

SISMOLOGÍA Y SISMOTECTÓNICA

TERREMOTOS FUERTES OCURRIDOS EN LA DEPRESIÓN NICARAGÜENSE EN EL PERÍODO 2014-2016

Alvarez, Leonardo¹; Rodríguez, Ana María¹; González, O'Leary²; Moreno, Bladimir²

¹Instituto Nicaragüense de estudios Territoriales (INETER, Nicaragua)

²Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAI, Cuba)

RESUMEN

Las principales ciudades nicaragüenses se encuentran a unos 30-40 km de la costa del Pacífico, dentro de lo que es conocido como Depresión Nicaragüense. Si a esto se une la ubicación de la zona de subducción de la placa Cocos bajo la del Caribe, alejada de la costa y caracterizada por una inclinación abrupta, se explica que los mayores daños debidos a terremotos se asocien a eventos ocurridos en la Depresión Nicaragüense y no en dicha zona. Luego de varios años sin ocurrencia de terremotos fuertes en la misma (el último había ocurrido en 2005 en las cercanías de la isla Ometepe, en el lago Cocibolca), el período 2014-2016 se caracterizó por la ocurrencia de 2 eventos de magnitud superior a 6 y varios de magnitud superior a 5. El trabajo realizado consistió en la determinación de los tensores de momento usando estaciones locales para los eventos mas fuertes, relocalización de epicentros, análisis de la historia temporal del terremoto mas fuerte en el periodo, así como un análisis de las características espacio - temporales de la ocurrencia de eventos de menor magnitud asociados a cada uno de ellos. Se comparan los resultados con algunas investigaciones geológicas y se realiza una interpretación geodinámica de los mismos.

Palabras clave: terremotos fuertes, tensores de momento, estadística de agrupaciones de terremotos

INTRODUCCIÓN

Históricamente las mayores afectaciones por terremotos en las principales ciudades de Nicaragua son debidas a eventos ocurridos en la Depresión Nicaragüense. Diversos factores han influido en esto, en primer lugar dichas ciudades están alejadas de la costa del Pacífico, a pesar de que los terremotos mas fuertes con magnitudes máximas posibles de 7.5-8 ocurren en la zona de subducción de la placa Cocos bajo la del Caribe. Dicha subducción se inicia algo alejada de la costa y con un ángulo pronunciado, por lo que a nivel de la costa ya las profundidades de los terremotos alcanzan unos 40-50 km, aumentando grandemente tierra adentro. Si a esto se une que estas ciudades mencionadas se encuentran relativamente alejadas de la costa siguiendo prácticamente la línea de la cadena volcánica, resulta que la sismicidad debida a la subducción en su mayoría ocurre a una profundidad superior a los 90-100 km, teniendo un efecto comparativamente menor que la asociada al fallamiento superficial, que aunque con menores magnitudes máximas posibles (unos 6.5), dadas su baja profundidad y cercanía a las ciudades produce efectos muy superiores. Ejemplo de ello fue el terremoto de Managua de 1972, que con magnitud $M_s=6.2$ destruyó casi toda la ciudad. La gran incógnita siempre ha sido (y perdura hasta nuestros días), la identificación de los lugares donde pueden ocurrir estos eventos dentro de la cadena volcánica y los trabajos de estimación de la peligrosidad sísmica, presentan toda la cadena volcánica como una zona de sismicidad uniforme [ver, por ejemplo, Molina et al., (2008)].

Un enfoque sismotectónico del problema, a nuestro juicio muy coherente, es debido a los trabajos de La

Femina et al. (2009). Según estos autores, la información disponible de mediciones geodésicas y mecanismos focales de terremotos fuertes, permiten plantear un esquema donde la zona entre la depresión y el Pacífico se mueve hacia el Noroeste, lo que fuerza un fenómeno que llaman de “librero” (bookshelf), esto es, un conjunto de fallas de dirección noreste-suroeste caracterizadas por un desplazamiento de rumbo izquierdo. Por otra parte, en el período 2014-2015 ocurrieron varios terremotos fuertes seguidos de réplicas y una serie de terremotos que son analizados detenidamente en este trabajo e interpretados a la luz de ese modelo sismotectónico.

MÉTODO

Fueron estudiados varios grupos de terremotos:

- 2014 abril – julio, mitad occidental del lago Xolotlán, con eventos principales el día 10 de abril (cuyo epicentro se ubica en los alrededores del volcán Momotombito) y el día 14 de abril (cuyo epicentro se ubica en la península de Chiltepe)
- 2015 septiembre – octubre, zona de El Sauce, serie con evento máximo el día 11 de septiembre
- 2016 junio-diciembre, zona de Puerto Morazán, con evento máximo el día 10
- 2016 septiembre - octubre, zona de El Hoyo, con evento máximo el día 15 de septiembre

Los métodos utilizados, no siempre los mismos en todos los casos, fueron:

- ➔ La relocalización de epicentros, ya sea por prueba de diferentes modelos de corteza o por el método de la doble diferencia (DD) para conocer detalles de su distribución espacial y la posible asociación con un plano de fallas conocido.
- ➔ La determinación del tensor de momento sísmico de los eventos mas fuertes y su descomposición, para conocer los posibles planos de falla, el desplazamiento en el foco así como la energía liberada en el mismo.
- ➔ El comportamiento temporal de la liberación de energía para conocer, entre otros, detalles de la posible presencia de eventos premonitores o réplicas.
- ➔ El comportamiento temporal del número diario de eventos y su ajuste a distribuciones teóricas para determinar parámetros que permitan estimar el tiempo de duración de las réplicas y su número.
- ➔ El estudio de la historia temporal del foco.

