

**SGP**
FUNDADA 1924**Boletín de la Sociedad Geológica del Perú**Journal homepage: www.sgp.org.pe

ISSN 0079-1091

Metodología para la alerta de eventos tsunamigénicos locales a partir del análisis frecuencial de señales sísmicas: Aplicación al borde occidental del Perú

José Luis Guzmán Mendivil, Hernando Tavera

Subdirección Ciencias de la Tierra Sólida, Instituto Geofísico del Perú (IGP), Calle Calatrava 216, La Molina, Lima, Perú
(jguzman@igp.gob.pe, hernando.tavera@igp.gob.pe)

RESUMEN

El Perú forma parte del denominado “Cinturón de Fuego del Pacífico” y su actividad sísmica está directamente asociada al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la sudamericana, dando origen a sismos de magnitud elevada que generalmente producen tsunamis. Este estudio propone una metodología rápida para discriminar y generar una alerta temprana ante la ocurrencia de sismos locales que sean tsunamigénicos y no tsunamigénicos. Para ello se realiza el análisis frecuencial de la señal sísmica y el cálculo de energía sísmica liberada por el sismo.

Los registros sísmicos con contenidos de baja frecuencia, alta energía liberada y epicentro cerca de la fosa, podrían ser potencialmente tsunamigénicos; mientras que, los que presentan altas frecuencias, bajos niveles de energía y epicentro cerca de la costa, son no tsunamigénicos. La metodología es aplicada a eventos sísmicos ocurridos en Perú, obteniéndose resultados óptimos para la alerta temprana de tsunamis, la cual podría ser emitida en un tiempo de aproximadamente dos minutos.

Palabras clave: Subducción, Tsunamis, Sismos locales, Tsunamigénicos.

1. Introducción

El Perú forma parte de la región sísmica más activa del mundo debido a que se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico y según su historia, ha sido afectado por un gran número de sismos ocurridos, a variados niveles de profundidad y rangos de magnitud, siendo los que presentan sus epicentros en el mar, los más propensos a generar tsunamis.

Por otro lado, ha quedado establecido, según la práctica, que solo los sismos con epicentro en el mar, con focos a profundidades menores a los 60 km y magnitudes $\geq 7.0M_w$, pueden generar tsunamis. Además, los tsunamis llegan a las zonas costeras en tiempos del orden de 15 a 20 minutos después de ocurrido el sismo, siendo posible establecer sistemas de alerta que permitan a la población salvaguardar su seguridad física.

A la fecha, son pocas las investigaciones y procedimientos propuestos para establecer las alertas de

tsunami haciendo uso de un mínimo de información, pero en todos los casos se analiza las características frecuenciales de los registros sísmicos. Uno de los primeros procedimientos propuestos fue TREMORS, que haciendo uso del registro sísmico en sus tres componentes, procedía a estimar la distancia epicentral y a partir del espectro de las ondas de manto para conocer la magnitud. El sistema fue de gran uso en Indonesia y también en Perú, pero dado que en los últimos 70 años no ocurre un sismo importante, el sistema no pudo ser puesto a prueba. Hoy en día, debido a la disponibilidad de gran cantidad de información sísmica en tiempo real y la ocurrencia en el mundo de un gran número de sismos con epicentros en el mar, generadores o no de tsunami, es posible proponer nuevos procedimientos para la alerta de tsunamis.

En este estudio, se realiza y se propone un procedimiento integrado que haciendo uso de la mínima información sísmica se pueda emitir alertas de tsunami a partir del contenido frecuencial en la señal sísmica.

2. Sismos tsunamigénicos y no tsunamigénicos

Los sismos que generan grandes tsunamis sin relación con el epicentro y magnitud del sismo, es una de las grandes intrigas que muchos científicos tratan de explicar. Estos no son muy frecuentes y a la fecha, es posible que solo hayan ocurrido en Perú, Nicaragua (Kanamori, H., Kikuchi, M., 1993) y México, siendo llamados como sismos tsunamigénicos.

2.1 Sismos no tsunamigénicos

Son conocidos también como "Sismos Interplaca", y se caracterizan por que ocurren cerca de la línea de costa y focos hasta profundidades de 60 km (Figura 1). Estos sismos presentan procesos complejos de ruptura, y sus registros se caracterizan por que presentan altas frecuencias. Por otro lado, el desplazamiento de la corteza sería controlada por la cantidad de energía liberada en el foco del evento sísmico, por lo que los sismos tendrían que presentar magnitudes ≥ 8.0 Mw para generar tsunamis.

