

# EN TORNO A LA PREVENCIÓN



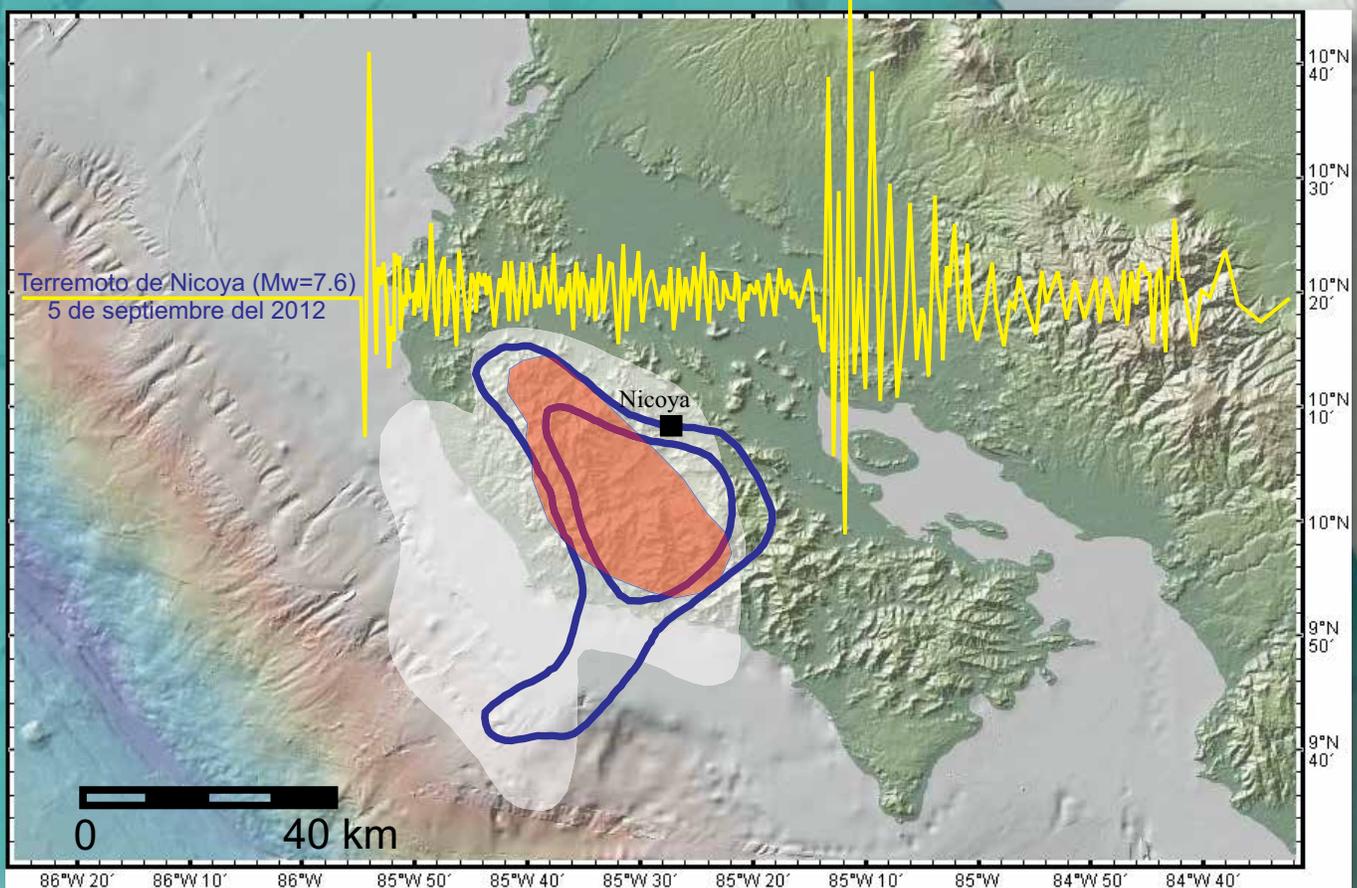
Revista No. 12, Jun. 2014

ISSN: 1659-3057

ISSN: 2215-3845

## NÚMERO ESPECIAL TERREMOTO DE NICOYA

5 de setiembre de 2012



San José, Costa Rica

### 3. ENJAMBRES SÍSMICOS EN LA PLACA CARIBE Y LA MICROPLACA DE PANAMÁ DISPARADOS POR EL TERREMOTO DE NICOYA (7,6 MW) DEL 5 DE SEPTIEMBRE DEL 2012.

PhD. Lepolt Linkimer Abarca<sup>1</sup>

Universidad de Costa Rica

PhD. Ivonne G. Arroyo Hidalgo<sup>2</sup>

Universidad Kiel, Alemania

M.Sc Walter Montero Pohly<sup>3</sup>

Universidad de Costa Rica

#### Resumen

La sismicidad disparada remotamente que ocurre a distancias superiores a 1-2 veces la longitud de la falla, parece ser un fenómeno frecuente que se ha presentado en Costa Rica luego de sismos de magnitud mayor a 7,0 Mw originados en las zonas inter-placas en los años 1941, 1950, 1983, 1990 y 1991. El 5 de septiembre del 2012, un sismo inter-placa de magnitud 7,6 Mw ocurrió en la zona sismogénica de la península de Nicoya, el cual disparó sismicidad en el interior de Costa Rica. En este estudio, analizamos los enjambres de sismos más importantes ocurridos durante los primeros seis meses después del terremoto de Nicoya y que ocurrieron a distancias de entre 150 a 350 km de la zona epicentral en el interior de la placa Caribe y la microplaca de Panamá. Estos enjambres se presentaron en tres regiones y escenarios tectónicos: la isla Calero en la región fronteriza entre Costa Rica y Nicaragua en la zona trasarco del Caribe, en la región al sur de Cartago cerca del arco volcánico y en el flanco sur de la Cordillera de Talamanca, en una porción inactiva del arco magmático. El enjambre en Calero consistió de 70 sismos de magnitudes de entre 2,0 y 4,2 Mw que ocurrieron entre el 22 de septiembre y el 9 de octubre del 2012. El patrón de la sismicidad sugiere la presencia de una falla local ubicada en la proyección en tierra del Escarpe de Hess. El enjambre al sur de Cartago consistió de 284 sismos de magnitudes de entre 1,8 y 4,1 Mw ocurridos entre el 5 de Septiembre y el 31 de Octubre del 2012. Las soluciones de los mecanismos focales sugieren un fallamiento

predominante de desplazamiento de rumbo en esta zona. El enjambre en la zona de San Vito de Coto Brus consistió de 30 sismos de magnitudes de entre 2,3 y 4,5 Mw que ocurrieron entre el 14 de octubre del 2012 y el 28 de enero del 2013. Estos sismos ocurrieron en la vecindad de fallas con rumbo norte-sur, que están localizadas en la proyección en tierra de la Zona de Fractura de Panamá. Documentar la sismicidad disparada remotamente puede proveer claves para el entendimiento de la física del ciclo sísmico y puede mejorar considerablemente la estimación de la amenaza sísmica al iluminar estructuras activas en el interior de Costa Rica y al señalar donde podrían ocurrir los sismos inducidos por un terremoto.

