

4.2 Resultados del proceso de inversión de ondas de los terremotos cercanos al volcán El Hoyo en el 2016, León- Nicaragua.

Ana Rodríguez (Sistema de Información Geográfica)

O'Leary González (CENAIS)

Leonardo Álvarez (Dirección de Sismología)

Introducción

El Tensor de Momento Sísmico (TMS) es la mejor forma de representar la fuente de un terremoto, ya que contiene información del tamaño del sismo, de los parámetros geométricos de la falla sismo-generadora, así como del tipo de proceso ocurrido, lo que tiene gran relevancia a la hora de estudiar la sismicidad de una determinada región y sus implicaciones sismotectónicas.

El TMS puede descomponerse utilizando el análisis de los autovalores y una base ortogonal de autovectores. Este proceso nos permite identificar o caracterizar la fuente sísmica que físicamente representa el tensor de momento sísmico obtenido. El método empleado requiere el uso de registros de estaciones de banda ancha que rodeen el epicentro a distancias cortas e intermedias que son sometidas a un proceso de inversión para encontrar las componentes de tensor de momento.

Dentro de las limitaciones encontradas para realizar este trabajo, está la falta de un modelo de velocidades sísmicas que sea apropiado para nuestras características geológicas de forma rutinaria, ya que el que se usa actualmente en la red no es el adecuado para la región, lo que pudiera implicar errores en la determinación de los parámetros que describen físicamente los terremotos.

Localización del área de estudio

El evento ocurrido el día 15 de Septiembre del 2016 a las 05:57:24 UTC y el ocurrido el día 28 de Septiembre a las 16:48:55 UTC, con magnitudes M_w 5.6 y 5.4 respectivamente, se localizan cerca del volcán El Hoyo en el departamento de León, según datos de la red sísmica del INETER (Fig. 1).

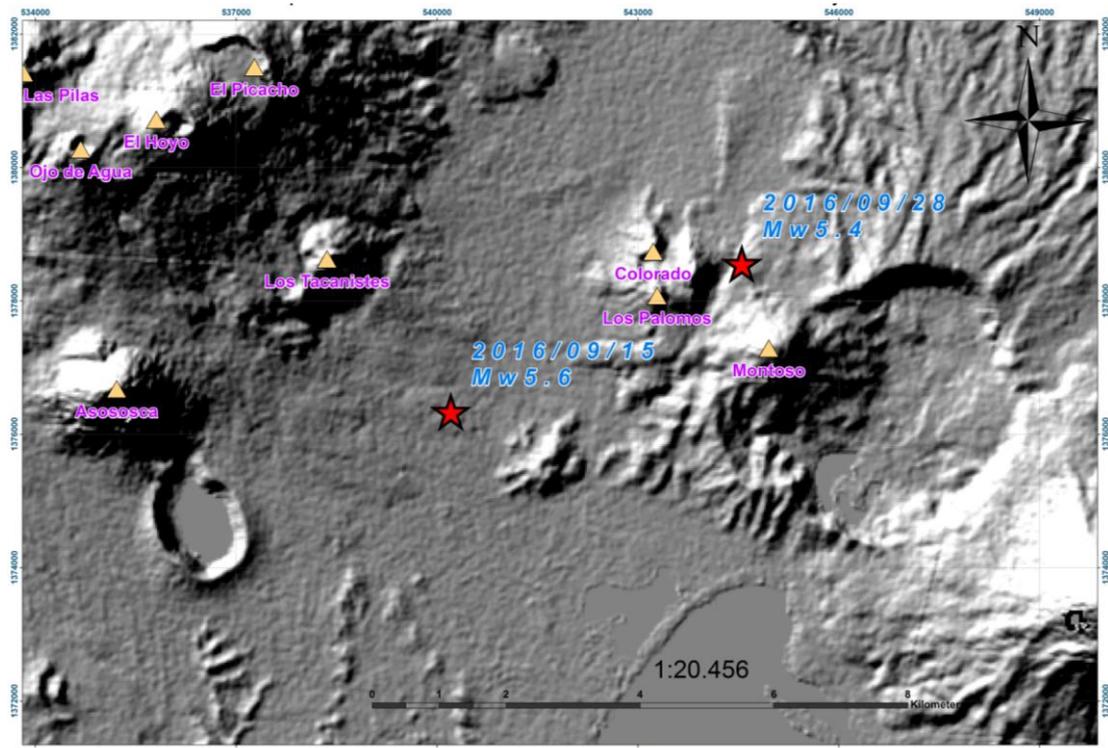


Figura 1. Localización del área de los eventos, donde se muestran claramente los epicentros de los terremotos estudiados cerca del volcán El Hoyo, con una distancia entre ellos de 4.9 km.

Procesamiento de datos sísmicos

Se realizó un análisis de las señales registradas por equipos de banda ancha de Nicaragua, Honduras, El Salvador y Costa Rica con el programa ISOLA (Sokos y Zahradnik, 2008, 2013).

Se prepararon los archivos de polos y ceros de las estaciones de banda ancha a utilizar en el proceso y se importaron al ISOLA los sismogramas en formato SAC.

La selección de las señales a utilizar se realizó en base al factor señal/ruido (Dreger, 2002) y a la presencia de las frecuencias deseadas. En la Fig. 2a y 2b, se muestran los gráficos utilizados en la evaluación de la razón señal/ruido.

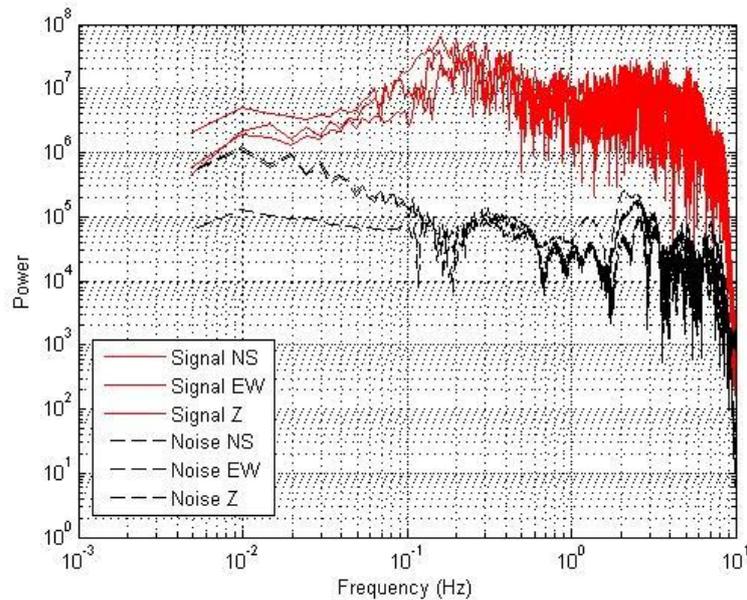


Figura 2a. Gráficas de amplitud señal-ruido de la estación NUBE, ubicada en San Salvador, donde se observa una buena relación señal/ruido (2 órdenes de diferencia en la amplitud espectral).

