

Distribución de intensidades macrosísmicas del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,7)

Intensity distribution of the Limón earthquake of april 22, 1991 (Mw 7.7)

Wilfredo Rojas-Quesada y Walter Montero-Pohly*

Universidad de Costa Rica (UCR), Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas (CICG),
San José, Costa Rica

*Autor para contacto: wmonteropo@gmail.com

(Recibido: 08/02/2021; aceptado: 16/03/2021)

ABSTRACT: The intensity distribution of the Limón earthquake of April 22, 1991 (Mw 7.7) was obtain using macroseismic information compiled from direct observations, personal and telephonic interviews and data recovered from different information sources. The earthquake was felt in a large region of Central America. The average perception radius estimated is ~ 620 km. The minimum intensity with which the earthquake was felt in Costa Rica was intensity IV at was determined in the northwestern part of the country. From this region the intensities increased until the mezoseismic region, located along the Caribbean side of the country, where the estimated intensities were between VIII and X degrees. In the mezoseismic zone occurred considerable landslides along the Caribbean spurs of the Talamanca Cordillera, sandy soil liquefaction in recent deposits located principally along the Caribbean coast and important damage over diverse civil works, standing out the damage to roads and bridges.

Keywords: Modified Mercalli Intensity; Macroseismic Information; Mezoseismic Zone; Geology of Costa Rica; Rupture Area.

RESUMEN: La distribución de intensidades del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,7) se ha obtenido a partir de observaciones directas, entrevistas personales y telefónicas y datos de diferentes fuentes de información. El sismo fue sentido en gran parte de América Central. El radio promedio de percepción estimado es de ~ 620 km. La intensidad mínima con que fue sentido el terremoto en Costa Rica fue con intensidad IV y se observó en el noroeste del país. Al sureste de esta región la intensidad aumentó hasta alcanzarse la zona mesosísmica localizada en el Caribe costarricense, donde las intensidades fueron entre VIII y X grados. En la región mesosísmica ocurrieron considerables deslizamientos en el sector Caribe de la cordillera de Talamanca, licuefacción de suelos arenosos en depósitos recientes principalmente a lo largo del litoral Caribe e importantes daños en diversas obras civiles, destacando los daños en obras viales (carreteras y puentes).

Palabras clave: intensidad Mercalli Modificada; información macrosísmica; zona mesosísmica; geología de Costa Rica; área de ruptura.



INTRODUCCIÓN

El terremoto de Limón, ocurrido a las 21:56 GMT del 22 de abril de 1991 (M_s 7,6; M_w 7,7), se originó en una falla inversa del área trasarco de la cordillera de Talamanca (Fig. 1). Debido a su gran magnitud y fuente cortical, generó gran destrucción en el Caribe de Costa Rica, en diversas obras civiles, tales como casas de habitación, edificios industriales, vías de comunicación (carreteras y puentes) y obras portuarias (Sauter, 1994). Asimismo, generó diversos efectos geológicos como el levantamiento tectónico de la costa, licuefacción y deslizamientos, principalmente (Denyer, Personius y Arias, 1994). Para investigar los anteriores efectos, el primer autor Wilfredo Rojas con la colaboración de Eduardo Hernández se desplazaron al día siguiente del terremoto al área mesosísmica con el objetivo de obtener información sobre los daños y consecuencias generadas por el evento sísmico. Posteriormente, se recopiló información macrosísmica en otros lugares del país y fuera del mismo. Esta información fue luego interpretada por Rojas (1991), lo cual le permitió obtener la distribución de intensidades asociada con el terremoto de Limón. El anterior estudio fue desafortunadamente poco divulgado, dado que se incluyó en un



Fig. 1: Marco tectónico regional y ubicación de localidades de América Central (excepto Costa Rica), donde se obtuvieron observaciones macrosísmicas del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (M_w 7,7) y el nivel de intensidad interpretado (entre paréntesis) de acuerdo con el Cuadro 1. La flecha negra muestra la velocidad de movimiento relativo entre las placas del Coco y Caribe. La estrella roja muestra el epicentro del terremoto de Limón según la localización de la RSN. CT es la cordillera de Talamanca. El rectángulo a trazos muestra la ubicación de la figura 2.

informe interno con escasa distribución. La iniciativa para elaborar un volumen especial relacionado con el treinta aniversario del terremoto de Limón incorporando artículos relacionados con el mismo se visualizó como una oportunidad especial para publicar el mapa de intensidades realizado por Rojas (1991) y la información macrosísmica que lo sustenta (Cuadro 1). Por la anterior razón, el segundo autor Walter Montero le propuso al primer autor (Wilfredo Rojas) aprovechar la oportunidad del volumen especial para publicar un artículo que incluyera el mapa de intensidades y el Cuadro 1. Wilfredo Rojas aceptó la propuesta con el compromiso del segundo autor de escribir la publicación. Lo anterior fue puesto en su oportunidad en conocimiento del Dr. Percy Denyer, como uno de los Editores del Volumen Especial. En el proceso, el muy querido colega Geólogo Wilfredo Rojas sufrió un quebranto de salud, el cual desafortunadamente derivó en que físicamente nos abandonará el pasado 4 de enero del 2021. Sin embargo, el compromiso de elaborar esta publicación se fortaleció aún más sabiendo que la misma permite en parte traslucir el importante aporte de este geocientífico a la geología nacional y en especial a la sismología. Finalmente, debe indicarse que el segundo autor realizó un viaje en helicóptero a la zona mesosísmica unos pocos días después de ocurrido el terremoto y unos meses después un viaje por vía terrestre, lo cual le permitió documentar los efectos del sismo y obtener información fotográfica del terremoto. En este artículo se presenta el mapa de distribución de intensidades del terremoto de Limón elaborado por Rojas (1991) con ligeras modificaciones, las cuales en su oportunidad serán indicadas.

