLLS (Rauch, 1997)

1. EPOLLS-Regional, consistente con un nivel general de información disponible para una estimación de peligro regional, requiere datos de la fuente e intensidad local del sismo (MW , PGA , R , D). Los parámetros utilizados en esta componente permiten tener en apariencia una mejor representación de la intensidad del sismo y son medidos con facilidad, ejemplo es la magnitud momento (MW) que da una medida más fiable de la energía sísmica que la magnitud de onda de la superficie (MS). El modelo de la componente Regional del EPOLLS queda representado en la ecuación 3.1.

$$D_{LL} = [0.613M - 0.0139R - 2.42a_{max} - 0.0114D]^2 + 0.149 \quad (3.1)$$

Donde D_{LL} es el desplazamiento horizontal promedio (m); M es la magnitud del sismo; R es la distancia del sitio en estudio al epicentro del área de ruptura (km); a_{max} es la aceleración máxima del suelo (g , aceleración de la gravedad); D es la duración de la fase intensa en el sitio (segundos).

2. EPOLLS-Sitio, esta componente mejora la predicción la estimación deslizamientos horizontales en sitios de estudios específicos, ayudado de datos topográficos y de dimensiones de un área donde se haya anticipado deslizamiento; pero no necesita de parámetros que describan a detalle las condiciones de la superficie del suelo. Los parámetros del Regional-EPOLLS se mantienen junto con sus coeficientes y se suman tres nuevos parámetros: la pendiente promedio (S_{TOP}), la altura de cara libre (H_{FACE}) y la longitud máxima del deslizamiento (L_{SLIDE}); estos parámetros se eligieron por la facilidad con que pueden ser determinados con respecto a otros parámetros. Ecuación 3.2.

$$D_{LL} = \left[\begin{array}{l} 0.613M - 0.0139R - 2.42a_{max} - 0.0114D + 0.000523L_{SLIDE} \\ +0.0423S_{TOP} + 0.0313H_{FACE} - 2.44 \end{array} \right]^2 + 0.111 \quad (3.2)$$

Donde L_{SLIDE} es la longitud máxima de desplazamiento lateral en la dirección del movimiento (m); S_{TOP} es la pendiente promedio transversal del desplazamiento lateral (%), H_{FACE} es la altura de cara libre (m).

3. EPOLLS-Geotécnico, esta componente toma en cuenta los parámetros de los modelos anteriores y hace uso de datos de exploraciones realizadas en sitio que estén disponibles, haciendo uso de los datos obtenidos de dichas exploraciones esta componente refina la estimación de desplazamientos horizontales. En este modelo se adicionan: Z_{FSmin} que es la profundidad promedio para contar con un factor de seguridad mínimo en suelos potencialmente licuables (m) y Z_{liq} es la profundidad a la capa superior de suelo licuable, estos parámetros son los que Rauch y Martin, consideraron más representativos de las características geotécnicas del suelo. Ecuación 4.3.

$$D_{LL} = \left[\begin{array}{l} 0.613M - 0.0139R - 2.42a_{max} - 0.0114D + 0.000523L_{SLIDE} \\ +0.0423S_{TOP} + 0.0313H_{FACE} + 0.0506Z_{FSmin} - 0.0861Z_{liq} + 2.49 \end{array} \right]^2 - 0.124 \quad (3.3)$$

El modelo EPOLLS cuenta con ventajas importantes sobre otras metodologías, como se menciono anteriormente, una es que da como resultado un promedio del desplazamiento horizontal esperado, que resulta ser más útil en los estudios de estimación del potencial de perdidas, y es por tanto considerado uno de los métodos más útiles. Sin embargo el modelo cuenta con limitaciones como es la localización de los casos de estudio de su base de datos ya que estos se encuentran en la costa oeste de Norte América y el este de las islas de Asia, según sus autores la fiabilidad de las estimaciones para otras regiones es desconocida.

3.1.3.1.2. Método de Tokimatsu y Seed (1987)

Es un método de análisis simplificado propuesto para la estimación de asentamientos probables en arenas saturadas y no saturadas debidos sismo. De acuerdo a esta metodología, los factores que principalmente intervienen en el desarrollo de asentamientos en arenas saturadas son la relación de esfuerzos cíclicos (CSR) y la densidad relativa (D_r). Considera también que los asentamientos son producto de la aplicación de cargas cíclicas a las arenas.

La metodología consiste en la obtención de la relación de esfuerzos cíclicos, considerada la expresión representativa de la resistencia de las arenas a la licuefacción, por medio de la siguiente ecuación:

$$CSR = \left(\frac{\tau_{SV}}{\sigma'_{vo}} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (3.4)$$

donde a_{max} es la aceleración máxima del suelo en el sitio, g es la aceleración de gravedad, τ_{SV} es el promedio del esfuerzo cortante cíclico inducido por el movimiento del sismo, σ_{vo} es el esfuerzo vertical total referido a la superficie del suelo, σ'_{vo} es el esfuerzo

vertical efectivo referido a la superficie del suelo y r_d es un factor de reducción de esfuerzo dado por Idriss (1999), ec. 3.5, donde z es la profundidad en m y M_w es la magnitud momento.

$$r_d = e^{\left\{ \left[-1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{z}{11.73} + 5.133\right) \right] + M_w \left[0.106 + 0.118 \sin\left(\frac{z}{11.28} + 5.142\right) \right] \right\}} \quad (3.5)$$

El siguiente paso consiste en obtener la densidad relativa de la arena, con el valor N obtenido de la SPT se obtiene el valor de la densidad relativa, usando la relación de Meyerhof (1957):

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N_j}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (3.6)$$

Donde σ'_v es la presión de sobrecarga efectiva en $\frac{kg_f}{cm^2}$, N_j es el valor N medido según los estándares japoneses. De la expresión anterior, se expresa como N_1 el valor de N_j correspondiente a la sobrecarga de presión de $1 \frac{kg_f}{cm^2}$, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N_1}{1.7}} = 16 \sqrt{N_1} \quad (3.7)$$

Donde N_1 se obtiene según Tokimatsu y Yoshimi (1983) de la siguiente forma:

$$N_1 = C_N N = \frac{1.7}{\sigma'_v + 0.7} N \quad (3.8)$$

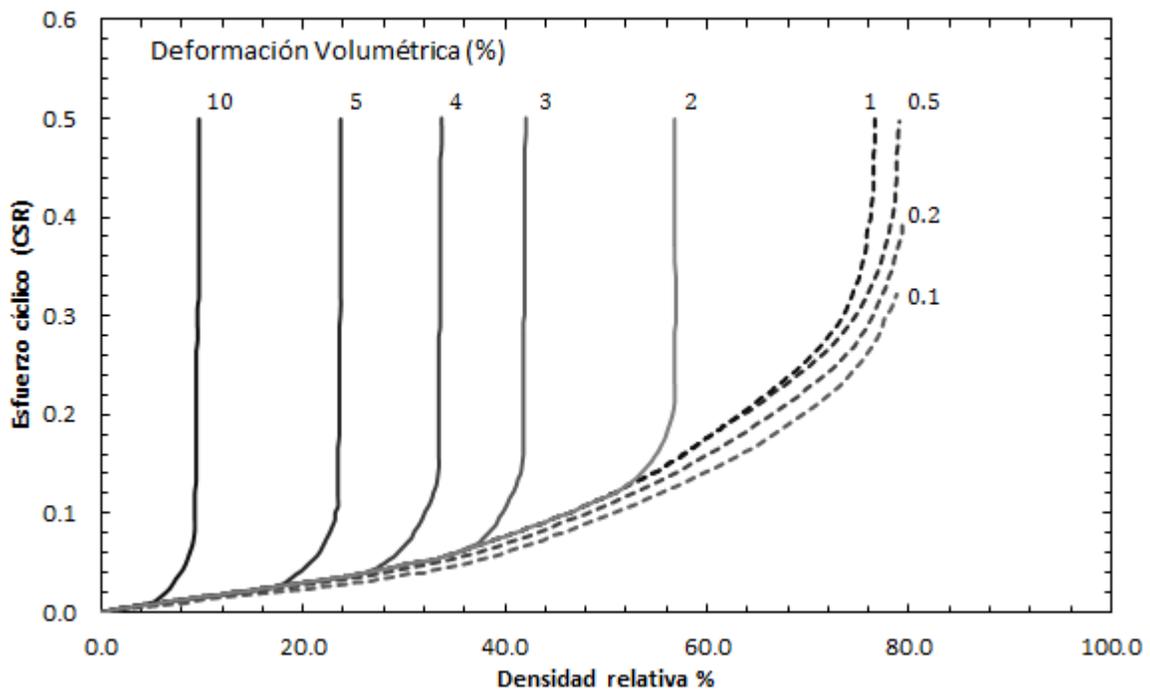


Fig. 3. 2 Deformación volumétrica de arena saturada en función de la relación de esfuerzo cíclico (CSR) y la densidad relativa (Tokimatsu and Seed, 1987)

Posteriormente, teniendo en cuenta la relación que existe entre estos parámetros, el siguiente paso es usar la gráfica de la Fig. 3.2, y obtener el valor de la deformación volumétrica

3.1.3.1.3. Método de Ishihara y Yoshimine

Ishihara y Yoshimine (1992) usaron esta metodología para estimar los asentamientos en varios sitios devastados por licuación durante el sismo de 1964 en Niigata, Japón. Desarrollaron este estudio como alternativa a los anteriores métodos, tomando en cuenta la densidad de las arenas y el esfuerzo cortante máximo desarrollado por la aplicación de una carga cíclica, adicionalmente, agregaron a su estudio el factor de seguridad contra licuación.

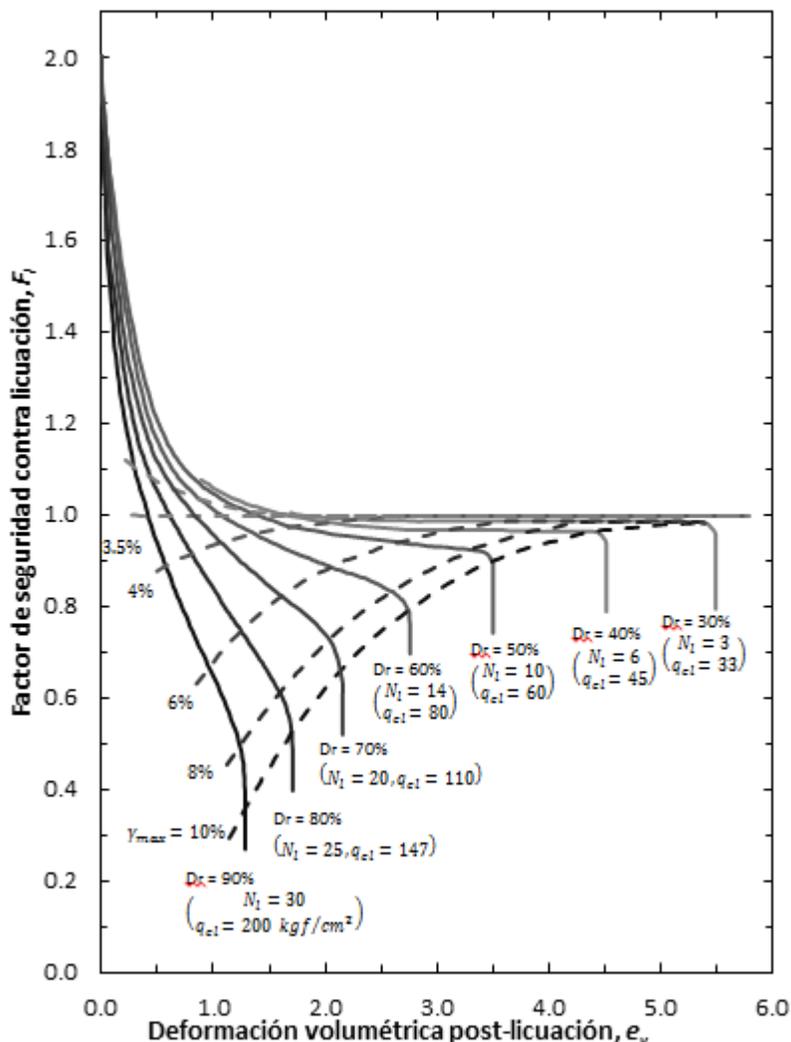


Fig 3. 3 Deformaciones volumétricas en función del factor de seguridad para licuación (Ishihara y Yoshimine, 1992)

En este estudio realizaron pruebas a arenas saturadas con un aparato de corte simple, con lo cual obtuvieron dos familias de curvas una que relaciona el cambio volumétrico

post-licuación con la magnitud del esfuerzo cortante máximo y otra que relaciona el factor de seguridad para licuación con el esfuerzo cortante máximo. Con la combinación de estas curvas generaron una gráfica en la que se relacionan la deformación volumétrica post-licuación con el Factor de Seguridad, eliminando de esta forma, la necesidad de usar el esfuerzo cortante máximo como parámetro de entrada. (Fig 3.3.)

Para la estimación de asentamientos con este método, es necesario que la densidad relativa y el factor de seguridad contra licuación sean conocidos. Es importante decir que esta metodología es aplicable únicamente para suelos constituidos predominantemente por arenas, ya que en suelos con contenido de finos los resultados serían dudosos. La metodología consta de tres pasos a seguir para la estimación de asentamientos:

1. Evaluar el factor de seguridad contra licuación, F_l , para cada capa de depósito de arena en un sitio dado, considerando la información de la intensidad del sismo en términos de la aceleración y de la densidad de arena en el depósito. Evaluar el Factor de Seguridad acorde al procedimiento descrito en el artículo de Seed *et al.* (1983).
2. Con el Factor de Seguridad y empleando la Fig 3.3 determinar la deformación volumétrica post-licuación, ε_v , para cada capa en el depósito de arena tomando los valores conocidos de N_1 o q_{c1} .
3. Estimar las deformaciones y sumar el producto del espesor de cada capa por el valor de la deformación volumétrica respectivo, con lo que se obtiene el valor de asentamiento en la superficie del suelo resultado de la disipación de la presión de poro inducido por un sismo.

Es importante reconocer que en el campo ingenieril resulta ser más importante optar por un análisis efectivo más que por un estudio sofisticado, el uso de metodologías sofisticadas se vuelve inapropiado debido a las limitaciones y complicaciones de modelos numéricos y analíticos. Para la realización de la estimación de movimientos laterales, se hace necesario el uso de un modelo que se adapte a las necesidades de este estudio, por tanto se considera que el modelo EPOLLS de Rauch y Martin, 2000, un modelo empírico, tiene las características necesarias para llevar a cabo este estudio.

Por otra parte los métodos disponibles para la estimación de desplazamientos verticales inducidos por sismo han sido desarrollados en laboratorio, es decir no forma parte de ellos la observación o interpretación de datos de campo. Por lo cual las estimaciones de asentamientos son relativamente difíciles de realizar. Al comparar las características de los métodos de Tokimatsu y Seed (1987) e Ishihara y Yoshimine (1992) se decidió que en esta tesis se usara la metodología de Tokimatsu y Seed ya que permite una obtención más efectiva y precisa de los parámetros de entrada y es posible realizar una adaptación del mismo a un sistema de cómputo.

3.2. Metodología para la obtención de mapas de desplazamiento horizontal del suelo debido a licuación

En esta tesis se toma la metodología propuesta por Jaimes *et al.*, (2011), metodología que consta de 6 pasos y el uso del método EPOLLS (Rauch y Martin, 2000), para la generación de mapas de desplazamientos horizontales a nivel regional.

1. Identificar las regiones del país con depósitos del Holoceno que presentan mayor susceptibilidad a presentar el fenómeno de licuación.
2. Elaborar un escenario sísmico dada una magnitud y distancia.
3. Estimar para un sitio de interés la $a_{m\acute{a}x}$ dada por una ley de atenuación para la magnitud y distancia requerida.
4. Estimar para el mismo sitio la duración del movimiento aplicando las ecuaciones 1.13 y 1.14 para la misma magnitud y distancia.
5. Obtener el valor del desplazamiento lateral debido a licuación, reemplazando los valores de los pasos 3 y 4 en la ecuación 3.1 para una magnitud y distancia dada.
6. Obtener un mapa regional de desplazamiento horizontal D_{LL} debido a un solo escenario se repiten los pasos 2 a 6 para diferentes sitios.

Con los pasos anteriores, es posible obtener un mapa regional de desplazamiento horizontal anual esperado para cada sitio, considerando todo el conjunto de escenarios que afectan al sitio como la suma del producto entre el desplazamiento horizontal esperado para determinado evento, y la frecuencia de ocurrencia de dicho evento en un periodo de un año, para todos los eventos estocásticos considerados, es decir

$$D_{LLAE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(D_{LL}|Eventoi)F_A(Eventoi) \quad (3.9)$$

donde D_{LLAE} es el valor anual esperado de desplazamiento horizontal del suelo debido a licuación, $E(D_{LL}|Eventoi)$ es el valor esperado del desplazamiento del suelo debido a licuación y limitado por la ocurrencia del evento y $F_A(Eventoi)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del evento.

Se requiere conocer el tiempo de espera asociado a los eventos que pueden generar los desplazamientos estimados. Este tiempo o periodo de retorno se expresa como:

$$T_r = \frac{1}{v(d_{ll})} \quad (3.10)$$

Entonces se obtiene la tasa de excedencia de los desplazamientos laterales que es el número medio de veces, por unidad de tiempo, en que el valor de el desplazamiento dado es excedido. Es decir,

$$v(d_{ll}) = \sum_{i=1}^{Eventos} D_{LLAE} P_r(D_{LL} > d_{ll}|I) \quad (3.11)$$

donde $v(d_{ll})$ tasa de excedencia del desplazamiento lateral, $P_r(D_{LL} > d_{ll}|I)$ es la probabilidad de que desplazamiento lateral estimado (D_{LL}) sea mayor que desplazamiento lateral establecido (d_{ll}), I ocurrencia del i -ésimo evento.

