

PATRONES DE SISMICIDAD PREVIOS A LA OCURRENCIA DE GRANDES TERREMOTOS EN EL BORDE OESTE DEL PERÚ

Christian Flores, Hernando Tavera y Leandro Rodriguez
Dirección de Sismología – Instituto Geofísico del Perú

edden.flores@geo.igp.gob.pe - hjtavera@ geo.igp.gob.pe
Instituto Geofísico del Perú - Calle Badajoz 169 - IV Etapa, Mayorazgo ATE

1.- Introducción

El proceso de formación de los terremotos, altamente complejo, dificulta la elaboración de un método eficaz para el pronóstico de los terremotos. Por esta razón los sismólogos evalúan y analizan diferentes parámetros geofísicos a fin de aumentar el conocimiento de este proceso complejo. La sismicidad es uno de los parámetros geofísicos más usados y su análisis a dado origen a la elaboración de diferentes metodologías que permiten estudiar su comportamiento en un determinado intervalo de tiempo (Keilis-Borok, 2002) y así comprender el proceso que se da en el interior de la tierra. El análisis de la ocurrencia de los grandes terremotos muestra que estos son recurrentes, con intervalos de tiempo variados (aleatorios), sin embargo, el análisis de su distribución en el tiempo y espacio ha mostrado ser una buena herramienta para empezar con el pronóstico de los terremotos (Tavera y Bernal, 2005). Así mismo, el análisis de la sismicidad con magnitudes intermedias, también ha permitido encontrar determinados patrones, en la secuencia de los terremotos, antes de la ocurrencia de grandes terremoto. Para la sismología los patrones sísmicos predecesores (PSP) no son algo nuevo, ya que estos corresponden a muchos rasgos bien conocidos en la dinámica de la sismicidad observada, como las réplicas que ocurren después de un gran terremoto y permiten la redistribución de los esfuerzos en la corteza.

En este estudio para evaluar la formación de patrones de sismicidad premonitores (TIP) antes de la ocurrencia de grandes terremotos en el borde occidental del Perú se aplicó el algoritmo M8 y así pronosticar la posible ocurrencia de estos en el futuro. En el análisis retroactivo se confirmó la formación de TIP's antes de los terremotos ocurridos en el Perú desde 1965. En el análisis prospectivo se identificó dos CTIP'S. El primer CTIP considera un área de 300km alrededor del punto: $-11,15^{\circ}\text{S}$ y $-78,37^{\circ}\text{O}$ ubicada al Nor-Oeste de Lima, y el segundo CTIP un área de 300km con centro en: $-19,55^{\circ}\text{S}$, $-69,97^{\circ}\text{O}$ ubicada en el límite Perú-Chile. En ambas áreas, es posible la ocurrencia de un gran terremoto dentro del periodo de tiempo 2008-2013.

2.- Reconocimiento de Patrones y Sistemas Complejos

Para el estudio de los sistemas altamente complejos, como los terremotos, Gelfand et. al (1976) desarrolló la metodología de reconocimiento de Patrones a fin de poder estudiar indirectamente estos sistemas. En la sismología, el sistema complejo o no lineal está representado por un sistema de fallas sísmicamente activas, los grandes terremotos son los eventos críticos (transiciones críticas) que son responsables de la variación repentina en las propiedades dinámicas del sistema (paso de un sistema en orden a uno desordenado, en un intervalo muy corto de tiempo), y los pequeños terremotos son la fuente de las perturbaciones del sistema y al mismo tiempo revelan la escalación de la respuesta del sistema a estas perturbaciones. De esta manera, los grandes terremotos son descritos como una transición de fase orden/desorden, donde el sistema pasa de un estado limitado a uno sin restricciones, el cual se da cuando la relación de “tensión-deformación” llega a un nivel crítico (tensión acumulada > resistencia del material) pudiendo identificarse patrones en la sismicidad intermedia y moderada (intensificación de las perturbaciones) antes de la ocurrencia de los grandes terremotos (Figura 1).