**Palabras clave:** Terremotos, Terremoto de Nicoya Enjambre sísmico, Sismicidad inducida, Costa Rica, Placa Caribe.

#### Abstract

Remotely triggered seismicity that takes place at distances greater than 1–2 fault lengths appears to be a frequent phenomenon after large earthquakes, including examples in Costa Rica after the large (Mw > 7.0) inter-plate earthquakes in 1941, 1950, 1983, 1990, and 1991. On September 5, 2012, an inter-plate 7.6-Mw earthquake struck the Nicoya Peninsula, triggering upper-plate seismicity in the interior of Costa Rica. In this study, we analyze the largest earthquake swarms that took place during the first six months after the Nicoya earthquake. These swarms occurred at distances of 150 to 350 km from the Nicoya source region in three different tectonic settings: the Calero Island near the Costa Rica-Nicaragua border in the backarc Caribbean region, the Cartago area in the central part of Costa Rica near the active volcanic

<sup>1</sup>Pertenece a la Escuela Centroamericana de Geología y Red Sismológica Nacional. Correo electrónico: lepolt.linkimer@ucr.ac.cr

<sup>2</sup>Pertenece a IFM-GEOMAR. Correo electrónico: iarroyo@ifm-geomar.de

<sup>3</sup>Pertenece al Centro de Investigaciones en Ciencias Geológicas. Correo electrónico: wmontero@ice.co.cr

arc, and the San Vito area in the Costa Rica- Panama border region, at the southern flank of the Talamanca Cordillera, an inactive portion of the magmatic arc. The Calero swarm with 70 2.0-to-4.2 Mw earthquakes took place from September 22 to October 9, 2012. The earthquake pattern suggests a smaller-scale fault as a possible source which is located along the inland projection of the Hess Escarpment. The Cartago swarm with 284 1.8-to-4.1 Mw earthquakes occurred from September 5 to October 31, 2012. The focal mechanism solutions suggest that strike-slip faulting predominates in this region, consistent with neotectonic observations. The San Vito earthquake swarm with 30 2.3-to-4.5 Mw earthquakes occurred between October 14, 2012 and January 28, 2013. These earthquakes occurred in the vicinity of north-south striking faults, which are located along the inland projection of the Panama Fracture Zone. Documenting remotely triggered earthquakes may provide us with insight into the physics of the earthquake cycle, and may greatly improve seismic hazards assessment by illuminating active structures within the interior of Costa Rica and by pointing to where the next earthquake might be located.

**Keywords:** Earthquakes, Nicoya Earthquake, Earthquake swarm, Triggered seismicity, Costa Rica, Caribbean Plate.

## 1. Introducción y marco tectónico

Los sismos disparados remotamente son eventos que suceden luego de terremotos de magnitudes grandes ( $M_w > 7,0$ ) pero ocurren fuera del área de réplicas, a distancias superiores a 1-2 veces la longitud de la falla. Estos sismos fueron identificados por primera vez luego del terremoto de Landers ( $M_w 7,3$ ), en California en 1992 (Hill, Reasenber, Michael, et al., 1993 y Hough, 2005). En aquella ocasión, minutos después del terremoto se observó un incremento significativo en localidades diversas y situadas a grandes distancias del epicentro del terremoto. Algunas de estas localidades incluyen Long Valley (a 415 km de distancia), el estado de Nevada (entre 450 y 650 km) y Yellowstone (a 1250 km). Este incremento en la sismicidad fue notado al graficar el número acumulativo de sismos con respecto al tiempo, de forma que al momento del terremoto, se notó un cambio drástico en la pendiente de esta gráfico.

La sismicidad disparada a distancias fuera del área de ruptura es usualmente explicada por los cambios que se generan en el estado de estrés estático de Coulomb y por el paso de las ondas sísmicas que se presume induce algún

mecanismo secundario que dispara la sismicidad (Freed, 2005 y Hough 2005). Muchos aspectos aún siguen siendo enigmáticos especialmente los que explican cuándo y dónde ocurre el siguiente sismo. Este tema tiene mucha relevancia en la estimación de la amenaza sísmica. A nivel global muchas investigaciones han apuntado este disparo de sismos en zonas fuera del área de réplicas, luego de terremotos en California (Hough, 2005), el oeste, centro y este de los Estados Unidos (Prejean, Hill, Brodsky, et al., 2004 y Hough, 2007), China (Peng, Wang, Chen, y Jiang, 2010 y Lei, Xie y Fu, 2011) y Taiwán (Wen, Beresnev y Cheng, 1996), entre otras regiones. Cuando un sismo dispara una serie de sismos, se le refiere como una “tormenta de sismos”, lo cual es similar a las réplicas, con la excepción de que estos sismos pueden ocurrir a grandes distancias y separados incluso por años del sismo disparador.

Costa Rica está caracterizada por una sismicidad alta. El país se localiza cerca del punto triple entre las placas del Coco, Caribe y Nazca. La sismicidad es especialmente abundante a lo largo de la Foca Mesoamericana y la zona sismogénica donde se subduce la placa del Coco debajo de la placa Caribe. Además, la sismicidad es alta a lo largo de la Zona de Fractura de Panamá, la cual sirve de límite entre las placas del Coco y Nazca. Adicionalmente, ocurren muchos sismos en el Cinturón Deformado del Norte de Panamá y el Cinturón Deformado del Centro de Costa Rica, las cuales son zonas de deformación con una alta densidad de fallas activas que se han postulado ser los límites entre la placa Caribe y la microplaca de Panamá (Figura 1). Desde 1821 en que Costa Rica adquiere su independencia de España, el país ha sufrido 67 terremotos, de los cuales 14 han tenido magnitudes mayores a 7,0 Mw. Al ser una región con tantas fuentes sísmicas y con sismos grandes cada década, Costa Rica es un lugar adecuado para el estudio de la sismicidad inducida.