Al final de este proceso se obtiene un mapa regional de desplazamiento horizontal del suelo asociado aun periodo de retorno.

3.3. Metodología para la obtención de mapas de desplazamiento vertical del suelo debido a licuación.

De forma similar en el articulo de Jaimes *et al.*, (2011) se describe una metodología para la estimación de desplazamientos verticales debidos a licuación a partir de seis pasos y empleando el método de Tokimatsu y Seed (1987).

1. Localizar zonas con alta susceptibilidad a desarrollar el fenómeno de licuación.
2. Asignar propiedades al suelo (σ'_0, σ_0 , densidad relativa) basados en la literatura técnica y en estudios disponibles de mecánica de suelos.
3. Estimar la relación de esfuerzos cíclicos CSR utilizando la expresión ec. 3.4.
4. Estimar la deformación volumétrica, ε_v , usando la Fig.3.2 y tomando como parámetros de entrada el valor del CSR calculado en el paso anterior y el valor de la densidad relativa del estrato.
5. Evaluar las deformaciones multiplicando el valor de la deformación volumétrica obtenido en el paso 4 por el espesor del estrato de suelo susceptible de licuarse.
6. Para obtener el mapa regional de desplazamiento vertical debido a un solo escenario se repiten los pasos 2 a 6 para diferentes sitios.

Análogamente a la metodología anterior, para obtener el desplazamiento vertical anual esperado para un determinado evento ocupamos la siguiente expresión:

$$D_{LLAE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(D_{LL}|Eventoi)F_A(Eventoi) \quad (3.12)$$

donde D_{LVAE} es el valor anual esperado de desplazamiento horizontal del suelo debido a licuación, $E(D_{LV}|Eventoi)$ es el valor esperado del desplazamiento del suelo debido a licuación y limitado por la ocurrencia del .

Se requiere conocer el tiempo de espera asociado a los eventos que pueden generar los desplazamientos verticales estimados. Este tiempo o periodo de retorno se expresa como:

$$T_r = \frac{1}{v(d_{lv})} \quad (3.13)$$

Entonces obtenemos la tasa de excedencia de los desplazamientos verticales. Es decir,

$$v(d_{lv}) = \sum_{i=1}^{Eventos} D_{LVAE} P_r(D_{LV} > d_{lv}|I) \quad (3.14)$$

donde $v(d_{lv})$ tasa de excedencia del desplazamiento lateral, $P_r(D_{LV} > d_{lv}|I)$ es la probabilidad de que desplazamiento lateral estimado (D_{LV}) sea mayor que

desplazamiento lateral establecido (d_{lv}). Finalmente obtenemos el mapa de desplazamiento vertical regional asociado a un periodo de retorno. Teniendo clara la metodología, se procede a aplicarla.

Capítulo 4

Aplicación de la metodología propuesta y análisis de resultados

La metodología utilizada en esta tesis, Jaimes *et al.*, (2011), requiere del uso de mapas geológicos, carta geológica de México (SGM, 6°ed., 2007), estudios geotécnicos disponibles y el conocimiento de métodos como el EPOLLS (2000) y el método de Tokimatsu y Seed (1987), información que ha sido descrita a lo largo de este trabajo de tesis y que permitirá aplicarla y analizarla para poder corroborar su confiabilidad.

Para realizar un análisis adecuado de resultados se hizo necesaria la elaboración de mapas de deslizamiento regional, que permiten observar la magnitud de los deslizamientos probables obtenidos mediante las metodologías propuestas para efectuar una comparación con datos de eventos históricos. Aplicación

4.1. Mapa de desplazamiento lateral del suelo debido a licuación

1. Identificar regiones del país con depósitos del Holoceno. (Fig. 2.3.)
2. Estimación de escenario sísmico o de amenaza sísmica, Fig 4.1, Mapa generado a partir de un conjunto de escenarios estocásticos (más de 54 000 escenarios).
3. Estimación de la a_{max} a partir de leyes de atenuación y elaboración de mapa de a_{max} del terreno para un periodo de retorno de 150 años, Fig 4.2.
4. Estimar la duración de los movimientos haciendo uso de leyes de atenuación.
5. Obtener el valor del desplazamiento lateral debido a licuación sustituyendo estos valores (duración y a_{max}) en ec. 3.1 para una magnitud y distancia dada.
6. Para obtener un mapa regional de desplazamiento horizontal DLL debido a un solo escenario se repiten los pasos 2 a 6 para diferentes sitios

Siguiendo estos pasos y substituyendo los parámetros obtenidos en la expresiones ec. 3.9 y 3.11, se obtiene un mapa de desplazamiento lateral del suelo esperado para un periodo de retorno de 150 años para cada sitio tomando en cuenta todo el conjunto de escenarios, Fig 4.3.

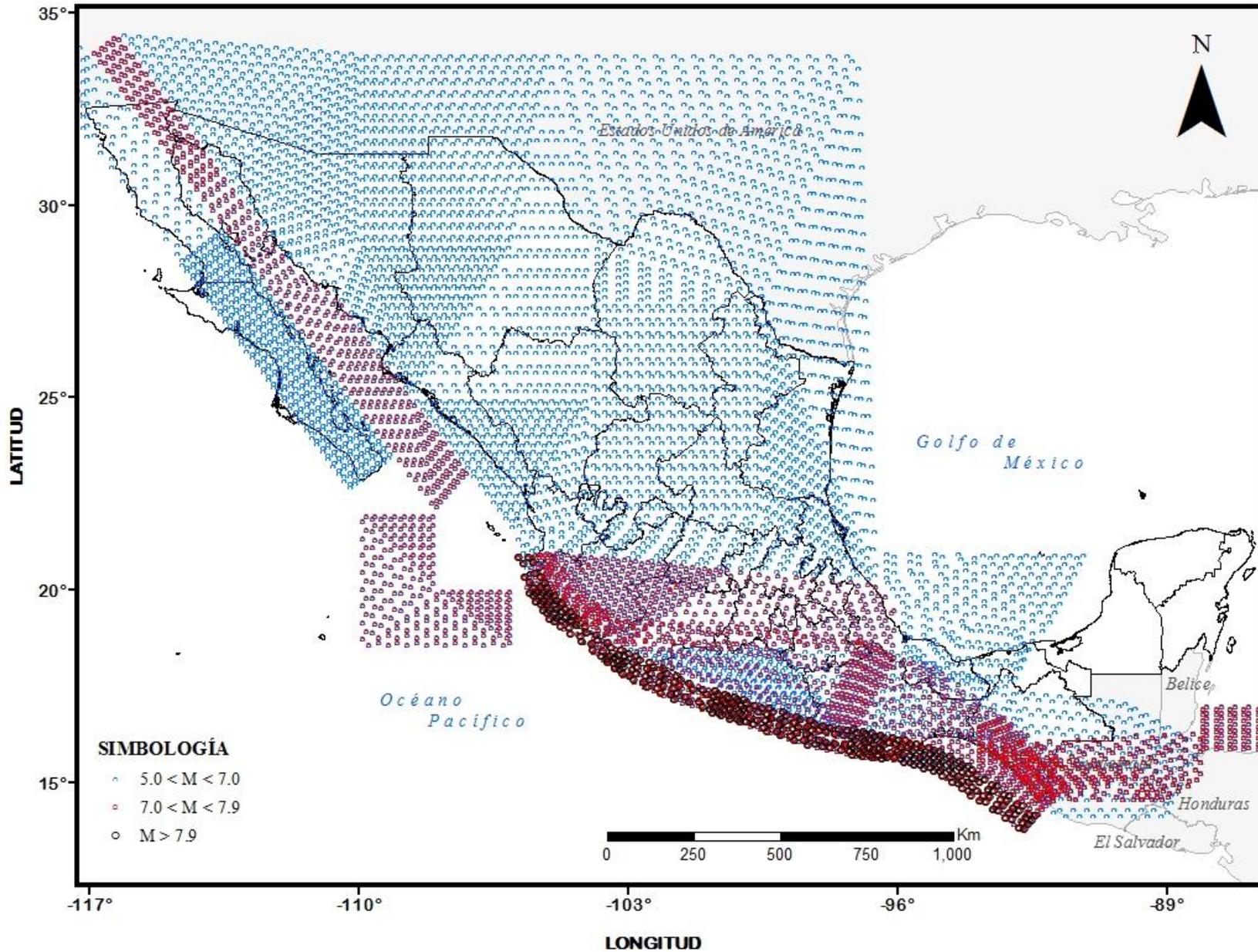


Fig 4.1 Mapa de posibles escenarios sísmicos de diferente magnitud, epicentro y fuente sísmica

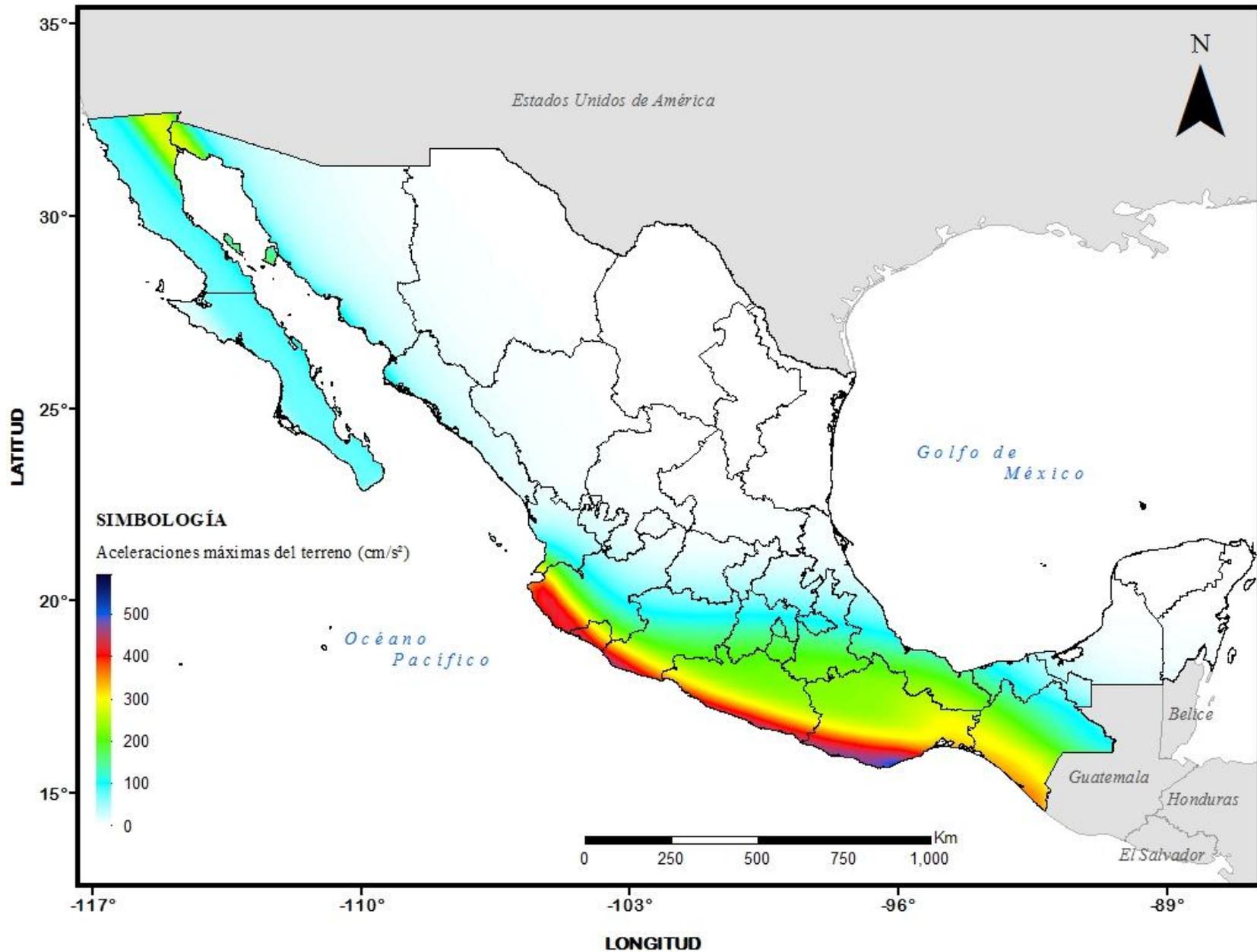


Fig 4.2 Mapa de a_{max} del terreno para un periodo de retorno de 150 años.

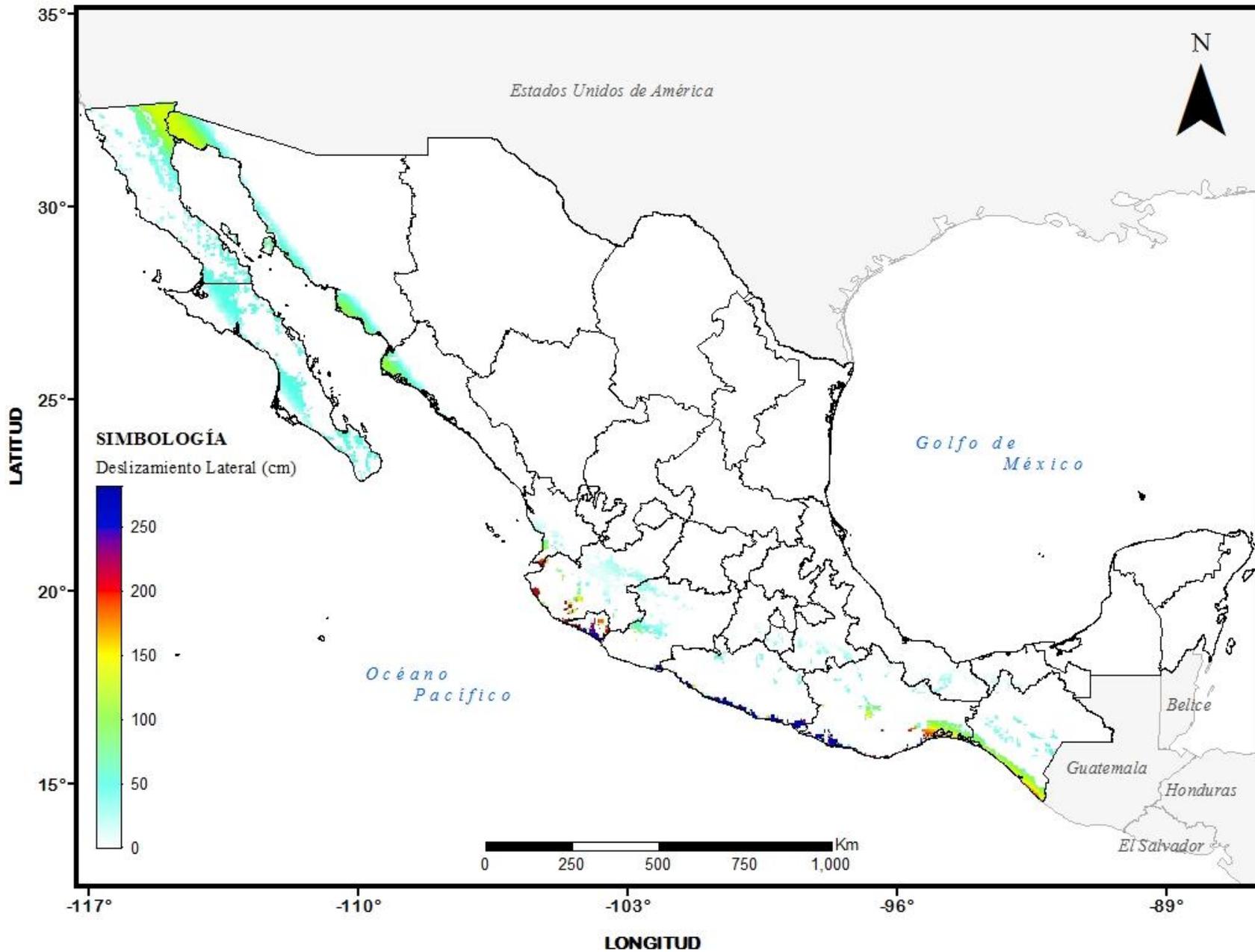


Fig 4. 3 Mapa regional de desplazamiento lateral del suelo esperado debido a licuación $T_r = 150$ años

4.2. Mapa de desplazamiento vertical del suelo debido a licuación

1. Fig. 2.3
2. Asignar propiedades del suelo (σ_o, σ'_o , densidad relativa) basados en la literatura técnica y estudios disponibles de mecánica de suelos.

Tabla 4. 1 Valores promedio de propiedades geotécnicas asignadas para la estimación del desplazamiento vertical del suelo debido a licuación, Jaimes *et al.*, 2011

ID	Latitud	Longitud	Prof (m)	γ (ton/m ³)	σ_o (kg/cm ²)	σ'_o (kg/cm ²)	N	(N _i) ₆₀	r_d	% F
1	32.59077	115.45022	4.05	1.8	7.29	7.24	12	13.98	0.94	5
			4.50	1.8	8.1	7.60	14	15.98	0.95	5
			5.40	1.8	9.72	8.32	10	10.98	0.96	5
			5.85	1.8	10.53	0.52	24	24.97	0.96	5
			6.75	1.8	12.15	9.40	14	13.98	0.97	5
2	32.59077	115.45022	4.5	1.8	8.10	8.1	20	21.97	0.95	5
			4.95	1.8	8.91	8.46	15	15.98	0.95	5
			5.85	1.8	10.53	9.18	9	8.99	0.96	5
			6.3	1.8	11.34	9.54	8	7.99	0.97	5
3	19.0522	104.31583	3.0	1.81	25.0	24.6	11	17.65	0.96	11.6
			6.0	1.87			29			7.3
			10.0	1.94			50			3.1
			14.5	1.94			50			10.4
			17.0	1.97			50			15.7

3. Estimar la relación de esfuerzos cíclicos CSR con la ecuación 4.4
4. Estimar la deformación volumétrica, ε_v , en la Fig. 4.2 .
5. Evaluamos las deformaciones multiplicando el valor de la deformación volumétrica obtenido en el paso 4 por el espesor del estrato de suelo susceptible de licuarse.
6. Generar el mapa regional de desplazamiento vertical debido a un solo escenario repitiendo los pasos 2 a 6 para diferentes sitios.

