

LICUEFACCIÓN DE SUELOS Y FENÓMENOS ASOCIADOS DURANTE EL TERREMOTO DE LIMÓN

Sergio Mora¹. & Susumu Yasuda²

¹ Depto. Geología, I.C.E. FAX: 506-231 4744, Costa Rica

² Dept. Civil Eng. Kyushu Inst. of Technology, FAX: 8193 882 5378, Japón

ABSTRACT: The April 22, 1991 Telire-Limón earthquake ($M_s = 7.5$) caused considerable damage in Costa Rica and Panamá. Close to 3000km² were affected by soil liquefaction-related phenomena, which occurred extensively in the the Caribbean lowlands of Limón province (Matina, Moín, Banano, Sixaola) in Costa Rica and Bocas del Toro (Changuinola, Almirante) in Panamá.

The areas affected could be classified in three groups: 1) Inland alluvial terraces along the rivers, 2) Sand bars and beaches, 3) Litoral sandy strips between the coast line and marshes, estuaries and lagoons.

Road 32, connecting San José and the port of Limón and Road 32 suffered extensive damage by lateral spread; several of their bridges were partially or totally damaged. Fractures, lateral spread and sand boils appeared extensively in the alluvial plains, all along the coast line and around marshes and estuaries.

RESUMEN: El Terremoto de Limón (22/4/91, $M_s = 7,5$), causó daños muy importantes en Costa Rica y Panamá. Cerca de 3000 km² fueron afectados por la licuefacción de suelos. Esta se desarrolló a lo largo de las tierras bajas del sector oriental del litoral Caribe, Provincia de Limón (e.g. Matina, Moín, Banano, Sixaola) y Changuinola y Almirante (Bocas del Toro) en Panamá.

Los sectores en los que se desarrolló la licuefacción se pueden clasificar en tres tipos: 1) bancos aluviales continentales; 2) barras arenosas litorales y playas (cordones) y 3) áreas litorales, márgenes de los ríos, estuarios y lagunas.

La Carretera Nacional No. 32 que conecta San José con Puerto Limón y varios de sus puentes, entre las localidades de Siquirres y Moín sufrieron graves daños originados por la licuefacción. En los cordones litorales, barras arenosas playeras, contornos de los estuarios, canales y lagunas litorales, la deformación y movimientos se desarrollaron aprovechando las suaves pendientes formadas hacia las depresiones, lo que generó una intensa fracturación del suelo. Dentro del sector litoral y sobre los ríos, cuatro puentes de importancia, en la carretera No. 36 fueron totalmente destruidos por esta misma causa.

INTRODUCCIÓN

Efectos del Terremoto

El 22 de abril de 1991 ocurrió un terremoto que afectó severamente el litoral Caribe de Costa Rica y Panamá, causando 45 muertos en Costa Rica

y 60 en Panamá (Fig. 1). Fueron observados daños estructurales severos en varias edificaciones, refinería de petróleo, muelles y puentes. Hubo también cuantiosos daños en la infraestructura de salud y educación, viviendas, agricultura, industria y servicios (agua, electricidad), así como en las carreteras, canales de cabotaje litoral y otros sectores.

El daño económico causado a la economía de Costa Rica se ha evaluado entre US\$ 500 y US\$ 950 millones (costos directos, sin contar capitalizaciones a largo plazo, lucro cesante, costos secundarios y efectos sobre los parámetros macroeconómicos). El impacto sobre el Producto Nacional Bruto (PNB) de 1991 se ha podido estimar entre 4,5 y 9 % (Mora, 1991; Bermúdez, este volumen).

No ha sido posible evaluar el impacto sobre el PNB de años subsiguientes, pero es definitivamente significativo. Es posible que la influencia de este sismo sobre la economía costarricense pueda hacerse sentir al menos durante la década posterior al evento. No se dispone de información sobre el daño económico en Panamá, pero se estima comparable al de Costa Rica.

La figura 2 muestra un mapa con la distribución de efectos geológicos y geodinámicos más relevantes. Cerca de 3000 km² fueron afectados por la licuefacción y sus fenómenos asociados

(volcanes de arena, fracturación del suelo, desplazamientos laterales, subsidencias del suelo, etc.) (Mora et. al, 1994).

Más o menos en la misma extensión fue observado un súbito levantamiento continental, simultáneo con el sismo (0,1 a 2,0 m a lo largo de la costa entre Matina y Changuinola, máximo en Puerto Limón, Punta Piuta; tierra-adentro alcanzó alrededor de 4,70 m a lo largo de la línea de transmisión eléctrica Cachí-Moín, entre Liverpool y Río Blanco) (Astorga, 1991; Alvarado J.C., 1991, com. oral). Extensas áreas de arrecifes coralinos se han visto afectadas por este fenómeno. También fue registrado un tsunami con olas de alrededor de 3,5 m en el sector de Limón.

