

Memorias del VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra y Simposio Internacional IAG Deformaciones Recientes de la Corteza Terrestre en SudAmerica y Alrededores; Santiago de Chile, 21-25 de octubre del 2002.

Monitoreo geodésico de una Brecha Sísmica Madura: Nicoya, Costa Rica

Marino Protti y Víctor González

Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica

Universidad Nacional,

Apartado 2346-3000, Heredia

Costa Rica

Tel (506) 261-0781

Fax (506) 261-0303

jprotti@una.ac.cr

vgonzale@una.ac.cr

Resumen

Una brecha sísmica existe bajo y frente a la Península de Nicoya en el noroeste de Costa Rica. Esta brecha es un segmento de la zona de subducción de Centroamérica donde la placa del Coco se introduce por debajo de la placa del Caribe. Grandes sismos han ocurrido en este segmento en 1853, 1900 y 1950. Sin deslizamiento significativo desde 1950, con una velocidad de convergencia cercana a los 90 mm/año y con un área de ruptura entre los 5000 y 10000 km², la brecha sísmica de Nicoya tiene potencial para generar un terremoto de magnitud superior a los 7.5 grados. Dado su alto potencial sísmico, la disponibilidad de información y especialmente el hecho de que la Península de Nicoya se encuentra directamente sobre el área de ruptura, esta brecha sísmica ha sido seleccionada como uno de los dos sitios para el Experimento Mundial de las Zonas Sismogénicas (SEIZE).

En un esfuerzo internacional por monitorear y documentar la deformación cortical, el OVSICORI-UNA ha venido trabajando con instituciones de los Estados Unidos y del Japón en la operación de estaciones sísmicas y en la ocupación de una red de GPS en y alrededor de la Península de Nicoya. Esta península está siendo desplazada hacia el continente y subsidiendo a velocidades de hasta 25 mm/año, consistente con la acumulación de deformación esperada a lo largo de una zona de subducción bloqueada. Durante el año 2002 estamos instalando 3 estaciones de registro continuo de GPS y re-ocuparemos la red total de GPS durante el 2003. Dado el estado de madurez de la brecha sísmica de Nicoya, estas

mediciones podrían darnos la oportunidad de documentar la deformación co-sísmica y post-sísmica cuando este gran sismo ocurra.

Abstract

A mature seismic gap exists under and off the Nicoya peninsula in northwestern Costa Rica. This gap is a segment of the Middle American Trench where the Cocos plate subducts under the Caribbean plate. Large earthquakes have occurred in this segment in 1853, 1900 and 1950. Without significant slip since 1950, with a convergence rate close to 90 mm/yr and an area ranging from 5000 to 10000 km², the Nicoya gap has potential to generate an earthquake with magnitude above 7.5. Given its high seismic potential, the available data and especially the fact that the Nicoya peninsula extends over large part of the rupture area, this gap was selected as one of the two sites for a SEIZE experiment.

In a joint international effort to monitor and document crustal deformation, OVSICORI-UNA has been working with institutions from United States and Japan in the operation of seismic stations and in the occupation of a GPS network in and around the Nicoya peninsula. This peninsula is moving landward and downward at rates close to 25 mm/yr, consistent with the elastic strain accumulation expected along locked subduction zones. During 2002 we are installing three continuous recording GPS receivers and will occupy the entire GPS network early in 2003. Given the maturity of the Nicoya seismic gap, these measurements could give us the opportunity to document coseismic and postseismic deformation when this large subduction earthquake occurs.

Introducción

La historia sísmica de una región con eventos sísmicos fuertes e intermitentes se conoce como ciclo sísmico. Cada ciclo sísmico se cierra una vez que ocurre uno de esos eventos de gran magnitud y su secuencia temprana de réplicas (primeros meses después del evento principal). El intervalo de tiempo entre dos de esos eventos fuertes se le llama período **intersísmico**. Cuando se hace referencia al período **presísmico** se habla de un tiempo de pocos años a meses antes del evento principal; el período **cosísmico** se refiere al momento de ocurrencia del sismo y por período **postsísmico** se refiere a pocos meses después del evento principal. La ocurrencia de un sismo representa el rompimiento de una sección o parche fuerte en una falla. A ese parche fuerte se le conoce en sismología como aspereza sísmica. Dependiendo de las condiciones particulares de ese parche, la ruptura puede ser muy repentina, relajando los esfuerzos acumulados en el tiempo, de una forma muy rápida, o la ruptura podría propagarse lentamente a lo largo de la falla. La velocidad de

ruptura proporciona información adicional sobre el grado de acoplamiento elástico entre los dos bloques que son separados por una falla.

La ocurrencia de los terremotos del 25 de marzo de 1990 a la entrada al Golfo de Nicoya, en Costa Rica y de Nicaragua del 1^{ro} de setiembre de 1992, al SE y NO de la Península de Nicoya, respectivamente, no solo contribuyeron a la delimitación geográfica de la brecha sísmica de Nicoya, sino también a recargarla aumentando así su potencial sísmico. Se tiene así, un segmento de la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya que no ha liberado energía sísmica importante desde 1950, rodeado por segmentos que se han deslizado con sismos fuertes en 1990 y 1992.

En este trabajo presentamos una descripción de las actividades de monitoreo de la brecha sísmica de Nicoya que realiza el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA) en conjunto con instituciones de los Estados Unidos y del Japón. Nos concentramos aquí en los estudios de deformación cortical y presentamos resultados preliminares de nuestras observaciones. Este trabajo de monitoreo pretende documentar la historia de deformación elástica de la Península de Nicoya durante el período presísmico y esperamos también registrar la deformación viscoelástica cosísmica y postsísmica.

Marco tectónico regional

La tectónica regional de América Central está controlada principalmente por el choque de las Placas del Coco y del Caribe (Fig. 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 van desde 70 mm por año frente a Guatemala hasta poco más de 90 mm por año frente a la Península de Osa [Protti-Quesada, 1994, calculado a partir de De Mets et al., 1990] (Fig. 2). A lo largo de este límite de placas es donde ocurren, en Costa Rica, la mayoría de los terremotos de gran magnitud.

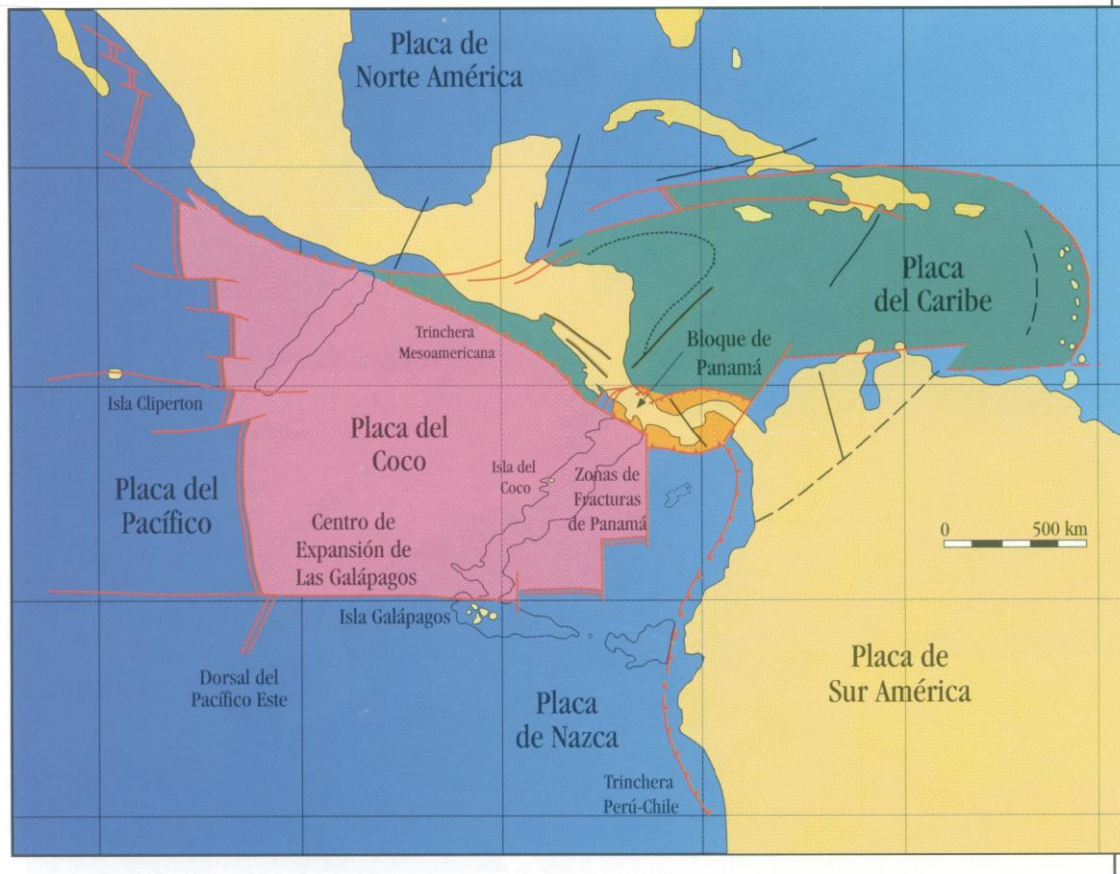


Figura 1. Marco tectónico regional de Costa Rica.