Para obtener el mapa regional de desplazamiento vertical esperado para un periodo de retorno de 150 para cada sitio, utilizamos la expresión ec. 3.12 y 3.14, tomando en cuenta el conjunto de escenarios, Fig 4.4.

Se puede observar en las Fig 4.3 y 4.4, algunas localidades donde se presento o documento el fenómeno de licuación no es perceptible la existencia de deslizamientos laterales, esto puede deberse a la baja sismicidad como es el caso de Bavispe, Sonora. También es evidente que en la zona costera del pacifico la probabilidad de que se presente licuación es elevada.

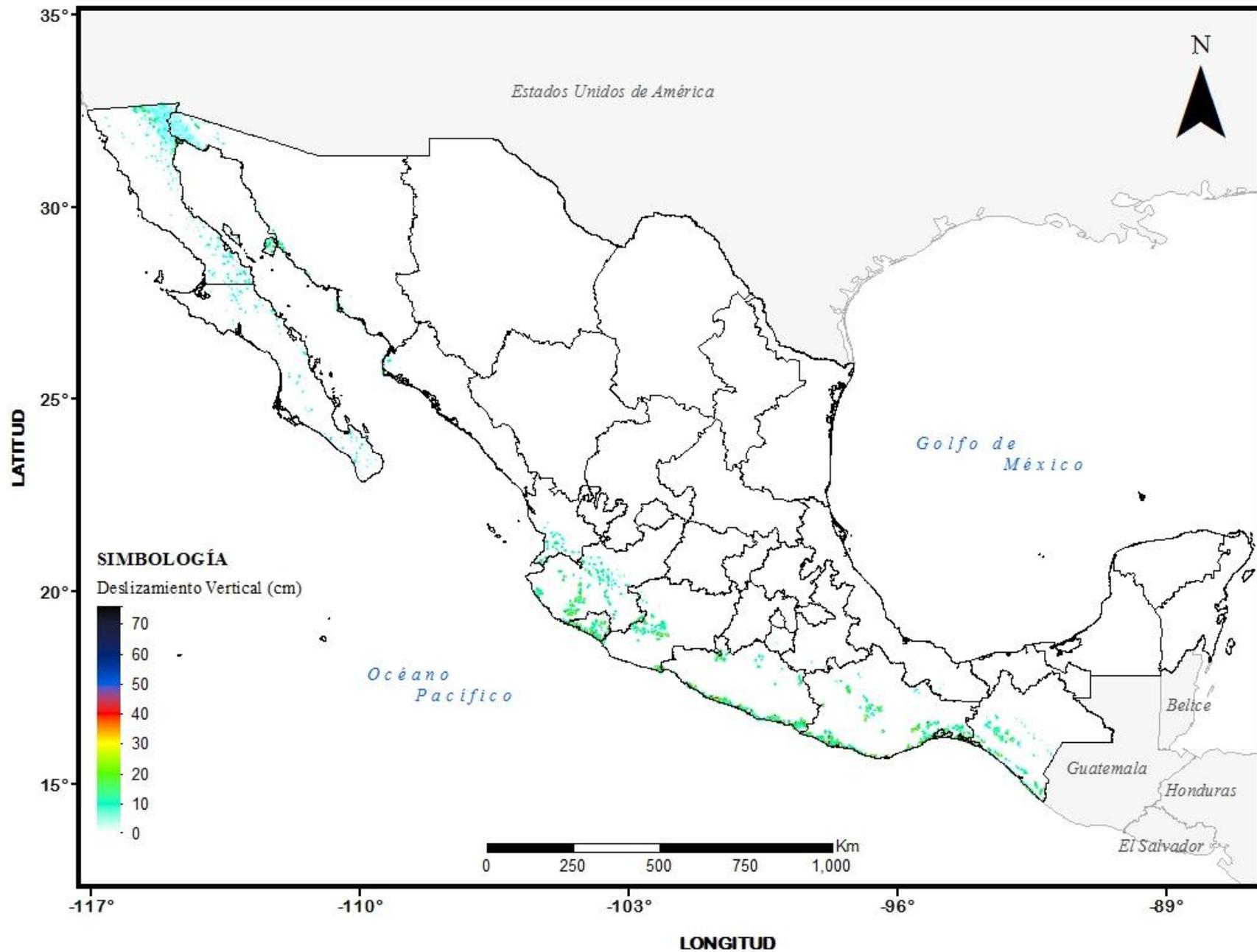


Fig 4. 4 Mapa regional de desplazamiento lateral del suelo esperado debido a licuación $T_r = 150$ años

4.3. Análisis de resultados

El análisis de resultados consistirá en comparar las zonas de desplazamientos laterales y verticales esperados $T_r=150$ contra las zonas donde se tienen registros de desplazamientos laterales y verticales por licuación, y verificar así que la metodología proporciona desplazamientos esperados en zonas donde se tienen registros y que las magnitudes de los registros se encuentren dentro del rango generado por la metodología. Comparar los datos arrojados por la metodología propuesta con los registrados en el capítulo 3, permite tener conocimiento de los alcances de la metodología así como de sus aciertos y falla. En general las imágenes están formadas por mapas de registros de desplazamientos y acercamientos de los mapas de desplazamientos esperados para un $T_r=150$ años.

4.3.1. Costa de Oaxaca (1870)

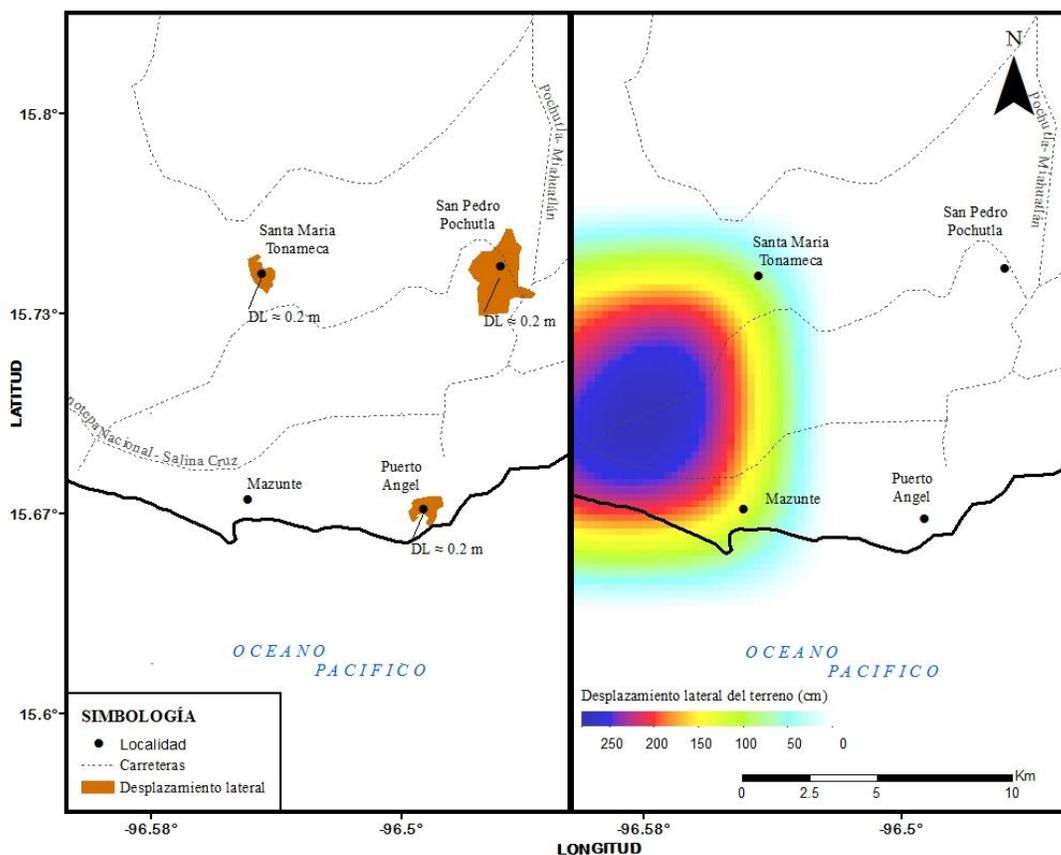


Fig 4. 5 mapa de comparacion de registros de deslizamientos laterales registrados y estimados, Oaxaca, 1870

Solo una de las tres localidades con registros de licuación coincide con el deslizamiento lateral estimado, Santa María Tonameca, donde los desplazamientos laterales estimados son del orden de 50 a 100cm, Fig 4.5, los deslizamientos estimados sobrepasan los datos históricos, destaca la localidad de Mazunte donde no se tienen registros de

deslizamientos pero de acuerdo a la parte derecha la imagen es probable la presencia de desplazamientos laterales del orden de 150 cm.

La falta de estimaciones de desplazamientos en las localidades de Puerto Ángel y Pochutla se debe a que estas localidades no tienen datos de suelos pertenecientes al holoceno, aunque se encuentren dentro de una región de alta sismicidad.

4.3.2. Bavispe, Sonora (1887)

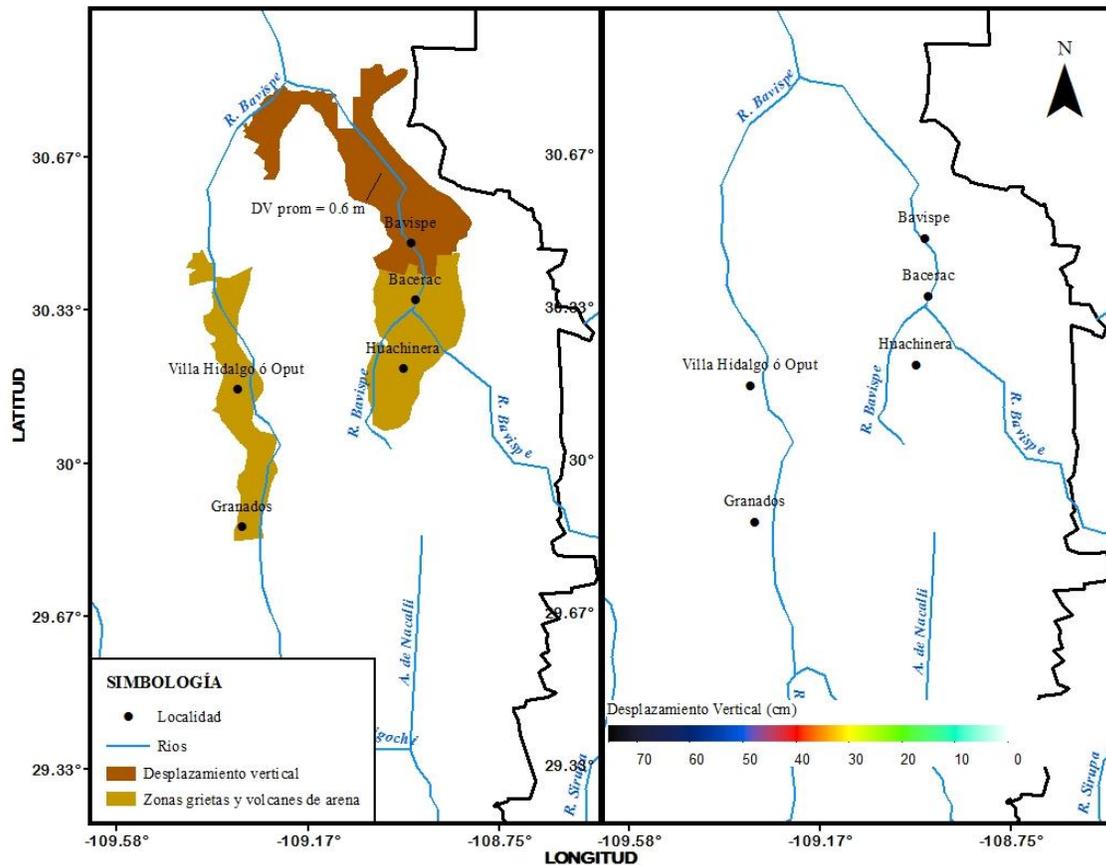


Fig 4. 6 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Bavispe, 1870

Es evidente que la metodología no proporciona desplazamientos verticales estimados en la zona correspondiente a Sonora, sin embargo, en el mapa de zonas susceptibles de licuación (Fig 2.3) estas localidades contengan zonas con alta susceptibilidad al fenómeno de licuación. Esto se debe a la baja sismicidad de esta zona.

Considero que el caso de Bavispe en 1887 es un escenario extraordinario, en el cual se conjuntaron las características sismológicas y geológicas necesarias para la generación del fenómeno de licuación, pero no debe tomarse como un evento sin importancia, ya que exista una baja posibilidad de ocurrencia del fenómeno pues ya existe un antecedente, haciendo necesario tomar en cuenta los riesgos que implica el fenómeno a la infraestructura existente.

4.3.3. Mexicali, Baja California (1915)

En este evento solo existe evidencia de grietas y volcanes de arena por licuación.

4.3.4. Jaltipán, Veracruz (1959)

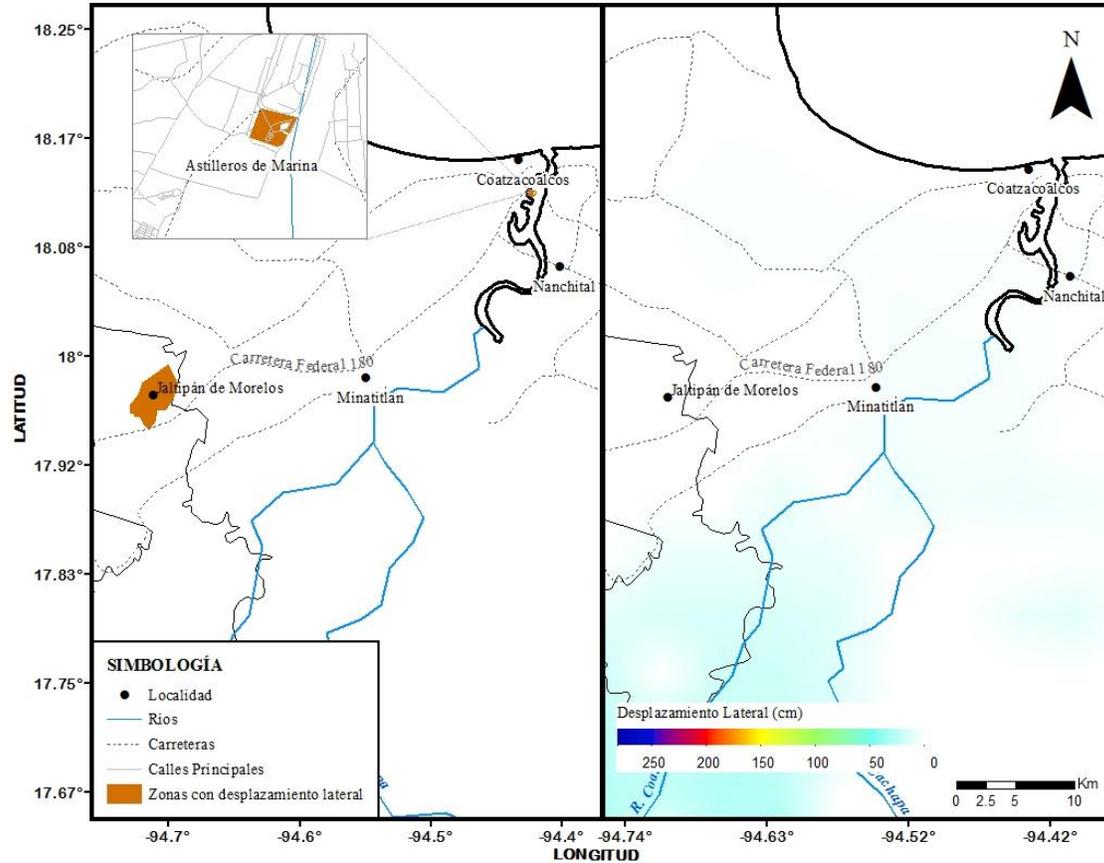


Fig 4. 7 Mapa de comparación de registros de deslizamientos laterales registrados y estimados, Jaltipán, 1959

Se observa que los deslizamientos estimados son menores a los 50 cm Fig 4.7, en el reporte de Marsal (1961) solo se menciona el desplazamiento sin hacer mención de la magnitud del mismo y refiere que se debió a un proceso de licuación parcial. Esta región de Veracruz constituye una de las zonas susceptibles al fenómeno de licuación por tanto es importante que se tome en cuenta la posibilidad de futuros eventos sísmicos donde se desarrolle este fenómeno.

En la figura 4.8 se observa que no se presentan desplazamientos verticales esperados en la zona de los Astilleros de Marina, esto se puede atribuir a la baja sismicidad de Veracruz que regularmente presenta aceleraciones de menos de 0.7 g, por lo tanto es posible suponer que el hundimiento súbito reportado se presentara en rellenos artificiales mal compactados.

