

APLICACIÓN DEL ALGORITMO M8 EN EL BORDE OCCIDENTAL DEL PERU: INCREMENTOS DE PROBABILIDAD PARA LA OCURRENCIA DE GRANDES TERREMOTOS

DETERMINATION OF THE TIME INCREASES PROBABILITY (TIP) FOR THE OCCURRENCE OF STRONG EARTHQUAKE IN THE PERU (APPLICATION OF THE ALGORITHM M8)

Christian Flores¹, Hernando Tavera² y Leandro Rodriguez³

RESUMEN

En este estudio se aplicó el método de predicción de terremotos a plazo intermedio, conocido como M8 (Keilis-Borok y Kossobokov, 1990), al borde occidental del Perú a fin de predecir la posible ocurrencia de sismos de gran magnitud en el futuro. Para su aplicación se utilizó los catálogos sísmicos del IGP y NEIC, previamente evaluados para constituir una base de datos homogénea. En el análisis retroactivo se confirmó la formación de TIP antes de los terremotos ocurridos en el Perú en los años 1970, 1974, 1996, 2001 y 2007. En el análisis prospectivo se identificó la presencia de dos CTIP correspondientes a áreas circulares de 300km con centro, para el primero en el punto -11,15°S y -78,37°O ubicado al Nor-Oeste de la ciudad de Lima, y para el segundo en -19,55°S, -69,97°O ubicado en el límite Perú-Chile. En ambas áreas, es posible la ocurrencia de un gran sismo dentro del periodo de tiempo 2008-2013.

Palabras clave: *Tiempos de Incrementos de Probabilidad (TIP), reconocimiento de patrones, algoritmo M8*

ABSTRACT

In this study applied an earthquake intermediate-term predicting method, known as M8 (Keilis-Borok & Kossobokov, 1990), in the western border of Peru to predict the possible occurrence of large earthquake in the future. For its application were used the NEIC and IGP seismic catalogs which previously have been evaluated to build a database homogeneous. In the retroactive analysis observed the formation of TIP before each earthquake in Peru in the years: 1970, 1974, 1996, 2001 and 2007. In the prospective analysis identified the presence of two CTIP both for circulars areas, from 300 km, the first around the point: -11,50°S y -78,37°W, located to the NW of the city of Lima and for the second in -19,55°S y -69,97°W, located in limit Peru-Chile. In both areas, it is possible the occurrence of a strong earthquake within the time period 2008-2013.

Keywords: *Time Increased Probability (TIP), pattern recognition, algorithm M8*

INTRODUCCIÓN

El proceso de formación de los terremotos, altamente complejo, dificulta la elaboración de un método eficaz para la predicción de los terremotos. Por esta razón los sismólogos evalúan y analizan diferentes parámetros geofísicos a fin de incrementar el conocimiento sobre este proceso, siendo la sismicidad, la información más usada

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).

El análisis de la ocurrencia de los grandes terremotos ($M > 7.5M_w$) muestra que estos son recurrentes en intervalos de tiempo variables (aleatorios); sin embargo, su distribución en el

¹ Instituto Geofísico del Perú - Dirección de Sismología. E-mail: edden.flores@igp.gob.pe

² Instituto Geofísico del Perú - Dirección de Sismología. E-mail: hernando.tavera@igp.gob.pe

³ Lamheyer Agua y Energía S.A. E-mail: lrodriguez@liperu.com

tiempo y espacio ha mostrado ser una buena herramienta para empezar con la predicción de los terremotos (Tavera y Bernal, 2005). Así mismo, el análisis de los sismos con magnitudes entre 4.0Mw y 7.5Mw (magnitudes intermedias) ha permitido observar, en sus secuencias, determinados patrones sísmicos predecesores (PSP) que emergen y anticipan la aproximación de un gran terremoto. Para la sismología los patrones sísmicos no son algo nuevo, ya que estos corresponden a muchos rasgos bien conocidos en la dinámica de la sismicidad observada, tal es el caso de las réplicas que ocurren después de un gran terremoto y permiten ver la redistribución de los esfuerzos en la corteza. También, el estudio y análisis de la sismicidad simulada mediante el uso de modelos numéricos han demostrado que los grandes terremotos son a menudo, precedidos por específicos PSP que se forman dentro de una amplia área, y emergen en la secuencia de terremotos con magnitudes menores, por ejemplo; el incremento de la actividad sísmica, el agrupamiento de eventos sísmicos, la migración y correlación de la sismicidad en el espacio y cambios en la relación de Gutenberg-Richter (Figura 1). Los dos primeros PSP han sido identificados en el análisis de la sismicidad observada y luego en la simulada (Keilis-Borock 1990, Keilis-Borock y Shebalin 1999, Gabrielov et al. 2000) y los otros fueron identificados primero en la sismicidad simulada y luego en la observada (Gabrielov et

al. 2000, Newman et al. 1995, Sornette 2000). En este estudio se utilizó un algoritmo numérico, conocido como M8, para evaluar la formación de patrones sísmicos antes de la ocurrencia de grandes terremotos en el borde occidental del Perú.