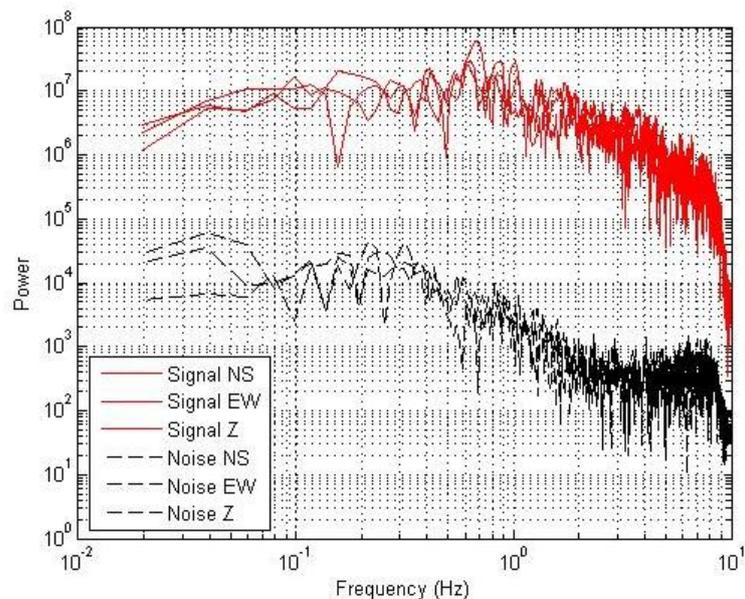


Figura 2b. La gráfica muestra la relación señal ruido de la estación ACON ubicada en Nicaragua (entre 3 y 4 órdenes de diferencia de la amplitud espectral).

Previo al procesamiento, se eliminaron aquellas señales con alteraciones instrumentales (polaridades invertidas, falta de señal, origen de tiempos incorrectos) siguiendo los criterios de Zahradnik y Plešinger 2005, 2010 y Vackar et al., 2015.

Se seleccionó el modelo de corteza. En este trabajo utilizamos el modelo ya empleado, con buenos resultados en los estudios de la serie de terremotos de El Sauce 2015 (González et al., 2015), que había sido preparado a partir de los resultados de Matumoto et al., 1977.

Se definieron los parámetros de búsqueda de la fuente sísmica y después se pasó a calcular las funciones de Green. Se invirtió el TMS en un proceso de prueba y error mediante comparación de señales reales y sintéticas. El resultado final está compuesto por las componentes del tensor de momento, los porcentajes de la descomposición del TMS en isotrópico, doble par de fuerzas y dipolo vectorial lineal compensado, así como gráficos de la incertidumbre de los diferentes parámetros obtenidos para la solución de doble par de fuerzas. El procedimiento de inversión busca además una solución para la localización de un punto medio de la fuente, denominado centroide, considerado como el punto donde se localiza el modelo fuente descrito por el tensor momento sísmico.

El porcentaje del doble par de fuerzas en el TM (DC% en las figuras) está representado con el 82.1 % para el terremoto del 15 de septiembre del 2016 y 79.5 % para el terremoto del 28 de septiembre del 2016. Estos porcentajes indican que estos terremotos son de origen tectónico (una falla) y no guardan ninguna relación con explosiones, implosiones o fenómenos volcánicos

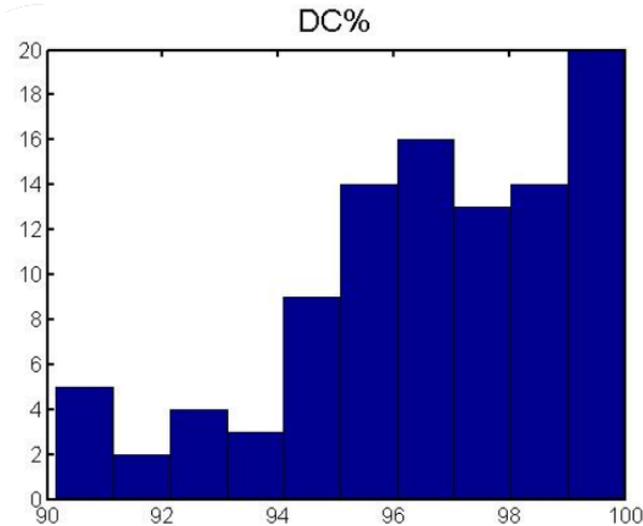


Figura 5. Porcentaje de doble par de fuerzas. El valor de 82.1 %, indica que el proceso es de tipo tectónico del evento del día 15 de Septiembre del 2016.

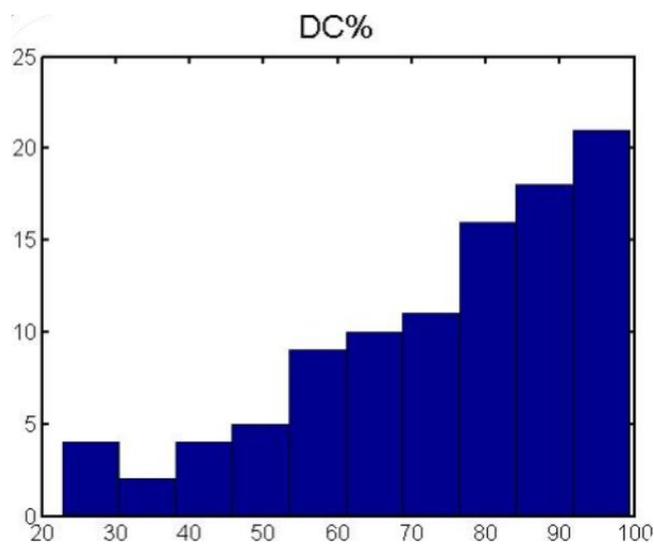


Figura 6. Porcentaje de doble par de fuerzas 79.5 %, indica que el proceso es de tipo tectónico del evento ocurrido el día 28 de Septiembre del 2016.

Se presentan las gráficas del ajuste entre los sismogramas sintéticos y reales para todas estaciones locales y regionales utilizadas para los eventos de septiembre del 2016 (ver Fig. 7 y 8). Como se ve de las mismas el ajuste de los sismogramas sintéticos con los reales es bueno.