Cerca de 2000 km² fueron afectados por deslizamientos, los cuales en cerca de 25 km² destruyeron el 100% del suelo y su cobertura forestal. Este es el daño más importante, desde el punto de vista ambiental, generado por el terremoto. Serán necesarias varias décadas para

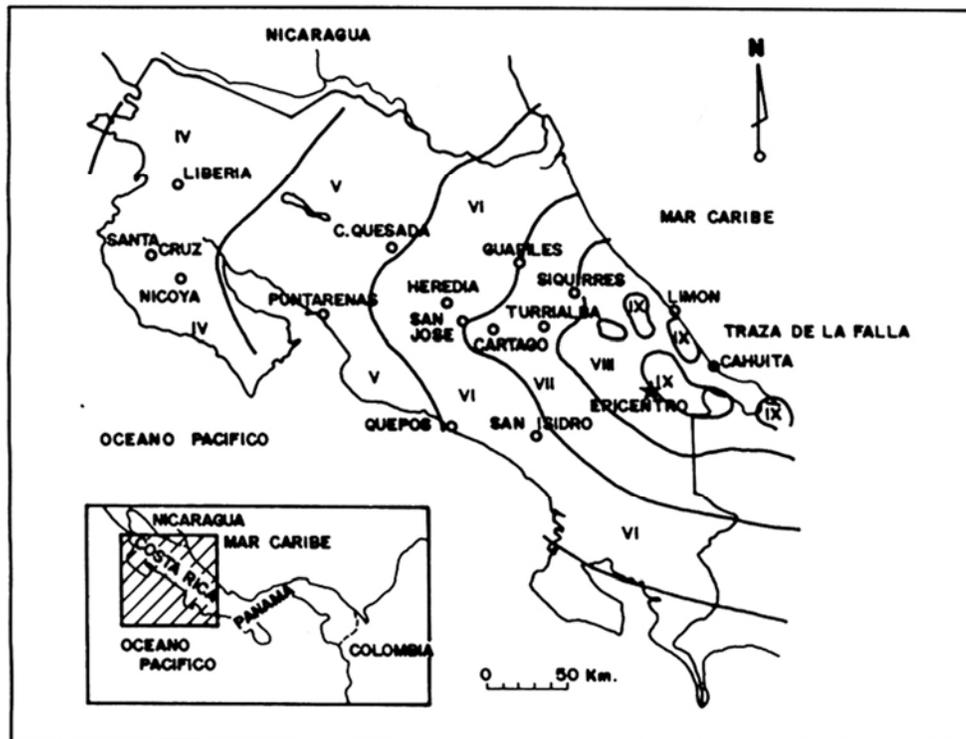


Fig. 1: Mapa de ubicación, isosistas, epicentro original y traza de la falla. Terremoto de Limón, 22 de abril de 1991 (Red Sismológica Nacional ICE-UCR).

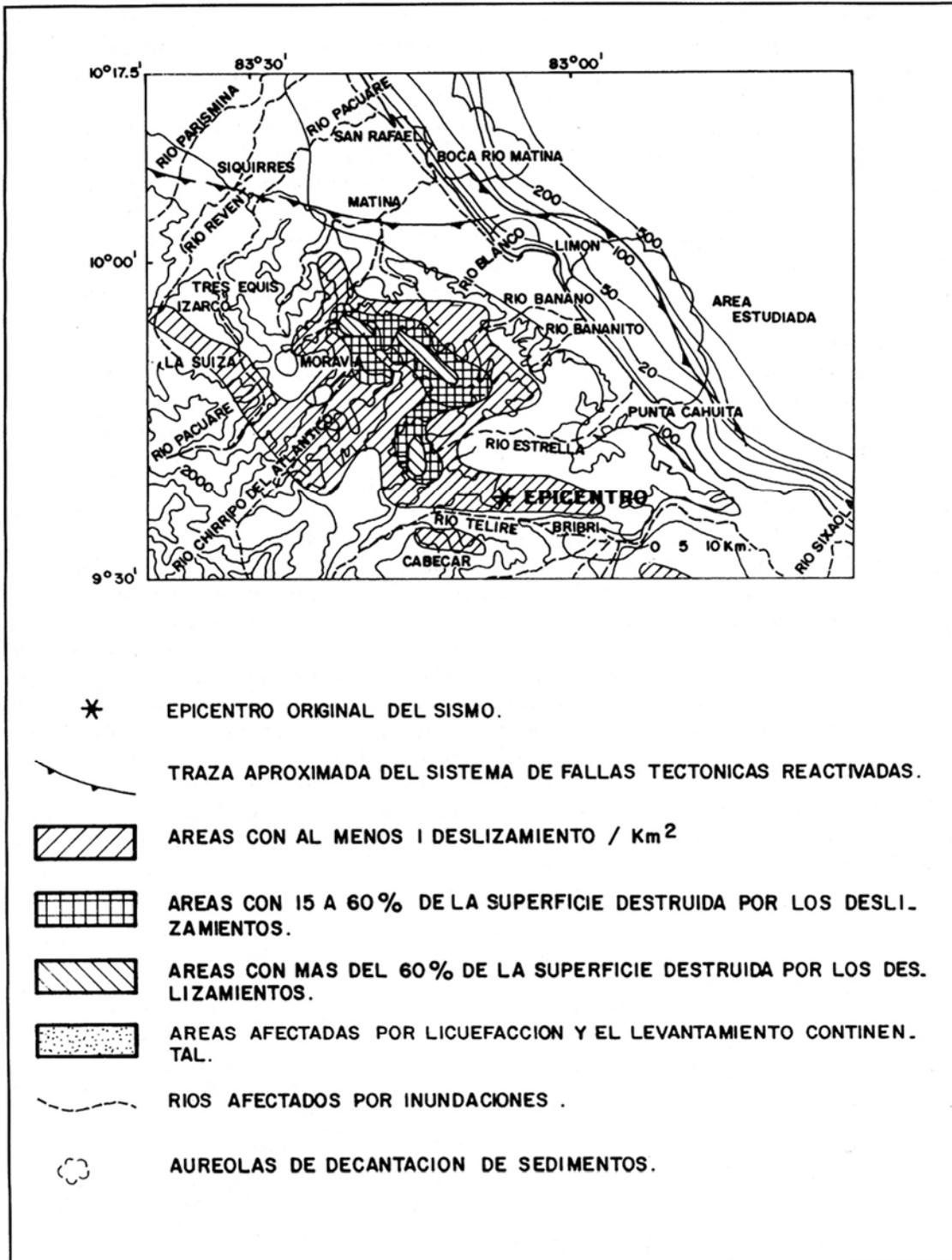


Fig. 2: Mapa de efectos geológicos - geodinámicos generados por el Terremoto de Limón.