El trabajo conllevó el uso de diversos programas confeccionados por otros autores y la escritura de programas y guiones (scripts) por los autores para diversas etapas del procesamiento de los datos. Los programas mas importantes confeccionados por otros autores fueron:

- x ISOLA para la determinación del tensor de momento sísmico (Sokos y Zahradnik, 2008, 2013)
- x MoPaD para la descomposición del momento sísmico (Krieger y Heimann, 2012)
- x hypoDD para relocalización de epicentros (Waldhauser, 2001; Waldhauser et al. 2000)
- x AFT para el ajuste de series temporales terremoto principal – réplicas (Ogata, 1983; Utsu, 2002)
- x TBWI para la inversión de formas de onda y determinación de la historia temporal del desplazamiento en el foco (Kikuchi y Kanamori, 1982, 1986, 1991)

Aparte de esos fueron usados otros programas como el SAC2000 (Goldstein et al. 2003) y el paquete SEISAN (Ottemöller et al.,2016). Para preparar gráficos y mapas fueron usados el gnuplot (Williams y Kelley 2010) y el paquete GMT (Wessel y Smith, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a) Terremotos del oeste del lago Xolotlán en 2014 (Moreno et al., 2014)

La actividad sísmica empezó el día 10 de abril en que ocurrió el terremoto máximo ($M=6.2$) en la zona del volcán Momotombito, y el día 14 de abril ocurrió un terremoto de $M=5.4$ en la península de Chiltepe. Los errores de determinación de los epicentros en la red nicaragüense no permitieron inicialmente aislar ambos eventos y en sus inicios se consideró la existencia de una amplia zona de réplicas. Sin embargo se realizó

un intenso trabajo de relocalización de los epicentros de los terremotos mas fuertes ocurridos en abril usando el algoritmo hypoDD (Waldhauser, 2001; Waldhauser et al. 2000) para los eventos principales y usando dentro del SEISAN (Ottemöller et al., 2016) variantes del modelo de corteza. Al final resultó que con un modelo determinado para Costa Rica (Matumoto et al., 1974) los errores de determinación disminuían y los resultados eran compatibles con los determinados con el algoritmo hypoDD. En la figura 1 se presenta los mapas de epicentros correspondientes y en la figura 2a un mapa que cubre el periodo abril-diciembre de 2014, con profundidades hasta 40 km donde se incluyen todas las relocalizaciones. Es evidente del análisis de estos mapas que se está en presencia de dos procesos diferentes terremoto principal-réplicas, donde el primero de ellos, iniciado en 10 de abril pudo servir de disparador del segundo que se inició el 14 de abril.

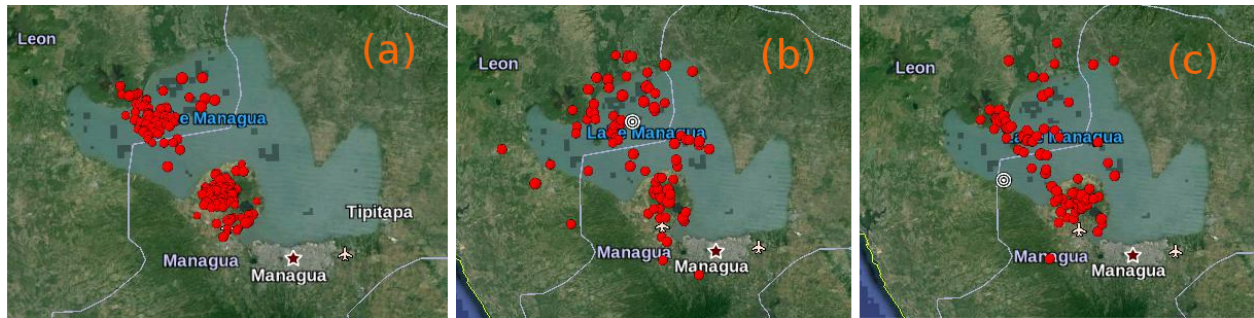


Fig.1. (a) Epicentros relocalizados con el algoritmo hypoDD, (b) Epicentros localizados usando el modelo de Matumoto et al (1974), (c) Epicentros localizados con el modelo en uso en la red de estaciones de Nicaragua.

Se realizó un estudio detallado de los tensores de momento de los eventos más fuertes en ambas zonas, 4 para el primer proceso y 2 para el segundo (tabla1). En la figura 2b se presenta un mapa con la ubicación de los eventos estudiados que se representan a partir del doble par de fuerzas asociado. Para los eventos del 10 al 11 y el primero de los del 14 de abril se pudo determinar el plano de falla por la relación epicentro-centroide, correspondiendo ambos a una dirección aproximadamente noreste-sureste, y aunque las rupturas no son simples, predomina la componente de corrimiento por el rumbo izquierdo.

Tabla 1. Soluciones halladas del tensor de momento sísmico para los eventos mas fuertes. Se indican las componentes del tensor (M_{ij}) y el % de doble par de fuerzas de la solución.

Fecha	Hora	Mrr	Mtt	Mpp	Mrp	Mrt	Mtp	% DP
Primer grupo								
2014 04 10	23:27:45.0	-0.099	-1.349	1.448	-0.063	-0.130	-0.312	86.1
2014 04 11	00:01:22.1	-1.080	-3.771	4.872	6.611	-2.672	-2.396	78.4
2014 04 19	13:44:28.3	-0.789	-4.194	4.984	1.282	-1.966	6.898	91.8
2014 04 22	04:18:38.4	-2.141	-2.914	5.155	4.656	-3.641	-3.397	64.1
Segundo grupo								
2014 04 14	05:07:03.0	-1.058	-5.787	6.845	-0.526	0.546	-0.276	69.8
2014 04 14	05:43:52.9	0.359	-0.590	0.231	-0.829	0.452	1.452	32.3

Otro estudio realizado fue el de historia de la fuente y distribución de los deslizamientos usando el método de Kikuchi y Kanamori (1982, 1986, 1991) cuyo resultado se muestra en la figura 3. Se puede observar en la orientación de los vectores de deslizamientos que predomina la ruptura por rumbo pero con componente normal. La mayor ruptura se concentra al final del plano de falla y en los primeros 3 km de profundidad. El proceso solo tuvo una duración de 10 segundos aproximadamente.