EL ALGORITMO M8

El Algoritmo M8 es una metodología de predicción de grandes terremotos a plazo intermedio. Fue elaborado por Keilis-Borok y Kossobokov (1990) a fin de evaluar y analizar la sismicidad predecesora a grandes terremotos ($M > 8$) ocurridos en diferentes regiones del mundo, llegando a identificar la existencia de determinados PSP como las variaciones de la sismicidad a corto plazo (flujo de la actividad sísmica), a largo plazo (desviación del flujo de la actividad sísmica), correlación de los terremotos (concentración e interacción de la actividad sísmica) y la frecuencia de réplicas que emergen en las secuencia de los terremotos con magnitudes intermedias previos a la ocurrencia de grandes terremotos (Figura 2).

Para el estudio de los sistemas altamente complejos, como los terremotos, Gelfand et. al, (1976) desarrollo la metodología de Reconocimiento de Patrones a fin de poder estudiar indirectamente estos sistemas. En sismología, el sistema complejo o no lineal está representado por un conjunto de fallas sísmicamente activas, siendo los grandes

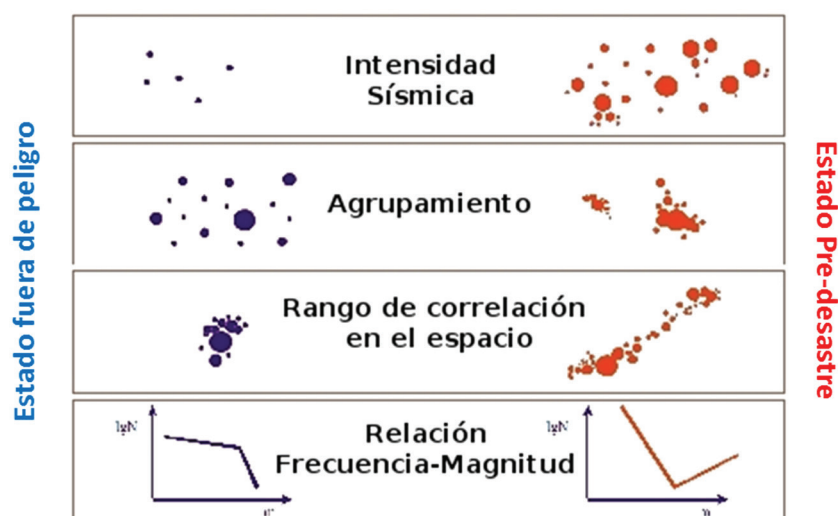


Figura 1. Patrones sísmicos predecesores observados antes de la ocurrencia de grandes terremotos

terremotos 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 la fuente de las perturbaciones del sistema que al mismo tiempo revelan la intensificación (aceleración) 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 “tensión/deformación” llega a un nivel crítico (tensión acumulada > resistencia del material) pudiendo identificarse patrones en la secuencia de los terremotos con magnitudes intermedias (intensificación de las perturbaciones) antes de la ocurrencia de los grandes terremotos (Figura 3). Así el algoritmo M8 fue desarrollado

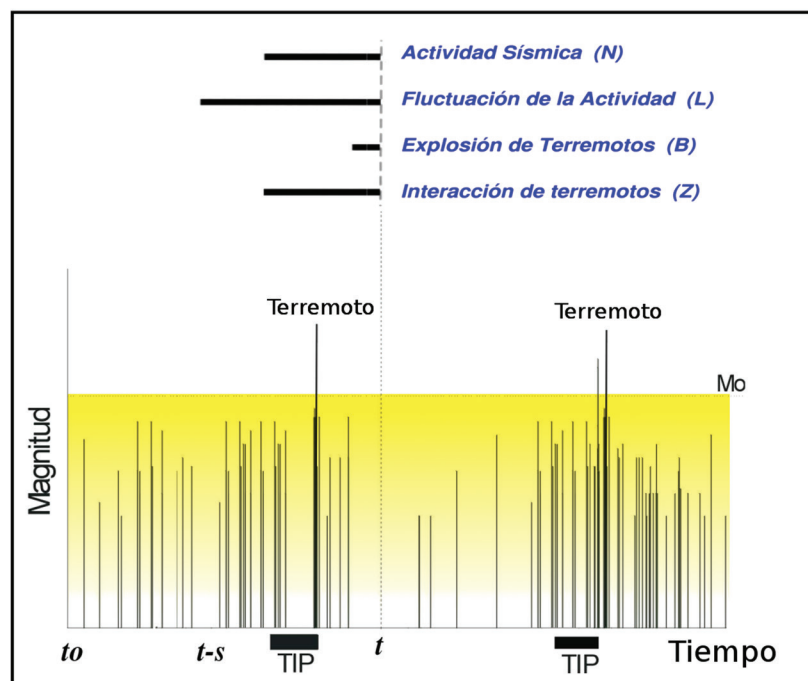


Figura 2. Esquema general de predicción del algoritmo M8. Las barras horizontales representan los patrones o funciones calculadas, y que son usadas para evaluar la formación de una alarma o TIP

