

## GENERALIDADES SOBRE LOS EFECTOS GEOLOGICOS DEL TERREMOTO DE LIMON

Percy Denyer<sup>1</sup>, Stephen Personius<sup>2</sup> & Olman Arias<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Escuela de Geología, Universidad de Costa Rica Apdo. 35-2060 UCR,  
Costa Rica, América Central

<sup>2</sup>U.S. Geological Survey, MS 966, Box 25046, Denver, CO 80225, U.S.A.

**ABSTRACT:** The April 22, 1991 earthquake caused severe damages in the southeastern region of Costa Rica. In this paper a summary of the geologic effects of the seismic event is discussed.

During the seismic event occurred the liquefaction of huge areas composed by non-consolidated Quaternary sediments. The magnitude of the liquefaction was more related to the underground composition than to the distance to the epicenter.

The subsidence that was observed in the Costa Rican Caribbean region, was not a tectonic effect, but it was caused by differential compaction of the soil and non-consolidated alluvial deposits.

The most dramatic effect of the earthquake was the co-seismic uplifting of the shoreline and inland area from Moín, in the north, to Gandoca, in the south. The magnitude of the co-seismic uplifting ranged from 0 to 1.85 m. A tsunami occurred after the main seismic event, however, its effect was diminished by the presence of a reef barrier and because the shoreline was already uplifted when the wave arrived.

Hundreds of landslides were triggered by the earthquake, causing a severe ecological damage to the tropical forest.

**RESUMEN:** El terremoto del 22 de abril de 1991 causó un daño severo en la región sureste del Caribe de Costa Rica, por lo cual se hace un sumario de aquellos efectos geológicos que impactaron a la población de la región.

Durante el Terremoto de Limón, ocurrió la licuefacción de grandes áreas constituidas por depósitos inconsolidados del Cuaternario, existiendo más influencia sobre la magnitud de la licuefacción por el tipo de subsuelo, que con la cercanía al epicentro.

Numerosos ejemplos de asentamiento diferencial fueron observados durante el trabajo post-terremoto. La subsidencia no debe de ser confundida con un efecto tectónico, sino que se debe a al asentamiento de sedimentos pobremente consolidados.

El efecto más dramático del terremoto fue el levantamiento co-sísmico de la línea de costa de Costa Rica, desde Moín al norte, hasta Gandoca al sur; el cual alcanzó un máximo de 1,85 m. Hubo también levantamientos tierra adentro, registrados con magnitudes superiores a los tres metros. Un tsunami ocurrió en asocio al terremoto, sin embargo su efecto fue disminuido por la presencia de una barrera arrecifal y que la costa estaba levantada, cuando la ola arribó.

Cientos de deslizamientos ocurrieron como una consecuencia directa del evento sísmico, los cuales causaron un severo daño ecológico a la selva tropical.

## INTRODUCCION

El terremoto del 22 de abril de 1991 causó un daño severo en la región suroeste del Caribe de Costa Rica. El trabajo de campo post-terremoto se realizó en los meses de mayo y junio de 1991, y se concentró en hacer un registro de los efectos geológicos superficiales, causados por el terremoto. El trabajo tuvo que hacerse con prontitud, porque muchas de las evidencias estaban desapareciendo rápidamente, a causa de las fuertes lluvias y el proceso de reconstrucción.

El trabajo de campo se vio dificultado por el clima lluvioso de la región, la densa vegetación tropical, la carencia de fotos aéreas post-terremoto y las dificultades de acceso, no sólo por las carreteras, sino también por la caída de cinco de los puentes principales.

En esta publicación se hace un sumario de aquellos efectos geológicos que de una u otra forma impactaron a la población de la región. Tratará sobre la distribución de la licuefacción, el asentamiento diferencial, el levantamiento de la costa, los deslizamientos inducidos y el efecto del tsunami. Los tópicos que aquí se describen muy escuetamente, serán tratados en detalle por otros autores, en este mismo volumen: la licuefacción es detallada por S. Mora & S. Yasuda; los deslizamientos por S. Mora & R. Mora; el levantamiento de la costa por P. Denyer, O. Arias & S. Personius y el tsunami por E. Camacho.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Luis Diego Morales, Director de Prevención y Mitigación de Desastres Naturales de la Comisión Nacional de Emergencias por el apoyo financiero y logístico. Parte del financiamiento y el tiempo de dedicación de los que participamos en este trabajo corrió por cuenta de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica: Proyecto 113-90-071.