EL TERREMOTO DE LIMÓN

El terremoto de Limón fue localizado por la Red Sismológica Nacional (RSN: UCR-ICE) cerca del eje de la cordillera de Talamanca, a una profundidad de 24,0 km (Figs. 1 y 2). El terremoto de Limón ocurrió en una falla inversa de bajo ángulo, con un valor estimado entre 15° y 25° de inclinación al suroeste (Montero, Pardo, Ponce, Rojas y Fernández, 1994; Dziewonski, Ekström y Salganik, 1992; Goes, Velazco, Schwartz y Lay, 1993; Tajima y Kikuchi, 1995).

Distribución de intensidades

La distribución de intensidades fue controlada en buena medida por la magnitud del sismo (M_w 7,7), el mecanismo de ruptura, la directividad asociada con la fuente, la geomorfología y por la geología local y regional. Las observaciones macrosísmicas en las diversas localidades y la distribución de intensidades del terremoto de Limón se muestran en el cuadro 1 y en las figuras 1, 2 y 3. Para asignar las intensidades se usó la escala Mercalli Modificada (MM). Debido a la alta magnitud del sismo de Limón (M_w 7,7), este fue percibido en gran parte de América Central y en islas del Caribe y del Pacífico (Fig. 1). Al noroeste de Costa Rica fue sentido con intensidad II, en forma leve en las capitales de Honduras (Tegucigalpa) a ~ 665 km y de El Salvador (San Salvador) a ~ 800 km. También, fue sentido en la capital de Nicaragua (Managua) a ~ 440 km. Por el lado sur fue percibido con intensidad II en la isla del Coco a una distancia epicentral de ~ 630 km y por el lado este fue sentido en la ciudad de Panamá (~ 400 km) y hasta en el Puerto Obaldía (~ 635 km) en la zona fronteriza entre Panamá y Colombia (Fig. 1). Por el lado norte fue sentido con intensidad III en la Isla San Andrés (Colombia) a una distancia epicentral de ~ 365 km. Es difícil estimar el área sentida para este terremoto, considerando el escaso número de sitios donde se estimó una intensidad II y porque tampoco se cuenta con información de sitios donde el sismo no fue sentido. Además, una gran parte de la zona entre intensidad I y II se localiza en el área marina. Se estima en forma grosera el radio promedio de percepción (r) con base en las diferentes distancias epicentrales máximas obtenidas en distintas direcciones. El valor obtenido es de ~ 620 km y si se usa la relación que Gutenberg y Richter (1956) obtuvieron para California:

$$M = -3,0 + 3,8 \log r \quad (1)$$

donde r es el radio promedio de percepción, entonces M es 7,6, valor que es ligeramente menor que la magnitud M_w obtenida para el terremoto de Limón. Lo anterior señala que el radio promedio de percepción obtenido para este terremoto está dentro de los valores esperados para un terremoto de esa magnitud.

La intensidad mínima con que se sintió el terremoto de Limón en Costa Rica fue de IV grados, la cual se realizó para gran parte de la península de Nicoya y el noroeste del país, incluyendo la localidad de La Cruz, cerca de la zona fronteriza con

Cuadro 1

Listado de intensidades y descripción de daños provocados por el terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 a las 21:56 hora local, magnitud Mw 7.7. Las intensidades son estimadas con base en la Escala Mercalli Modificada (MM) y son la base para la elaboración del mapa de intensidades.

