

EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE ALERTA DE TSUNAMIS TREMORS: TERREMOTO DE CHILE DE 2010

Sheila Yauri y Hernando Tavera

Dirección de Sismología - Instituto Geofísico del Perú. Email: sheila.yauri@igp.gob.pe, hjtavaera@geo.igp.gob.pe

RESUMEN

La constante amenaza de tsunamis de origen sísmico en toda la costa del Océano Pacífico ha llevado al Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis (SNAT) y al Instituto Geofísico del Perú (IGP) a instalar, en convenio, un sistema automático de alerta temprana de Tsunamis de carácter Regional y Lejano denominado TREMORS. En el presente estudio se evalúa la precisión de éste sistema, estableciéndose para ello límites de confianza para el cálculo de los parámetros epicentrales y determinación de la alerta de tsunami. La alerta se basa en el cálculo automático del Momento Sísmico (Mo). La base de datos utilizada consta de 11 eventos sísmicos entre regionales y telesísmicos con características tsunamigénicas y no-tsunamigénicas registrados por las estaciones TREMORS de Chile (ELRO) y Perú (NNA). Los resultados obtenidos son correlacionados con los valores reportados por el IGP y NEIC. Los resultados indican que el TREMORS presenta residuales con respecto al NEIC en distancia epicentral en un rango de 3.3° y -10° y en el acimut, las residuales están entre 5.8° y -14° para señales con $S/R < 3000$ y entre 2.1° y -4.8° para señales con $S/R > 3000$. Asimismo, el momento sísmico presenta residuales entre 0.12 a -0.14 N.m. Estos resultados sugieren que los parámetros hipocentrales proporcionados por el sistema TREMORS son óptimos para fines de alerta de tsunamis a distancias regionales.

INTRODUCCIÓN

Los tsunamis son eventos naturales extremos poco frecuentes pero de muy rápida generación, debido a diferentes mecanismos, siendo el más frecuente los producidos por eventos sísmicos con epicentro en el mar, superficiales y con magnitudes mayores a 7 grados. La historia de tsunamis ocurridos en el mundo, permite considerar que los más importantes y destructivos han ocurrido alrededor del Océano Pacífico, zona de alto potencial sísmico conocida como "Cinturón de Fuego del Pacífico". Dentro de este contexto, el Perú está permanentemente expuesto a la ocurrencia de sismos de gran magnitud, los cuales en algunos casos han sido generadores de grandes tsunamis como los ocurridos en 1582, 1586, 1604, 1687, 1746, 1868 y 1966 (Silgado, 1978). Más aún, en los últimos 12 años la costa peruana ha sido escenario de 4 importantes tsunamis en 1996 (Chimbote y Nazca), 2001 (Camaná) y 2007 (Pisco), dejando a su paso destrucción y pérdida de vidas. Ante tal situación y teniendo en cuenta que los tsunamis son recurrentes en el espacio y tiempo, se hace necesario contar con un sistema automático de alerta de tsunamis, que proporcione información en forma rápida y precisa sobre la ocurrencia de un tsunami en cualquier punto del Océano Pacífico. El SNAT a cargo de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN), en convenio con el IGP, cuenta con un sistema automático de alerta de tsunamis denominado TREMORS, el cual realiza la evaluación del riesgo de tsunami para la costa peruana, basándose en la localización en tiempo real y cálculo automático de los parámetros hipocentrales de los sismos. En el presente estudio, se evalúa la precisión del sistema TREMORS a fin de validar su eficiencia para la estimación del riesgo de tsunami y finalmente, se establece límites de alerta para el Perú en base a las características tsunamigénicas de los eventos utilizados.