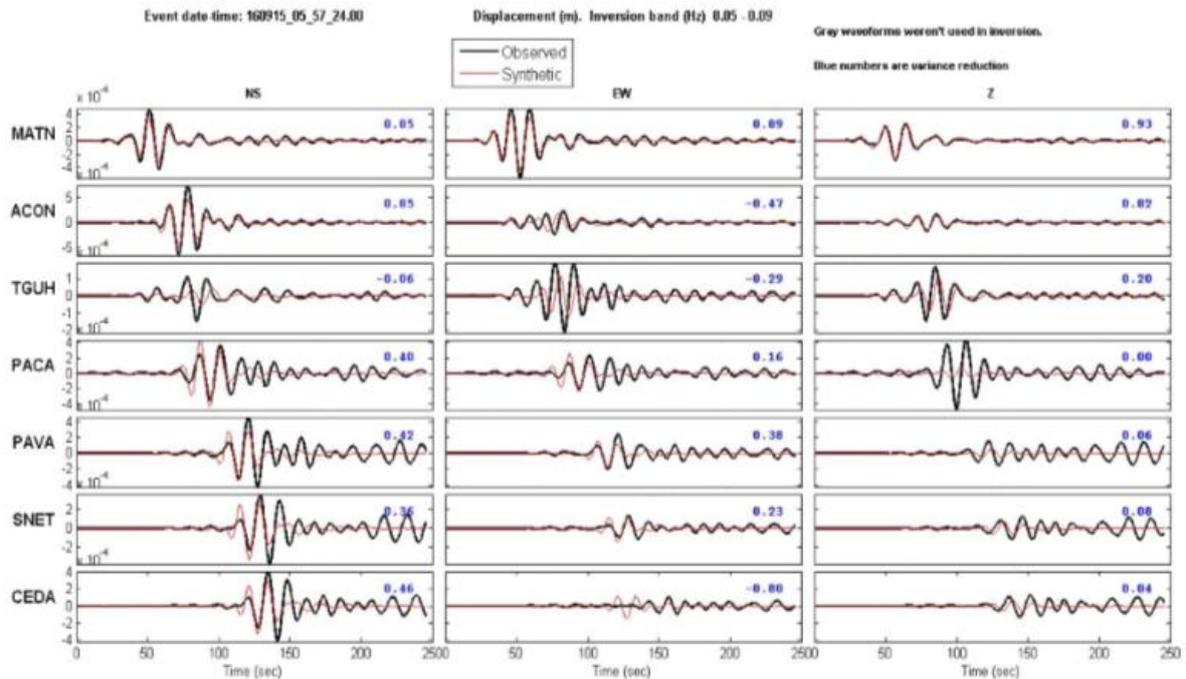


Figura 7. Ajuste de sismogramas sintéticos con los reales del evento ocurrido el día 15 de Septiembre del 2016.

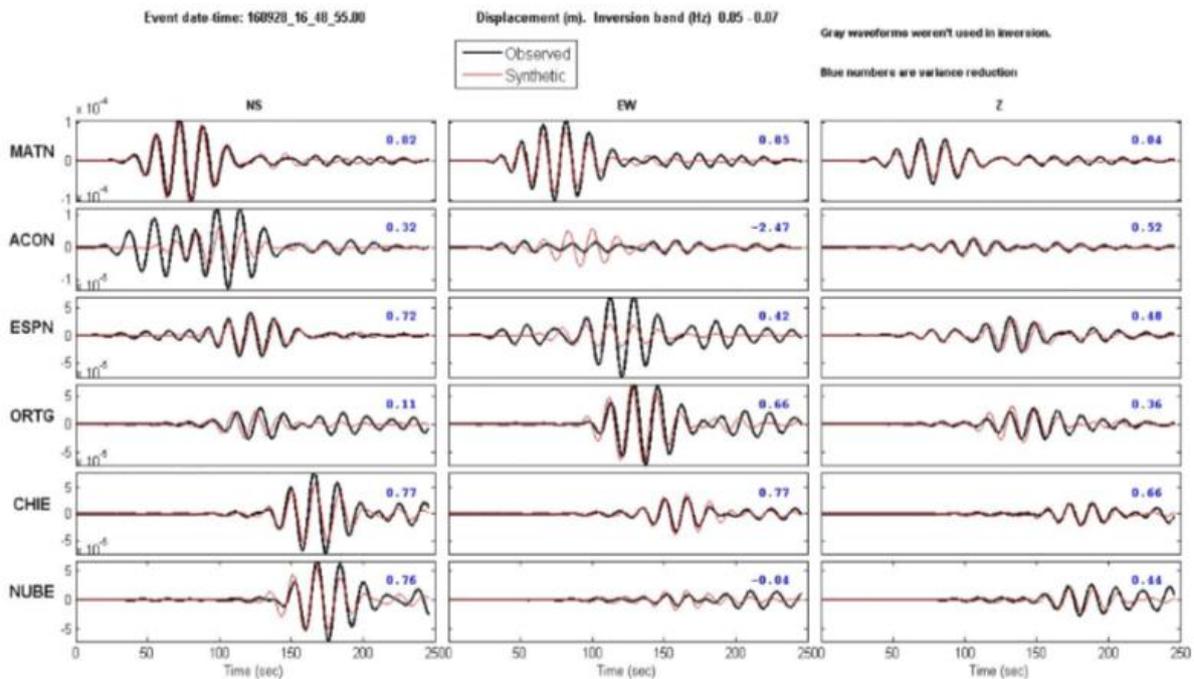


Figura 8. Ajuste de sismogramas sintéticos con los reales del evento ocurrido el día 28 de Septiembre del 2016.

Se obtuvo el gráfico de la variación de los posibles planos de nodales de la solución de doble par de fuerzas, donde se observa un buen ajuste alrededor de la solución seleccionada (Fig. 9 y 10). De forma cuantitativa, el análisis de la calidad de la solución de doble par de fuerzas se detalla a continuación.

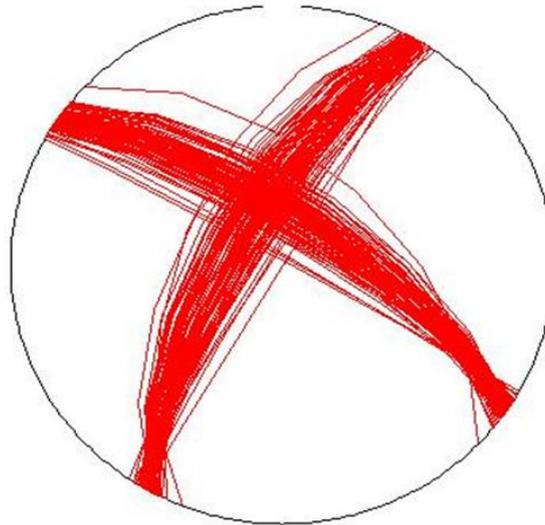


Figura 9. Variación de los posibles planos nodales del evento del 15 de Septiembre.

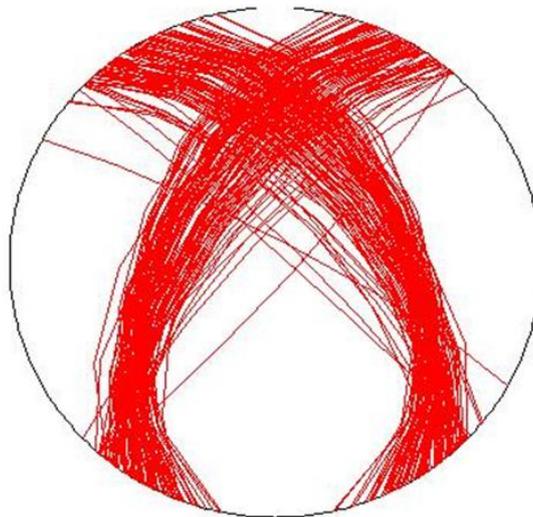


Fig. 10. Variación de los posibles planos nodales del evento del 28 de Septiembre.

a) El ángulo de Kagan, definido como la menor rotación entre 2 bases ortogonales que describen diferentes modelos de doble par de fuerzas (Zahradnik y Custodio, 2012), se encuentra entre los valores permitidos para clasificar como buena las soluciones dadas para ambos eventos (Fig. 11 y 12).