Intensidad (MM)	Poblados y sitios con datos de intensidad	Descripción de daños generales
II	Tegucigalpa, San Salvador, Isla del Coco y Puerto Obaldía (frontera Panamá – Colombia)	Sentido leve por pocas personas y ligero balanceo
II-III	Managua (Nicaragua), Ciudad Panamá (Panamá), Trujillo (Honduras)	Sentido leve por varias personas y reportado ligero movimiento en edificios altos.
III	Isla San Andrés (Colombia), Rivas (Nicaragua), Colón y Santiago de Panamá	Reportado por varias personas en forma oscilatoria, oscilación leve de objetos colgantes.
III-IV	La Cruz, Bluefields (Nicaragua) y Azuero (Panamá)	Reportado sentido por varias personas, los objetos colgantes oscilaban y utensilios de cocina vibraron en forma leve.
IV	Malpaís, Sámara, Liberia, Playas del Coco, Hacienda Santa Rosa, Nicoya, Upala, Caño Negro, Los Chiles, San Carlos (Nicaragua) y Ometepe (Nicaragua), Pedasí y Miguel de la Borda en Panamá.	Sacudida u oscilaciones largas, construcciones de madera crujían en forma leve; cristales, ventanas y puertas vibraron pero no en forma fuerte.
V	Puerto Armuelles, Punta Burica, Conte, Puerto Jiménez, Playa Sirena, Isla del Caño, Quepos, Jacó, Jicaral, Isla de Chira, Paquera, Cóbano, Abangares, Tilarán, Cañas, San Rafael de Guatuso, La Fortuna de San Carlos, Esparza. El Piro (Panamá).	Sentido por personas en movimiento y al aire libre, reportan objetos colgantes oscilando moderadamente y otros objetos tuvieron leve desplazamiento y leves golpes entre ellos. Sismo fue sentido en algunos vehículos en movimiento. Paredes y ventanas de habitaciones vibraron, algunas puertas se cerraban, se reportaron cuadros colgantes moviéndose, deslizamientos leves en taludes de carreteras y algunos bloques cayeron.
V-VI	Orotina, Aguas Zarcas, San Juan del Norte, Drake	Sentido fuertemente. En San Juan del Norte el agua de un estanque osciló, personas indican que nunca antes habían sentido un sismo tan fuerte.
VI	La Concepción (Panamá), Golfito, Puerto Cortés, Dominical, Ciudad Neilly, Santa María de Dota, San Pablo de León Cortés, Aserrí, Acosta, Alajuela, Atenas, San Ramón, Zarco, Barra de Colorado, Tortuguero, Heredia, Piedras Negras, Santiago de Puriscal.	Sentido por todas las personas, se asustaron y salieron al exterior de los edificios y construcciones, varios objetos y adornos cayeron de estanterías, algunos muebles pesados se movieron levemente de sus sitios, revestimientos con materiales pobres agrietados, se observaron los árboles, postes y torres oscilando, deslizamientos leves en carreteras en materiales no consolidados.
VI-VII	San José, Guápiles, Buenos Aires	Sentido por todas las personas, se generó pánico, dificultad para caminar, muchos objetos cayeron.
VII	Sabalito, San Vito, Boruca, Guácimo, Siquirres, Turrialba, La Suiza, Ujarrás de Buenos Aires, Olán. Boquete y Barú en Panamá.	Pánico general, las personas se tambaleaban y algunas se cayeron, daños en edificios de pobre construcción, formación de grietas en paredes y caída de repellos y de ladrillos en varias construcciones. Reportes, incluso de grietas en edificios de hormigón armado de estructuras de acero. Caída moderada de bloques y deslizamientos menores en taludes de carreteras y cauces de ríos. Pequeños derrumbes en bancos de arena y grava.
VIII	Sixaola, Pandora, Bananito, Valle la Estrella, Limón Centro, Beverly, Bocas del Pacuare, Boca del Parismina, Colonia Puriscaleña, Valle Escondido, Grano de Oro, Corina, Zent, Chase, Guachalaba (de Baja Talamanca), Amubri, Sepecue, Shiroles, Petróleo, Liverpool, San José Cabécar. Changuinola, Guabito, Sibube e Islas de Bocas del Toro en Panamá.	Las personas casi no se podían mantener de pie, conducción de vehículos muy afectada, colapso total de construcciones en mal estado, daños en estructuras de hormigón, así como en puentes y edificios con estructura convencional de acero, caída de algunas paredes de mampostería, desajuste de planchas de concreto, mucho agrietamiento en el asfalto de carreteras, caída de torres, de depósitos de agua y de combustible elevados. Se da el movimiento de algunas casas sobre sus cimientos, grietas en suelos húmedos. Gran cantidad de deslizamientos en terrenos de laderas fuertes, caída de árboles en terrenos inclinados y desprendimiento de ramas.

Cuadro 1 (continuación)

Listado de intensidades y descripción de daños provocados por el terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 a las 21:56 hora local, magnitud Mw 7,7. Las intensidades son estimadas con base en la Escala Mercalli Modificada (MM) y son la base para la elaboración del mapa de intensidades.