alcanzar la recuperación total de las laderas, sobre todo considerando sus fuertes pendientes y las elevadas tasas de erosión que impiden la formación rápida de nuevos suelos.

Características Generales del Terremoto

La región fronteriza entre Costa Rica y Panamá se encuentra dentro de la zona de interacción de tres placas tectónicas mayores: Caribe, Nazca y Coco. Recientemente se ha sugerido que el Cinturón Deformado de Panamá podría tener las características tectónicas de microplaca.

Varias fuentes sismogénicas sido identificadas por la Red Sismológica Nacional (RSN-ICE/UCR); por ejemplo aquellas relacionadas con el proceso de subducción de la Placa del Coco bajo la de Caribe, la interacción entre las placas del Coco y Nazca a través de la Zona de Facturas de Panamá y el alineamiento tectónico o sistema transversal de fallas de Costa Rica, el cual delimita la interacción entre las placas de Caribe y la Microplaca Panamá (ZDP) y que incluye la actividad de la región Caribe.

Otras fuentes menores, asociadas con la actividad de ciertos elementos neotectónicos locales y someros, han generado también eventos importantes. Según las referencias históricas confiables (González, 1910), la licuefacción se ha producido en asociación con eventos sísmicos generados en todas estas fuentes.

Los parámetros básicos del terremoto son los siguientes (Red Sismológica Nacional ICE/UCR):

- Tiempo de origen: 15:57 (Hora local); 21:57 (GMT); 22 de abril, 1991
- Epicentro; Coordenadas: 9° 36.60'N; 84° 9.20'W; cuenca media del río Telire, Fila Jacrón-Dichíbeta, cantón de Talamanca, Provincia de Limón, Costa Rica
- Profundidad: 16.44km
- $M_s = 7,6$; $M_b = 6,3$ (NEIC); $M_l = 7,5$ (RSN,ICE/UCR); $M_w = 7,7$ (NEIC)

El sismo fue generado por la súbita ruptura de una falla inversa de bajo ángulo, en un movimiento de sobre-corrimiento (RSN, ICE/UCR, 1991). El bloque superior, coincidente con parte de la costa

del Caribe de Costa Rica, se desplazó hacia el NNE. No fue posible apreciar si la traza de la falla alcanzó la superficie, pues la intersección entre ellas se desarrolla mar adentro, entre 10 a 20 km de la costa.

La figura 1 muestra las isosistas (Mercalli Modificada, MM). Las intensidades fueron más elevadas en la región costera de relleno aluvial, en donde se registraron valores máximos de IX a X. En las áreas montañosas y de suelos más firmes (rocas, suelos residuales), las intensidades fueron menores (e.g. VII-VIII) (Mora & Mora, 1992; Mora et. al, 1994).

Registros de Aceleraciones

El evento principal fue registrado en más de 20 estaciones acelerográficas en Costa Rica, operadas por el Laboratorio de Ingeniería Sísmica de la Universidad de Costa Rica y el Departamento de Geología del Instituto Costarricense de Electricidad. La estación acelerográfica más cercana al epicentro se encuentra en el sitio de presa en estudio de Siquirres, a una distancia epicentral de 61 km. Esta estación, ubicada sobre suelo coluvial blando de 8m de espesor, registró una aceleración pico instantánea máxima de 0,76 g, la cual fue recalculada para una roca en 0,44 g (Laporte, 1993, comunicación oral).

La segunda estación por su cercanía, fue la de San Isidro de El General, ubicada a 76km del epicentro. En este caso, la aceleración fue de 0,20

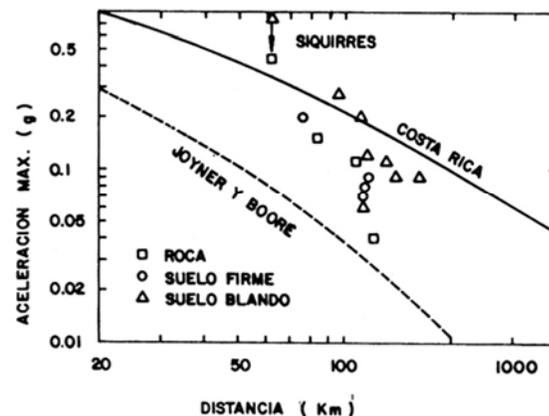


Fig. 3: Aceleraciones pico vs. distancia epicentral, según los registros obtenidos durante el Terremoto de Limón (Climent, 1991).

g. La diferencia tan importante en los valores de las aceleraciones registradas por estas dos estaciones obedece posiblemente a que puede haberse desarrollado un fenómeno de directividad de ondas durante el proceso de ruptura. La localidad de San Isidro se encuentra en una dirección transversal a la ruptura y en la otra vertiente de la Cordillera de Talamanca, lo cual parece haber contribuido a la atenuación de la energía del sismo. Siquirres por el contrario, se localiza prácticamente sobre la prolongación longitudinal de la traza de la falla que generó la ruptura.