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, con límites que aún no están muy bien desarrollados ni definidos. El límite norte del Bloque de Panamá con la Placa del Caribe es un margen convergente, conocido como el "Cinturón Deformado del Norte de Panamá" [Silver et al., 1990], el cual se extiende desde las costas del Caribe de Colombia hasta Limón, Costa Rica (Fig. 1 y 2). Fue en el extremo oeste de este límite de placas donde ocurrió el terremoto del Valle de la Estrella, Limón, de abril de 1991. Hacia el noroeste, el contacto entre el Bloque de Panamá y la Placa del Caribe consiste en una zona difusa de fallamiento de corrimiento lateral izquierdo, que corre desde Limón hasta la Fosa Mesoamericana a través de la parte central de Costa Rica [Ponce y Case 1987, Jacob y Pacheco 1991, Güendel y Pacheco 1992, Goes et al., 1993, Fan et al., 1993, Marshall et al., 1993, Fisher et al., 1994, Protti y Schwartz 1994]. El Bloque de Panamá comprende la parte sur de Costa Rica y todo Panamá.

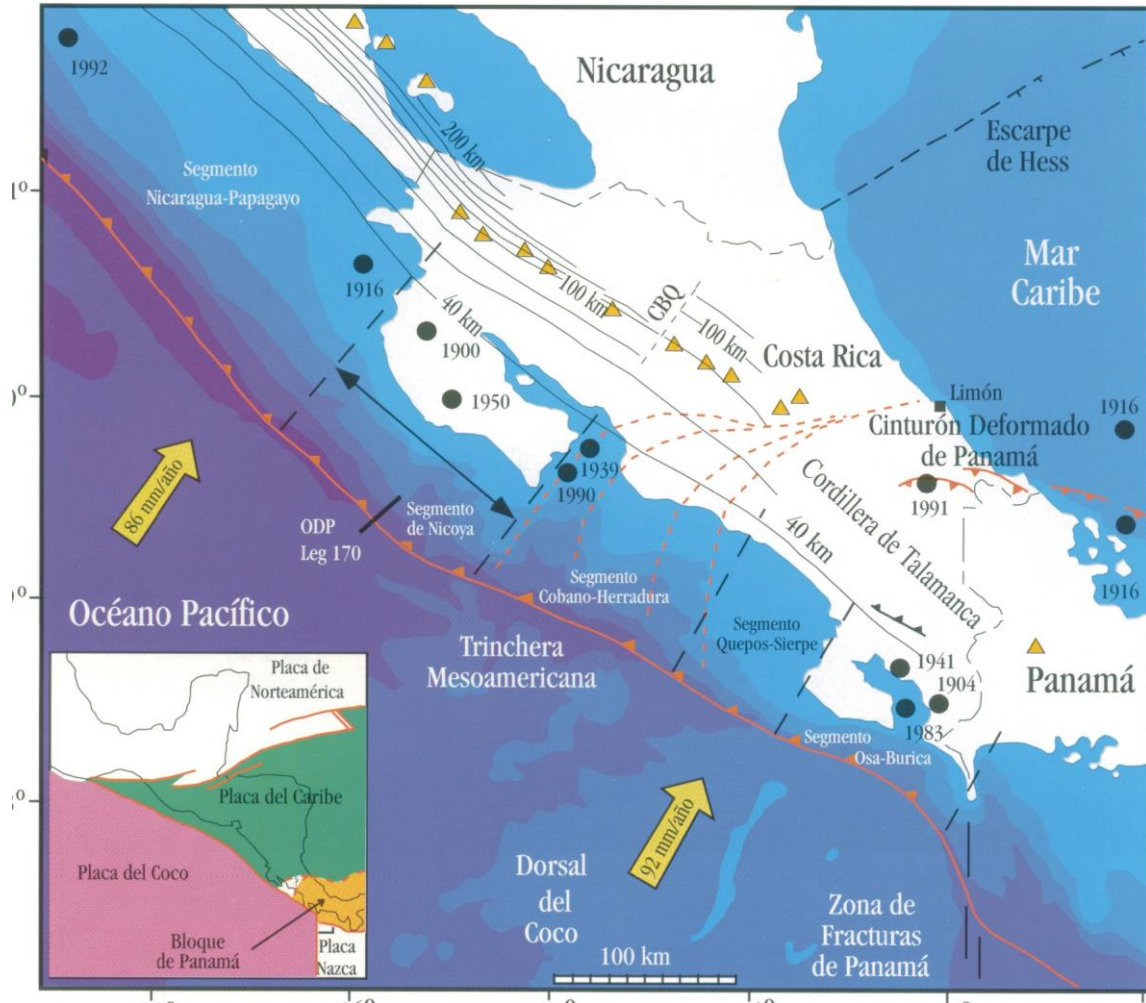


Figura. 2. Detalle de la tectónica local de Costa Rica y geometría de la zona Wadati-Benioff. Los contornos de profundidad de la placa del Coco bajo Costa Rica están dados a intervalos de 20 km, comenzando con el de 40 km. Los triángulos rellenos representan volcanes activos y los círculos rellenos muestran la ubicación de los terremotos con magnitudes mayores que 7 grados durante el siglo XX. CBQ señala la Contorsión Brusca de Quesada.

Al sur de la Península de Burica se encuentra la zona de fracturas de Panamá. Este sistema de fallas de corrimiento lateral derecho constituye el límite entre las Placas del Coco y de Nazca (Fig. 1). Al oeste de la zona de fracturas de Panamá se encuentra la cordillera submarina del Coco la cual se subduce bajo la Península de Osa. La cordillera o dorsal asísmica del Coco, es la traza o cicatriz formada en la Placa del Coco como resultado de su paso sobre el punto caliente de las islas Galápagos.

Este ambiente tectónico hace que Costa Rica sea una región sumamente activa en términos de sismicidad, con fuentes sísmicas de diverso origen y profundidad, dispersas por todo el país. Eventos sísmicos superficiales, con profundidades menores que 40 km se presentan: a) asociados con la subducción de la Placa del Coco bajo la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá; b) a lo largo de la zona de fracturas de Panamá; c) como fallamiento intraplaca de esas tres unidades tectónicas; d) como actividad interplaca entre la Placa del Caribe y el Bloque de Panamá, tanto a lo largo del Cinturón Deformado del Norte de Panamá como a lo largo de la zona de fallas que atraviesa la parte central de Costa Rica; y e) asociada al arco volcánico (Protti-Quesada, 1994). Sismos de profundidad intermedia (40 a 220 km) ocurren como deformación interna de la porción subducida de la Placa del Coco (Protti-Quesada, 1991; Protti et al., 1994a). De abril de 1984 a diciembre de 1999, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica, Universidad Nacional (OVSICORI-UNA) ha registrado actividad en todas estas fuentes sísmicas y ha localizado cerca de 50 000 sismos en poco más de 15 años.