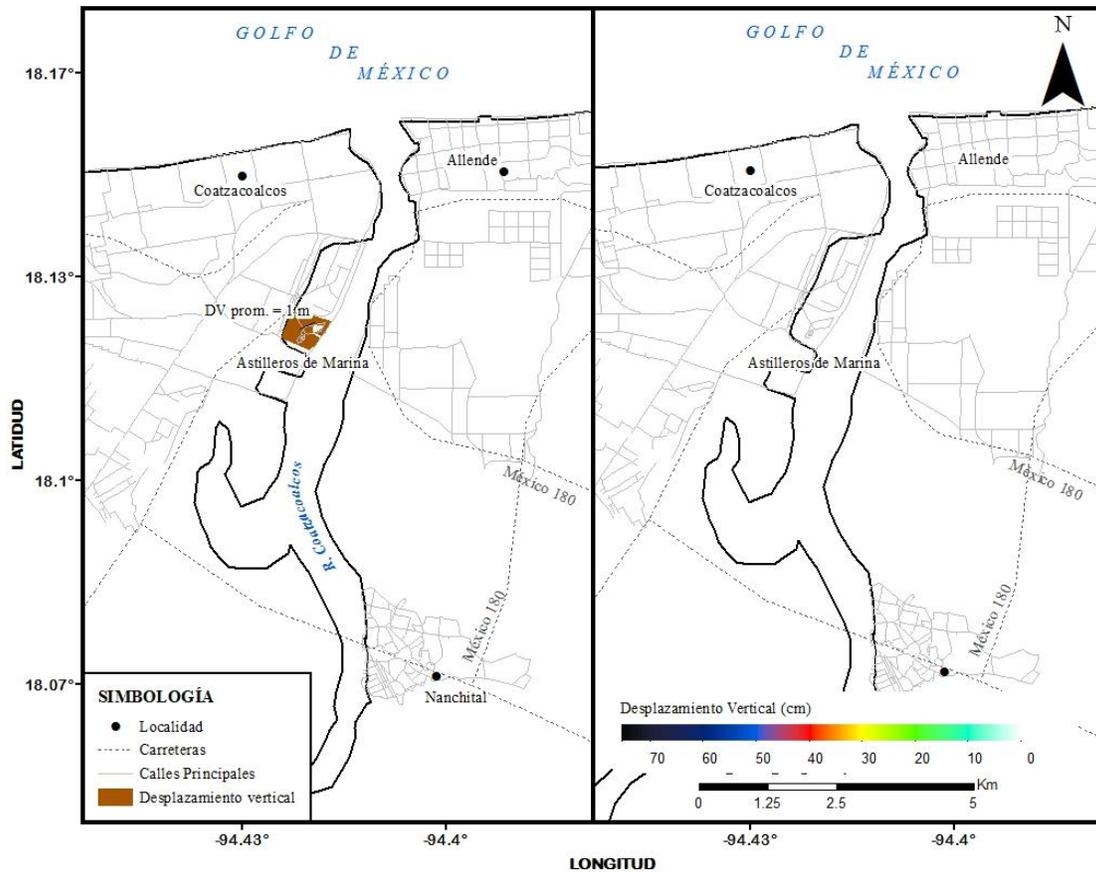


Fig 4. 8 Mapa de comparación de registros de deslizamientos verticales registrados y estimados, Jaltipán, 1959

4.3.5. Chiapa de Corzo, Chiapas (1975)

En la Fig 4.9 observamos que $0.0 \leq D_{LLAE} < 50.0$ cm en la región que comprende desde Chiapa de Corzo hasta América Libre, en el reporte elaborado por Dawson *et al.* (1977), los desplazamientos laterales son del orden de 10 cm, que coinciden con el rango antes mencionado. En el caso de la Fig 4.10 los deslizamientos verticales reportados son de 3 y 5 cm para cada evento y los desplazamientos estimados no rebasan 10 cm.

Destaca que la probabilidad de que ocurran desplazamientos en el futuro aumenta por las condiciones geológicas presentes, ya que estas localidades y principalmente el Puente Santo Domingo se encuentra a los costados y sobre la trayectoria del río Santo Domingo.

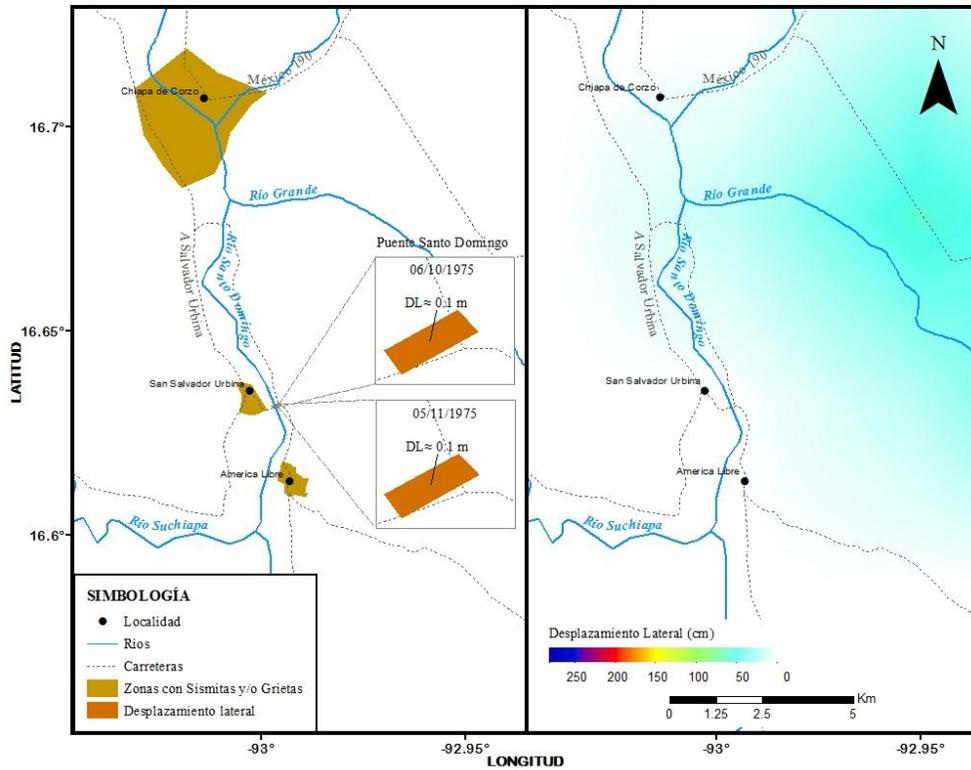


Fig 4. 9 Mapa de comparación de registros de deslizamientos laterales registrados y estimados, Chiapa de Corzo, 1975

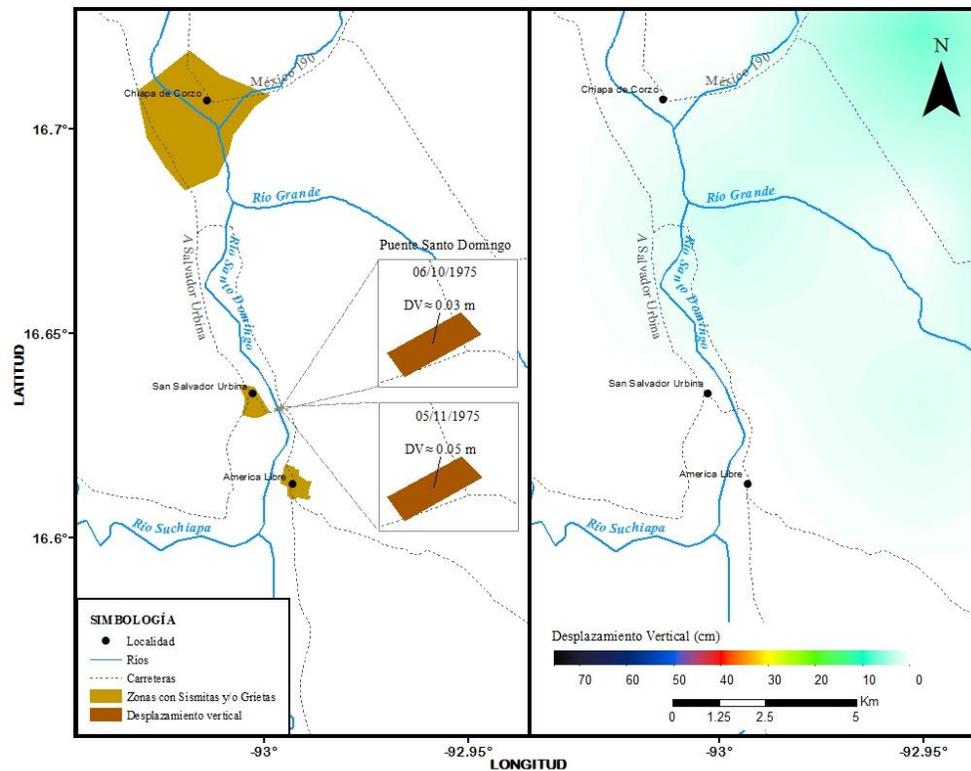


Fig 4. 10 Mapa de comparación de registros de deslizamientos verticales registrados y estimados, Chiapa de Corzo, 1975

4.3.6. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1979)

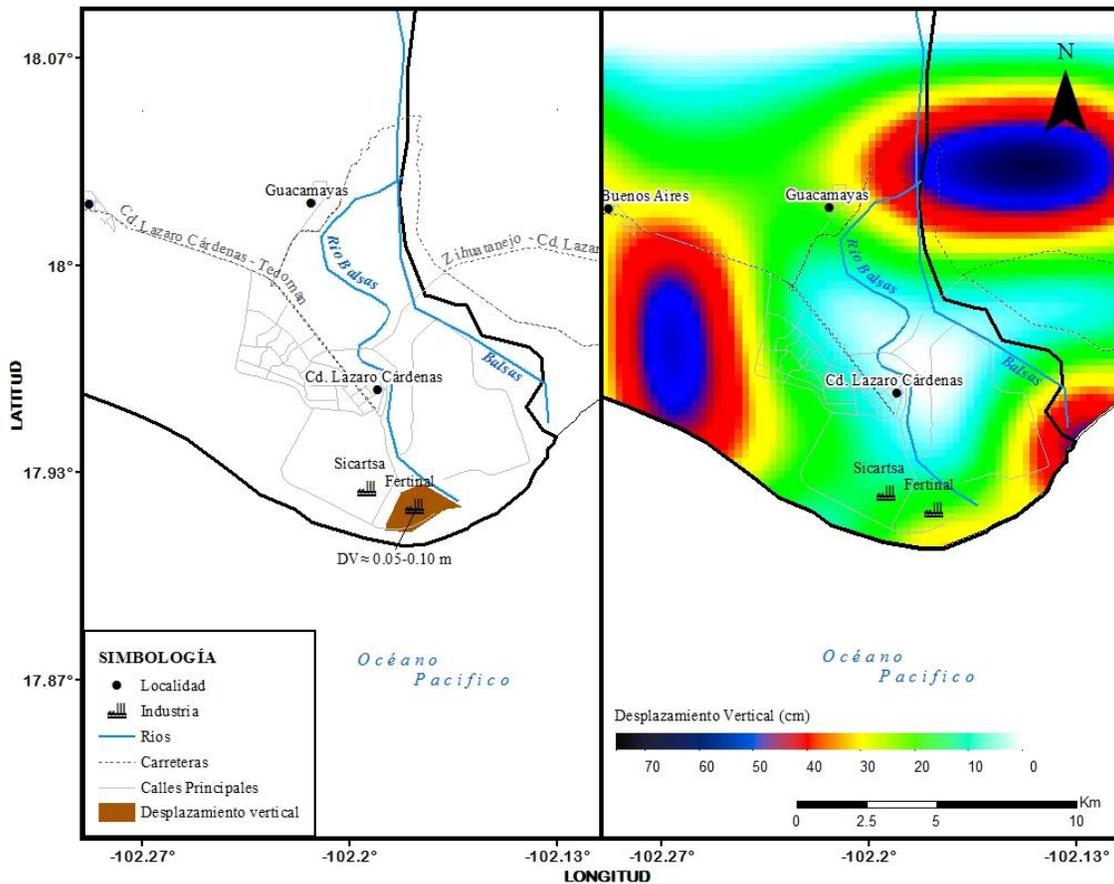


Fig 4. 11 Mapa de comparación de registros de deslizamientos verticales registrados y estimados, Lázaro Cárdenas, 1979

Los deslizamientos verticales esperados en este importante puerto y principalmente en la isla de Enmedio donde se localiza Fertinal (antes FERTIMEX) van de los 20 a los 30 cm rebasando los registrados (Jaime et al., 1979) que indican desplazamientos máximos de 10 cm, Fig 4.11, en esta zona se tienen una mayor gama de colores indicando los desplazamientos, esto debido a la alta sismicidad y a las condiciones geológicas que predominan, haciendo de este puerto una zona con alta probabilidad de presentar fallas por licuación.

4.3.7. Mexicali, Baja California (1980)

Anderson *et al.* (1982), indica para este evento sísmico desplazamientos laterales que van de los 2 a 10 cm y desplazamientos verticales de no mas 16.5 cm, así como manifestaciones de licuación en diversas localidades, en comparación con la metodología empleada que genero un rango de desplazamientos laterales estimados menores a los 150 cm y desplazamientos verticales estimados menores a los 10 cm. (Fig. 4.12 y 4.13)

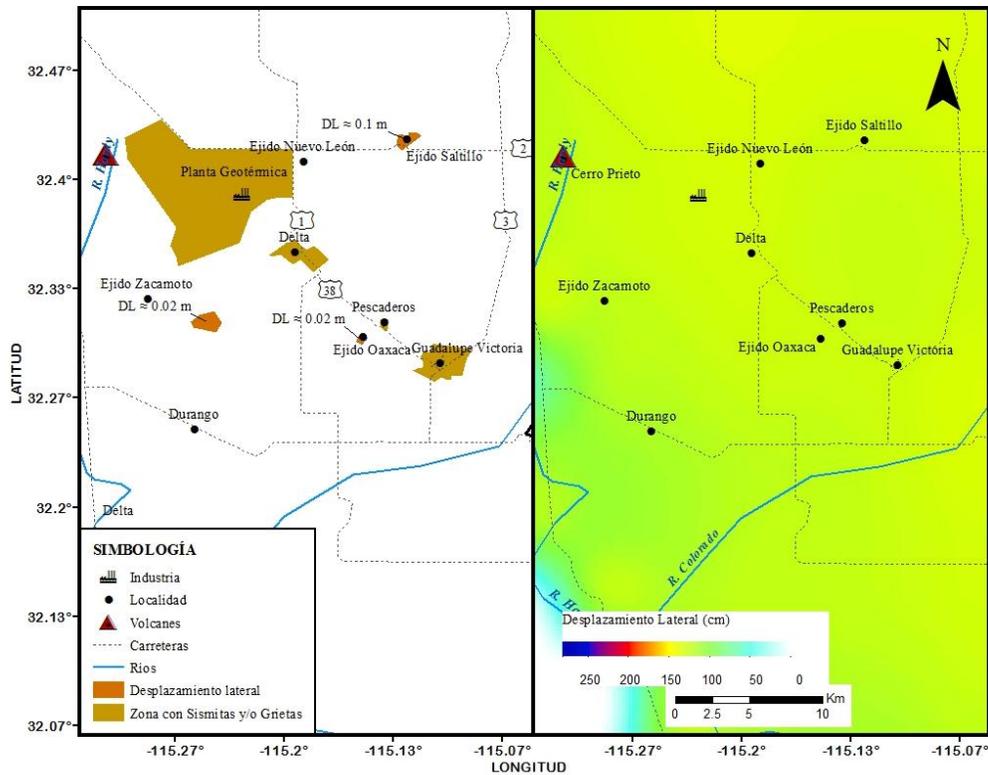


Fig 4. 12 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Mexicali, 1980

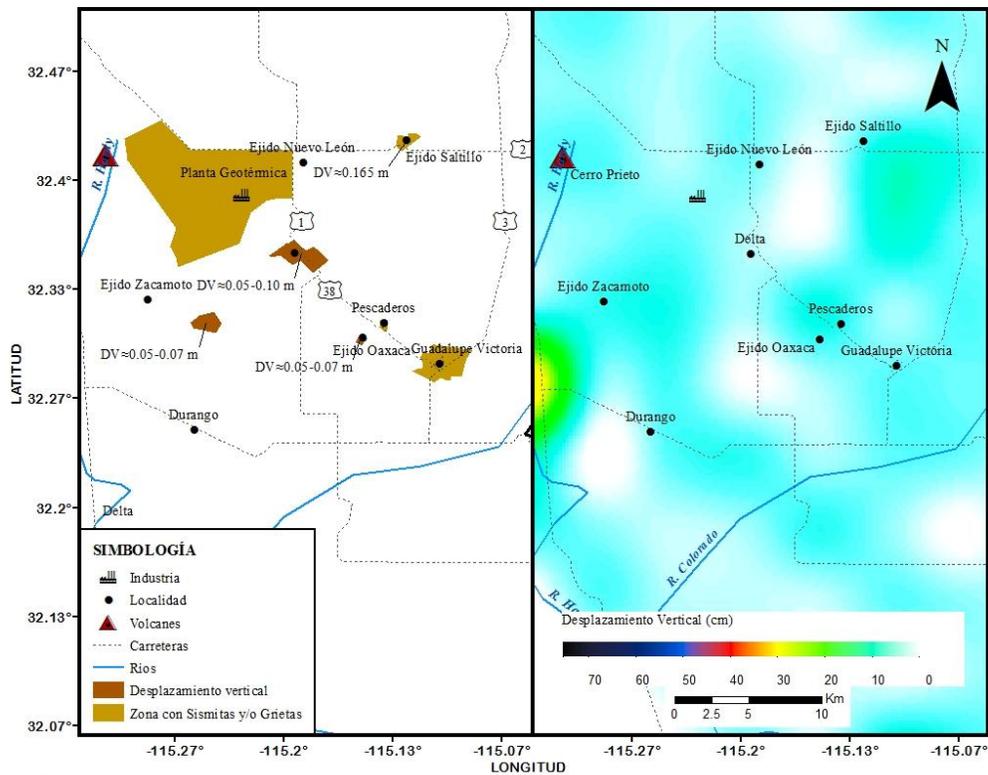


Fig 4. 13 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Mexicali, 1980

Esta región del estado de Baja California se considerada dentro de la región de mas alta sismicidad de la Republica, donde se presentan sismos frecuentemente y de gran magnitud con aceleraciones que sobrepasan el 0.7 g, estos factor sísmico sumado a las características del suelo hacen a esta zona altamente susceptible al fenómeno de licuación y a las fallas provocadas por el mismo.