El 5 de septiembre del 2012, un terremoto de magnitud 7,6 Mw ocurrió en la zona sismogénica de la península de Nicoya (Linkimer, Arroyo, Mora, et al., 2013 y Protti, González, Newman, et al., 2014). Inmediatamente después del terremoto, se registró un incremento notorio de la sismicidad en el interior de Costa Rica en regiones situadas fuera de la zona de ruptura del terremoto. En este artículo, se describe la sismicidad de la placa Caribe y la microplaca de Panamá en el interior de Costa Rica durante los seis meses después del terremoto de Nicoya y postulamos que estos sismos fueron disparados por este terremoto. El objetivo del estudio es describir los enjambres de sismos más importantes disparados por

el terremoto, con énfasis en los sismos ocurridos en: la Isla Calero en la frontera con Nicaragua; al sur de Cartago en la parte central del país y en San Vito de Coto Brus en la zona fronteriza con Panamá. También, se pretende señalar las fallas que mostraron actividad sísmica posterior al terremoto. Documentar la sismicidad inducida es importante ya que puede proveer claves sobre la física del ciclo sísmico y sobre la ubicación del siguiente sismo fuerte. Además, puede mejorar la estimación de la amenaza sísmica al iluminar las fuentes sísmicas activas dentro de Costa Rica.

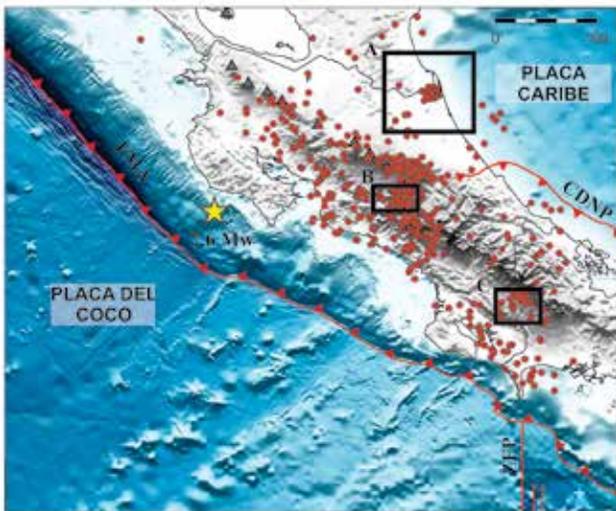


Figura 1. Contexto Tectónico regional y ubicación epicentral del terremoto de Nicoya (estrella amarilla) y sismos ocurridos en la placa Caribe y micropalca de Panamá durante los seis meses siguientes al terremoto de Nicoya (círculos rojos). Los rectángulos negros con letras A, B y C muestran las áreas seleccionadas en la cual se realizó relocalización de sismos y son mostradas en detalle en las Figuras 4, 5 y 6, respectivamente. FMA: Fosa Mesoamericana, CDNP: Cinturón Deformado del Norte de Panamá, ZFP: Zona de Fractura de Panamá

## 2. Metodología

Los sismos analizados en este estudio fueron registrados por la Red Sísmológica Nacional (RSN: UCR-ICE). La RSN fue creada mediante un convenio entre la Sección de Sísmología, Vulcanología y Exploración Geofísica de la Escuela Centroamericana de Geología de la Universidad de Costa Rica (UCR) que funciona desde 1973 y el Área de Amenazas y Auscultación Sísmica y Volcánica del

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) que además incluye al Observatorio Sísmológico y Vulcanológico del Arenal y Miravalles (OSIVAM). El centro de registro conjunto de la RSN opera desde 1982 y se localiza en las instalaciones en la Escuela Centroamericana de Geología de la UCR.

La red sísmica de la RSN está constituida por 60 estaciones ubicadas en diferentes partes del territorio costarricense (Figura 2). La mayoría de estaciones son sismómetros de banda ancha de tres componentes, pero además existe algunas estaciones con sismómetros de periodos corto. Las estaciones llegan al centro a través de diferentes rutas vía línea telefónica, internet y radio. El tiempo de las señales proviene de receptores de GPS en cada estación y en el centro de registro. Desde agosto del 2011 se implementaron los sistemas Seiscomp y Earthworm que constituyen el sistema automático de detección de sismos locales, regionales y globales.



Figura 2. Estaciones de la Red Sísmológica Nacional al momento del terremoto de Nicoya.<sup>4</sup>

Luego del terremoto de Nicoya la RSN realizó un informe detallado sobre las causas y consecuencias del sismo (Linkimer y Soto, 2012). Durante la realización de este informe, se le dio un seguimiento minucioso a la sismicidad post terremoto y de allí se detectó que varias

<sup>4</sup> Los triángulos azules son estaciones internacionales que también fueron usadas en la localización de los sismos y corresponden con sitios administrados por las redes de OVSICORI-UNA, la Universidad de Panamá y el Observatorio Sísmológico del Occidente de Panamá (OSOP).

zonas del interior de Costa Rica estaban presentando un aumento en la sismicidad. Se escogieron las tres zonas del país donde se había presentado el mayor número de sismos, de mayor magnitud y que habían sido reportados como sentidos por la población. Estas tres regiones están ubicadas en la zona de la isla Calero en la frontera con Nicaragua, al sur de Cartago en la parte central del país y en la zona de San Vito de Coto Brus en la zona fronteriza con Panamá. Las tres regiones se encuentran además en tres contextos tectónicos diferentes: el trasarco, cerca del arco volcánico activo y cerca del arco magmático inactivo de Talamanca, respectivamente.