La actividad sísmica de profundidad intermedia por debajo de Costa Rica revela características intrínsecas de la Placa del Coco. Un aspecto que destaca es la existencia de una rasgadura en la Placa del Coco por debajo de la parte central de Costa Rica (la Contorsión Brusca de Quesada (CBQ) [Protti-Quesada, 1991]) observable a profundidades mayores de 70 km (Fig. 2). Al noroeste de esta rasgadura, o falla tipo tijera, la Placa del Coco se inclina hasta 80 grados y alcanza profundidades que varían desde 220 km por debajo de la frontera de Costa Rica con Nicaragua, hasta 135 km justo en la rasgadura. Hacia el sureste de la Contorsión Brusca de Quesada, la Placa del Coco se inclina 60 grados y la sismicidad no se extiende a más de 125 km de profundidad detrás del arco volcánico, ni a más de 50 km de profundidad al noreste de Quepos (Fig. 3) [Protti et al., 1995a].

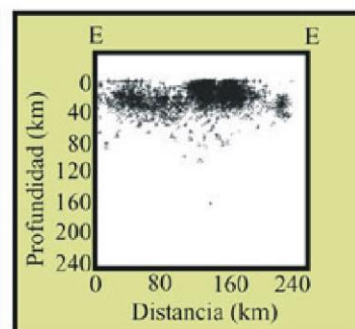
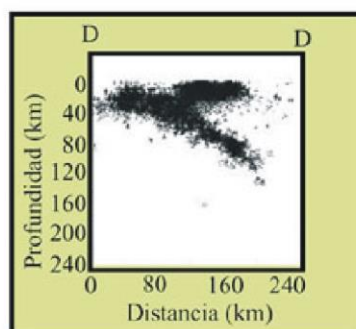
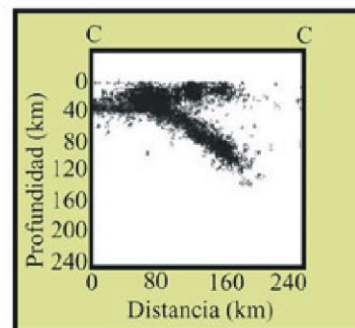
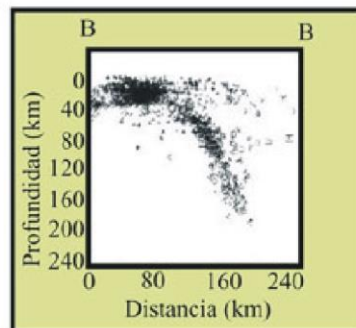
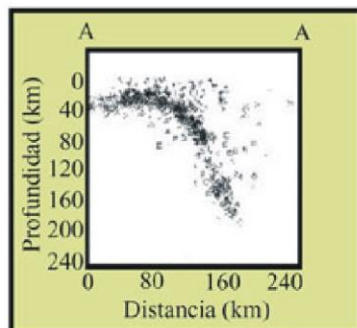
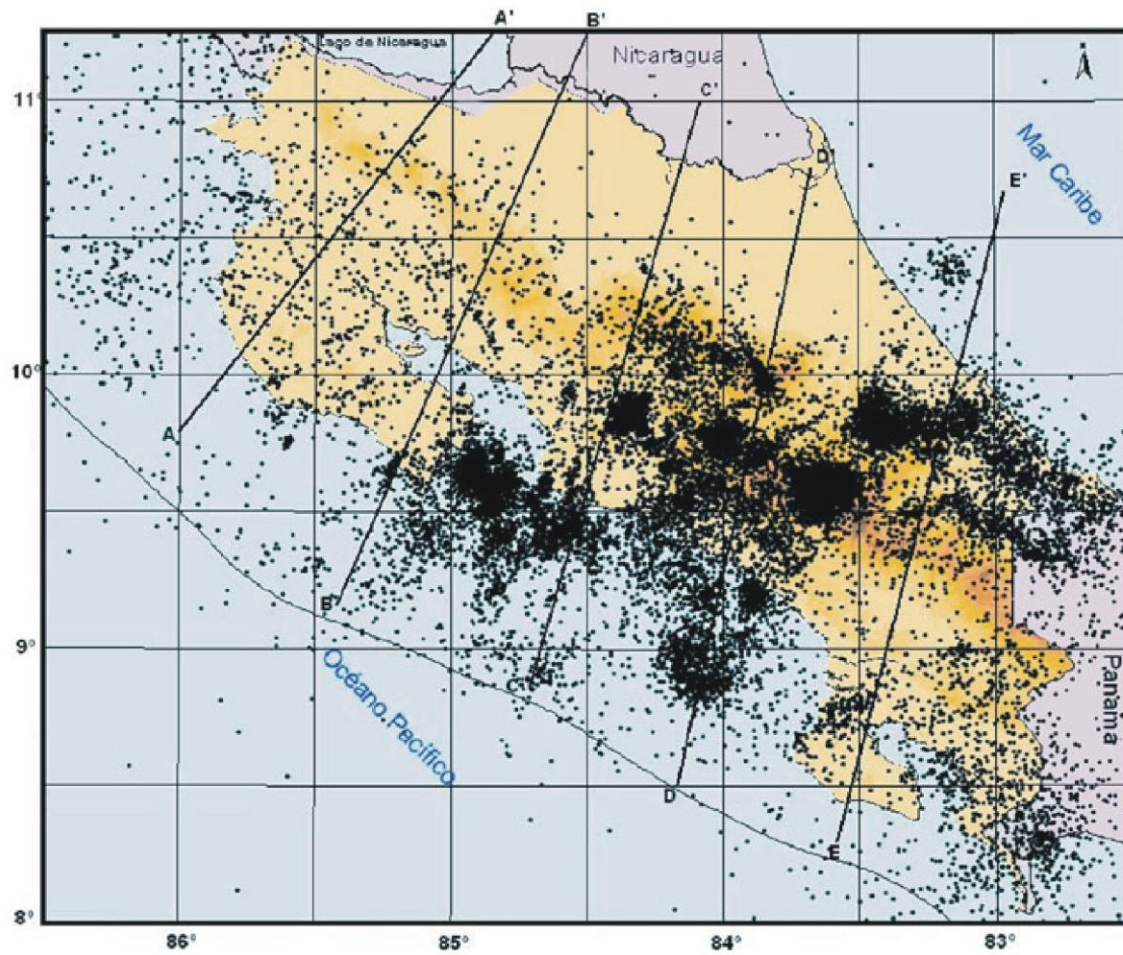


Figura 3. Sismicidad de Costa Rica y Nicaragua y secciones transversales de sismicidad para Nicaragua (N), el norte (NCR), la parte central (CCR) y el sur (SCR) de Costa Rica. Cada símbolo en el mapa y los perfiles representa un sismo. La Contorsión Brusca de Quesada se ubica justo en el límite entre las secciones NCR y CCR.

Definición de la brecha sísmica de Nicoya

Las brechas sísmicas han sido definidas como aquellos segmentos, a lo largo de límites activos de placas, que no han experimentado la repetición de un sismo de gran magnitud por varias décadas y que por lo tanto son considerados como sitios potenciales para la ocurrencia de terremotos futuros (Nishenko, 1985). Las brechas sísmicas representan así tanto un intervalo en el tiempo como un espacio geográfico donde no se ha liberado grandes cantidades de energía sísmica en límites de placas que sí han generado en el pasado grandes terremotos.

La ausencia de un terremoto importante desde octubre de 1950 en el segmento de Nicoya y la ocurrencia de los sismos ocurridos en 1990, a la entrada al Golfo de Nicoya al SE, y en 1992, frente a Nicaragua al NO, han permitido determinar la extensión geográfica de lo que definieron Protti et al., 2001 como la "brecha sísmica de Nicoya" (Fig. 4). Tanto la magnitud de los terremotos ocurridos en este segmento, como su actividad sísmica anormalmente baja durante el período intersísmico, brindan información adicional sobre las características de un futuro terremoto que pueda ocurrir por debajo de la Península de Nicoya.