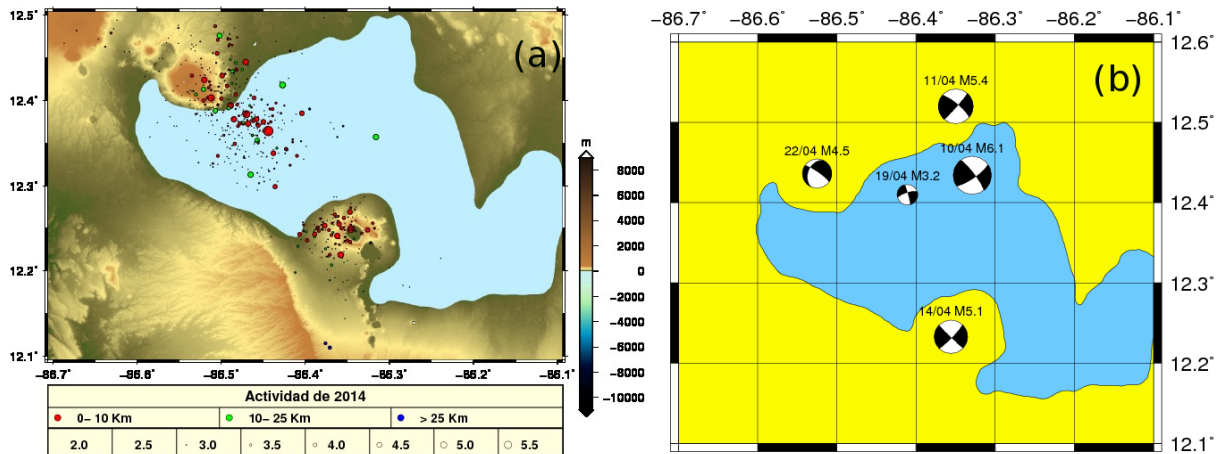


Fig. 2. (a) Mapa de epicentros para $M > 2$ y $h < 40$ km correspondientes al período abril-diciembre. Se incluyen los epicentros relocizados. (b) Soluciones de planos de falla asociadas a los tensores de momento de la tabla 1. Corresponden a procesos de corrimiento por el rumbo izquierdo con orientación NE-SO y en algunos casos con cierta componente normal.

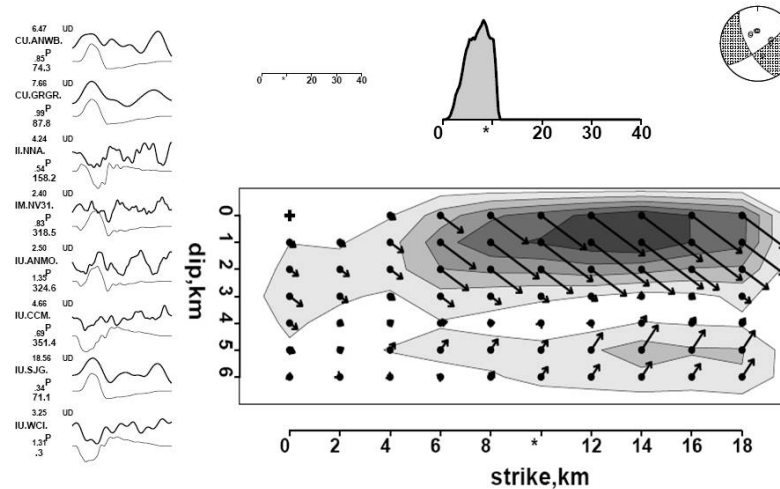


Fig. 3. Historia de la fuente y distribución de los deslizamientos.

Finalmente se realizó un análisis estadístico de la ocurrencia temporal de réplicas, las cuales fueron ajustadas a diferentes modelos teóricos usando el programa AFT (Ogata, 1983; Utsu, 2002). El modelo que presentó el mejor ajuste para el caso del sismo del 10 de abril fue el de Otsuka (formula 1) con valores de coeficientes ($a_1=1.727 \cdot 10^{-15}$, $a_2=37.069$, $a_3=0.123$, $a_4=0.841$ y $a_5=0.00736$)

$$n(t) = a_1 + a_2 \cdot \exp(-a_5 \cdot t) / (t + a_3) \cdot a_4 \quad (1)$$

para el segundo grupo hay muy pocos eventos y no se logra un ajuste confiable de los modelos.

b) Terremotos en la zona de El Sauce en 2015 (González et al, 2015).

Precedida de una actividad poco significativa desde el 9 de agosto de 2015, el 11 de septiembre comenzó una serie de terremotos cercana a la localidad de El Sauce cuyo comportamiento es el característico de un enjambre de terremotos. Esta zona se encuentra en el borde “interior” de la depresión de Nicaragua. Primeramente se procedió a un proceso de relocación de eventos, que como en el caso anterior se hizo utilizando el método de la doble diferencia (hypoDD) o usando el SEISAN con el modelo de Costa Rica. El resultado de esta relocación se muestra en la figura 4a. Los eventos son superficiales, la mayoría de ellos se localizan entre 5 y 7 km de

profundidad. El ancho de aproximadamente 2 km que definen los epicentros se encuentra dentro del margen de error que se obtuvo en la precisión de las soluciones. En el resto del año la ubicación de los eventos mantiene la tendencia de los relocalizados pero con una dispersión mucho mayor. En este caso también se realizó la determinación del tensor de momento sísmico para los 5 eventos mas fuertes de la serie (tabla 2, figura 4b). Todos ellos tienen una solución de plano de falla asociada de tipo normal con una orientación N-S. No se logró determinar, entre los 2 planos de las soluciones cual correspondía al plano de falla.