La figura 3 muestra la relación entre los valores de los picos de aceleración máxima instantánea, registrados durante el sismo y la distancia epicentral. Además, aparecen las curvas de las ecuaciones empíricas de atenuación, calculadas por Joyner y Boore y por Climent (1991) para el caso de este sismo. La curva calculada por Joyner y Boore representa la envolvente inferior de las aceleraciones pico para sitios en roca en Norteamérica y sobre la cual se ubican todos los valores observados. Se aprecia que las aceleraciones pico observadas en Costa Rica son todas superiores a las utilizadas para trazar esa envolvente.

Los Fenómenos Asociados a la Licuefacción de Suelos

Como fue mencionado anteriormente, una extensión considerable de las llanuras aluviales y áreas litorales fueron afectadas por la licuefacción

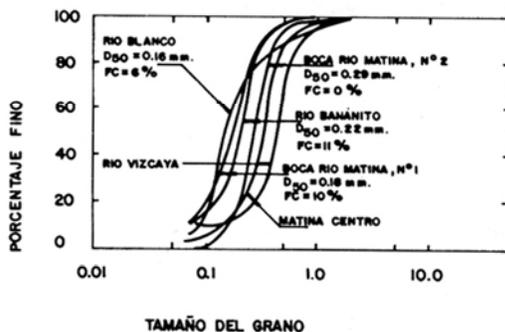


Fig. 4: Curvas granulométricas de algunas muestras recogidas en sitios con licuefacción de suelos.

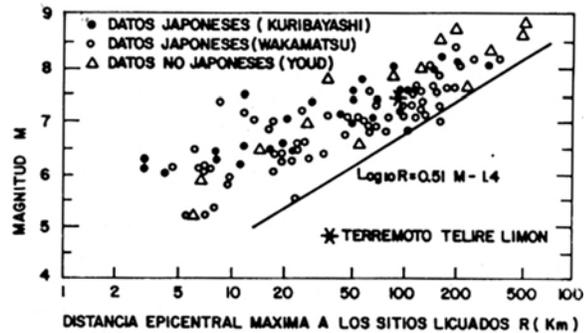


Fig. 5: Distancia epicentral máxima a los sitios con licuefacción vs. magnitud y sus relaciones (Et Cel, 1993) Ishihara.

de suelos. Mora et al (1994), Matamoros (1993) y Skögsberg & Hafström (1994) realizaron reconocimientos de terreno, análisis de laboratorio e intentos de zonificación del potencial de licuefacción.

En la Tabla 1 aparece la localización de los sitios en donde se observaron los fenómenos más relevantes, una breve descripción de los daños y la composición granulométrica predominante de los suelos de cada sitio. Por su parte, la figura 4 muestra las curvas granulométricas características de las muestras de suelos obtenidas en algunos de los sitios en donde la licuefacción se presentó con mayor intensidad. D_{50} representa el diámetro promedio de las partículas del suelo y FC el porcentaje del contenido de partículas finas (limos y arcillas, es decir, el material que pasa la malla #200; 0,074 mm).

Cabe hacer notar que la mayor distancia observada entre un sitio que mostrara algún tipo de fenómeno de licuefacción al origen epicentral del sismo fue de 90km. Sin embargo, al considerar que la ruptura ocurrió con propagación longitudinal al plano de falla (RSN-ICE/UCR, 1991), esta distancia podría medirse más bien en cerca de 60km en cualquier dirección, a partir de la superficie de ruptura (e.g. Moravia de Chirripó a Boca de Pacuare hacia el Norte, Telire a Changuinola hacia el SSE). Estos datos fueron graficados en la figura 5, la cual resume la información recopilada de otros terremotos por Kuribayashi et al. (1975), Youd (1977) y Wakamatsu (1991). La envolvente inferior fue

Tabla 1

Resumen de las características principales de los sitios en donde se presentaron fenómenos de licuefacción de suelos y los daños ocurridos (Mora et. al, 1994).

Sitio o Región	Descripción de los Daños y Fenómenos	Granulometría Principal
Área atravesada por la carretera No. 32 (San José-Limón), entre Madre de Dios, Moín y sus alrededores.	Desplazamientos laterales y hundimientos del relleno de la carretera entre el río Chirripó y Moín (cerca de 40km destrucción casi total), varios puentes dañados. Basculamiento de algunas torres de la línea de transmisión CachiMoín alrededor de Zent a causa de la pérdida momentánea de la capacidad de soporte y subsidencias del suelo. Desplazamientos laterales de las terrazas aluviales en el cauce del río Chirripó y en las rampas de aproximación de los puentes sobre los ríos Cuba y Blanco. Volcanes de arena.	Arenas finas entre 4 y 10 m de profundidad, nivel freático somero.
Población de Matina y alrededores.	Asentamiento y basculamiento de viviendas, volcanes de arena, desplazamientos laterales y fracturación del suelo alrededor del cauce del río Matina. Daños en puente ferroviario.	Arenas medias entre 3 y 9 m de profundidad, nivel freático somero.
Carretera entre Limón y Boca de Matina a lo largo del cordón litoral.	Fracturación y desplazamientos laterales cerca de la playa y Cementerio al NW de Moín. Subsidencia del terreno, volcanes de arena, desplazamientos laterales e inundación de varias hectáreas alrededor de Boca de Matina. Desplazamientos laterales en relleno y esplanada para perforación petrolera Matina 1.	Arenas finas, nivel freático somero.
Carretera No. 36 y sus alrededores (Limón-Sixaola).	Fracturación del pavimento y desplazamientos laterales del relleno. Fracturación y volcanes de arena en la pista de aterrizaje del aeropuerto de Limón. Desplazamientos laterales y fracturación en terrazas aluviales del río Banano cerca del puente (La Bomba). Fracturación, desplazamientos laterales hacia el sector continental en el cordón litoral entre las bocas de los ríos Vizcaya, Bananito y Estero Negro y en los bancos arenosos y rampas de aproximación de los puentes, lo que provocó su destrucción. Subsidencia e inundación del terreno aledaño. En alguna medida, la licuefacción contribuyó a la destrucción del puente sobre el río Estrella.	Arena media, nivel freático somero.
Sector del litoral panameño.	Fracturación del suelo, desplazamientos laterales, volcanes de arena, subsidencia e inundación de terrenos en el sector de Changuinola y Almirante (Bocas del Toro, Panamá).	Suelos arenosos finos, nivel freático somero.