2.2 Sismos tsunamigénicos

Estos eventos necesitan poca energía sísmica para poder generar un tsunami debido a que su fuente de generación es muy superficial cerca de la fosa oceánica (Figura 1). La baja rigidez de los sedimentos origina su lento desplazamiento y a la vez menores velocidades de ruptura, lo que se traduce, en una mala excitación de las frecuencias sísmicas usadas en la determinación de la magnitud del sismo, de tal manera que los sismos son más grandes que lo reportado minutos después de ocurrido. En este caso los dos registros sísmicos se caracterizan por el contenido de bajas frecuencias. Según Kanamori (1972), si un sismo genera un tsunami mucho mayor de lo esperado para su tamaño, será conocido como "Tsunami Earthquake".

De lo discutido, se concluye que existen marcadas diferencias entre los sismos llamados tsunamigénicos y no

tsunamigénicos, siendo las principales las que se detalla en la Tabla 1. Por lo tanto, es probable proponer una metodología que permita el análisis y la emisión de alertas de Tsunami al mismo tiempo.

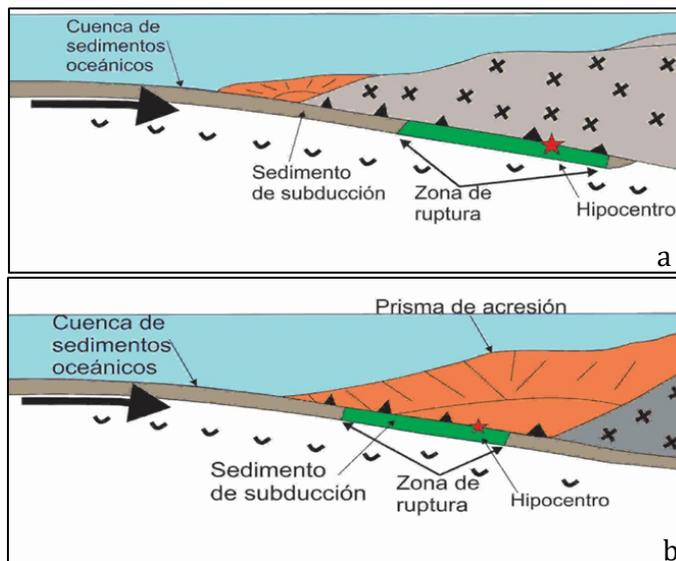


Figura 1: a) Sismos asociados al contacto de placas. b) Sismos asociados al prisma de acreción (Modificado de Kanamori et al., 1993).

3. Metodología

La formación de un sismo que genere un gran tsunami está ligada a su proceso de origen y a la energía liberada en la fuente. Sin embargo, pueden ocurrir eventos de magnitud moderada que generen tsunamis locales. Por otro lado, se observado que los cambios típicos en el contenido frecuencial y energía liberada, pueden ser evaluados en las señales según el origen de la fuente (Tabla 1), lo cual indicaría una característica particular de los sismos y que puede ser usado para su discriminación (Shapiro et al., 1998).

Tabla 1: Parámetros que caracterizan a sismos tsunamigénicos y no tsunamigénicos.

Parámetros	Sismos no Tsunamigénicos- Tipo 1 "Sismos Interplaca"	Sismos Tsunamigénicos-Tipo 2 "Sismos Lento"
Ubicación de la fuente	Foco superficial cerca de la línea de costa	Foco superficial cerca de la fosa
Magnitud (Mw)	≥ 8.0	≥ 7.0
Velocidad de Ruptura	3 km/seg.	1.73 km/seg.
Intensidad (MM)	VII (Pisco, 2007)	IV (Chimbote, 1996)
Contenido frecuencial	Altas frecuencias	Bajas frecuencias
Características del Tsunami	Genera un tsunami grande coherente con la magnitud del sismo	Genera un tsunami grande, sin relación con la magnitud del sismo.
Tiempo de llegada de la ola	Menor tiempo de llegada a la zona costera (~15 min, sismo 1974).	Mayor tiempo de llegada a la costa (1h, sismo 1996).

Estas hipótesis han sido integradas en el algoritmo "TSUFREC" y es aplicado a eventos sísmicos que ocurren a distancias epicentro-estación menor a 500 km.