Se realizó una búsqueda de sismos en el catálogo de localizaciones de rutina de la RSN para el periodo de seis meses después del terremoto de Nicoya, en estas tres regiones con coordenadas: 10.4-11.1 N y 84.1-83.3 W para la región de Calero; 9.70-9.92 N y 84.2-83.8 W para la región de Cartago y parte central de Costa Rica y 8.70-9.00 N y 83.1-82.7 W para la región de San Vito de Coto Brus. Para los sismos seleccionados la lectura de fases sísmicas y su localización fue realizada con los programas MULPLT y HYP (Lienert y Havskov, 1995) que están incluidos en el paquete SEISAN (Havskov y Ottemöller, 1999 y Ottemöller, Voss, y Havskov, 2011). La lectura de arribos se realizó aplicando un sistema de calidad por pesos de 0 a 4, en el que 0 corresponde a la menor incertidumbre. Se estimó además la magnitud momento ( $M_w$ ) para cada sismo. Posteriormente, los sismos que ocurrieron durante los seis meses después del terremoto de Nicoya, fueron además relocalizados usando dos métodos más: NonLinLoc, el cuál provee una solución probabilística expresada como una función de densidad a posteriori (PDF) y HypoDD, que genera localizaciones de alta precisión para los sismos que se encuentran muy cercanos unos de otros. De los sismos localizados se seleccionaron las mejores localizaciones para realizar interpretaciones con relación al fallamiento y para esto se tomaron en cuenta criterios como el número de observaciones, la presencia de una estación cercana a la fuente y la relación espacial de las estaciones alrededor del epicentro. Para la determinación de mecanismos focales se utilizó el programa FOCMEC (Snoke, Munsey, Teague, Bollinger, 1984) incluido en la versión 8,3 del paquete SEISAN (Havskov y Ottemöller, 1999). En estos cálculos se utilizan las polaridades de la onda P y los ángulos de llegada de las ondas (take-off angles) calculadas a partir de un modelo de velocidades.

### 3. Sismicidad inducida en Costa Rica

El número de sismos superficiales (profundidad  $< 30$  km) que fue analizado para los seis meses posteriores al terremoto de Nicoya, fue de 70, 289 y 30 para las regiones de Calero, Cartago y San Vito, respectivamente. Adicionalmente, se realizó una búsqueda de los sismos ocurridos en estas tres regiones para los seis meses previos al terremoto y el número de sismos encontrado fue significativamente menor, de 6, 23 y 15, respectivamente. El total de sismos re-localizados en las tres regiones en conjunto para los seis meses posteriores y previos al terremoto, fue de 389 anterior y 44 posterior, respectivamente.

Parte de la motivación de este estudio radica en que históricamente se han presentado en Costa Rica sismos superficiales de magnitudes intermedias (de entre 5,0 y 6,5) en la placa Caribe y microplaca de Panamá que han sido muy destructivos. Muchos de estos sismos han ocurrido con tiempos de 5 horas y hasta 5 años luego de sismos de magnitud mayor a 7,0  $M_w$  en la zona interplaca.

Es difícil de determinar si un sismo fue en efecto disparado por otro y cuál es la ventana de tiempo en que se produce este disparo. Es importante también mencionar, que han ocurrido sismos muy destructivos en forma aislada, es decir, muy separados en el tiempo de ocurrencia con respecto a los sismos de gran magnitud. Sin embargo, en otros casos, el corto tiempo entre la ocurrencia de sismos de magnitud alta en la zona interplaca y sismos superficiales en la placa cabalgante de magnitud intermedia sugiere una conexión. Podemos citar por ejemplo casos de sismos superficiales y distantes del evento “disparador” para los últimos grandes terremotos en Costa Rica. Uno de los casos más significativos fue el del terremoto del 5 de diciembre de 1941 en la península de Osa, de magnitud 7,0  $M_w$ . Cinco horas después de su ocurrencia, un terremoto superficial de magnitud 6,3  $M_w$  produce daños importantes en la ciudad de Bagaces en Guanacaste a 310 km del epicentro del sismo en Osa.

Luego del terremoto de Nicoya del 10 de octubre de 1950, ocurrieron cuatro terremotos superficiales destructivos en los siguientes cinco años. Estos fueron los terremotos de Paraíso de 1951 (magnitud 5,9  $M_w$  a 160 km de distancia del sismo de Nicoya), Patillos cerca del volcán Irazú (magnitud 6,1  $M_w$  a 160 km), Limón en 1953 (magnitud 6,1  $M_w$  a 240 km) y Bajos del Toro (magnitud 5,9  $M_w$  a 110 km). En el caso del terremoto de Golfito del 3 de abril de 1983, de magnitud 7,2  $M_w$ , ocurrió un terremoto

superficial tres meses después, el 3 de Julio de 1983, de magnitud 6,3 Mw y localizado a 100 km de distancia del epicentro, en la zona de Pérez Zeledón. (Boschini et al., Montero y Alvarado, 1995 ; Montero, 2001).

Durante los años de 1990 a 1993, ocurrió una crisis sísmica importante en el centro de Costa Rica. Esta “tormenta de sismos” inicia con el terremoto de Cóbano del 25 de marzo de 1990, de magnitud 7,0. Meses después ocurren una serie de sismos superficiales importantes que incluyen los sismos del 30 de Junio de 1990 en Puriscal (magnitud 5,4 a 80 km de distancia), el 22 diciembre de 1990 en Alajuela (magnitud 6,0 a 80 km) y el 16 de febrero de 1991 en Santa Bárbara de Heredia (magnitud 4,9 a 100 km de distancia). Luego, el 22 de abril de 1991, ocurre el terremoto de Limón de magnitud 7,7 y de nuevo otra seguidilla de sismos superficiales destructivos, siendo los más importantes los ocurridos el 24 de abril de 1991 cerca de Turrialba (magnitud 6,2), el 9 de agosto de 1991 en Frailes de Desamparados (magnitud 5,1) y el 10 de Julio de 1993 en Pejibaye de Jiménez (magnitud 5,8).

Esta crisis sísmica de 1990 a 1993 dejó un saldo de 51 víctimas mortales y unas 7,000 casas destruidas en Costa Rica. (Morales, 1984).

Durante los seis meses posteriores al evento de Nicoya no se presentaron sismos de magnitudes mayores a 4,5 en la placa superior y solamente se han presentado enjambres de sismos de magnitudes bajas. Sin embargo, una comparación de los sismos registrados durante los seis meses anteriores y los seis meses posteriores al terremoto de Nicoya muestra que la sismicidad registrada en la placa superior por la RSN se duplicó y pasó de 380 sismos superficiales a 638. Un gráfico del número acumulativo de sismos a través del tiempo muestra claramente el impacto del terremoto de Nicoya al inducir sismicidad (Figura 3). El número acumulativo de sismos, es simplemente la suma diaria del número de sismos ocurridos durante un periodo de tiempo. Para hacer este cálculo, se seleccionaron únicamente los sismos superficiales (< 30 km) en Costa Rica, excluyendo la zona sismogénica, las zonas de la costa Pacífica y las penínsulas de Osa y Nicoya, esto por la dificultad de determinar en esas zonas si un sismo superficial es causado por una falla local o por los procesos superficiales de la subducción de placas. En la figura 3 se puede ver claramente como la pendiente del número acumulativo de sismos cambia drásticamente el día del terremoto. Tres zonas en particular presentaron sismos que llamaron la atención por haber sido percibidos por la población, estas son las zonas de Cartago, Calero y

San Vito, que se describen a continuación.

