

Terremoto del Valle de La Estrella: análisis sísmico, cascada de desastres y pérdidas económicas en valor presente (2020)

Valle de La Estrella earthquake: seismic analysis, disaster cascade and update of economic losses in present value (2020)

Daniela Campos-Durán^{1*}, Ronnie Quintero-Quintero² y Tatiana Abarca-Rojas³

¹Universidad Nacional (UNA), Escuela de Ciencias Geográficas, Heredia, Costa Rica

²Universidad Nacional (UNA), Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (Ovsicori), Heredia, Costa Rica

³Universidad de Costa Rica (UCR), Maestría Profesional en Gestión del Riesgo y Atención de Emergencias, San José, Costa Rica

*Autora para contacto: daniela.campos.duran@una.cr

(Recibido: 04/01/2021; aceptado: 15/03/2021)

ABSTRACT: Seismicity and focal mechanisms in the of North Panama Deformed Belt (NPDB) indicate a compressional environment associated with the overthrusting of the Panama Block (PB) on the Caribbean plate; crustal PB strike-slip focal mechanisms are observed in the Talamanca and Central Volcanic Cordillera. The hypocenters reach maximum depths between 50-60 km at the foot of the Talamanca mountain range and are shallow near the Caribbean coast. The 1991, Valle de la Estrella earthquake (Mw 7.6) triggered aftershocks in an area of ~140x70 km; landslides and liquefaction were the secondary events that caused most damage and losses in infrastructure (housing, bridges, railroad network, road network and aqueducts); its effects were concentrated in coastal cities, such as Limón and Bocas del Toro. The economic losses in present 2020 value correspond to \$3 433 266 937.41.

Keywords: Earthquake; Limon; 1991; Liquefaction; Landslides; Focal Mechanisms; South Caribbean.

RESUMEN: La sismicidad y mecanismos focales en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) indican un entorno compresivo asociado al cabalgamiento del Bloque de Panamá (BP) sobre la placa Caribe; mecanismos focales corticales de cizalla en BP se observan en la cordillera de Talamanca y en la Cordillera Volcánica Central. Los hipocentros alcanzan profundidades máximas entre 50-60 km al pie de la cordillera de Talamanca y más superficiales cerca de la costa Caribe. El terremoto del Valle de La Estrella de 1991 (Mw 7,6) disparó réplicas en un área de ~140x70 km; los deslizamientos y licuefacción fueron los eventos secundarios que causaron más daños y pérdidas en infraestructura (vivienda, puentes, red ferroviaria, red vial y acueductos), sus efectos se concentraron en ciudades costeras, como Limón y Bocas del Toro. Las pérdidas económicas de la época en valor presente al 2020 corresponden a \$3 433 266 937,41.

Palabras clave: Terremoto; Limón; 1991; licuefacción; deslizamientos; mecanismos focales; Caribe Sur.



INTRODUCCIÓN

La Red Sísmica del Observatorio Vulcanológico y Sismológico Costa Rica de la Universidad Nacional (Ovsicori-UNA), inició con el monitoreo de la actividad sísmica y volcánica de Costa Rica en abril de 1984 (Güendel et al., 1989). Durante el tiempo de operación de la red sísmica, se ha registrado y localizado una importante sismicidad en el país; destacando eventos como el terremoto de Cóbano del 25 marzo de 1990 (Mw 7,3); el terremoto de Puriscal del 22 de diciembre de 1990 (Mw 5,9); el terremoto del Valle de La Estrella, Limón del 22 de abril de 1991 (Mw 7,6); el terremoto de Cinchona, Poás de Alajuela del 8 de enero de 2009 (Mw 6,1) y el terremoto de Nicoya del 5 setiembre de 2012 (Mw 7,6) (Montero et al., 1991; Protti et al., 1994; Protti et al., 1995; Protti et al., 2014; Segura et al., 2014; Quintero et al., 2014; Chaves et al., 2017; Hobbs et al., 2019).

Los datos históricos (Cuadro 1) y de monitoreo sísmico recolectados y analizados por las redes sísmicas locales del país en la década de 1980, indicaban que el Caribe de Costa Rica era una zona sísmica con alta peligrosidad (aunque no fue reconocida de tal forma al inicio del monitoreo sísmico); lo que quedó ratificado con el terremoto del 22 de abril de 1991, el cual tuvo una magnitud Mw 7,6 con epicentro a 43 km al SW de la ciudad de Limón. El mecanismo focal reportado por el Ovsicori-UNA indica una falla inversa con dirección SE y ángulo de buzamiento de 40° al SW y eje de presión SW (Montero et al., 1991); relacionándose con el cabalgamiento del Bloque de Panamá sobre la placa Caribe, en la zona conocida como Cinturón Deformado del Norte de Panamá (CDNP) (Fig. 1).

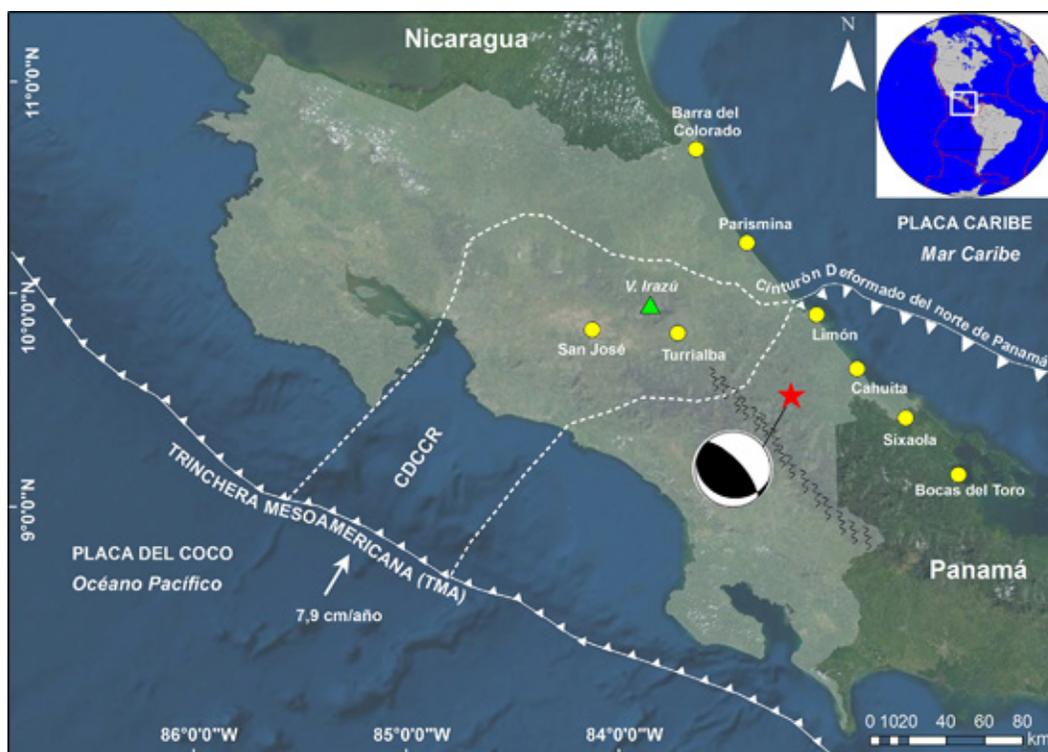


Fig. 1: Tectónica de Costa Rica, subducción de la placa del Coco bajo la placa Caribe y Bloque de Panamá a lo largo de la Trinchera Mesoamericana (TMA); el CDNP que es zona de pliegues y cabalgamiento en el Caribe de Panamá y Costa Rica (Climent et al., 2008) y el CDCCR que es límite W del Bloque de Panamá. El mecanismo focal del terremoto del Valle de la Estrella de 1991 (GCMT, 2020) es mostrado en la figura; con strike/dip/rake de 103°/25°/58° y el epicentro relocalizado en este trabajo se indica por una estrella roja; por círculos amarillos se indican las principales localidades afectadas por el terremoto de 1991, por un triángulo verde el macizo del volcán Irazú y la cordillera de Talamanca por líneas negras. Se indica la velocidad relativa de convergencia CO-CA 7,9 cm/año de acuerdo con el modelo GSRM2.1 (Kreemer et al., 2014), calculada usando la calculadora de movimiento de placas de UNAVCO (<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>).

Montero (2001) señala que el borde NE de la cordillera de Talamanca cuenta con una importante actividad notectónica asociado a fallas como falla Kabébeta (desplazamiento dextral e inverso), falla Ayil, falla Pacuare, Fallas de Matina-Siquirres, falla Río Blanco (desplazamiento de rumbo sinistral con componente normal), falla de Limón (segmento de falla del sistema de fallamiento inverso del CDNP, bajo la Baja Talamanca y el litoral Caribe) y la falla Sukut.

Históricamente el Caribe de Costa Rica fue considerado como un área de incipiente actividad sísmica, por tanto de bajo riesgo para la población (Soulas, 1991), previo al sismo del Valle de La Estrella se tenía registro de un evento el 07 de enero de 1953, Mw 5,5 (Rothé, 1969), evento sísmico cuantificado con magnitud Mw 6,0 por Güendel (1986) e ISC-GEM (2021). En términos tectónicos, Soulas (1989) señaló la presencia de fallas activas, a lo largo del pie de monte caribeño de la cordillera de Talamanca, inversas, capaces de generar sismos mayores a Ms 7,0 y de bajo ángulo en prolongación del CDNP.

Después del sismo de Osa (Mw 7,4) en 1983, un sismo de magnitud Mw 7,3 ocurrió en el Pacífico Central del país en marzo de 1990 y sismos moderados se localizaron en el CDCCR entre marzo y diciembre de 1990; el 22 de abril de 1991 ocurre un sismo Mw 7,6 en el Caribe costarricense, conocido como terremoto del Valle de La Estrella, Limón (Montero et al., 1991; Protti y Schwartz, 1994; Protti et al., 1995; Segura et al., 2014).

El terremoto del Valle de La Estrella fue sentido desde Tegucigalpa, Honduras hasta ciudad de Panamá; la mayor destrucción se concentró en las llanuras aluviales ubicadas entre el pie de monte de la cordillera de Talamanca y la costa y en las depresiones intra-montañas del Valle de La Estrella y del Valle de Baja Talamanca-Sixaola (Soulas, 1991). El área afectada fue de aproximadamente 8 000 km², 80% de los daños se registraron en Costa Rica y el 20% restante en la Provincia de Bocas del Toro, Panamá.

Los mayores daños se observaron en carreteras, líneas férreas, puentes, puertos, oleoductos y acueductos; referente a las pérdidas económicas, estas ascendieron a 21 991,9 millones de colones, equivalente a un 4,21% del Producto Interno Bruto del país en 1991 (Morales, 1994). Este sismo es considerado uno de los más destructivos y que más daños ha provocado en estructuras civiles e infraestructura (destacando viviendas y sistema de acueductos), así como en ecosistemas terrestres y marinos, siendo uno de los eventos más desastrosos en la historia de Costa Rica, de acuerdo con Campos-Durán y Quesada-Román (2017) este terremoto corresponde a un riesgo intensivo, siendo la provincia de Limón la que más daños reportó, ya que se registraron 41,262 personas afectadas y 4,606 viviendas entre dañadas y destruidas.

Transcurridas casi tres décadas del terremoto del Valle de la Estrella, considerando el crecimiento de la población y el desarrollo turístico y de infraestructura, se propone en el presente trabajo analizar la sismicidad asociada a ese evento, con el propósito de responder a preguntas como a) ¿Qué consecuencias socioeconómicas tendría la ocurrencia de un nuevo terremoto con características similares al ocurrido en 1991?, b) ¿Cuál es la distribución espacial de los sismos que ocurren en la Caribe de Costa Rica? y c) ¿Cuál son las fuentes sismogeneradora en el Caribe del país?.

