

EN TORNO A LA PREVENCIÓN



Revista No. 12, Jun. 2014

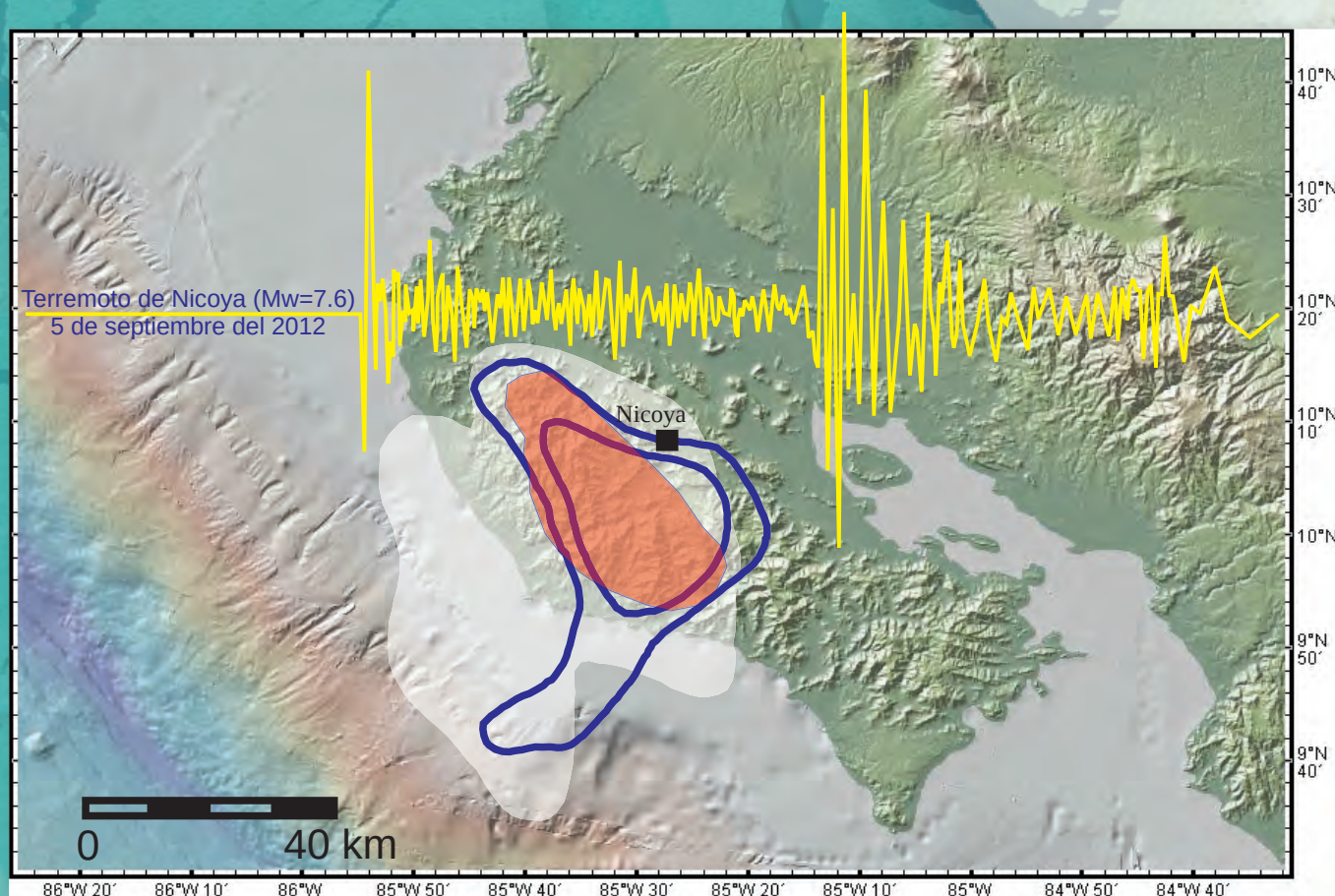
ISSN: 1659-3057

ISSN: 2215-3845

NÚMERO ESPECIAL

TERREMOTO DE NICOYA

5 de setiembre de 2012



San José, Costa Rica

1. EL TERREMOTO DE NICOYA (MW=7.6), COSTA RICA, DEL 5 DE SEPTIEMBRE DEL 2012: UN CASO EXITOSO DE ANTICIPACIÓN

PhD. Marino Protti¹

MSc. Víctor González²

Universidad Nacional de Costa Rica

PhD. Susan Schwartz³

University of California, CA, EEUU

PhD. Timothy Dixon⁴

University of South Florida, FL, EEUU

PhD. Andrew Newman⁵

Georgia Institute of Technology, GA, EEUU

PhD. Lujia Feng⁶

Nanyang Technological University, Singapur

PhD. Jeffrey Marshall⁷

California State Polytechnic University, CA, EEUU

terremoto de esta magnitud y proximidad. Este terremoto no ocurrió de forma inesperada. Desde 1995 se venían haciendo evaluaciones del potencial sísmico de esta región clasificada como una brecha sísmica. Por más de una década antes del sismo se venía construyendo una red de monitoreo geodinámico en la península de Nicoya y sus alrededores, región bajo la cual se subduce la placa del Coco a casi 80 mm por año. Este proyecto internacional de cooperación multi-institucional tenía como objetivo aprovechar la oportunidad temporal de estar al final del ciclo sísmico. Además, se aprovechaba la ventaja geográfica de contar con una península directamente sobre la zona sismogénica de grandes sismos de subducción y poder así registrar, en el campo cercano, no solo el futuro terremoto sino también el proceso de acumulación de esfuerzos y la documentación de la historia de ruptura del terremoto. La información obtenida con dicha red permitió anticipar la ubicación y magnitud del inminente terremoto. Presentamos en este trabajo los antecedentes de esa anticipación y los detalles de lo ocurrido antes, durante y después de este terremoto, considerado quizás el terremoto de subducción mejor registrado de la historia.

Resumen

Las zonas de subducción, los lugares donde convergen dos placas tectónicas, liberan alrededor del 90% de la energía sísmica de nuestro planeta y generan los terremotos más grandes ($M_w > 8.5$). El comprender los procesos que se conjugan para crear estas amenazas de origen natural podría ayudar a reducir su impacto en la población y la infraestructura. El 5 de septiembre del 2012, a las 8:42 a.m ocurrió un terremoto de 7.6 grados de magnitud bajo la península de Nicoya, en el noroeste de Costa Rica. La gran mayoría de los terremotos de subducción en el mundo ocurren costa afuera; sin embargo este de Nicoya ocurrió en tierra firme bajo zonas pobladas. A pesar de ello, el terremoto de Nicoya del 2012 no provocó ninguna muerte y los daños que causó fueron muy pocos para un

Palabras clave: Terremotos, Terremoto de Nicoya, Subducción, Brecha sísmica, Sismicidad y tectónica, Costa Rica.

Abstract

Subduction zones, regions where two tectonic plates converge, are responsible of nearly 90% of the energy released by our planet and cause the largest earthquakes ($M_w > 8.5$). Understanding the processes that conjugate

¹Pertenece al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. Correo electrónico: marino.protti.quesada@una.cr

