

# Análisis de la Sismicidad de 2001 en El Salvador. Parte 2: Distribución Temporal.

## *Analysis of the 2001 Seismicity in El Salvador. Part 2: Temporal Distribution.*

Belén Benito<sup>1</sup>, Moisés Contreras<sup>1</sup>, Miryam Bravo<sup>1</sup>, Gema Barrero<sup>1</sup>, Esther Jiménez<sup>1</sup>

E.U.I.T. Topográfica. Universidad Politécnica de Madrid.  
ma\_ben@euitto.upm.es

### SUMMARY

*This paper presents a study of the temporal distribution of the earthquakes occurred in El Salvador during 2001. This part is the continuation of the previous one, aimed to analyze the spatial distribution. The main goal of the global study is to know the evolution of the events with different origine which took place in El Salvador during the last year and to analyze the possible interaction between them. These earthquakes occurred in the subduction zone Cocos-Caribbean and in the local faults aligned with the volcanic chain. The main shocks of both sequences were recorded on January 13 th and February 13 th, respectively. Their aftershock sequences, together with other minor events which followed each another, produced an intense activity in the zone, creating a big alarm in the population. As result of the study done, we found that some events with  $M \approx 5$  acted as triggers of other shocks with the same or different origin (subduction or local faults). All of which has contributed to infer conclusions about the interaction of both series and to explain the intense activity by the triggering mechanism which apparently presents itself.*

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

### 1. INTRODUCCIÓN

Una descripción de la crisis sísmica que afectó a El Salvador a comienzos de 2001 ha sido hecha en la primera parte del trabajo. Ahora focalizamos el estudio en la evolución temporal de la sismicidad, que se plantea de forma complementaria al análisis de la distribución espacial, tratando de corroborar los resultados encontrados previamente.

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, que en ciertos momentos parecía no decaer de acuerdo a las leyes conocidas, como la ley de Omori. Sin embargo, esta actividad puede ser explicada por la coexistencia de dos sismos principales con diferentes orígenes de ruptura (subducción y fallas locales), cuyas réplicas se han superpuesto temporalmente y con cierta probabilidad se han podido inducir unas a otras. La cuestión de 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) es también discutida.

### 2. DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE RÉPLICAS

A continuación se ha estudiado la evolución temporal de cada secuencia de réplicas, de forma independiente para los eventos del 13 de Enero y del 13 de Febrero, y en el caso del segundo, los premonitores también han sido incluidos en el análisis. A partir de los resultados hemos estudiado la posible interacción entre ambas series. La discriminación de los eventos asociados a cada secuencia es hecha tomando los epicentros vinculados a cada superficie previamente definida

pero extendiendo el intervalo de tiempo a todo el periodo de 2001. Para tener una visión global de la evolución temporal, la figura 1 representa los histogramas del número de eventos por día en función del tiempo, para las dos secuencias del 13 de Enero y 13 de Febrero. El análisis gráfico permite corroborar lo ya indicado en el estudio de la actividad por ventanas de una semana (parte 1): decrecimiento y crecimiento alternativo de la actividad de ambos tipos, que parecen sucederse en el tiempo.

En la serie de subducción es de destacar la disminución casi exponencial del número de eventos tras el aumento brusco del 13 de Enero hasta el 25 de ese mismo mes, día en el que la actividad parece estabilizarse hasta el 7 de Febrero. A partir de ahí comienza un ligero descenso en el número de eventos, hasta que sucede el sismo local del 13 de Febrero, que parece motivar un ligero incremento también en la actividad de subducción. El número de sismos vuelve a aumentar considerablemente a partir del 28 de Febrero, coincidiendo con la ocurrencia de un nuevo evento de  $M = 5,6$ . La actividad decrece otra vez hasta el 16 de Marzo, fecha en la que tiene lugar otro sismo con el mismo origen, de  $M = 5,7$ , con el consiguiente aumento de réplicas durante aproximadamente una semana. A partir de ahí dicha actividad va decreciendo gradualmente.