METODOLOGÍA

Para la relocalización de la sismicidad desde 1984 al presente (2021) y en especial la sismicidad asociada al terremoto del Valle de La Estrella del 22 de abril de 1991 (Mw 7,6), se empleó las bases de datos sismológicos de las redes del Ovsicori-UNA, la Red Sismológica Nacional de Costa Rica (RSN) y de la Universidad de Panamá (UPA). Para las relocalizaciones de la sismicidad se utilizó el programa *HYPOCENTER* (Lienert y Haskov, 1995) y el modelo de velocidad de Quintero y Kissling (2001), con una razón Vp/Vs de 1,78. Además se emplearon las formas de onda y el programa *ISOLA* (Sokos y Zahradnik, 2008 y 2013) para la inversión por el tensor de momento e impulso de los primeros arribos y el programa *FOCMEC* (Snoke et al., 1984) para el cálculo de mecanismos focales.

Se realizó una búsqueda en los boletines sismológicos nacionales e internacionales y de información publicada por el Ovsicori-UNA en medios informativos del país, para proceder a conjuntar la base de datos macrosísmica producto de ese terremoto, también se realizó una búsqueda en catálogos sísmicos internacionales como USGS (2020), *International Seismological Center* (ISC) (2020), ISC-GEM (2021), Duputel et al. (2012) y el *Proyecto Global Centroide Momento Tensor* (GCMT), (2020) para conocer las principales características de la fuente sísmica que originó el sismo.

Se sistematizaron y analizaron los estudios técnicos y científicos que recopilan los impactos sociales, económicos, en infraestructura y en los ecosistemas, producto del terremoto del Valle de La Estrella, estos a su vez se relacionaron con los eventos naturales secundarios, disparados por el sismo, tales como a) deslizamientos, b) amplificación y licuefacción y c) levantamiento y

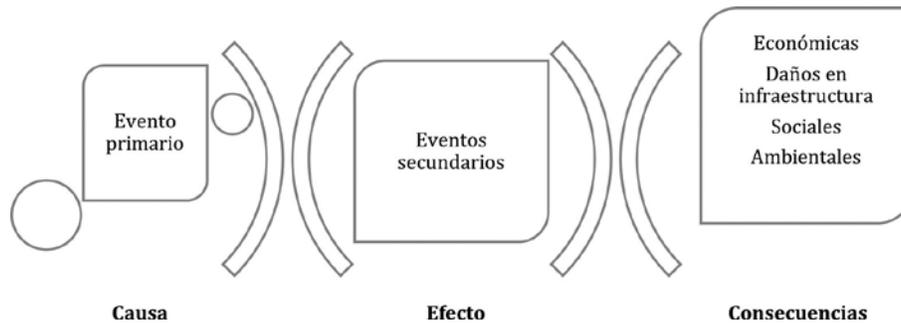


Fig. 2: Modelo de cascada de desastres propuesto para el análisis multifactorial.

subsistencia de la costa. Para estimar la relación entre ambas variables se propone un modelo de análisis multifactorial de cascada de desastres (Fig. 2), que consiste en estimar los impactos que se dieron producto de los eventos disparados.

Para estimar las pérdidas económicas al valor presente (2020), se consultó la base de datos Pérdidas Ocasionadas por Fenómenos Naturales del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (Mideplan) (2020) (<https://www.Mideplan.go.cr/perdidas-ocasionadas-fenomenos-naturales>), de donde se obtuvieron las pérdidas económicas en dólares, distribuidas en 14 sectores: acueductos y alcantarillados, aeropuerto, atención de la emergencia, edificios públicos y privados, educación, energía, ferroviario, infraestructura vial, portuario, ríos y quebradas, salud, sistema eléctrico, telecomunicaciones y vivienda.

Para actualizar las pérdidas económicas se empleó el Índice de Precios al Consumidor (IPC) de abril de 1991 comparado con el mismo mes para el 2020, se tomó como base abril, ya que fue el mes donde tuvo lugar el terremoto del Valle de La Estrella. Se empleó el IPC, por ser un instrumento de carácter estadístico, permite calcular la evolución a través del tiempo de los precios de un conjunto de bienes y servicios representativo del consumo final de los hogares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sismicidad en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá entre 1984 y 1991

La red sismológica del Ovsicori-UNA localizó sismicidad en la zona Caribe, entre Nicaragua, Costa Rica y Panamá, desde que comenzó su operación en abril de 1984; ya para 1991 se habían localizado en el área 720 sismos con profundidades menores a los 70 km, cuyas magnitudes oscilaron entre 1,9 y 4,4 Mw; si se analiza la distribución temporal de los sismos entre 1984 y el 22 de abril de 1991, se nota un ligero aumento en la sismicidad a partir de 1987, siendo 1990 el año con mayor cantidad de registros (176); esta comparación se da en un período en que el número de estaciones en operación por el Ovsicori-UNA es muy parecido (Fig. 3), por lo en esta investigación se plantea que el incremento es real; aunque no refleja la sismicidad total en el Caribe de Costa Rica durante esos años.

En la Fig. 4 se denota que el incremento en las estaciones usadas es mayor entre 1989 y 1993; lo cual está estrechamente relacionado con el aumento de la actividad sísmica en el país durante esos años.

Los sismos en el Caribe, mayoritariamente se localizaban en un área que comprendía Parismina, Volcán Turrialba y Bocas del Toro en Panamá y distribuidos entre 10 y 70 km de profundidad, los más profundos estaban ubicados en Bocas del Toro, Panamá; pero por la distribución de la red sísmica del Ovsicori-UNA, los errores de localización son altos en esa zona sísmica (Fig. 5). Las profundidades de los sismos alcanzaron unos 70 km de profundidad en el NW de Panamá, lo que fue ratificado con el análisis de datos combinados de redes locales y regionales por Camacho et al. (2010), argumentando los autores la existencia de una zona de Wadatti-Beniof en el W de Panamá; pero que no se puede corroborar solamente con el uso de datos de las redes sismológicas utilizadas en esta investigación.

Entre 1798 y 1953 han sido registrados, sismos históricos con Mw entre 6,0 y 7,6 (Cuadro 1); con sismos fuertes o mayores con un periodo de recurrencia de 50 años.

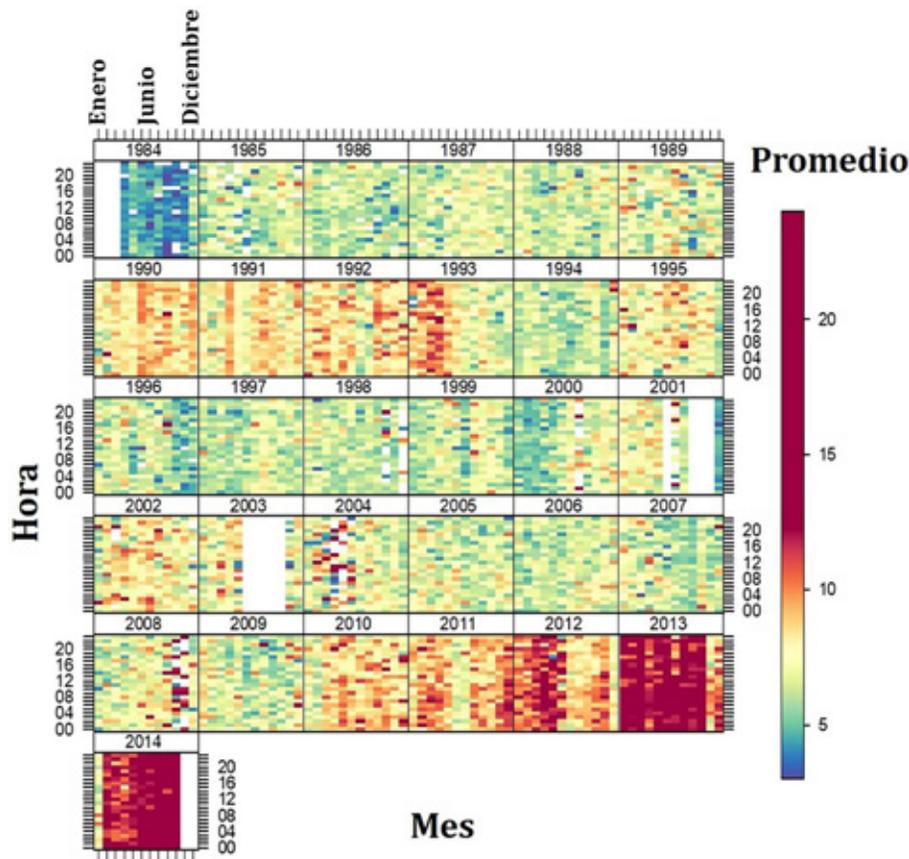


Fig. 3: Nivel de la tendencia del número de estaciones usadas en la localización de los sismos del catálogo del Ovsicori-UNA entre 1984 y 2014 y su relación con el uso horario y mensual. Los espacios vacíos en los cuadros y que son más evidentes en los cuadros correspondientes a los años 2001 y 2003, se asocian con la ausencia de datos sísmicos. Los colores representan el valor medio del número de fases usadas en la localización de sismos por hora y mes, para cada año que se ha mantenido en operación la red sísmica, los colores claros indican pocas fases y los oscuros que se han usado mayor cantidad de fases en la localización del sismo.

Análisis sísmico y relocalización del terremoto del Valle de La Estrella

El terremoto del Valle de La Estrella, Limón se relocaliza y es ubicado a 43 km SSW de Puerto Limón (latitud 9.613, longitud -83.153), con profundidad de 17 km y tiempo de origen 21:56:51,9 (hora UTC) el 22 de abril de 1991; la solución GCMT (<https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>) indica una falla inversa con dirección SEE, con un plano de ruptura buzando 25° al SSW, es decir hacia el continente. El centroide dado por GCMT se ubica a 15 km de profundidad y 32 km NE de Puerto Limón (Fig. 6) y 20,4 segundos después; respecto al tiempo de origen del hipocentro y la ruptura se da a lo largo del plano de falla con parámetros: strike = 103°, dip = 25°, rake = 58° (ver Cuadro 2). La falla que dio origen al sismo es inversa con una pequeña componente lateral izquierda, rumbo SE, buzando al SW con un ángulo de 25 grados.

Otras agencias internacionales que calculan el tensor de momento, como Duputel et al. (2012), Francia (<http://wphase.unistra.fr/MGE65/index.html>) hacen la búsqueda del centroide y lo ubican debajo del epicentro, a 12 km de profundidad. La falla que originó este sismo comprende parte de Bocas del Toro en Panamá hasta Batán, Limón, Costa Rica, con una dimensión de 120 x 60 km y desplazamientos máximos de 3,2 m medidos en Cahuita y Sixaola, ubicados en la costa sur del caribe de Costa Rica, zona fronteriza entre Costa Rica y Panamá (Centro Nacional de Información sobre Terremotos del USGS, 2020).