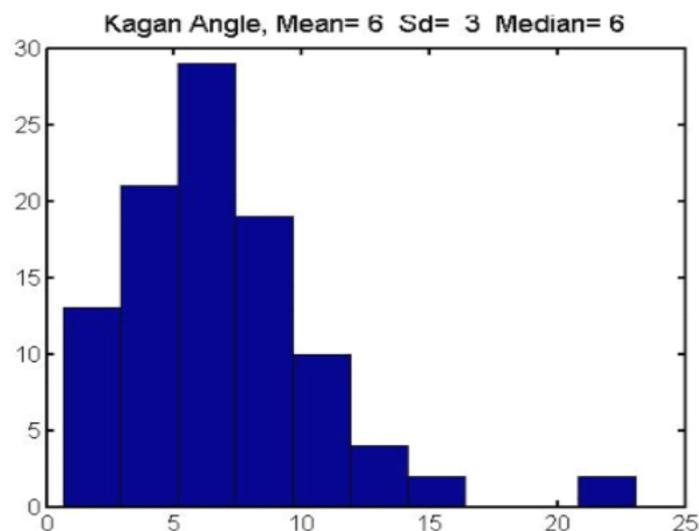


Figura 11. Variación del ángulo de Kagan del evento del 15 de Septiembre 2016. Su valor promedio es de 6 grados, lo que indica estabilidad en la solución.

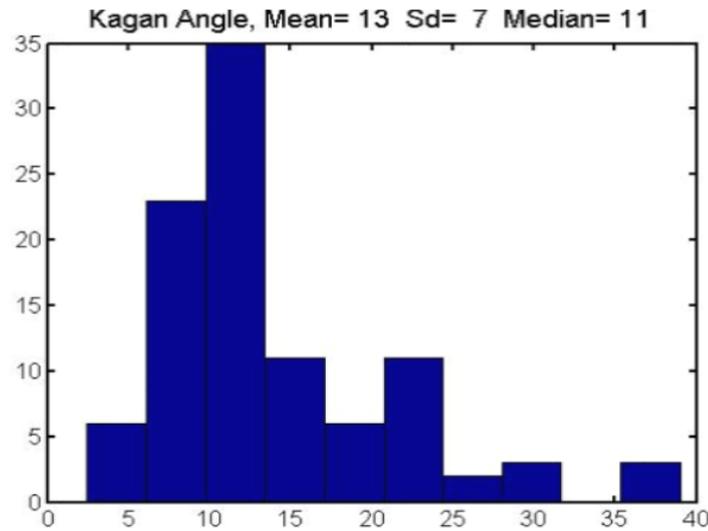


Figura 12. Variación del ángulo de Kagan del evento del 28 de Septiembre 2016. Su valor promedio es de 13 grados, lo que indica estabilidad en la solución obtenida.

b) Se obtuvieron ángulos de deslizamiento (“rake” en inglés) para el evento del 15 de Septiembre de -164° y -16° en los respectivos planos, lo cual es coherente con un mecanismo focal tipo de corrimiento por el rumbo en dirección NE-SW o NW-SE (Fig. 13). Los ángulos de deslizamiento para el evento del día 28 de Septiembre son de -143° y -41° en los respectivos planos, lo cual corresponde a un movimiento normal con componente strike slip en dirección NE-SW o NW-SE (Fig. 14).

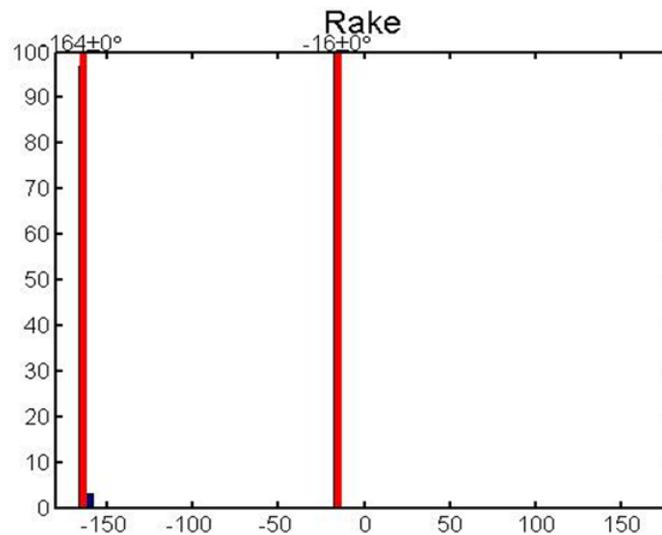


Figura 13. Variación del ángulo de deslizamiento (rake) en el proceso de análisis de estabilidad de la solución del evento del 15 de Septiembre.

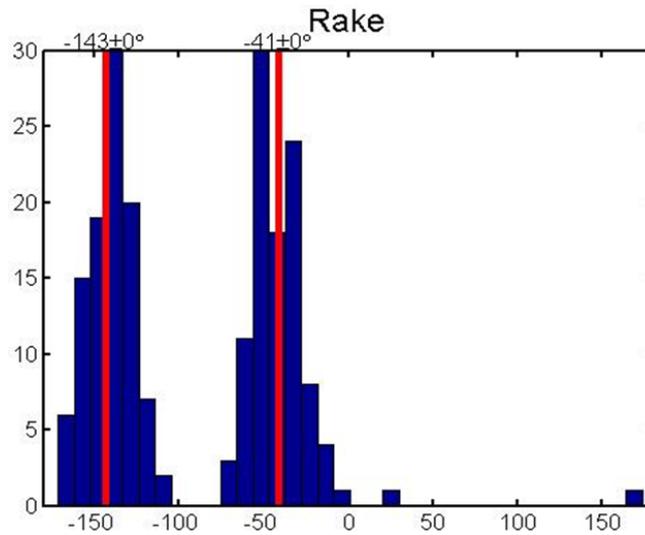


Figura 14. Variación del ángulo de deslizamiento (rake) del evento del 28 de Septiembre.

c) El ángulo de buzamiento (“dip” en inglés) presenta valores de 76 ° y 75° grados en los respectivos planos en el evento del 15 de Septiembre. Para el evento del 28 de Septiembre presenta valores de 55° y 60° grados respectivamente (Fig. 15 y 16).

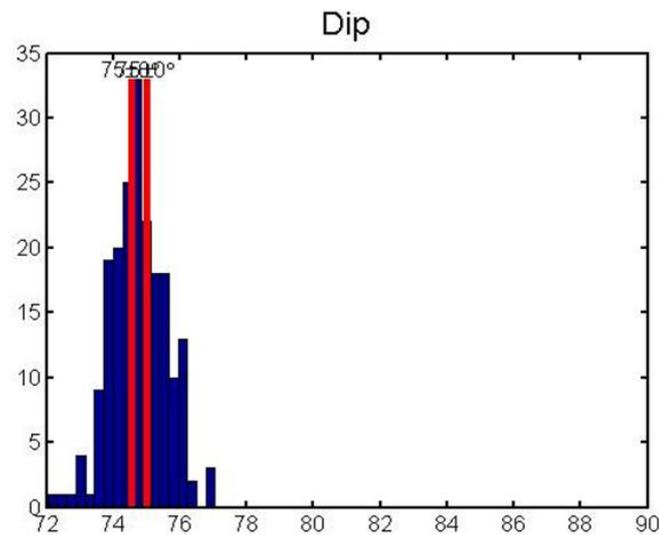


Figura 15. Variación del ángulo de buzamiento del plano de falla en el proceso de análisis de estabilidad de la solución del evento del 15 de Septiembre.