Intensidad (MM)	Poblados y sitios con datos de intensidad	Descripción de daños generales
IX	Asunción, Río Blanco, La Bomba, Vizcaya, Bocas de los ríos Banano, Bananito y La Estrella, Playón del río Telire, Yorkín, Fila Matama Este, Ayil, Boca Matina, Cieneguita, Cuba Creek, Boston, Finca Palma, Manzanillo y Punta Manzanillo, California, Paraíso, Katsi, Pandora, Finca 12, Finca 14, El Progreso.	Imposible conducción vehicular, casi imposible mantenerse de pie, daños muy severos como grandes grietas en carreteras y líneas férreas dobladas, daños en acueductos y tuberías de aguas negras, eyección moderada de arena y barro en arenas y aluviones finos, daños severos en muchas edificaciones. Varios remolques y contenedores volcados. Las personas reportaron ver olas en el suelo que les causaba mareos. Desprendimiento de laderas en cauces y cañones de muchos ríos. Colmatación de canales y creeks en plantaciones de banano, varias personas y animales muertas. Se dieron levantamientos costeros de entre 1 a 2 m.
X	Bajo Coen, Puente Vizcaya, Boca río Matina, Playón del río Aguas Zarcas, Vesta, Batán, Estrada, Matina, Paraíso de Sixaola, Margarita, Daytonia, Finca 2 y Finca 7, Hitoy Cerere.	Pánico total, reportan el ganado hincado, la mayoría de las personas en el suelo sentadas, hincadas o acostadas en el suelo, observaban oleajes en el terreno y relieve. Un testigo reportó que en el playón de la cuenca baja del río Telire vio como el caudal del agua regresó por unos segundos aguas arriba. Reportes de casas de madera colapsadas, desplazamientos horizontales en tierras llanas y playas, daño considerable en tubería subterránea en Vesta y Matina. Rieles de ferrocarril doblados severamente y desprendidos de sus durmientes o desplazados. Fenómeno de licuefacción severo con muchos cráteres de eyección de arenas y barro.

Nicaragua. La explicación del decaimiento de la intensidad al grado IV en esta región de Costa Rica se justifica porque es la que se ubica a mayor distancia epicentral y porque tiene un sustrato predominantemente rocoso, caracterizado por el Complejo de Nicoya en la península de Nicoya y depósitos de ignimbritas en el noroeste del país (Denyer y Alvarado, 2007). La zona de intensidad V incorpora las llanuras de San Carlos, la región entre las ciudades de Tilarán y de las Juntas, la región comprendida entre Puntarenas y Esparza y el sector este de la península de Nicoya, el promontorio de Herradura y las penínsulas de Osa y Burica, entre otros. La zona de intensidad VI incorpora las llanuras de Sarapiquí, la cordillera volcánica Central, el Valle Central Occidental, donde se ubican San Ramón al oeste y San José al este, la región de los Santos donde se localiza Santa María de Dota, la depresión de El General donde se localiza San Isidro y la Fila Costeña, donde se localiza San Vito. La región con intensidad VII incorpora las llanuras al noreste de Guápiles y Siquirres hasta Tortuguero, el Valle Central Oriental donde se ubican Cartago y Turrialba y el frente pacífico de la cordillera de Talamanca.

La zona mesosísmica incorpora la región donde se determinaron intensidades entre los grados VIII y X (Figs. 2 y 3). Esta incluye el sector Caribe de la cordillera de Talamanca y la región costera desde Parismina al noroeste hasta el sureste de Sixaola y el noroeste de Panamá (Figs. 2 y 3). La zona mesosísmica se caracterizó por los grandes deslizamientos que afectaron las estribaciones de la cordillera de Talamanca en su lado Caribe (Mora y Mora, 1994; Fig. 4A y 4B). También, por los importantes daños que hubo en la infraestructura vial, incluyendo carreteras y diversos puentes (Sauter, 1994; Fig. 4C y 4D) y los daños a las construcciones para uso humano tales como edificios de concreto armado (Sauter, 1994; Fig. 4E) y casas de habitación (Fig. 4F). Adicionalmente, hubo importantes efectos en los suelos, tales como licuefacción y desplazamientos laterales del terreno (Mora y Yasuda, 1994).

Factores que explican la distribución de intensidades en la zona mesosísmica

Las altas intensidades interpretadas en la zona mesosísmica pueden explicarse por varios factores. En alto número y el gran tamaño de los deslizamientos observados, se explicaría por los valores elevados del índice del relieve relativo que caracteriza a gran parte de las estribaciones del lado Caribe de la cordillera de Talamanca (Mora y Mora, 1994). Estos terrenos de pendientes fuertes con suelos regolíticos, tienen una alta susceptibilidad a los deslizamientos cuando son sometidos a acelera-