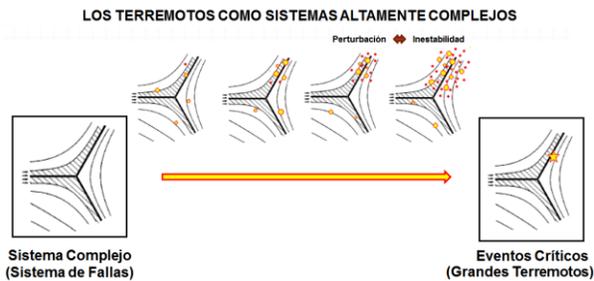


Figura 1. Representación de los terremotos como sistemas altamente complejos

El estudio y análisis de la sismicidad observada y simulada en ordenadores de modelos numéricos han demostrado que los grandes terremotos de magnitud M , son a menudo precedidos por específicos PSP, que se forman dentro de una amplia zona, y emergen en la secuencia de terremotos con magnitudes menores a M , tales como la intensificación de la actividad sísmica, el agrupamiento de eventos sísmicos, la migración y correlación de la sismicidad en el espacio, cambios en la relación de Gutenberg-Richter (Figura 2). Los dos primeros tipos se han encontrado primero en análisis de la sismicidad observada y luego en los modelos, y los otros dos tipos de patrones fueron encontrados primeros en la sismicidad simulada y luego en la sismicidad observada (Vilkovich y Shnirman, 1979).

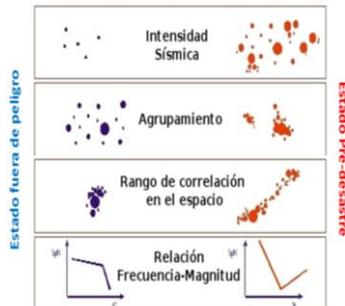


Figura 2. Patrones sísmicos predecesores observados antes de la ocurrencia de grandes terremotos

3.- Algoritmo M8

El Algoritmo M8 es un método de predicción de grandes terremotos de plazo intermedio. Este algoritmo fue diseñado por Keilis-Borok y Kossobokov (1990), quienes evaluaron y analizaron la sismicidad predecesora a grandes terremotos ($M > 8$), ocurridos en diferentes partes del mundo, encontrando determinados patrones sísmicos tales como; actividad sísmica, fluctuación de las actividad, interacción de los terremotos y

explosión de réplicas que emergen en la secuencia de los terremotos de magnitudes intermedias antes de la ocurrencia de grandes terremotos (Figura 2).

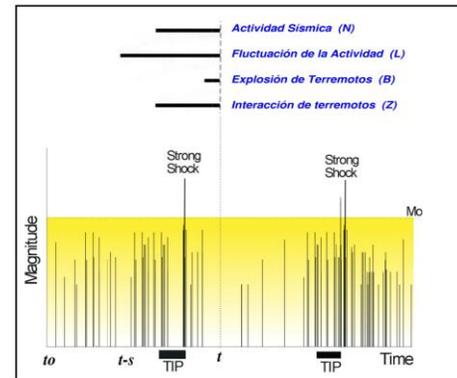


Figura 2. Esquema general de predicción del algoritmo M8. Las barras horizontales representan los patrones o funciones calculados, y que son usadas para evaluar la formación de una alarma o un TIP, que indica la cercanía de un gran terremoto

3.1 Patrones Sísmicos Predecesores

Flujo de la actividad sísmica (función N)

Considera la actividad sísmica o la intensidad del flujo de terremotos en un intervalo de tiempo $(t_i - s, t_i)$ y tienen una magnitud mayor que un límite mínimo M_{min} .

$$N(M_{min}, t_i, s) = n(t_i) - n(t_i - s)$$

Desviación de la actividad a largo plazo (función L)