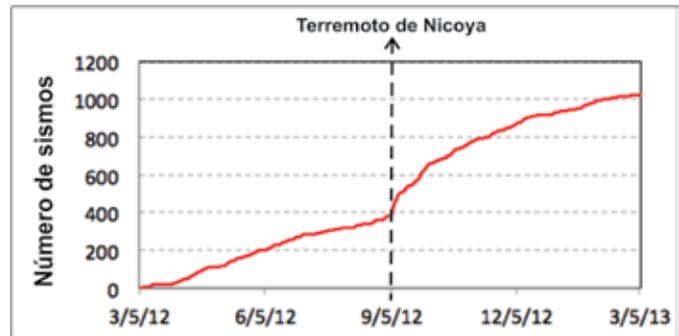


Figura 3. Número acumulativo de sismos en la placa cabalgante (Caribe y Panamá) durante los seis meses previos y seis meses posteriores al terremoto de Nicoya del 5 de septiembre del 2012.

#### 4.Zona de la Isla Calero

A partir del 22 de setiembre y hasta el 9 de octubre del 2012, la RSN registró 70 sismos en la zona de la isla Calero, en el extremo noreste del territorio nacional de Costa Rica (Figura 4). El enjambre de sismos inició con cuatro sismos el día 22 de setiembre. Desde ese día y hasta el 3 de octubre ocurrieron por lo menos dos eventos por día. La mayor actividad se registró el 26 y 30 de setiembre, cuando ocurrieron 13 sismos cada día.

La secuencia de sismos se caracterizó por magnitudes bajas de entre Mw 2,5 y 4,2, pero la mayoría de los sismos (45) localizados tuvieron magnitudes de entre 3,1 y 3,5 Mw. Los dos sismos de mayor tamaño en esta zona tuvieron magnitudes Mw de 4,2 y 4,1 y ocurrieron los días 25 y 30 de setiembre, respectivamente. Todos los sismos tuvieron profundidades menores a 20 km, especialmente entre 10 y 20 km (61 eventos).

La estación sismológica ubicada en la región de Tortuguero, ha permitido una buena cobertura de esta sismicidad en conjunto con el resto de estaciones con que cuenta la RSN en todo el país. La base de datos sismológicos de la RSN no contiene eventos sísmicos registrados en la zona del río Colorado y la isla Calero, desde sus inicios en 1976. Por esta razón estos sismos son relevantes desde el punto de vista científico, ya que es la primera vez que se registran sismos en esa zona.

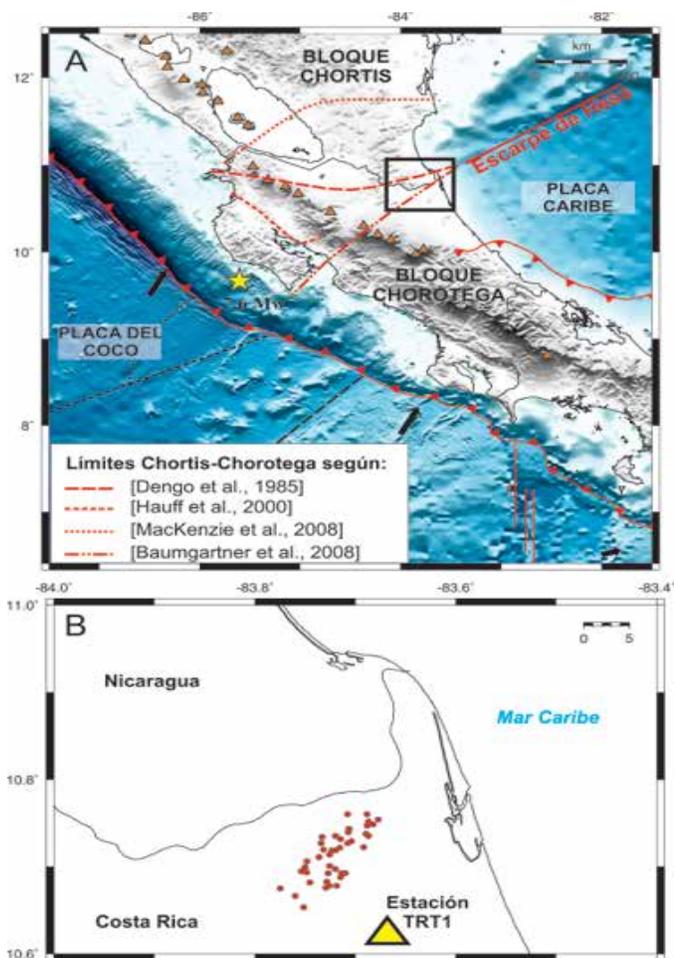


Figura 4. A) Mapa de ubicación regional del Escarpe de Hess y B) Mapa de ubicación de los sismos en la zona de isla Calero. Se muestran además los mecanismos focales de tres sismos.

La región de la isla Calero es una de las más remotas de Costa Rica, por lo que la población expuesta a estos temblores es sumamente baja y por esto los eventos sísmicos fueron reportados como sentidos en muy pocas localidades. La mayoría de los reportes provinieron del puesto policial Delta Costa Rica y desde la boca del río Sarapiquí. Los eventos de mayor magnitud que ocurrieron los días 25 y 30 de setiembre fueron también reportados sentidos muy levemente en otras localidades más distantes como Ciudad Quesada, Puerto Viejo de Sarapiquí y Turrialba.

Históricamente, existen referencias sobre terremotos en la zona limítrofe entre Costa Rica y Nicaragua en los años 1648, 1651 y 1663. De acuerdo con Peraldo y Montero (1994), estos terremotos levantaron los caudales del río San Juan, haciendo imposible que embarcaciones de cierto tamaño pudiesen recorrer sectores del río. No se conoce con certeza cuál fue la fuente sísmica de estos terremotos.

