

ANÁLISIS DE LA SISMICIDAD DE 2001 EN EL SALVADOR. PARTE 1 : DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

Belén Benito ¹, Moisés Contreras ¹, Miryam Bravo ¹, Gema Barrero ¹, Esther Jiménez ¹

1. E.U.I.T. Topográfica. Universidad Politécnica de Madrid. ma_ben@euitto.upm.es

ABSTRACT

This paper presents the first part of a study of the earthquakes occurred in El Salvador during 2001. This part is focused to analyze the spatial distribution, while the temporal evolution will be studied in a second part. The seismic crisis began with the devastating earthquake on January 13th, with a magnitude $M_w=7.7$. The epicentre was located off the Western Pacific coast, in the subduction zone between the Cocos and Caribbean plates. One month later, a second destructive earthquake took place with $M_w=6.6$, whose epicentre was located inside the Continent, near San Pedro Nonualco. This shock also produced important damage and its origin, different of the previous one, was now associated to the local system faults in Central America extending along the volcanic axis. The two main shocks and their aftershock sequences, together with other minor events which followed each another, produced an intense activity in the zone, not very usual in a such a short interval of time. The main goal of this study is to know the spatial distribution of each seismic sequence as well as their surfaces rupture. In a second part we will study the temporal evolution of both series and the possible interaction between them. We find that some events with $M>5$ acted as triggers of other shocks with the same or different origin (subduction or local faults). The Coulomb stress transfer has also been studied, and some models have been developed, considering the rupture parameters derived from the geometric distribution of aftershocks. These models seem to confirm such an interaction, the fact being relevant that the February 13th event occurred in a zone where the Coulomb stress increased after the January 13th event. In its turn, some of the further events with magnitude around 5 were located in other zones of stress increase associated to the two main previous shocks. The use of a Geographic Information System (GIS) designed for this study allowed us to identify those events with different origin and to obtain the rupture surfaces from their aftershock distribution, to analyze the activity by time windows, and to study the decay relations for each series. All of which has contributed to infer conclusions about the mentioned interaction and to explain the intense activity by the triggering mechanism which apparently presents itself. This activity has been related with the historical seismicity in El Salvador and has been framed in the seismotectonic environment of this small country of the Central American Isthmus.

Key words: Seismicity of Central América, subduction, volcanic chain events, aftershock distributions.

1. INTRODUCCION

A comienzos de 2001 tuvo lugar una de las crisis sísmicas más importantes que han afectado a El Salvador, debido al tamaño y a la frecuencia de sismos ocurridos durante los seis primeros meses del citado año. La crisis comenzó con el devastador terremoto del 13 de Enero, con $M_w=7.6$ (USGS), localización epicentral a 12.80° N y 88.79° W y profundidad focal alrededor de 40 km. El epicentro fue localizado en la costa Oeste del Pacífico, en la zona de subducción entre las placas de Cocos y Caribe. Este terremoto fue seguido de un importante número de réplicas con el mismo origen, cerca de 540 con $M>2$ durante el primer mes, y 400 durante los primeros 6 meses, de las cuales casi la mitad tuvieron magnitud mayor que 3.

Justo un mes después tuvo lugar un segundo terremoto destructivo, el día 13 de Febrero de 2001, con $M_w=6.6$, localización a 13.64° N y 88.94° W y profundidad focal alrededor de 15 km. Esta vez el epicentro fue localizado dentro del continente, cerca San Pedro de Nonualco (a 30 Km. de San Salvador) y fue asociado al sistema de fallas locales alineadas con el eje volcánico que atraviesa el país de Este a Oeste. Este movimiento fue precedido por un importante número de eventos, alrededor de 200 ocurridos entre el 13 de Enero y el 13 de Febrero ($M>2$), que configuraron una actividad sísmica local generalizada a lo largo de cadena volcánica, que pareció dispararse con el sismo previo de subducción del 13 de Enero. El evento del 13 de Febrero fue también seguido por numerosas réplicas, casi 685 durante el primer mes y 1300 a lo largo del periodo de los 6 primeros meses.