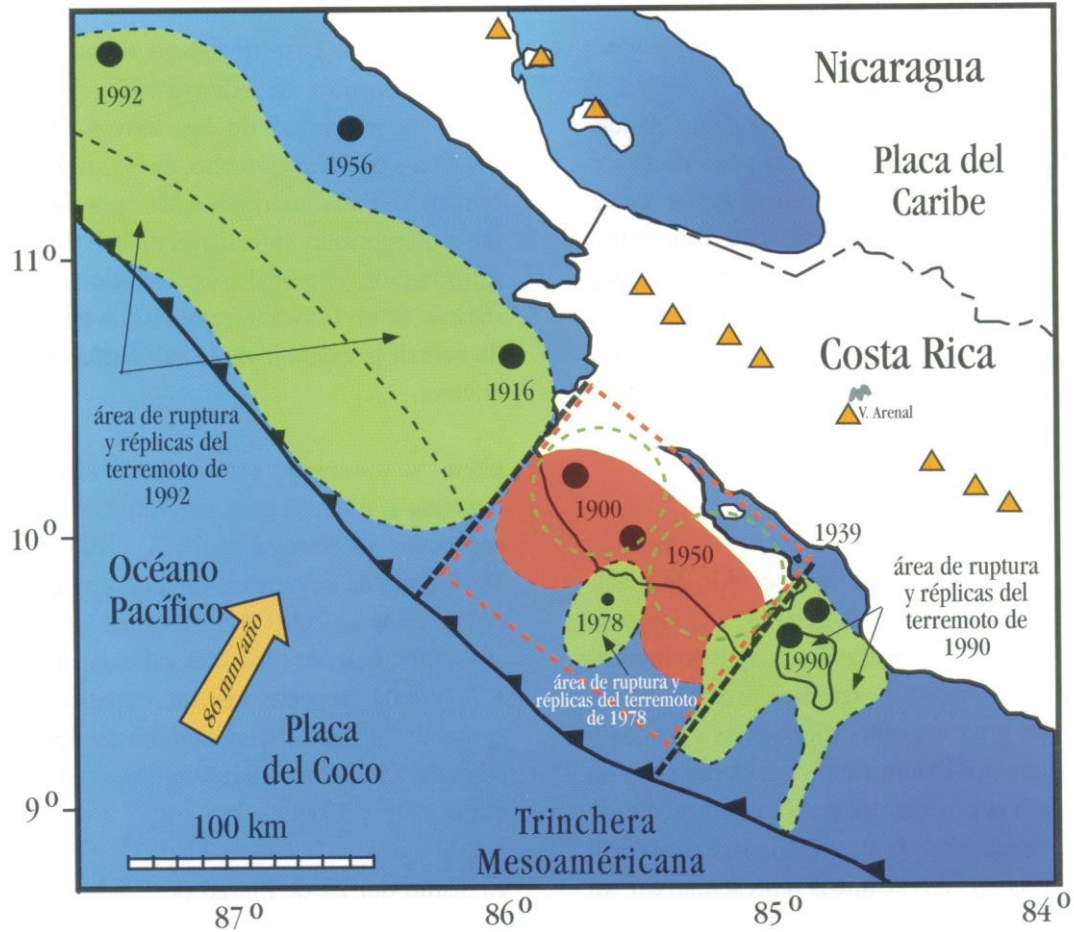


Figura 4 . Definición geográfica de la brecha sísmica de Nicoya. El rectángulo y los círculos en líneas interrumpidas marcan el límite máximo y mínimo del área de ruptura del próximo terremoto; el área en rojo marca la interpretación de Protti et al., 2001 de la forma de la aspereza sísmica.. Los triángulos negros marcan la ubicación de los volcanes activos y los círculos negros la ubicación de sismos importantes en la región.

Como se mencionó anteriormente, han ocurrido sismos de gran magnitud en el segmento de Nicoya en 1853, 1900 y 1950. Esto da un período de recurrencia de 49 años al 2000 y de 50.7 años al año 2005, con desviaciones estándar de 1.73 y 4.04 respectivamente. Estadísticamente, la menor desviación estándar sería de 1.5 si el sismo hubiera ocurrido entre 1998 y 1999.

El sismo del 25 de marzo de 1990 a la entrada al Golfo de Nicoya ocurrió en el extremo NO del segmento Cóbano-Herradura (Fig. 2) y su ruptura, tanto cosísmica como durante las réplicas, se propagó únicamente hacia el SE (Protti et al., 1995b). Este evento además de marcar claramente el límite SE de la brecha sísmica de Nicoya, da información sobre el contraste brusco, en acople elástico de la zona sismogénica, que existe entre los segmentos de Nicoya y Cóbano-Herradura. Esto último por cuanto ni siquiera este sismo de magnitud 7.0, justo en el límite, fue capaz de iniciar la ruptura de la brecha sísmica por debajo de la Península de Nicoya (Protti et al., 1995b). El límite SE de la brecha sísmica de Nicoya corresponde con la proyección hacia la trinchera de la Contorsión Brusca de Quesada.

El límite NO de la brecha sísmica de Nicoya lo marca el comportamiento de la secuencia de réplicas del sismo de Nicaragua del 2 de setiembre de 1992. Este sismo ocurrió en la parte NO del segmento Nicaragua-Papagayo y sus réplicas se propagaron hacia el SE deteniéndose súbitamente en el extremo NO de la Península de Nicoya, en el Golfo de Papagayo.

Hacia el arco volcánico, esta brecha sísmica se extiende hasta el eje del Golfo de Nicoya (Protti-Quesada, 1991), donde la superficie del plano de subducción (falla) se encuentra casi a los 40 km de profundidad. Con base en la información obtenida del sismo de 1990 y en las relocalizaciones de las réplicas del sismo de 1950 (Güendel, 1986), hacia la trinchera, el área de acople elástico comienza a unos 15 km de ésta, sobre el plano de subducción a profundidades cercanas a los 5 km. Sin embargo, dada su magnitud potencial, el futuro terremoto en este segmento podría llegar a propagar la ruptura hasta la trinchera.

En resumen, se define aquí la brecha sísmica de Nicoya como el intervalo transcurrido desde 1950 y la superficie de la zona de subducción ubicada por debajo de la Península de Nicoya. Esta área se muestra gráficamente en la Figura 4.

Redes de control geodésico existentes en la Península de Nicoya y alrededores

Para el monitoreo de la deformación cortical asociada a la acumulación de esfuerzos en la brecha sísmica de Nicoya, el OVSICORI-UNA opera y ocupa redes temporales y permanentes de control geodésico, principalmente de GPS, en la Península de Nicoya y sus alrededores. Estas redes son un

esfuerzo conjunto entre el OVSICORI-UNA, el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la Agencia Nacional de Aeronáutica Espacial de los Estados Unidos (JPL-NASA), la Universidad de California en Santa Cruz (UCSC), la Universidad de Miami (UM), el Centro Japonés de Ciencias Marinas y Tecnología (JAMSTEC) de Japón y el Instituto de Investigación de Terremotos de la Universidad de Tokio (ERI).

Junto con el JPL, el OVSICORI-UNA ha participado en la ocupación de monumentos geodésicos de una red de GPS en y alrededor de la Península de Nicoya (Fig. 5). Dicha red, que fue diseñada por el OVSICORI-UNA específicamente para el seguimiento de la brecha sísmica de Nicoya, ha sido ocupada en 1994, 1996, 1997 y más recientemente, con la participación de UM, en febrero del año 2000. En la costa oeste de la península, entre Puerto Carrillo y Sámara, el OVSICORI-UNA y el JPL-NASA operaron, hasta 1999, un receptor permanente de GPS en el mismo lugar donde opera la estación sismológica INDI de banda ancha.