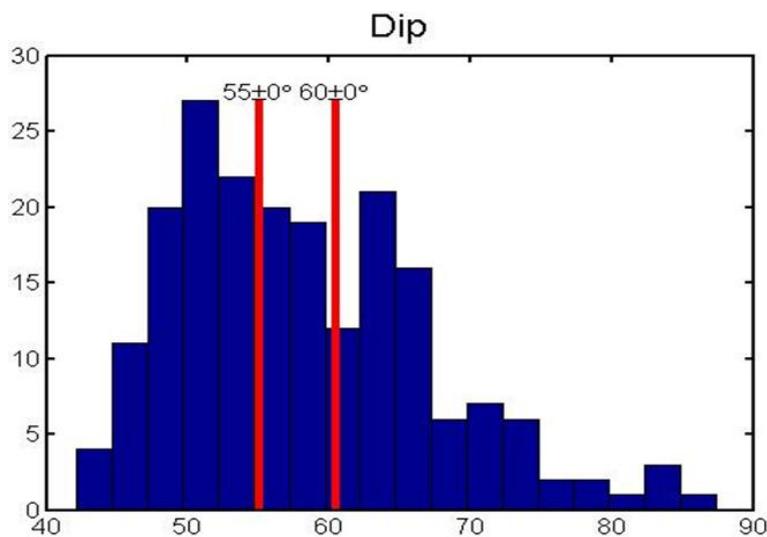


Figura 16. Variación del ángulo de buzamiento del plano de falla en el proceso de análisis de estabilidad de la solución del evento del 28 de Septiembre.

d) El azimut (“strike” en inglés) toma los valores de 304° y 210° grados en los respectivos planos para el evento del 15 de Septiembre y de 325° a 212° respectivamente para el evento del 28 de Septiembre (Fig. 17 y 18).

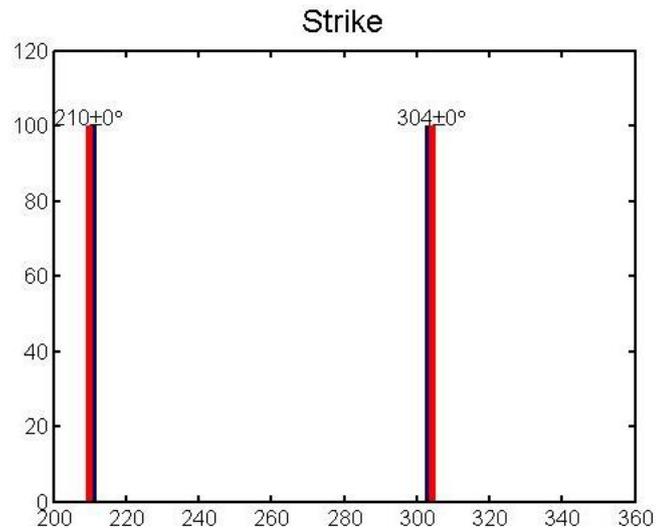


Figura 17. Variación del azimut de los planos nodales en el proceso de análisis de estabilidad de la solución del evento del 15 de Septiembre.

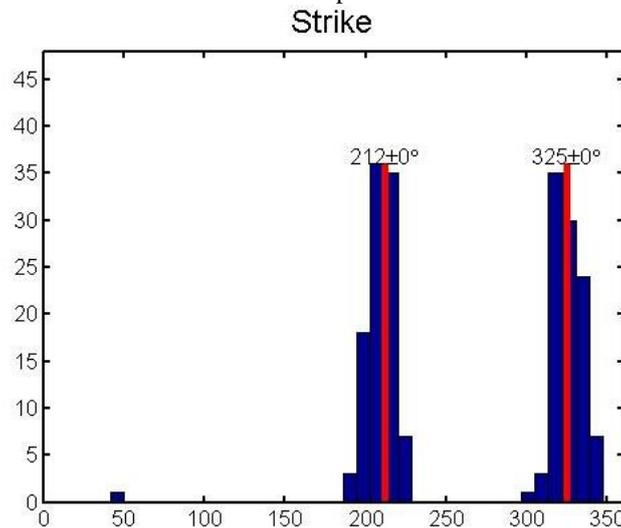


Figura 18. Variación del azimut de los planos nodales del evento del 28 de Septiembre.

Un método de determinar la estabilidad de los resultados obtenidos consiste en repetir consecutivamente la inversión de las formas de onda, eliminando cada vez los datos de una estación o de una componente. Dicho método se denomina “jackknifing” (Sokos y Zahradnik, 2013). La aplicación en nuestro caso refleja una buena estabilidad en las soluciones (Fig. 19 y 20).

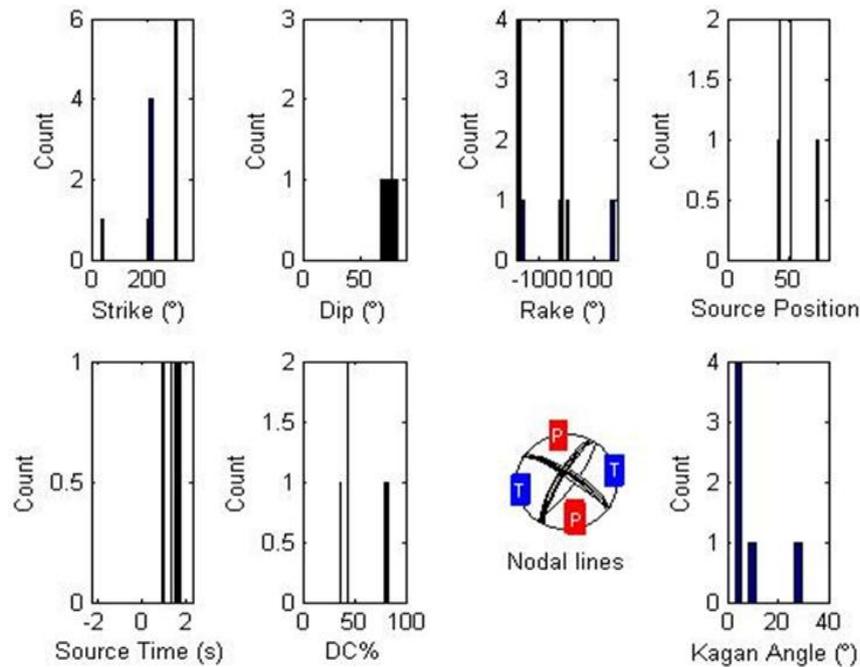


Figura 19. Resultados de la aplicación del método “jackknifing”. Se muestra la incertidumbre de los ángulos de la fuente (STRIKE, DIP, RAKE), de la posición de la fuente, de los planos nodales y del ángulo-K, con respecto a la solución con todas las estaciones del evento del día 15 de Septiembre del 2016.

