



# DESTRUCTIVE EARTHQUAKES IN EL SALVADOR TRIGGERED BY EXTENSIONAL EVENTS IN THE SUBDUCTING PLATE

## TERREMOTOS DESTRUCTIVOS EN EL SALVADOR INDUCIDOS POR EVENTOS EXTENSIONALES EN LA PLACA EN SUBDUCCIÓN

José J. Martínez-Díaz<sup>1</sup>, Belén Benito<sup>2</sup>, José A. Álvarez-Gómez<sup>1</sup> y Douglas Hernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 28040, Spain

<sup>2</sup> E.U.I.T. Topografía, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid Spain

<sup>3</sup> Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), El Salvador Avda Las Mercedes, Edificio ISTA, San Salvador

### SUMMARY

We investigate the existence of a mechanism of static stress triggering driven by the interaction of normal faults in the Middle American subduction zone and strike-slip faults in the El Salvador volcanic arc. The local geology points to a large strike-slip fault zone, the El Salvador fault zone, as the source of several destructive earthquakes in El Salvador along the volcanic arc. We modeled the Coulomb failure stress (CFS) change produced by the June 1982 and January 2001 subduction events on planes parallel to the El Salvador fault zone. The results have broad implications for future risk management in the region, as they suggest a causative relationship between the position of the normal-slip events in the subduction zone, and the strike-slip events in the volcanic arc. After the February 2001 event, an important area of the El Salvador fault zone located to the east of the Rio Lempa was loaded with a positive change in Coulomb failure stress ( $>0.15$  MPa). This scenario must be considered in the seismic hazard assessment studies that will be carried out in this area

### 1. INTRODUCCIÓN

El Salvador ha sufrido al menos 11 terremotos destructivos durante los últimos 100 años que han causado más de 3000 víctimas debidas bien al efecto directo de las sacudidas o a los deslizamiento de ladera inducidos (Bommer et al., 2002). La zona sísmica de El Salvador se sitúa en las proximidades de la zona de subducción centroamericana, en el área donde convergen las placas de Cocos y la Placa del Caribe con una velocidad de 73 a 84 mm a<sup>-1</sup> (Demets, 2001) (Fig.1). En función de su localización y origen tectónico pueden distinguirse dos tipos de actividad sísmica. Los terremotos de mayor magnitud ( $M_w > 7.0$ ) se generan a una profundidad intermedia en la placa de cocos a lo largo de la zona de interfase con la placa del Caribe. En el continente las fallas a lo largo del arco volcánico generan terremotos superficiales moderados ( $5.5 < M < 6.8$ ) que son responsables de la mayor parte de los daños y la destrucción en El Salvador.

Los grandes terremotos de falla normal que se generaron en la placa que subduce frente a las costas de El Salvador (1982, Ms 7.3, and 2001, Ms 7.8) estuvieron precedidos y seguidos por terremotos de desgarre destructivos en el arco volcánico (1951 Ms 5.9, 1965 Ms 6.3, 1986 Ms 5.4 and 2001 Ms 6.5). En estudios previos se ha propuesto la posibilidad de que esta sucesión de eventos pueda estar relacionada a procesos de interacción cosísmica y postsísmica (Benito et al., *en prensa*). La transferencia de esfuerzos de fractura de Coulomb estáticos (CFS) producida por un evento sísmico principal es capaz de promover la ocurrencia de otros eventos principales y/o controlar la posición de las réplicas incluso a decenas de kilómetros de distancia (Harris, 1998; Stein, 1999). Las implicaciones que la existencia de este tipo de interacciones puede tener en las evaluaciones de peligrosidad sísmica de la zona son muy importantes y justifican este tipo de estudios en una zona altamente vulnerable como es El Salvador.

### 2. ZONA DE FALLA DE EL SALVADOR

La imagen de RADAR-SRTM de la zona (JPL, NASA <http://photojournal.jpl.nasa.gov/>) y el modelo digital del terreno, construido a partir de mapas topográficos a escala 1:25.000, muestran la existencia de una gran estructura con más de 100 km de

longitud a la que hemos denominado zona de falla de El Salvador (ZFES) (Fig 2). Esta zona de falla, con orientación N90°-100°E, está formada por varios segmentos estructurales y se extiende desde la frontera oriental de El Salvador hasta la ribera oeste del Lago Ilopango. En este punto la ZFES intersecta un grupo de fallas NNE-SSW en las proximidades de San Salvador.