²Pertenece al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica. Correo electrónico: victor.gonzalez.salas@una.cr

³Correo electrónico: syschwar@ucsc.edu

⁴Correo electrónico: thd@usf.edu

⁵Correo electrónico: anewman@gatech.edu

⁶Pertenece al Earth Observatory of Singapore. Correo electrónico: lfeng@ntu.edu.sg

⁷Correo electrónico: marshall@csupomona.edu

to produce these natural hazards could help reduce their impact on population and infrastructure. On September 5th, 2012, at 8:42 AM, a $M_w=7.6$ earthquake occurred under the Nicoya peninsula in NW Costa Rica. Most subduction earthquakes occur offshore, but this Nicoya earthquake occurred on land under populated areas. Notwithstanding, the Nicoya 2012 earthquake did not cause human fatalities and damage in infrastructure was impressively low. This earthquake was not unexpected. Since 1995 several seismic potential assessments were published for this region, classified as a seismic gap. As part of an international cooperation project, a geodynamic network was built since the late 1990's on the Nicoya peninsula and its surroundings, where the Cocos plate subducts at nearly 80 mm/yr. With this project we were taking advantage of the temporal opportunity of being at the end of a seismic cycle. We were also benefitting from a geographical advantage of having a peninsula sitting right over the seismogenic zone of large earthquakes so we could record, in the near field, not only the incoming earthquake, but the process of stress build up and the history of rupture propagation. Information recorded by this network allowed us to anticipate the location and magnitude of the earthquake. In this work we are presenting a summary of the work done before, during and right after the Nicoya 2012 earthquake, which is perhaps the best recorded subduction earthquake.

Keywords: Earthquakes, Nicoya earthquake, Subduction, Seismic gap, Seismicity and tectonics, Costa Rica.

1. Introducción

Las zonas de subducción, los márgenes continentales o de arcos de islas donde convergen dos placas tectónicas, liberan alrededor del 90% de la energía sísmica de nuestro planeta (Pacheco y Sykes, 1992) y son las únicas capaces de generar terremotos con magnitudes de momento sísmico, M_w , mayor que 8.5 grados. Estos sismos ocurren en su mayoría bajo el fondo oceánico, lo cual hace muy difícil su registro y estudio. El comprender los procesos que se conjugan para crear estas amenazas podría ayudar a reducir la vulnerabilidad de la población y la infraestructura. Para finales del Siglo XX una porción de la parte sur de la Trinchera Mesoamericana, donde la Placa del Coco se subduce por debajo de la Placa del Caribe a casi 80 mm/año, había sido ya identificada como una brecha sísmica. Esta brecha, la brecha sísmica de Nicoya, se ubicaba costa afuera y por debajo de la península de

Nicoya, en el noroeste de Costa Rica. Antes del terremoto de Nicoya del 2012, este segmento de subducción, con un acoplamiento elástico fuerte, había sufrido sus tres últimas rupturas, produciendo grandes sismos en 1853, 1900 y 1950 (Protti, Güendel y Malavassi, 2001).