En este caso solo se requiere el registro del sismo en una estación de banda ancha. Una vez seleccionado el registro sísmico y realizado la corrección por respuesta instrumental, se procede a realizar la corrección por el efecto de propagación geométrica definido por $(R^{-0.5} \text{ ó } \frac{1}{\sqrt{R}})$, y la corrección por la atenuación anelástica dada por $e^{-\frac{\pi f R}{\beta Q(f)}}$ y en donde "R" es la distancia hipocentral, " β " es la velocidad de la onda de corte y $Q(f)$ el factor de calidad; expresado como $273(f)^{0.067}$. En esta relación, la frecuencia "f" tiene un valor de 1.62Hz sugerido por Ordaz y Sing (1992) para zonas eventos ocurridos en de subducción.

El proceso a seguir en el diagnóstico de eventos tsunamigénicos, se resume en la Figura 2.

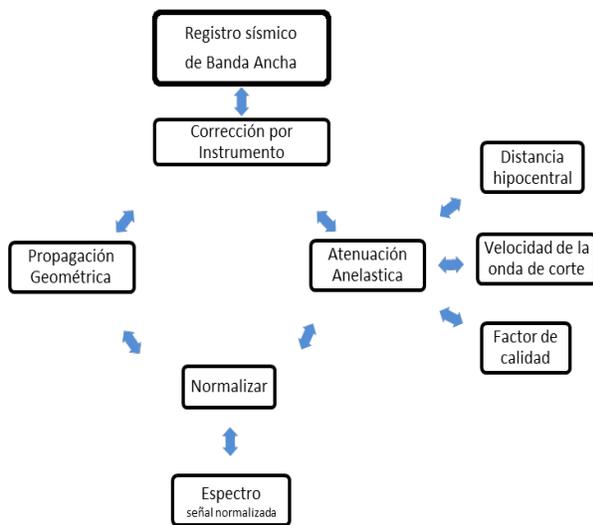


Figura 2: Esquema de los principales procesos considerados para el cálculo de diagnóstico de los eventos Tsunamigénico.

Realizada las correcciones indicadas, se procede al cálculo de la energía a partir del espectro de las tres componentes del registro sísmico y usando en la siguiente relación:

$$Energía = \frac{\int_0^{\infty} [V_N^2 + V_E^2 + V_Z^2] df}{\int_1^{\infty} [V_N^2 + V_E^2 + V_Z^2] df}$$

Donde, $V_i(f)$ es el espectro de Fourier de la i-ésima componente del registro sísmico (N, E y Z corresponden a cada componente del registro). Para el límite de las integrales se considera la frecuencia de 5 Hz, a fin de garantizar que los espectros estén por encima del ruido. Para el límite inferior se toma el valor de 1 Hz ya que por debajo del mismo, los espectros son dominados por el ruido.

Conocida la energía espectral, se procede a discriminar los eventos sísmicos considerando los parámetros de la Tabla 1, previos a emitir la alerta de tsunami.

4. Aplicación

La metodología propuesta, ahora integrada en el algoritmo TSUFREC, es aplicada a dos eventos ocurridos en el borde occidental de Perú, 21 de febrero y 12 de noviembre de 1996, para ambos eventos se considera los registros obtenidos de la estación de ÑAÑA, (NNA), Figura 3.

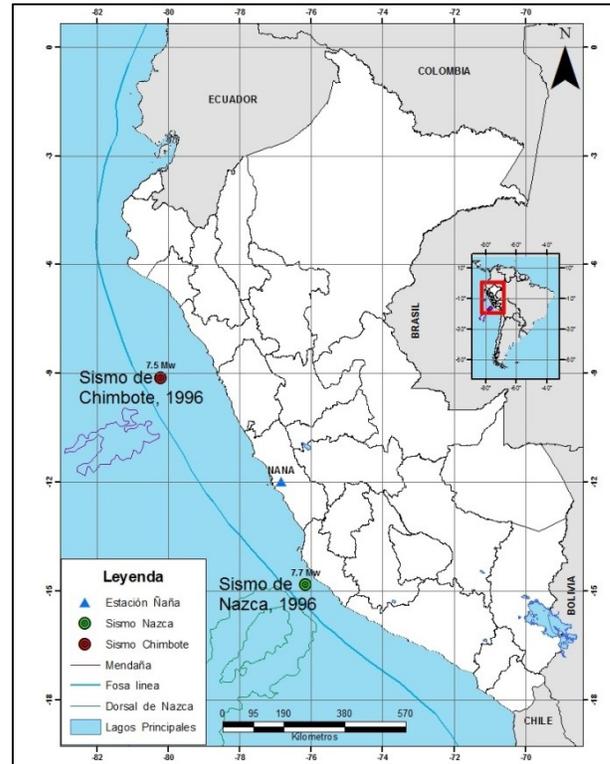


Figura 3: Ubicación de los sismos de Chimbote y Nazca de 1996, así como la estación de Ñaña.