Obtenida a partir de la desviación de la actividad sísmica o fluctuación de la actividad promedio equivalente a la diferencia del número de terremotos para un intervalo $(t_i - s, t_i)$ y el número de terremotos equivalentes para un periodo "s" para el intervalo $(t_0, t_i - s)$. Donde, t_0 es el tiempo de inicio del catálogo.

$$L(M_{min}, t_i, s, t_0) = N - N^*$$

$$\text{donde: } N^* = n(t_0, t_i - s) * 6 / ((t_i - s) - t_0)$$

Concentración o interacción de los terremotos (Función Z)

Se determina por la concentración en el espacio e interacción a gran escala de los terremotos y es aproximadamente equivalente al cociente, entre el diámetro o longitud promedio de las fuentes "l" (S/N) y la distancia media "r" ($N^{-1/3}$).

$$Z(t, M_{min}, M_{max}, s, \alpha, \beta) = S(t, M_{min}, M_{max}, s, \alpha, \beta) / (N(t, M_{min}, s) - N(t, M_{max}, s))^{2/3}$$

donde S; es la suma ponderada de la energía liberada y N; el numero de sismos)

Explosión de réplicas (Función B)

Es representado por el agrupamiento de terremotos después de un terremoto principal y es equivalente al máximo número de réplicas ocurridas en los “e” días después de cada terremoto en un determinado rango de magnitud (Mmin, Mmax).

$$B(t, M_{min}, M_{max}, 1 \text{ año}) = B_i(e)_{max}$$

Tabla 1: Umbrales de magnitud usados por la funciones del Algoritmo M8

| | N1 | L1 | Z1 | N2 | L2 | Z2 | |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|
| Mmin. | M(10) | M(10) | M(10) | M(20) | M(20) | M(20) | Mo-2,0 |
| Mmax. | - | - | Mo-0,5 | - | - | Mo-0,5 | Mo-0,2 |

3.2.- Declaración de “Tiempos de Incremento de Probabilidad - TIP”

El análisis de las funciones descritas arriba permiten identificar tiempos de incremento de la probabilidad (TIP), cuando al menos seis de las siete funciones tienen un valor "muy grande" por encima de sus valores anteriores (un aumento del 10% para las funciones N, L y Z, y del 25% para la función b). Cuando, la condición es satisfecha en dos sucesivos intervalos de análisis un TIP o alarma es declarado y tendrá una duración de cinco años.

4.- Análisis de datos

1.- Conversión de las magnitudes mb, MS, ML a la magnitud Mw. A fin de homogenización las magnitudes presentes en los catálogos sísmicos (Figura 5).

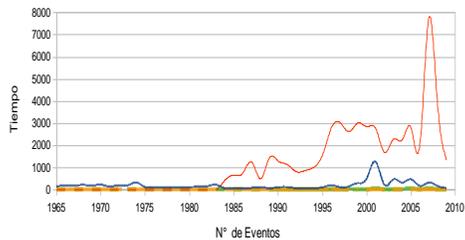


Figura 5. Distribución temporal de magnitudes

2.- Identificación y depuración de las réplicas asociados a los terremotos principales (Figura 6).

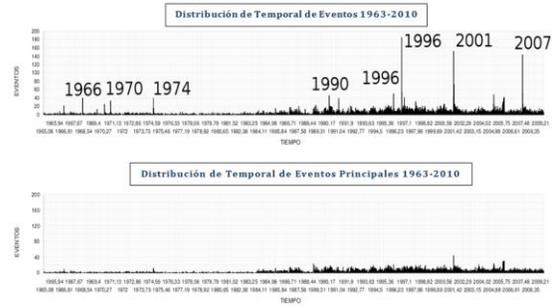


Figura 6. Distribución temporal de los eventos sísmicos

3.- Calculo de la magnitud de completitud (Figura 7), desde la cual, el catálogo es calificado como homogéneo y completo.