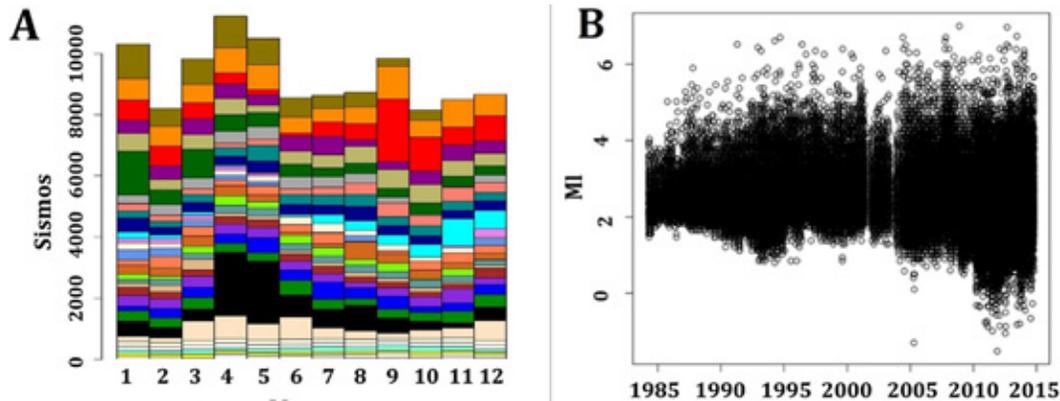


Fig. 4: A) Diagrama de barras de los sismos registrados mensualmente por la red del Ovsicori-UNA entre 1984 y 2014. Los meses se representan por números de 1 al 12, los colores representan los distintos años (en la base se muestra 1984 y en la parte superior 2014, se destaca 1991 en negro). B) Gráfico de magnitud Richter MI versus día. Los años de operación se muestran en el eje de la abscisa. Los sismos se representan por un círculo abierto. Se nota que a partir del 2010 se incrementan los registros de sismos con magnitud inferior a un grado en la escala Richter; lo que indica una mayor cobertura y operación de las estaciones sísmicas.

Réplicas del terremoto del Valle de La Estrella

Se analizaron dos días de réplicas, lo que permitió determinar que las 1111 réplicas registradas se ubicaron entre 10 y 30 km de profundidad, un aspecto significativo por resaltar es que un porcentaje importante de esos sismos se localizaron al NW del evento principal, cubriendo un área de 140x70 km con epicentros desde Bocas del Toro en Panamá, hasta Batán, Limón, Costa Rica; lo que indica que las réplicas se ubican a ambos lados del epicentro del sismo principal (Fig. 7). El análisis de la actividad sísmica registrada durante varios meses muestra que los sismos en la zona tienen la característica de ser más superficiales cerca de la costa con profundidades entre 10 y 20 km y un poco más profundos al interior del continente, correspondiendo a sismos ubicados al SE del evento principal, con profundidades entre 20 y 40 km.

Las réplicas de mayor magnitud localizadas por el Ovsicori-UNA, se ubicaron el mismo 22 de abril en el siguiente orden a) a las 22:07:15,8 (mb 5,2), profundidad 14 km, al NW del evento principal y cercano a Batán, Limón (ISC, 2020); b) 22 de abril a las 22:08:36,18 (mb 5,4), profundidad 22 km, 44 km al NW del evento principal (ISC, 2020); 27 de abril 1991, 05:42:43 (Mw 5,3), 58 km al NW del epicentro del evento principal, por debajo de Batán, Limón; con un plano de falla con dirección SE 133°, con un ángulo de 40° buzando al SW y con un ángulo de deslizamiento de 99°.

El 4 de mayo a las 03:42:55, ocurrió otro sismo (Mw 6,1), ubicado en la provincia de Bocas del Toro, Panamá, a 70 km NE del sismo principal, con 15 km de profundidad y un plano de falla con parámetros de strike=138°, dip=21°, rake=105°. El 27 de mayo a las 18:40:35 ocurrió otro sismo Mw 5,7, 18 km al NW del sismo principal, profundidad de 26 km y con un plano de falla buzando con bajo ángulo de 9° al SW, rumbo al SE (151°) y un rake de 108° (GCMT, 2020).

Los sismos de mayor magnitud, asociados al terremoto del Valle de La Estrella y su mecanismo focal, similar al evento principal, confirman que la falla que originó este sismo se extiende desde Bocas del Toro hasta el oeste de Batán, Limón, con una longitud de ruptura de aproximadamente 140 km y con ancho de unos 70 km, abarcando 50 km costa adentro y alcanzando profundidades de hasta 50-60 km.

El mecanismo focal del sismo principal (Mw 7,6) es inverso con componente lateral izquierdo y en general los mecanismos focales indican un régimen compresivo desde Bocas del Toro en el SW de Panamá hasta las cercanías de Siquirres, Limón (Fig. 8 y 9); mecanismos focales de corrimiento lateral puro y corrimiento lateral con componente normal se observa a lo largo de la cordillera de Talamanca y Cordillera Volcánica Central de Costa Rica (CVC). Se aprecia claramente un cambio de ambiente compresivo a transcurriente en la CVC y no en la cercanía de Limón.

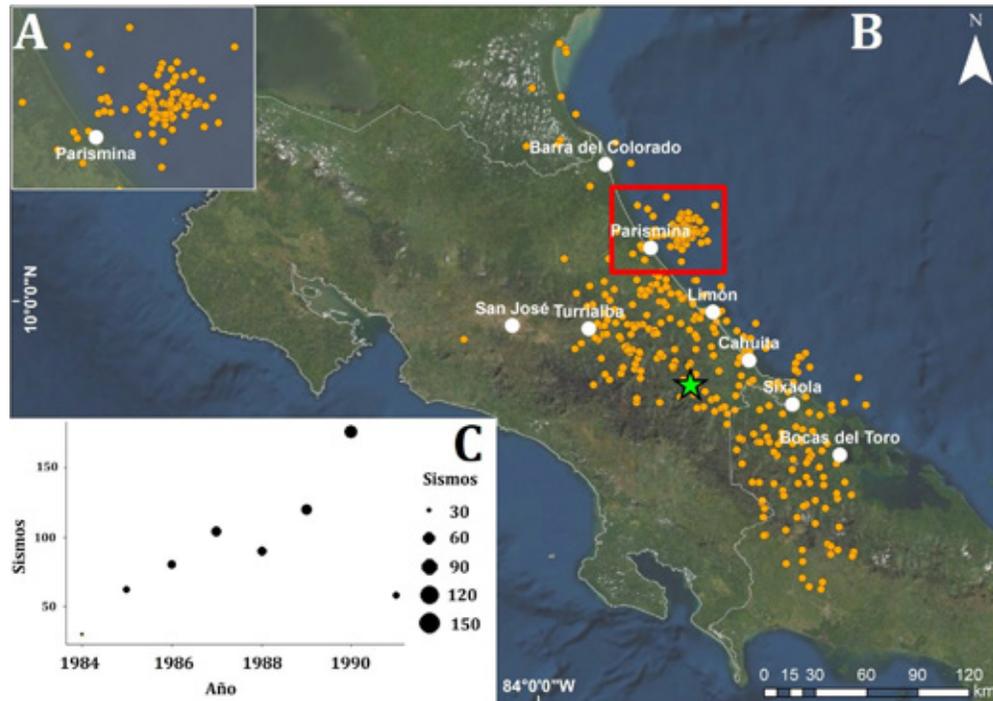


Fig. 5: A) Acercamiento de los epicentros relocalizados entre 1984 y el 22 de abril de 1991, cerca de Parismina. B) El epicentro del terremoto del Valle de la Estrella (Mw 7,6) se muestra con una estrella verde, los sismos se relocalizaron usando cuatro o más estaciones sísmicas. C) comportamiento de la distribución temporal de la sismicidad entre 1984 y 1991, siendo 1990 el año con mayor actividad sísmica registrada.

Cuadro 1

Sismos históricos importantes entre 1798 y 1991.

Sismo	Año	Mes-día	Hora UTC	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	Magnitud (Mw)	Fuente
1	1798	02-22	00:30	10,00	-83,20	15	6,2	ISC-GEM, (2021) Ovsicori-UNA (2020)
2	1821	04-10	00:00	9,83	-84,08	10	6,3	ISC-GEM (2021)
3	1822	05-07	01:30	9,63	-83,15	20	7,6	Ovsicori-UNA (2020)
4	1916	04-24	08:02	10,11	-83,56	15	7,6	Güendel, (1986)
5	1916	04-26	02:21	9,51	-82,45	10	7,5	Güendel, (1986)
6	1953	01-07	12:00	9,90	-83,10	10	6,0	ISC-GEM (2021), Güendel (1986)
7	1991	04-22	21:56	9,61	-83,15	16	7,6	Ovsicori-UNA, (2020) Dziewonski et al. (1981)

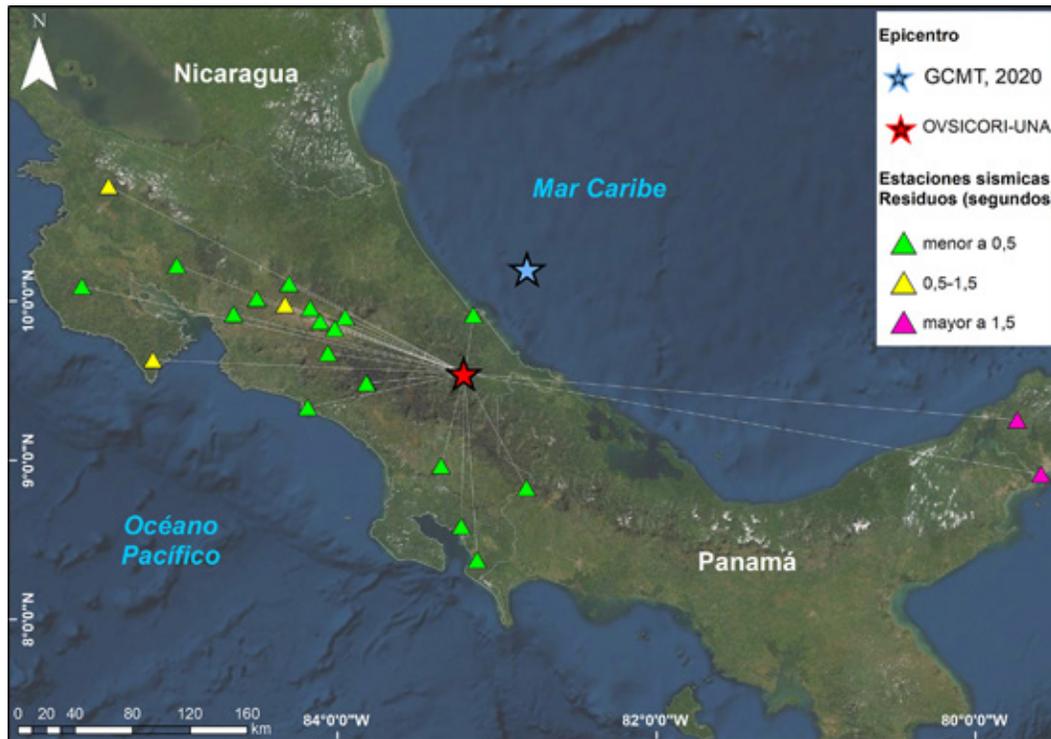


Fig. 6: Epicentro del terremoto del Valle de la Estrella, indicado en la figura por una estrella roja, también se indica por una estrella celeste la ubicación del centroide (GCMT, 2020). Las estaciones sísmicas usadas en la localización se indican por triángulos donde el color indica el residuo. Además, se expone la trayectoria que une el epicentro con la estación sísmica. Para la relocalización se usaron estaciones de Ovsicori-UNA, RSN y UPA, solo lecturas de arribos de la onda P fueron usadas.