Analizando en la misma figura 1 la actividad local de cadena volcánica, lo primero que cabe destacar es la ocurrencia de eventos con este origen entre el 13 de Enero y el 25 de Enero, que pueden considerarse premonitores del siguiente sismo principal del 13 de Febrero, pero que obviamente se han activado con el sismo anterior. Es llamativa la total laguna de sismos en las dos semanas siguientes, hasta el 13 de Febrero, día en que se produce el

mayor evento de la serie, con magnitud 6.6. Este dispara su secuencia de réplicas que decaen exponencialmente en número hasta el 17 de Febrero, fecha en la que ocurre el nuevo evento local de  $M = 5.1$ . El nivel de actividad se mantiene casi constante hasta aproximadamente el 5 de Marzo, que comienza una disminución gradual. Sin embargo el 10 de Abril tiene lugar un significativo incremento, coincidiendo con el sismo de  $M=4.9$  de ese día y del 8 al 12 de Mayo se aprecia un incremento brusco, motivado por los tres eventos de  $M > 4.5$  que se suceden durante estos dos días.

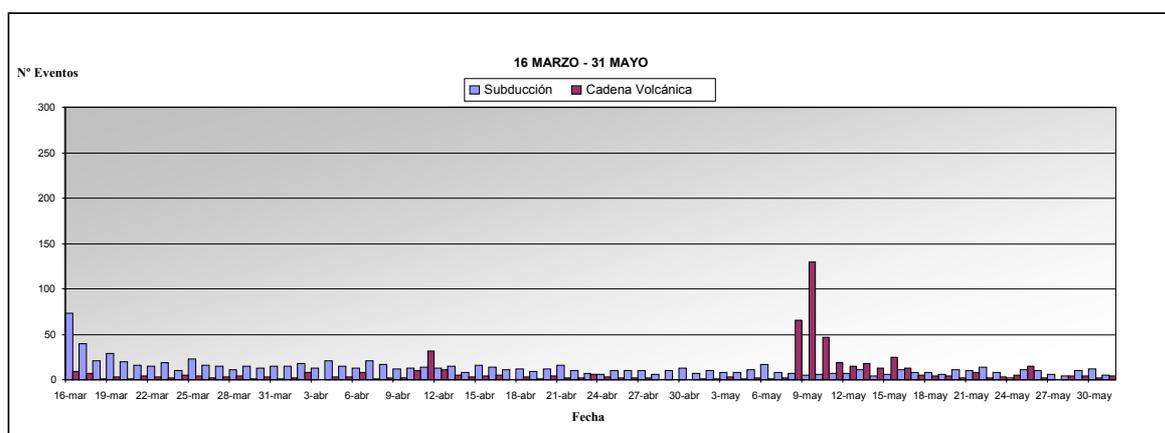
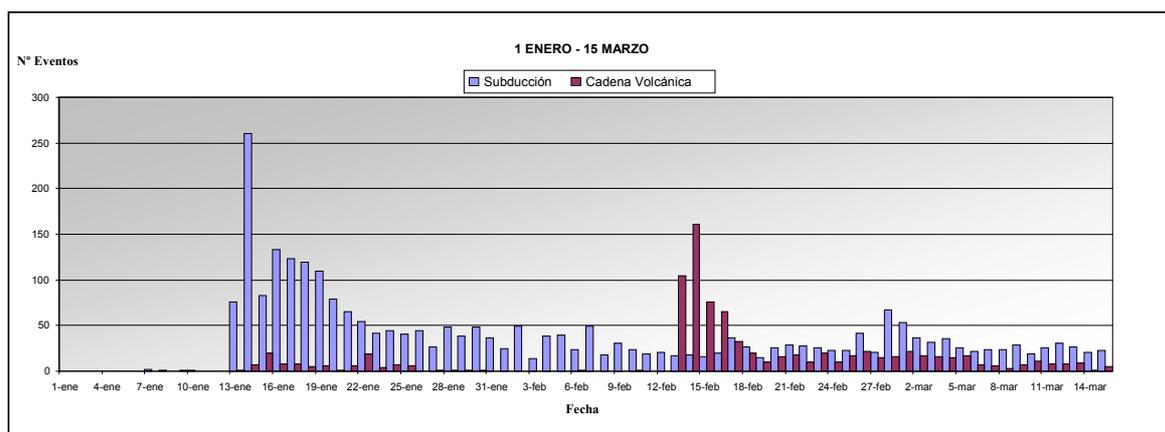
Todo lo anterior parece corroborar la interacción entre eventos con diferente origen, que puede ratificarse analizando la representación conjunta de ambas series, subducción y cadena volcánica, tomando como tiempo común de referencia el 13 de Enero, a escala logarítmica. Esta representación se muestra en la figura 2, donde se puede apreciar una fuerte irregularidad en la caída de ambas series, durante el intervalo en que son superpuestas o coinciden con un nuevo sismo, principalmente para el 13 de Enero. La gráfica correspondiente a subducción presenta aproximadamente 3 tendencias, separadas por dos puntos de inflexión que coinciden con la ocurrencia de los eventos locales del 13 de Febrero y el 8 de Mayo. Precisamente esos dos días la gráfica de cadena volcánica presenta dos picos claros de