Las evidencias que indicaban la existencia de un fuerte acople elástico en el segmento de Nicoya eran: a) un bajo nivel de sismicidad de fondo; b) el cese repentino de la propagación de las réplicas de los terremotos de 1990 y de 1992 justo en los bordes de la brecha sísmica de Nicoya; y c) el rápido movimiento (de cerca de 30 mm/año) hacia el NE (en dirección paralela a la convergencia entre las Placas del Coco y del Caribe) de la península de Nicoya, observado con sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS). El fuerte acoplamiento elástico entre las placas del Coco y del Caribe podría ser causado por la carga litostática (peso de la columna de rocas) que ejerce la península de Nicoya sobre la interface de las dos placas. La ocurrencia de los terremotos del 25 de marzo de 1990 a la entrada al Golfo de Nicoya y de Nicaragua del 1 de setiembre de 1992, al SE y NO de la Península de Nicoya, respectivamente, habían contribuido no solo a la delimitación geográfica de la brecha sísmica de Nicoya, sino también a recargarla aumentando así su potencial sísmico.

La presencia de la península de Nicoya sobre el área de ruptura (lo cual facilita la instrumentación y observación), su alto potencial sísmico y la cercanía a su próxima ruptura fueron las tres características más importantes que hicieron que este segmento fuera seleccionado, por un panel de científicos a nivel mundial, como uno de los dos sitios sismogénicos en los que se estaría realizando el “experimento de zonas sismogénicas” (SEIZE: Seismogenic Zone Experiment). Este experimento, una iniciativa del Programa MARGINS con financiamiento de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (US-NSF), involucró la participación de instituciones de tres continentes (América, Europa y Asia); la contraparte en Costa Rica ha sido el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), entidad estatal con sede en Heredia.

2. Marco tectónico regional

La tectónica regional de América Central está controlada principalmente por el choque de las Placas del Coco y del Caribe (Figura 1). Como consecuencia de esta colisión la placa oceánica del Coco se subduce por debajo de la placa del Caribe, a lo largo de la Fosa Mesoamericana, a

velocidades que llegan a casi 80 mm/año frente a península de Osa (DeMets, 2001 y Protti, González, Freymueller y Doelger, 2012). En el extremo suroeste de la placa del Caribe las condiciones locales de esfuerzos tectónicos han provocado la fracturación de la misma y la creación de una microplaca, denominada bloque de Panamá. El bloque de Panamá comprende la parte sur de Costa Rica y todo Panamá. Al sur de la península de Burica se encuentra la zona de fracturas de Panamá que constituye el límite entre las placas del Coco y de Nazca.

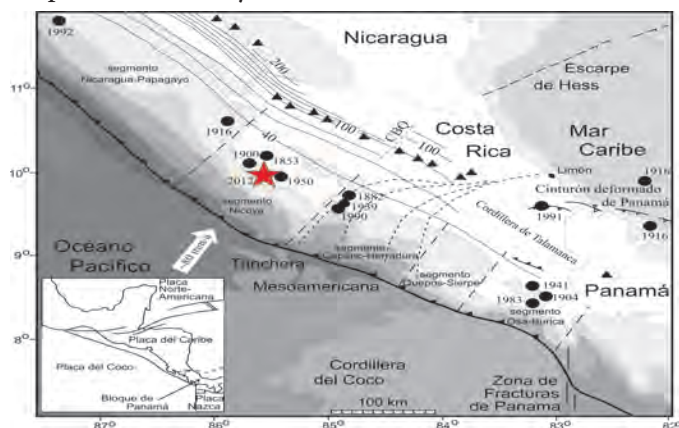


Figura 1. Marco tectónico regional de Costa Rica y segmentación de la zona de subducción. Modificada de Protti, Güendel y Malavassi, 2001.⁸

El acople de la placa del Coco tanto con la placa del Caribe como con el bloque de Panamá cambia a lo largo de la zona de subducción desde Nicaragua hasta el sur de Costa Rica (Protti, Güendel y McNally, 1994). Estos cambios correlacionan muy bien con las características batimétricas del fondo oceánico que se subduce y están directamente relacionadas con la génesis y la edad de la placa del Coco. Con base en esos cambios y diferencias y en los registros de sismicidad tanto histórica como instrumental, la zona de subducción en el Pacífico sur de América Central se ha dividido en cinco segmentos (Figura 1): 1) Nicaragua-Papagayo, 2) Nicoya, 3) Cóbano-Herradura, 4) Quepos-Sierpe y 5) Osa-Burica. La Litósfera de la placa del Coco creada en la Dorsal del Pacífico se subduce por debajo de la placa del Caribe en los dos primeros segmentos, mientras que la placa del Coco creada en la dorsal de Galápagos se subduce por debajo del bloque de Panamá en los dos últimos segmentos y por debajo de una transición entre la placa del Caribe y el bloque de Panamá en el segmento Cóbano-Herradura (Figura 1).