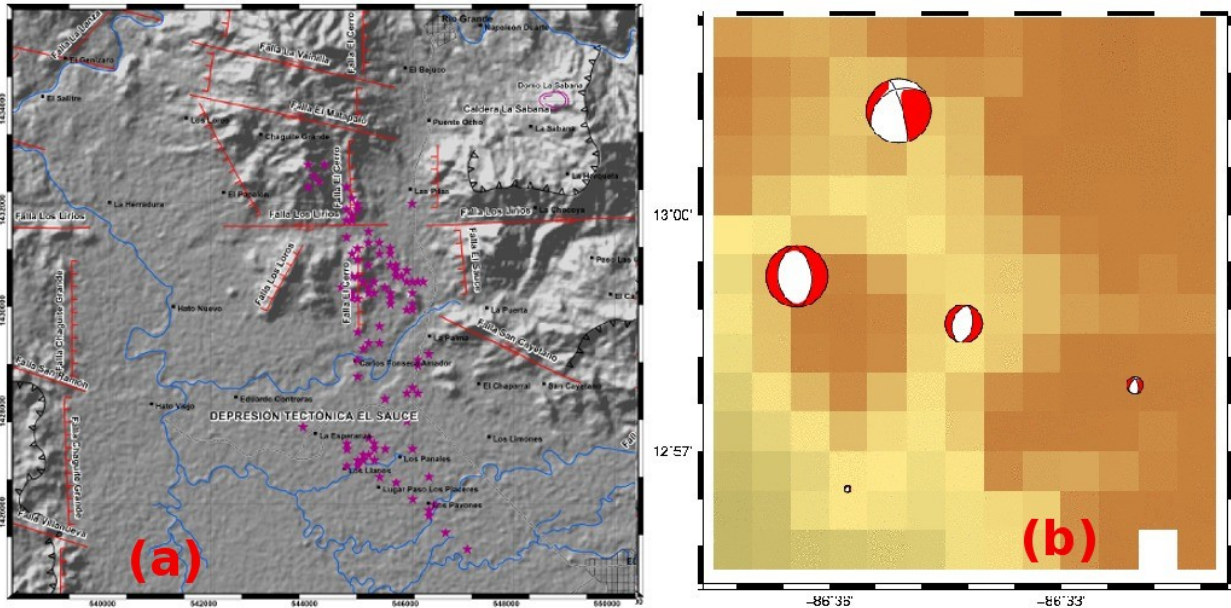


Fig. 4. (a) Relocalización de eventos en la zona de El Sauce ocurridos en septiembre 2015. (b) Mapa de las soluciones del tensor de momento con planos de falla superpuestos.

Tabla 2. Soluciones halladas del tensor de momento para los terremotos de la serie de El Sauce. Se indican las componentes RCONV-047 del tensor (M_{ij}) y el % de doble par de fuerzas de la solución.

Fecha	Hora	Mrr	Mtt	Mpp	Mrp	Mrt	Mtp	%DP
2015 09 12	11:22:01.9	-3.189	-1.355	4.544	-1.300	1.544	1.246	71.8
2015 09 12	19:35:52.2	-0.873	-0.972	1.845	-0.742	2.236	1.162	81.9
2015 09 14	08:13:01.3	-8.110	0.824	7.285	-0.713	3.128	1.482	84.4
2015 09 24	06:23:37.5	-3.637	0.319	3.318	-0.129	0.703	-0.250	83.9
2015 10 11	23:09:20.5	-1.403	0.082	1.320	-0.042	0.258	0.301	97.1

c) Terremotos de Puerto Morazán [Rodríguez et al. (2016a); Alvarez y Segura (2016)]

El 10 de junio de 1978 ocurrió un terremoto de $M=6$ en los alrededores de Puerto Morazán, el cual fue seguido de numerosas réplicas. La orientación de la zona de réplicas tiene una tendencia NE-SO, tal como se ve en el mapa de epicentros de la figura 5a. No tuvo réplicas de magnitud superior a 5 y su número disminuyó rápidamente en los primeros días. Se realizó un ajuste del número diario de eventos a diversas distribuciones teóricas resultando un mejor ajuste para el modelo modificado de Omori (fórmula 2, figura 5b), aunque un resultado muy cercano se obtiene con el modelo de Otsuka (Ogata, 1983, Utsu. 2002).

$$n(t) = a_1 + a_2/(t + a_3)^{a_4} \quad (2)$$

Los valores de los coeficientes son: $a_1=0.309$, $a_2=777.0$, $a_3=2.577$ y $a_4=1.519$.

Para el terremoto principal se determinó el tensor de momento sísmico, cuyos parámetros se presentan en la tabla 3. El tipo de mecanismo de la solución de planos de falla asociada es predominantemente de corrimiento por el rumbo izquierdo (con una ligera componente de tipo normal). Fue posible determinar, por la relación centroe-epicentro, que el plano de falla es el que sigue una dirección NE-SO (figura 7b).