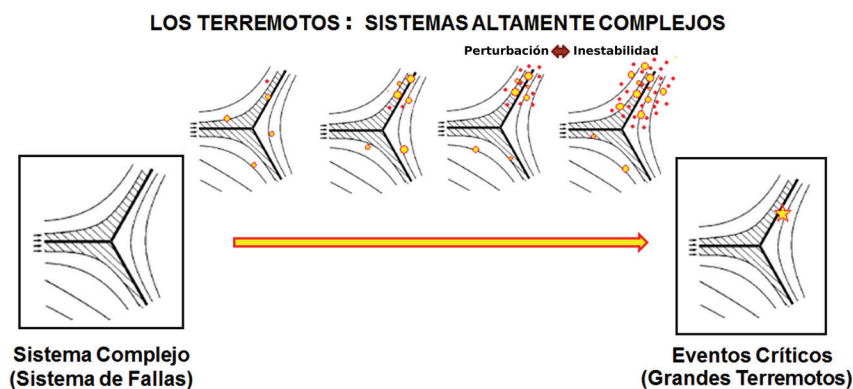


Figura 3. Representación de los terremotos como sistemas altamente complejos

con el objetivo de identificar estos patrones, siendo los más importantes los siguientes:

Función N; Variación a corto plazo de la actividad sísmica

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

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

donde “s” = Intervalos de tiempo de la ventana principal y es igual a 6 años.

Función L; Variación de la actividad sísmica a largo plazo

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 en un periodo “s” para el intervalo (t_o , t_i-s). Donde, t_o es el tiempo de inicio de la base de datos.

$$L(M_{min}, t_i, s, t_o) = N - N';$$

donde: $N' = n(t_o, t_i - 6) * 6 / ((t_i - 6) - t_o)$

Función Z; correlación de los terremotos

Se determina por la concentración en el espacio e interacción a gran escala de los terremotos, siendo 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 número de sismos.

Función B; frecuencia de réplicas

Es representado por el agrupamiento de los terremotos en un intervalo de tiempo y espacio corto, 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 (M_{min} , M_{max}).

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

donde “e” = Intervalo de tiempo dentro del cual se determina el numero de replicas y es igual a 2 días.

Normalización de la actividad sísmica

La intensidad del flujo de terremotos o actividad sísmica, de una región específica a otra, son diferentes por lo cual la actividad sísmica, en las diferentes áreas considerados en este estudio, es normalizada mediante el cálculo de una magnitud del umbral mínimo (M_{min}), de modo que, la tasa promedio anual de ocurrencia de terremotos principales con $M_i \geq M_{min}$, en un área, es igual a un valor en común. Para un primer conjunto de funciones nombradas como N1, L1 y Z1, la constante es 10 por año, y de 20 para otro segundo conjunto de N2, L2 y Z2.

Declaración de “Tiempos de Incremento de Probabilidad - TIP”

El análisis de las funciones descritas arriba permite identificar los tiempos de incremento de la probabilidad (TIP) de ocurrencia de terremotos. Un TIP es declarado cuando al menos seis de las siete funciones tienen un valor alto por encima de sus valores anteriores (un aumento aprox. 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 (t_i y $t_i + 0.5$ años) un TIP es declarado y tendrá una duración de cinco años, tiempo durante el cual debe ser evaluado la ocurrencia de un gran terremoto.

En el diagrama de flujo de la Figura 4 se muestra los principales datos y parámetros de ingreso necesarios para la ejecución del algoritmo M8.

ANÁLISIS DE DATOS

Para este estudio se ha usado los catálogos sísmicos del IGP y NEIC, los cuales han sido

analizados e integrados a fin de obtener una base de datos calificada como homogénea. A continuación, se describe brevemente algunos de los principales análisis realizados:

1. Conversión de las magnitudes m_b , M_s , M_L a la magnitud M_w , a fin de homogenización las magnitudes presentes en los catálogos sísmicos.
2. Identificación y depuración de las réplicas asociados a los terremotos principales (Figura 5). Este tipo de análisis es importante, porque permite extraer los patrones sísmicos posteriores a un gran evento y así facilitar el análisis de los patrones predecesores presentes en la actividad sísmica de fondo.