Los datos de las redes sísmicas actuales han permitido una excelente localización de los hipocentros de los sismos en los últimos años; así como implementar las formas de onda para la inversión por el tensor de momento. Los resultados indican que los sismos inversos en el Caribe de Costa Rica predominan hasta el W del volcán Turrialba (Fig. 9), y que en el arco volcánico del centro de Costa Rica y hacia el S de esta área, la predominancia es de sismos de corrimiento lateral y para el Caribe Norte la predominancia es también de sismos de corrimiento lateral. Fan et al. (1992) y Protti et al. (1994) propusieron que varios sismos con M_w entre 3,2 y 4,4 y localizados a NW del sismo principal del Valle de La Estrella, con mecanismos del tipo corrimiento lateral izquierdo, podían indicar una transición del tipo subducción (cabalgamiento NPDB) a transcurrente en el centro de Costa Rica, y que la zona de deformación en el centro de Costa Rica podía ser el límite W del Bloque de Panamá. Fernández (2013) no encuentra evidencia de esa zona transcurrente que se extienda del Pacífico hasta el Caribe de Costa Rica y Soulas (1989) propuso que el CDNP se extendía a lo largo de la falla Siquirres-Matina y con posible extensión hasta Aguas Zarcas de San Carlos, Costa Rica (Fernández, 2013).

En el caso de esta investigación, un conjunto de sismos, con mecanismos focales similares al sismo del Valle de La Estrella, ocurren entre Turrialba de Cartago y Siquirres de Limón y podrían indicar la extensión del CDNP hasta mínimo Turrialba (Fig. 8 y 9). Una réplica ubicada el 24 de abril de 1991, tiene la misma característica que el sismo principal del 22 de abril y se localizó por debajo de Batán, Limón, lo que indica que esa zona de cabalgamiento sobrepasa Limón y se extiende al W de Puerto Limón; llegando mínimo hasta Batán.

La actividad actual muestra sismicidad entre la costa en Parímina hasta la parte continental, con varios sismos mostrando un patrón similar a los observados entre el Caribe Sur de Costa Rica y Bocas del Toro, Panamá. Posiblemente, el CDNP continúa más al W de lo que inicialmente se pensó y puede ser que ese límite abarque toda esa fila de Sarapiquí. Los MF globales y locales obtenidos en este trabajo son consistentes en mostrar sismos inversos en la costa Caribe Sur de Costa Rica y W de Panamá y sismos transcurrentes en la CVC y la cordillera de Talamanca.

El terremoto del Valle La Estrella abarcó un área extensa de más de 140 km x 70 km, desde Batán, Limón hasta Bocas del Toro, Panamá y con la localización hipocentral de los sismos en la zona, se podría decir que el sismo fue un poco más profundo de lo que se calculó con los datos de la época, y que pudo incluso alcanzar los 25 km de profundidad. Los hipocentros indican que la sismicidad en esa zona llega hasta 50 km de profundidad para los sismos entre 35 y 50 km de distancia de la costa y hacia el continente. Sobresalen pequeñas alteraciones hipocentrales en proyecciones perpendiculares a la costa Caribe, cerca de esta los sismos se concentran entre 10 y 30 km de profundidad, y a distancias mayores a 35 km de la costa, se ubican mayoritariamente entre 20 y 40 km de profundidad. Las proyecciones paralelas a la costa no muestran cambios en profundidad desde Parímina hasta Bocas del Toro.

El terremoto del Valle de La Estrella fue un agente disparador de otras fuentes sísmicas al interior del país, que iniciaron con la reactivación de energía sísmica al poco tiempo después de ocurrido el sismo principal; destacándose los sismos fuertes del 24 de abril 1991 a las 19:13:00 (Mw 6,1), ubicado a 50 km al SW del evento principal, mostrando un plano de falla con parámetros strike = 54°, dip=84° y rake = -12° (GCTM, 2020), que corresponde a un deslizamiento de corrimiento lateral izquierdo, esta fuente sísmica fue nombrada como de Moravia de Chirripó por Montero et al. (1991).

Sismicidad en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá entre 1991 y 2020

Entre 1991 y 2020 se ha registrado alta sismicidad en el Caribe, desde Nicaragua hasta Panamá, resaltando que esta es continua desde Parímina hasta Bocas del Toro y concentrada en núcleos específicos hacia el W y hacia el Archipiélago de San Andrés, Colombia. Los sismos relocalizados cuentan con una mejor cobertura de la red sísmológica, donde estos alcanzan ~50 km de profundidad al pie de la cordillera de Talamanca; pero, la mayoría se ubican en los primeros 30 km de profundidad. Los sismos ubicados fuera de la costa Caribe muestran ubicaciones más profundas, esto probablemente por motivo de mala cobertura de la red sísmica (Fig. 10).

Cascada de desastres asociados al terremoto del Valle de La Estrella

El aumento de la población y de la infraestructura en áreas de amenaza, conllevan un aumento en la exposición y vulnerabilidad ante la ocurrencia de algún evento natural, en este sentido Alexander y Pescaroli (2019) enfatizan que el estudio de la cascada de desastres ha surgido como un nuevo paradigma en el abordaje de los desastres, ya que a mayor vulnerabilidad el impacto de los desastres suele extenderse a través de los sistemas socioeconómicos, donde la escalada de los diferentes eventos secundarios que se generan pueden acarrear mayores impactos que el evento primario.

En ese sentido, el terremoto del Valle de La Estrella (evento primario) generó una cascada de desastres, ya que disparó tres principales eventos secundarios a) deslizamientos, b) amplificación y licuefacción y c) levantamiento y subsidencia de la costa, los cuales tuvieron una incidencia directa sobre los sistemas sociales y económicos, así como en la infraestructura y los ecosistemas, la síntesis se muestra en la Fig. 11.

Impacto de los deslizamientos

Los principales efectos se dieron en las áreas montañosas de la vertiente del Caribe, en la cordillera de Talamanca, donde las abruptas pendientes y la sacudida sísmica fueron los principales factores que detonaron los procesos de inestabilidad de

Cuadro 2

Sismos relocalizados y sus mecanismos focales.

	RELOCALIZACIÓN						MECANISMO FOCAL							Fuente
	yyyy	mm	dd	hh	mm	sec	Long.	Lat.	Prof	Strike	Dip	Rake	Mag.	
1	1988	01	31	23	31	45,1	-83,65	9,76	13,3	149	90	180	5,0	GCMT
2	1991	04	22	21	56	51,9	-83,15	9,61	17,1	103	25	58	7,6	GCM
3	1991	04	23	18	56	44,1	-83,26	9,76	20,3	246	7	-17	5,1	GCMT
4	1991	04	24	19	12	59,6	-83,55	9,59	9,9	145	78	-174	6,1	GCMT
5	1991	04	27	05	42	43,5	-83,35	10,09	24,5	133	40	99	5,3	GCMT
6	1991	05	04	03	42	54,6	-82,44	9,52	14,7	138	21	105	6,1	GCM
7	1991	05	27	18	40	34,6	-82,99	9,64	26,1	151	9	108	5,7	GCMT
8	1991	11	10	08	20	18,4	-83,44	9,87	25,3	142	61	121	5,3	GCMT
9	1993	3	12	20	51	37,1	-83,36	9,77	19,7	1	41	-41	3,3	FOCMEC
10	1997	06	23	01	03	47,3	-83,49	10,51	18,7	138	42	127	5,3	GCMT
11	1998	10	01	20	44	05,9	-82,50	9,79	30	155	34	135	5,3	GCMT
12	2000	08	13	06	28	10,0	-82,64	11,48	21,3	262	88	-22	5,4	GCMT
13	2004	6	10	15	03	40,7	-82,97	9,86	28	143	46	112	5,0	GCMT
14	2009	11	20	17	22	28,9	-83,11	10,50	43,4	165	79	-165	5,2	GCMT
15	2009	11	26	21	04	20,7	-82,80	9,68	35	126	32	-49	4,6	FOCMEC
16	2011	02	28	22	09	05,2	-82,89	10,01	35	100	44	119	5,0	FOCMEC
17	2012	6	26	03	16	58,0	-83,60	9,96	23,5	116	37	88	4,1	ISOLA
18	2013	05	27	09	41	14,5	-82,75	9,31	21,3	125	25	92	5,8	GCMT
19	2014	06	16	13	26	46,4	-81,41	11,59	41,1	1	59	150	5,3	GCMT
20	2015	4	27	05	38	41,5	-83,57	9,77	18,5	52	71	-30	3,3	FOCMEC
21	2015	6	11	18	43	59,7	-83,50	10,06	22,4	67	68	19	4,5	ISOLA
22	2015	6	21	07	27	32,6	-83,15	10,04	29,9	77	30	29	5,3	FOCMEC
23	2015	9	26	14	45	02,3	-83,50	9,89	16,2	156	56	90	4,6	ISOLA
24	2015	10	23	05	14	00,7	-82,87	9,66	23,1	58	22	-62	3,9	FOCMEC
25	2016	2	8	19	40	20,0	-83,70	9,96	14	89	44	61	3,4	FOCMEC
26	2016	5	24	20	17	58,6	-83,75	10,02	3,1	104	84	-8	3,8	FOCMEC
27	2016	8	7	06	09	50,8	-83,89	10,55	23,8	213	86	5	4,8	ISOLA
28	2017	3	30	12	11	46,3	-83,76	10,97	20	185	76	-161	4,4	ISOLA
29	2017	4	2	23	54	32,6	-82,61	8,93	19,8	175	62	-169	5,3	GCMT
30	2017	4	21	11	57	17,3	-83,45	9,85	17,4	96	39	101	3,1	FOCMEC
31	2017	4	24	07	07	52,0	-83,64	9,85	14,5	142	23	118	3,3	FOCMEC
32	2017	6	23	19	08	28,0	-83,61	9,88	17,8	86	31	88	2,8	FOCMEC
33	2017	8	19	21	38	04,0	-83,62	9,93	17,3	151	28	101	4,5	ISOLA
34	2017	9	17	04	29	23,0	-83,38	9,76	16	49	21	-14	3,2	FOCMEC
35	2017	10	5	21	51	11,0	-83,69	9,90	14	76	28	90	3,0	FOCMEC
36	2018	6	15	06	45	17,1	-83,45	9,86	21,9	324	77	-171	4,3	FOCMEC
37	2018	11	17	14	12	53,5	-83,89	10,15	12,9	122	36	99	4,9	FOCMEC
38	2019	4	1	13	44	48,5	-82,64	9,45	29,7	52	29	6	5,3	ISOLA

Cuadro 2 (continuación)

Sismos relocalizados y sus mecanismos focales.

	RELOCALIZACIÓN						MECANISMO FOCAL							Fuente
	yyyy	mm	dd	hh	mm	sec	Long.	Lat.	Prof	Strike	Dip	Rake	Mag.	
39	2019	4	3	22	39	33,7	-83,67	9,93	14,3	108	65	85	2,7	FOCMEC
40	2019	4	10	16	07	59,1	-82,63	9,51	13	310	30	-86	4,0	FOCMEC
41	2019	7	29	04	43	40,8	-81,93	9,705	35	114	34	95	4,9	GCMT
42	2019	9	18	04	58	51,9	-82,83	9,85	9	108	83	28	4,8	ISOLA
43	2020	1	14	15	34	42,6	-83,93	10,363	18	39	60	55	3,4	FOCMEC
44	2020	4	8	14	32	49,3	-83,35	10,464	27,6	76	75	27	4,9	ISOLA
45	2020	4	20	09	26	59,1	-82,86	9,711	29,1	97	55	-4	4,0	FOCMEC
46	2020	6	15	09	58	20,4	-83,48	9,899	18,1	82	51	8	3,2	FOCMEC
47	2020	7	2	00	38	50,3	-83,19	10,101	27,8	109	40	90	3,8	FOCMEC

las laderas. El daño ambiental conllevó a la desaparición de selva virgen en la Reserva de la Biosfera La Amistad (Morales, 1994; Soulas, 1991), como resultado de ello se dio un desequilibrio hidrológico que desencadenó inundaciones, avalanchas de lodo y contaminación de aguas fluviales, lagunares y marinas (Mora y Mora, 1994).