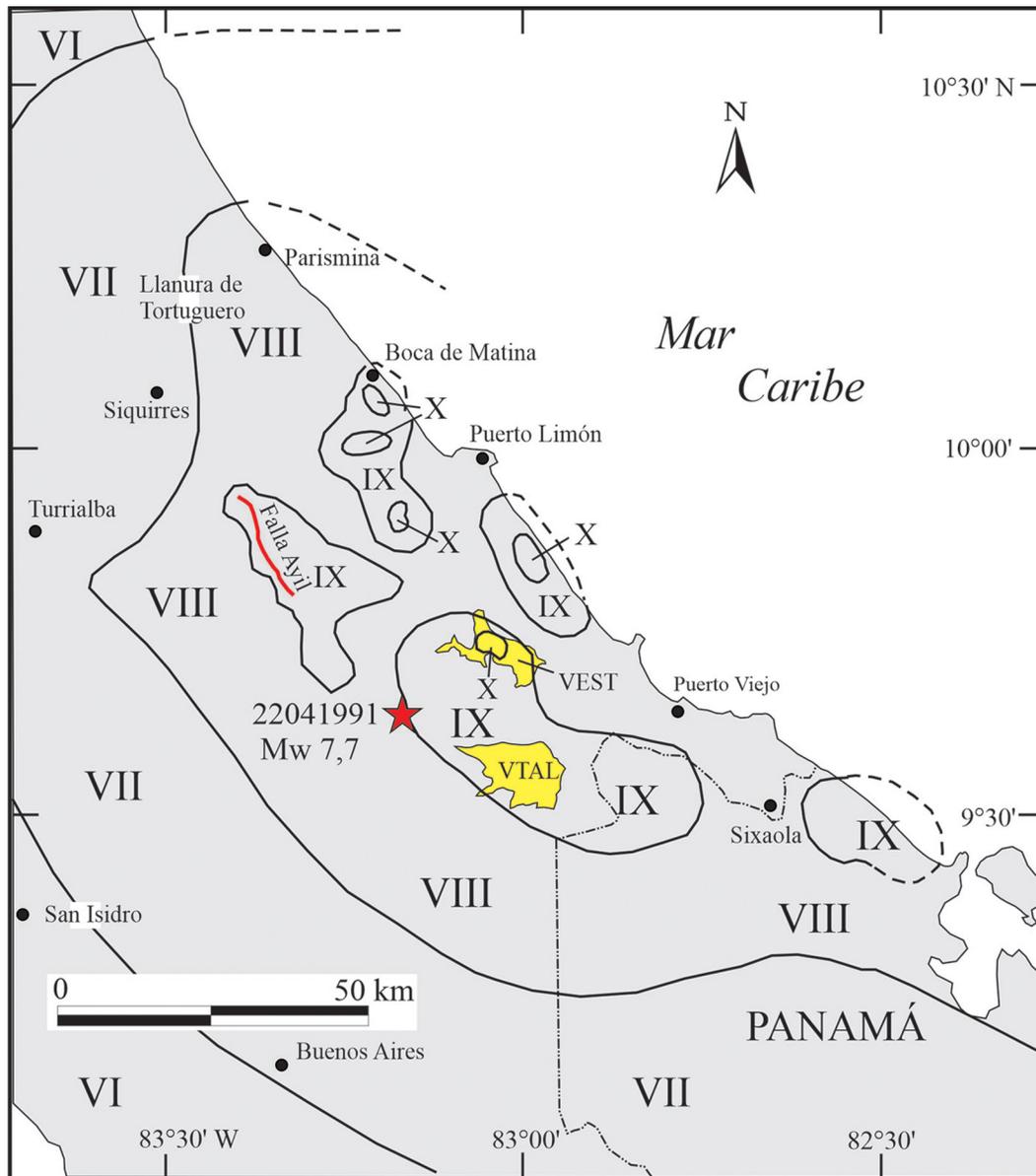


Fig. 3: Mapa con el detalle de la distribución de intensidades del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,7) en la región este de Costa Rica donde se determinaron las máximas intensidades MM entre VIII y X grados. En trazo rojo se muestra la falla Ayil. La estrella roja muestra el epicentro del terremoto de Limón según la RSN. En color amarillo se ubican zonas con depósitos aluviales, según ha sido modificado del mapa geológico de Denyer y Alvarado (2007). VEST y VTAL corresponden respectivamente con los valles La Estrella y de Talamanca. Ubicación en la figura 2.

Las zonas afectadas por el fenómeno de la licuefacción y por desplazamientos laterales del terreno se presentaron principalmente a lo largo del cordón litoral entre Boca de Matina y el noroeste de Puerto Limón y entre el sureste de Puerto Limón hasta cerca de Puerto Viejo (Mora y Yasuda, 1994). A ambas zonas se le asignaron intensidades entre IX y X grados (Fig. 3). También, se asignó intensidad IX a la zona ubicada al este de Sixaola, en territorio de Panamá, la cual también fue afectada por el fenómeno de la licuefacción (Fig. 3; Camacho y Viquez, 1994). En general se observa que las zonas afectadas por



Fig. 4: (A) Deslizamientos en la cuenca media del río Chirripó. (B) Cauce ligeramente represado por deslizamiento en la margen izquierda del río Chirripó. (C) Puente caído sobre el río Estrella. (D) Losa caída del puente sobre la quebrada Westfalia, al sureste de la localidad de Westfalia. (E) Daños estructurales en el Hotel Las Olas cimentado sobre arrecife coralino levantado. (F) Casa con las paredes inclinadas en el camino a Westfalia. Fotos Walter Montero.

licuefacción y por los desplazamientos laterales del suelo, tienen un sustrato de origen aluvial o marino con capas arenosas medias a finas (Mora y Yasuda, 1994), con edades posiblemente del Holoceno. Estos sedimentos generalmente se encuentran poco consolidados y tienen poca consistencia. En la zona Caribe de Costa Rica, además de los depósitos de este tipo encontrados a lo largo del cordón litoral, destacan los depósitos aluviales que rellenan las cuencas de los valles la Estrella y de Talamanca (VEST y VTAL respectivamente en la figura 3; Denyer y Alvarado, 2007). También, deben incluirse las llanuras de Tortuguero entre las zonas con depósitos aluviales, palustres a marinos, en cuyo sector sureste se alcanzaron intensidades entre VIII y X grados (Fig. 3).