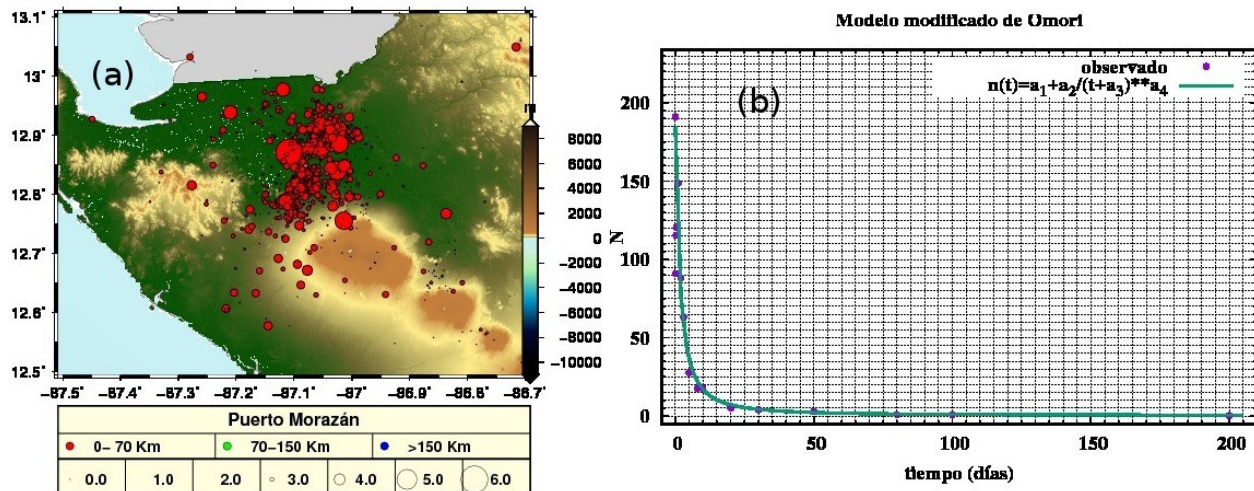


Fig. 5. (a) Epicentros de terremotos de la región de estudio desde septiembre hasta diciembre de 2016 ($M > 2$, $h < 40$ km). (b) Ajuste del número diario de ocurrencia de eventos al modelo modificado de Omori. Los datos experimentales se representan promediados, el ajuste se hizo con la serie temporal original.

Tabla 3. Soluciones halladas del tensor de momento para el terremoto principal de Puerto Morazán. Se indican las componentes del tensor (M_{ij}) y el % de doble par de fuerzas de la solución.

Fecha	Hora	Mrr	Mtt	Mpp	Mrp	Mrt	Mtp	%DP
2016 06 10	03:25:21.0	0.095	-7.773	7.678	-4.412	3.651	-3.084	91.1

d) Terremotos de El Hoyo [Segura y Alvarez (2016); Rodríguez et al., (2016b)]

El 15 de septiembre de 2016 ocurrió el terremoto principal ($M=5.7$), que fue seguido por numerosas réplicas, ocurriendo la mas fuerte el día 28 ($M=5.4$). No se realizó un trabajo de relocalización de epicentros, y los datos que se poseen tienen una gran dispersión (figura 6a). Al ocurrir la segunda réplica parece ocurrir una reactivación de la actividad, lo que se observa en el histograma de la figura 6b. Con vistas a precisar esto se hizo el ajuste del número diario de eventos a modelos teóricos que consideran una sola secuencia y a uno que considera 2 secuencias (Ogata, 1983, Utsu, 2002). Entre los modelos teóricos de una sola secuencia el mejor ajuste se obtiene con el modelo de Otsuka (fórmula 1) con valores de los coeficientes ($a_1=8.868251 \cdot 10^{-15}$, $a_2=54.63$, $a_3=0.0567$, $a_4=0.483$ y $a_5=0.068$). Sin embargo el ajuste al modelo modificado de Omori considerando 2 secuencias es mucho mejor (fórmula 3).

$$n(t)=a_1+a_2/(t+a_3)**a_4+H(t-T_2) \cdot a_5/(t-T_2+a_6)**a_7 \quad (3)$$

donde H es la función de Heaviside, T_2 es el tiempo de inicio de la segunda secuencia (13.5 días) y los coeficientes hallados son: $a_1=9.933 \cdot 10^{-9}$, $a_2=3334$, $a_3=4.383$, $a_4=2.381$, $a_5=6.490 \cdot 10^6$, $a_6=4.180$ y $a_7=8.075$ (figura 7a).

En este caso también fueron halladas soluciones del tensor de momento para 2 eventos: el principal y el que inició la segunda secuencia. Las soluciones de plano de falla asociada corresponden en el primer caso a un mecanismo de corrimiento por el rumbo de dirección NE-SO con una pequeña componente normal, y en el segundo, a la inversa, un mecanismo normal con una componente ligera de corrimiento por el rumbo. En ambos caso de identificó como plano de falla el dirigido en la dirección NE-SO (figura 7b).