Los deslizamientos impactaron aproximadamente 2 000 km², las áreas más afectadas fueron las cuencas altas de los ríos Estrella, Banano, Bananito y Chirripó, donde se presentaron deslizamientos espectaculares por su dimensión y extensión (Mora y Mora, 1994). En este sentido, Soulas (1991) enfatiza que los deslizamientos correspondieron a desprendimientos y caída de bloques, donde la franja ubicada entre el cañón del río Chirripó y los alrededores de la cuenca alta del río Banano, fue el proceso de ladera más notable por sus dimensiones (Fig. 12), este corresponde a un fuerte desnivel en la cordillera de Talamanca.

Los procesos de ladera se concentraron en áreas montañosas, habitadas por grupos indígenas con baja densidad poblacional, lo que sumado a las condiciones aisladas y precarias (Morales, 1994) fueron factores de vulnerabilidad que potenciaron el impacto del desastre en estas áreas. Se destaca que el impacto de los deslizamientos se concentró en Costa Rica, caso contrario en Panamá, donde las principales afectaciones se asociaron al proceso de licuefacción y de levantamiento y subsidencia de la costa.

Hernández et al. (1992) contabilizaron un total de 1 834 deslizamientos provocados por el terremoto, los cuales variaron de tamaño en función de su localización (litología, pendientes, grado de meteorización y pluviosidad). Las áreas que presentaron cada uno de los procesos de ladera cosísmicos variaron entre 3 157 m² y 19,15 km². Quesada-Román (2016) indica que otras variables morfométricas como la densidad de la disección (concentración de ríos en un área específica), la profundidad de la disección (altura relativa entre la ruptura de pendiente más representativa y el *talweg*), la erosión total (densidad de curvas de nivel en un espacio definido) tienen valores altos en sus métricas, todas ellas potenciadas por la inclinación del terreno superior a 35° y la presencia de sustratos sedimentarios del Terciario en las áreas más afectadas, relacionadas con las cabeceras de los ríos Estrella, Banano y Bananito y Chirripó.

Impacto de la amplificación y licuefacción

Los suelos ubicados entre el pie de monte de la cordillera de Talamanca y la costa, así como en el Valle de La Estrella y el Valle de Talamanca, corresponden a depósitos aluviales, por lo que son suelos limosos y arenosos de poca cohesión (Soulas, 1991), factor que contribuyó a los procesos de amplificación de la sacudida sísmica y por ende la licuefacción; la distancia



Fig. 7: Sismos registrados y relocalizados desde el 22 de abril de 1991 a las 21:57:52 al 24 de abril de 1991 a las 23:59:59. Los sismos se representan por círculos anaranjados. Por una estrella roja se representa el epicentro del terremoto del Valle de la Estrella (Mw 7,6). La mayoría de las réplicas se concentra en el continente y hacia el NW del sismo principal.

entre el epicentro y el área más lejana afectada por la licuefacción se estimó en 92 km (Hafström y Skogsberg, 1994). En Bocas del Toro, Panamá los depósitos aluviales y sedimentos no consolidados favorecieron el proceso de licuefacción en sectores como Guabito, California, Changuinola, Puerto Almirante y la ciudad de Bocas del Toro (Camacho y Víquez, 1994) (Fig. 13).

La licuefacción fue el evento secundario que más daños causó en la infraestructura, destacando el colapso en ocho puentes, así como daños en 80 km de pavimento, principalmente en las rutas Siquirres-Limón (35 km) Siquirres-Limón-Cahuita y Limón-Sixaola, daños en las vías férreas, instalaciones portuarias, aeropuertos, edificios y viviendas (Hafström y Skogsberg, 1994; Sauter, 1994; Soulas, 1991). Los principales efectos de la licuefacción se concentraron en la costa, entre Matina, Costa Rica y Bocas del Toro, Panamá. Camacho y Víquez (1994) señalan que para el caso de Bocas del Toro la licuefacción afectó aproximadamente 355 km², destacando el impacto sobre la red vial y la vía férrea (Fig. 14).

Impacto del levantamiento y subsidencia de la costa

Las mediciones del levantamiento costero indicaron un levantamiento no uniforme a lo largo de la costa, alcanzando unos 90 cm en Cahuita y un levantamiento máximo de 1,5 m en Limón centro (Montero et al., 1991; Soulas, 1991). En Bocas del Toro, Panamá se registraron subsidencias de hasta 0,9 m (Camacho y Víquez, 1994). La plataforma continental que se elevó estaba conformada por corales, rocas de playa y depósitos de arena (Montalto y Cerdas, 1991).

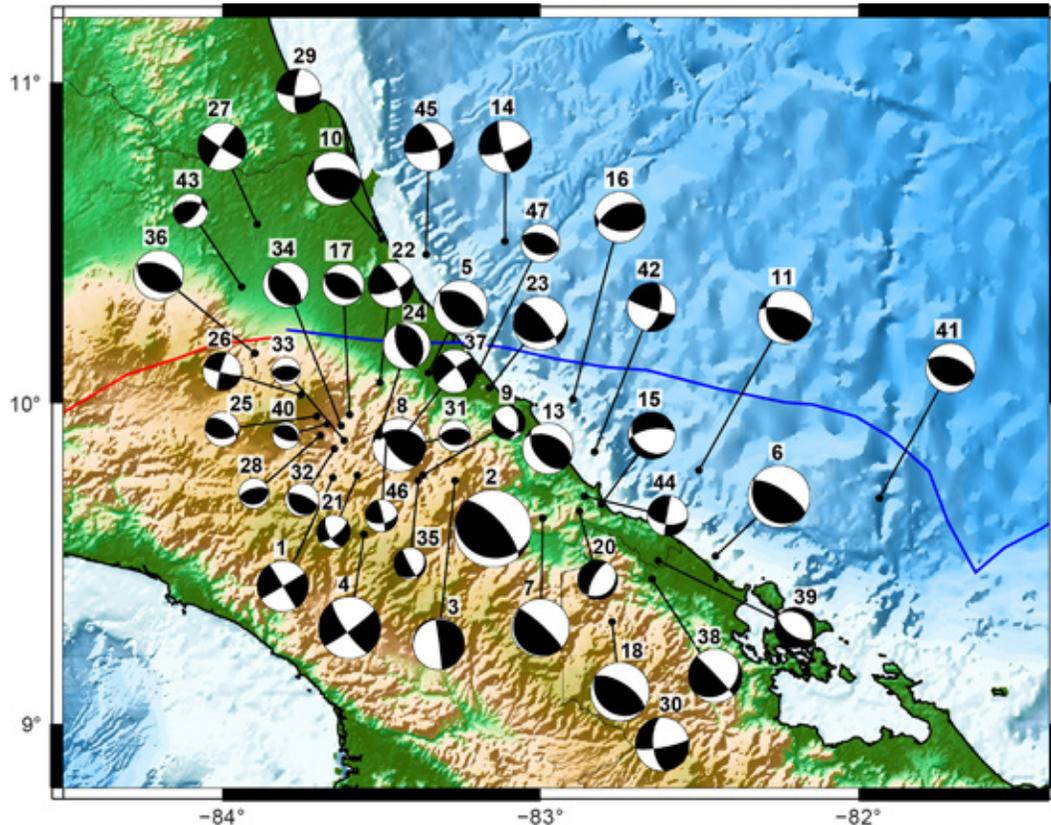


Fig. 8: Mecanismos focales (MF) desde 1984 hasta el 2020, principalmente para la región Caribe de Panamá, Costa Rica y Nicaragua. Aquí se muestran MF obtenidos en este trabajo y por agencias globales. En la parte superior del mecanismo focal se indica el sismo acorde a la posición en el cuadro 2. Por una línea roja y azul se indican límites de placas CA-BP; con transición del tipo subducción (azul) a transcurrente (roja).

En Costa Rica fueron registrados levantamientos entre la Ciudad de Limón de 1,5 m hasta Gandoca, donde se registró una elevación de 0,4 m; para el caso de Bocas del Toro, Panamá solamente se registraron subsidencias, las cuales oscilaron entre 0,9 m en Knapp Hole Point y 0,3 m cerca de la desembocadura del río Changuinola y la punta sur de Isla Carenero (Fig. 15; Cuadro 3)

Entre los principales efectos del levantamiento continental Cortés et al. (1994) señalan que en Moín y en Punta Piuta $\sim 10\,000\text{ m}^2$ de arrecifes quedaron expuestos y en Portete se registraron $20\,000\text{ m}^2$, en el parque Nacional Cahuita los autores destacan que fueron hallados corales quebrados, así como grietas formadas en el frente de los arrecifes lo que provocó que los más profundos quedaran enterrados; además la exposición de arrecifes fósiles es un fiel indicador que este proceso se ha repetido a lo largo del tiempo. En el caso de Bocas del Toro, Panamá, el proceso de subsidencia provocó pérdidas de áreas de bosque cercanas a la costa, las cuales quedaron cubiertas de agua, tal como sucedió en la desembocadura del río San-San, en Big Bay y en Lennan Cove; cerca de la desembocadura del río Changuinola se formó una entrada al mar lo que destruyó vegetación y limitó el tránsito por el canal de Changuinola, la terminal del ferrocarril, localizada en Knapp Hole Point, se hundió al menos 0,9 m (Camacho y Viquez, 1994).

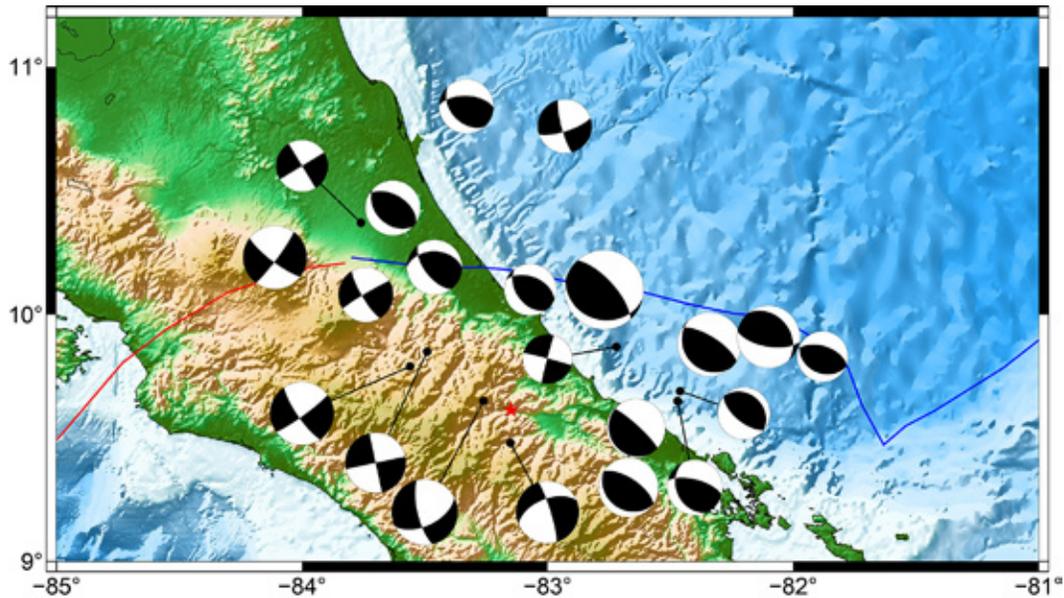


Fig. 9: Mecanismos focales desde 1988 hasta finales de setiembre del 2019; obtenidos del catálogo global GCMT (Dziewonski et al., 1981, Ekström et al., 2012) para la zona Caribe de Costa Rica y Panamá. Con una estrella de color roja se indica el epicentro del terremoto de Valle de La Estrella. Las líneas roja y azul indican los límites de placas CA-BP; con transición del tipo subducción (azul) a transcurrente (roja).