La ZFES deforma materiales de edad cuaternaria con movimientos de desgarre dextral. Seis de los mayores terremotos destructivos ocurridos a lo largo del eje volcánico ocurrieron en la parte occidental de la ZFES. También el terremoto de 1951 parece estar asociado con esta estructura. La distribución de réplicas del terremoto de Febrero de 2001 ( $M_w$  6.6) muestra claramente que este evento se produjo por la rotura de un segmento de la ZFES desde el Río Lempa hasta el Lago Ilopango (RS en Fig 2). La geología local apoya que los segmentos de la ZFES fueron el origen de los principales terremotos destructivos ocurridos a lo largo del arco volcánico de El Salvador.

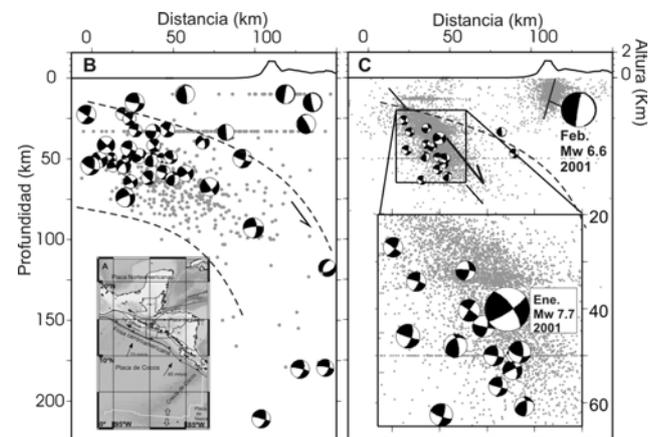


Figura 1ª: distribución de la sismicidad total en una sección NE-SW transversal al límite de placas Cocos-Caribe (a y b). (c) hipocentros y mecanismos focales de las réplicas de los terremotos de Enero y Febrero de 2001 en la misma sección.

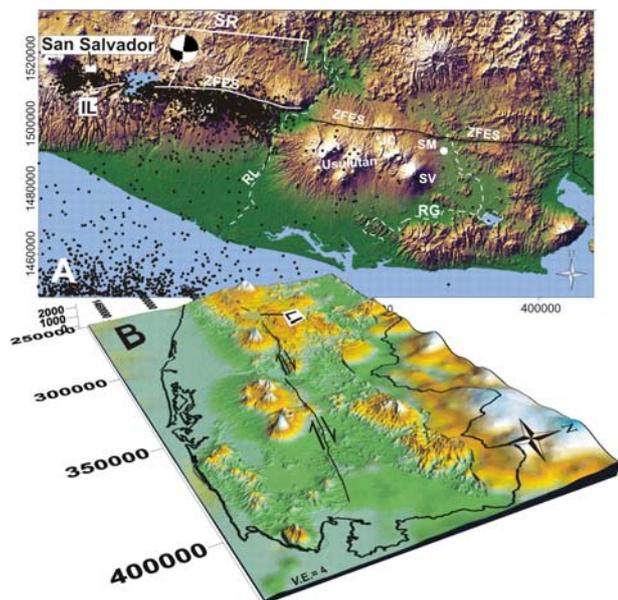


Figura 2. A: imagen de RADAR SRTM de la Zona de Falla de El Salvador (ZFES) sobre la que se proyectan las réplicas del terremoto de febrero de 2001 (SR: segmento reactivado de la falla). B. Modelo digital de elevación del eje volcánico sobre el que se representa la traza de la ZFES

### 3. METODOLOGÍA

Para calcular cómo los grandes eventos de la zona de subducción pueden afectar la estabilidad de la ZFES se ha modelado el cambio de esfuerzos estáticos de Coulomb (CFS) generado por los terremotos de 1982 y 2001 sobre planos paralelos a dicha zona de falla. Éstos planos son paralelos también a la solución focal de los terremotos de 1986 (Mw 5.7) y febrero de 2001 (Mw 6.6). El cambio de CFS se ha calculado mediante la expresión,

$$\Delta CFS = \Delta \tau_{\beta} - \mu' \Delta \sigma_{\beta}$$

donde  $\Delta \tau_{\beta}$  es el cambio de esfuerzo de cizalla sobre el plano, considerado positivo en el sentido del movimiento de la falla, y  $\Delta \sigma_{\beta}$  es el cambio de esfuerzo normal sobre el plano y es positivo en si tiene carácter compresivo.  $\mu'$  es el coeficiente de fricción aparente e incluye el efecto de la presión de fluidos así como las propiedades del material de la zona de falla [ver Harris (1998)]. Los valores positivos de  $\Delta CFS$  promueven el movimiento de la falla, mientras que los valores negativos lo inhiben. Se han estimado el cambio de esfuerzo en un semiespacio elástico siguiendo el método de Okada (1992). El coeficiente de fricción aparente utilizado ha sido de 0.4. En cualquier caso, la introducción de valores diferentes de coeficiente friccional aparente oscilando entre 0,2 y 0,6 no produjeron variaciones significativas en los resultados.