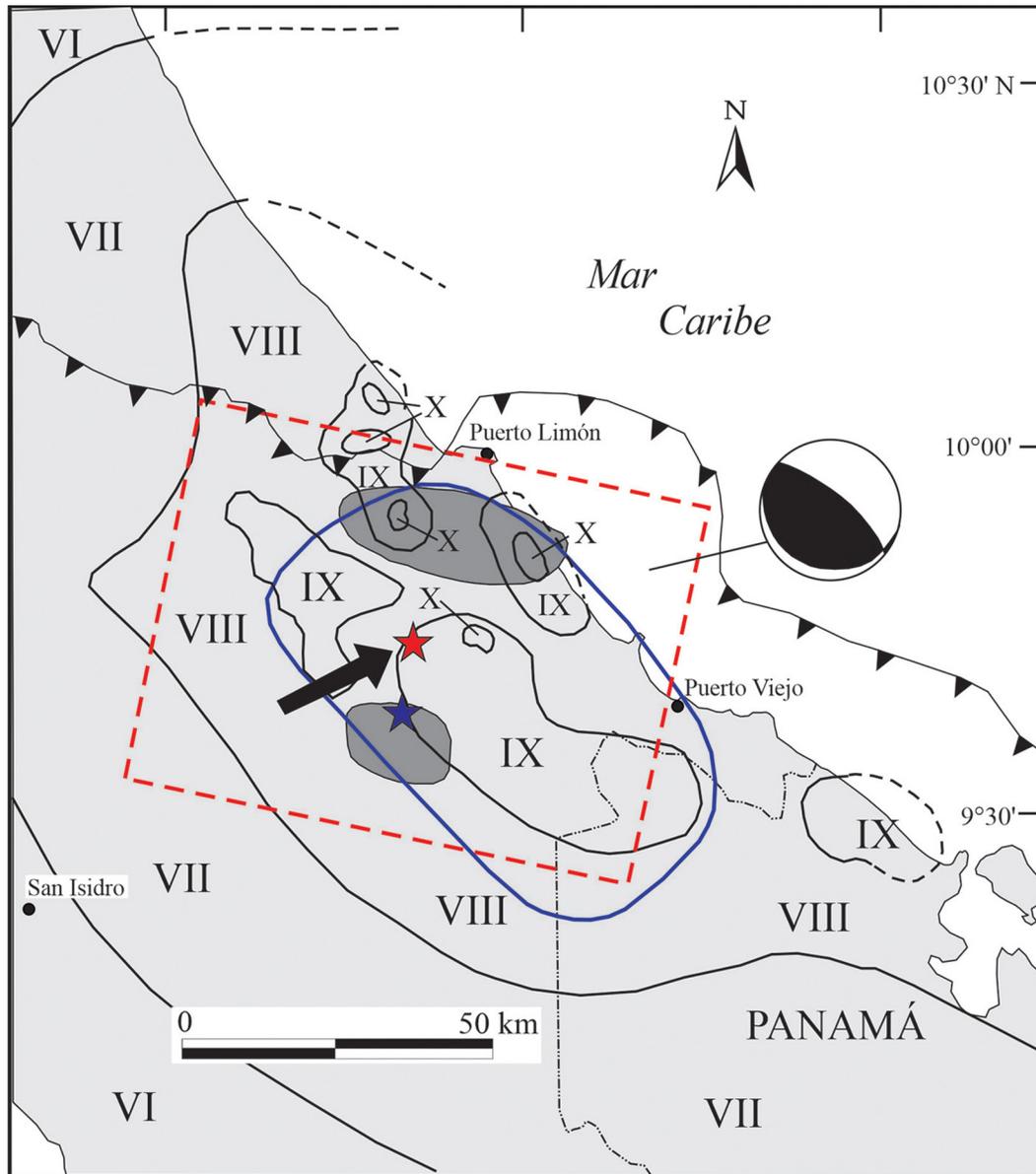


Fig. 5: Distribución de intensidades iguales o superiores a VIII grados del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (M_w 7.7) y su relación con las áreas de ruptura propuestas por Montero *et al.* (1994) y por Goes *et al.* (1993). La zona elipsoidal a trazo azul es la de Montero *et al.* (1994), donde la estrella azul es el epicentro de la RSN. El área de ruptura de Goes *et al.* (1993) (rectángulo a trazos rojos y su mecanismo focal preferido) es su interpretación final, obtenida a partir de las soluciones de ondas de cuerpo y superficiales. La flecha negra indica la dirección del vector deslizamiento en la falla inversa propuesto por Goes *et al.* (1993) a partir del hipocentro obtenido por NEIC (estrella roja muestra epicentro). Las áreas en color gris oscuro representan las regiones donde se liberó la mayoría del momento sísmico según Goes *et al.* (1993). Las líneas con triángulos rellenos en negro indican el frente de fallamiento inverso que originó el terremoto de Limón.