SISTEMA TREMORS

Denominado TREMORS por su sigla en inglés "Tsunami Risk Evaluation through seismic MOment in a Real time System", desarrollado por el Laboratorio de Geofísica de la Polinesia Francesa (LDG). Este sistema se basa en una serie de algoritmos, que en conjunto permiten analizar las señales sísmicas registradas por una estación sísmica de tres componentes y de banda ancha. Una vez ocurrido un sismo, el algoritmo detecta el arribo de la onda P mediante los criterios STA/LTA y umbrales de amplitud y duración. La localización epicentral del sismo es calculada mediante dos parámetros: el acimut y la distancia epicentral, donde el primero se obtiene a partir de la polarización de la onda P en el plano horizontal y el segundo a

partir de la diferencia de los tiempos de arribo de las fases P y S haciendo uso de las tablas de Jeffreys-Bullen (1935). Una vez localizado el sismo, el TREMORS realiza el cálculo automático del M_0 a partir de la magnitud manto (M_m). La alerta se basa en el valor de M_0 teniendo en cuenta que el volumen de agua en movimiento es directamente proporcional a la dislocación de la falla y superficie de ruptura y en consecuencia al M_0 (Aki, 1967; Kanamori, 1972; Abe, 1975; Okal, 1988; Talandier y Okal, 1989). Así, el sistema calcula M_0 mediante la siguiente relación:

$$L \cdot \rho \cdot \Delta g = \alpha M_0 + \eta$$

Donde M_m , se obtiene del espectro de amplitud de las ondas superficiales en un rango de periodo entre 50 a 300s. En el caso de generarse un tsunami, el sistema TREMORS emite dos mensajes de alerta: la primera y solo referencial, a la llegada de la onda P al sobrepasar una amplitud fijada en un umbral de $100 \mu m$. La segunda y más importante esta relacionada al M_0 fijado en un valor de $1E+20$ N.m; es decir, todo sismo con M_0 mayor a este umbral puede ser considerado como potencialmente tsunamigénico.

BASE DE DATOS

La base de datos corresponde a un total de 10 eventos sísmicos registrados entre 1996 y 2007, de los cuales 7 son regionales ($<30^\circ$) y 4 Telesísmicos ($>30^\circ$) con epicentros en el mar y continente, todos con características tsunamigénicas y no-tsunamigénicas (Figura 1). Las señales corresponden a registros de banda ancha obtenidas de las estaciones TREMORS ELRO del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y NNA del SNAT.

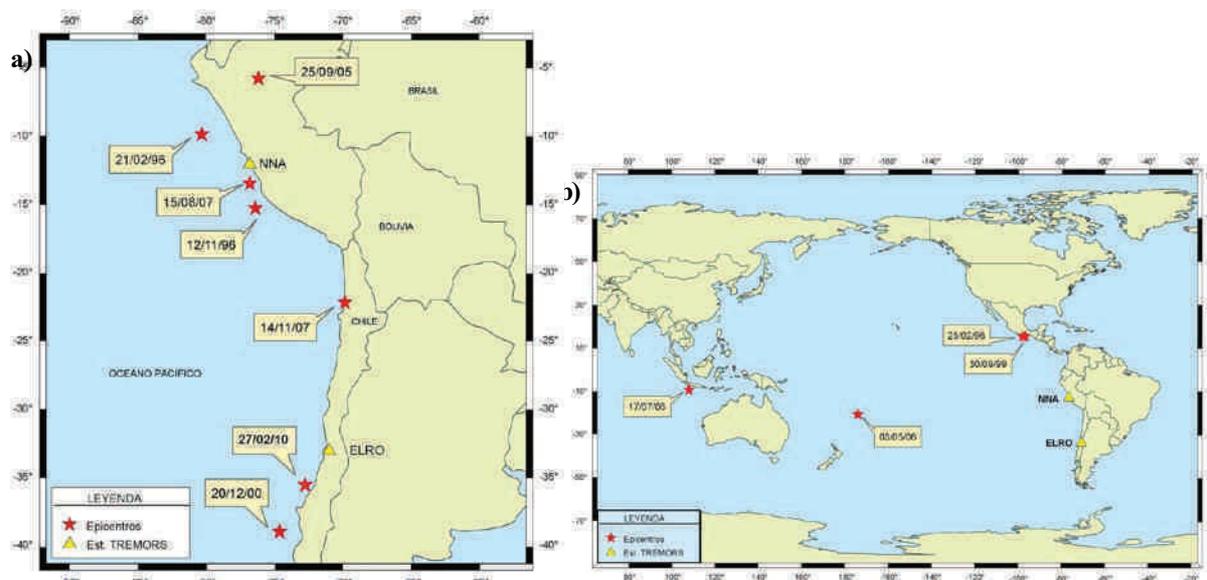


Figura 1. Mapa de sismos utilizados en el presente estudio. a) Regionales y b) Lejanos.