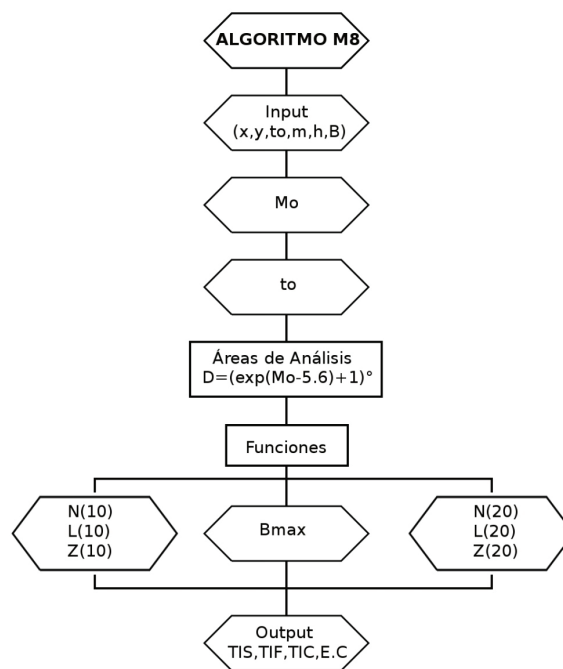


Figura 4. Esquema de los parámetros de ingreso para el Algoritmo M8

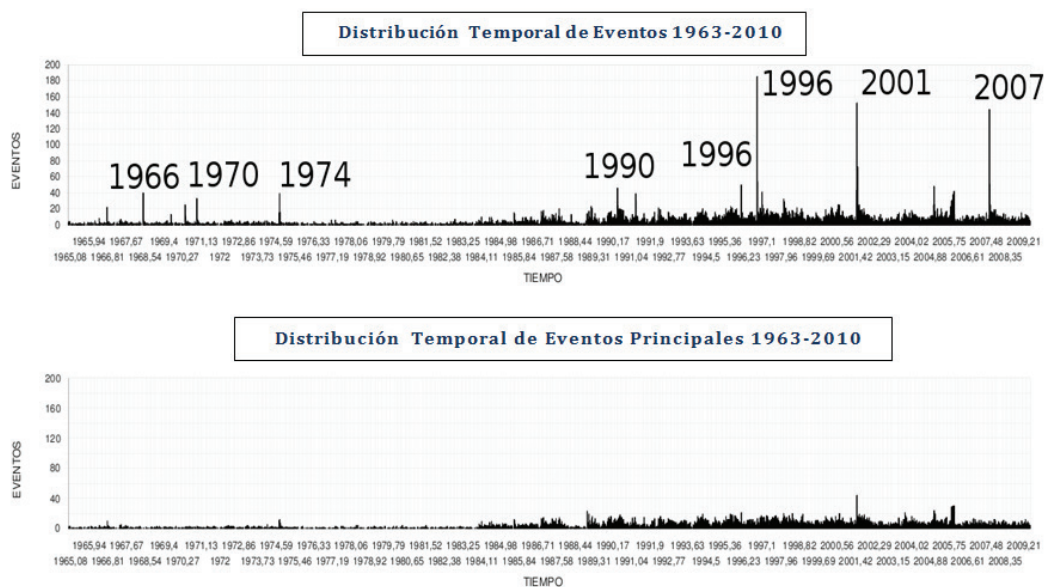


Figura 5. Comparación de la distribución temporal de los eventos sísmicos con y sin réplicas. En la parte superior el incremento anormal en la sismicidad de fondo indica la ocurrencia de los grandes terremotos ocurridos en el borde oeste del Perú. En la parte inferior se muestra la distribución temporal, luego de filtrar las réplicas de los eventos principales.

3. Cálculo de la magnitud de completitud (Figura 6). Este análisis es realizado a fin de determinar la magnitud mínima desde el cual, la base de datos es calificada como homogénea.
4. Una vez obtenida una base de datos de ingreso (INPUT) se ejecuto el algoritmo M8 en dos partes: Análisis Retroactivo y Análisis Prospectivo, para lo cual previamente se ingreso los siguientes parámetros: magnitud de evaluación (7.5Mw), el tiempo de inicio del análisis (A. Retroactivo, $t_0=1963$; A.

Prospectivo, $t_0=1984$), las áreas de análisis (Tabla 1), el radio de análisis ($R=300$) y los parámetros internos del algoritmo usados para el cálculo de las funciones.

Los datos de salida (OUTPUT) que contienen los valores para cada una de las funciones y áreas de análisis, son graficados a fin de realizar una mejor interpretación, identificación y presentación de los TIP encontrados en un determinado tiempo, dentro o al final de cada análisis.

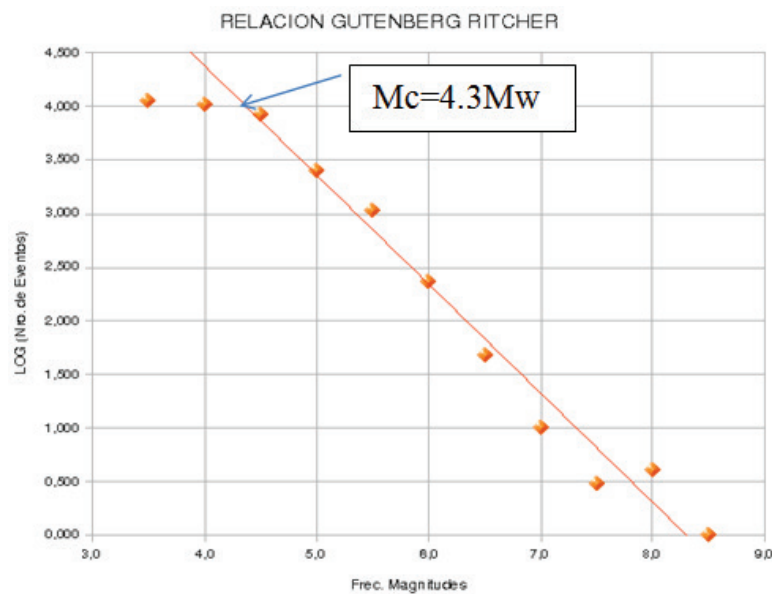


Figura 6. Determinación de la magnitud de completitud $M_c = 4.3Mw$ a partir de la cual la base de datos es calificada como completa.

