

Postnóstico (pronóstico hecho a posteriori) del sismo del 11 de octubre de 2013 en Venezuela, mediante análisis de semiperiodicidad

Quinteros, Claudia B.^{1,2} y F. Alejandro Nava¹

¹Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, División de Ciencias de la Tierra.

Departamento de Sismología

²Departamento de Geofísica FUNVISIS, Venezuela

Email: cquinter@cicese.mx

Email: fnava@cicese.mx

Resumen

Un reciente método para buscar secuencias de sismos mediante análisis espectral de Fourier aplicado a la serie de tiempos de ocurrencia de sismos ocurridos en el noreste de Venezuela, desde 1922 hasta inicio del 2013, permitió identificar una secuencia semiperiódica de 6 eventos con periodicidad $\tau_p \approx 14.4$ años, error $\sigma \approx 1.525$ años y probabilidad de ocurrencia no aleatoria $P_c \approx 0.8$, lo que resulta en un postnóstico (pronóstico hecho a posteriori) muy acertado para el sismo ocurrido el 11 de octubre de 2013 cercano a la costa oriental de Venezuela.

Palabras clave: Pronóstico sísmico, semiperiodicidad, Venezuela

Introducción

Una interpretación simplista del modelo del rebote elástico (Reid *et al.*, 1940) puede sugerir que los grandes sismos deben ocurrir de manera periódica; sin embargo, dicho modelo utilizado como kernel de un sistema críticamente autorregulado resulta en secuencias semiperiódicas de grandes sismos, mientras que los sismos pequeños ocurren en forma esencialmente aleatoria.

La mayor parte de los estudios que pretenden identificar secuencias semiperiódicas asumen que todos los eventos grandes ocurridos en una región sismogénica dada son producto del mismo proceso semiperiódico, pero es necesario considerar la posibilidad de que en dicha región ocurra más de un proceso semiperiódico, por lo que la serie de eventos observada puede contener eventos de más de una secuencia, así como eventos que no pertenezcan a alguna secuencia identificable. Con base en esta consideración, Nava *et al.* (2013) proponen un método para

identificar secuencias semiperiódicas mediante el análisis espectral (analítico) de Fourier y lo aplican a la región de Parkfield, California, USA. Quinteros *et al.* (2013) aplican dicho método a regiones de Japón y Venezuela. En cada caso, se logró identificar una o más secuencias semiperiódicas con alta probabilidad de no ocurrir por azar, y además, los postnósticos del último sismo de cada secuencia identificada, resultaron coherentes al coincidir con sismos ya ocurridos.

A tan sólo meses de la publicación de estos estudios, el 11 de octubre de 2013 ocurrió un sismo cercano a la costa oriental de Venezuela, de magnitud M_w 5.6 según Funvisis ó 6.1 según el USGS. Este sismo no había sido pronosticado por Quinteros *et al.* (2013) pues su análisis estuvo enfocado a la búsqueda de secuencias con tiempos interevento relativamente largos, combinando datos instrumentales con datos históricos, y la heterogeneidad de dichos datos precluyó

obtener secuencias con tiempos inetervento cortos. Por tal motivo, surgió la curiosidad de aplicar nuevamente el análisis, utilizando ahora únicamente datos instrumentales homogéneos para ver si el método podía identificar una secuencia asociada con el nuevo sismo.

Método

El método propuesto por Nava *et al.* (2013) consiste en la identificación de componentes semiperiódicas en el espectro analítico de Fourier de las series observadas de eventos cuyas magnitudes son iguales o mayores que una magnitud umbral dada y Quinteros *et al.* (2013), proponen una manera de disminuir los posibles efectos negativos de eliminar eventos con magnitudes menores que el umbral dada la incertidumbre usual ($\approx \pm 0.1$) en la estimación de magnitudes. El análisis utiliza solamente eventos grandes, pues son los apropiados para presentar comportamiento semiperiódico y los de interés desde el punto de vista de peligro sísmico. Por tanto, la magnitud umbral se escoge, por prueba y error, de mayor a menor, de manera que la series estudiadas contengan suficientes sismos para llevar a cabo el análisis, pero no tantos como para que las secuencias identificadas tengan alta probabilidad de ser debidas al azar.