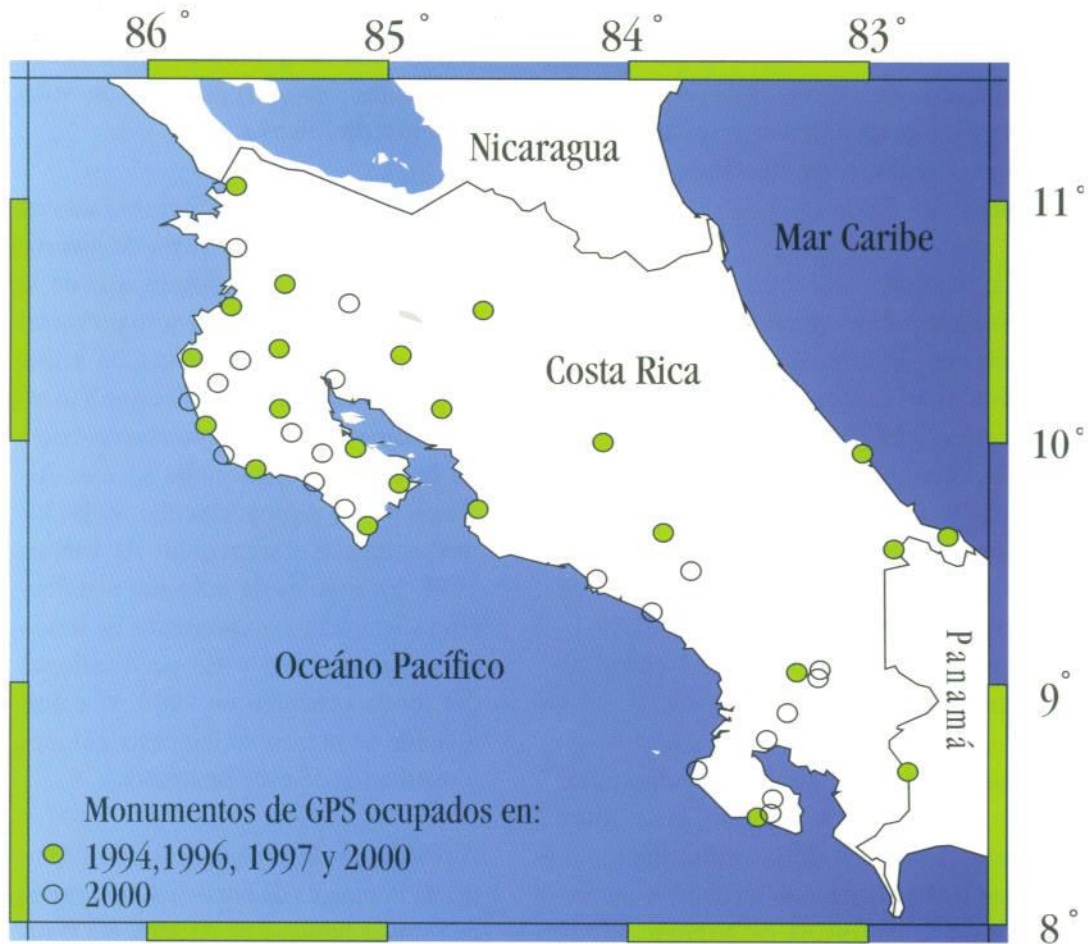


Figura 5. Distribución de los monumentos geodésicos de la red de GPS para estudios de deformación cortical en Costa Rica. Círculos rellenos marcan los sitios ocupados en los años 1994, 1996, 1997 y 2000; los círculos sin rellenar indican sitios ocupados únicamente en el año 2000.

Con el fin de incrementar la resolución de las mediciones de deformación y para modelar mejor la ubicación de los límites superior e inferior de la zona sismogénica por debajo de la Península de Nicoya, se construyó un perfil denso de monumentos de GPS a través de la península, perpendicular a la trinchera, para ocupaciones anuales (Fig. 6). Este perfil geodésico fue construido en el 2001 y ocupado, a finales del 2001 y 2002, con el apoyo financiero de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y la asesoría técnica de JAMSTEC y del ERI. También con el apoyo de esas tres instituciones japonesas se obtuvo la instrumentación para la instalación de tres estaciones permanentes de GPS. Estas estaciones fueron instaladas en los sitios INDI, HUAC y PUJE del perfil geodésico antes descrito (Fig. 6).

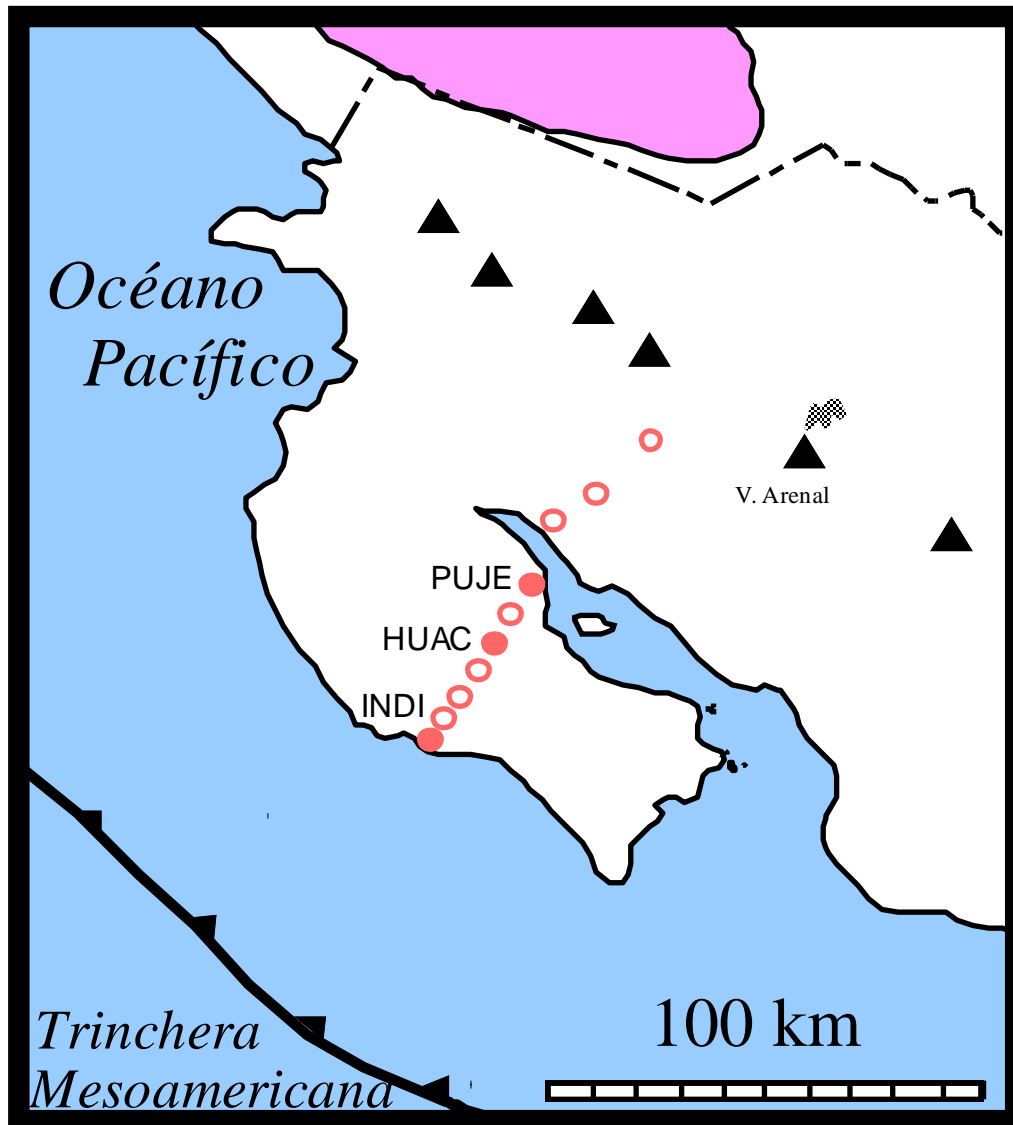


Figura 6. Ubicación de monumentos de GPS a lo largo de un perfil geodésico perpendicular a la trinchera Mesoamericana, a través de la Península de Nicoya. Círculos abiertos representan los monumentos ocupados en el 2001 y 2002 y los círculos rellenos indican tres de esos sitios que se transformaron en estaciones permanentes de GPS.

Además de estas redes de control geodésico, el OVSICORI-UNA y UCSC operan una red sísmológica de banda ancha en la Península de Nicoya. Una red más densa operó en la península, como parte del Experimento de la Zona Sismogénica (SEIZE), de diciembre de 1999 a julio del 2001.