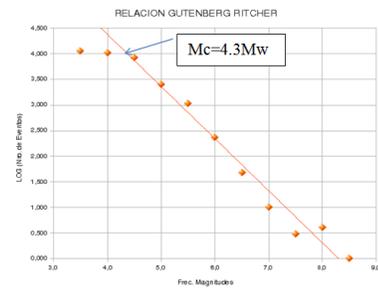


Figura 7. Magnitud de completitud

4.- Una vez obtenida una base de datos de ingreso (INPUT) confiable, homogénea y completa se ejecuto el algoritmo M8 en dos parte: Análisis retroactivo y Análisis Prospectivo, para lo cual previamente se ingreso los siguientes parámetros: magnitud a evaluar (Mo=7,5Mw), el tiempo de inicio del análisis (A. Retroactivo, to=1963; A. Prospectivo, to=1984), las áreas de análisis (Figura 8), el radio de análisis (R=300) y otros parámetros internos del algoritmo usados para el calculo de los patrones de sismicidad.

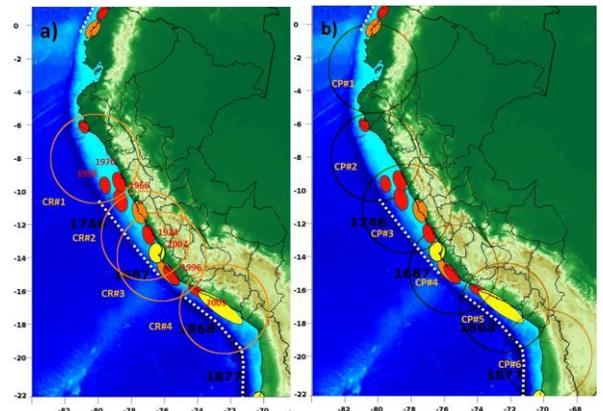


Figura 8. Áreas de investigación a) A. Retroactivo. b) A. Prospectivo

5.- Resultados

5.1.- Análisis Retroactivo

5.1.1 Terremoto de Arequipa, 2001 (8,4Mw)

Las curvas observadas en la Figura 9, representan el comportamiento de los patrones de sismicidad antes y después del terremoto de Arequipa (8,4Mw), ocurrido el 23 de junio del 2001. En julio de 1988 se observa un incremento en los valores de las patrones pero al no continuar el mismo en el análisis siguiente (enero de 1989) no se diagnostica ningún TIP. En julio de 1998 se observa un incremento en todas las funciones y al ser el mismo corroborado en el siguiente análisis (enero de 1999), se diagnostico la formación de un TIP, justo antes del terremoto de Arequipa (2001).

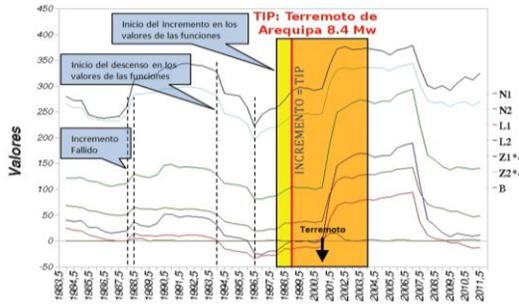


Figura 9. TIP encontrado para el terremoto de Arequipa (Mw=8.4) del 23 de junio del 2001

5.1.1 Terremoto de Pisco, 2007 (8,0Mw)

Para el terremoto de Pisco, 8,0Mw las funciones muestran una tendencia muy similar al terremoto de Arequipa. Observando, una caída drástica en los valores de las funciones, en julio del 2002, esta caída dura hasta julio del 2004. En julio del 2005 y enero del 2006 se verifica el incremento de los valores de las funciones del algoritmo M8, lo que origina la formación de un TIP en enero del 2006. El 15 de agosto del 2007 ocurre el terremoto de Pisco, el cual fue pronosticado con un tiempo de anticipación de dos años, por la alarma o TIP formado en enero del 2006 (Figura 10).