Para identificar secuencias, tras elegir un pico espectral, se construye un “peine” periódico a partir del periodo y de la fase correspondientes, se descartan los eventos que están demasiado lejos de los “dientes” del peine y el proceso se repite (4 veces), utilizando criterios de aceptación cada vez más severos, hasta identificar la secuencia constituida por los sismos que mejor ajustan al peine. Si, en cualquier paso, no hay eventos que ajusten algún diente, entonces se descarta el periodo del peine como posible base de semiperiodicidad. El tiempo de ocurrencia del próximo sismo de la secuencia, es estimado por el tiempo correspondiente al próximo diente del peine.

A partir del error cuadrático entre eventos y peine se estima qué tan grande es la variación aleatoria causante de la semiperiodicidad, se establecen límites de confianza para el tiempo pronosticado y se estima la probabilidad de que el peine haya ocurrido al azar P_ϕ . La probabilidad de que no haya ocurrido al azar, $P_c = 1 - P_\phi$ es una medida de qué tan significativo es el pronóstico.

Sismicidad y datos

La región de interés, mostrada en la Figura 1, abarca el noreste de Venezuela, en donde la actividad sísmica se encuentra bien definida principalmente sobre el sistema de fallas transcurrentes de El Pilar (Beltrán *et al.*, 1995). Esta zona de fallamiento es el resultado de la interacción tectónica entre la Placa Caribe y la Placa Suramericana. La actividad sísmica en esta región es mayormente superficial, aunque puede alcanzar cerca de los 120 km de profundidad (Sobiesiak *et al.*, 2005). Se caracteriza por ser moderada, con alta tasa de microsismicidad ($M \leq 3$) y eventos de magnitud intermedia (entre 3 y 5). Sin embargo, han ocurrido grandes sismos en esta región ($M \geq 6$) que, aunque no son tan frecuentes, son motivo de estudios en busca de la mitigación de riesgos, debido a los daños significativos que éstos han causado.

El catálogo sísmico de la región es el resultado de la recopilación de información de diferentes agencias, que ha realizado Funvisis, integrada con la información que ellos generan mediante el monitoreo de la Red Nacional Sismológica de Venezuela, en conjunto con redes sismológicas del Caribe y algunas estaciones de la Red Mundial.

La ventana de tiempo analizada en este estudio, determinada por la consideración de que el catálogo sea completo y homogéneo, abarca desde 1922.00 hasta 2013.00, con 20 sismos de magnitud $M \geq 5.7$ (Tabla 1).