Cuadro 3

Puntos de levantamiento y subsidencia en la costa Caribe, entre Limón, Costa Rica y Bocas del Toro, Panamá.

Sitio	Levantamiento (m)	Subsidencia (m)	Latitud	Longitud	Fuente
Knapp Hole Point	-	0,9	9,40	-82,32	Camacho y Viquez (1994)
Río San-San	-	0,5	9,53	-82,51	
Río Changuinola	-	0,3	9,45	-82,43	
Punta sur de Isla Carenero	-	0,3	9,33	-82,23	
Ciudad de Limón	1,5	-	9,99	-83,03	Montero et al. (1991)
Cahuita	0,9	-	9,73	-82,84	Soulas (1991)
Playa Bananito	0,8	-	9,88	-82,97	
Westfalia	0,6	-	9,91	-82,98	Montero et al. (1991)
Gandoca	0,4	-	9,63	-82,62	

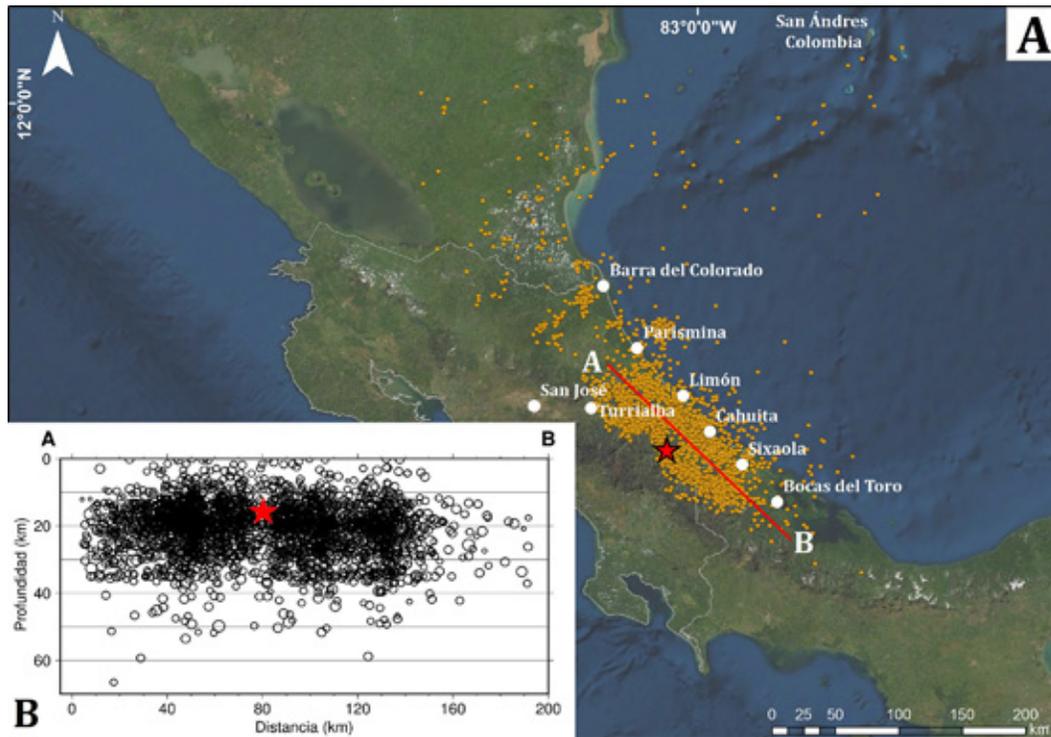


Fig. 10: A) Sismos registrados entre 1984 y 2020, se escogieron de la base de datos original con las siguientes condiciones: entre 8 y 13 grados latitud norte y 85 y 81 grados longitud oeste y con profundidades menores a 100 km, haber sido registrado por ocho estaciones o más y que al menos una de ellas esté ubicada en el Caribe (CDL, COVE, RIFO, BATAN, LIO, LICR, FICA, VEST, CNKC, SIXA). Con una estrella roja se resalta la profundidad y la ubicación del terremoto del Valle de La Estrella, la orientación del perfil se denota con una línea roja continua. B) Perfil a lo largo de la línea AB y con 33 km de anchura a ambos lados de la línea AB. A veces la cantidad de datos no es suficiente para obtener una buena profundidad, por lo que automáticamente en la relocalización se fija a 33 km, como se puede observar en la figura B para varios de los sismos.

Pérdidas económicas en valor presente (2020)

El terremoto del Valle de La Estrella, como se ha mencionado en los apartados anteriores, corresponde en época histórica al evento que ha generado uno de los mayores desastres en Costa Rica. Los eventos secundarios desencadenados por este sismo (deslizamientos, amplificación y licuefacción y levantamiento costero) tuvieron un impacto directo sobre la infraestructura destacando la red vial, puentes, acueductos, aeropuertos, puertos, edificios y viviendas y en las actividades económicas (principalmente cultivo de banano). Las pérdidas económicas reportadas, únicamente para el sector gubernamental ascendió a 21 991,9 millones de colones (188 millones de dólares), para la época esta cifra representaba el 4,21% del Producto Interno Bruto (PIB) (Morales, 1994).

A pesar de la acotación de Morales (1994), en esta investigación se consideran las pérdidas reportadas por el Mideplan, las cuales están basadas en el Plan Regulador para la zona atlántica de Costa Rica (CNE, 1991) y que se encuentran desglosadas por sector. En 1991 el total de pérdidas fue de \$279 764 466,09 y se distribuyó en 14 sectores, para el 2020 esa cifra actualizada corresponde a \$3 433 266 937,41 (Cuadro 4).

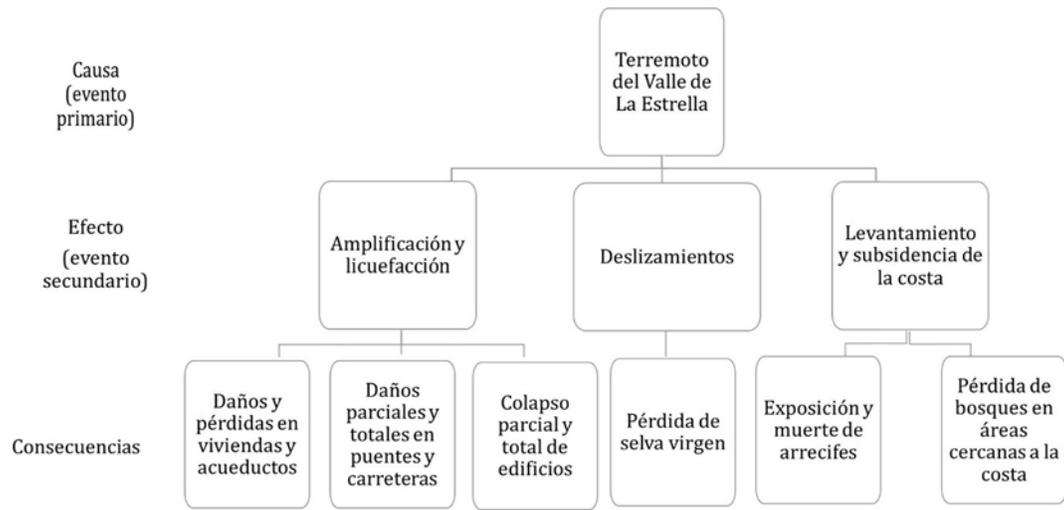


Fig. 11: Cascada de desastres asociados al terremoto del Valle de La Estrella, se identificaron tres eventos secundarios principales, donde la amplificación y la licuefacción fue el que más daños en infraestructura y pérdidas económicas causó, destacando el daño en carreteras, colapso de puentes, así como de edificios y viviendas.

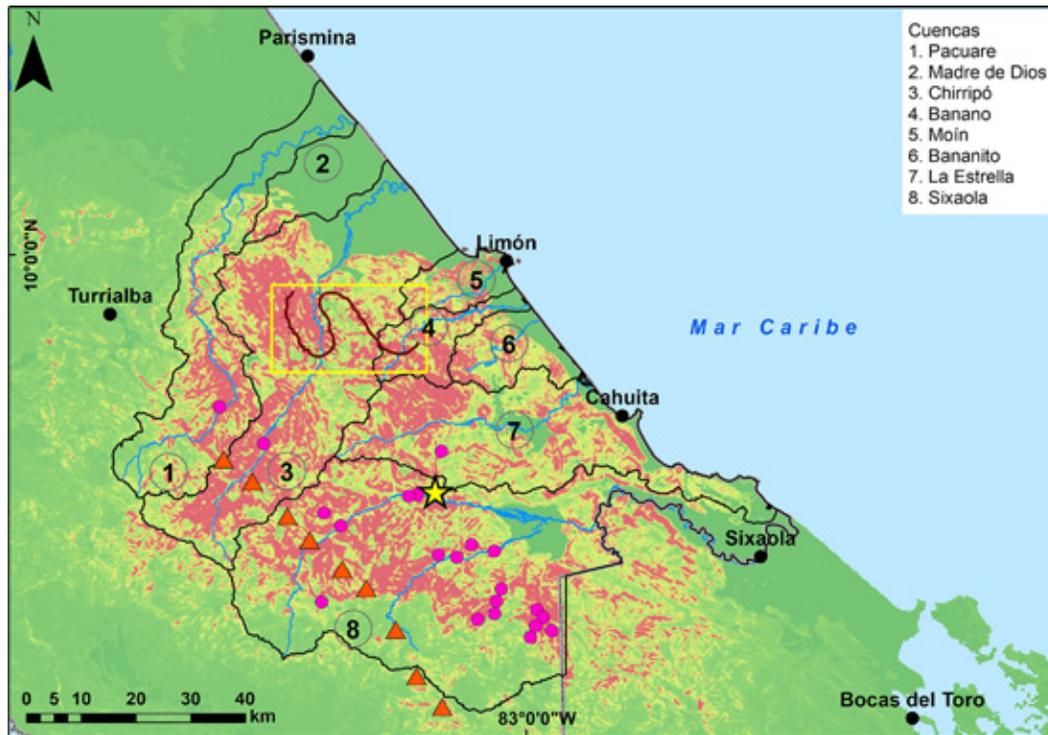


Fig. 12: Áreas de deslizamiento detonadas por el terremoto del Valle de La Estrella, el modelo de deslizamiento fue elaborado por Jesse et al. (2017) y facilitado por el Centro Nacional de Información sobre Terremotos-USGS (2020). Los poblados indígenas, identificados en la figura con círculos fucsia, se localizan en las estribaciones de la cordillera de Talamanca (una de las áreas más afectadas por deslizamientos) indicada por triángulos anaranjados, en las cuencas Chirripó y Banano se resalta en un recuadro amarillo el deslizamiento señalado por Soulas (1991) como proceso de ladera más notable por sus dimensiones. El epicentro del terremoto del Valle de La Estrella se indica con una estrella amarilla.