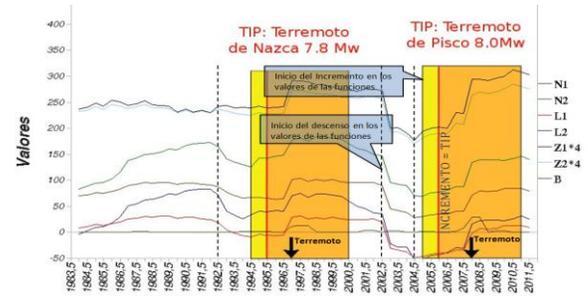


Figura 10. TIP encontrado para el terremoto de Nazca, ocurrido el 12 de noviembre de 1996 (7,8Mw) y para el terremoto de Pisco (Mw=8,0) del 15 de agosto del 2007

5.2.- Análisis Prospectivo

La aplicación prospectiva del algoritmo M8, se realiza a fin de evaluar la posibilidad de que ocurra un gran terremoto en el borde occidental del Perú para los siguientes años. Los resultados obtenidos muestra la formación de dos TIP's, calificados como CTIP (TIP en progreso).

5.2.1 Primera zona de alarma

La primera área de alarma (CTIP) se ubica al Nor-Oeste de la ciudad de Lima. En esta área la distribución de los valores de las funciones (Figura 11), muestra un comportamiento similar observado antes, en los TIP'S encontrados para el terremoto de Arequipa (2001) y Pisco (2007). En esta área (CP-3) en julio del 2007 se observa el incremento en todos los valores de las funciones, el mismo que es verificado en dos periodos de tiempo de manera consecutiva (enero del 2008 y julio del 2008) indicando la formación de un TIP en julio del 2008, así como una alta probabilidad, que dentro del área evaluada, y el tiempo de duración de la alarma (2008 - 2013) ocurra un terremoto con magnitud $M \geq 7,5$ Mw.

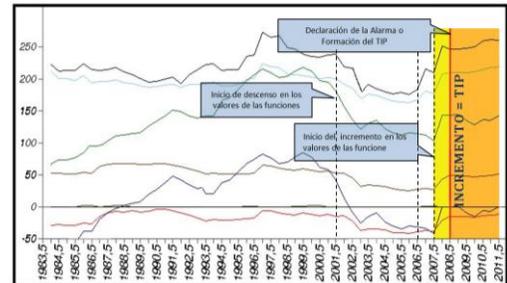


Figura 11. CTIP, identificado en el área CP-3 (centro: -11.8S - 77.15W y radio=300km). El tiempo probable dentro del cual puede ocurrir un terremoto $M \geq 7,5$, se encuentra entre 2008/07-2013/07

5.2.2 Segunda zona de alarma

El segundo CTIP abarca los departamentos de Tacna, Moquegua, Sur de Arequipa y la región Norte de Chile. El centro de esta área se encuentra en: $-19,55^{\circ}\text{S}$, $-69,97^{\circ}\text{O}$, y abarca un radio de $R=300\text{km}$. La distribución de las funciones en esta área (Figura 12), muestra una tendencia similar a los valores de las funciones observadas antes de la formación de los TIP'S descritos anteriormente, pero con la diferencia de que en esta área, la caída y aumento de las funciones se dan en un periodo más largo. En Julio del 2001 Luego de ser verificado el incremento en todas las funciones y en dos periodos de tiempo consecutivos de análisis (enero 2001 y julio 2001), se declaró el TIP en julio del 2001. Luego de transcurrir el tiempo de duración de este TIP (2001-2006) y de no ocurrir ningún terremoto, el TIP es calificado como un FTIP (Falsa Incremento de Probabilidad). Después del FTIP, las curvas continúan presentando valores altos, razón por la cual en julio del 2008 se vuelve a declarar un nuevo TIP, calificado esta vez como un CTIP (TIP en progreso). Considerando la fecha de origen (07/2008) y la duración de la alarma (5 años) un terremoto con magnitud $M \geq 7.5$, puede ocurrir dentro del área evaluada y el tiempo que resta desde que la alarma fue declarada (2011-2013). Nótese en la Figura 12, que desde el año 2010, los valores de las funciones del algoritmo M8 se incrementan notablemente.