Tabla 1. Áreas de análisis

Área	Centro de las Áreas		Radio (Km)
	Latitud(°)	Longitud(°)	
CR-1	-8.04	-80.21	300
CR-2	-12.66	-77.17	300
CR-3	-13.91	-76.19	300
CR-4	-16.68	-72.64	300
CP-1	-2.70	-80.38	300
CP-2	-8.04	-80.21	300
CP-3	-11.15	-78.37	300
CP-4	-14.72	-75.54	300
CP-5	-17.05	-72.43	300
CP-6	-19.55	-69.97	300

CR: Áreas usadas para el Análisis Retroactivo

CP: Áreas usadas para el Análisis Prospectivo

RESULTADOS

Análisis Retroactivo

El objetivo de este primer análisis es medir la eficacia del algoritmo M8 para la predicción de la ocurrencia de grandes terremotos en el Perú, para lo cual, se hizo uso de la distribución temporal y espacial de los grandes terremotos ocurridos en el pasado.

Desde 1969 hasta el año 2011 en el borde occidental del Perú han ocurrido seis grandes terremotos con magnitudes mayores a 7,5Mw y epicentros frente a Casma (7,9Mw en 1970), Lima (7,9Mw en 1974), Chimbote (7,7Mw en 1996), Nazca (7,8Mw en 1996), Arequipa (8,0Mw en 2001) y Pisco (8,0Mw en 2007).

Los resultados del análisis retroactivo (Figura 7) muestran la formación de los TIP previos a la ocurrencia de los terremotos antes citados con un tiempo de anticipación de 3 años en promedio. En la figura 7, cada una de las curvas representa las funciones analizadas con el algoritmo M8 y de ellas,

las más sensibles en el proceso de formación de un terremoto son N1, N2, L1, L2 y B; mientras que, los incrementos en las funciones Z1 y Z2 no son bien marcados, a excepción de lo observado para los terremotos de Arequipa (2001) y Pisco (2007), ambos con magnitudes $M \geq 8,0Mw$.

Terremoto de Arequipa, 2001 (8,4Mw)

La Figura 8, muestra la distribución de las funciones antes y después del terremoto de Arequipa (8,0Mw), ocurrido el 23 de junio del 2001. En julio de 1988 se observa un incremento temporal en los valores de las funciones pero que no amerita la formación de un TIP. Posteriormente, las funciones siguen una tendencia sin ninguna fluctuación importante en sus valores hasta enero de 1994, donde descienden para luego ascender (julio de 1996) de manera aleatoria en los siguientes tres análisis consecutivos. En julio de 1998 se observa el incremento en los valores de todas las funciones, y en enero de 1999 se confirma la formación de un TIP, dos años antes de ocurrir el terremoto de Arequipa (2001).

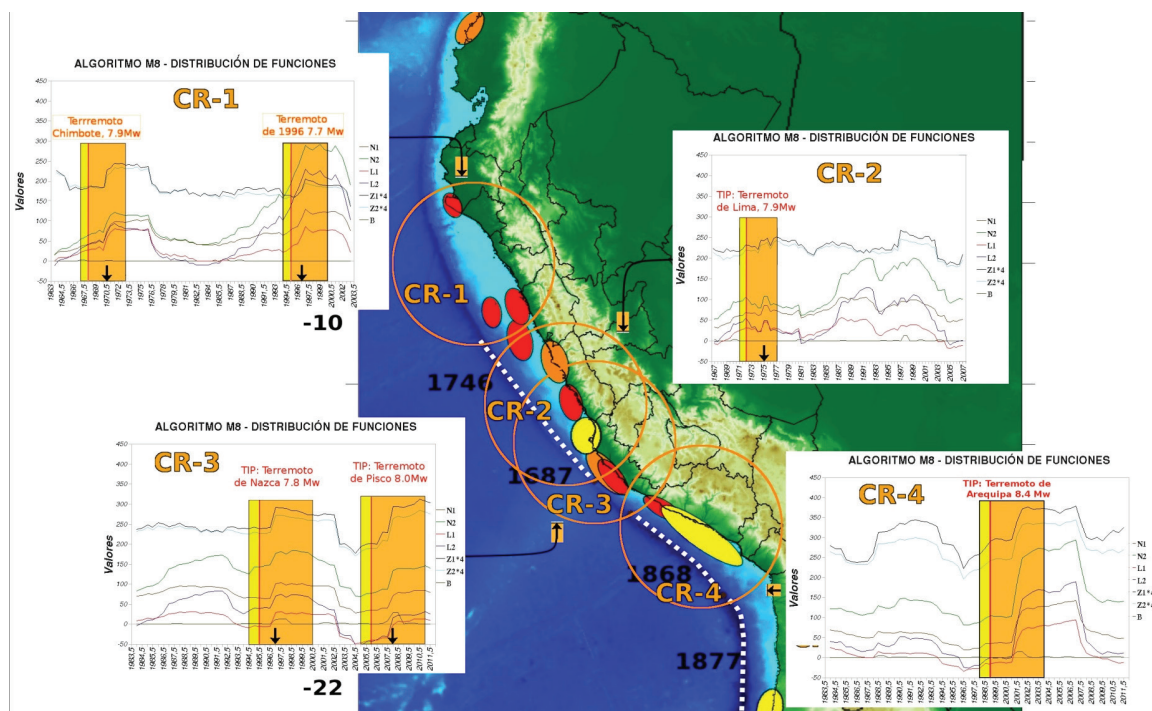


Figura 7. Resultados del análisis retroactivo. Las curvas representan las funciones calculadas con el M8, las barras amarillas y naranjas indican la formación y duración de los TIP. Las flechas negras indican la ocurrencia de terremotos.