4.1. Evento del 21 de febrero

4.1.1. Análisis sísmico

El 21 de Febrero de 1996, a las 7h 51m (hora local), ocurrió un evento sísmico con magnitud 7.5Mw y epicentro a 200 km en dirección oeste con respecto a la ciudad de Chimbote, su foco tuvo una profundidad de 18 km. La intensidad del sismo en la escala Modificada de Mercalli (MM) fue de III en la localidad de Chimbote, por lo tanto, no produjo daños ni efectos secundarios. Según Ihmlé et al., (1998), el sismo se caracterizó por presentar un proceso lento de ruptura con velocidades de 2.0 km/s dentro de un área rectangular de ruptura paralela a la línea de fosa de 110 km de largo por 40 km de ancho.

4.1.2. Análisis frecuencial

El registro sísmico en velocidad, corresponde a la estación de Ñaña ubicada a 400 km del hipocentro del sismo (Figura 4). El espectro de energía, muestra que el evento sísmico se caracterizó por presentar frecuencias menores a 0.5 Hz y altos valores de energía. De acuerdo a la Tabla 1, el sismo sería caracterizado como tsunamigénico; por lo tanto, se daría la alerta de tsunami.

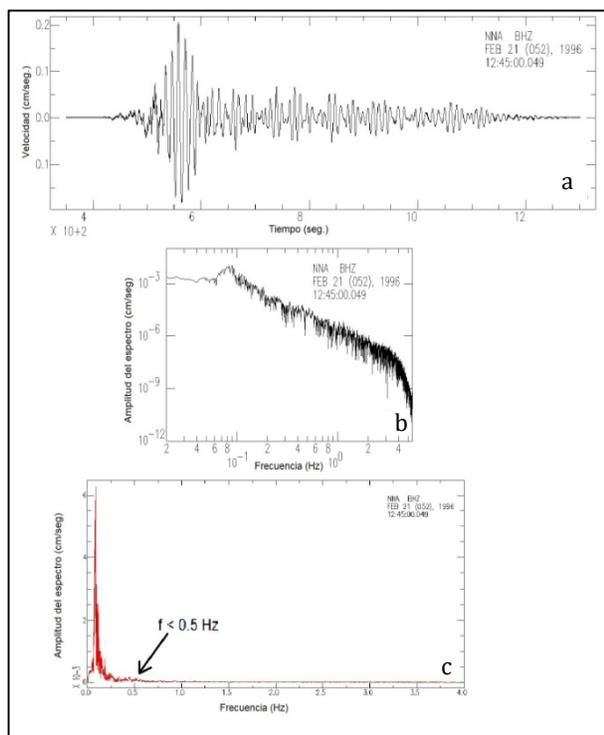


Figura 4: a) Registro del sismo del 21 de febrero de 1996, b) Espectro de amplitud en velocidad y c) Análisis frecuencial en escala log-log.

El 21 de febrero, después de ocurrido el sismo, se produjo un tsunami que demoró alrededor de una hora en llegar a las costas de Chimbote y sus alrededores. En el muelle de la ciudad de Chimbote, la inundación alcanzó una longitud de casi 800 metros. El máximo "run up" alcanzado fue de más de 5.0 metros en la bahía de Chimbote; y en la ciudad de Chimbote, del orden de 3.0 metros. Hacia el sur, la distancia máxima de inundación fue de 300 metros tierra adentro. Las playas Samanco y La Caleta sufrieron graves daños debido a que la inundación alcanzó distancias de 200 y 300 metros (Bourgeois et al., 1999). El tsunami provocó la muerte de 12 personas, 54 heridos.

4.2. Evento de Nazca-1996

3.2.1. Análisis sísmico:

El 12 de Noviembre de 1996, a las 11h 59min (Hora local), ocurrió un evento sísmico con magnitud de 7.7 Mw, epicentro a 90 km al SO de la ciudad de Nazca y foco a profundidad de 46 km. La intensidad del sismo en la escala Modificada de Mercalli fue de VII en las localidades de Nazca y Palpa, V Ica, IV Camaná, III y II Arequipa, Moquegua y Tacna (Tavera, 2004).

4.2.1. Análisis sísmico:

Para el análisis frecuencial se utilizó el registro de la estación de Ñaña ubicada a 400 km del hipocentro (Figura 5). De acuerdo a sus espectros de frecuencia, el sismo presenta altas frecuencias ($\geq 4\text{Hz}$) y bajo nivel de energía liberada.