Deformación cortical de la Península de Nicoya y sus alrededores

El régimen de esfuerzos y la deformación cortical inducida en la Península de Nicoya y sus alrededores, han sido registrados por medios geodésicos. Tres campañas de medición utilizando los sistemas globales de posicionamiento GPS (geodesia satelital) realizadas en Costa Rica por el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA y el OVSICORI-UNA en 1994, 1996 y 1997, y otra a principios del 2000, con colaboración además de la Universidad de Miami, han permitido registrar dicha deformación. Con base en los resultados de las tres primeras campañas (el procesamiento de los datos de la última campaña no se concluido aún) encontramos que la Península de Nicoya está siendo desplazada hacia el NE con respecto a la Placa del Caribe a velocidades de hasta 30 mm/año y presenta una subsidencia de su costa oeste de hasta 20 mm/año (Lundgren et al., 1999) (Fig. 7). Este empuje de la península hacia el NE y hacia abajo es una evidencia clara del fuerte acople existente entre las Placas del Coco y del Caribe a lo largo del segmento de subducción de Nicoya (Fig. 8). De los datos de GPS también ha sido posible extraer una componente de desplazamiento de la península hacia el NO, paralelo a la trinchera, sugiriendo que la península se podría estar comportando como una cuña del arco externo, con movimiento propio independiente de la Placa del Caribe (Lundgren et al., 1999).

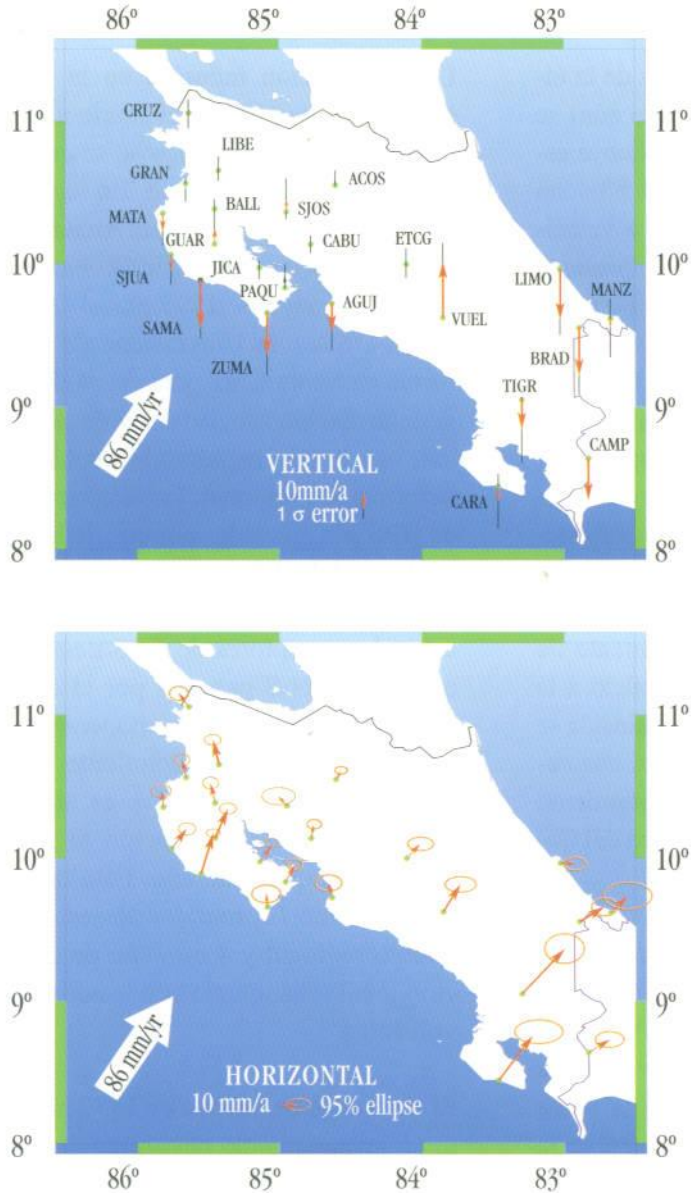


Figura 7. Vectores de desplazamiento cortical vertical y horizontal, con respecto a la placa del Caribe, obtenidos a partir de tres campañas de GPS realizadas en 1994, 1996 y 1997 (Lundgren et al., 1999). Note la rápida subsidencia de la costa oeste de la Península de Nicoya y el desplazamiento de ésta hacia el NE. Los vectores de gran magnitud en la región sur de Costa Rica son el resultado del Bloque de Panamá con respecto a la Placa del Caribe e incluyen deformación posterior al sismo del Valle de la Estrella del 22 de abril de 1991.

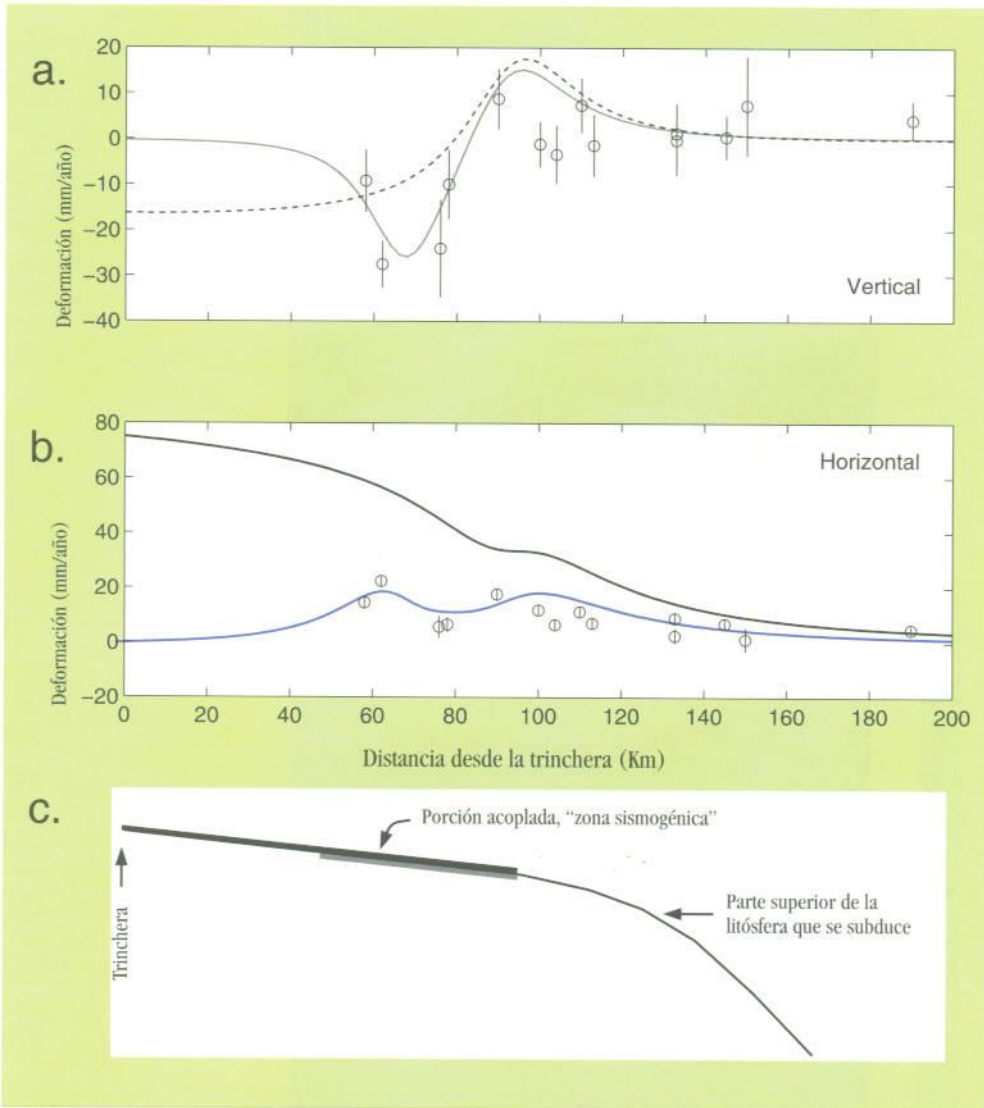


Figura 8. Modelaje unidimensional de la deformación en la Península de Nicoya producto de una falla parcialmente acoplada (50 %) desde la trinchera (línea interrumpida) y solo por debajo de la península (línea continua) (modificado a partir de Lundgren et al., 1999). a) deformación vertical observada con sus respectivos errores y deformación esperada para ambos modelos; b) deformación horizontal observada con sus respectivos errores y deformación esperada para ambos modelos; c) diagrama de la geometría de la zona de contacto utilizada en el modelaje y ubicación de las zonas acopladas para cada modelo.