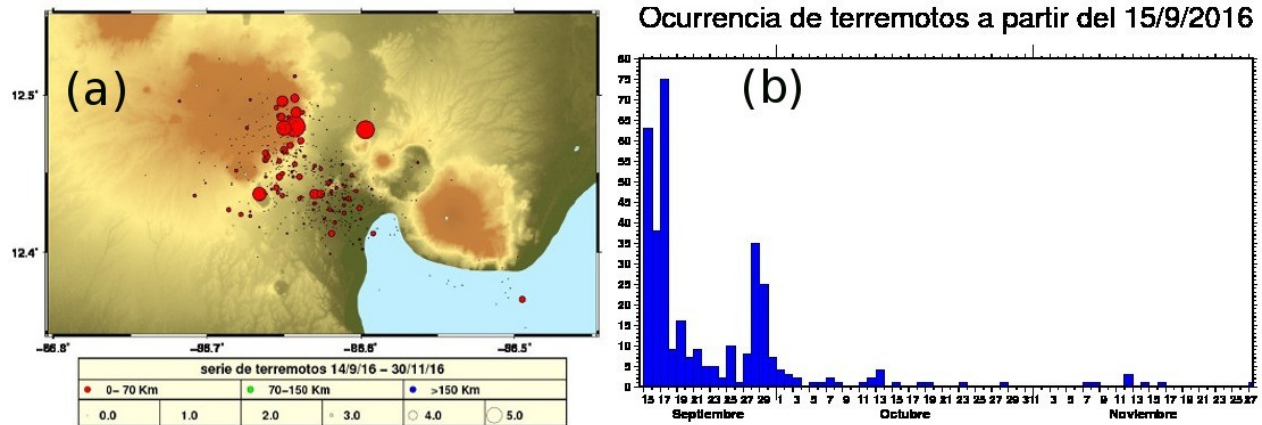


Fig. 6. (a) Mapa de epicentros que abarca desde la ocurrencia del terremoto principal hasta fines de noviembre de ese año. Nótese la dispersión en la distribución espacial propia de los epicentros determinados por la red (b) Histograma del número diario de eventos donde se nota claramente la ocurrencia de dos secuencias.

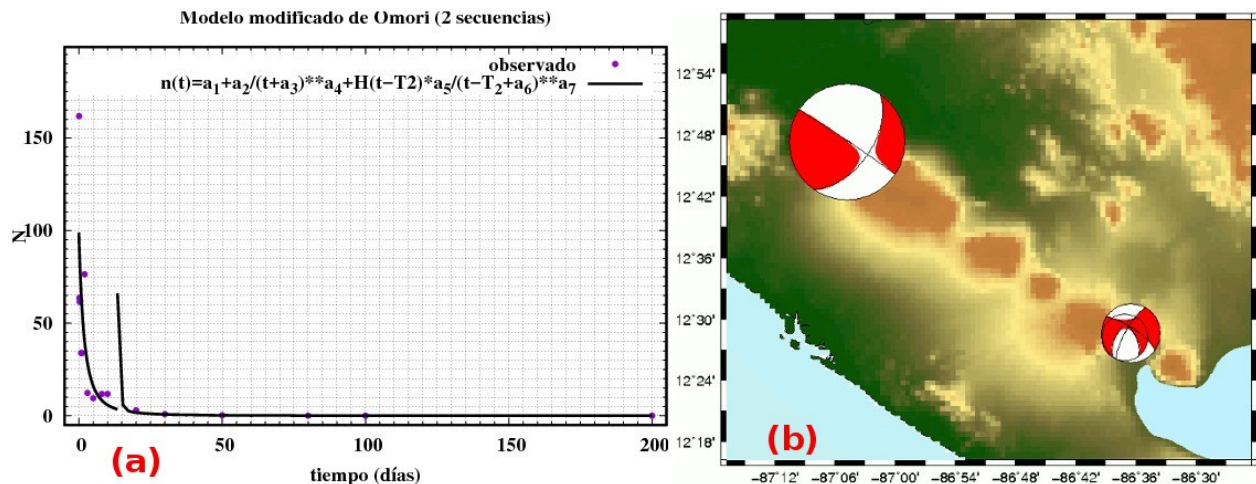


Fig. 7. (a) Ajuste del número diario de eventos al modelo de Otsuka con dos secuencias; los datos experimentales se representan promediados, el ajuste se hizo con la serie temporal original. (b) Mapa de las soluciones de tensor de momento con las soluciones de plano de falla añadidas. En el extremo inferior derecho están las dos de El Hoyo y en el superior izquierdo la de Puerto Morazán.

Tabla 4. Soluciones halladas del tensor de momento para los terremoto de El Hoyo. Se indican las componentes del tensor (M_{ij}) y el % de doble par de fuerzas de la solución.

Fecha	Hora	Mrr	Mtt	Mpp	Mrp	Mrt	Mtp	%DP
2016 09 15	05:57:24.0	-0.770	-2.807	3.577	1.064	0.218	-1.610	82.1
2016 0928	16:48:55.0	-0.993	-0.701	1.694	1.032	0.153	-0.098	79.5

Las soluciones del tensor de momento de los terremotos de 2014 y 2016 se ajustan perfectamente al modelo planteado por La Femina et al. (2002) mientras que los eventos de 2015, parecen apartarse de ese modelo, aunque consideramos que en realidad lo reafirman. El modelo de “librero” está muy bien explicado en lo que corresponde a los lados de los libros, pero es confuso en explicar lo que ocurre en la partes de arriba y abajo de los mismos. La Femina et al, (2002) no dicen nada de lo que debe ocurrir en

esos lugares, mientras que Funk et al. (2009) presentan una rotación en el extremo superior y dicen que la cadena está dividida en un serie de bloques rotantes (figura 8a). Esa rotación de los bloques es difícil de imaginar, lo que lleva a buscar una interpretación diferente. Mientras el desplazamiento ocurre en la parte interior de los bloques el mecanismo de corrimiento por el rumbo izquierdo es el esperado, pero cuando el movimiento alcanza los extremos de esos bloques se crea un déficit de masa que obliga a una rotación de los esfuerzos, pasando los esfuerzos compresivos a orientación vertical mientras que los distensivos se mantienen en dirección horizontal este-oeste (figura 8b). Eso corresponde a un mecanismo normal como los observados en los terremotos de El Sauce. En la parte inferior de los “libros” no tenemos un ejemplo de ese tipo que corrobore nuestra hipótesis; sin embargo, en un perfil de orientación este-oeste investigado en el km 45.6 en la carretera vieja a León, en el borde exterior de la depresión, se han encontrado diques de otro material a lo largo de la misma (figura 9) lo que se pudiera explicar por la existencia de esfuerzos distensivos de dirección este-oeste (Muñoz, 2017). Este redireccionamiento de los esfuerzos puede ser la causa de la formación de estructuras de dirección norte-sur a partir del borde interior de la depresión nicaragüense, como es el caso de la depresión tectónica asimétrica El Sauce (Flores, 2011); no obstante, el tema debe ser estudiado con mas profundidad.