Bajo el segmento de Nicoya, la placa del Coco que se subduce es relativamente vieja, de batimetría suave y el ángulo de subducción es muy similar al segmento Nicaragua-Papagayo. Sin embargo, a diferencia del segmento Nicaragua-Papagayo, la existencia de la península de Nicoya en este segmento ejerce una importante carga litostática sobre el plano de subducción aumentando así los esfuerzos normales e incrementando, por lo tanto, el acople entre las dos placas. Debido a este fuerte acople el segmento de Nicoya se caracteriza por la generación de sismos de gran magnitud (superior a 7 grados) y por una baja actividad sísmica de fondo en los períodos intersísmicos. En este segmento han ocurrido sismos de gran magnitud en 1826, 1853, 1900 y 1950. El sismo de Sámara del 23 de agosto de 1978, de 6.9 grados de magnitud, rompió solo una pequeña porción del segmento de Nicoya. Con base en el tamaño del área de ruptura y la magnitud del evento, se estima que este sismo liberó alrededor del 6% de la energía total acumulada, hasta esa fecha, bajo la península de Nicoya.

3. Monitoreo

El OVSICORI-UNA, junto con instituciones de los Estados Unidos y del Japón, ha venido instalando instrumentación en redes de monitoreo geodinámico en la península de Nicoya y sus alrededores desde principios de la década de los ochentas. Estaciones sísmicas analógicas de periodo corto han registrado desde 1984 y digitales de banda ancha y de periodo corto desde finales de los noventas. Como arreglos temporales se operaron sismómetros de fondo oceánico frente a la península de Nicoya durante la primera mitad del 2000. Además, por 18 meses, entre el 2010 y el 2011 operaron simultáneamente tres arreglos sísmicos densos de periodo corto.

El monitoreo geodésico inició con campañas de ocupación con GPS en 1988 que se extendieron hasta inmediatamente después del terremoto del 2012. La operación de estaciones continuas de GPS inició en el 2002 con la donación de tres receptores y antenas por parte del Gobierno de Japón, a través de su Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA). Para la ocurrencia del terremoto de Nicoya del 2012 había ya operando una red de 19 estaciones continuas de GPS, donadas por la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (US-NSF). En anticipación al terremoto por ocurrir estas estaciones

⁸. Círculos negros marcan terremotos de subducción de magnitud mayor que 7.0; triángulos negros marcan la ubicación de volcanes activos; CBQ: Contorsión Brusca de Quesada. La estrella roja marca la ubicación del mayor deslizamiento del terremoto de Nicoya del 2012.

continuas de GPS ocupaban un sector de su memoria para registrar datos de alta frecuencia (5 Hz) que son cruciales para el análisis de la historia de ruptura. En la Figura 2 se muestra la distribución de estaciones de monitoreo en la península de Nicoya y sus alrededores.

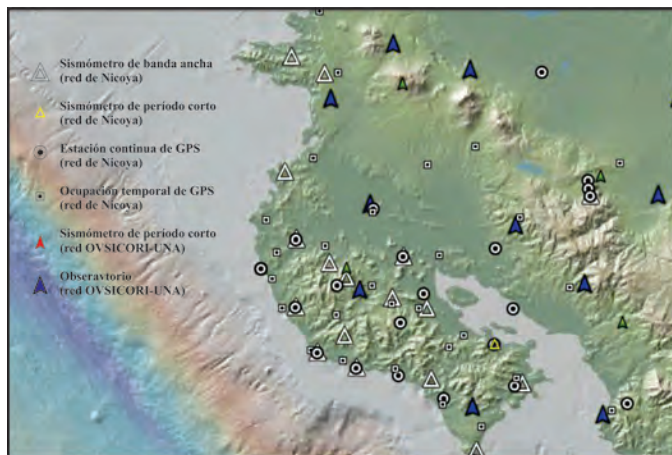


Figura 2. Mapa con la distribución de la instrumentación instalada en la península de Nicoya y sus alrededores. Por Protti et al., 2014.⁹

Además, del monitoreo instrumental, se venían realizando trabajos de campo para el estudio y cartografía de terrazas marinas levantadas en la península de Nicoya como consecuencia de su actividad tectónica (Marshall y Anderson, 1995 y Marshall, Gardner, Protti y Nourse, 2009). Estos trabajos de campo, que incluyeron la documentación de los levantamientos costeros inducidos por el terremoto de Nicoya de 1950, habían iniciado desde finales de los ochentas y pocos años antes del terremoto se comenzaron a documentar perfiles de playa para su comparación posterior al terremoto (Marshall, Gardner, Protti y Morrish, 2014 y Protti, González, Newman, et al. 2014).