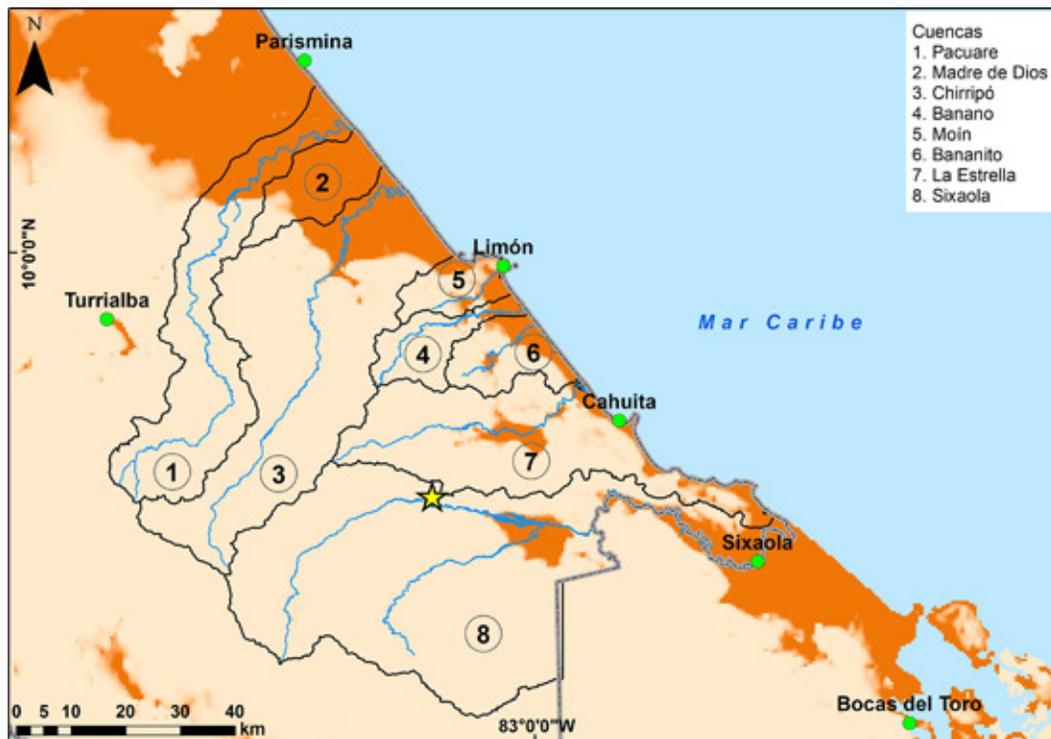


Fig. 13: Áreas afectadas por la licuefacción debido al terremoto del Valle de La Estrella, el modelo de licuefacción fue elaborado por Zhu et al. (2017) y facilitado por el Centro Nacional de Información sobre Terremotos del USGS (2020) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0004qpg/ground-failure/summary>), además se incluye la cartografía propuesta por Soulas (1991), la cual muestra una alta coincidencia al modelo de Zhu et al. (2017). La licuefacción se concentró en la costa y afectó ciudades como Limón en Costa Rica y Bocas del Toro en Panamá. El epicentro del terremoto se indica por una estrella amarilla y principales poblados por círculos verdes.

De acuerdo con los datos analizados los cinco sectores que registraron las mayores pérdidas económicas fueron vivienda, infraestructura vial, portuario, acueductos y alcantarillados y ferroviario. Al 2020 la suma de dichos rubros asciende a \$3 090 549 786,15, esto considerando las mismas condiciones de infraestructura existentes en 1991, es decir si al presente se tuviera un evento sísmico similar al ocurrido en 1991 las pérdidas incluso serían mayores al monto estimado, ya que el desarrollo urbano (red vial y viviendas), comercial (puertos) y turístico (hoteles y comercios) han presentado un crecimiento sostenido en los últimos 30 años.

CONCLUSIONES

La sismicidad en el CDNP se ubica ~40 km fuera de la costa Caribe (Puerto Limón hasta Bocas del Toro) y alcanza ~60 km de profundidad hacia el continente por debajo de la Cordillera de Talamanca, indicando por tanto una posible zona de subducción activa. Donde la zona de transición de esa subducción activa a transcurrente no está bien definida; los datos no confirman esa transición en Puerto Limón. Los mecanismos focales locales y globales indican que el CDNP debe ubicarse más al W de Puerto Limón.

Desde el arco volcánico central hacia el S del país, los sismos tienen componente fuerte de cizallamiento, lo cual muestra claramente esa zona de transición de convergente a transcurrente y que de extenderse al W de Sarapiquí, daría pie a una transición triple.

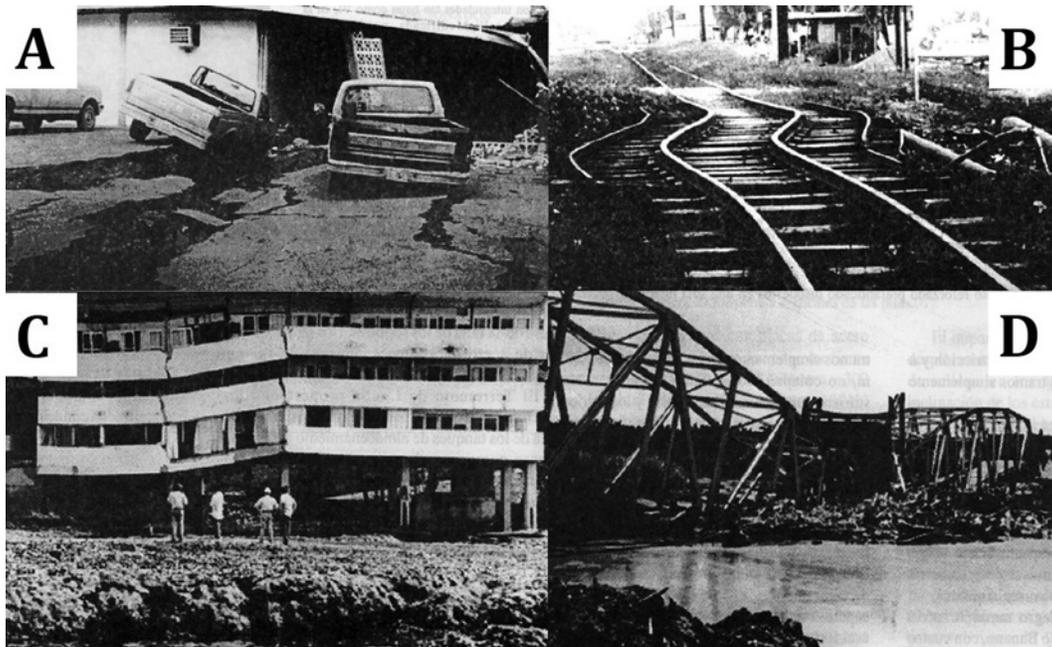


Fig. 14: Principales efectos de la licuefacción en Costa Rica y Panamá: A) Grietas en las oficinas de la Chiriquí Land Company en Changuinola debido a desplazamientos laterales. B) Daños en el puente del ferrocarril en Changuinola, Panamá, debido a desplazamientos laterales. C) Hotel Las Olas en la ciudad de Limón, parcialmente colapsado, sus bases fueron construidas sobre material coralino. D) Puente sobre el río La Estrella colapsado debido a la falta de mecanismos de soporte para mitigar los desplazamientos laterales. Las imágenes A y B fueron tomadas de Camacho y Viquez (1994) y las imágenes C y D de Sauter (1994).

Cuadro 4

Pérdidas económicas en dólares por el terremoto del Valle de La Estrella al valor presente (2020)

Sector	Valor en 1991	Valor presente (2020)
Edificios públicos y privados	528 125,01	6 481 145,25
Telecomunicaciones	947 011, 712	11 621 718,96
Educación	1 329 746,89	16 318 641,46
Aeropuerto	1 497 703,65	18 379 805,35
Sistema eléctrico	1 702 156,12	20 888 844,13
Atención de la emergencia	2 540 747,27	31 180 026,93
Salud	3 126 922,78	38 373 567,44
Energía	8 023 412,42	98 463 242,93
Ríos y quebradas	8 230 951,35	101 010 158,81
Ferrovionario	21 256 073,49	260 854 337,11
Acueductos y alcantarillados	31 007 254,85	380 520 744,41
Portuario	39 325 418,74	482 601 174,68
Infraestructura vial	40 004 734,33	490 937 729, 25
Vivienda	120 244 207,47	1 475 635 800,70
Total	279 764 466,09	3 433 266 937,41

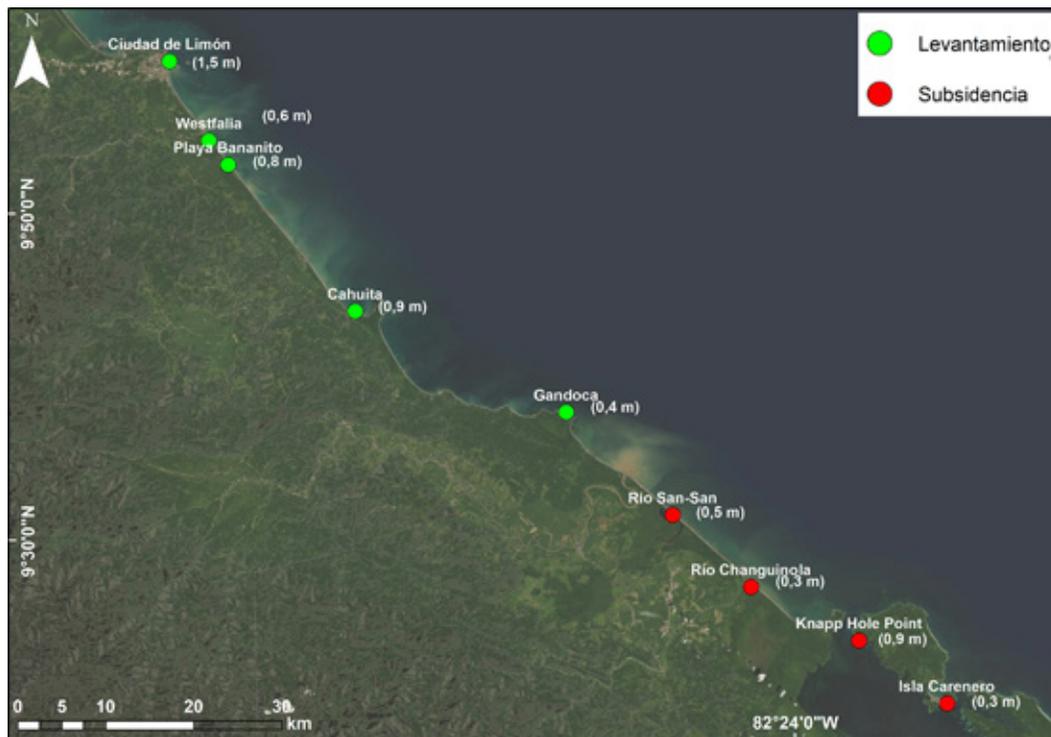


Fig. 15: Puntos de levantamiento y subsidencia de la plataforma continental, en Costa Rica solo fueron registrados puntos de levantamiento, mientras que en Panamá únicamente se dio subsidencia de la plataforma continental. Los datos fueron recolectados en una franja de aproximadamente 115 km entre la ciudad de Limón, Costa Rica e Isla Carenero, Bocas del Toro, Panamá. Para referencias ver Cuadro 3.