actividad, con los mayores incrementos en el número de eventos de esta serie, que llega a ser mayor que 100 en ambos casos.

Ahondando en esta cuestión, hemos estudiado también el decaimiento de réplicas de cada secuencia de una forma analítica, haciendo ajustes a la bien conocida ley de Omori, que en forma logarítmica corresponde a la expresión:  $\text{Log}(N(t)) = a - b \cdot \text{log}(t)$ ; siendo  $N(t)$  el número de eventos por día y  $t$  el tiempo en días desde el sismo principal. En la figura 3 se muestran los ajustes para las dos series en dos intervalos temporales para cada una de ellas. Para la serie de subducción un primer ajuste es hecho con la secuencia total (todo el año) y un segundo tomando sólo los eventos entre el 13 de Enero y el 13 de Febrero. Puede apreciarse que las réplicas decaen siguiendo la ley de Omori en el periodo hasta el 13 de Febrero, pero se pierde el decaimiento lineal cuando el segundo terremoto ocurre. El ajuste a la ley de Omori es mejor si sólo consideramos las réplicas antes del segundo terremoto (ecuación 2) que con la secuencia completa (ecuación 1).

$$\text{Log } N(t) = 2.7 - 0.8 \cdot \text{log}(t) \quad R^2 = 0.7 \quad (1)$$

$$\text{Log } N(t) = 2.4 - 0.7 \cdot \text{log}(t) \quad R^2 = 0.8 \quad (2)$$



**Figura 1. Histograma con el número de eventos en función del tiempo para el periodo del 13 de Enero al 31 de Mayo, con representación independiente de las réplicas del 13 de Enero y réplicas y premonitores del 13 de Febrero.**

Para la serie local un primer ajuste es hecho con la secuencia total de réplicas durante todo el año, donde es posible ver que la tendencia exponencial de decaimiento se pierde al cabo de aproximadamente 100 días [ $\log(t)=2$ ], coincidiendo con la ocurrencia de los sismos del 8 y 9 de Mayo. Una segunda prueba, considerando solo los eventos hasta esta fecha muestra un mejor ajuste. Las leyes encontradas para esos dos intervalos son dadas en las ecuaciones 3 y 4, respectivamente.

$$\text{Log } N(t) = 1.9 - 0.7 \cdot \log(t) \quad R^2=0.5 \quad (3)$$

$$\text{Log } N(t) = 2.2 - 1.1 \cdot \log(t) \quad R^2=0.7 \quad (4)$$

Los resultados confirman una perturbación en la tendencia lineal de decaimiento cuando tiene lugar otro terremoto de magnitud moderada. Un resultado similar se ha encontrado en el análisis de la secuencia de réplicas del terremoto de Izmit (Turquía), el 17 de Agosto de 1999. La distribución temporal de réplicas sigue la ley de Omori excepto para perturbaciones debidas a la actividad que sucede a eventos de magnitud

alrededor de 5, en particular el movimiento de la Isla de Mármara del 20 de Septiembre (Polat et al, 2002).

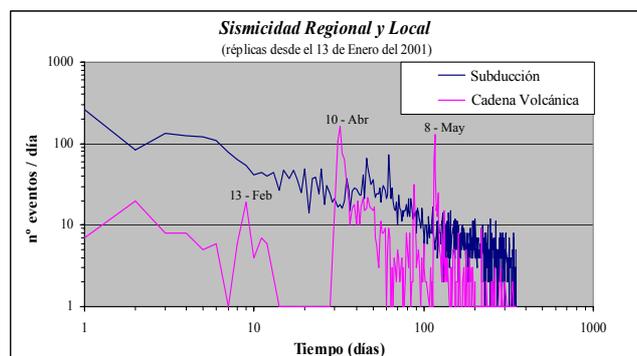


Figura 2. Distribución temporal conjunta de las series de eventos asociadas al 13 de Enero(subducción) y 13 de febrero (cadena volcánica), con referencia al tiempo origen del primer evento principal, en escala logarítmica.