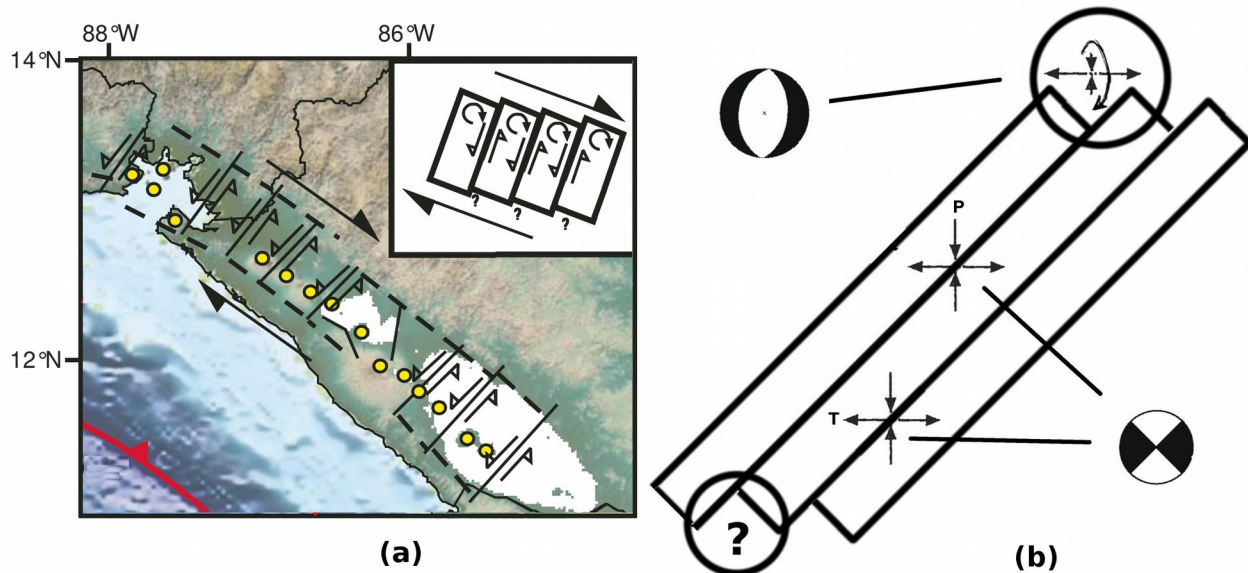


Fig. 8. Discusión del modelo de “librero” de La Femina et al. (2009). (a) Representación del mismo donde se plantea la hipótesis de bloques rotantes [modificado de Punk et al. (2009)]. (b) Interpretación de este trabajo; en los extremos de los bloques ocurre una rotación de los esfuerzos compresivos que conduce a la ocurrencia de terremotos con mecanismo normal, situación ya comprobada en el extremo superior con los terremotos de El Sauce, e inferida como posible en los inferiores por observaciones de campo.

En las tablas 1-4 aparece la columna de del porciento de doble par (%DP). El tensor de momento se descompone en parte isotrópica (ISO), correspondiente a procesos de explosión/implosión y desviatoria, la cual se divide en doble par de fuerzas (DC), correspondiente a cizalla pura, y dipolo vectorial lineal compensado (CLVD), que se interpreta como un cambio de volumen compensado por el movimiento de la partícula a lo largo del plano del esfuerzo mayor. En el caso de ISO=0, un movimiento de cizalla puro tendrá un %DP=100, mientras que según disminuya este valor se está en presencia de desplazamiento en fallas no planares (Vavryčuk, 20015). En nuestro caso, todas las soluciones tienen la componente isotrópica nula por lo que se está en presencia de fallas de cizalla o planares. El mayor valor de este parámetro corresponde al terremoto de puerto Morazán, que tiene un epicentro bastante alejado de los volcanes activos, por lo que su plano de falla no es afectado por procesos magmáticos. Por otra parte, los tres valores menores de %DC corresponden a terremotos con epicentros ubicados bajo volcanes activos, el del 24/4 bajo el volcán Momotombo, y los dos del 14/4, bajo el volcán Apoyeque. En estas ubicaciones es muy probable que las fallas donde ocurre el desplazamiento sean bastante irregulares.



Fig. 9. Fotos tomadas en un corte de dirección este-oeste en la zona del km 45.6 de la carretera vieja a León. Está presente una base de areniscas rellena con diques de lutitas. Las fracturas están orientadas en dirección norte-sur (fotos cortesía de Angélica Muñoz).

CONCLUSIONES

- 1) Fue realizado un análisis de los terremotos fuertes ocurridos en la depresión nicaragüense en el período 2014-2016. Los procesos corresponden lo mismo al caso terremoto principal - réplicas como a enjambre de terremotos. En el primer tipo la historia temporal se ajustó a modelos teóricos del número diario de eventos con una secuencia y uno de los casos estuvo formado por dos secuencias.
- 2) Se determinaron los tensores de momento de los eventos principales de cada proceso, predominando las soluciones de plano de falla del tipo de corrimiento por el rumbo. No están presentes procesos de explosión/implosión, y las fallas asociadas varían de cizalla pura a no planares.
- 3) La ocurrencia de mecanismos normales en la zona de El Sauce fue usada para hacer una reinterpretación del modelo tectónico de La Femina et al. (2002) para la depresión nicaragüense que explica con más detalle que ocurre precisamente en los bordes de la depresión.