Datos de GPS de campañas regionales en 1988 y 1991, en las que también participó el OVSICORI-UNA, muestran una deficiencia en la convergencia entre la isla del Coco (sobre la placa del mismo nombre) y Liberia (sobre la Placa del Caribe, justo al NE de la Península de Nicoya). Dixon (1993)

modeló esta deficiencia de deslizamiento y la interpretó como un bloqueo en la zona de contacto entre las placas, a una profundidad de 25 km bajo la Península de Nicoya (Fig. 9).

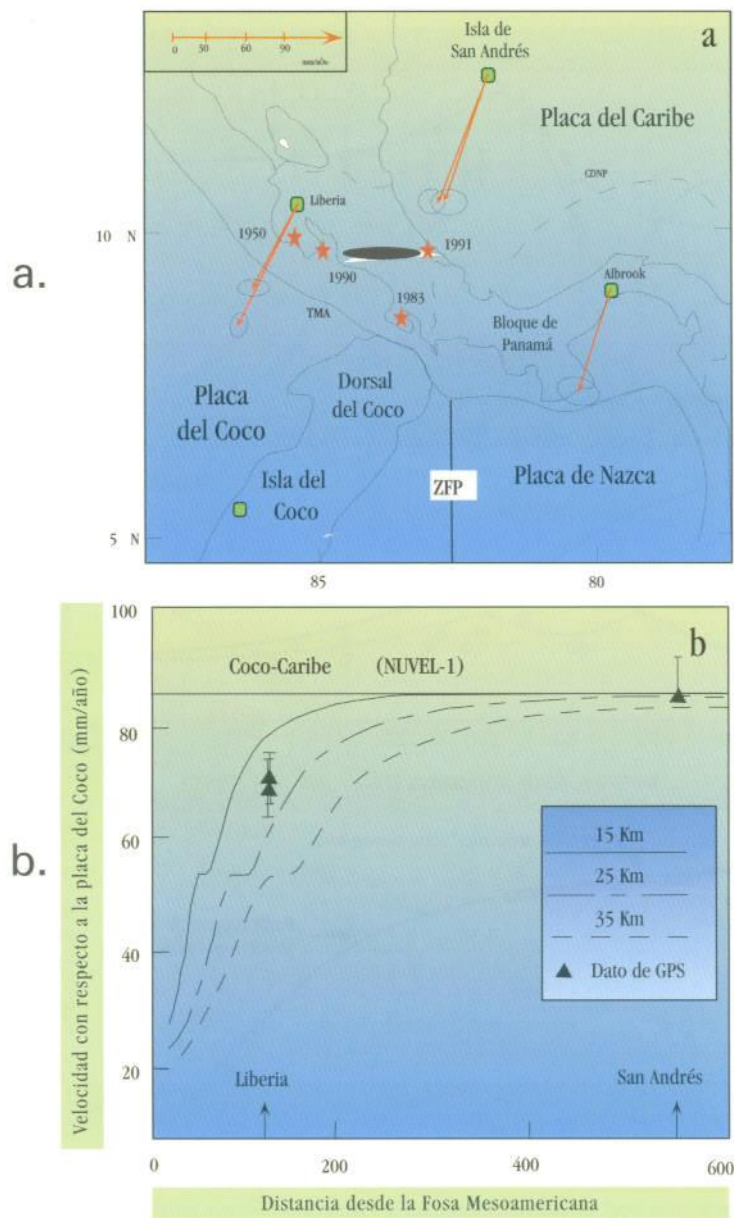


Figura 9. Desplazamientos teóricos y observados de la Placa del Caribe con respecto a la Placa del Coco para un sitio en la Isla de San Andrés y otro en Liberia (modificado a partir de Dixon 1993). a) Mapa con vectores, ubicación de sitios (círculos sólidos) y terremotos importantes (estrellas); b) modelaje de los resultados para tres modelos de fallas acoplados bajo la Península de Nicoya a 15, 25 y 35 km de profundidad.

El terremoto de Nicoya de 1950 produjo un levantamiento cosísmico de alrededor de 1 m en la costa oeste de la península (Marshall y Anderson, 1995) y la mayor parte de ese levantamiento se ha recuperado como subsidencia durante el período intersísmico. Al final del período intersísmico, previo a la ruptura principal, ocurre, en zonas de subducción bien acopladas, una subsidencia rápida (deformación elástica) de las áreas donde cosísmicamente ocurrirá levantamiento (deformación visco-elástica). Como se mencionó anteriormente, la subsidencia actual en la costa oeste de la península es del orden de 20 mm/año. Esta subsidencia presísmica es posible de observarla macroscópicamente en la región entre playa Guiones y Sámará y es la responsable de la erosión de la carretera costera en playa Carrillo por parte del oleaje durante mareas muy altas. En playa Guiones esta subsidencia ha causado la erosión de la playa y también variaciones importantes en el equilibrio entre erosión y depositación (Geol. Gregorio Escalante, comunicación personal, 1997, 1998, 1999).

Los modelos viscoelásticos simples predicen, para sismos de subducción, un levantamiento cortical hacia la trinchera en la parte más superficial de la falla y subsidencia o hundimiento sobre la parte más profunda. La Figura 10 muestra el patrón de deformación esperado en y alrededor de la Península de Nicoya, para un sismo con 25% de deslizamiento sísmico en la parte más superficial y de menor ángulo (8°) de la zona de acople (de 6 a 12 km de profundidad, o sea, una ruptura que no se extendería hasta la trinchera) y 60% de deslizamiento en la parte más profunda y más inclinada (29°) de la falla (de 12 a 40 km de profundidad). Este modelo predice un levantamiento de la costa oeste de la península de casi un metro y un hundimiento en el Golfo de Nicoya y el valle del Tempisque de casi 20 centímetros. Dado el deslizamiento en dos fallas con diferente ángulo de inclinación, los modelos viscoelásticos de deformación sugieren, además, la ocurrencia de una subsidencia relativa (menor levantamiento) en la plataforma continental que involucra esfuerzos horizontales extensivos en esa región. Esto podría explicar la presencia de una cuenca sedimentaria y del fallamiento normal observados por medio de reflexión sísmica en la plataforma continental.