Un tercer evento tuvo lugar el 17 de Febrero, solo 4 días más tarde que el sismo previo, causando una gran alarma entre la población, a pesar de su menor magnitud. El epicentro fue localizado al sur del área metropolitana de San Salvador, a 12.9° N y 89.1° W, y su magnitud fue estimada en $M_b=5.1$ (CIG). Este fue otro sismo tectónico local asociado con el sistema de fallas a lo largo del eje volcánico, seguido nuevamente por su serie de réplicas.

Además de los anteriores, otros eventos con magnitud próxima o mayor que 5 se fueron sucediendo desde el primer terremoto del 13 de Enero hasta Septiembre, alternando su origen de subducción y fallas locales y causando nuevos incrementos de actividad en sus respectivas zonas epicentrales, con inducción a veces de sismicidad en otras zonas adyacentes. Entre ellos cabe destacar los ocurridos el 28 de Febrero y el 16 de Marzo, con magnitud 5.6 y 5.7 respectivamente, estando sus epicentros localizados en la costa; así como otros localizados en fallas de la cadena volcánica, registrados el 10 de Abril con $M=4.9$ y una pequeña serie de 3 eventos ocurridos el 8 y 9 de Mayo, con magnitud alrededor de 4.7.

La coincidencia en tan corto espacio de tiempo de los dos sismos principales del 13 de Enero y 13 de Febrero, junto con los otros eventos menores, de magnitud alrededor de 5, y sus respectivas secuencias de réplicas, produjo una intensa actividad, no muy usual en tan corto intervalo de tiempo, que en ciertos momentos parecía no decaer de acuerdo a las leyes conocidas, como la ley de Omori. Sin embargo, esta actividad tan intensa puede ser explicada por la coexistencia de dos sismos principales

con diferentes orígenes de ruptura (subducción y falla local), cuyas réplicas se han superpuesto temporalmente y con cierta probabilidad se han podido inducir unas a otras. El estudio de la distribución espacial y temporal de estas series, en relación con el entorno tectónico es el principal objetivo de este trabajo. El análisis de la sismicidad histórica de El Salvador, muestra que a menudo grandes eventos de subducción fueron seguidos por terremotos superficiales en un intervalo de tiempo de 4 o 5 años. La inevitable cuestión que ahora se plantea es si el sismo del 13 de Febrero pudo ser de alguna forma “disparado” por el evento de subducción del mes anterior (Bommer et al, 2002) y el estudio que a continuación se presenta ahonda en esta cuestión, desvelando algunos hechos al respecto.

2. ENTORNO SISMOTECTÓNICO

La sismicidad registrada en el año 2001 está enmarcada en el entorno sismotectónico particular de El Salvador, y en el más general de Centroamérica a escala regional, ambos descritos extensamente por numerosos autores (Dewey and Suarez, 1991; Ambraseys and Adams, 2001; White and Harlow, 1993; Bommer et al, 2002). La figura 1 muestra el mapa tectónico de la región.



Como puede verse en dicha figura, hay dos fuentes principales de sismicidad en la zona. La primera, donde se generan los mayores terremotos, es la zona de Benioff-Wadatti donde la placa de Cocos está subduciendo bajo la placa del Caribe en la zona Medio Atlántica (Bommer et al, 2002). El movimiento relativo de ambas placas alcanza razones del orden de 8 cm/año, produciendo terremotos de gran magnitud, $M > 6$ y profundidades intermedias $60 < h < 200$ km, localizados fuera de la costa. Algunos grandes eventos en esta zona durante el siglo pasado tuvieron lugar el 7 de septiembre de 1915 ($M_s = 7.7$), el 28 de Marzo de 1921 ($M_s = 7.4$), el 21 de Mayo de 1932 ($M_s = 7.1$) y el 19 de Junio de 1982 ($M = 7.3$).