Área de ruptura del terremoto de Limón y su relación con la zona mesosísmica

En fallas con movimiento inverso es frecuente encontrar que la geometría del área de la ruptura y las zonas de mayor liberación del momento sísmico controlen parcialmente las características de la zona mesosísmica. Con respecto al terremoto de Limón existen varias estimaciones del área de ruptura y estas se encuentran contenidas dentro de la zona mesosísmica (Fig. 5). Montero *et al.* (1994) y Ponce *et al.* (1994) consideraron usando réplicas que el área sísmica de la ruptura fue alrededor de 85x45 km² (mostrada con trazo azul en la Fig. 5). El área de ruptura sísmica encontrado por los anteriores autores se ubica dentro del área continental y tiene un eje mayor paralelo a la costa Caribe y se ubica dentro de la zona mesosísmica, siendo esta última mayor tanto por el lado noroeste como por el sector sureste. Por su parte, Goes *et al.* (1993) con base en el modelaje de las ondas de cuerpo obtenidas de sismogramas de banda ancha estiman que el área de ruptura no es mayor a 60x80 km² (rectángulo a trazos rojos en la Fig. 5) y que la mayoría del momento sísmico se liberó en un área de 45x45 km². Goes *et al.* (1993) consideran que esa zona de ruptura es bastante pequeña para un evento de magnitud M_w 7,7.

Para entender mejor las altas aceleraciones que se originaron dentro del área mesosísmica debe también considerarse el proceso de ruptura del terremoto y la liberación del momento sísmico. Montero *et al.* (1994) con base en el acelerograma de la estación de San Isidro, ubicada unos 68 km al suroeste del epicentro (Fig. 5) identificó 5 subeventos durante el proceso de ruptura. Estos subeventos se identificaron con base en la amplitud de la onda S especialmente claros en la componente N-S del acelerograma (ver Fig. 3 en Montero *et al.*, 1994). Existen dos modelos de ruptura para el terremoto, que son los de Goes *et al.* (1993) y el de Tajima y Kikuchi (1995). En Montero (2021) se discuten varias características sismológicas de ambos. Para ver el control de la geometría y del proceso de la ruptura del terremoto de Limón sobre la distribución de las intensidades se escoge como ejemplo el modelo de Goes *et al.* (1993) (Fig. 5). El área de ruptura del terremoto obtenido (rectángulo a trazos rojos en figura 5) se localiza bajo gran parte de la zona mesosísmica, aunque esta última cubre un área mayor tanto al noroeste como al sureste. Asimismo, el modelo de la liberación de momento sísmico incluye dos zonas principales ubicadas tanto al sursuroeste como al nornordeste del hipocentro (estrella roja muestra el epicentro). Ambas zonas originarían altas aceleraciones en las zonas ubicadas directamente encima de ellas. Se puede observar que tres zonas de intensidades entre IX y X grados ubicadas un poco al sur de Puerto Limón se localizarían cerca o parcialmente por encima del subevento del nornordeste del epicentro, mientras que el otro subevento ubicado al sursuroeste del epicentro se localizaría al suroeste de una zona alargada en sentido noroeste de intensidad IX.

DISCUSIÓN

Montero *et al.* (1991) elaboraron un mapa preliminar de intensidades para el terremoto de Limón, con base en información obtenida en el campo y con cerca de 250 entrevistas realizadas en Costa Rica. Estos autores asignan una intensidad máxima de IX grados, la cual cubre todo el litoral Caribe de Costa Rica, incluyendo al norte de la localidad de Tortuguero, y también extendiéndose en el noroeste de Panamá. Además, las isosistas que separan los diferentes niveles de intensidades mostrados en el mapa de Montero *et al.* (1991) tienen un patrón alargado en dirección nornoroeste hacia Nicaragua, sugiriendo intensidades de VIII y VII grados en el litoral Caribe de Nicaragua, lo cual entra en contradicción con el patrón de intensidades propuesto en este trabajo. Por lo anterior, se considera que en el mapa de intensidades de Montero *et al.* (1991) se asignaron valores de intensidad muy altos en el Caribe nicaragüense. En cambio, en la propuesta de este estudio, las isosistas de intensidad VIII y VII cierran dentro del territorio nacional en su región norte y las intensidades asignadas en las localidades del litoral Caribe nicaragüense de San Juan del Norte son de V a VI grados y de III a IV en Bluefields (ver Fig. 1). Asimismo, el patrón de intensidades de Montero *et al.* (1991) sugiere un decaimiento más rápido de las intensidades hacia el noroeste de Costa Rica, porque asigna intensidades de grado III en el sector oeste de la península de Nicoya y en el noroeste del país. Esta última diferencia es explicable considerando que entre diferentes autores pueden existir distintas valoraciones de los datos macrosísmicos.

Denyer *et al.* (1994) muestran las áreas afectadas por licuefacción al noroeste de Puerto Limón, en la zona de planicie aluvial y del cordón litoral y también al sureste Puerto Limón, a lo largo del litoral Caribe, incluyendo la región de Sixaola y el noroeste de Panamá. También incluyen dentro de la zona afectada por licuefacción a los valles la Estrella y de Talamanca.