Toda esta instrumentación y estudios tenían la finalidad de registrar y estudiar los cambios que ocurrían en la península asociados al proceso de acumulación de esfuerzos en la zona sismogénica y para capturar el próximo terremoto en el campo cercano. Era claro que se estaba ante una oportunidad histórica al encontrarse al final del ciclo sísmico, como geográfica al contar con la península de Nicoya situada justo sobre el área potencial de ruptura.

4. Estudios de potencial sísmico antes del terremoto

A continuación se presenta la evolución del conocimiento obtenido del potencial sísmico de la península de Nicoya durante las dos décadas previas al terremoto del 2012. Este conocimiento cambió conforme se fueron instalando más estaciones, aumentaba la cantidad y tipo de datos y se sofisticaban los modelos de inversión de la información registrada.

Con base en mediciones de deformación por medio de campañas de GPS y utilizando un modelo simple de dislocación visco-elástica homogénea (Lundgren, et al., 1999) se estimó que la brecha sísmica de Nicoya tenía potencial para la generación de un terremoto de $M_w=7.6$. La zona de ruptura se estimó sería solo bajo la península de Nicoya. En el libro publicado por Protti, Güendel y Malavassi (2001), utilizando la información sismológica y geodésica disponible se realizó una proyección del momento sísmico acumulado y se concluyó que, para el año 2000 había potencial para generar un terremoto con magnitud entre 7.5 y 7.9. Linuma, Protti, Obana, et al. (2004).

A partir de la ocupación con GPS de un perfil denso de monumentos geodésicos perpendicular a la península y utilizando una inversión bidimensional homogénea de la deficiencia de deslizamiento, obtuvieron un potencial de $M_w=7.7$ para una zona de ruptura que se extendía desde 15 km costa afuera hasta 30 km de profundidad.

El mismo año y utilizando datos de 24 monumentos geodésicos ocupados en campañas de GPS desde 1991, Norabuena, Dixon, Schwartz, et al. (2004), sin estimar el potencial en términos de magnitud, concluyen que un parche con acoplamiento fuerte en la interface inicia a 8 km, de profundidad con un máximo a 14 km, y que otro parche fuerte existe a 39 +/- 6 km de profundidad. González y Protti (2005), realizaron un afinamiento del potencial sísmico de la península de Nicoya, utilizando la información instrumental obtenida en el primer quinquenio del siglo XXI, reportando potencial para generar un terremoto entre 7.7 y 7.9 grados de magnitud.

La última estimación del potencial sísmico de Nicoya se publicó en junio del 2012, tan solo 10 semanas antes del terremoto de Nicoya (Feng, Newman, Protti, et al.

⁹ Los sitios marcados como observatorios cuentan con estación continua de GPS, sismómetro de banda ancha y acelerómetro.

2012). Para ese trabajo se utilizaron los datos de casi 20 años de campañas de GPS y la información de casi una década de estaciones continuas de GPS. La disponibilidad e inversión de esa gran cantidad de datos permitió no solo estimar en $M_w=7.8$ el potencial sísmico, sino también mapear inhomogeneidades en la distribución del acople elástico en la zona sismogénica del segmento de Nicoya.

En la Figura 3 se muestra el área de la falla, que según Feng et al., 2012, tenía, antes del terremoto, potencial para deslizarse más de 2 m. Del trabajo de Feng et al., 2012, destacan dos parches fuertes con casi 100% de acoplamiento elástico; uno somero (de 10 a 20 km de profundidad) frente a Nosara y otro más profundo (de 20 a 30 km) entre Nosara y Nicoya.

5. El terremoto de Nicoya del 2012

El 5 de septiembre del 2012 a las 8 horas 42 minutos y 0.4 segundos inició la ruptura, en su fase de alta frecuencia, en la interface entre la placa del Coco y la placa del Caribe bajo la península de Nicoya; 3.4 segundos después se dispara la fase principal del terremoto. La fase inicial se ubica en 9.76°N , 85.56°W a 13.1 km de profundidad (Yue et al., 2013); 32 minutos antes del terremoto ocurrieron tres premonitores de poco más de 2.0 grados de magnitud ubicados muy cerca de donde ocurre la fase inicial; el último y más grande ($M_w=2.9$) de estos premonitores ocurrió 2 minutos antes del terremoto.