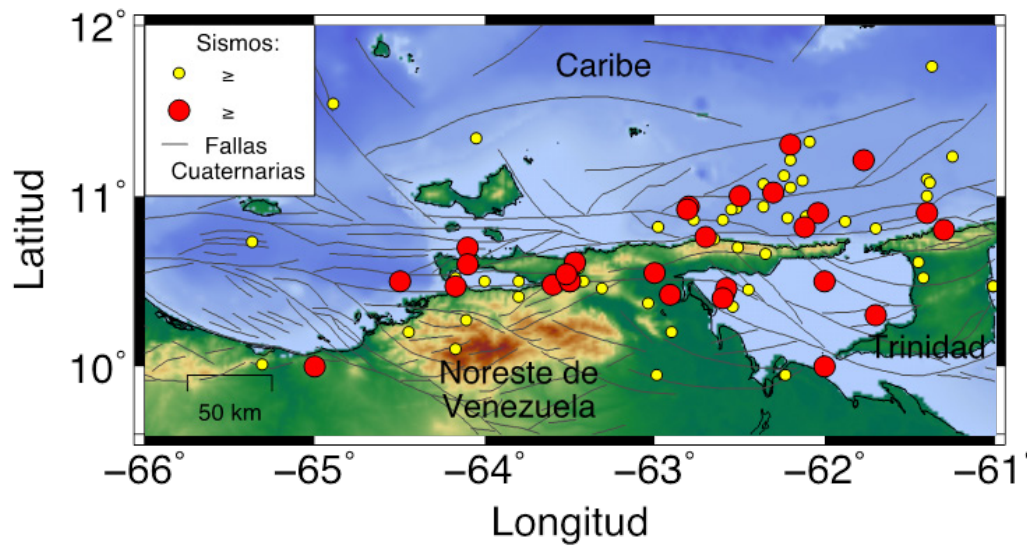


Figura 1. Mapa del noreste de Venezuela. La sismicidad representada es de magnitud $M \geq 5$, ocurrida entre los años 1530-2013.

Tabla 1. Sismos del catálogo de la región NW de Venezuela, $M \geq 5.7$.

Número	Año	M
1	1923.6014	6.5
2	1926.0851	6.5
3	1929.0452	6.9
4	1935.2738	6.5
5	1942.3451	6.0
6	1945.9763	6.5
7	1954.9254	6.3
8	1957.7521	6.1
9	1957.7568	6.7
10	1957.9827	5.9
11	1962.9900	6.1
12	1963.5322	6.3
13	1965.8586	5.8
14	1968.7193	6.2
15	1974.4457	5.7
16	1983.1828	5.9
17	1986.4427	5.9
18	1997.5200	6.9
19	2000.7585	5.9
20	2006.7440	6.1

Resultados

Fueron realizados varios análisis para diferentes magnitudes umbral M_o . Para $M_o \geq 6$ no hubo suficientes eventos para el análisis. Para $M_o = 5.9, 5.8$ y 5.7 se encontró una misma secuencia conformada por los seis eventos: 3, 5, 8, 14, 17 y 19 de la Tabla 1, con período, tiempo pronosticado y error cuadrático casi idénticos y con probabilidades de no-aleatoriedad muy parecidas.

Como ejemplo de dichos análisis mostramos el de la serie de $N=20$ eventos que ocurren

durante un intervalo $T=91$ años [1922.0-2013.0], correspondiente a $M_o = 5.7$. La Figura 2 muestra los cuatro pases del análisis; el primer pase incluye todos los eventos de la serie, y en cada pase se descartan los sismos que no ajustan al peine hasta que en el cuarto pase se considera únicamente los sismos mejor ajustados a la secuencia semiperiódica del paso previo. El análisis identificó una secuencia conformada por seis eventos (tabla 1), que tienen periodo $\tau_p=14.4$ años y error rms $\sigma=1.525$ años. La probabilidad de no aleatoriedad de esta secuencia es $P_c=0.836$.