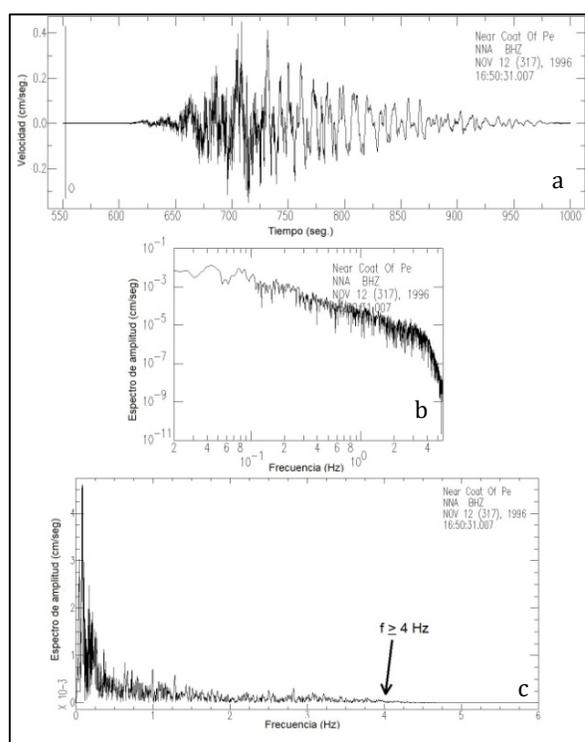


Figura 5: a) Registro del sismo del 12 de noviembre de 1996, b) Espectro de amplitud en velocidad y c) Análisis frecuencial en escala log-log.

De acuerdo a las consideraciones de la Tabla 1, el evento corresponde a un sismo no Tsunamigénico.

Después de ocurrido el sismo y después de transcurrido 15 minutos se reportó la ocurrencia de tsunami que no causó mayores daños en la zona costera.

5. Conclusiones

La metodología propuesta permite discriminar, en base a la energía liberada y al contenido frecuencial de los registros sísmicos, entre eventos locales tsunamigénicos y no tsunamigénicos. Los primeros ocurren cerca de la fosa y se caracterizan por presentar bajas frecuencias; mientras que, los segundos, con epicentro cerca de la costa presentan altas frecuencias. El método permitiría dar alertas de tsunami con tan solo disponer de información de una estación sísmica de banda ancha. Esta metodología ha sido integrada en el algoritmo TSUFREC, el mismo que es parte del Centro Nacional de Monitoreo Sísmico - Acelerométrico de la subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida del Instituto Geofísico del Perú.

Referencias

Bourgeois, J., Petroff, C., Yeh, H., Titov, V., Synolakis, C., Benson, B., Kuroiwa, J., Lander, J. y Norabuena, E. (1999): Geologic Setting, Field Survey and Modeling of the Chimbote, Northern Peru, Tsunami of 21 February 1996. Journal of Pure and Applied Geophysics, Earth and Environmental Science Issue, Volume 154, Numbers 3-4 / May, 1999, Pages 513-540.

- Ihmlé, P., Gomez J., Heinrich P., Guibourg S., (1998). The 1996 Peru tsunamigenic earthquake: Broadband source process. *Geophysical Research Letters*, vol. 25, NO. 14, Pages 2691.
- Kanamori, H., (1972). Mechanism of tsunami earthquakes. Earthquake Research Institute, Tokyo University, Tokyo, Japan.
- Kanamori, H., Kikuchi, M., (1993). The 1992 Nicaragua earthquake: a slow tsunami earthquake associated with subducted sediments. *Nature*, 361, 714-716.
- Ordaz, M., y Singh, S., (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, an evidence of amplification in the hill zone of Mexico City, *Bull Seism. Soc. Am.*, 82, 24-43.
- Rabinovich, A., Kulicov E., y Thomson, R., (2001). Tsunami risk estimation of coasts of Peru and northern Chile. *ITS 2001 Proceedings, Session 1. Number 1-5.*
- Shapiro N., Singh, S., y Pacheco, J., (1998). A fast and simple diagnostic method for identifying tsunamigenic earthquake, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional de México D.F., México.
- Satake, K. y Tanioka, Y., (1999). Source of tsunami and tsunamigenic earthquakes in subduction zones, *Pure appl., Geophys.*, 154, 467-483.
- Tavera, H., Antayhua, Y., (2004). Estudio de la distribución espacial de las réplicas del sismo de Nazca del 12 de Noviembre de 1996 (Perú).
- Yauri S., (2008). Detección, localización y análisis de sismos tsunamigénicos: Sistema de alerta de tsunami tremors. *Tesis de grado U.N.S.A.*