Se agradece a los siguientes colegas por su ayuda durante el trabajo de campo: Rogelio Samuels, Fernando Montalto, Alexis Cerdas, Sergio Mora y Allan Astorga. A Walter Montero por el apoyo logístico como director de la Escuela

de Geología de la U.C.R. Al personal de JAPDEVA: Eduardo Ramírez, Julio Sarmiento y Gerardo Rodríguez por su apoyo en la visita a la isla Uvita.

El viaje de S. Personius fue financiado por USAID/OFDA, y Paul Bell dio la asistencia durante el trabajo de campo.

La fotografía de la figura 3 fue proporcionada por el periódico La Nación.

## LICUEFACCION INDUCIDA POR EL TERREMOTO

Durante el Terremoto de Limón, ocurrió la licuefacción de grandes áreas (Fig. 1), constituidas por un subsuelo de depósitos fluviales del Cuaternario, no consolidados. Esto produjo volcanes de arena y lodo (Fig. 2), numerosas fracturas del suelo, y el asentamiento diferencial de grandes áreas de terreno.

La figura 1 muestra la distribución general de la licuefacción inducida, sobre la cual influyó más el tipo de subsuelo, que la cercanía al epicentro. De hecho el área afectada por la licuefacción es mayor que el área de ruptura (Montero et al., 1991; Rojas, 1991), lo que se debe probablemente al fenómeno de amplificación dinámica (Matti & Carson, 1991) en sedimentos poco cohesivos.

El fenómeno de licuefacción combinado con el movimiento de la onda sísmica causó un severo daño a numerosas casas, obras de infraestructura y decenas de kilómetros de carretera (Figs. 3 y 4) por el efecto. En la mayoría de los casos, la licuefacción causó más daños que el mismo movimiento durante el terremoto.

Uno de los fenómenos más espectaculares que causó el terremoto, y que está relacionado con la licuefacción, fue la formación de volcanes de arena (Fig. 2); los cuales fueron observados, principalmente en lugares cercanos a la costa. Según los pobladores entrevistados, que observaron el fenómeno, hubo numerosas salidas de agua fétida y salada que junto con arena y barro, fueron eyectadas hasta alturas de 5 m. Ocho días después del terremoto, los autores observaron los residuos de estos volcanes, con diámetros hasta de 2 m.