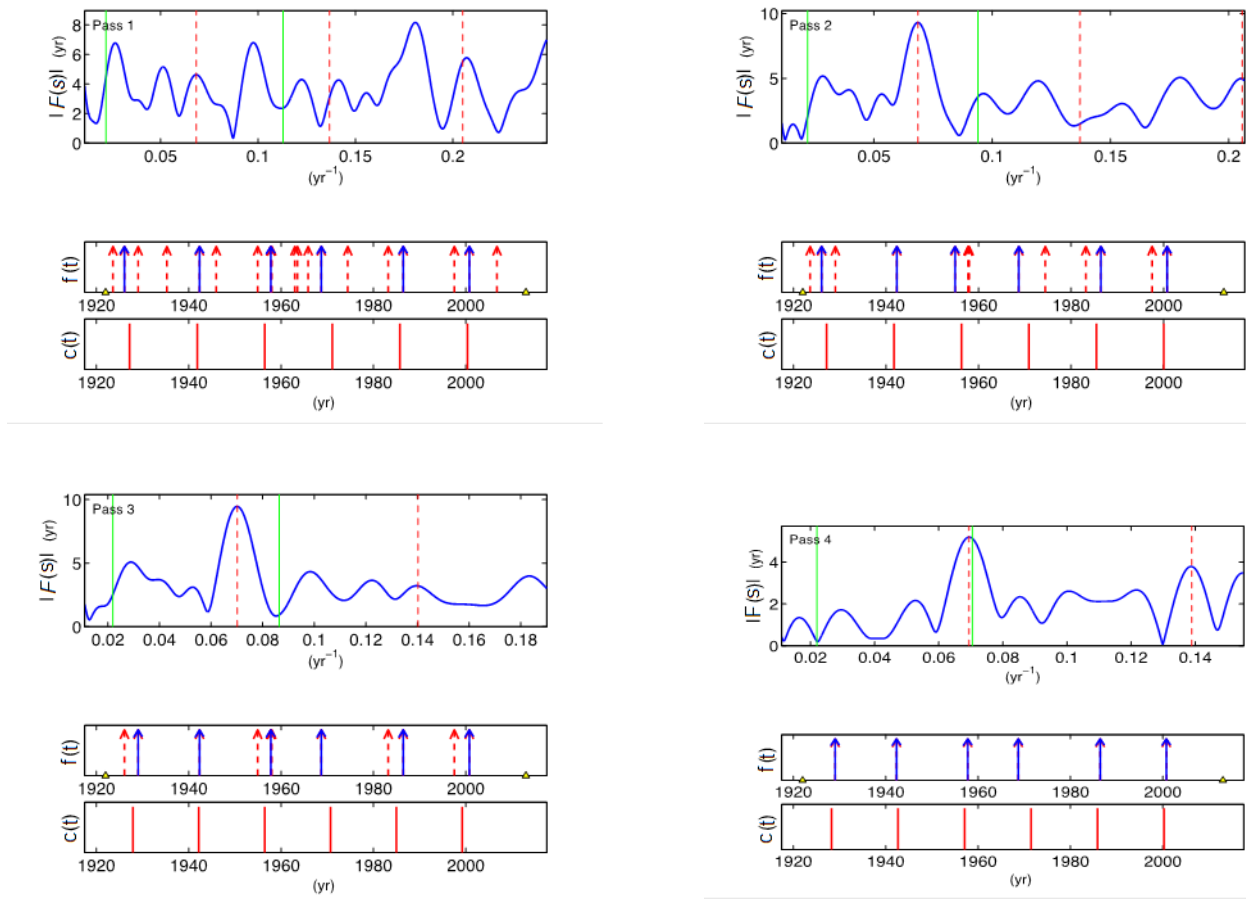


Figura 2. Primer pase (superior izquierda), segundo pase (superior derecha), tercer pase (inferior izquierda) y cuarto pase (inferior derecha) del análisis espectral, en donde se identifica la secuencia semiperiódica con frecuencia y múltiplos de ésta indicados por las líneas punteadas; bajo los espectros se muestran los eventos utilizados (flechas, con línea continua aquellos eventos identificados con los dientes del peine) y el peine determinado del espectro (líneas verticales rojas).

El pronóstico del tiempo de ocurrencia del próximo evento de la secuencia es $t=2014.670 \pm 3.050$, con intervalo de incertidumbre correspondiente a 2σ (95.45%) de confianza. La Figura 3 muestra el postnóstico del análisis; la fecha postnósticada se muestra como una línea punteada y la curva (roja) centrada en ella, mostrada en las dos gráficas superiores, es la distribución de densidad de probabilidad de ocurrencia suponiendo distribución normal para las variaciones aleatorias normalizada para tener área total P_c . El tiempo de ocurrencia del sismo del pasado 11 de octubre de 2013 está indicado por una flecha con línea discontinua que muestra lo cercano que está del tiempo postnósticado.

La probabilidad de que el sismo postnósticado ocurriera en un intervalo de $\pm 2\sigma$ centrado sobre el tiempo del postnóstico (figura 3), es $P_{cq} = 0.79$, y representa una ganancia de probabilidad de 1.24 con respecto a la probabilidad Poissoniana durante el mismo intervalo.