La fase principal inicia en 9.82°N , 85.47°W a 17.2 km de profundidad (Yue, Lay, Schwartz, et al. 2013). Esta fase principal del terremoto de Nicoya se propaga hacia abajo en la falla teniendo su máximo deslizamiento y amplitud en la zona de la falla bajo un área comprendida en el contorno Carrillo-San Juanillo-Santa Cruz-Nicoya-Carrillo. En el plano de falla la región que tuvo algún deslizamiento correspondió a ~ 30 km en la dirección de buzamiento (NE) y ~ 70 km en el rumbo de la falla (NW) (Yue et al., 2013). En la Figura 3 se muestran los contornos de las áreas de la falla que experimentaron más de 1.2 y 2.0 m de deslizamiento durante los primeros 30 segundos del terremoto (Yue et al., 2014).

El pico de máximo deslizamiento alcanzó 4.4 m y se ubicó bajo la región aproximadamente a mitad de camino entre

Nicoya y Carrillo. El terremoto tardó aproximadamente 30 segundos propagando la ruptura por la falla y su momento sísmico total fue de 3.5×10^{20} Nm, correspondiente con un terremoto de magnitud $M_w = 7.6$ (Yue et al., 2013).

El deslizamiento en la falla que inició el 25 de septiembre continuó como un deslizamiento lento postsísmico por poco más de 6 meses y todavía, a casi 2 años después del terremoto, no se puede decir aún que las porciones de la falla que deslizaron estén ya y nuevamente acumulando deformación. La deformación registrada en superficie con las estaciones continuas de GPS y en los monumentos geodésicos que se reocuparon 5 a 12 días después del terremoto, permitieron obtener una inversión del deslizamiento total en la falla durante el terremoto y de la fase más importante del deslizamiento postsísmico. El máximo desplazamiento horizontal registrado en superficie fue de 68 cm hacia el SO en Garza y la máxima deformación vertical fue de 53 cm de levantamiento en Sámara (Protti et al., 2014). La inversión de la deformación cosísmica y postsísmica inmediata indican que el deslizamiento en la falla se dio principalmente en el parche fuerte profundo (20-30 km) publicado por Feng et al. (2012). El parche más superficial (10-20 km) frente a Nosara prácticamente no deslizó y operó como una barrera que detuvo el deslizamiento hacia la trinchera (Figura 3). La deficiencia de deslizamiento aún existe ahí y tendrá eventualmente que ocurrir; no contamos con información para determinar el mecanismo de cómo y cuándo ocurrirá.

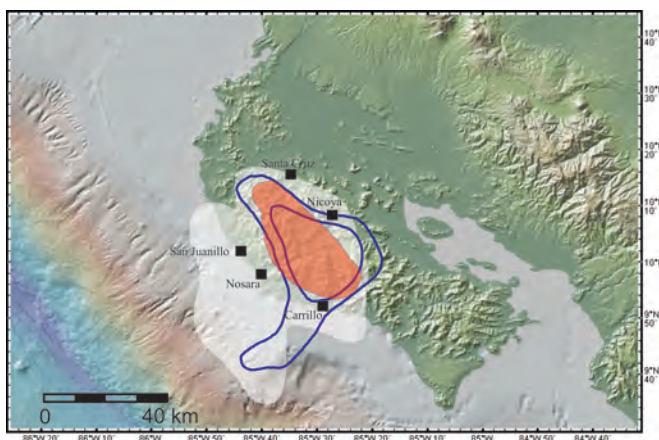


Figura 3. Sobreposición de resultados. Por Protti et al., 2014.¹⁰

¹⁰ Parche claro: área de la falla identificada antes del terremoto de Nicoya con 50% o más de acoplamiento elástico (Feng et al., 2012). Líneas azules: regiones con deslizamiento total en la falla, de afuera hacia adentro, de más de 1.2 y más de 2 m, respectivamente, después de 30 segundos del terremoto (Yue et al., 2013). Parche rojo: región de la falla con deslizamiento acumulado mayor a 2 m durante el terremoto y las siguientes dos semanas.

El terremoto de Nicoya del 2012, como los terremotos anteriores, tuvo la mayor parte de su deslizamiento bajo tierra firme o en fondo oceánico poco profundo. Esto hizo que, como lo plantearon Chacón y Protti (2011) el potencial para la generación de un tsunami era muy bajo, como efectivamente ocurrió. El tsunami que produjo el terremoto de Nicoya del 2012 fue tan pequeño que solo fue registrado instrumentalmente.

Una característica muy importante del terremoto de Nicoya del 2012 ha sido su poca cantidad de réplicas de magnitud moderada. De acuerdo a la Ley de Omori, para un sismo de magnitud 7.6 se esperarían alrededor de 10 réplicas con magnitud superior a 6.6 y unas 100 réplicas de magnitud superior a 5.6. La réplica mayor del terremoto de Nicoya del 2012 solo alcanzó $M_w=6.5$ (cumpliendo con la Ley de Bath). En total, después de 1 año y 8 meses, solo han ocurrido 5 réplicas con magnitudes mayores que $M_w=5.0$. Esto es un indicativo de que el terremoto de Nicoya del 2012 no representó la ruptura total de la interface y que aún continúa bloqueada.