trazada y su ecuación calculada por Wakamatsu (1991). La información aportada por este terremoto se encuentra dentro del rango de los datos obtenidos por los autores antes mencionados.

Clasificación de las Areas con Licuefacción de Suelos

Los sitios que presentaron los fenómenos ligados a la licuefacción de suelos más evidentes y representativos pueden clasificarse en tres grupos principales:

- 1) Areas continentales con suelos aluviales en las márgenes de los ríos, localizadas hasta varios kilómetros tierra-adentro de la línea de costa.

En este sector, el relleno sobre el cual fue construida la Carretera Nacional No. 32 fue dañado severamente entre los alrededores del puente sobre el Río Chirripó y Moín, aproximadamente en 40 km. Se desarrolló una fractura central paralela al eje de la carretera y un desplazamiento lateral hacia ambos lados del relleno. Las fracturas alcanzaron en algunos sitios hasta 3,5 m de profundidad.

En la figura 6 aparece un esquema que pretende explicar este fenómeno. La licuefacción puede haber ocurrido bajo el relleno en una capa de arena

fina situada bajo el nivel freático, entre 1 y 6 m de profundidad bajo el nivel del terreno original ocasionando una súbita pérdida de la capacidad soportante del terreno. Numerosos volcanes de arena fueron observados cerca de la carretera y dentro de las plantaciones de banano en donde muchos de los canales de irrigación y drenaje fueron obstruidos.

- 2) Barras, playas arenosas, cordones litorales y bandas de separación entre la costa, canales y lagunas litorales.

La licuefacción se desarrolló aquí desde una altura de 2 ó 3 m sobre el nivel del mar. Ejemplos de ello pudieron observarse a lo largo del camino entre Moín y Boca Matina, el cual sufrió graves daños, al igual que los terrenos circundantes.

La figura 7 muestra un esquema en el que se intenta explicar el mecanismo de ruptura. Los movimientos producidos por el desplazamiento lateral del terreno siempre ocurrieron tierra-adentro, es decir, hacia las leves depresiones del terreno en el fondo de los canales, lagunas litorales y pantanos. Los materiales recogidos de los volcanes de licuefacción mostraron una composición granulométrica de arena media limpia (Figura 4).

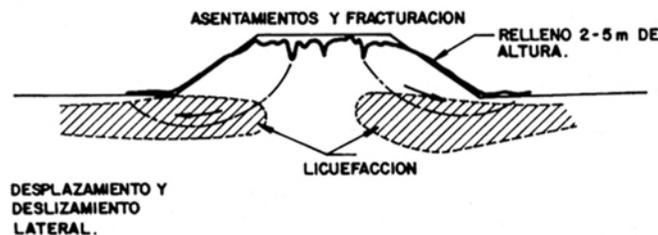


Fig. 6: Esquema ilustrativo del desarrollo de la licuefacción y de los daños en la Carretera Nacional N° 32 entre el Río Chirripó y Limón.

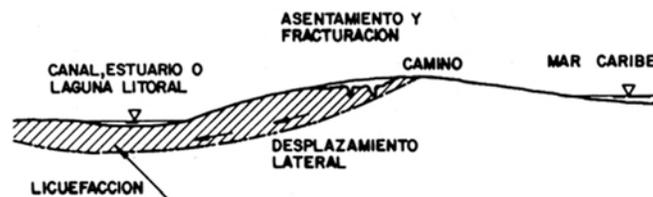


Fig. 7: Esquema de desarrollo de los desplazamientos laterales en las barras y cordones arenosos del Litoral Caribe.

3) Areas costeras a lo largo de los estuarios.

La carretera No. 36 entre Limón y Sixaola está trazada casi paralelamente a la línea de costa, por lo que atraviesa las desembocaduras o cauces inferiores de varios ríos. Los puentes sobre ellos sufrieron daños muy severos y cuatro fueron destruidos en su totalidad.

El puente sobre el río Vizcaya, compuesto por tres lozas de concreto prefabricadas de sección en "I", estaba sostenidas por dos pilares que colapsaron abruptamente. La figura 8 muestra un diagrama esquemático de los daños en su estructura. Uno de los bastiones sufrió un colapso completo a causa de la licuefacción de su fundación. La estructura de contención de la rampa de aproximación sur del puente sufrió una rotación de 8° hacia el oeste y fue empujada hacia el centro del río a causa del desplazamiento de la rampa de aproximación.