Figura 1. Mapa tectónico de Centroamérica

La segunda fuente de sismicidad es una zona de sismos corticales superficiales, asociada al sistema de fallas locales que se extiende a través del país de Este a Oeste, coincidiendo con la línea de volcanes del cuaternario. Esos terremotos tienen un origen tectónico, pero se denominan a menudo “eventos de cadena volcánica”, debido a la coincidencia de sus epicentros con el eje volcánico. La mayoría de los sismos con este origen tienen magnitud moderada $5.5 < M < 6.8$ y profundidad superficial $h < 20$ km. Sin embargo esos eventos juegan un importante papel en el riesgo sísmico de la región, porque generalmente producen daños mucho mayores que los sismos de subducción, debido al carácter superficial de sus focos y a la coincidencia de sus epicentros con centros de población. (White and Harlow, 1993). De hecho, durante el siglo XX tales eventos causaron destrucción al menos en 7 ocasiones, ocurriendo a veces en grupos de dos o tres sismos separados por periodos de minutos u horas (Bommer et al, 2002). Entre ellos cabe mencionar el ocurrido el 8 de Septiembre de 1917 al oeste de la capital, ($M_s = 6.7$), el sismo del 28 de Abril de 1919 en San Salvador ($M_s = 5.9$), el del 14 de Julio de 1930 ($M_s = 6.9$) y el ocurrido el 20 de Diciembre de 1936 ($M_s = 6.1$) que causó graves daños en San Vicente, 40 km al este de San Salvador. Con similar origen tuvo lugar otro sismo el 25 de Diciembre de 1937 ($M_s = 5.8$), cerca de la frontera de El Salvador con Guatemala y otra serie de tres sismos destructores sucedió al este de El Salvador el 6 y 7 de Mayo de 1951 ($M_s = 5.9, 6.0$ and 5.5 respectivamente). Finalmente, dos terremotos más recientes, de este grupo de cadena volcánica, causaron graves daños en la ciudad de San Salvador el 3 de Mayo de 1965 ($M_s = 5.9$) y el 10 de Octubre de 1986 ($M_s = 5.4$).

Los terremotos del 13 de Enero y 13 de Febrero son dos ejemplos más de actividad sísmica en ambas zonas, subducción y cadena volcánica. En particular, el sismo del 13 de Enero es bastante similar al ocurrido en 1982, en términos de mecanismo focal y profundidad, así como en el patrón de daños causados al Suroeste del país. Por otra parte, la localización del epicentro del 13 de Febrero es análoga al ocurrido en 1936. Además, se pone de manifiesto la sucesión en un cierto intervalo de tiempo de ambos tipos de sismos: el de subducción de 1982 fue seguido por el de corteza de 1986; y el evento local de 1936 fue precedido por el de subducción de 1932. En ambos casos el intervalo temporal transcurrido fue de 4 años. La diferencia con los eventos de 2001 es que en estos últimos la sucesión tiene lugar justo en el plazo de un mes, siendo ésta una de las principales particularidades de esta crisis sísmica de 2001.

Respecto al mecanismo focal de ambos tipos de sismos, Bufo et al (2001) da soluciones para los de subducción de 1982, 1996 y 13 de Enero 2001 correspondientes a falla normal con extensión horizontal en dirección NE-SW. Sin embargo los eventos de corteza de 1965, 1986 y Febrero 2001 presentan un mecanismo de desgarre con planos de falla verticales orientados en dirección NS y EW.

Una cuestión que parece evidente en este entorno tectónico es el hecho de que los terremotos de subducción en falla normal raramente tienen “la última palabra”. Usualmente son seguidos por grandes eventos de corteza en el plazo de 4 o 5 años, o por eventos superficiales intraplaca (Lomnitz and Rodriguez, 2001). Este hecho puede ser observado en otras regiones donde el régimen tectónico genera límites de subducción fuera de la costa y ejes volcánicos en el interior del continente, como es el caso de México. Lo observado puede explicarse porque en la transferencia de esfuerzos tras el terremoto, la relajación de tensiones en una cierta zona conduce a la acumulación de esfuerzos en otra zona adyacente. Un patrón similar al de México puede existir en El Salvador, donde grandes sismos de subducción han podido disparar, de alguna forma, eventos de corteza en el interior de la placa dentro de un corto intervalo de tiempo. (Bommer et al, 2002). El estudio de la distribución espacial y temporal de la sismicidad que a continuación se presenta, parece corroborar la hipótesis mencionada.