4.3.8. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1981)

En este evento solo existe evidencia de grietas y presencia de volcanes de arena por licuación.

4.3.9. Lázaro Cárdenas, Michoacán (1985)

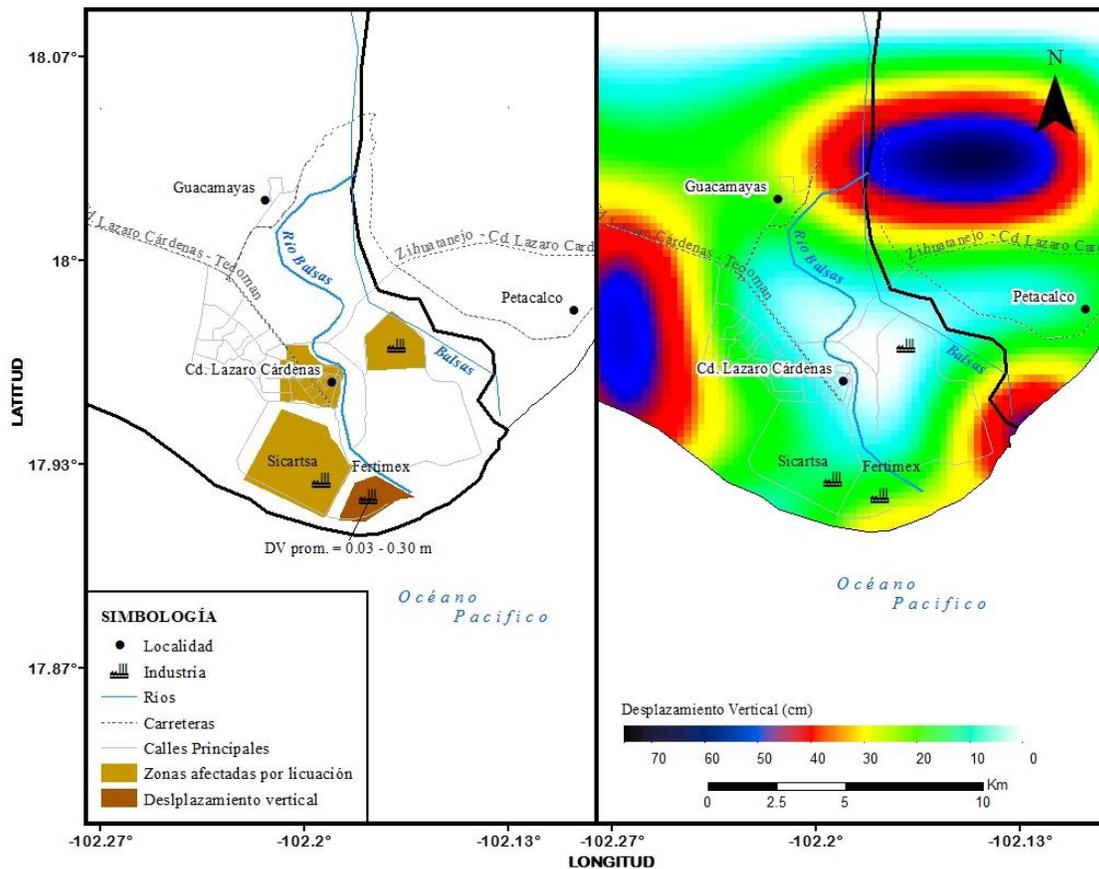


Fig. 4. 14 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Lázaro Cárdenas, 1985

En este puerto ha presentado repetidamente el fenómeno de licuación así como fallas del suelo que se han adjudicado a este fenómeno, Fig 4.14, tomando en cuenta estas evidencias y los estimaciones proporcionadas por la metodología, se hace notoria y evidente la alta susceptibilidad a licuación de la zona de Lázaro Cárdenas y principalmente la isla de Enmedio, y el alto riesgo de fallas en el suelo y en estructuras debido a licuación.

4.3.10. Jalisco y Colima (1995)

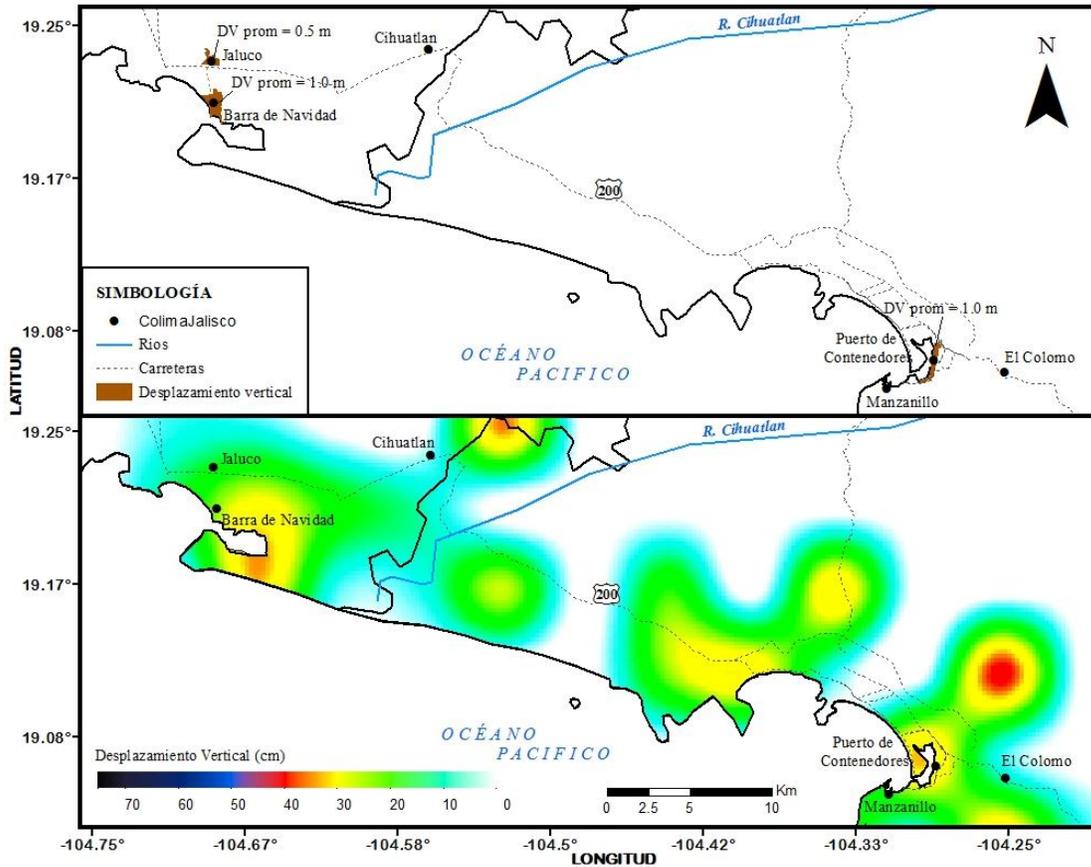


Fig 4. 15 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Colima-Jalisco, 1995

La zona de la República Mexicana ilustrada en el mapa, Fig 4.15, comprende una de las regiones con mayor sismicidad, zona donde se reportan sismos de gran magnitud y aceleraciones del suelo elevadas ($>0.7g$), combinado con las formaciones geológicas del Holoceno que son susceptibles a presentar el fenómeno de licuación por sismo; la suma de estas características provoca en esta zona junto con parte de la costera del Pacífico una alta susceptibilidad a licuación.

Aunque en este mapa, Fig 4.15, de comparación es visible que los desplazamientos verticales estimados no coinciden con los registrados por Juárez *et al.* (1995), el mapa nos permite observar que en localidades donde no se tienen registros documentados es probable la ocurrencia del fenómeno en sismos futuros, ya que en esta zona se unen los factores necesarios para la ocurrencia del fenómeno.

4.3.11. Tlaxcala y Puebla (1999)

En este evento solo existe evidencia de volcanes de arena debidos a licuación, aunque en los mapas de estimación de desplazamientos laterales no se manifiestan ningún tipo de desplazamiento es importante tomar en cuenta que es en esta zona donde se tiene el primer registro licuación durante un evento sísmico de la zona central de la Republica Mexicana.

4.3.12. Colima (2003)

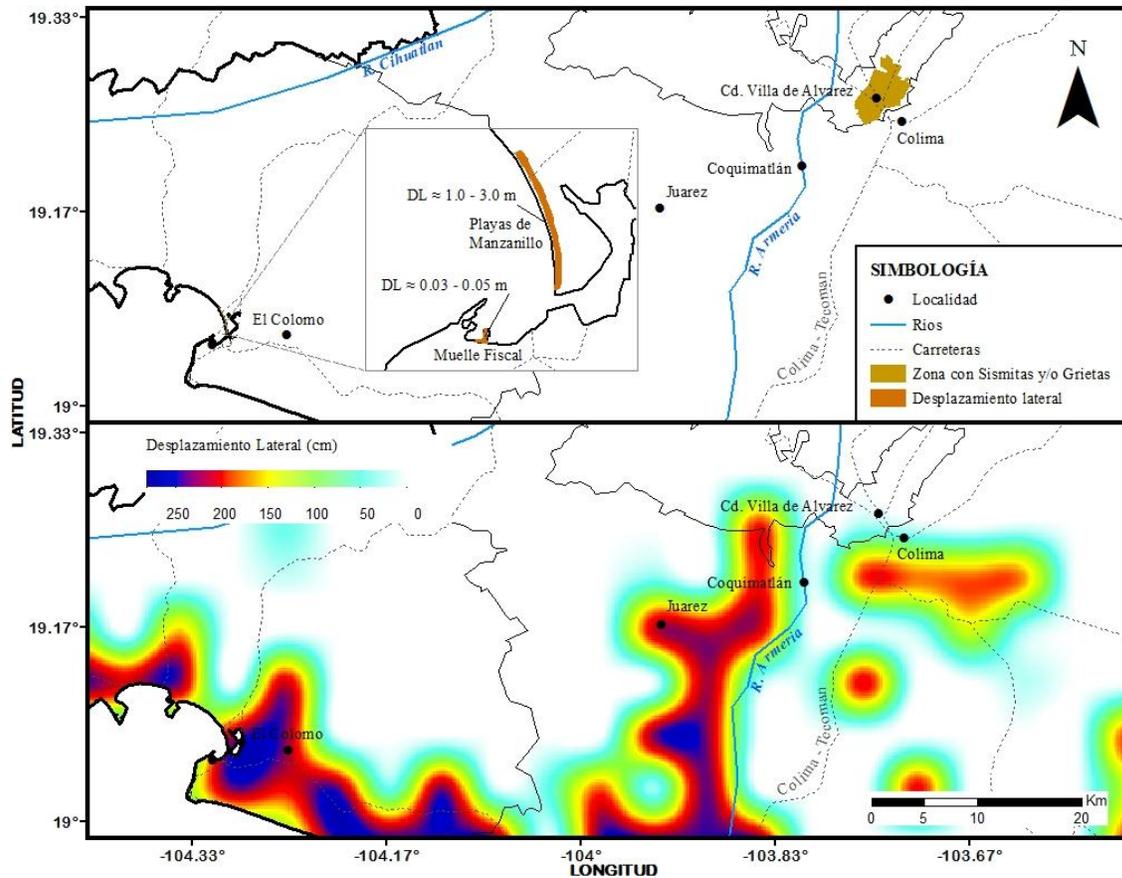


Fig 4. 16 Mapa de comparación de registros de desplazamientos laterales registrados y estimados, Colima-Jalisco, 2003

Durante este evento sísmico en el estado de Colima se reportaron grandes desplazamientos laterales de tierra en las playas de Manzanillo, en un rango de 1 a 3 m y en el muelle Fiscal de menos de 0.05 m en dirección al mar, comparando estos datos con los obtenidos por la metodología propuesta (Fig 4.16), tenemos que desplazamientos menores a 200 cm (2 m); por tanto es evidente que en este evento la metodología proporciona datos que coinciden con los reales.

Para desplazamientos verticales esperados, Fig 4.17 tenemos datos menores a los 20 cm en el muelle Fiscal contra menos de 5 cm de los registros (EERI, 2006).

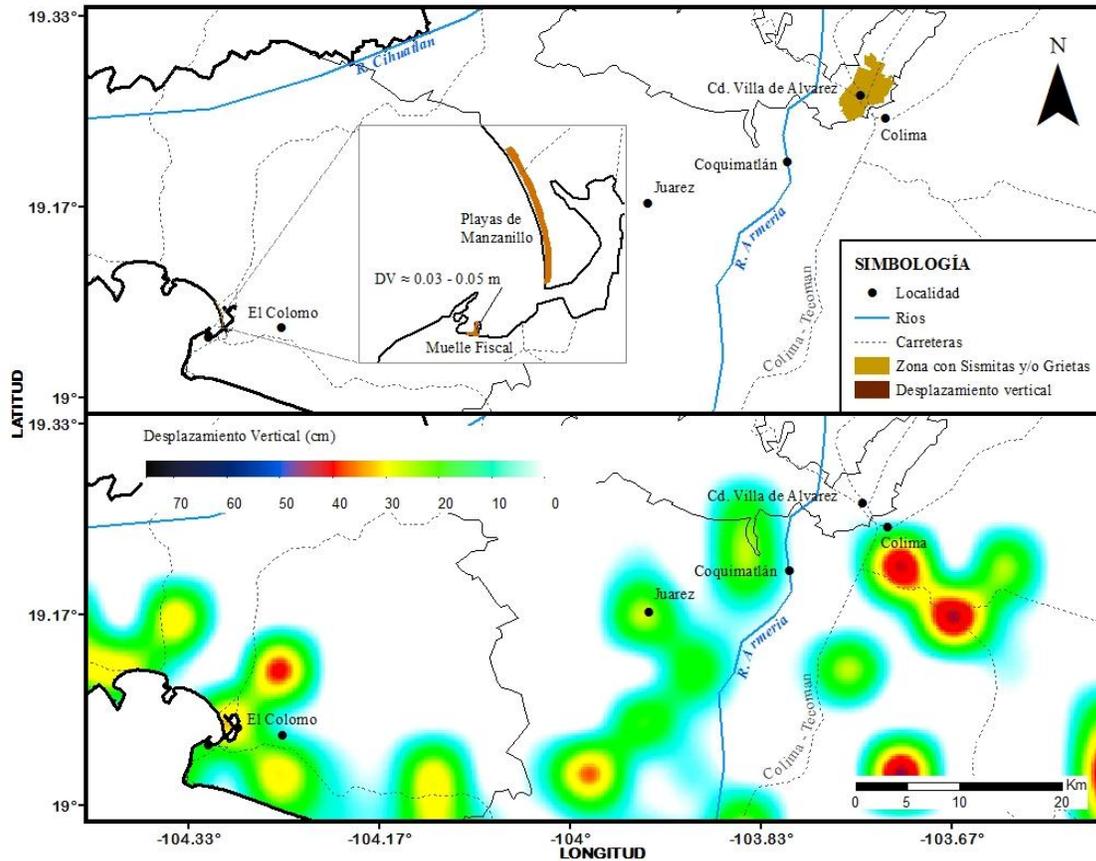


Fig 4. 17 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Colima, 2003

4.3.13. Mexicali, Baja California (2010)

Los desplazamientos laterales registrados (EERI, 2010) están por encima de los desplazamientos estimados, justo en las márgenes del Río Colorado donde se asientan las columnas que soportan el puente del Ferrocarril, en este punto los desplazamientos laterales son de 1 y 5 metros hacia el río. Los desplazamientos en el Valle de Mexicali y el ejido de Zacamoto están por debajo del máximo estimado (Fig 4.18). En cuanto a los desplazamientos verticales estimados son congruentes con los registrados (Fig 4.19).

Como se mencionó en la sección 5.3.7, el valle de Mexicali pertenece a una de las regiones del país con alta sismicidad, que sumado a las características geológicas descritas en el capítulo 3, hacen del valle una zona muy susceptible a la licuación del suelo debido a sismos; por lo tanto es importante tomar en cuenta esta información para la prevención o mitigación de posibles eventos futuros.