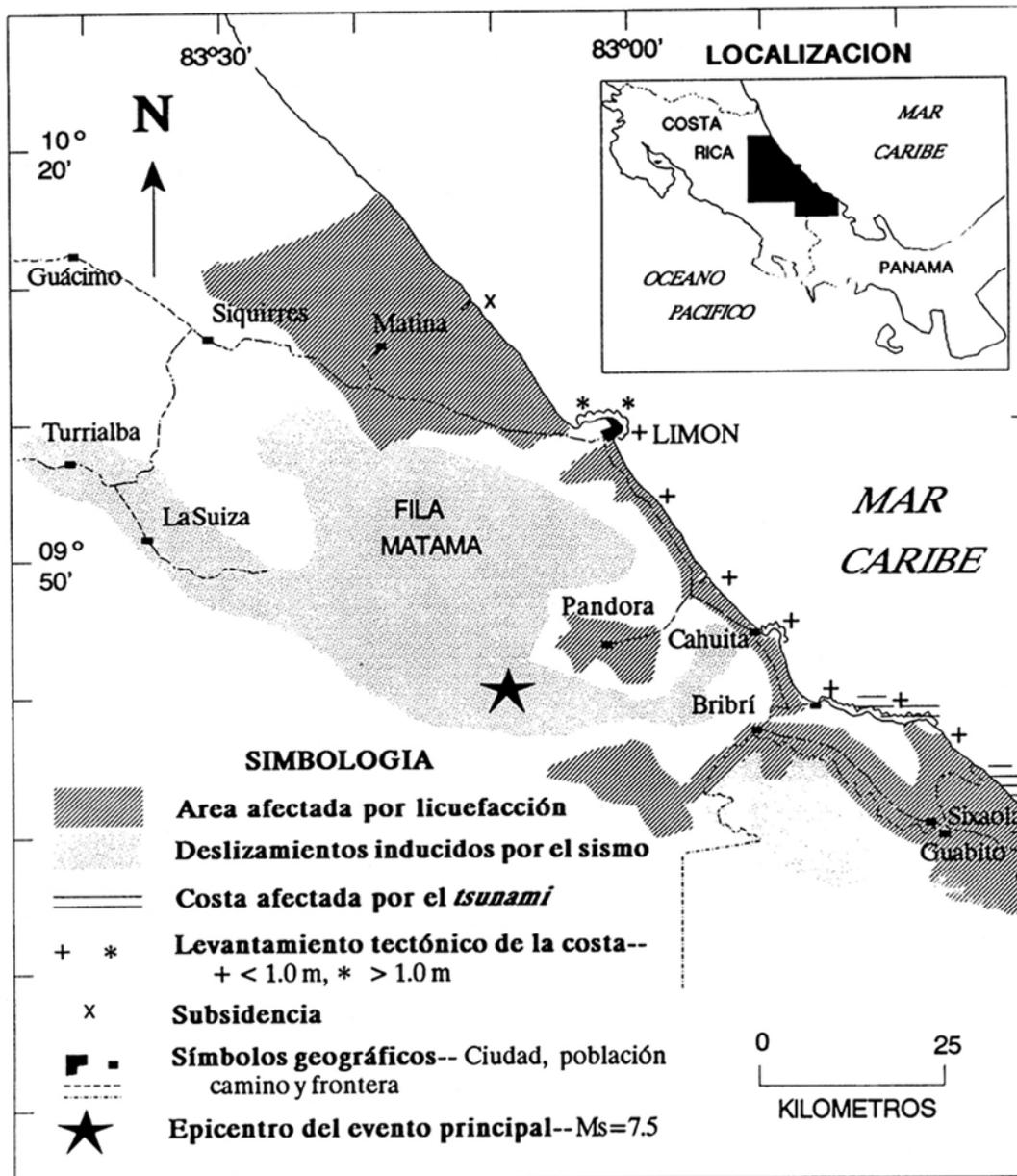


Fig. 1: Mapa guía de los efectos geológicos del Terremoto de Limón del 22 de abril de 1991.

Miles de fracturas y fisuras en el suelo se formaron durante el terremoto, la mayoría orientadas al azar y con formas curvilíneas. Otras se formaron paralelas a los rasgos geológicos, como la línea de costa, barras de arena, cauces de ríos y canales artificiales. El fracturamiento de extensión lateral ("lateral spreading") produjo severos daños

en las vías de comunicación, incluyendo carreteras, puentes y vías de ferrocarril.

El fenómeno de extensión lateral produjo daños considerables en el canal artificial de Tortuguero (Fig. 5), el cual es vital para la comunicación de varias comunidades al norte de Boca Matina. El canal fue totalmente obstruido por fracturamiento

de extensión lateral, paralelo a ambas riberas del canal. Fracturas con movimiento de extensión de más de un metro fueron observadas en ambas riberas. Los pobladores consultados reportaron que durante el terremoto hubo eyección de agua fétida y barro del centro del canal. Hubo que hacer un nuevo dragado para poder restablecer la navegación.

Fracturamientos similares al del canal de Tortuguero, fueron observados en las riberas de los ríos Matina, Estrella y Sixaola. Además, el fenómeno fue muy crítico en el complejo sistema de canales de drenaje de las compañías bananeras, muchos de los cuales debieron ser dragados nuevamente.