Mora y Yasuda (1994) detallan algunas zonas afectadas por licuefacción en la zona Caribe de Costa Rica. Por otro lado, Camacho y Víquez (1994) incluyen una zona de planicie aluvial y costera extensa afectada por licuefacción en el noroeste de Panamá y otra al sur afectada por deslizamientos. Las regiones anteriores mostradas por Denyer *et al.* (1994), Mora y Yasuda (1994) y por Camacho y Víquez (1994) son incorporadas dentro de la zona mesosísmica propuesta en este estudio con intensidades entre VIII y X grados.

CONCLUSIONES

El mapa de intensidades del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (M_w 7,7) se realizó a partir de diversas fuentes de información. La zona mesosísmica del terremoto corresponde con la zona afectada con intensidades entre VIII y X grados y se asocia con diversos efectos geológicos, como son deslizamientos, licuefacción, desplazamientos laterales del suelo y daños a las obras civiles. A partir de la zona mesosísmica las intensidades decayeron con la distancia hasta una intensidad mínima de IV en el noroeste de Costa Rica. El terremoto se sintió en gran parte de América Central y en islas del Caribe y del Pacífico con un radio promedio de percepción de ~ 620 km.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a Eduardo Hernández, quien colaboró tanto en el campo como en la realización de entrevistas telefónicas que permitieron obtener información macrosísmica del terremoto de Limón. Asimismo, se agradece a Lepolt Linkimer, Editor del Volumen Especial del 30 Aniversario del Terremoto de Limón sus importantes observaciones al presente artículo, los cuales ayudaron a mejorarlo. Esta publicación se realizó como parte de las actividades de investigación del proyecto 830-B6-808: “Promoción del desarrollo científico, académico y tecnológico en geología”, del Centro de Investigaciones Geológicas de la Universidad de Costa Rica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Camacho, E. y Víquez, V. (1994). Licuefacción y hundimientos costeros en el noreste de Panamá durante el terremoto de Limón. Volumen Especial Terremoto de Limón 22 de abril de 1991. *Revista Geológica América Central*, 133-138.
- Denyer, P. y Alvarado, G. E. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica* [Escala 1:400 000]. San José, Costa Rica: Librería Francesa.
- Denyer, P., Personius, S. y Arias, O. (1994). Generalidades sobre el efecto geológico del terremoto. *Revista Geológica de América Central, Número Especial: Terremoto de Limón*, 29-38.
- Dziewonski, A. M., Ekström, G. y Salganik, M. P. (1992). Centroid-moment tensor solutions for April-June 1991. *Physics Earth Planetary Interiors*, 71, 6-14.
- Goes, S., Velasco, A., Schwartz, S. y Lay, T. (1993). The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica ($M_w = 7.7$) earthquake and its tectonic implications: A broadband study. *Journal Geophysical Research*, 98, 8127-8142.
- Gutenberg, B. y Richter, C. (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. New York: Editorial Hajner.

- Montero, C., Segura, J., Malavassi, E., Güendel, F., González, V., Fernández, E., De Obaldía, F., Rojas, D., Rodríguez, H., Mata, A., Van der Laat, R., Barboza, V., Barrantes, O., Marino, T. y McNally, K. (1991). *Observaciones iniciales obtenidas luego del terremoto del 22 de abril de 1991, Ms=7.4, Valle de la Estrella, Costa Rica*. Heredia, Costa Rica: Instituto de Investigación: Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional. Manuscrito inédito.
- Montero, W. (2021). Análisis retrospectivo del terremoto de Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,7) y de la actividad sísmica disparada en las fallas Aayil, Pacuare, Atirro, División y Navarro. *Revista Geológica América Central, 30 aniversario del terremoto de Limón (1991-2021)*, 65, 1-26.
- Montero, W., Pardo, M., Ponce, L., Rojas, W. y Fernández, M. (1994). *Revista Geológica de América Central, Número Especial: terremoto de Limón*, 93-102.
- Mora, S. y Mora, R. (1994). Los deslizamientos causados por el terremoto de Limón: factores de control y comparación con otros eventos en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central, Número Especial: Terremoto de Limón*, 139-152.
- Mora, S. y Yasuda, S. (1994). Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Número Especial: Terremoto de Limón*, 121-132.
- Ponce, L., Pardo, M., Domínguez, J., Montero, W., Rojas, W., Boschini, I., Suárez, G. y Camacho, E. (1994). Estudio de réplicas del terremoto de Limón usando datos locales: Resultados e implicaciones tectónicas. *Revista Geológica de América Central, Número Especial: Terremoto de Limón*, 103-110.
- Rojas, W. (1991). *El terremoto del 22 de abril 1991 en la región Caribe y la sismicidad asociada en el mes de abril, 1991 Costa Rica Panamá*. San José, Costa Rica: Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica. Manuscrito inédito.
- Sauter, F. (1994). Evaluación de daños en puentes y otras estructuras causados por el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Número Especial: Terremoto de Limón*, 171-186.
- Tajima, F. y Kikuchi, M. (1995). Tectonic implications of the seismic ruptures associated with the 1983 and 1991 Costa Rica earthquakes. En P. Mann (ed.), *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America* (Geological Society America Special Paper 295, pp. 225-233). Boulder: *Geological Society America*.