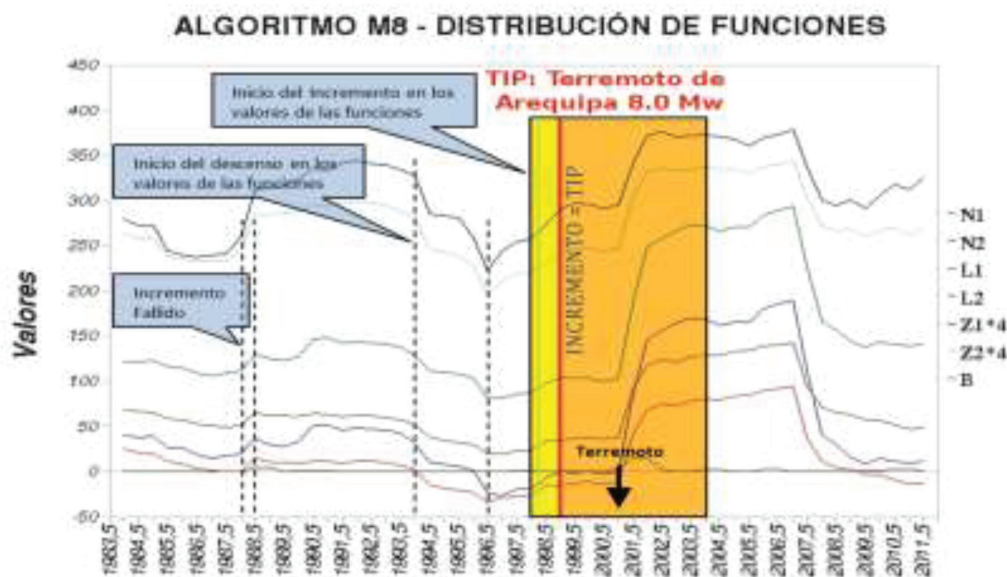


Figura 8. TIP encontrado para el terremoto de Arequipa ($M_w=8.0$) del 23 de junio del 2001

Terremoto de Pisco, 2007 (8,0Mw)

Para el terremoto de Pisco (8,0Mw) los valores de las funciones muestran una tendencia similar al terremoto de Arequipa. En este caso se observa una caída rápida en los valores de las funciones en el mes de julio del 2002 que continuó hasta julio del 2004. En julio del 2005 y enero del 2006 se verifica el incremento en todos los valores de las funciones sustentando la formación de un TIP. Los valores de las funciones se mantuvieron constantes hasta el 15 de agosto del 2007, fecha en que ocurre el terremoto de Pisco y según el algoritmo M8, su ocurrencia fue conocida con dos años de anticipación (Figura 9).

Análisis Prospectivo

La aplicación prospectiva del algoritmo M8 pretende evaluar la posibilidad de que ocurra en el borde occidental del Perú un terremoto durante el periodo 2010-2016. Los resultados de este análisis muestran la formación de dos CTIP, los cuales son definidos como TIP en progreso, siendo sus características las siguientes:

Primer CTIP

La primera área circular involucrada con un CTIP tiene como centro: $-11,15^\circ\text{S}$, $-78,37^\circ\text{W}$ y radio = 300km, y se ubica en el extremo Nor-Oeste de la ciudad de Lima. En esta área la distribución de los valores de las funciones muestra en el mes de julio

del 2007 un descenso drástico para luego ascender de igual manera en los dos siguientes análisis (enero del 2008 y julio del 2008), indicando la formación del CTIP; por lo tanto, en esta área la probabilidad de que ocurra un terremoto con magnitud $M \geq 7,5Mw$ dentro del periodo 2008-2013, es muy alta.