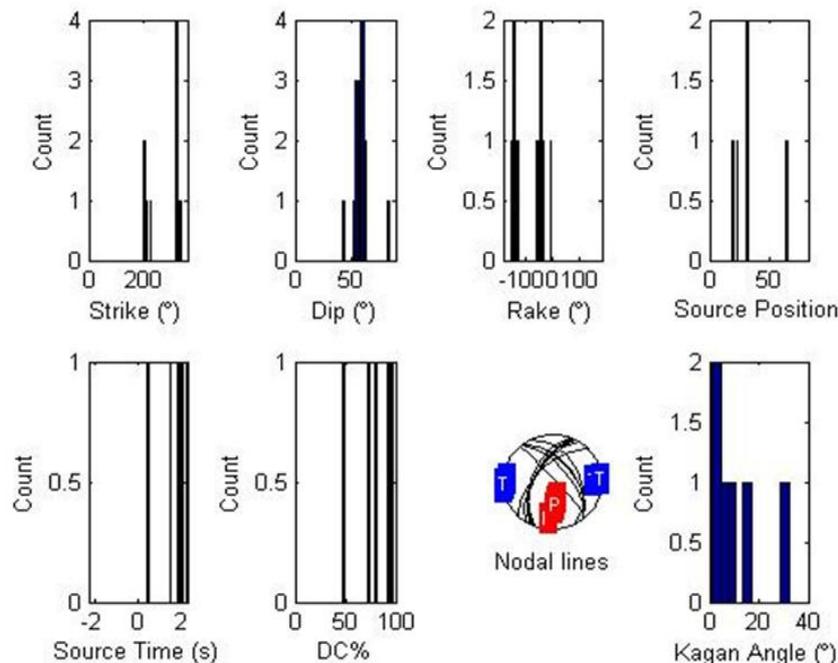


Figura 20. Resultados de la aplicación del método “jackknifing”. Se muestra la incertidumbre de los ángulos de la fuente (STRIKE, DIP, RAKE), de la posición de la fuente, de los planos nodales y del ángulo-K con respecto a la solución con todas las estaciones del evento del día 28 de Septiembre del 2016.

La identificación del plano de falla entre los dos planos nodales es uno de los procesos más complejos en sismología. El programa ISOLA nos da una herramienta, denominada “método C-H Plot”, la cual permite ayudarnos en la elección del mismo. Se basa en la representación 3D de los planos nodales, con centro en el centroide, donde se superpone la posición del hipocentro. El plano de falla será aquel en el que el hipocentro esté más cerca. El programa calcula el valor de esas distancias. La localización basada en los tiempos de recorrido, proporciona la posición del hipocentro (H), esto es el lugar en que se inició la propagación de la ruptura. La solución CMT de formas de onda de largo período provee el centroide (C), que es la aproximación de fuente puntual de la región del deslizamiento dominante en la falla. En la medida en que la diferencia de distancias a ambos planos sea mayor, será mejor la elección entre ellos.

En nuestro estudio el método de H-C Plot, nos dio como resultado para el evento del 15 de Septiembre 2016, que la distancia del hipocentro hasta el plano nodal 1 es de 0.85 km y su distancia hasta el plano nodal 2 es de 4.84 km, mientras

que la distancia entre el centroide y el epicentro es de 6.56 km. Por lo tanto, se seleccionó como plano de falla el de dirección NE-SW (ver la Fig. 21). En el caso del evento del 28 de Septiembre nos dio como resultado que la distancia del hipocentro hasta el plano nodal 1 es de 3.19 km y su distancia hasta el plano nodal 2 es de 1.23 km, mientras que la distancia entre el centroide y el epicentro es de 3.66 km. Por lo tanto, se seleccionó como plano de falla el de dirección NE-SW (ver la Fig. 22).

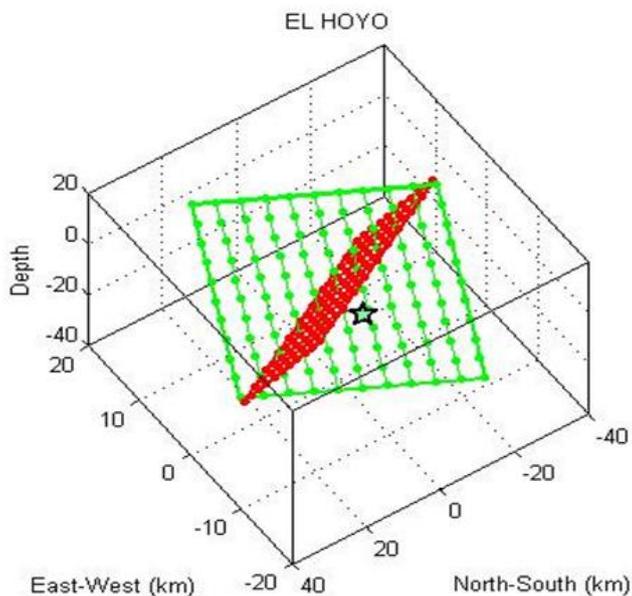


Figura 21. En la solución del método “C-H Plot” se muestra la posición del hipocentro con respecto a los planos de la solución. Donde se muestra que el plano de color verde es donde se encuentra la posición del hipocentro siendo el plano preferencial el plano nodal 1 con -165° grados en dirección NE-SW.

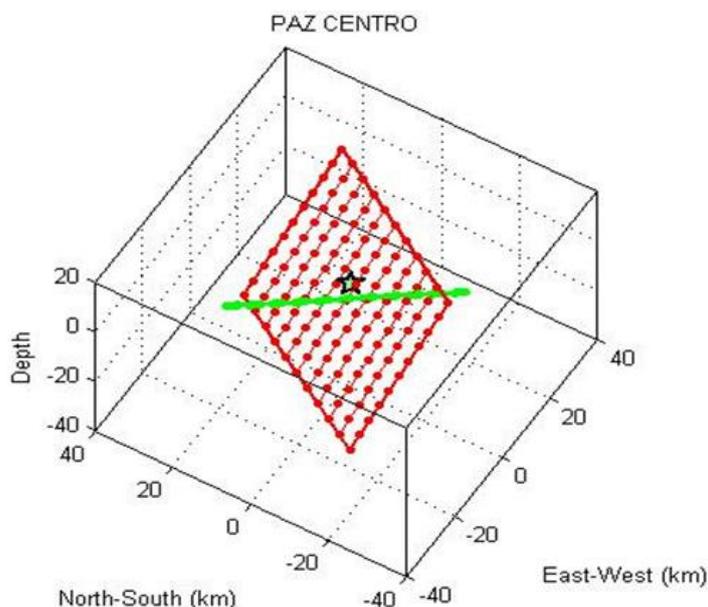


Figura 22. En la solución del método “C-H Plot” se muestra la posición del hipocentro con respecto a los planos de la solución. Donde se muestra que el plano de color rojo es donde se encuentra la posición del hipocentro siendo el plano preferencial el plano nodal 2 con -41° grados en dirección NE-SW.