El terremoto del Valle de La Estrella es un claro ejemplo de desastres en cascada, ya que disparó otros eventos secundarios, como deslizamientos, amplificación licuefacción y levantamiento y subsidencia de la costa. Los deslizamientos se concentraron en áreas montañosas de la cordillera de Talamanca, aunque su impacto fue menor debido a la escasa infraestructura y reducidos núcleos poblacionales (grupos indígenas), sin embargo se perdieron importantes hectáreas de selva virgen. En cuanto al levantamiento y subsidencia de la costa, se determinó que el levantamiento se dio al menos entre la ciudad de Limón (1,4 m) y Gandoca (0,4 m); en el caribe Panameño solo se registró subsidencia de la costa (máximo de 0,9 m en Knapp Hole Point), ambos procesos solo afectaron arrecifes coralinos y pérdida de áreas de bosque cercanas a la costa. Los principales daños en infraestructura (carreteras, puentes, puertos, viviendas y acueductos) se debieron a la amplificación y licuefacción del suelo, esto en localidades costeras, como la ciudad de Limón, donde la alta concentración de infraestructura y de población fueron factores que maximizaron el impacto del desastre.

Las pérdidas económicas que tuvieron lugar en 1991 fueron actualizadas al valor presente (2020), donde se obtuvo un monto de a \$3 090 549 786,15, esto considerando el mismo escenario socio-productivo de la época con un sismo de similares características al terremoto del Valle de La Estrella; esto indica que de suceder un evento similar las pérdidas actuales serían mayores, ya que el Caribe costarricense y panameño han experimentado un crecimiento de población y de infraestructura, así como en turismo; por lo que proyecciones como estas permiten reflexionar si en materia de gestión de riesgo Costa Rica cuenta con los mecanismos financieros para afrontar un evento similar como el acaecido en 1991.

AGRADECIMIENTOS

Al Ovsicori-UNA, al ISC, ISC-GEM, RSN, LIS, UPA, GCMT, USGS por la disposición de información en línea y por los datos usados en este trabajo. La recopilación de información es un trabajo en equipo y conlleva el trabajo de mucho personal; así como de la ayuda de instituciones nacionales e internacionales y del Estado costarricense; por lo que agradecemos a todos los que han participado de una u otra forma en recopilación de información. Un especial agradecimiento a Carlos Montero Cascante y Juan Segura Torres por las conversaciones y materiales sobre la sismicidad de los años 90; principalmente los datos macrosísmicos; al Mideplan por la disponibilidad de la información de las pérdidas económicas producto del terremoto del Valle de La Estrella y a los revisores Waldo Taylor y Lepolt Linkimer por sus observaciones y sugerencias que ayudaron a enriquecer el contenido y análisis de los resultados de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, D. y Pescaroli, G. (2019). What are Cascading Disasters?. *UCL Open Environment*, 1, 1-6. doi: 10.14324/111.444/ucloe.000003
- Camacho, E. y Víquez, V. (1994). Licuefacción y hundimientos costeros en el noroeste de Panamá durante el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial del Terremoto de Limón*, 133-138. doi: 10.15517/RGAC.V010.13446
- Camacho, E., Hutton, W. y Pacheco, J. (2010). A New Look at Evidence for a Wadati-Benioff Zone and Active Convergence at the North Panama Deformed Belt. *Bulletin of The Seismological Society of America*, 100(1), 343–348. <https://doi.org/10.1785/0120090204>
- Campos-Durán, D. y Quesada-Román, A. (2017). Riesgos Intensivos y Extensivos en América Central entre 1990 y 2015. *Anuario do Instituto de Geociências – UFRJ*, 40(2), 234-249. doi: 10.11137/2017_2_234_249
- Chaves, E., Duboeuf, L., Schwartz, S., Lay, T. y Kintner, J. (2017). Aftershocks of the 2012 Mw 7.6 Nicoya, Costa Rica, Earthquake and Mechanics of the Plate Interface. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1227–1239. doi: 10.1785/0120160283
- Centro Nacional de Información sobre Terremotos, USGS. (2020). *M 7.6 - Costa Rica 1991-04-22 21:56:51 (UTC)*. Estados Unidos. Manuscrito inédito. Recuperado de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0004qpg/executive>
- Climent, A., Rojas, W., Alvarado, G. E. y Benito, B. (2008). *Proyecto Resis: evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica*. San José, Costa Rica. Manuscrito inédito. Recuperado de https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf
- Cortés, J., Soto, R. y Jiménez, C. (1994). Efectos ecológicos del terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial del Terremoto de Limón*, 187-192. doi:10.15517/RGAC.V010.13450
- Duputel, Z., Rivera, Luis., Kanamori, H. y Hayes, G. (2012). W phase source inversion for moderate to large earthquakes (1990-2010). *Geophysical Journal International*, 189(2), 1125-1147. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05419.x

- Dziewonski, A. M., Chou, T. A. y Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86, 2825-2852. doi: 10.1029/JB086iB04p02825
- Ekström, G., Nettles, M. y Dziewonski, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200-201, 1-9. doi: 10.1016/j.pepi.2012.04.002
- Fan, G., Beck, S. y Wallace, T. A. (1992). Diffuse Transcurrent Boundary in Central Costa Rica: Evidence from a Portable Aftershock Study (Abstract). *Eos. Trans., AGU*, 73, 345.
- Fernández, M. (2013). Seismotectonic and the hypothetical strike-slip tectonic boundary of Central Costa Rica. En S. D'Amico (ed.) *Earthquake research and analysis—New advances in seismology* (pp. 77-105). Universidad de Malta, Malta. doi: 10.5772/54989
- Güendel, F. (1986). *Seismotectonics of Costa Rica: An analytical view of the southern terminus of the Middle America Trench*. (Tesis de doctorado inédita). Universidad de California, California, Estados Unidos.
- Güendel, F., McNally, K. C., Lower, J., Protti, M., Saenz, R., Malavassi, E., Barquero, J., Van der Laat, R., Gonzalez, V., Montero, C., Fernández, E., Rojas, D., Segura, J., Mata, A. y Solis, Y. (1989). First results from a new seismographic network in Costa Rica, Central America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 79(1), 205–210.
- Hafström, P. y Skogsberg, J. (1994). *Liquefaction during the Limón - Telire earthquake, 22 April 1991* (Tesis de maestría inédita). Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suecia.
- Hernández, G., Vahrson, W. y Ruiz, A. (1992). *Mapa de deslizamientos producto del terremoto (4-22-91)*. Heredia, Costa Rica: Escuela de Ciencias Geográficas. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Hobbs, T., Newman, A. y Protti, M. (2019). Enigmatic upper-plate sliver transport paused by megathrust earthquake and afterslip. *Earth and Planetary Science Letters*, 520, 87-93. doi: 10.1016/j.epsl.2019.05.016
- International Seismological Center (ISC). 2020. *On-line Bulletin*. Recuperado de <http://www.isc.ac.uk>
- International Seismological Centre (2021). *ISC-GEM Earthquake Catalogue*. Recuperado de <https://doi.org/10.31905/d808b825>
- Kreemer, C., Blewitt, G. y Klein, E.C. (2014). A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 3849- 3889. doi: 10.1002/2014GC005407
- Lienert, B. R. y Haskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seismological Research Letters*, 66, 26 - 36. doi: 10.1785/gssrl.66.5.26
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (Mideplan). (2020). *Pérdidas Ocasionadas por Fenómenos Naturales del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica*. Base de datos. Recuperado de <https://www.Mideplan.go.cr/perdidas-ocasionadas-fenomenos-naturales>
- Montalto, F. y Cerdas, A. (1991). *Informe preliminar de amenazas geológicas, Terremoto de Telire: Limón, 22 de abril de 199, Costa Rica, Centroamérica*. San José, Costa Rica: ICE. Manuscrito inédito.

- 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., McNally, K. (1991). *Informe preliminar: Terremoto 22 de abril 1991, Ms: 7,4, Valle de La Estrella, Limón Costa Rica*. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional. Manuscrito inédito.
- Montero, W. (2001). Neotectónica de la región central de Costa Rica: Frontera oeste de la microplaca de Panamá. *Revista Geológica de América Central*, 24: 29-56. doi: 10.15517/rgac.v0i24.8551
- 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, Volumen Especial del Terremoto de Limón*, 139-152. doi: 10.15517/RGAC.V0I0.13447
- Morales, L. D. (1994). Daños causados por el terremoto de Limón: Pérdidas y medidas de mitigación. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial del Terremoto de Limón*, 201-210. doi: 10.15517/RGAC.V0I0.13455
- Rothé, J. P. (1969). *La séismicité du globe 1953-1965*. Unesco. Recuperado de <https://catalogue.nla.gov.au/Record/1800368>
- Proyecto Global Centroide Momento Tensor (GCMT). (2020). *Catálogo en línea*. Recuperado de <https://www.globalcmt.org/>
- Protti, M. y Schwartz, S. Y. (1994). Mechanics of back arc deformation in Costa Rica: Evidence from an aftershock study of the April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica, earthquake (Mw =7.7). *Tectonics*, 13(5), 1093– 1107. doi: 10.1029/94TC01319
- M. Protti., K. McNally., Pacheco, J., González, V., Montero, C., Segura, J., Brenes, J., Barboza, V., Malavassi, E., Güendel, F., Similia, G., Rojas, D., Velasco, A., Mata, A., Schillinger, W. (1995). The March 25, 1990 (Mw=7.0, MI=6.8), earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: its prior activity, foreshocks, aftershocks, and triggered seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 100, 20345-20358. doi: 10.1029/94JB03099
- Protti, M., González, V., Newman, A., Dixon, T., Schwartz, S., Marshall, J., Feng, L., Walter, J., Malservisi, R. y Owen, S. (2014). Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nature Geoscience*, 7, 117–121. doi: 10.1038/ngeo2038
- Quesada-Román, A. (2016). Impactos geomorfológicos del Terremoto de Limón (1991; ms=7.5) y consideraciones para la prevención de riesgos asociados en Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 56, 93-111. doi: 10.15359/rgac.1-56.4
- Quintero, R. y Kissling, E. (2001). An improved P-wave velocity reference model for Costa Rica. *Geofísica Internacional*, (40)1, 3-19.
- Quintero, R., Zahradník, J. y Sokos, E. (2014). Near regional CMT and multiple-point source solution of the September 5, 2012, Nicoya, Costa Rica Mw 7.6 (GCMT) earthquake. *Journal of South American Earth Sciences*, 55, 155–165. doi: 10.1016/j.jsames.2014.07.009
- Sauter, F. (1994). Evaluación de daños en puentes y otras estructuras civiles causados por el terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central, Volumen Especial del Terremoto de Limón*, 171-186. doi: 10.15517/RGAC.V0I0.13449
- Segura, J. D., Quintero, R., Burgoa, R. B. y Jiménez, U. W. (2014). Análisis de la actividad sísmica en Costa Rica durante el 2010 y resumen de los eventos sísmicos más importantes presentados en Costa Rica de 1983-2012. *Revista Geográfica de América Central*, 1(52), 71-102.

- Sokos, E. y Zahradník, J. (2008). ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Computers and Geosciences*, 34, 967-977. doi: 10.1016/j.cageo.2007.07.005
- Sokos, E. y Zahradník, J. (2013). Evaluating centroid_moment tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters*, 84, 656-665. doi: 10.1016/j.cageo.2007.07.005
- Soulas, J. P. (1989). Tectónica activa, Proyecto hidroeléctrico Siquirres. Informe de misión. San José, Costa Rica: ICE. Manuscrito inédito.
- Soulas, J. P. (1991). El sismo de Limón-Changuinola (Costa Rica y Panamá) del 22 de abril de 1991. Informe preliminar de Misión. Manuscrito inédito. Recuperado de <https://www.cne.go.cr/CEDO-CRID/pdf/spa/doc656/doc656-contenido.pdf>
- Snoke, J., Munsey, J., Teague, A. y Bollinger, G. (1984). A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data: *Earthquake notes*, 55.
- US Geological Service (USGS). (2020). *Latest Earthquake in the world*. Recuperado de <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/recenteqsww/>