Tal como lo anticiparon Protti et al., 2001, el desplazamiento de la península de Nicoya hacia el SO ocurrido durante el terremoto de Nicoya del 2012, produjo un cambio importante en el régimen de esfuerzos al interior del país generando enjambres sísmicos en fallas superficiales. Un incremento de sismicidad se presentó a todo lo largo de la cordillera de Guanacaste. Como el desplazamiento de la placa del Caribe inducido por el terremoto se extendió hasta más allá de la cadena volcánica (8 cm al SO en Veracruz, cerca de Cano Negro), indujo activación de un enjambre en la región de isla Calero. Este tipo de disparo de sismicidad ya había sido documentado para los terremotos de 1990 (Protti et al., 1995) y 1991 (Protti y Schwartz, 1994).

6. Discusión

Es claro que el haber identificado una brecha sísmica madura correspondiente con el segmento de subducción de Nicoya no era suficiente; había que conocer su potencial y las características que podría tener un futuro terremoto en esa región. El haber logrado que Nicoya fuera seleccionado como laboratorio mundial de la iniciativa SEIZE de MARGINS fue trascendental para aprovechar la oportunidad temporal de estar cerca del final de un ciclo sísmico y ventaja espacial de contar con una península directamente sobre la zona sismogénica. El trabajo internacional que se desarrolló en la instrumentación y estudio de esta brecha sísmica cumplió con creces sus

objetivos. La información recolectada antes del terremoto permitió anticipar la zona de ruptura y su potencial. La captura del terremoto en el campo cercano y el registro de su evolución y deformación postsísmica han hecho del terremoto de Nicoya el evento de subducción mejor registrado en la historia.

El trabajo de campo involucró muchas visitas a la península de Nicoya que permitieron una interacción constante con su población. Se aprovecharon estas visitas para impartir charlas sobre tectónica de Costa Rica y exponer ante los habitantes de esa región el potencial sísmico al que estaban expuestos. En estas exposiciones se incluyó a una gran cantidad y diversidad de público: escuelas, colegios, hospitales, clínicas, municipalidades, asociaciones comunales y sus comunidades, grupos turísticos organizados y comités locales de emergencia. El haber identificado la península de Nicoya y sus alrededores como un área con alto potencial sísmico, fue la motivación de fondo para que el proyecto BOSAI de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, con la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE) como contrapartida, escogieran esa región como zona piloto para la implementación de la filosofía BOSAI en la preparación de las comunidades ante amenazas naturales. En este proyecto se trabajó como colaboradores e instructores en la capacitación de líderes comunales de comités locales de emergencia.

Las estimaciones de Lundgren et al., 1999 y de Protti et al., 2001, que ya planteaban un alto potencial sísmico para la península de Nicoya, fueron consideradas por la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico, del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. Es así como a partir de la versión del Código Sísmico de Costa Rica del 2002 se exigieron medidas de construcción más estrictas para esa región.

7. Conclusiones

Los trabajos de anticipación que se realizaron desde la década de los noventa, que incluyeron la instalación y operación de una densa red de monitoreo geodinámico y estudios del potencial sísmico, hicieron del terremoto de Nicoya del 5 de septiembre del 2012 el sismo de subducción mejor documentado en la historia. Este es el primer caso en el mundo en el que se ha podido anticipar la zona de ruptura de un futuro terremoto. El proyecto de monitoreo geodinámico de la brecha sísmica de Nicoya es ejemplo de una excelente y transparente cooperación científica internacional en el que toda la información recolectada

estuvo siempre accesible a toda la comunidad científica internacional y de la misma manera después del terremoto (Dixon, Schwartz, Protti, et al., 2012). Lo aprendido y lo que aún queda por aprender a partir de los datos recolectados por este proyecto internacional conjunto, será insumo para un mejor entendimiento de los procesos que se conjugan en zonas de subducción para la generación de grandes terremotos y podría eventualmente aportar al desarrollo de la predicción sísmica. La documentación de la deformación presísmica, cosísmica y postsísmica, junto a la anómalamente reducida cantidad de réplicas de magnitud moderada, indican que el terremoto de Nicoya del 2012 no representó una ruptura total de la interface y que aún existe potencial para una ruptura de un parche más superficial en la interface.

Los trabajos anteriores al terremoto no representaron solo una actividad académica sino que incluyeron un fuerte componente de divulgación y preparación de la población. Quizás sea muy difícil llegar a valorar en cuánto contribuyó, con la usencia de muertes y el poco daño, el haber conocido e informado de antemano el potencial sísmico de la península de Nicoya, pero es claro que esta fue una experiencia nueva en Costa Rica al experimentar un terremoto que no fue inesperado.