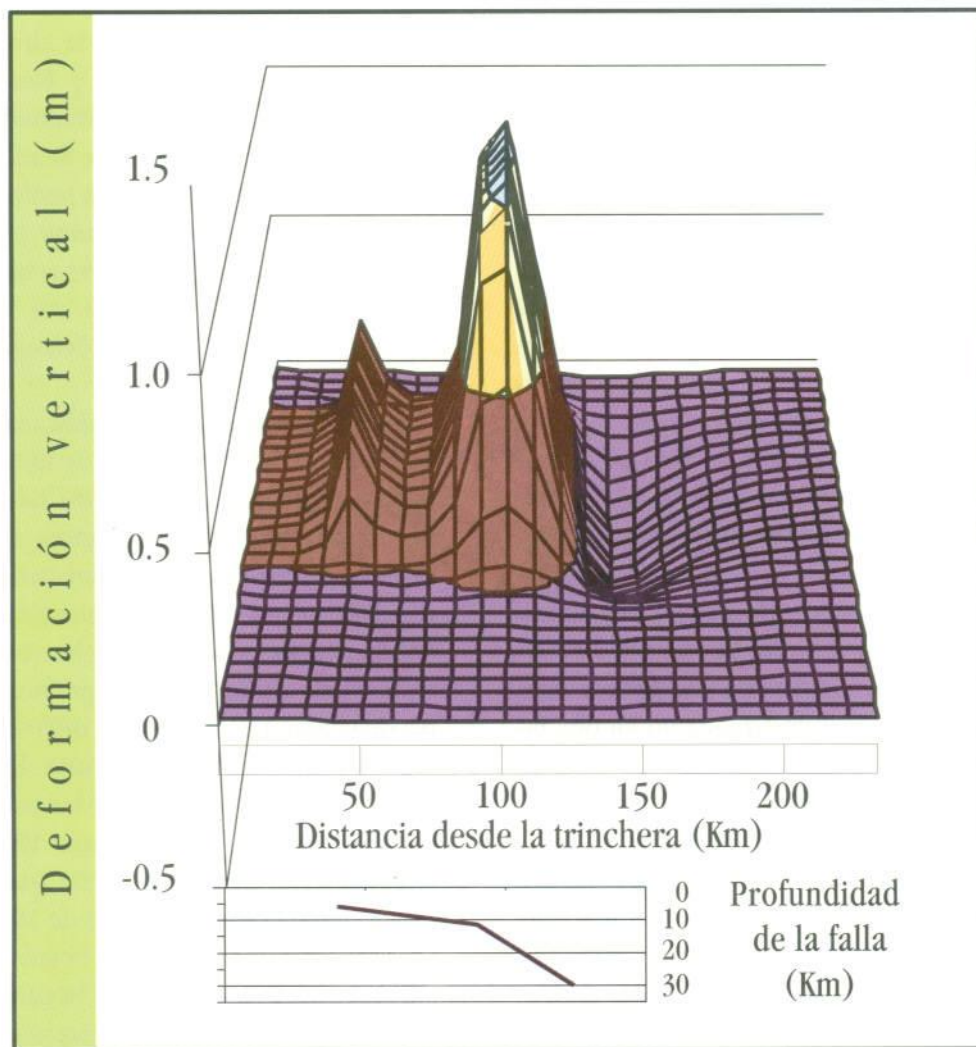


Figura 10. Patrón de deformación esperado en y alrededor de la Península de Nicoya para un sismo con 25% de deslizamiento sísmico en la parte más superficial y de menor ángulo (8°) de la zona de acople (de 6 a 12 km de profundidad) y 60% de deslizamiento en la parte más profunda y más inclinada (29°) de la falla (de 12 a 40 km de profundidad).

CONCLUSIONES

Se ha definido la extensión geográfica de la brecha sísmica de Nicoya y se ha ubicado en su contexto tectónico regional. Con base en su tamaño y tasas de deformación, se estima que esta brecha tiene a la fecha suficiente deslizamiento acumulado para generar un terremoto de magnitud cercana a los 7.5 grados. La magnitud del deslizamiento sísmico acumulado desde 1950 indica que

el sismo de Nicoya debe ocurrir. No se puede saber cuándo este evento tendrá lugar, pero con base en datos históricos (tiempos de recurrencia y la ausencia de registros de terremotos de magnitud superior a 8) se interpreta que será pronto (pocos años).

En el período presísmico hemos ya registrado deformaciones corticales elásticas compatibles con un fuerte acople en la zona de subducción por debajo de la Península de Nicoya. Es así como la metodología de los sistemas de posicionamiento global prueban nuevamente ser una herramienta efectiva en la documentación de los ciclos sísmicos y reafirman su potencial aplicación en la predicción sísmica.

Para el OVSICORI-UNA es un compromiso histórico documentar, lo mejor posible, la deformación en la banda de registro más ancha posible (de 100 Hz a decenas de años) y por el mayor tiempo posible, de tal forma que se pueda dejar registros de las fases presísmica, cosísmica y postsísmica del próximo sismo de Nicoya. Esta información será invaluable para la predicción sísmica en Costa Rica y la región del circumpacífico.

Agradecimientos

La información presentada aquí fue el resultado del trabajo de muchos investigadores e instituciones. Debemos dejar expreso nuestro agradecimiento a Rodolfo van der Laet, Enrique Hernández y Tomás Marino del OVSICORI-UNA, a Paul Lundgren del Laboratorio de Propulsión a Chorro, a Timothy Dixon de la Universidad de Miami, a Susan Schwartz de la Universidad de California en Santa Cruz, a Edmundo Norabuena del Instituto Geofísico del Perú (actualmente en la Universidad de Miami), a Yoshiyuki Kaneda y Koichiro Obana del Centro Japonés de Ciencias Marinas y Tecnología, y a Takeshi Inuma, Shin'ini Miyasaki y Teruyuki Kato del Instituto de Investigaciones de Terremotos de la Universidad de Tokio.

Referencias bibliográficas

- De Mets, C., R.G. Gordon, D.F. Argus y S. Stein 1990 Current plate motions, *Geophys. J. Int.*, 101:425-478.
- Dixon, T. 1993 GPS Measurement of relative motion of the Cocos and Caribbean plates and strain accumulation across the Middle America Trench, *Geophys. Res. Lett.*, 20- 20: 2167-2170.
- Fisher, D.M., T.W. Gardner, J.S. Marshall y W. Montero 1994 Kinematics Associated With Late Tertiary and Quaternary Deformation in Central Costa Rica: Western Boundary of the Panamá Microplate; *Geology*, 22: 263-266.

- Goes, S.D.B., A A. Velasco, S. Schwartz y T. Lay 1993 The April 22, 1991, Valle de la Estrella, Costa Rica (Mw=7.7) earthquake and its tectonic implications: a broadband seismic study, *J. Geophys. Res.*, 98: 8127-8142.
- Güendel, F. 1986 Seismotectonics of Costa Rica: an analytical view of the southern terminus of the Middle American Trench, doctoral dissertation, University of California, Santa Cruz, 1986.
- Güendel, F. y J. Pacheco 1992 The 1990-1991 seismic sequence across central Costa Rica: evidence for the existence of a micro-plate boundary connecting the Panama deformed belt and the Middle America trench, *Eos Trans., Am. Geophys. Un.*, 73: 399.
- Jacob, K.H. y J. Pacheco 1991 The M-7.4 Costa Rica earthquake of April 22, 1991: tectonic setting, teleseismic data, and consequences for seismic hazard assessment, *Earthquake Spectra*, 7- B.
- Lundgren, P.; Protti, M.; Donnellan, A; Heflin, M.; Hernández, E. y D. Jefferson 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. S., D. M. Fisher y T.W. Gardner 1993 Western margin of the Panama microplate, Costa Rica: kinematics of faulting along a diffuse plate boundary, *Geol. Soc. Am. Abstracts with programs* 25- 6: A-284.
- Marshall, J.S. y R. S. Anderson 1995 Quaternary uplift and seismic cycle deformation, Península de Nicoya, Costa Rica, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107- 4: 463-473.
- Nishenko, S.P. 1985 Seismic Potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: a quantitative reappraisal, *Jour. Geophys. Res.*, 90-B5: 3589-3615.
- Ponce, D.A. y J.E. Case 1987 Geophysical interpretation of Costa Rica, in: *Mineral Resources Assessment of the Republic of Costa Rica*, U.S. Geol. Surv., Misc. Invest. I-1865: 8-17.
- Protti-Quesada, J. M. 1991 Correlation between the age of the subducting Cocos plate and the geometry of the Wadati- Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica; MSc. dissertation, University of California, Santa Cruz, 66 p.
- Protti-Quesada, J. M. 1994 The Most Recent Large Earthquakes in Costa Rica (1990 Mw 7.0 and 1991 Mw 7.6) and Three-dimensional Crustal and Upper Mantle P-wave Velocity Structure of Central Costa Rica, Ph.D. dissertation, University of California, Santa Cruz, 116 p.
- Protti, M. y S. Schwartz 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. Güendel, F. y K. McNally 1994a 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., Güendel, F. y McNally, K. 1995a Correlation between the age of the subducting Cocos Plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica. In: *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate Boundary in Southern Central America*, Mann, P. ed.: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 295: 309-326.
- Protti, M.; and 14 other co-authors 1995b 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. *Jour. Geophys. Res.*, 100- B10: 20345-20358.
- Protti, M; F. Guendel, F.; E. Malavassi; 2001; Evaluación del potencial sísmico de la Península de Nicoya; 1ª ed.; Editorial Fundación Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 144 p.
- Silver, E. A., D.L. Reed, J.E. Tagudin y D.J. Heil 1990 Implications of the north and south Panama thrust belt for the origin of the Panama orocline. *Tectonics*, 9: 261-281.