3. ESTUDIO DE LAS SERIES SISMICAS DEL 13 DE ENERO Y EL 13 DE FEBRERO DE 2001.

En este trabajo focalizamos el estudio esencialmente en las secuencias de réplicas asociadas a los sismos del 13 de Enero y 13 de Febrero, que fueron los sismos principales ocurridos en El Salvador en 2001. El análisis hecho aporta información sobre la posible interacción entre ambos tipos de eventos. El tercer sismo, del 17 de Febrero, tuvo un origen demasiado lejano a los focos de los otros dos sismos como para ser considerado en el proceso tectónico global. Su impacto fue principalmente psicológico, debido a la agitación de la población después de cinco semanas de intensa actividad. Este y los otros sismos de magnitud próxima a 5 pueden ser considerados como una consecuencia de la transmisión de esfuerzos por los dos grandes sismos previos, aunque al mismo tiempo pudieron actuar como mecanismo de disparo de nuevas series de réplicas, como se verá en los apartados siguientes. En esta parte del estudio tratamos de identificar las réplicas asociadas a ambos eventos, del conjunto total de sismos, así como sus superficies de ruptura.

3.1. Parámetros Focales

Los parámetros focales de los terremotos estudiados, su mecanismo focal, función temporal de la fuente y momento sísmico de ambos eventos, han sido estimados por diversos autores (Bommer et al, 2002, Buforn et al, 2001). Para el sismo del 13 de enero la mayor parte de las soluciones apuntan a un mecanismo de falla normal con plano subvertical y eje de tensión sub-paralelo a la dirección de buzamiento del estrato descendente. Según Bommer et al (2002) la ruptura quedó dividida en dos subeventos: el primero con mayor amplitud y duración de 22 s, y el segundo con duración de 24 s. El momento sísmico estimado es $5.54 \cdot 10^{20}$ Nm y ningún efecto de directividad resultó claramente evidente. La profundidad focal es de aproximadamente 40 km.

Para el sismo del 13 de Febrero el estudio citado aporta una solución muy diferente a la del sismo previo. Se trata ahora de un sismo de mecanismo de desgarre que tuvo lugar dentro de la placa continental de Caribe. La profundidad se estima en 14 km, el momento sísmico es $6.05 \cdot 10^{18}$ Nm y la función temporal de fuente tuvo una duración de 12 s. Aunque hay una ambigüedad sobre el plano de falla, con dos posibles soluciones, la distribución de réplicas parece confirmar que dicho plano debe ser sub-paralelo a la zona de subducción. Las otras soluciones dadas en la tabla 3 son bastante similares a la de Bommer et al (2002).

3.2. Distribución espacial de réplicas

Para obtener una visión global de la evolución de la sismicidad que nos permita discriminar los eventos asociados a cada serie, comenzamos el análisis examinando la distribución de replicas, semana por semana, dentro del intervalo temporal del 13 de Enero al 28 de Marzo. Los resultados son incluidos en la figura 2, que muestra los epicentros de los sismos ocurridos en el intervalo mencionado, tras ser relocalizados por el CIG. En dicha figura es posible observar algunas agrupaciones correspondientes a las replicas de los mayores sismos, con las mayores concentraciones en torno a los epicentros de los sismos principales del 13 de Enero y 13 de Febrero.