Esta elección de los planos de falla en ambos terremotos se puede fundamentar también por la ubicación de la réplica de ambos eventos (Fig. 23). A pesar del uso de un modelo de corteza inadecuado en la localización hipocentral, se observa una alineación clara NE-SW de las réplicas (Fig. 23).

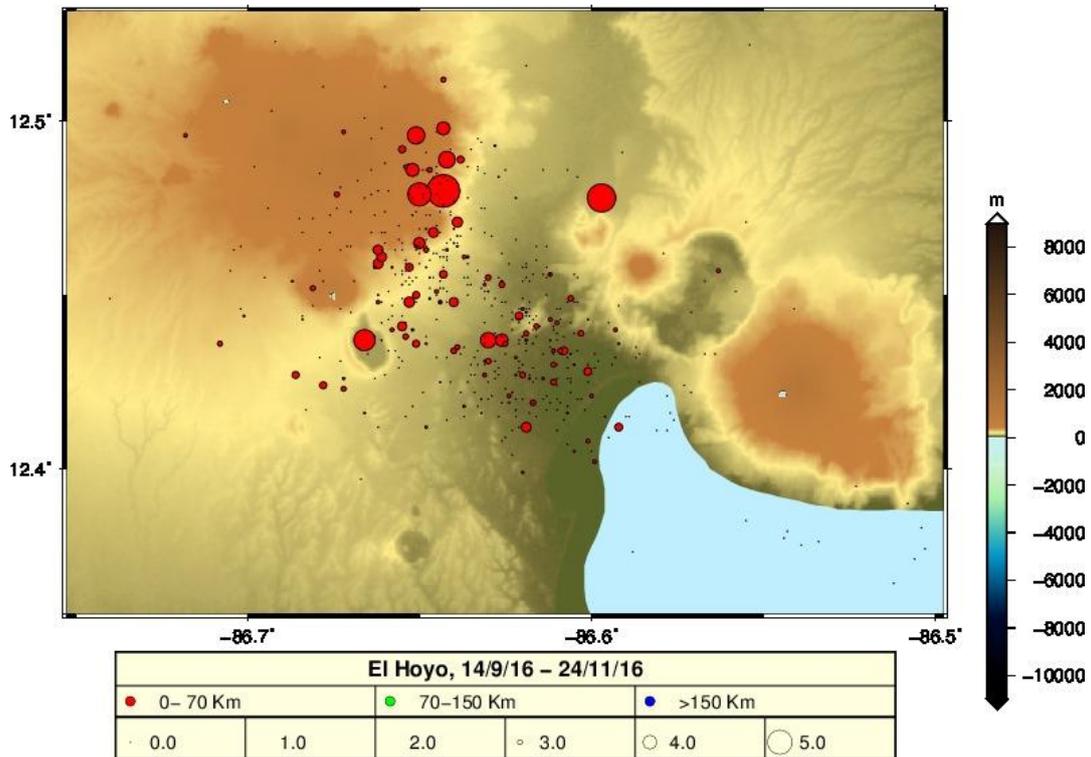
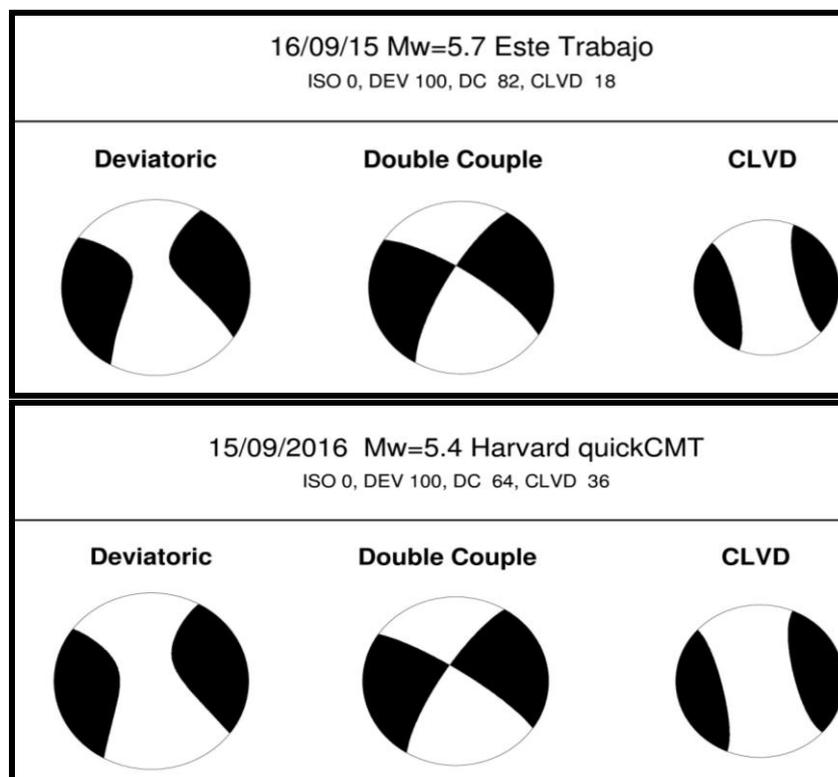


Figura 23. Actividad sísmica desde el 14 de septiembre 2016 hasta el 24 de noviembre de 2016 en la zona del volcán El Hoyo, según datos del INETER

Resulta de interés, comparar nuestras soluciones del tensor momento sísmico de los dos eventos del 15 y 28 de Septiembre con las obtenidas por diferentes agencias internacionales que calculan el TMS. Es de destacar que a diferencia de lo realizado por nosotros, las agencias internacionales utilizan estaciones alejadas y un modelo global de estructura de La Tierra. Tanto nosotros, como las agencias mencionadas obtuvieron un valor nulo para la componente isotropica, por lo que la comparación se presenta en forma de gráficos de parte desviatoria (que coincide con el tensor total), doble par de fuerzas y dipolo vectorial lineal compensado (CLVD) (Fig. 24 y 25). La correspondencia entre las soluciones es bastante buena.



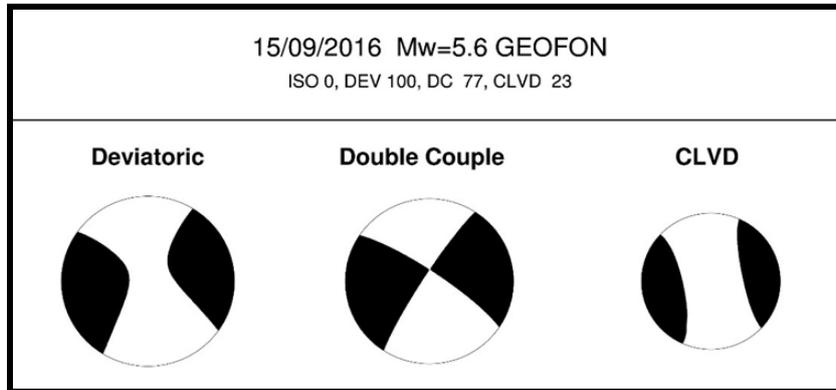


Figura 24. Comparación entre las soluciones encontradas por Harvard (quickCMT), GEOFON y en este trabajo del evento sísmico del día 15 de Septiembre.