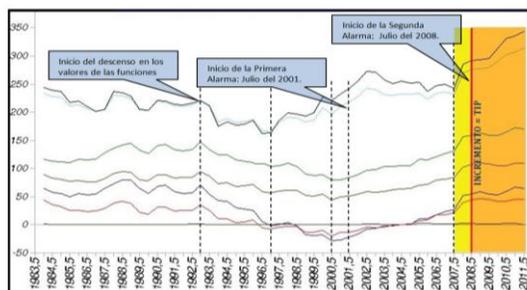


Figura 12. CTIP encontrado en el área CP-6, frontera Perú-Chile, indica la posible ocurrencia de un gran terremoto ($M > 7.5 M_w$) dentro del periodo de 2008/07-2013/07

Conclusiones

Luego del análisis retroactivo se verificó la formación de TIP's antes de los grandes terremotos ocurridos en el Perú, desde 1965, el tiempo de anticipación promedio entre las alarmas (TIP) y la ocurrencia de los grandes terremotos es de 3 años.

La aplicación prospectiva permite identificar la formación de dos TIP'S, calificados como CTIP (TIP en progreso), en el centro y Sur del Perú. El primer CTIP considera el área de 300km alrededor del centro: -11.15°S y -78.37°O ubicado al Nor-Oeste de Lima, y el

segundo CTIP abarca el área de 300km con centro -19.55°S , -69.97°O ubicado en el límite Perú-Chile. En ambas áreas, se espera la posible ocurrencia de un gran terremoto dentro del periodo de tiempo 2008-2013.

Recomendaciones

Debido que a la fecha no existe ningún método eficaz para la predicción de los terremotos, se recuerda a la población y autoridades tomar conciencia y no olvidar de la situación sísmica en el cual se encuentra el Perú, por lo cual se debe de estar preparado y saber que hacer antes, durante y después de un terremotos a fin de reducir y mitigar los daños que estos fenómenos involucran.

Bibliografía

- Gelfand, I., S. Guberman, V. Keilis-Borok, L. Knopoff y F. Press (1976). Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California. *Plzys. Earth Planet. Ínter.* 11:227-83
- Tavera H. & Bernal I. (2005).- "Distribución Espacial de Áreas de Ruptura y Lagunas Sísmicas en el Borde Oeste del Perú". Volumen Especial N°6 Alberto Giesecke Matto (2005) pp. 89-102.
- Keilis-Borok, V. (2002). Earthquake prediction: state-of-the-art and emerging possibilities. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 30, p. 1-33 (2002)
- Keilis-Borok V. (1996). "Intermediate-term earthquake prediction" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Colloquium Paper* Vol. 93, pp. 3748-3755, April 1996
- Keilis-Borok V. & Kossobokov V. (1990). "Localization of intermediate-Term earthquake prediction". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No B12, pp. 19,763-19,772 November 10, 1990
- Kossobokov V., Romashkova L., Keilis-Borok V. & Healy J. (1999). "Testing earthquake prediction algorithms: statistically significant advance prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific 1992-1997". *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 111(1999) 187-196
- Vilkovich, E. y M. Shnirman (1979). An Algorithm for Establishing the Migration of Strong Earthquake. *Vychisl. Seismol.* 12, 37-44
- Vorobieva I. (1999). "Prediction of a subsequent large earthquake". *Physics of the Earth and Planetary Interiors* vol. 111(1999) 187-196