De los 7 eventos regionales, 4 generaron tsunamis locales (Chimbote 21/02/96, Nazca 12/11/96, Pisco 15/08/07 y Chile 27/02/10) y 3 no (Chile 20/12/00, 14/11/07 y Lamas 25/09/05). El sismo de Lamas es de origen cercano y con epicentro localizado en continente. De los 4 eventos telesísmicos, 2 generaron tsunamis locales (Tonga 03/05/06 e Indonesia 17/07/06) y 2 no (México, 25/02/96 y 30/09/99).

METODOLOGÍA Y APLICACIÓN

La metodología a seguir consiste en realizar el análisis comparativo de los parámetros calculados por el TREMORS mediante la detección automática y manual con los reportados por el IGP y NEIC. En la Figura 2, se esquematiza los diferentes pasos seguidos por el sistema para el cálculo de los parámetros epicentrales y M_0 del terremoto de Chile del 27 de febrero de 2010. En a) se observa el sismograma en sus tres componentes mostrando la identificación automática de la onda P y su polarización horizontal y vertical; en b) se observa el registro de las componentes Vertical (Z) y Transversal (T) con sus respectivas envolventes

de energía, donde se identifica el arribo de las fases S, R y L; en c) se observa el registro de las ondas superficiales Rayleigh y Love para el cálculo de la magnitud Manto (Mm) y Momento Sísmico (Mo) y finalmente, en d) se muestra el epicentro y los parámetros sísmicos calculados por el sistema TREMORS para el terremoto de Chile del 2010.

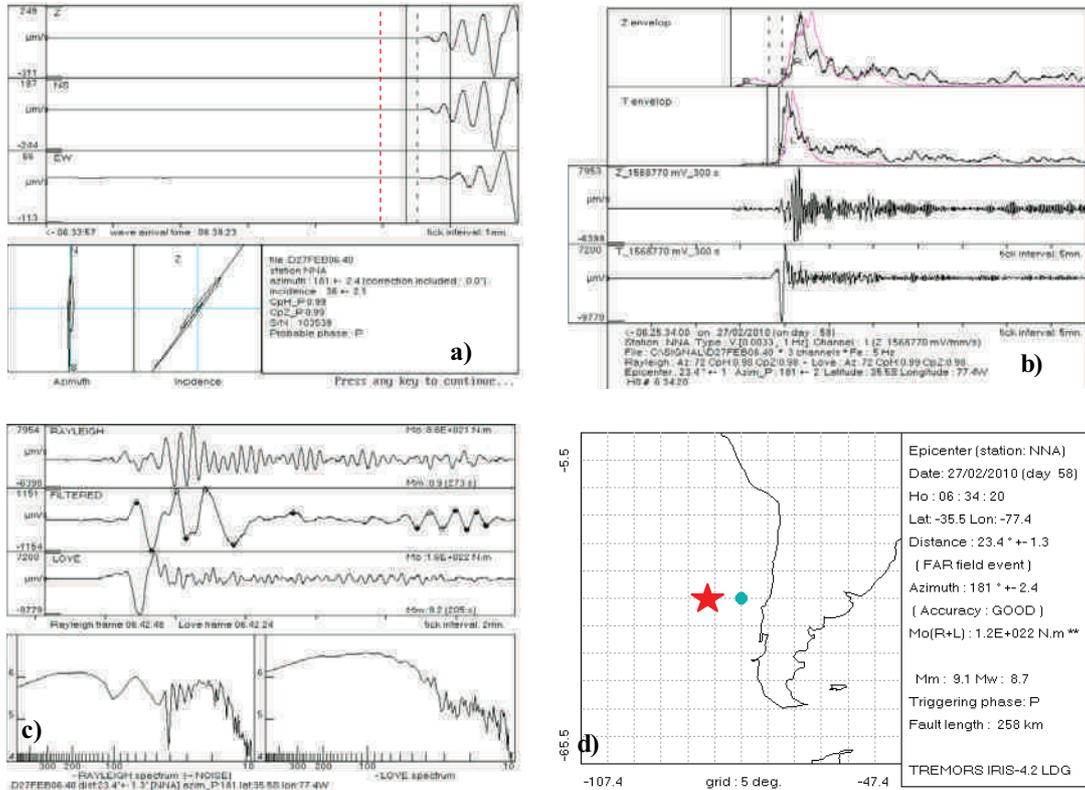


Figura 2. Procedimiento efectuado por el sistema TREMORS. a) Identificación automática de la onda P, b) Detección automática de las fases P, S, R y L, c) Cálculo automático de Mm y Mo y d) Localización epicentral y parámetros sísmicos calculados automáticamente por el sistema TREMORS para el terremoto Chile del 27 de Febrero de 2010.