Fig. 2: Residuos de volcanes de arena, en una pequeña fractura, unos 2 km al norte de Moín.

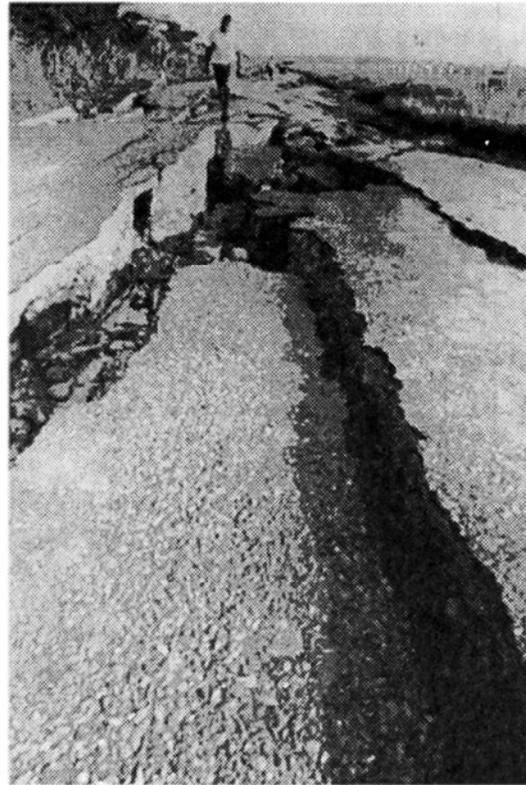


Fig 3: La destrucción de carreteras fue uno de los efectos más impresionantes del terremoto. Esta fotografía fue tomada en el aeropuerto de Limón, sobre la carretera que comunica Limón con Cahuita (cortesía del periódico La Nación).

### ASENTAMIENTO DIFERENCIAL

Numerosos ejemplos de asentamiento diferencial fueron observados durante el trabajo post-terremoto efectuado por los autores. Este fenómeno no debe de ser confundido con subsidencia tectónica, sino que se debe al asentamiento de sedimentos pobremente consolidados. Estos sitios están localizados en áreas pantanosas, preferiblemente en la desembocadura de los ríos, donde el subsuelo está constituido por espesos depósitos fluviales y deltaicos pobremente consolidados y saturados de agua. En la figura 1 se muestra un sitio al noreste de Matina, que coincide precisamente con la zona de desembocadura del río Matina (Fig. 6). Aunque estas áreas no corresponden con un desplazamiento

tectónico, el efecto de subsidencia resulta en un fenómeno permanente.

En Boca Matina, la subsidencia fue mayor a 0,5 m y la población tuvo que ser reubicada.

Otro ejemplo, aunque de una menor escala que Matina, fue observado en el Parque Nacional Cahuita (al este de Cahuita, Fig. 1), donde se reporta un levantamiento co-sísmico de 0,5 m en las plataformas coralinas, y en las áreas pantanosas aledañas el nivel del mar se mantuvo sin cambio relativo, pues el levantamiento co-sísmico se compensó con la subsidencia causada por el asentamiento diferencial.

### DEFORMACION TECTONICA

Uno de los más dramáticos efectos del terremoto fue el levantamiento co-sísmico de la



Fig. 4: Fracturas paralelas al camino, provocadas por la licuefacción y el asentamiento diferencial. La fotografía fue tomada en la población de Boca Matina.



Fig. 5: El canal de Tortuguero se obstruyó a causa del desplazamiento lateral del suelo ("lateral spreading"), la licuefacción y el asentamiento diferencial, por lo cual tuvo que ser dragado nuevamente como se observa en la fotografía, tomada un mes después del terremoto, unos 500 m al norte de la desembocadura del Río Matina.

línea de costa de Costa Rica, desde Moín (al norte), hasta Gandoca (al sur) (Figs. 1 y 7). El levantamiento alcanzó un máximo de 1,85 m, en las vecindades de Limón y en Cahuita, Puerto Viejo y Gandoca fue inferior a 1,0 m (Denyer & Arias, 1991; en prensa). Este levantamiento causó daños a embarcaderos y muelles, por ejemplo el muelle de Moín tuvo que ser dragado, pues la menor profundidad del agua estaba provocando problemas a las embarcaciones de mayor calado.