El puente sobre el río Bananito, compuesto por dos lozas con perfil en "I", sostenidas por un bastión en el centro del cauce, sufrió también un colapso total (Fig. 9). El río Bananito fluye paralelo con la línea de costa por alrededor de 4km antes de desembocar en el Mar Caribe. Debido a que el puente cruza el río en esta porción paralela, la carretera No. 36 adquiere una forma de "S" cerca del puente.

La carretera fue trazada a lo largo de la barra arenosa del litoral hacia el norte y sobre el límite del pantano hacia el sur. Fueron observadas

numerosas fracturas a lo largo de las márgenes del río y la rampa de aproximación sufrió desplazamientos laterales severos hacia el río (Fig. 10). La estructura de apoyo del sur desarrolló una rotación de cerca de 15° a causa del desplazamiento lateral.

Una falla similar a esta ocurrió en el puente sobre el río Estero Negro, en el cual una de las dos lozas prefabricadas de concreto y de perfil en "I" colapsó súbitamente. A causa del desplazamiento lateral de la rampa de aproximación hacia el centro del cauce, la estructura del apoyo de la margen izquierda fue empujada y descajada de su estructura de sostén. La rampa de aproximación de la margen derecha también sufrió un desplazamiento lateral importante.

La destrucción del puente sobre el río La Estrella parece haber sido la consecuencia, en su mayor parte, de una concepción estructural inadecuada, en particular por la escasez de elementos de apoyo en el bastión central. Estos fueron insuficientes para sostener los segmentos del puente durante la deformación ocasionada por las vibraciones sísmicas. Sin embargo, al haberse observado numerosos indicadores de licuefacción (agrietamientos del suelo, volcanes de arena en las plantaciones de banano aledañas, desplazamientos laterales en la carretera y rampa de aproximación de la margen derecha), es posible que la licuefacción contribuyera también con la destrucción del puente.

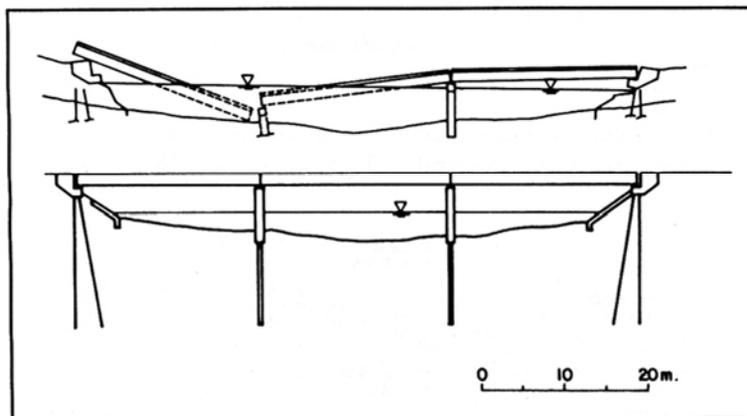


Fig. 8: Esquema ilustrativo de los daños sufridos por el puente sobre el Río Vizcaya, Carretera N° 36.