8. Referencias bibliográficas

- Chacón-Barrantes, S. E. y Protti, M. (2011). Modeling a tsunami from the Nicoya, Costa Rica, seismic gap and its potential impact in Puntarenas. *J. South American Earth Sciences*, 31, 372-382.
- DeMets, C. (2001). A new estimate for present day Cocos & Caribbean Plate motion: implications for slip along the Central American Volcanic Arc. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (21), 4043-4046.
- Dixon, T. H., Schwartz, S., Protti, M., González, V., Newman, A., Marshall, J. y Spotila, J. (2013). Detailed data available for recent Costa Rica earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94 (2), 17-18. doi: 10.1002/2013EO020001.
- Feng, L., Newman, A., Protti, M., González, V., Jiang, Y. y Dixon, T. (2012). Active deformation near the Nicoya Peninsula, northwestern Costa Rica, between 1996 and 2010: interseismic megathrust coupling. *J. Geophys. Research*, 117(B6), doi: 10.1029/2012JB009230.
- González, V. y Protti, M. (2005). Afinamiento del potencial sísmico y monitoreo de la brecha sísmica de Nicoya. *Ambientico*. (147). 13-16.
- Linuma, T., Protti, M., Obana, K., González, V., Van der Laat, R., Kato, T., Miyasaki, S., Kaneda, Y. y Hernández, E. (2004). Inter-plate coupling in the Nicoya Peninsula, Costa Rica, as deduced from a trans-peninsula GPS experiment. *Earth Planetary Sci. Lett.* (223), 203-212.
- Lundgren, P., Protti, M., Donnellan, A., Heflin, M., Hernández, E. y Jefferson, D. (1999). Seismic cycle and plate margin deformation in Costa Rica: GPS observations from 1994 to 1997. *Jour. Geophys. Res.*, 104 (B12), 28915-28926.
- Marshall, J. y Anderson, R. (1995). Quaternary uplift and seismic cycle deformation, Península de Nicoya, Costa Rica. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107(4), 463-473.
- Marshall, J., Gardner, T., Protti, M., y Morrish, S., (2014). The geomorphic footprint of megathrust earthquakes: morphotectonics of the 2012 Mw7.6 Nicoya Earthquake, Costa Rica. En Varga, R. y Markley, M., (eds.). *Proceedings of the Twenty-Seventh Keck Research Symposium in Geology*. Claremont, California, USA : Keck Geology Consortium.
- Marshall, J., Gardner, T., Protti, M., y Nourse, J. (2009). International geosciences field research with undergraduate students: Three models for experiential learning projects investigating active tectonics of the Nicoya Peninsula, Costa Rica, in Whitmeyer, S.J., Mogk, D.W., and Pyle, E.J., eds., *Field Geology Education: Historical Perspectives and Modern Approaches*, Geological Society of America Special Paper 461, doi: 10.1130/2009.2461(08).
- Norabuena, E., Dixon, T., Schwartz, S., DeShon, H., Protti, M., Dorman, L., Flueh, E., González, V., Lundgren, P., Newman, A., Pollitz, F. y Sampson, D. (2004). Geodetic and seismic constraints on some seismogenic zone processes in Costa Rica. *J. Geophys. Res.* 109 (B1403). doi:10.1029/2003JB002931.
- Pacheco, J. y Sykes, L. (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 82 (3). 1306-1349.
- Protti, M. Güendel, F. y McNally, K. (1994). The geometry of the Wadati-Benioff zone under southern Central America and its tectonic significance: results from a high-resolution local seismographic network. *Phys. of the Earth and Planet. Inter.*, 84. 271-287.
- Protti, M. y otros 14 autores. (1995). The march 25, 1990 (Mw=7.0 Ml=6.8) earthquake at the entrance of the Nicoya Gulf, Costa Rica: its prior activity, foreshocks, aftershocks and triggered seismicity. *Jour. Geophys. Res.*, 100 (B10). 20345-20358.
- Protti, M. y Schwartz, S. (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.
- Protti, M., González, V., Freymueller, J. y Doelger, S. (2012). Cocos Island, on Cocos plate, moves at 95 mm/yr towards N330E and converges with San Andres Island, on the Caribbean plate, at 78 mm/yr. *Rev. Biol. Trop.* 60 (Suppl. 3). 33-41.
- 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.
- Protti, M., Güendel, F. y Malavassi, E. (2001) Evaluación del potencial sísmico de la Península de Nicoya. Heredia, C.R. : EUNA.
- Yue, H., Lay, T., Schwartz, S., Rivera, L., Protti, M., Dixon, T. y Owen, S. (2013) The 5 september 2012 Costa Rica Mw 7.6 earthquake rupture process from joint inversion of high-rate GPS, strong-motion, and teleseismic P wave data and its relationship to adjacent plate boundary interface properties. *Journal of Geophysical Research* 118, 5453-5466. doi:10.1002/jgrb.50379.