La estructura tectónica más importante que se localiza en la vecindad de la isla Calero hacia el Mar Caribe, es el Escarpe de Hess, el cual es una estructura en el piso oceánico de la placa Caribe de rumbo noreste, poco analizada en la literatura, que tradicionalmente se ha usado para representar el límite entre bloques geológicos de diversos orígenes denominados Chortis y Chorotega (Bowland, 1993; Mann, Rogers y Gahagan, 2007). El grupo de epicentros localizados en este estudio muestra un fuerte alineamiento de rumbo noreste. Este alineamiento de epicentros, también se encuentra alineado con la proyección en tierra del Escarpe de Hess, de rumbo noreste, no obstante esta estructura no es clara en el interior de istmo centroamericano y hay varias propuestas sobre su posible localización dentro del territorio (Figura 4), por ejemplo, las presentadas por Dengo (1985), Hauff, et al. (2000), MacKenzie, et al. (2008) y Baumgartner, et al. (2008).

Otras estructuras reconocidas en la zona son las fallas lístricas en la desembocadura del río San Juan (Barboza, Fernández, Barrientos y Bottazzi, 1997) que tienen un rumbo distinto al del escarpe de Hess. En este estudio, nos inclinamos a relacionar la sismicidad ocurrida con una falla local que podría estar asociada con el Escarpe de Hess. A pesar de ocurrir en una zona remota y con poca población expuesta, este enjambre de temblores en la isla Calero nos recuerda que en Costa Rica pueden ocurrir temblores en prácticamente todos los rincones de su territorio.

## 5. Zona sur de Cartago

En este apartado discutimos la sismicidad de la parte central de Costa Rica, con énfasis en la zona sur de Cartago. Durante el período de tiempo analizado ocurrieron 284 sismos que se concentraron principalmente en la zona de los volcanes Irazú y Turrialba y en la vecindad de las fallas Navarro y Aguacaliente al sur de Cartago. Llama la atención que las fallas ubicadas en la zona de Turrialba, como las fallas Atirro, Tucurrique, Turrialba y Azul no parecen tener actividad sísmica durante este período. La sismicidad en la zona al sur de Cartago se concentró principalmente entre el mismo día del terremoto de Nicoya, el 5 de setiembre y hasta el 31 de octubre del 2012. Los sismos tuvieron magnitudes de entre 1,8 y 4,1 Mw, siendo la mayoría de magnitudes de entre 3,0 y 3,6 Mw (48 eventos). Las profundidades fueron siempre menores a 20 km, siendo la mayoría de profundidad menor a 10 km (78 eventos).

La sismicidad de mejor calidad fue usada en conjunto con la ubicación de las fallas activas para determinar el grado de actividad de dichas fallas luego del terremoto de Nicoya (Figura 5). La sismicidad analizada ocurrió al oeste de las fallas Velo Horizonte al sur de San José, al oeste de la falla Río Azul, en una zona entre las fallas Tarrazú y Navarro, al sureste de una falla inferida de rumbo noroeste entre las fallas Navarro y Aguacaliente, a lo largo de las fallas Queverí, Río Macho y Ochomogo, en las cercanías de la falla Navarro y muy cerca de la falla Aguacaliente.

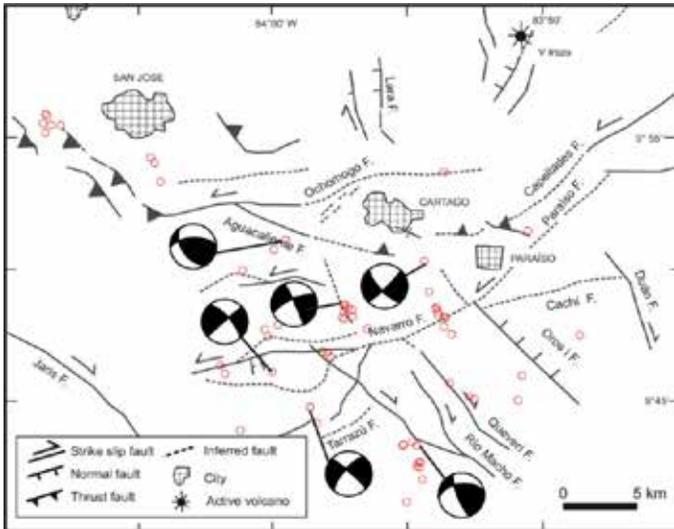


Figura 5. Mapa de fallas activas en la zona central de Costa Rica y localización de los sismos de mejor calidad (círculos rojo) ocurridos durante los seis meses posteriores al terremoto de Nicoya. Se muestran además los mecanismos focales de seis sismos.

Realizamos los mecanismos focales de los sismos de mayor tamaño y encontramos que estos son consistentes con las observaciones neotectónicas de la zona y sugieren un fallamiento predominantemente de desplazamiento de rumbo sinistral en el plano nodal noreste y dextral en el plano nodal noroeste (Figura 5). Uno de los eventos de mayor tamaño ocurrió el 18 de noviembre del 2012 (3,8 Mw) y fue localizado muy cerca de la traza de la falla Aguacaliente al sur de la ciudad de Cartago (Figura 5). Este sismo fue reportado como sentido en Cartago, Tres Ríos, Curridabat, Moravia, Santa Ana, Heredia, Orosí, Paraiso y Turrialba. Las soluciones del mecanismo focal describen una falla de desplazamiento de rumbo sinistral puro en el plano nodal noreste, similar al de la falla Aguacaliente en esa zona.

## 6. Zona de San Vito de Coto Brus

En la zona de San Vito de Coto Brus, cerca de la región fronteriza con Panamá, se localizaron 30 sismos de buena calidad ocurridos entre el 14 de octubre del 2012 y el 28 de enero del 2013. Estos sismos tuvieron magnitudes de entre 2,3 y 4,5 Mw y ocurrieron a profundidades de entre 15 y 25 km. La región donde ocurre esta sismicidad, tiene una alta densidad de fallas (Arroyo, 2001). Los epicentros en esta zona son dispersos y se encuentran ubicados curiosamente en la zona con la menor expresión de fallas activas.

La distribución de los sismos sugiere actividad en las fallas Lourdes, San Bosco, San Vito, Alturas, Flor de Roble y Lucha (Figura 6). Esta región fue igualmente la que desplegó la sismicidad ocurrida durante la red de Boruca estudiada por Arroyo (2001).