En la ventana correspondiente a la primera semana después del 13 de Enero, se puede observar que al mismo tiempo que tiene lugar el sismo de subducción, diferentes núcleos de eventos locales son disparados dentro del continente, junto con otro grupo fuera de la costa, cayendo el sismo principal en la parte más al Suroeste. En la segunda semana, 21-28 Enero, la actividad de ambos tipos decae, mientras que en la tercera y cuarta semanas la actividad local desaparece y no se producen eventos de cadena volcánica. Hay un periodo de “quiescencia” que abarca los 15 días anteprevios al segundo gran evento del 13 de Febrero. A partir de esta fecha dos nuevas series locales son disparadas, a lo largo de un sistema de fallas paralela y perpendicular a la costa, asociadas respectivamente a ese evento y al del 17 de Febrero ($M_b=5.1$). Al mismo tiempo, la actividad de subducción parece crecer de nuevo durante la semana del 13 al 20 de Febrero, como si se hubiera reactivado tras los dos sismos locales. La siguiente semana, del 21 al 28 de Febrero, registra menos actividad de ambos tipos, pero aún continúa siendo apreciable. El 28 de Febrero un nuevo sismo con $M=5.6$ tiene lugar en la zona de subducción y la actividad en ésta se mantiene más o menos constante, decreciendo en el interior del continente durante la semana del 1 al 7 de Marzo. Esta tendencia continúa durante la semana siguiente, 8-14 Marzo, ocurriendo un nuevo sismo el día 16 en la zona de subducción. En la ventana temporal el 15 al 21 de Marzo se puede observar que la actividad local apenas existe, mientras que la de subducción se mantiene apreciable, probablemente debido a este último evento.

Examinando la evolución en las siguientes semanas, aunque no se incluye la correspondiente figura por razones de espacio, se ha podido comprobar que nuevos incrementos de la actividad local se registran en torno al 10 de abril y al 9 de Mayo, fechas en que tienen lugar nuevos sismos de magnitud mayor que 4.5. En resumen, la actividad sísmica tanto de subducción como de fallas locales, crece y decrece alternativamente, siendo posible encontrar algunas semanas en las que ambos tipos de sismicidad parecen sucederse en el tiempo. Un hecho resulta evidente: coincidiendo con la ocurrencia de nuevos eventos de magnitud superior a 4.5, la actividad alrededor de sus epicentros es disparada nuevamente, cuando antes había comenzado a decrecer. Tales eventos pueden estar actuando como mecanismo de disparo de nuevos movimientos, induciendo a su vez otros con similar magnitud y diferente fuente. Dichos eventos parecen tener gran relevancia en la actividad global registrada, siendo al mismo tiempo *causa y efecto* de la misma.