Segundo CTIP

El segundo CTIP considera un área circular de 300km de radio con centro en: $-19,55^\circ\text{S}$, $-69,97^\circ\text{O}$, abarcando a los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y la región Norte de Chile. En esta área, la distribución de las funciones muestra una tendencia temporal de incrementos y descensos en los valores de las funciones durante periodos más largos. Por ejemplo, en enero de 1993 se produce el descenso en todos los valores de las funciones hasta enero de 1997, fecha a partir de la cual las funciones Z1 y Z2 comienzan a incrementarse, a diferencia de las otras que continúan descendiendo hasta julio del año 2000, fecha en que comienzan también a ascender. Posteriormente, en enero y julio del 2001, se produce el incremento en los valores de todas las funciones; por lo tanto, se declara la formación de un TIP. Considerando que los TIP tienen un periodo de validez de 5 años y al no ocurrir un gran terremoto hasta el año 2006, el TIP es calificado como un FTIP (Falso Incremento de Probabilidad). Al retomar el análisis, en el año 2007, se observa

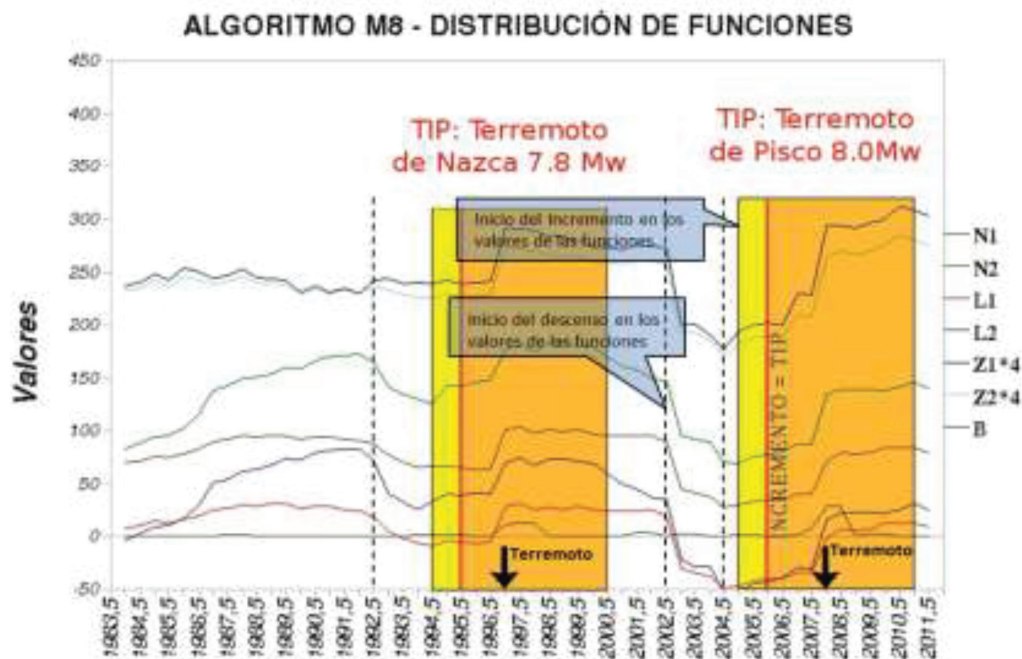


Figura 9. TIP encontrado para el terremoto de Nazca, ocurrido el 12 de noviembre de 1996 (7,8Mw) y para el terremoto de Pisco (Mw=8,0) del 15 de agosto del 2007

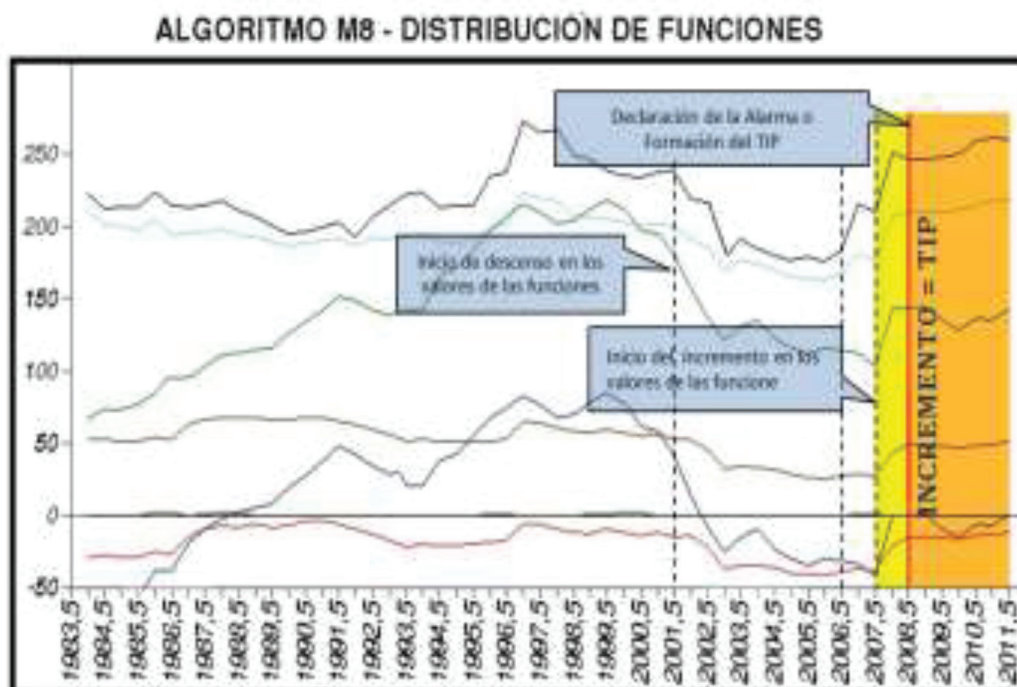


Figura 10. Primer CTIP, identificado al NO de Lima. El tiempo probable dentro del cual puede ocurrir el terremoto $M \geq 7.5$, se encuentra entre 2008/07-2013/07