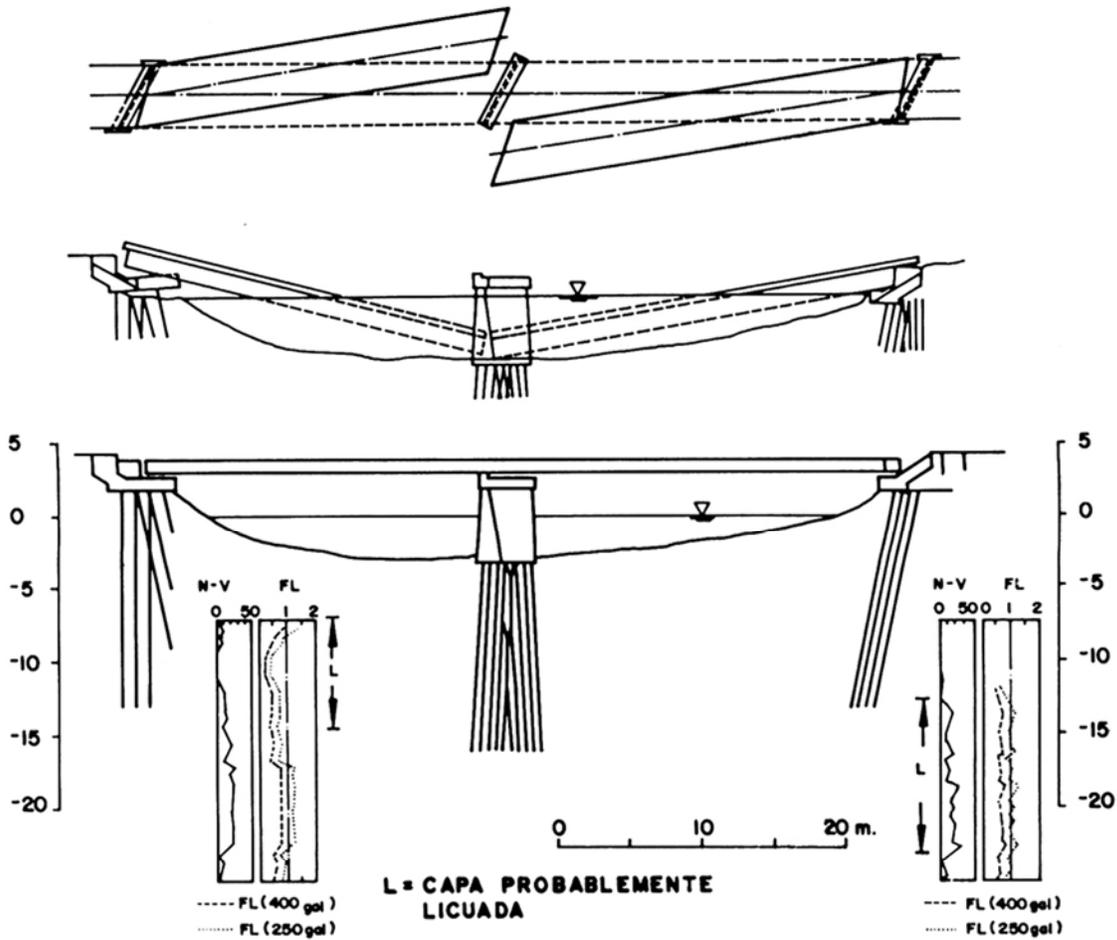


Fig. 9: Esquema que muestra los daños ocurridos al puente sobre el Río Bananito, Carretera N° 36.

Estimación de la posición de las capas licuables

Para comprender mejor el desarrollo de la licuefacción, fue realizado un muestreo de los suelos afectados y de sus manifestaciones superficiales (e.g. volcanes de arena). Fueron también consultados los registros de las perforaciones de investigación ejecutadas antes de la construcción de los puentes entre 1969 y 1971, particularmente las descripciones granulométricas y los resultados de SPT (“Standard Penetration Test”).

De acuerdo con las especificaciones de la Asociación de Constructores de Carreteras del

Japón, el Factor de Resistencia a la Licuefacción F_1 se ha estimado según la ecuación:

$$F_1 = R/L$$

En donde L es la carga cíclica aplicada por el sismo; la resistencia del suelo a la licuefacción R se compone de la suma de tres componentes que reflejan las propiedades mecánicas del suelo:

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

R_1 se define como una función del número de golpes N en SPT:

$$R = 0.0662 \sqrt{(N) P'_0 + 0.7}$$

en la cual P'_0 representa el esfuerzo efectivo aportado por la columna litostática (kgf/cm²).

R_2 depende del diámetro promedio de las partículas del suelo (D_{50} , mm):

$$R_2 = 0.19; \quad \text{si } 0.02 \leq D_{50} < 0.05 \text{ mm}$$

$$R_2 = 0.225 \log(0.35/D_{50}); \quad \text{si } 0.05 \leq D_{50} < 0.60 \text{ mm}$$

$$R_2 = -0.05; \quad \text{si } 0.60 \leq D_{50} < 2.00 \text{ mm}$$

R_3 refleja el contenido de partículas finas FC (%), y se calcula de la siguiente manera:

$$R_3 = 0; \quad \text{si } FC \leq 40\%$$

$$R_3 = 0.04FC - 0.16; \quad \text{si } FC > 40\%$$

Por su parte, el esfuerzo aplicado por la sobrecarga cíclica producida por el sismo se calcula, según Seed & Idriss (1971), de la siguiente manera:

$$L = T_{\text{prom}} / P'_o = a_{\text{má}} / g * P'_o / P'_o * r_d;$$

en donde

T_{prom} = Esfuerzo cortante promedio aplicado durante un período específico

$a_{\text{má}}$ = aceleración sísmica máxima en la superficie del suelo

P'_o = esfuerzo total ejercido por la columna litológica a la profundidad considerada

P'_o = Esfuerzo efectivo ejercido por la columna litológica a la profundidad considerada

r_d = factor de reducción del esfuerzo aplicado, considerando que la rigidez del suelo se incrementa con la profundidad. Se puede calcular por medio de la relación:

$$r_d = 1 - 0.015z;$$

z = profundidad considerada (m)

Se procede luego a determinar la resistencia del suelo a las cargas cíclicas, ya sea por medio de

correlaciones empíricas o utilizando el número de golpes en SPT (N_m) (Seed et al, 1985):

$$(N_1)_{60} = C_n * N_m * ER_m / 60$$

C_n = Coeficiente de corrección para la presión litostática

ER_m = Eficiencia energética real aplicada por la barra de perforación SPT

Según los análisis granulométricos, el diámetro promedio de las partículas del suelo y su contenido se estimaron en 0.22 mm y 11% respectivamente. Los resultados del análisis se muestran en las figuras 8 y 9 para los puentes sobre los ríos Vizcaya y Bananito. En esos gráficos, la capa que se señala con una "L" es en la que aparenta haber ocurrido la licuefacción. Fueron aplicados dos diferentes valores de aceleración pico: 250 y 400 Gals para calcular el valor $A^{\text{má}}$ y para efectos de comparación.

Debe considerarse que los pilotes de fundación de los puentes alcanzaron profundidades de 15,5 m en el río Vizcaya, cerca de 13 m en las estructuras de apoyo en las márgenes y 16,2 m en el pilar central del río Bananito y 12,75 m en los apoyos de las márgenes y 18m en el pilar central del río Estero Negro, respectivamente. Bajo estas circunstancias, la licuefacción puede haber ocurrido en toda la profundidad cubierta por los pilotes hasta su punta, bajo una aceleración ($A^{\text{má}}$) aun ligeramente inferior a 250 Gals.