Conclusiones y discusión

La aplicación del método y las técnicas propuestos en Nava *et al.* (2013) y Quinteros *et al.* (2013), resulta en un postnóstico muy acertado para el sismo del pasado 11 de octubre en Venezuela. El postnóstico es bastante robusto, pues da esencialmente los mismos resultados para magnitudes umbral de 5.7, 5.8 y 5.9. Las probabilidades de no aleatoriedad correspondientes son 0.836, 0.869 y 0.903, respectivamente.

En las aplicaciones mencionadas aquí y en las mostradas en las referencias recién citadas, el método ha dado postnósticos muy acertados, pero es necesario enfatizar que los pronósticos que puedan ser hechos mediante este método están sujetos a que las suposiciones explícitas e implícitas en el mismo sean correctas. Además, aún si dichas suposiciones son correctas, es necesario tomar en cuenta las incertidumbres propias de los catálogos sísmicos, que pueden ser factores importantes para la confiabilidad de los resultados.

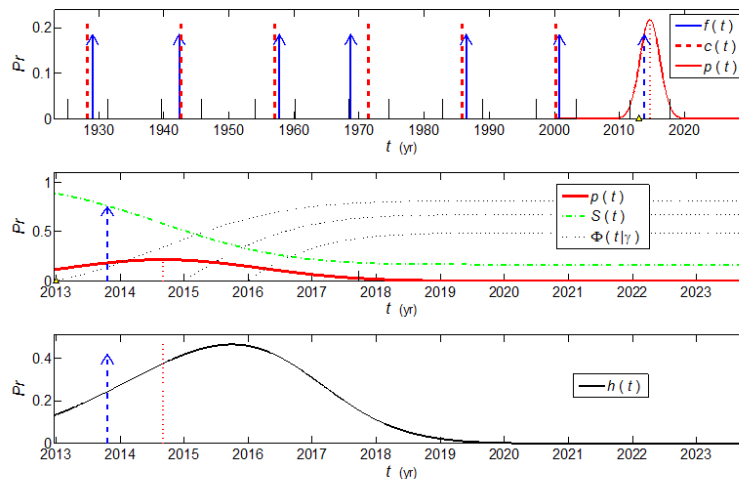


Figura 3. Postnóstico para $M_o = 5.7$. La gráfica superior representa los eventos de la secuencia semiperiódica $f(t)$, los dientes del peine $c(t)$ y la función de densidad de probabilidad (pdf) del evento postnósticado $p(t)$ normalizada para tener área total P_c . El triángulo amarillo indica el tiempo final de la serie (2013.0). En la gráfica de la mitad, se muestra una vista ampliada de $p(t)$ y el tiempo de ocurrencia del sismo (flecha), junto con la función de supervivencia $S(t)$ y la función de tiempo de vida futura $\phi(t | \gamma)$ para varios valores de γ . En la gráfica inferior, se muestra la función de peligro $h(t)$.

Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al editor de GEOS y a los dos árbitros anónimos. Este estudio fue financiado parcialmente por la beca 242919 de Conacyt (C.Quinteros), y es adjunto al proyecto CGL2011-29474-C01-01.

Referencias

- Beltrán, C., Singer, A. and Rodriguez, J.A. (1996). The El Pilar fault active trace (northeastern Venezuela): neotectonic evidences and paleoseismic data, Third ISAG, St Malo, pp 153–156.
- Nava, F., Quinteros, C., Glowacka, E. and Frez, J. (2013). Semi-periodic sequences and extraneous events in earthquake forecasting: I. Theory and method, parkfield application. *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-013-0679-5
- Quinteros, C., Nava, F., Glowacka, E. and Frez, J. (2013). Semi-periodic sequences and extraneous events in earthquake forecasting II: Application, forecasts for Japan and Venezuela. *Pure and Applied Geophysics*. doi:10.1007/s00024-013-0678-6
- Sobiesiak., M., Alvarado, L. (2005). Recent seismicity in northeastern Venezuela and tectonic implications. *Revista de la Facultad de Ingeniería, UCV*, 20(4), 75-84.

Recepción del manuscrito: 28 de octubre de 2013.

Recepción del manuscrito corregido: 6 de diciembre de 2013.

Aceptación: 6 de diciembre de 2013.