REFERENCIAS

- Alvarez, L.; Segura, F. (2016): Sismicidad de la zona de ocurrencia de los terremotos. Bol. Sismos y Volcanes de Nicaragua, septiembre 2016, pp. 17-24.
- Flores, P. (2011): Estudio geoestructural en las hojas topográficas de Villanueva y El Sauce en el occidente de Nicaragua. Monografía para optar al título de Ingeniera Geóloga. UNAN, Nicaragua, 167 pp.
- Funk, J.; Mann, P.; McIntosh, K. y Jason Stephens, J. (2009): Cenozoic tectonics of the Nicaraguan depression, Nicaragua, and Median Trough, El Salvador, based on seismic-reflection profiling and remote-sensing data. Geol. Soc. Am. Bulletin; v. 121; pp 1491–1521.
- Goldstein, P.; Dodge, D.; Firpo, M. y Minner, L. (2002): SAC2000: Signal processing and analysis tools for seismologists and engineers, En: International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Parte B, Capítulo 85.5 pp. 1613-1614.
- González, O. Moreno, M. y Alvarez L. (2015): La serie de terremotos de El Sauce, septiembre – octubre de 2015. Informe, CENAI, Fondos del INETER, Managua, 37 pp.
- Kikuchi, M. y Kanamori, H. (1982): Inversion Of Complex Body Waves, Bul. Seism. Soc. Am., 72, pp. 491-506.
- Kikuchi, M. y Kanamori, H. (1986): Inversion Of Complex Body Waves - II, Phys. Earth and Planet. Inter., 86, pp. 205-206.

- Kikuchi, M. y Kanamori, H. (1991): Inversion Of Complex Body Waves - III, *Bul. Seism. Soc. Am.*, 81, pp. 2335-2350.
- Krieger, L. y Heimann S. (2012): MoPaD —Moment Tensor Plotting and Decomposition: A Tool for Graphical and Numerical Analysis of Seismic Moment Tensors. *Seism. Res. Lett.*, 83, pp. 589-595.
- La Femina, P.C., Dixon, T.H. y Strauch, W. (2002). Bookshelf faulting in Nicaragua. *Geology* 30 (8), pp. 751-754.
- Matumoto, T; Ohtake, M.; Latham, G. y Umana, J. (1974): Crustal structure in Southern Central America. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 64, pp.121-134
- Molina, E.; Marroquín, G.; Escobar, J.J.; Talavera, E.; Rojas, W.; Climent, A.; Camacho, E.; Benito, B.; Lindholm, C. (2008): Proyecto RESIS-II. Evaluación de la amenaza sísmica en Centroamérica, 237 pp.
- Moreno, B.; González, O.; Alvarez, L. (2014): Informe de trabajo realizado sobre el terremoto del 10/04/2014 y sus réplicas. CENAI, Fondos del INETER, Managua, 55 pp.
- Muñoz, A. (2017): Estudio de zonificación geológica por fallamiento superficial. Proyecto de telefonía celular empalme El Tránsito TNM03007, Kilómetro 45.6 carretera vieja a León, Municipio Nagarote, Departamento de León. Fondos del INETER, 25 pp.
- Ogata, Y. (1983), Estimation of the parameters in the modified Omori formula for aftershock frequencies by the maximum likelihood procedure. *Jour. Phys. Earth*, Vol.31, pp.115-124.
- Ottmøller, L; Voss, P. y Havskov, J. (2016): SEISAN earthquake analysis software for Windows, Solaris, Linux and MacOSX, <http://seisan.info>, 409 pp.
- Rodríguez, A.; González, O., Alvarez, L. (2016a): Resultados del proceso de inversión de ondas del terremoto del día 10-06-2016 a las 03:25:21 UTC en Puerto Morazán, Chinandega, Nicaragua. *Bol. Datos Geofísicos*, junio 2016, pp. 38-45.
- Rodríguez, A.; González, O.; Alvarez, L. (2016b) Resultados del proceso de inversión de ondas de los terremotos cercanos al volcán El Hoyo en el 2016, León-Nicaragua. *Bol. Sismos y Volcanes de Nicaragua*, septiembre 2016, pp. 25-38
- Segura, F.; Alvarez, L. (2016): Serie sísmica de Puerto Morazán, Junio de 2016, Nicaragua. *Bol. Datos Geofísicos*, junio 2016, pp. 45-53.
- Sokos, E.N. y Zahradnik. J (2008): ISOLA, a FORTRAN code and a Matlab GUI to perform multiple point source inversion of seismic data. *Computers and Geosciences*, 34, pp. 967-977.
- Sokos, E. N. y Zahradnik. (2013). Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismol. Res.Lett.* 84. pp. 656-665.
- Utsu, T. (2002): Statistical Features of Seismicity. En: *International Handbook Of Earthquake And Engineering Seismology*, Parte A, Capítulo 43, pp. 719-732.
- Vavryčuk, V. (2015): Moment tensor decompositions revisited. *J Seism.*, 19, pp. 231–252.
- Waldhauser, F. (2001): hypoDD A program to compute double-difference earthquake locations, *USGS Open File Rep.*, 01-113, 25 pp.
- Waldhauser F. y Ellsworth, W.L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, pp. 1353-1368
- Wessel, P. y Smith, W.H.F. (1998). New, improved version of Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, 79 (47), 579.
- Williams, T. y Kelley, C. (2010). gnuplot 4.4, An Interactive Plotting Program, Manual, 224 pp.