Los parámetros utilizados en los modelos se han derivado de los mecanismos focales y del análisis espacial del catálogo relocalizado de réplicas descrito en detalle en Benito et al. (*en prensa*). Las roturas fueron modeladas como rectángulos. Los resultados de la figura 3 muestran en sección y en planta los cambios de CFS generados por los eventos de Octubre de 1986 y Enero y Febrero de 2001.

### 4. CONCLUSIONES

Los modelos realizados muestran que los terremotos de falla normal que se producen en la zona de subducción con planos de rotura subparalelos a la dirección de la fosa inducen un lóbulos de aumento de CFS sobre planos N 90° E con buzamiento elevado situados en la zona del eje volcánico (ver Fig. 3a). Este tipo de terremotos genera aumentos de CFS por encima de 0,3 MPa en amplias áreas de la ZFES.

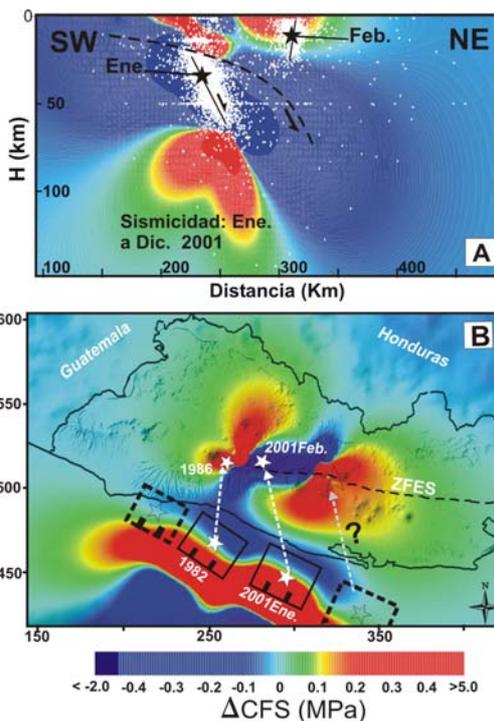


Figura 3. A: Modelo en sección de la transferencia de esfuerzo de Coulomb (CFS) inducido por el terremoto de enero de 2001 sobre la ZFES. Se incluyen las réplicas de los eventos de ene. Y feb de 2001. B: Modelo conjunto en planta de la transferencia de CFS inducida por los eventos de 1982, y 2001 sobre la ZFES para una profundidad de 10 km. Un sector importante de ZFES ha quedado cargado de esfuerzo de Coulomb.

El modelo de cambio de CFS inducido por los tres mayores eventos ocurridos en la zona de estudio en los últimos 25 años (Jun. 1982, Ene. 2001 y Feb. 2001) sobre planos paralelos a la ZFES sugiere la existencia de una relación causa-efecto entre la posición de los grandes eventos de falla normal en la zona de subducción, y los eventos de desgarre en la zona del eje volcánico. Además, el mapa de cambio de CFS muestra que después del último evento en febrero de 2001 una importante área de la zona de falla de El Salvador situada al este de río Lempa ha sido cargada con más de 0.15 MPa (Fig. 4E). Un evento extensional importante localizado al sureste del evento de enero de 2001 produciría una recarga de ese sector de la ZFES que aumentaría la probabilidad de rotura ya de por sí aumentada tras los últimos terremotos. Esta posibilidad presenta importantes implicaciones en los estudios de peligrosidad sísmica que se desarrollen en el futuro en la zona. La localización del próximo evento extensional debería ser considerado a la hora de evaluar las probabilidades de excedencia de aceleración o movimiento del suelo a lo largo del eje volcánico de El Salvador.

### 5. REFERENCIAS

Benito, B., Cepeda, J., and Martínez-Díaz, J.J., 2004, Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes, in Rose, W.I., et al., eds., Recent work on natural hazards mitigation in El Salvador: Geological Society of America Special Paper 375 (in press).

Bommer, J., Benito, B., Ciudad-Real, M., Lemoine, A., López-Menjívar, M., Madariaga, R., Mankelov, J., Mendez-Hasbun, P., Murphy, W., Nieto-Lovo, M., Rodríguez, C., and Rosa, H., 2002, The Salvador earthquakes of January and February 2001: Context, characteristics and implications for seismic risk: Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v. 22, p. 389-418.

DeMets, C., 2001, A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc: Geophysical Research Letters, v. 28, p. 4043-4046.

Harris, R.A., 1998, Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard: Journal of Geophysical Research, v. 103, p. 347-358.

Okada, Y., 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 82, p. 1018-1040.

Stein, R.S., 1999, The role of stress transfer in earthquake recurrence: Nature, v. 402, p. 605-609.