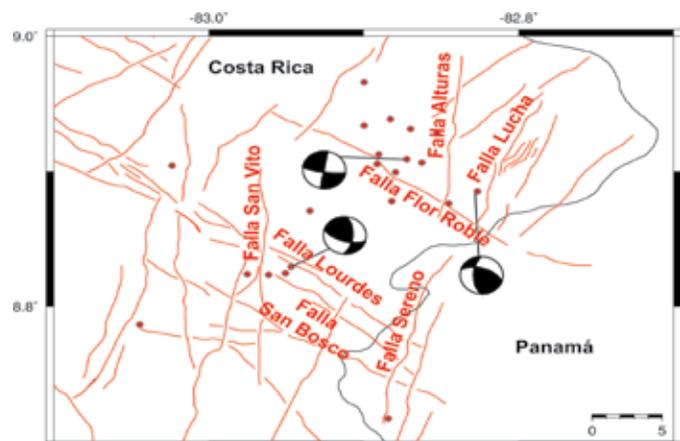


Figura 6. Mapa de fallas activas en la zona de San Vito de Coto Brus y localización de los sismos ocurridos durante los seis meses posteriores al terremoto de Nicoya. Se muestran además los mecanismos focales de tres sismos.

Las fallas más importantes de la zona tienen un rumbo norte-sur y noroeste-sureste, siendo las primeras las más prominentes desde el punto de vista geomorfológico. Estas fallas forman una faja de fallas de desplazamiento de rumbo dextral que coinciden con la prolongación en tierra de la Zona de Fractura de Panamá, la cual sirve de límite entre las placas del Coco y Nazca. Los mecanismos focales calculados para esta zona sugieren un fallamiento consistente en con el observado en la neotectónica (Figura 6).

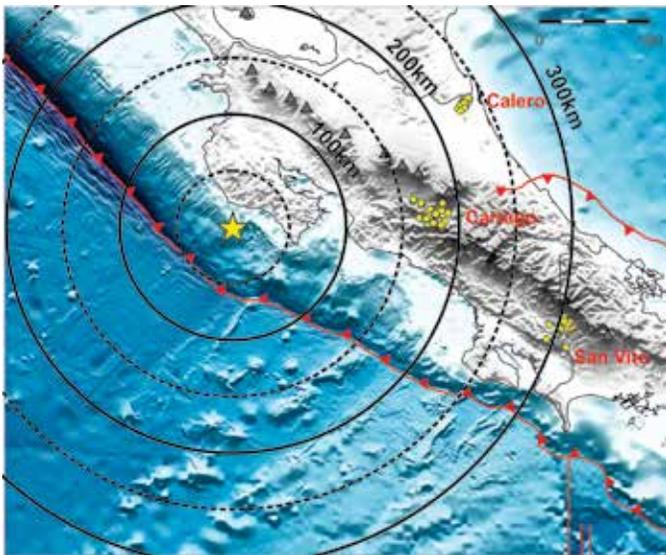


Figura 7. Resumen de los sismos relocalizados con alta calidad (círculos amarillos) y su distancia con respecto al epicentro del terremoto de Nicoya (estrella amarilla) en las tres zonas analizadas de Calero, Cartago y San Vito.

## 7. Conclusiones

Durante los seis meses posteriores al terremoto de Nicoya del 5 de septiembre del 2012, ocurrieron enjambres de sismos a distancias de entre 150 y 350 km de la fuente (Figura 7). Estos enjambres ocurrieron en tres sectores diferentes del país, en distintos contextos tectónicos: en la zona de la isla Calero, entre el 22 de septiembre y 9 de octubre del 2012, en la zona central de Costa Rica, especialmente al sur de la ciudad de Cartago, entre el 5 de septiembre y el 31 de octubre del 2012 y en la zona de San Vito de Coto Brus, entre el 14 de octubre del 2012 y el 28 de enero del 2013. Todos estos sismos tuvieron magnitudes bajas ( $< 4,5$  Mw) y fueron superficiales ( $< 25$  km). De estos sismos se observó que los sismos en la zona de Cartago fueron los más superficiales, con profundidades en su mayoría menores a 10 km, luego seguido por los sismos de la zona de Calero, con profundidades de entre 10 y 20 km y los más profundos los ocurridos en la zona de San Vito, en donde las profundidades fueron principalmente entre 15 y 25 km.

Luego del terremoto de Nicoya, la cantidad de sismos registrados por la RSN a nivel de la placa Caribe y la microplaca de Panamá se incrementó considerablemente. Durante los seis meses posteriores al sismo de Nicoya, la cantidad de sismos fue más del doble que la registrada en la misma ventana de tiempo previo al terremoto. Esta observación significa que el terremoto de Nicoya disparó

sismicidad en la placa Caribe y microplaca de Panamá.

Las localizaciones de los sismos analizados sugieren que la placa Cabalgante (Caribe y Panamá) no se encuentra críticamente sometida al mismo esfuerzo en todas partes, sino solo en determinados espacios, es decir, las zonas en donde se generaron los enjambres de sismos deben de haber estado en un estado cerca de fallar, de forma que el sismo de Nicoya ha provocado un disturbio ya sea por el cambio en el estado de esfuerzo estático o debido al cambio dinámico producido por el paso de las ondas sísmicas. El hecho de que el mapa de sismos de Costa Rica luego del terremoto de Nicoya se iluminara significativamente durante los seis meses posteriores al terremoto, refuerza la hipótesis de la existencia de la sismicidad inducida en Costa Rica e ilustra que un terremoto de magnitud 7,6 Mw puede impactar todas las regiones del país, pues como ocurrió en este caso, disparó sismos desde el extremo noreste en isla Calero, hasta la zona limítrofe con Panamá en San Vito de Coto Brus.

Adicionalmente, el terremoto de Nicoya resaltó estructuras activas en el interior de Costa Rica. Los sismos re-localizados en este estudio, sugieren actividad en las cercanías de las fallas: Belo Horizonte, Rio Azul, Aguacaliente, Ochomogo, Tarrazú, Navarro, Queverí y Rio Macho en la parte central de Costa Rica y en las fallas Lourdes, San Bosco, San Vito, Alturas, Flor de Roble y Lucha en la región de San Vito de Coto Brus. Los mecanismos focales calculados son consistentes con la neotectónica en estas regiones. En el caso de los sismos de la isla Calero, se documentan sismos por primera vez en esa región del país y además se evidencia la presencia de una falla activa que podría corresponder con la extensión en tierra del Escarpe de Hess.