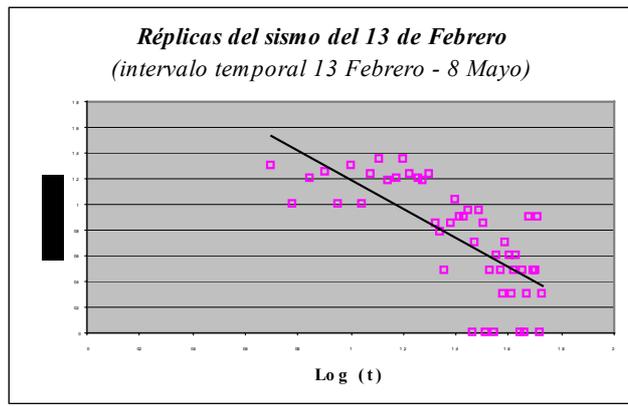
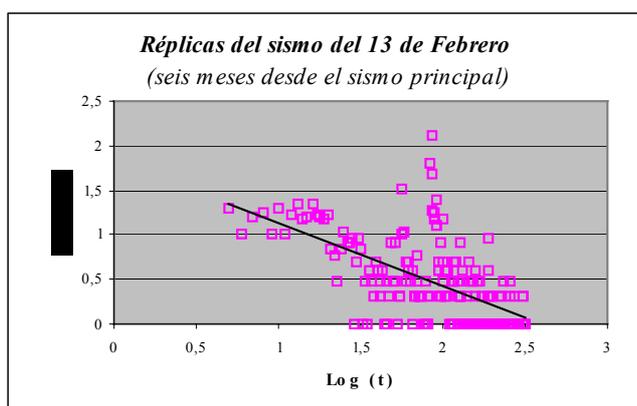
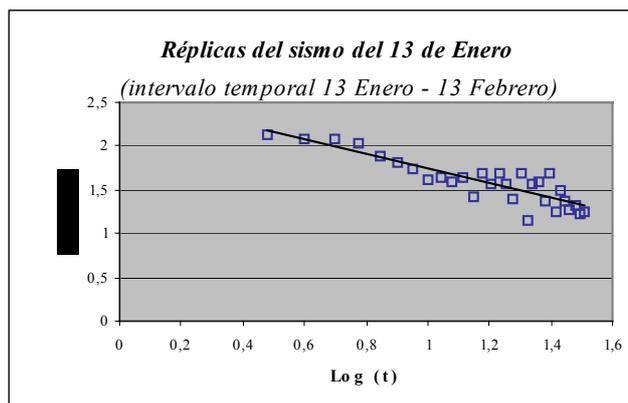
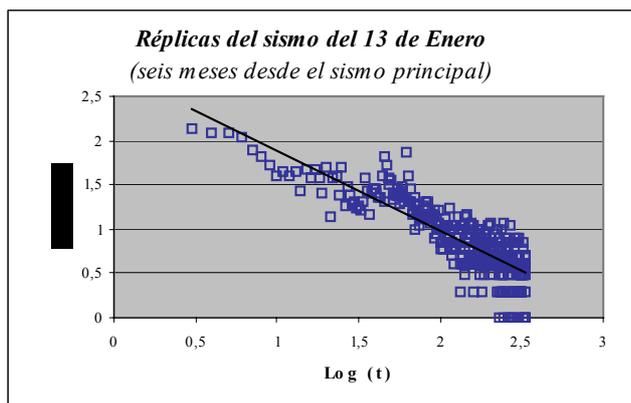


Figura 3. Ajustes de las distribuciones de réplicas del 13 de Enero y del 13 de Febrero a la Ley de Omori

Figura 3. Ajustes de las distribuciones de réplicas del 13 de Enero y del 13 de Febrero a la Ley de Omori.