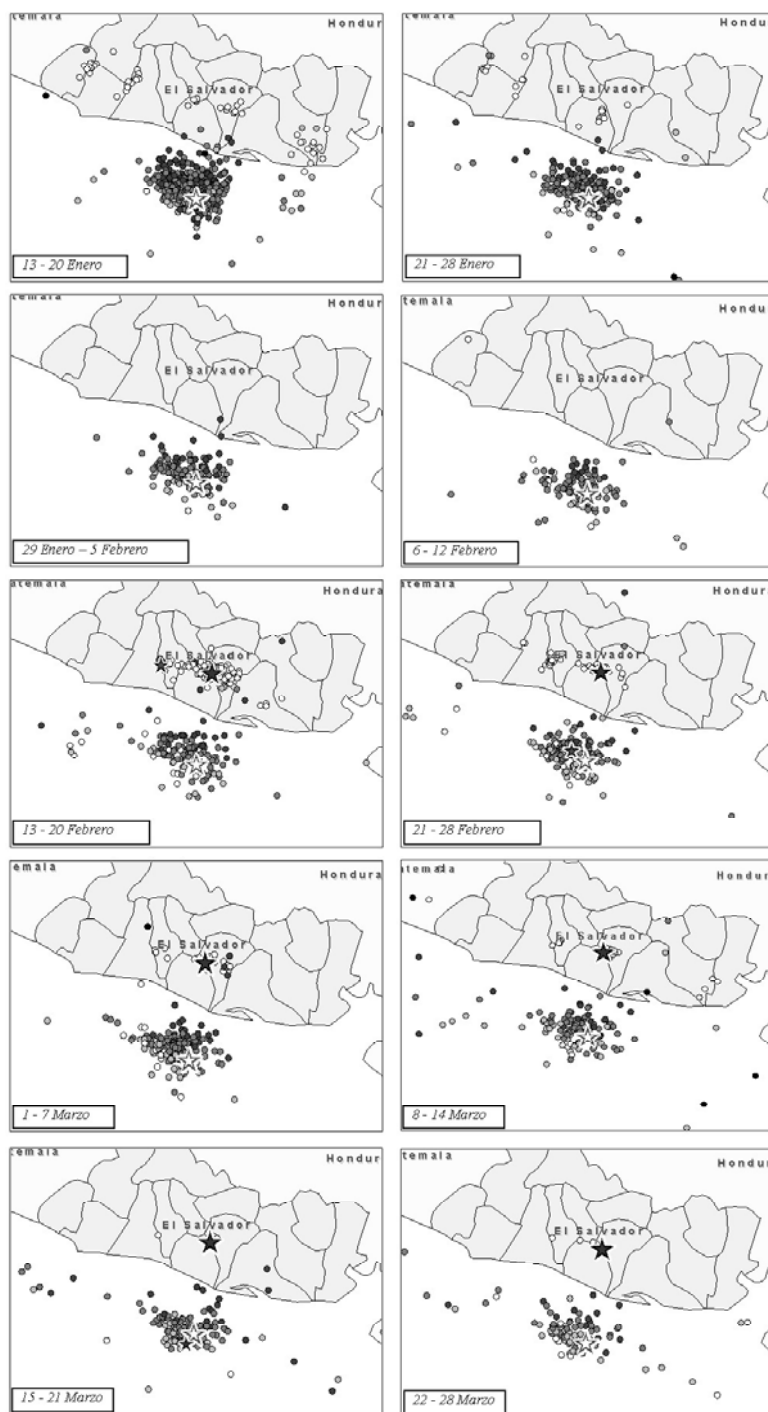


Figura 2. Sismicidad de El Salvador, desde el sismo principal del 13 de enero de 2001, desplegada por ventanas de una semana de duración, hasta el 28 de marzo de 2001

3.3. Modelización de las superficies de ruptura.

Después de estudiar la distribución espacial de las dos secuencias de réplicas, tratamos ahora de modelizar las superficies de ruptura asociadas a los sismos del 13 de Enero y del 13 de Febrero. Para ello hemos considerado las réplicas ocurridas durante los 3 días siguientes a cada terremoto principal, para lo cual utilizamos el SIG creado al efecto. Este nos permitió, discriminar los eventos no relacionados con el sismo principal, ya que durante los días siguientes al mismo tuvo lugar una actividad local generalizada en el sistema de fallas dentro del continente y los correspondientes sismos, aunque probablemente fueron “disparados” por el del 13 de enero, no pueden considerarse réplicas del mismo.

En un primer paso, llevamos a cabo un análisis puramente estadístico, usando un método ortogonal de mínimos cuadrados, para encontrar el mejor ajuste elíptico a la distribución de hipocentros de cada serie. Este análisis, efectuado de forma independiente de la información del mecanismo focal y otras consideraciones sismológicas, da resultados con rigor matemático, pero no coherentes con el proceso físico y las observaciones existentes. De hecho, el plano estimado para el sismo del 13 de Febrero resulta con un buzamiento mucho más pequeño que el dado por el mecanismo. Para evitar este tipo de errores, hemos probado diferentes orientaciones de planos, centrados en la nube de réplicas, de acuerdo con los mecanismos focales estimados por diversas agencias. Todas ellas coinciden en presentar un mecanismo de falla normal para el 13 de Enero y uno de desgarre para el 13 de Febrero, con dos planos ortogonales y casi verticales para el caso de este último, que introducen una ambigüedad sobre el posible plano de ruptura. Buscamos así la mejor solución, que represente mayor coherencia entre el mecanismo y el área de réplicas.