Sismos superficiales destructivos de magnitudes de entre 4,9 y 6,3 Mw, han ocurrido luego de sismos de magnitud mayor a 7,0 Mw en los años de 1941, 1950, 1983, 1990 y 1991, con tiempos de retraso de entre 5 horas a 5 años. Por esta razón el estudio de la sismicidad inducida reviste de importancia pues puede apuntar las zonas donde potencialmente se podría generar un enjambre o sismos destructivos, a diferencia de las fundamentaciones del pasado, cuando se pensaba que el impacto de los terremotos estaba reducido únicamente al área de réplicas.

## 8. Referencias bibliográficas

- Arroyo, I. (2001). Sismicidad y neotectónica en la región de influencia del proyecto de Boruca: hacia una mejor definición sismogénica del sureste de Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Universidad de Costa Rica.
- Barboza, G., Fernández, A., Barrientos, J. y Bottazzi, G. (1997). Petroleum geology of the Caribbean margin of Costa Rica. *The Leading Edge*, 16 (12), 1787-1798. Exploration, Society of Exploration Geophysicists.
- Baumgartner, P., Flores, K., Bandini, A., Girault, F. y Cruz, D. (2008). Upper triassic to cretaceous radiolaria from Nicaragua and northern Costa Rica: the mesquito composite oceanic terrane. *Ofioliti*, (33), 1-19.
- Boschini, I., Alvarado, G. y Rojas, W. (1988). El terremoto de Buenavista de Pérez Zeledón (Julio 3, 1983): evidencia de una fuente sismogénica intraplaca desconocida en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (8): 111-121.
- Bowland, C. (1993). Depositional history of the western Colombian basin, Caribbean Sea, revealed by seismic stratigraphy. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 105(10), 1321-1345, doi: 10.1130/0016-7606(1993)105.
- Dengo, G. (1985). Mid America: tectonic setting for the Pacific margin from southern Mexico to northwestern Columbia. En Nairn, A. y Stechli, F., eds., *The ocean basins and margins*, v. 7. New York, Plenum Press. 123-180.
- Freed, A. (2005). Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 335-367. Doi: 10.1146/annurev.earth.33.092203.122505
- Hauff, F., Hoernle, K., Van den Bogaard, P., Alvarado, G. y Garbe-Schönberg, D. (2000). Age and geochemistry of basaltic complexes in western Costa Rica: contributions to the geotectonic evolution of Central America. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 1(1): 1009, doi:10.1029/1999GC000020.
- Havskov, J. y Ottemöller, L. (1999). SeisAn earthquake analysis software. *Seismological Research Letters*, 70, 532-534.
- Hill, D., y otros 30 autores. (1993). Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 landers, California, Earthquake. *Science*, 260 (5114), 1617-1623. doi: 10.1126/science.260.5114.1617.
- Hough, S. (2005). Remotely triggered earthquakes following moderate mainshocks (or, why California is not falling into the ocean). *Seismological Research Letters*, 76 (1), 58-66. doi:10.1785/gssrl.76.1.58
- Hough, S. (2007). Remotely triggered earthquakes following moderate main shocks. *Geological Society of America Special Papers*, (425), 73-86. doi: 10.1130/2007.2425(06).
- Lei, X., Xie, C. y Fu, B. (2011). Remotely triggered seismicity in Yunnan, southwestern China, following the 2004 Mw9.3 Sumatra earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 116, B08303. doi: 10.1029/2011JB008245.
- Lienert, B. y Havskov, J. (1995). A computer program for locating earthquakes both locally and globally. *Seis. Res. Lett.*, (66), 26-36. doi:10.1785/gssrl.66.5.26.
- Linkimer, L. y Soto, G., editores (2012). *El Terremoto de Sámara del 5 de setiembre del 2012*. San José, C.R.: Red Sismológica Nacional.
- Linkimer, L., Arroyo, I., Mora, M., Vargas, A., Soto, G., Barquero, R., Rojas, W., Taylor, W. y Taylor, M. (2013). El Terremoto de Sámara (Costa Rica) del 5 de setiembre del 2012 (Mw 7,6). *Rev. Geol. Amér. Central*, (49), 73-82.
- MacKenzie, L., Abers, G., Fischer, K., Syracuse, E., Protti, M., Gonzalez, V., y Strauch, W. (2008). Crustal structure along the southern Central American volcanic front. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9: Q08S09, doi:10.1029/2008GC001991.
- Mann, P., Rogers, R. y Gahagan, L. (2007). Overview of plate tectonic history and its unresolved tectonic problems. En Bundschuh J. y Alvarado G. *Central America: geology, resources and hazards*. New York, EEUU: Taylor and Francis. 201-237.
- Montero, W. y Alvarado, G. (1995). El terremoto de Patillos del 30 de diciembre de 1952 (Ms=5,9) y el contexto neotectónico de la región del volcán Irazú, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (18), 25-42.
- 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.
- Morales, L.D., 1994: Daños causados por el terremoto de Limón: pérdidas de medidas de mitigación. *Revista Geológica de América Central*, Vol. Esp. Terremoto de Limón, 201-210.
- Ottemöller, L., Voss, P. y Havskov, J. (2011). SEISAN: the earthquake analysis software for windows, solaris, linux, and macosx, version 9.0.1. Bergen, Noruega: University of Bergen.
- Peng, Z., Wang, W., Chen, Q. y Jiang, T. (2010). Remotely triggered seismicity in north China following the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake. *Earth Planets Space*, (62), 893-898. doi:10.5047/eps.2009.03.006.
- Peraldo, G. y Montero, W. (1994). *Temblores del período colonial de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Prejean, S., Hill, D., Brodsky, E., Hough, S., Johnston, M., Malone, S., Oppenheimer, D., Pitt, A. y Richards-Dinger, K. (2004). Remotely triggered seismicity on the United States west coast following the Mw 7.9 Denali fault earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94 (6B), S348-S359.
- 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.
- 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), 15-20.
- Wen, K., Beresnev, I. y Cheng, S. (1996). Moderate- magnitude seismicity remotely triggered in the Taiwan region by large earthquakes around the Philippine Sea plate. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86 (3), 843-847.