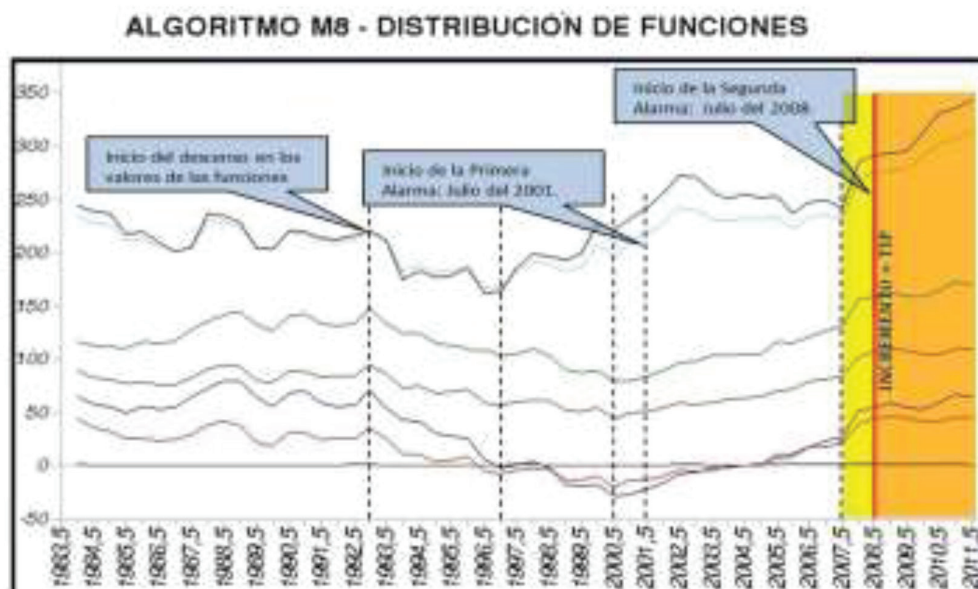


Figura 11. Segundo CTIP identificado en el área ubicado en la frontera Perú-Chile, indica la posible ocurrencia de un gran terremoto ($M > 7.5Mw$) dentro del periodo de 2008-2013

que las funciones vuelven a presentar valores altos y así, en julio del 2008 se vuelve a declarar la formación de un nuevo TIP, calificado esta vez como un CTIP. Considerando la fecha de origen del CTIP (07/2008) y la duración de la alarma (5 años), un terremoto con magnitud $M \geq 7.5$, podría ocurrir dentro del área evaluada hasta el año 2013. Nótese en la Figura 11, que desde el año 2010, los valores de las funciones del algoritmo M8 se incrementan notablemente para esta área en particular.

CONCLUSIONES

El análisis retroactivo realizado con el algoritmo M8 en el borde occidental del Perú, permitió verificar la formación de TIP antes de grandes terremotos ocurridos, entre los años 1965-2011. El tiempo de

anticipación promedio entre las alarmas (TIP) y la ocurrencia de los terremotos fue de 3 años.

La aplicación prospectiva del algoritmo M8 ha permitido identificar la formación de dos TIP, calificados como CTIP (TIP en progreso), en la región centro y Sur del Perú. Ambos CTIP consideran áreas circulares con radios de 300 km, para el primero con centro en: $-11.15^{\circ}S$ y $-78.37^{\circ}O$ y ubicación al Nor-Oeste de la ciudad de Lima; mientras que, el centro del segundo se encuentra en: $-19.55^{\circ}S$, $-69.97^{\circ}O$ y esta ubicado en el límite Perú-Chile. En ambas áreas, se espera la posible ocurrencia de un terremoto de magnitud $M_o > 7.5Mw$ dentro del periodo de tiempo 2008-2013.

REFERENCIAS

- Gabrielov A., Zaliapin I., Newman W. y Keilis-Borok V. (2000). Colliding cascades model for earthquake prediction. *J. Geophys. Int.* 143:427-37
- 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
- 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. y Shebalin P. (1999). Dynamics of lithosphere and earthquake prediction. *Phys. Earth Planet. Inter.* 111:179-330
- 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. (1990). The lithosphere of the Earth as a non-linear system with implications for earthquake prediction. *Rev. Geophys.* 28(1):19-34 (Transl. into Chinese) Keilis-Borok VI, ed. 1990b. Intermediate-term earthquake prediction: models, phenomenology, worldwide
- Keilis-Borok V. y 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. y 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
- Newman W., Turcotte D. y Gabrielov A. (1995). Log-periodic behavior of a hierarchical failure model with applications to precursory seismic activation. *Phys. Rev. E* 52:4827-35
- Sornette D. (2000). *Critical Phenomena in Natural Sciences. Chaos, Fractals, Self-organization and Disorder: Concepts & Tools*. Springer Ser. Synerg., Heidelberg. New York: Springer-Verlag. 432 pp.
- Tavera H. y 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.
- Vilkovich, E. y Shnirman M. (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