RESULTADOS

En el caso del sistema TREMORS, el primer parámetro que permite localizar el epicentro de un sismo es el acimut. Los resultados muestran que las señales con relación Señal/Ruido (S/R) menores a 3000 presentan residuales de acimut entre 5.8° y -14°; mientras que, las señales con S/R > 3000 presentan residuales menores entre 2.1° y -4.8°. El segundo parámetro que determina el epicentro del sismo es la distancia epicentral. En el caso de sismos regionales, las residuales para este parámetro son entre 1.5° y -2.9°. Para sismos lejanos las diferencias son mayores, presentándose en un rango de 3.3° y -10.8°.

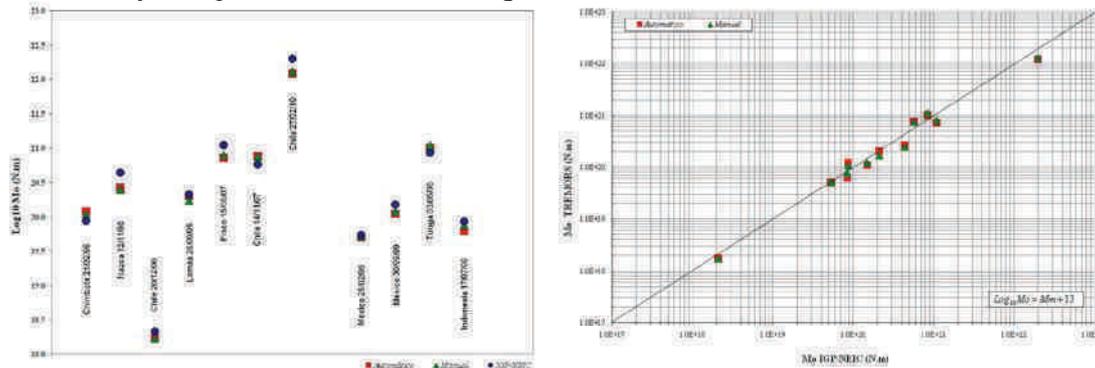


Figura 3. Momento sísmico (Mo) calculado por el sistema TREMORS (automático y manual) en comparación con los valores reportados por el IGP ó NEIC.

El cálculo de M_0 obtenido por el TREMORS en comparación con los reportados por el IGP y NEIC (Figura 3) presenta diferencias en un rango de 0.12 a -0.14 unidades; por tanto, la magnitud momento (M_w) presentan variaciones del orden de 0.1 a 0.2 M_w y en algunos casos son similares (México, Lamas, Pisco y Tonga). De esta manera, se demuestra la buena resolución del TREMORS para el cálculo de M_0 y M_w y se constituye en un procedimiento confiable para fines de alerta de tsunamis regionales y telesísmicos.

Considerando el valor del M_0 , el TREMORS generó alerta de tsunami local para los sismos de Tonga (03/05/06), Pisco (15/08/07), Nazca (12/11/96), Chimbote (21/02/96), Indonesia (17/07/06) y Chile (27/02/10), los cuales fueron corroborados y confirmados mediante registros mareográficos y observaciones de campo (Figura 4). Tomando en cuenta estos acontecimientos, se establece el umbral para sismos No generadores de Tsunami con $M_0 < 5.0 \times 10^{19}$ N.m (color plomo, Fig. 4) y generadores de tsunami local para $M_0 > 5.0 \times 10^{19}$ N.m (color amarillo), siendo estos resultados similares a lo establecido por Okal y Talandier (1992) para la Polinesia Francesa (Tabla 1). Naturalmente, estos umbrales de alerta del TREMORS, deben ser complementadas con los registros mareográficos y observaciones del nivel del mar en las zonas cercanas a al epicentro.