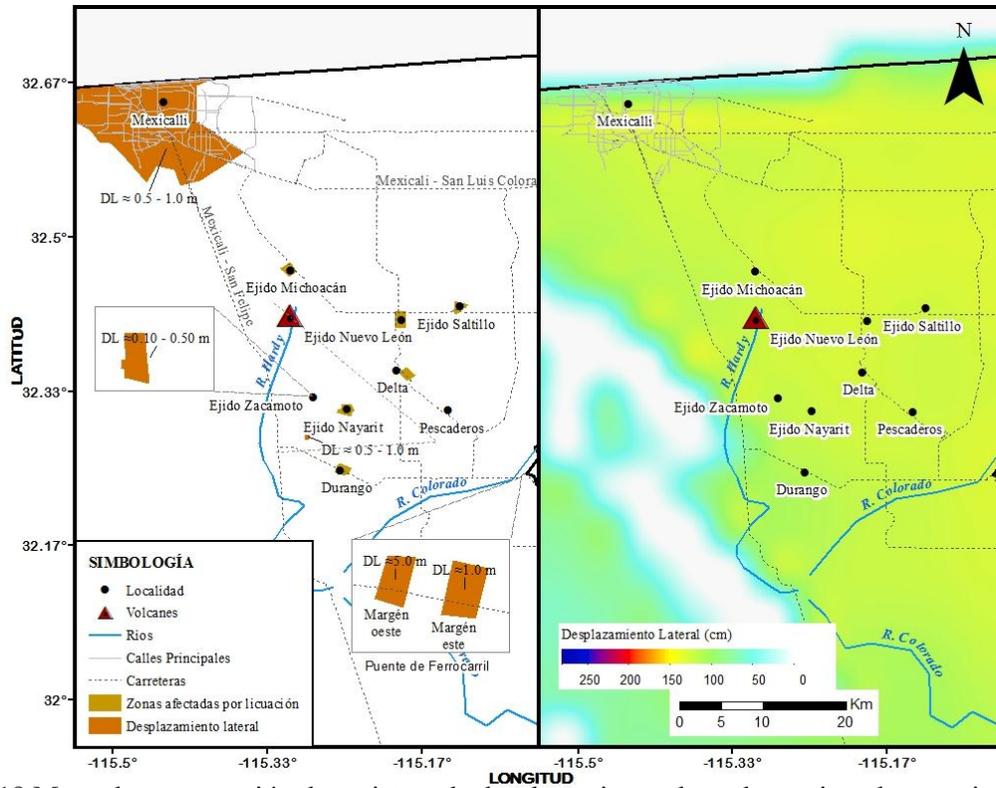


Fig 4. 18 Mapa de comparación de registros de desplazamientos laterales registrados y estimados, Mexicali, 2010

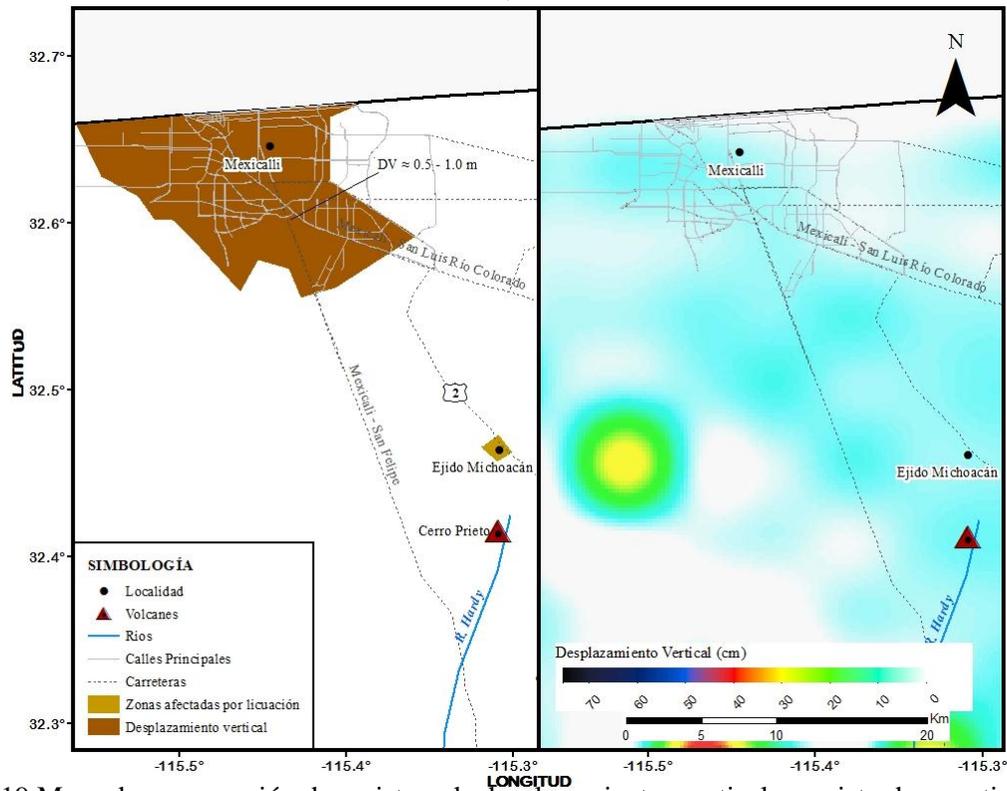


Fig 4. 19 Mapa de comparación de registros de desplazamientos verticales registrados y estimados, Mexicali, 2010

Conclusiones y recomendaciones

- **Conclusiones**

La Metodología propuesta para la estimación de desplazamientos verticales y laterales debidos a licuación por sismo hace uso de características geológicas, sismológicas y geotécnicas para generar una representación de los posibles desplazamientos de suelo en zonas que cumplan con las características necesarias para su desarrollo.

Acorde al análisis realizado en el capítulo anterior, existen regiones del país donde la metodología no proporciona datos de desplazamientos, como es el caso de Bavispe, Sonora; Puebla y Tlaxcala; además para zonas como el estado de Veracruz se tienen pocos datos de desplazamientos que no coinciden con datos de registros en estos lugares, sin embargo, a pesar de lo anterior y al hacer el análisis para el resto de los eventos se tiene una gran correspondencia en cuanto a regiones afectadas y respecto a la magnitud de los desplazamientos, comparando los datos estimados con los registrados, los primeros resultan ser mayores a los segundos. Dando un gran margen de confianza a la metodología.

El análisis mostró que los modelos usados en la metodología se adecuan a las características de la República Mexicana, haciendo factible su uso para analizar desplazamientos por licuación en eventos sísmicos futuros. Tener conocimiento de los desplazamientos generados por licuación debido a sismo permite conocer de manera cualitativa los posibles efectos sobre estructuras y líneas vitales.

El uso de la metodología para la predicción en eventos futuros permitirá la elaboración de mapas para la identificación zonas con alto riesgo de licuación. Mapas que son de gran utilidad en estudios de estimación de pérdidas esperadas por desplazamientos del suelo debidas a licuación, estudios que permiten conocer las pérdidas en infraestructura (viviendas, edificios públicos, líneas vitales) y las pérdidas económicas.

Parte importante del estudio fue la recopilación de datos de eventos de licuación, que no habían sido tomados en cuenta, con lo que se logró corregir y aumentar la base de datos sobre eventos de licuación por sismo en la República Mexicana, a partir de esta tesis, se tiene una base de datos históricos en una etapa considerada no instrumental (no se contaban con aparatos que pudieran proporcionar magnitud, aceleración o ubicación y profundidad del epicentro) que cuenta con nueve eventos (Anexo8) y una base de datos en etapa instrumental con 14 eventos (Capítulo 3).

Conclusiones y Recomendaciones

Después de este análisis y tomando en cuenta la base de datos de eventos licuación debidos a sismo en la República Mexicana, se hace indiscutible que las zonas donde existe una mayor susceptibilidad a desarrollar licuación por sismo es la zona costera del Pacífico, comprendida entre los estados de Jalisco y Oaxaca y en el valle de Mexicali, donde se ha presentado licuación en repetidas ocasiones.

Aunque es posible estimar la presencia de licuación por sismo, ya que se presenta en regiones con características bien definidas a nivel regional, en función de sus datos históricos, geológicos y geotécnicos, no es posible predecir bajo ninguna circunstancia el momento o lugar exacto de su ocurrencia.

• Recomendaciones

La metodología para la elaboración de mapas de licuación inducida por sismo en base a estimación de desplazamientos laterales y verticales debidos a licuación por sismo requiere un mayor conocimiento de los depósitos de suelo y las características geotécnicas, por lo cual:

- La principal recomendación es la necesidad de crear una base de datos georreferenciada para la ubicación a nivel regional de suelos del holoceno o de menor edad, así como su tipo de depósito, este mapa permitirá tener un rango de mayor a menor susceptibilidad a licuación acorde a lo propuesto por Youd y Perkins (1978).
- Un mayor conocimiento de las características geotécnicas a base de mayores exploraciones, principalmente en regiones donde se tiene conocimiento de la incidencia del fenómeno, sin descartar la necesidad de estudios en la zona centro del país (Tlaxcala y Puebla).

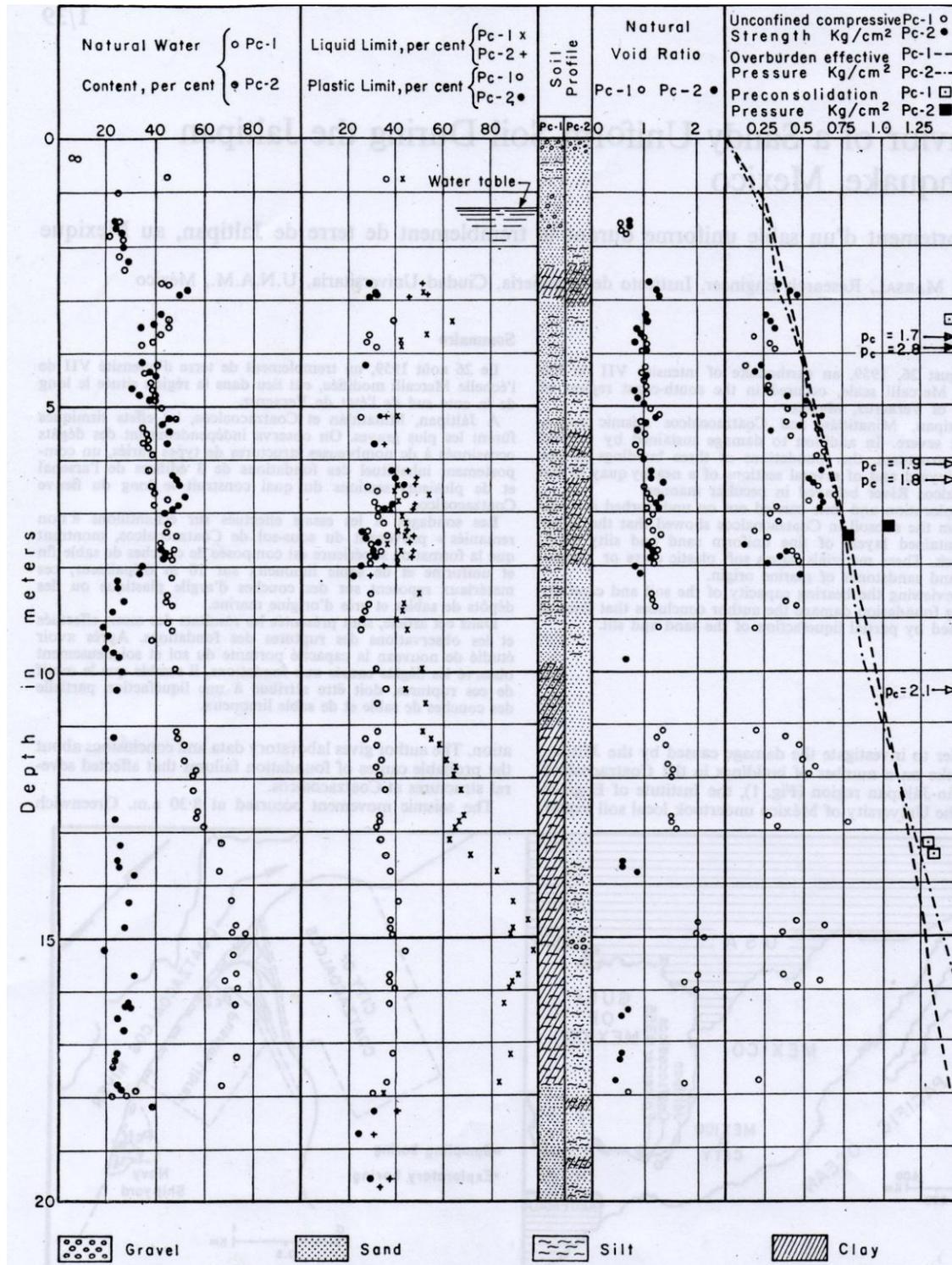
Estos datos permitirán tener una mayor precisión en la estimación de desplazamientos y por tanto en la estimación del riesgo de licuación por sismo.

Los mapas generados a partir de esta metodología, mapas de peligro de licuación, deberán ser tomados en cuenta para la elaboración, actualización y mejora de las normas técnicas de diseño de obra civil, principalmente en las regiones con mayor peligro de licuación por sismo; ejemplo de ello es la construcción de nuevas industrias, mejoras o ampliaciones en los puertos de Lázaro Cárdenas y Manzanillo, así como en zonas aledañas.

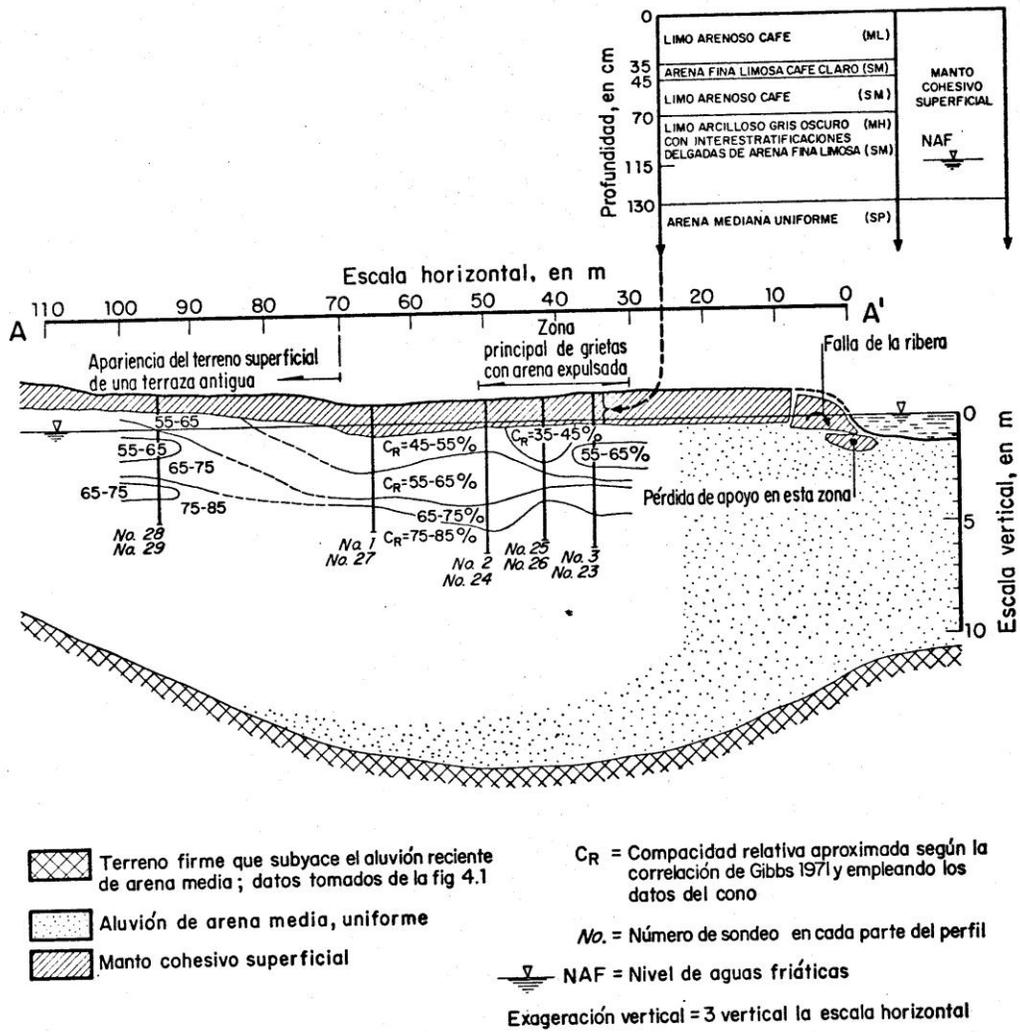
En investigaciones futuras, estas recomendaciones deberán ser parte importante en el momento de generar y planear los mapas de uso de suelo, para que se tome en cuenta el riesgo que implica hacer desarrollos urbanos en zonas cercanas a playas; en zonas donde se tienen ya asentamientos urbanos o industriales, los mapas permitirán tener un conocimiento del impacto de la licuación y permitirán desarrollar las medidas preventivas necesarias.

En la actualidad existe un conocimiento más extendido del fenómeno de licuación, que no se debe a que la licuación por sismo se presente con mayor frecuencia, sino a que existe una mayor presencia de asentamientos humanos en zonas que han sido afectadas por el fenómeno, por lo cual es necesario hacer un mayor énfasis en el conocimiento y desarrollo de herramientas que nos permitan entender el fenómeno para prevenir riesgos futuros.

ANEXOS

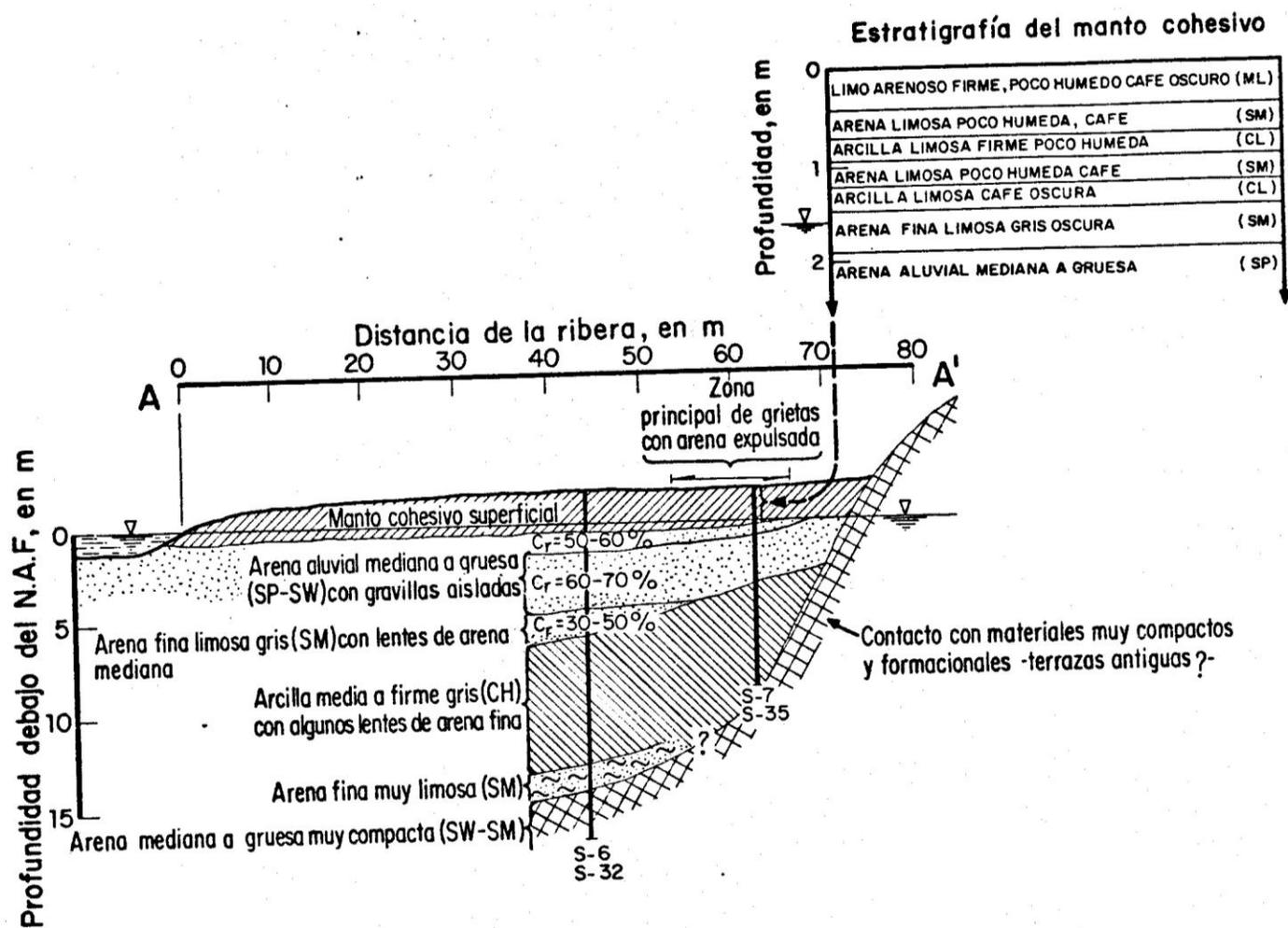


Za Anexo 1. Perfil del suelo, muestra la variación de las propiedades mecánicas con respecto a la profundidad (Marsal, R. J., 1961).