El levantamiento co-sísmico produjo daños irreparables a los arrecifes de la costa caribeña (Cortés et al., este volumen). Un problema sanitario se produjo al quedar expuestas las tuberías de aguas negras, las cuales drenan directamente al mar (Fig. 8). Este problema fue irónicamente resuelto extendiendo las tuberías unos metros más.



Fig. 6: El asentamiento de sedimentos pobremente consolidados, cerca de la desembocadura del Río Matina, produjo la subsidencia y la consecuente inundación de varias viviendas.

Actualmente se puede observar la tubería que se muestra en la figura 8, restaurada y prolongada hasta el mar.

Según datos del Instituto Costarricense de Electricidad (Sergio Mora, com. pers., 1992), el levantamiento tierra adentro fue de mayor magnitud, con diferencias en los valores pre y post terremoto de más de tres metros, en el tramo de la línea de transmisión de Siquirres a Limón.

El levantamiento, tanto en la línea de costa como tierra adentro, modificó el perfil longitudinal de algunos ríos que desembocan en el Caribe, reduciendo el gradiente en áreas muy planas. Esto ayudó a que el primer temporal, tres meses después del terremoto, causara severas inundaciones. El caso contrario se observó en la localidad de Manzanillo, donde la magnitud de la subsidencia por asentamiento diferencial, fue menor que el levantamiento tectónico de la costa, lo que resultará en una disminución de la vulnerabilidad a inundaciones en las zonas de costa.

Según Montero et al. (1991), Goes et al. (1993), entre muchos otros autores, el Terremoto de Limón ocurrieron en una falla inversa, buzando suavemente

al oeste, y con un rumbo paralelo a la costa Caribe de Costa Rica. Durante el estudio de campo, no se encontró evidencia superficial de la ruptura primaria, sin embargo, se cartografiaron varias superficies discontinuas de falla, con rumbo noreste y movimiento transcurrente. Estas fallas son el resultado de la segmentación del bloque superior que se movió al noreste, durante la ruptura, cuyo límite noroeste es la falla de Río Blanco.

Se observaron numerosas fracturas en las plataformas expuestas por el levantamiento cósmico, aunque la mayoría de ellas se interpretaron como causadas por el colapso durante el movimiento sísmico y se descartó un origen tectónico (Denyer & Arias, en prensa). Este tipo de estructuras fue observado en el promontorio de Limón y Punta Manzanillo-Gandoca, y ejemplos submarinos similares fueron reportados por los buzos de la región.

#### DESLIZAMIENTOS INDUCIDOS

Cientos de deslizamientos ocurrieron como una consecuencia directa del evento sísmico (Fig. 1) y

la gran cantidad de réplicas, y muchos otros siguieron durante las intensas lluvias, unos meses después del terremoto. La mayoría de los deslizamientos ocurrieron en áreas con pendientes de más de 25°, en suelos saturados, pues en el momento del terremoto ya habían empezado las lluvias en la región. Algunos de ellos causaron la obstrucción del paso del agua, al formarse represamientos, que pudieron causar grandes avalanchas de lodo.

Estos deslizamientos causaron un severo daño ecológico a la selva tropical, al llevarse consigo una inmensa cantidad de árboles y plantas. Con las primeras lluvias post-terremoto, los ríos y playas de la región estaban llenos de inmensos troncos de árboles (Figs. 9 y 10) y el color de las aguas era café intenso.