### 3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis hecho de la distribución espacial y temporal de los sismos del 2001 lleva a la conclusión de que tan intensa actividad puede ser explicada por la coexistencia de los dos sismos principales con diferentes fuentes (subducción y fallamiento local), cuyas réplicas se han superpuesto temporalmente y se han podido inducir unas a otras. Se ha comprobado, además, que algunos eventos de magnitud entorno a 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.

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 se plantea en este trabajo es si el sismo del 13 de Febrero pudo ser de alguna forma activado por el evento de subducción del mes anterior. Todo parece indicar que primer sismo del 13 de Enero disparó una o varias fallas locales, y éstas a su vez se activaron mutuamente, al tiempo que indujeron nuevos eventos en la zona de subducción. Cabe preguntarse si estos sismos locales se habrían producido igualmente aunque no hubiera ocurrido el sismo del 13 de Enero. Una respuesta razonable es que probablemente habrían ocurrido pasado algún tiempo y de forma más paulatina. La historia sísmica de El Salvador demuestra que hay un sismo destructor de cadena volcánica cada aproximadamente 20 años, y el último fue en 1986. Es probable entonces que la falla donde se produjo el sismo del 13 de Febrero tuviera bastante energía acumulada, y aunque tal vez no se habría disparado justo ahora por sí sola, la acumulación de esfuerzos derivada del reajuste de tensiones tras el 13 de Enero sí ha podido actuar como disparo. Algo así como "la gota que desborda el vaso". Algo similar, a una escala de menor magnitud ha podido suceder con los restantes sismos de moderada magnitud ocurridos en la zona. Cada uno de ellos ha podido ser inductor de nuevos sismos y por esa razón en algunos periodos en lugar de tender a decrecer la actividad como cabría esperar, lo que claramente se produjo fue un incremento.

Finalmente, cabe destacar la importancia que tiene la posible actuación de ciertos sismos como mecanismo de disparo de otros con diferente fuente, en la peligrosidad sísmica de la región; algo que se hace extensivo a otras zonas con régimen tectónico similar. Sería conveniente investigar las condiciones en las que un sismo de subducción puede interactuar con otros de cadena volcánica y repetir procesos similares al visto en este trabajo, algo que planteamos como línea abierta de investigación para estudios futuros.

### 4. BIBLIOGRAFÍA

- Bommer, J; B. Benito; M. Ciudad-Real; A. Lemoine; M. Lopez-Menjivar; R. Madariaga; J. Mankelow; P. Mendez-Hasbun; W. Murphy; M. Nieto-Lovo; C. Rodríguez and H. Rosa.** The Salvador Earthquakes of January and February 2001: Context, characteristics and implications
- Buforn, E; A. Lemoine; A. Udias and R. Madariaga (2001).** Mecanismo focal de los terremotos de El Salvador. 2º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, Octubre 2001, Madrid.
- Christophersen, A and E. Smith (2000).** A global model for the aftershock behaviour, Proc. 12 WCEE, New Zealand, 2000.
- Gardi, M. Coco, A. M. Negro, R. Sabadini y S.K. Singh, 2000.** Dynamic modelling of the subduction zone of Central Mexico. *Geophys. J. Int.*, 143, 809-820.
- Harlow, D.H., White, R., Rymer, M Y Alvarado, G. (1993).** The San Salvador earthquake of 10 October 1986 and its historical context, *Bull. Seism. Soc. Am.*, V 83, pp 1143-1154.
- Omori, F. (1984).** On the aftershocks of earthquakes, *Journal College of Sciences, Imperial University, Vol 7, pp 111-200.*
- Polat, O; H. Eyidogan, H. Haessler, A. Cisternas and H. Phillip (2002).** Analysis and interpretation of the aftershock sequence of the August 17, 1999, Izmit (Turkey) earthquake., *Journal of Seismology, in press.*
- Rojas, W; Bungum, H; Lindholm, C.D. (1993).** A catalog of historical and recent earthquakes in Central America, Report NORSAR, 77p
- White, R. (1991).** Tectonic implications of upper-crustal seismicity in Central America. In: *The Geology of North America, Decade map, vol 1, pp 323-338.*
- White, Ra., Ligorria, J.P. Y Cifuentes, I.L. (1998).** Seismic History of the Middle America subduction Zone along the Guatemala Triple Junction, *Draft*