Para el sismo del 13 de Enero el resultado es un plano buzando 60° al NE con una dirección $N 82^\circ W$, siguiendo un plano sub-paralelo a la zona de subducción, mostrado en la figura 3a. La traza de la falla es también representada y puede verse bastante paralela a la costa. El área de ruptura es modelizada por una elipse con eje 42 km en longitud y 76 km de anchura. El área de ruptura es 2532 km^2 y la parte superior llega a profundidad de 20 km.

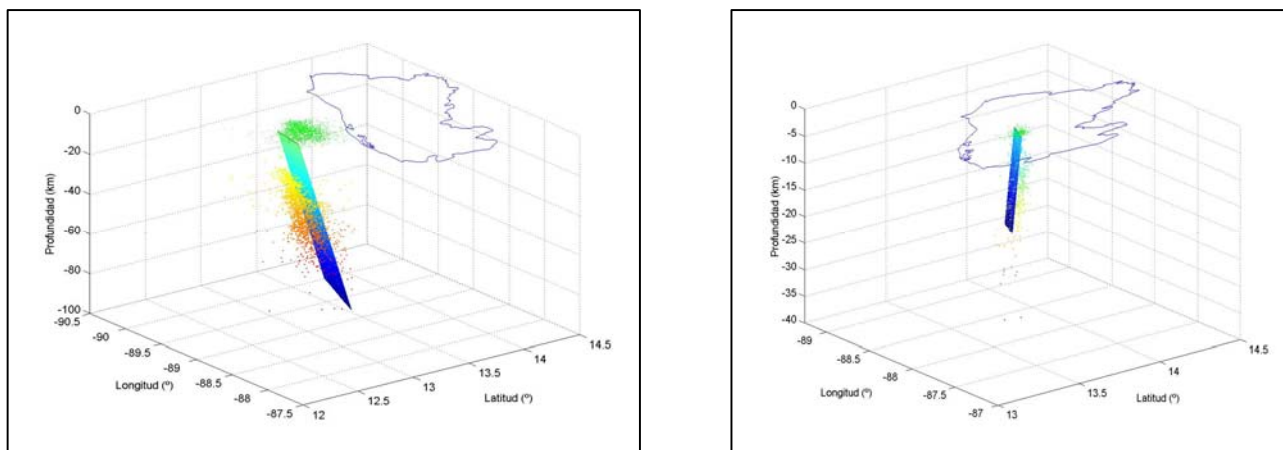


Figura 3. Planos de falla obtenidos para los sismos del 13 de Enero (a) y del 13 de febrero (b)

Para el sismo cortical del 13 de febrero la solución que mejor acuerda con uno de los planos determinados por mecanismo es la que tiene dirección $N 81^\circ E$ y buzamiento de 70° . La superficie de ruptura es de 470 km^2 . La parte superior alcanza profundidades de 5 km, sin romper en superficie, y la mayor parte de los hipocentros están confinados a profundidades menores de 15 km.

4. CONCLUSIONES

El análisis hecho sobre la distribución espacial de sismos del 2001 en El Salvador, junto con el estudio de la evolución temporal que se presentará en la segunda parte del trabajo, han permitido establecer conclusiones sobre posibles interacciones que parecen haberse presentado entre las secuencias de réplicas de subducción y cadena volcánica. Particularmente, se ha comprobado que algunos eventos de magnitud alrededor de 5 han actuado como mecanismo de disparo de nuevos sismos con el mismo o diferente origen. Dichos eventos son, al mismo tiempo, causa y efecto de la intensa actividad registrada. Una discusión más extensa de este resultado se presentará en la segunda parte del trabajo, tras el análisis de la evolución temporal que lo confirma.

5. BIBLIOGRAFÍA (La bibliografía completa se presenta al final de la parte 2 del trabajo)