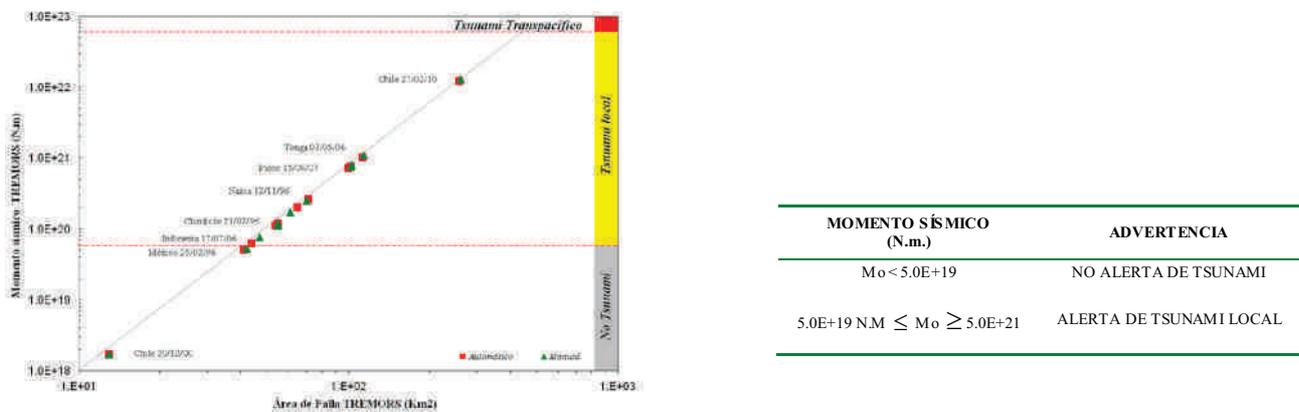


Figura 4. a) Momento sísmico calculado por el TREMORS (Automático y manual) en función del área de ruptura y b) Límites de alerta de tsunamis en base al Momentos sísmico.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la detección de los eventos sísmicos y por ende, la identificación automática de las fases sísmicas que realiza el sistema TREMORS, depende de la calidad de la señal Señal/Ruido (S/R) y de las características del primer impulso, siendo más preciso en señales de tipo impulsivas. La distancia epicentral, presenta residuales en el cálculo automático para eventos regionales entre 1.5° y -2.9° y para eventos telesísmicos entre 3.3° y -10.8° . En acimut las residuales varían entre 5.8° y -14° , para $S/R < 3000$; mientras que, para $S/R > 3000$ disminuyen entre 2.1° y -4.8° . El M_0 calculado por el TREMORS presenta pequeñas variaciones (0.12 y -0.14) con referencia a los valores reportados por el IGP y NEIC. Estas variaciones se deben a las diversas constantes asumidas por el algoritmo para realizar las correcciones de distancia y fuente a fin de calcular M_m . Se establece la eficiencia del sistema en la emisión de una alerta automática de tsunamis y se establece el umbral de alerta: Sismos con $M_0 < 5.0 \times 10^{19}$ N.m, no generan tsunamis; mientras que, aquellos con $5.0 \times 10^{19} \text{ N.m} \leq M_0 \leq 5.0 \times 10^{22}$ N.m, generan tsunamis de tipo Local.

REFERENCIAS

- Aki, K. (1975). Scaling Law of Seismic Spectrum, *J Geophys. Res.* 72, 1217-1231.
- Jeffreys, H. and Bullen, K. (1935). Times of transmission of earthquake waves. *Bur. Centr. Seism. Internat. A 11*, 202 pp.
- Kanamori, H. (1972). Mechanism of Tsunami Earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.* 6, 346-359.
- Okal, E. A. (1988). Seismic parameter controlling Far-field Tsunami Amplitudes. *Natural Hazards 1*, 67 - 96.
- Silgado, E. (1978), "Historia de los Sismos más Notables Ocurredos en el Perú (1513-1974)", Instituto de Geología y Minería, *Boletín No. 3, Serie C, Geodinámica e Ingeniería Geológica, Lima, Perú.*
- Talandier, J., and Okal, E. A. (1992). An algorithm for Automated tsunami Warning in French Polynesia, Based on Mantle Magnitudes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 79, 1177 - 1193.