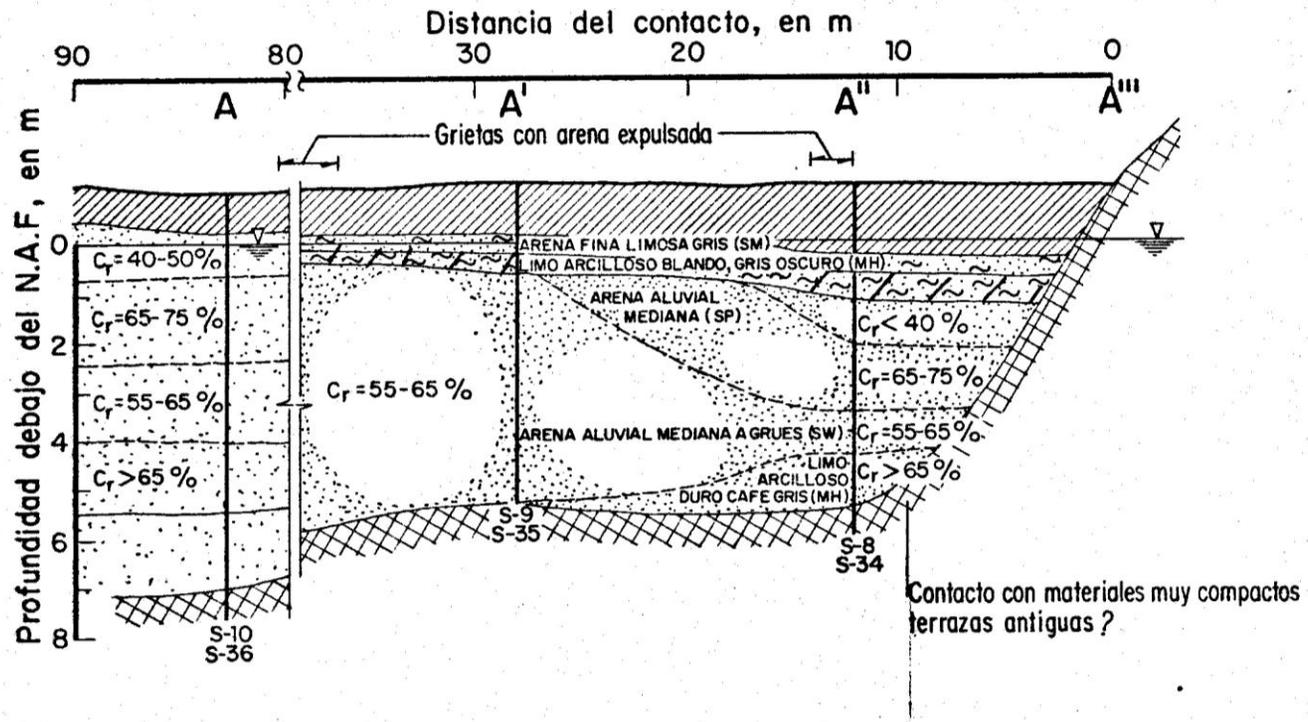
Anexo 2 Perfil estratigráfico del sitio I con compacidades relativas de los suelos aluviales. (Dawson A., et al., 1977)

De acuerdo a granulometrías de los sondeos S-2 y S-25 las arenas que sufrieron licuación van de uniformes a poco uniformes.



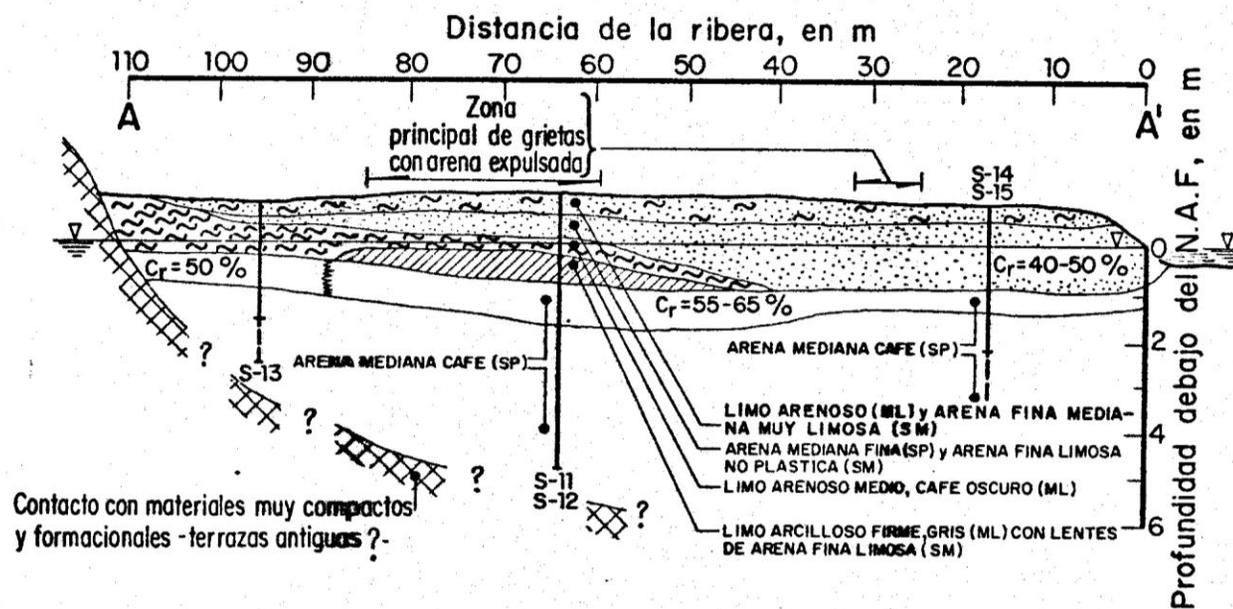
C_r = Compacidad relativa, estimada de resistencias a la penetración estandar y la correlación recomendada por Gibbs, (1971)

Anexo 3 Perfil estratigráfico sitio II (Dawson A., et al., 1977)



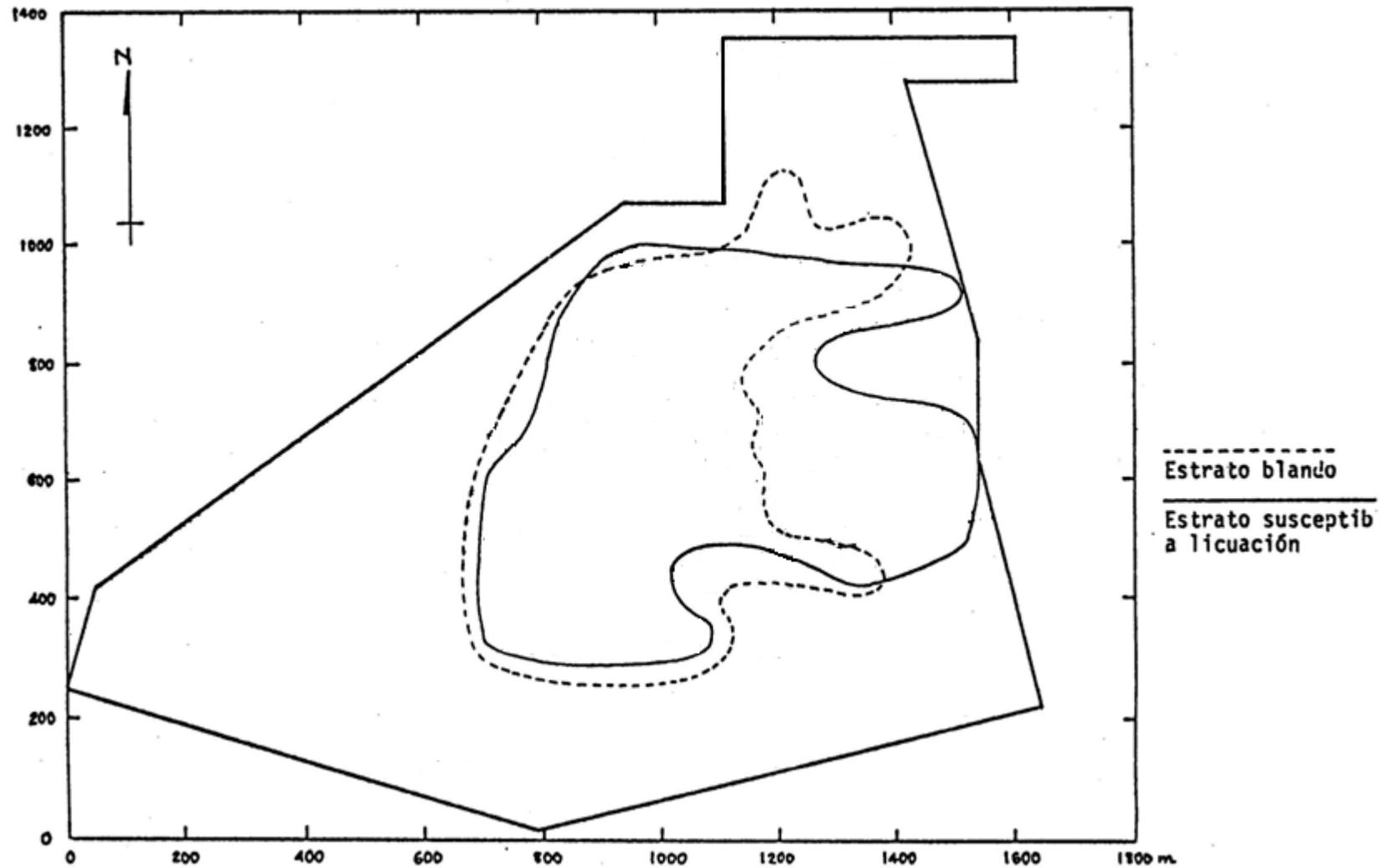
C_r = Compacidad relativa aproximada obtenida de la resistencias a la penetración y la correlación recomendada por Gibbs, (1971)

Anexo 4 Perfil estratigráfico sitio III (Dawson A., et al., 1977)

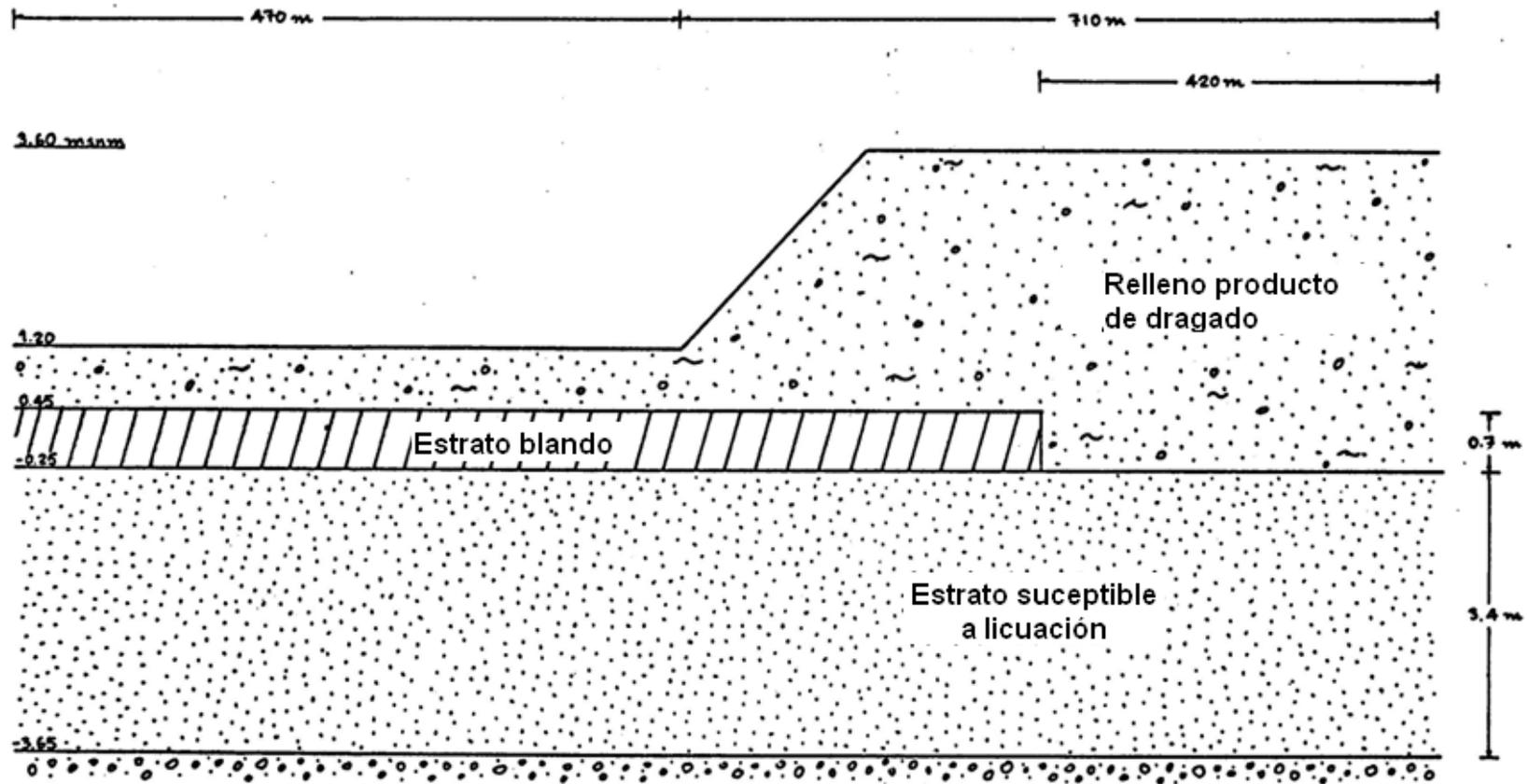


C =Compacidad relativa aproximada obtenida de la resistencias a la penetración y la correlación recomendada por Gibbs,(1971)

Anexo 5 Perfil estratigráfico sitio IV (Dawson A., et al, 1977)



Anexo 6 Localización del estrato susceptible de licuación Isla de Enmedio. (López, G.R., 1982)



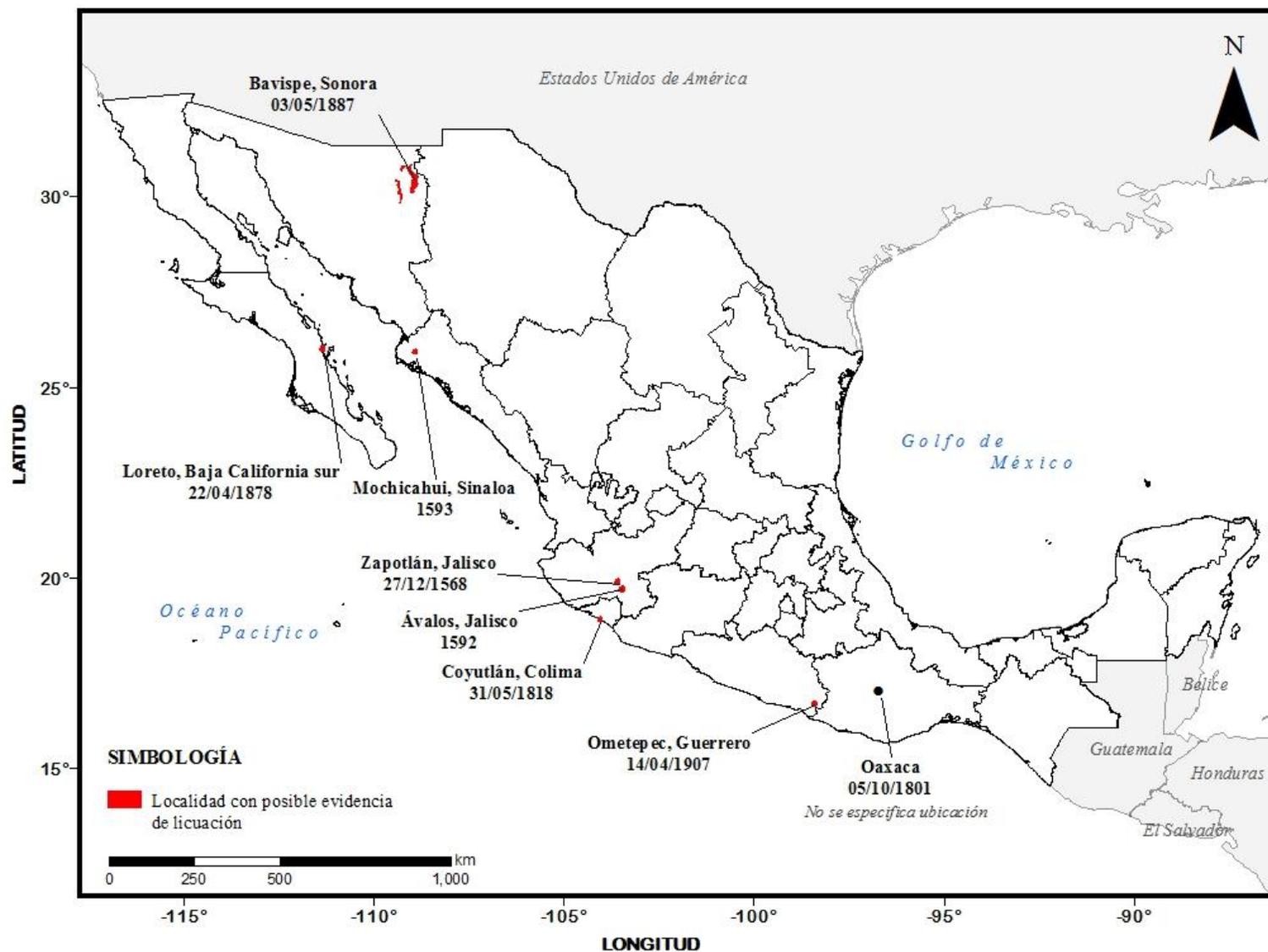
Anexo 7 Corte estratigráfico idealizado. (López, G.R., 1982)