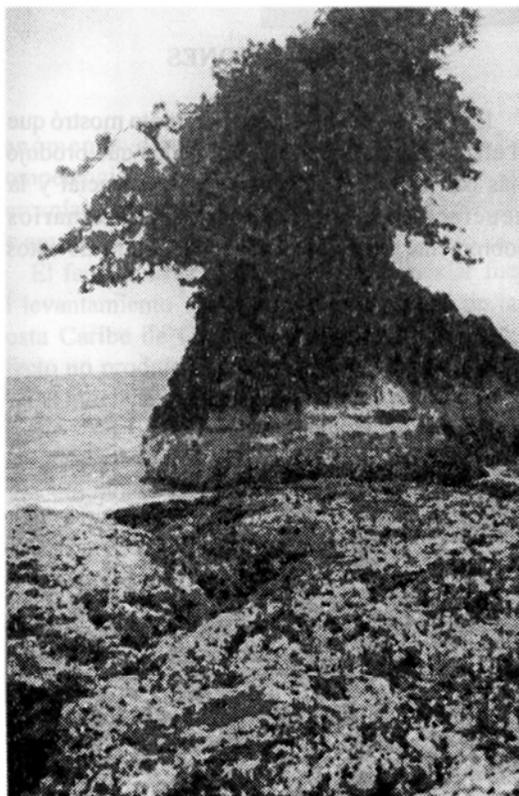


Fig. 7: El levantamiento co-sísmico de la línea de la costa es evidente en esta fotografía por la diferencia de coloración en las rocas, provocada por la presencia de organismos. Esta fotografía fue tomada en la ciudad de Limón, cerca del hospital de la C.C.S.S., donde el levantamiento fue ligeramente superior a un metro.



Fig. 8: Los desagües de aguas negras quedaron expuestos en las plataformas levantadas tectónicamente, produciendo un problema sanitario que se sumó a la carencia de agua potable. Esta fotografía fue tomada al noroeste de la ciudad de Limón.

Entre las cuencas más dañadas, están las de los ríos Estrella, Banano, Bananito, Viscaya, Zent y Chirripó. En la cuenca del río La Estrella, que tiene un área mínima de 250 km<sup>2</sup> con pendientes mayores a 30°, se estimó una devastación de al menos 30%; la cantidad de biomasa en este tipo de bosque es de 200 m<sup>3</sup>/hectárea (Sergio Feoli, com. pers., 1991). De esta forma se hizo un cálculo grosero de que la cantidad de biomasa removida, que bajó por el río La Estrella, fue de por lo menos  $1.3 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

### EFEECTO DEL TSUNAMI

Se entrevistaron numerosos habitantes de la región afectada y generalmente las respuestas fueron muy consistentes. En las localidades donde se reportó un tsunami (p.e. Gandoca, Punta Uva

Manzanillo, Boca Matina), los pobladores dijeron que antes del terremoto, el mar estaba muy tranquilo, sin ningún comportamiento anormal. Durante el terremoto hubo una súbita reducción del nivel del mar, seguido por el tsunami, 5-15 minutos después. La altura de la ola alcanzó un máximo de 2,5 m y en algunas localidades se reportó una serie de olas, por un período entre 15 y 60 minutos después del sismo.

Los mayores daños por efecto del tsunami, se reportaron en Panamá (E. Camacho, este volumen). En Costa Rica, la mayor parte de reportes son de Manzanillo, Punta Uva y algunos en la desembocadura de los ríos, cerca de la ciudad de Limón.

Los efectos del tsunami se vieron disminuidos en Costa Rica a causa de la presencia de una barrera arrecifal, y al hecho de que en el momento que arribó, la costa había sido levantada por el efecto tectónico. Los reportes del tsunami en las desembocadura de los ríos puede deberse a la ausencia de barras arrecifales en estos sitios y por la subsidencia por compactación de estas áreas, lo que pudo haber permitido la entrada de olas mayores que las normales.

### EFFECTOS EN EL AGUA SUBTERRANEA

Hubo una elevación post-terremoto del nivel freático, que varió entre 0,5 y 2,0 m, en áreas deltaicas. Casi todos los reportes son del norte de Limón, Matina y más al noroeste. En Matina hubo deformación de las tuberías de pozos existentes (Eduardo Hernández, com. pers., 1991). Este fenómeno debe de estar relacionado con la compactación y reducción de la porosidad de los acuíferos en sedimentos poco consolidados.