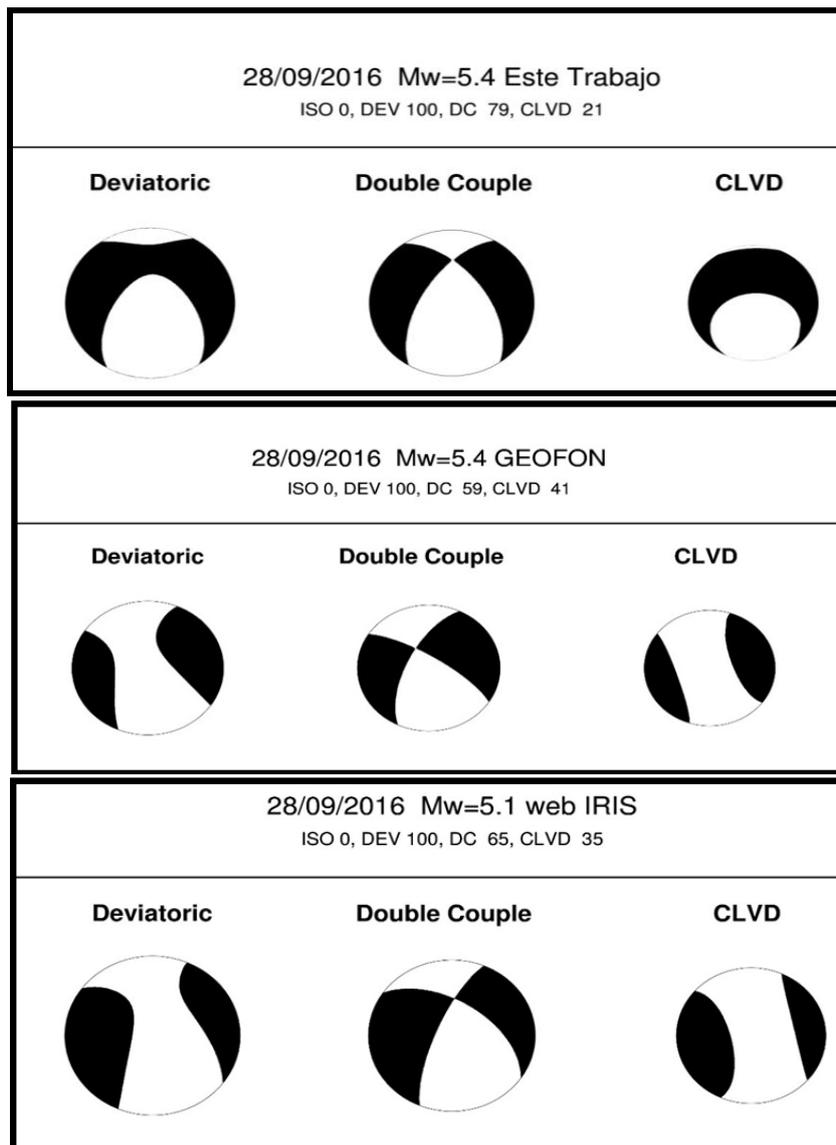


Figura 25. Comparación entre las soluciones encontradas por IRIS, GEOFON y este trabajo del evento sísmico del día 28 de Septiembre.

Por otra parte, la solución de doble par de fuerzas identificada como un corrimiento por el rumbo izquierdo en una dirección NE-SO, es congruente con el modelo planteado por La Femina et al., 2002 para la cadena volcánica de Nicaragua, caracterizado por un movimiento hacia el Oeste por el borde Sur de la cadena y hacia el Este por el borde Norte, lo que provoca la ocurrencia de desplazamientos de corrimiento por el rumbo de dirección NE-SO en diversas fallas de dimensiones no muy grandes. A lo largo de esas fallas pueden ocurrir terremotos de magnitud máxima entre 6 y

6.5, ejemplo de ellos pueden ser el terremoto de Managua de 1972, el de la isla de Ometepe en el 2005, el del volcán Momotombito en el 2014, el de Puerto Morazán en Junio de este año y el que nos ocupa en este trabajo.

Conclusiones

En este trabajo, se determinaron los tensores de momento sísmico de los eventos ocurridos los días 15 de Septiembre 2016 a las 05:57:24 y 28 de Septiembre del 2016 a las 16:48:55 UTC, mediante la inversión de las formas de ondas de estaciones de banda ancha localizadas en el Salvador, Honduras y Nicaragua, utilizando el software ISOLA.

En ambos casos, se obtuvo un elevado porcentaje de la solución correspondiente a un doble par de fuerzas (82.1% y 75.9% respectivamente), lo que indica el carácter tectónico de los mismos. La solución de doble par de fuerzas corresponde a un movimiento de corrimiento por el rumbo, y entre ambos planos posibles se seleccionó como plano de falla, con un adecuado margen de confiabilidad el de dirección NE-SW.

Las pruebas de estabilidad y calidad de la solución para ambos eventos, mostraron que los resultados son satisfactorios y los niveles de incertidumbre son aceptables.

Bibliografía

- Dreger D. S. (2002). Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TDMT_INV) Version 1.1, Berkeley Seismological Laboratory, pp. 18.
- GFZ (2016): Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum GEOFON Program. GEOFON Moment Tensor Solutions. <http://geofon.gfz-potsdam.de/eqinfo/list.php?mode=mt>
- González al te :(2015) Informe de La serie de terremotos del Sauce-León Nicaragua de septiembre – octubre de 2015 pp 1-37 financiando con fondos propio del INETER
- Harvard (2016): Global Centroid Moment Tensor Project database. <http://www.globalcmt.org/CMTfiles.html>
- Havskov and Ottemoller, SeisAn Earthquake analysis software, Seis. Res. Lett., 70, 1999. http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_70/srl_70-5_es.html
- Krizova, D., Zahradnik, J., y Kiratzi, A. (2013). Resolvability of isotropic component in regional seismic moment tensor inversion. Bull. Seism. Soc. Am., 103, 2460–2473.
- La Femina, P.C., Dixon, T.H., Strauch, W., 2002. Bookshelf faulting in Nicaragua. Geology 30 (8), 751-754.
- Matumoto, T.; Ohtake, M.; Latham, G., Umana, J. (1977): Crustal structure in Southern Central America. Bull. Seism. Soc. Am., vol. 64, pp. 121-134.
- Sokos, E. N., and J. Zahradnik. (2008). ISOLA a FORTRAN code and a Matlab GUI to perform multiple point source inversion of seismic data. Computers and Geosciences, 34, 967-977.
- Sokos, E. N., and J. Zahradnik. (2013). Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. Seismol. Res.Lett. 84. 656-665.
- Vackař J., J. Burjanek, and J. Zahradnik. (2015). Automated detection of disturbances in seismic records; MouseTrap code. Seism. Res. Letters (in press).
-