Consecuentemente y como lo muestra la figura 10, es de suponer que el colapso de las estructuras de fundación se inició a partir del momento en que el terreno comenzó a licuarse en ambas márgenes

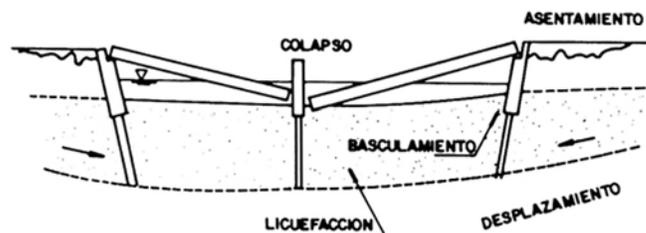


Fig. 10: Mecanismo probable de desarrollo de los daños debidos a la licuefacción de suelos y por el desplazamiento lateral en los bancos aluviales y que afectaron los puentes de la Carretera N° 36.

del río. La licuefacción puede haber ocurrido hasta la profundidad de las puntas de los pilotes o incluso mayor. De esta manera se desarrolló un desplazamiento lateral hacia la depresión del centro del río, empujando y haciendo girar los apoyos laterales del puente. Esto provocó que las lozas se desmontaran y colapsaran. La pérdida momentánea de la capacidad soportante bajo uno de los pilares centrales del puente Vizcaya, generó un asentamiento súbito y la subsidencia del suelo, lo que hizo que el pilar se hundiera en el terreno.

CONCLUSIONES

Puede afirmarse que los deslizamientos y la licuefacción fueron los fenómenos secundarios que causaron los mayores daños estructurales, económicos y ambientales durante el Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (MI = 7,5). Cerca de 2000 km² fueron afectados por los deslizamientos mientras que aproximadamente 3000 km² lo fueron por la licuefacción (volcanes de arena, asentamientos diferenciales, agrietamientos del suelo, desplazamientos laterales, subsidencias).

La licuefacción fue la principal causa del severo daño sufrido por el relleno de las carreteras nacionales Nos. 32 y 36 y sus puentes. La concepción estructural de los puentes no contempló los elementos necesarios para soportar un sismo como el ocurrido. Sumado a esto, la pérdida de capacidad soportante, asentamientos diferenciales y desplazamientos laterales de las márgenes y rampas de aproximación, la deformación, movimientos, rotaciones y colapsos de las estructuras laterales de apoyo y los pilares centrales de los puentes causaron su colapso y destrucción.

Por lo observado en el terreno durante los procesos de construcción de los nuevos puentes que sustituyeron los destruidos, se manifiesta la preocupación de los autores por el hecho de no ser evidente que el diseño de las nuevas estructuras las haga capaces de soportar, sin daños considerables, un futuro evento sísmico semejante al de 1991. Considerando la constitución geológica del terreno y su respuesta dinámica, de seguro la licuefacción de suelos se hará presente de nuevo.

REFERENCIAS

- Astorga, A., 1991: Informe sobre el levantamiento de la Costa Caribe de Costa Rica (sismo 22/41, Valle de la Estrella). - Escuela de Geología, Univ. Costa Rica, 9 págs. (informe inédito).
- Bermúdez, M., (este volumen): Manejo institucional y percepción en la población del Terremoto de Limón.
- Kuribayashi, E. & Tatsuoka, F., 1975: Brief review of soil liquefaction during earthquakes in Japan. - *Soils and Foundations*, **15(4)**: 81-92.
- Matamoros, O., 1993: Análisis de la amenaza de licuefacción, lavas, lahares y caída de cenizas volcánicas en la región Caribe Norte de Costa Rica. - Tesis de Licenciatura. Escuela de Ciencias Geográficas, Univ. Nacional, Heredia, Costa Rica. 80 págs.
- Mora, S; 1992. Estimación preliminar de los daños económicos causados por el terremoto de Limón, Costa Rica (22/4/91, MI=7.5). - Departamento de Geología, I.C.E. Informe inédito. 16 págs.
- Mora, S. & Mora, R., (en prensa): Landslides triggered by the 22 April, 1993 Limón-Telire, Costa Rica Earthquake. - U.S. Geological Survey Prof. Paper.
- Mora, S., Ishihara, K., Watanabe, H., Yasuda, S. & Yoshida, N., 1994: Soil liquefaction and landslides during the 1991 Telire-Limón, Costa Rica Earthquake. - *En*: "Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes". Proc. XIII Intl. Conf. soil Mech. Found. Eng., New Delhi. 41-48.
- National Earthquake Information Center (NEIC), 1991: Preliminary determination of epicenters report. - Golden, Colorado.
- RED SISMOLOGICA NACIONAL (RSN/ICE-UCR), 1991: Datos e información preliminar sobre el sismo de Telire-Limón, 22 de abril de 1991 (MI=7.5) y sus réplicas. - Archivos y datos inéditos.
- Seed, B. & Idriss, J., 1971: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. - *J. Soil Mech. Found. Eng.*; ASCE, **97(9)**: 1249-1273.
- Seed, B., Tokimatsu, K., Harder, L. & Chung, R, 1985: Influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluation. - *J.GED, ASCE*, **111(12)**: 1425-1445.
- Skögsberg, J. & Hafström, P., 1994: Liquefaction during the Limón-Telire earthquake, April 22, 1991. - Engineering Degree Thesis. Dept. Rocks and Soils Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 150 págs.
- Youd, L., 1977: Discussion of "Brief review of soil liquefaction during earthquakes in Japan". - *Soils and Foundations*, **17(1)**: 83-85
- Wakamatsu, K., 1991: Maps for historic liquefaction sites in Japan. - Takai University Press, Japan. 341 págs.