En Olivia, unos 20 km al noroeste de Sixaola, una pequeña fuente termal se activó por 8 días después del terremoto. Tales fenómenos en fuentes termales son un efecto común en terremotos fuertes (Marler, 1964; Hutchinson, 1985).

### CONCLUSIONES

El trabajo de campo post-terremoto mostró que el efecto más extendido y uno de los que produjo más daños, fue el asentamiento diferencial y la licuefacción de los depósitos Cuaternarios pobremente consolidados. La magnitud de estos



Fig. 9: Los deslizamientos produjeron que los ríos transportaran gran cantidad de troncos de árbol. Esta fotografía fue tomada a la altura de Vesta, sobre el Río La Estrella.

Fig. 10: Los troncos de árbol, producto de los intensos deslizamientos, se acumularon finalmente en la costa. Esta foto fue tomada en el Parque Nacional Cahuita.



fenómenos estuvo más relacionada con la competencia del suelo y/o subsuelo, que con la cercanía al epicentro, probablemente por el efecto de amplificación de la onda sísmica.

El fenómeno geológico más espectacular fue el levantamiento co-sísmico de gran parte de la costa Caribe de Costa Rica. Sin embargo, este efecto no produjo mayores daños, con excepción de los muelles, que tuvieron que ser dragados de nuevo.

Un gran número de deslizamientos fueron inducidos por el terremoto, sin embargo, la mayoría ocurrió en áreas despobladas, siendo el daño ecológico su mayor efecto.

El perfil de los ríos ha sido variado por el terremoto, con un levantamiento de la línea de costa y asentamiento en la parte trasera, aumentará la susceptibilidad a inundaciones en los próximos años, puesto que la falta de cobertura vegetal y suelo provocará una mayor escorrentía superficial.

El tsunami causó mayores daños en Panamá. En Costa Rica su efecto fue disminuido por la presencia de una barrera arrecifal y que cuando la ola arribó, la línea de costa había sido ya levantada por el efecto tectónico.

## REFERENCIAS

- Denyer, P. & Arias, O., 1991: Efectos geológicos del terremoto de Limón, Costa Rica. - 35 págs., Universidad de Costa Rica, Informe no publicado, San José.
- Denyer, P. & Arias, O. (en prensa): Efectos geológicos del terremoto del 22 de abril de 1991, Costa Rica. - *Geoistmo*.
- Goes, S., Velasco, A., Schwartz, S., & Lay, T., 1993: The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw = 7.7) Earthquake and its Tectonic Implications: a Broadband Seismic Study. - *J. Geoph. Research*, **1**(B5): 8127-8142.
- Hutchinson, R.A., 1985: Hydrothermal changes in the Upper Geyser Basin, Yellowstone National Park, after the 1983 Borah Peak, Idaho, earthquake. - *En*: Stein, R.S. & Bucknam, R.C. (Eds.): Workshop XXVIII: On the Broah Peak, Idaho, earthquake. - U.S. Geol. Surv. Open-File Report 85-290: 612-624.
- Marler, G.D., 1964: Effects of the Hebgen Lake Earthquake of August 17, 1959, on the hot springs of the geyser basins, Yellowstone National Park. - U.S. Geol. Surv. Bull., 1898, 53 págs.
- Matti, J. C. & Carson, S. E., 1991: Liquefaction susceptibility in the San Bernardino Valley and vicinity, Southern California; a regional evaluation. - U.S. Geol. Surv. Bull., 1898, 53 págs.

Montero, W., Ponce, L., Pardo, M., Domínguez, J., Boschini, I., Rojas, W., Suárez, G. & Camacho, E., 1991: The Limón earthquake of April 22, 1991 ( $M_s = 7.5$ ), seismicity, focal mechanism and tectonic implications [abs]. - Fall AGU Meeting, Supplement to EOS 72 : 301.

Rojas, W., 1991: El terremoto del 22 de abril de 1991 en la región Caribe y la sismicidad asociada en el mes de abril, 1991. - 65 págs., Laboratorio de Sismología, Universidad de Costa Rica, informe no publicado, San José.