Anexo 8. Tabla de eventos históricos con posible evidencias de licuación en etapa no instrumental

Evento	Fecha	Estado y municipios del país afectado por licuación	Descripción
1	27/12/1568	Zapotlán, Jalisco	"...por su gran intensidad se abrieron nuevas barrancas, se separaron algunas montañas, los manantiales de agua que brotaban en Zapotlán, apareciendo en otros sitios:..."
2	1592	Ávalos, Jalisco	"... el día de hoy parecen por aquella parte muchas aberturas de tierra y en las mayores ollas que dejó este estrago, se hacen unas pequeñas lagunas..."
3	1593	Sinaloa	"Temblor de tierra espantoso y desusado, un cerro de peña vivo llamado Mochicavi se rompió y abrió, por su boca arrojó cantidad de agua."
4	05/10/1801	Oaxaca	"En los pueblos en algunas partes se abrieron nuevos manantiales..."
5	31/05/1818	Coyutlán, Colima	"...En las salinas de Coyutlán, se abrió la tierra en muchas partes, brotó agua y se volvió a cerrar."
6	25/05/1868	Acapulco, Guerrero	"...las casas sufrieron bastante deterioro en sus techos y paredes; en algunos lugares la tierra se abrió y vertió agua..."
7*	11/05/1870	Coyula, Zapotengo y Tonameca, Oaxaca	"... en las grietas que se abrieron en Coyula, Zapotengo y Tonameca brotó cantidad de agua fresca y turbia..."
		Puerto Ángel, Oaxaca	"...en Puerto Ángel en el momento del temblor se vio hervir a borbotones el agua y la arena del mar como si estuviese en un caldero..."
7	22/04/1878	Loreto, Baja California Sur	"...En la sala de una casa que estaba recién concluida, resultó una abra de la que brotó agua en abundancia, inundándose toda la finca..." "...En la tierra cercana a la playa se hicieron enormes abras, por las que brotó abundante agua dulce de una temperatura elevada."
6*	03/05/1887	Bavispe, Sonora	"...después del temblor se formaron grietas en las inmediaciones de los ríos, que circundan el lugar, que vomitaban agua..."
5	14/04/1907	Ometepec, Guerrero	"...muy fuerte y muy largo temblor a las 11:35 p.m., con ruidos subterráneos; agrietamientos del suelo y brote o secado de muchos manantiales..."

Fuente: García y Suárez, 1996, **"Los simos en la historia de México"**, Ediciones Científicas Universitarias.

* Evento registrado en la tabla de Eventos de licuación Capítulo 2.



Anexo 9 Mapa de Eventos históricos con posible evidencia de licuación, en etapa no instrumental

Referencias

- Aguilera, J. G., (1888), **“Estudio de los fenomenos seismicos del 3 de mayo de 1887”**, Anales del Ministerio de Fomento de la Republica Mexicana, Tomo X, pp. 3-56
- Alcocer, S., Durán, R. Flores,, L.o, Gutiérrez, C.s, Reyes C.s, (2003), **El Sismo De Tecomán, Colima Del 21 De Enero De 2003, Observaciones Preliminares En El**
- Ambraseys, N.N. (1988). **“Engineering Seismology, Earthquake Engineering and Structural Dynaics”**, Vol.17, pp.1-105.
- Anderson, J. G., Simons, R. S., (1982), **The Mexicali Valley of 9 June 1980**, pp. 73-105
- Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Alexander, M. y Singh, S.H. (2010), **“Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes”**, Journal of Seismology, 14, pp. 769-785. SUBDUCCION
- Bird, J., Bommer, J., Crowley, H. y Pinho, R. (2006), **“Modelling liquefaction-induced building damage in earthquake loss estimation”**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 26, pp. 15-30.
- Dawson A., Flores R. y Arenas A., (1977), **“Estudio de licuación de arenas en Chiapas”**, Informe interno del Instituto de Ingeniería UNAM
- Dubois, S. M., y Sbar, M. L., (1981), **“The 1887 Earthquake in Sonora: Analysis of regional ground shaking and ground failure”**, inProceedings of Conference XIII, Evaluation of Regional Seismic Hazards and Risk, (Santa Fe, New Mexico, August 25-27, 1980), edited by W. W. Hays and compiled by B. B. Charonnat, *U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 81-437*, Reston, VA..
- EERI, (2003), **“Preliminary Observations on the Tecomán, Colima, Mexico, Earthquake of January 21”**, 2003, EERI Special Earthquake Report — March 2003
- EERI, (2006), **“El sismo de Tecomán, México del 21 de enero de 2003”, Capitulo 4. Condiciones geotécnicas**, Serie “Aprendiendo de Sismos”, Informe de la SMIS y EERI.
- EERI, (2010), **The Mw 7.2 El Mayor Cucapah (Baja California) Earthquake of April 4, 2010**, EERI Special Earthquake Report — July 2010

- Figueroa J., (1968), **"La sismicidad en el estado de Veracruz, el macrosismo del 11 de marzo de 1967"**, N° 167, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Figueroa J., (1973), **"Sismicidad en Chiapas"**, N° 316, Instituto de Ingeniería, UNAM
- Figueroa J., (1975), **"Sismicidad en Oaxaca"**, N° 360, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- García y Suárez, (1996), **"Los simos en la historia de México"**, Ediciones Cientificas Universitarias
- García, D., Singh, S.H., Herráiz, M., Ordaz, M. y Pacheco, J.F. (2005), **"Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra"**, Bulletin of the Seismological Society of America, 95(6), pp. 2272-2282.
- Greene M., Power M., and Youd T. L., (1994), **"Liquefaction"**, Earthquake basics No.1, Publication of Earthquake Engineering Research Institute, pp. 1-5
- IG-IIUNAM, (1985), **"Informe y Evaluación preliminar Elaborado por el Instituto de Geofísica con la colaboración del Instituto de Ingeniería"**, UNAM, 25/10/1985, http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/Sismo85/sismo85_inf.htm
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"**, Bavispe, Sonora, Clave Geoestadística 26015.
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"**, Chiapa de Corzo, Chiapas, Clave geoestadística 07027
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"** Cihuatlán, Jalisco, Clave geoestadística 14022
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"**, Jáltipan, Veracruz de Ignacio de la Llave, Clave geoestadística 30089
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"**, Lázaro Cárdenas, Michoacán de Ocampo, Clave geoestadística 16052.
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"**, Manzanillo, Colima, Clave geoestadística 06007
- INEGI 1, 2009, **"Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos"**, Mexicali, Baja California, Clave geoestadística 02002.
- Ishihara K, Yoshimine M.,(1992), **" Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes"**. Soils Found ;32(1): 173–88.

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982). **“Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods”**, Proc., 3rd Int. Conf. on Microzonation, Seattle, Vol.3, pp1319-1330

Jaime, A., Montañez, L., Romo M. P., Arguello, M., (1979), **“Estudio De Licuación Del Subsuelo Del Complejo Industrial De Fosforados Fertimex Lazaro Cardenas Mich.”** Informe Final

Jaimes, M. A., Niño, M. L., Reinoso, E. A., 2011, **“Estimación de mapas de desplazamiento lateral y vertical del suelo debido a licuación inducido por sismo”**, XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Agascalientes, Agascalientes.

Juárez, E., Rico, A., (2009), **“Mecánica de Suelos”**, Tomo 1 Fundamentos de Mecánica de Suelos, Ed. Limusa, , pag.100-101.

Juárez, H., Guerrero J.J., Gama A., Withney R.A. , Vera R., Hurtado F., (1995), **El sismo del 9 de octubre de 1995 en Manzanillo, Colima**, pp. 316-326

Kramer, S. , Scawthorn, C., (2000), **“Geotechnical Earthquake Considerations.”** Bridge Engineering Handbook. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan Boca Raton: CRC Press, Chapter 4

Legorreta, H., (2000), **“Apuntes para la asignatura de Mecánica de Suelos”**, semestre 2000-2, pag. 21-22.

Lira H. (2005). **“Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto”**, BC. Geotermia. Vol. 18 No. 1. Enero-Junio.

Louie , J. , (1998), **“What is Richter Magnitude ?”**, Traducción por Yi Tan; Abril,

López, G. R., (1982) **“Puerto Industrial Lázaro Cárdenas Michoacán”**, IX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, pp276-277

Marsal, R. J., (1961), **Behavior of a Sandy Uniform Soil During the Jaltipán Earthquake**, Mexico, Proc. %th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Engn. París

Meneses, J., (2010), **EERI PRELIMINARY RECONNAISSANCE REPORT ON THE 2010, M 7.2 EL MAYOR-CUCAPAH EARTHQUAKE**,

Ovando, E y Segovia, J. A. (1996), **“Licuación de arenas”**, TGC Geotecnia S. A. de C.V

OPS, (1985), **“Crónicas de Desastres N°3, Terremoto de 1985”**, Organización Panamericana de la Salud.

Pestana, J. M., Sancio, R. B., Bray, J. D., Romo, M. P., Mendoza M. J., Moss, R. E. S., Mayoral, J. M., Seed, R. B., (1999), **El Sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999 CENAPRED Julio, 1999**, Geotechnical Engineering Aspects of the June 1999 Central Mexico Earthquakes

Rauch, A. F., (1997), **“EPOLLS an Empirical Method for Predicting Surface Displacements due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes”**, Chapter 2, Chapter 6, Chapter 7.

Rauch, A.F. y Marti, J.R. (2000), **“EPOLLS model for predicting average displacements on lateral spreads”**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 16, pp 985-1006.

Rocha A., G., (1982), **“Puerto Industrial Lázaro Cárdenas Michoacán, IV. 4. RELLENOS”**, Memorias de la XI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. 1, Veracruz, Ver. Pp. 271-274

Sadigh K, Egan JA, Youngs RR, (1986), **“Specification of ground motion for seismic design of long period structures”**. Earthq Notes , 57(1): 13 [Relationships are tabulated in Joyner and Bore (1988)].

Santoyo, E., (2010), **“Exploración de suelos”**, Vigésima Conferencia Nabor Carrillo, SMIG A. C., pag. 71-79.

Suarez, J.,(2009), **“Deslizamiento: Análisis Geotécnico”**, www.erosion.com.co

Seed, H.B., Idriss, I.M. (1971). **“Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential”**, J. SMFD, ASCE, Vol.97, No.9, pp.1249-1273.

SGM, 2007, **“Carta geologica de México”**, 6ta. Edición.

Tamez G., E., (1987), **“Efectos del sismo del 19 de septiembre de 1985 en el Puerto Industrial de Lázaro Cárdenas, Michoacán”**, Memorias Simposio. Los sismos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos, México, D.F. pp. 19-22

Tokimatsu K, Seed HB., (1987), **“Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking”**. ASCE J Geotech Geoenviron Eng; 113(8): 861–78.

Youd, T.L., (1984), **“Recurrence of Liquefaction at the Same Sites”**, Proc. Eighth World Conference Earthquake Engineering Division, Vol. 104, No. 4. Pp. 231-238

Youd, T. L., and S. N. Hoose. (1978). **“Historic Ground Failures in Northern California Triggered by Earthquakes”**. U.S. Geological Survey Professional Paper 993.

Youd, T.L. and Perkins, D.M. (1978). **“Mapping of Liquefaction-Induced Ground Failure Potential”**, J. GED, ASCE, Vol. 104, No.4, pp.433-446.

Youd, T. L. and Perkins, D. M. (1987). **“Mapping of Liquefaction Severity Index”** , J.GED, ASCE, Vol.113, No.11, pp.1374-1392.

- Referencia de tabla de eventos sísmicos:

- ¹ Figueroa J., 1975, "**Sismicidad en Oaxaca**", N° 360, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- ² Aguilera, J. G., (1888), "**Estudio de los fenomenos seismicos del 3 de mayo de 1887**", Anales del Ministerio de Fomento de la Republica Mexicana, Tomo X, pp. 3-56
- ² Dubois, S. M., y Sbar, M. L., (1981), "**The 1887 Earthquake in Sonora: Analysis of regional ground shaking and ground failure**", in Proceedings of Conference XIII, Evaluation of Regional Seismic Hazards and Risk, (Santa Fe, New Mexico, August 25-27, 1980), edited by W. W. Hays and compiled by B. B. Charonnat, *U.S. Geol. Surv. Open File Rep. 81-437*, Reston, VA..
- ³ Santoyo, E. y Montañez, L., (1976), "**Información General Acerca del Subsuelo de 17 Ciudades de México, 9. MEXICALI, B.C.N.**", Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. 2, Secretaria de Obras Publicas- Instituto de Ingeniería, Guanajuato. Pp. 119-122
- ⁴ Marsal, R. J., 1961, "**Behavior of a Sandy Uniform Soil During the Jaltipán Earthquake**", Mexico, Proc. %th Int. Conf. Soil Mech. And Found. Engrn. París
- ⁵ Dawson A., Flores R. y Arenas A., (1977), "**Estudio de licuación de arenas en Chiapas**". Informe interno del Instituto de Ingeniería UNAM
- ⁶ Jaime, A., Montañez, L., Romo M. P., Arguello, M., 1979, "**Estudio De Licuacion Del Subsuelo Del Complejo Industrial De Fosforados Fertimex Lazaro Cardenas Mich.**" Informe Final.
- ⁷ Anderson, J. G., Simons, R. S., (1982), "**The Mexicali Valley of 9 June 1980**", pp. 73-105
- ⁸ Rocha A., G., (1982), "**Puerto Industrial Lázaro Cárdenas Michoacán, IV. 4. RELLENOS**", Memorias de la XI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos, Vol. 1, Veracruz, Ver. Pp. 271-274
- ⁹ IG-IIUNAM, (1985) "**Informe y Evaluación preliminar Elaborado por el Instituto de Geofísica con la Colaboración del Instituto de Ingeniería**", UNAM, 25/10/1985, http://www.ssn.unam.mx/website/jsp/Sismo85/sismo85_inf.htm
- ¹⁰ Juárez H., Guerrero J.J., Gama A., Withney R.A. , Vera R., Hurtado F., (1995), "**El sismo del 9 de octubre de 1995 en Manzanillo, Colima**", pp. 316-326
- ¹¹ Pestana, J. M., Sancio, R. B., Bray, J. D., Romo, M. P., Mendoza M. J., Moss, R. E. S., Mayoral, J. M., Seed, R. B., 1999, "**El Sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999 CENAPRED Julio, 1999**", Geotechnical Engineering Aspects of the June 1999 Central Mexico Earthquakes

¹²–Alcocer, S., Durán, R., Flores, L., Gutiérrez, C., Reyes, C., (2003), **Preliminary Observations on the Tecomán, Colima, Mexico, Earthquake of January 21, 2003**, EERI Special Earthquake Report — March 2003 y **EL SISMO DE TECOMÁN, COLIMA DEL 21 DE ENERO DE 2003, OBSERVACIONES PRELIMINARES EN EL ESTADO DE COLIMA** CENAPRED. 27 de enero de 2003

¹³ EERI; (2010), **The Mw 7.2 El Mayor Cucapah (Baja California) Earthquake of April 4, 2010**, EERI Special Earthquake Report — July 2010 y **EERI PRELIMINARY RECONNAISSANCE REPORT ON THE 2010, M 7.2 EL MAYOR-CUCAPAH EARTHQUAKE**, J. Meneses

- **Imágenes:**

http://ocw.uis.edu.co/educommons/ingenieria-civil/estabilidad-de-taludes/carpeta-6/portal_factory/ECDocument/Comportamiento_sismico_de_estructuras_en_sismos.pdf

Obando R., T. E., (2009), “**Antología de los Efectos de la licuefacción en suelos sujetos a sollicitaciones sísmicas. Ejemplos de Casos**”, Universidad Internacional de Andalucía UNÍA (Huelva, España).

Juárez, E., Rico, A., **Mecánica de Suelos**, Tomo 1 Fundamentos de Mecánica de Suelos, Ed. Limusa, 2009, pag.100-101.

Rauch, A., **EPOLL (Empirical Prediction of Liquefaction Lateral Spreading in Earthquake)**, 1997, Chapter 2