

## SOFTWARE PARA DETERMINACION DE OCURRENCIA DE MAREMOTOS

## SOFTWARE FOR DETERMINATION OF OCCURRENCE OF TSUNAMIS

César Jiménez T.

### RESUMEN

Se define y se describen las causas y características de un maremoto. Dando énfasis en los requisitos que debe cumplir un terremoto maremotogénico (generador de maremoto). Las condiciones del sismo generador de maremoto son: a) que el epicentro se ubique en el mar o cerca de la línea de costa, b) que la profundidad sea menor a 60 km, c) que el movimiento tenga una componente vertical y d) que la magnitud de momento sea mayor a 7.0 Mw. Se analiza la geometría del área de ruptura para discriminar si un sismo con epicentro en continente (en zona de subducción) es generador de un maremoto. En base a dichas condiciones se implementa un software para determinar la ocurrencia de maremotos, el mismo que tiene una rutina para calcular los tiempos de arribo de la primera onda del maremoto.

*Palabras claves: maremoto, subducción, sismo.*

### ABSTRACT

It is defined and there are described the causes and characteristics of a tsunami. It is given emphasis on the requirements that a Tsunamigenic Earthquakes (generator of tsunami). The conditions of the generator earthquake are: a) that the epicenter be located on the sea or near the coastline, b) that the depth be less than 60 km, c) that the movement have vertical component and d) that the moment magnitude be greater than 7.0 Mw. The area rupture is analyzed for discriminating if an earthquake with epicenter on land (in subduction zones) can be generator of tsunamis. Taking into account those conditions, a software for determining the happening of tsunamis is implemented, this one has a routine for to compute the arrival times of the first tsunami's wave.

*Keywords: tsunami, subduction, earthquake.*

### INTRODUCCIÓN

La Sala de Alerta de Tsunamis de la DHN requiere procesar en forma rápida la información de sismos ocurridos a nivel nacional e internacional para poder emitir una alerta en caso de inminente maremoto. Para acelerar el proceso es necesario contar con un software que procese la información correspondiente en forma automática.

En nuestro medio, este problema no había sido resuelto hasta antes del año 2009, no se contaba con esta herramienta.

El aporte de este trabajo consiste en proporcionar una herramienta adicional para el operador de la Sala de Tsunamis en su labor de vigilancia y monitoreo

de sismos y maremotos.

Se analizará las condiciones de generación de maremotos (en zonas de subducción) y la clasificación de maremotos según su potencial destructivo, en base a esto se implementará un algoritmo para procesar dicha información.

### MARCO TEÓRICO

Un maremoto es un conjunto de ondas de agua de gran longitud (con períodos en el rango de 5 a 60 minutos o más) teniendo una duración total de varias horas, que se propagan en el océano debido a una perturbación.

Los maremotos pueden ser generados por diferentes procesos impulsivos de desestabilización gravitacional de la columna de agua, tales como desplazamientos tectónicos – asociados con terremotos, erupciones volcánicas submarinas, deslizamientos de tierra submarinos, caída de rocas a bahías o al océano e impacto de grandes meteoritos en el océano. Un terremoto generador de maremotos usualmente está asociado a zonas de subducción. Dado que muchas de estas zonas se encuentran bordeando la cuenca del Pacífico, la gran mayoría de los maremotos ocurren en el Océano Pacífico.

Las ondas del maremoto pueden alcanzar velocidades de hasta 800 km/h en alta mar, y atravesar un océano en pocas horas. En alta mar, la ola es prácticamente imperceptible, a menudo de menos de 1m de amplitud; sin embargo, al entrar en aguas costeras poco profundas, el maremoto debe frenar su movimiento y repentinamente crece en altura. Cuando llega a la costa, puede convertirse en un muro de agua de varios metros de altura capaz de destruir ciudades costeras.

¿Cómo diferenciamos un maremoto de simples olas enormes como las que utilizan los surfistas, por ejemplo? Las simples olas son originadas por los vientos. Las ráfagas de viento sacuden la superficie de las aguas, las rizan y dan lugar a ondulaciones que van creciendo en amplitud. Estas olas tienen un periodo de pocos segundos. En la Figura 2, se muestra una señal mareográfica que contiene 3 componentes importantes: marea (periodo largo de alrededor de 12 horas), maremoto (periodo largo de 23 minutos) y olas (periodo corto de alrededor de 15 segundos).

De la Fig. 2, podemos apreciar en el registro mareográfico, que el inicio del maremoto del 15 de agosto de 2007 en San Juan de Marcona (Ica) es a las 19:11 hora local. Luego, se aprecian alrededor de 18 ondas de amplitud apreciable y con un periodo promedio de 23 min. Esto implica una duración de por lo menos 7 horas y probablemente más incluyendo fenómenos de resonancia locales. Podemos inferir que este tren de ondas corresponde al maremoto originado por el terremoto principal y sus réplicas inmediatas (puesto que no hay discontinuidad ni cambio de fase apreciable en la forma de onda) y no por las réplicas posteriores, las cuales fueron de pequeña magnitud (ver Tabla 1) como para originar otro maremoto. (Ortega y

Jimenez, 2008).

La señal sísmica en el dominio del tiempo (ver Figura 1) presenta una saturación debido a la cercanía de la estación, puede observarse una pequeña réplica (5.1 Mw), demasiado pequeña para

Tabla 1. Réplicas mayores a 5.0 Mw (agosto de 2007). Fuente: NEIC

Día	Hora GMT	Magnitud
15	23:40	8.0
15	23:57	5.1
16	00:02	5.6
16	00:19	5.8
16	00:25	5.3
16	01:02	5.8
16	01:06	5.2
16	01:35	5.4
16	04:04	5.6
16	04:23	5.2
16	05:16	6.4
16	09:43	5.3

producir un maremoto.

En el artículo “Observaciones del Tsunami asociado con el Terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007” del volumen “El Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007”, pag. 351, el autor afirma (Woodman, 2008): “Hubo un segundo tsunami después de la media noche (con tiempos de ocurrencia un poco difusos) con un nivel no menor de 2.34 m sobre la marea alta”. Más adelante (pag. 367) refiere: “...Carlos Calderon, guardián de una de las casas, se encuentra en el techo de esta y escucha el estruendo de una gran ola que golpea el rompe olas frente a la casa y entra con gran estruendo también en el callejón que lo separa de la casa vecina. Según él, el evento ocurre a las

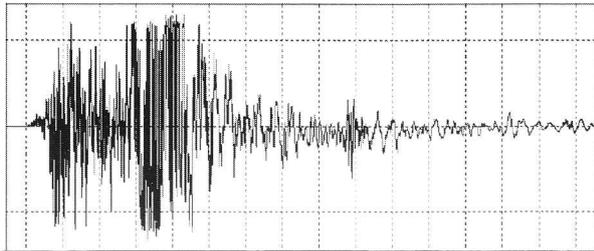


Figura 1 Señal del terremoto de Pisco 2007 para la estación de Ñaña (NNA).

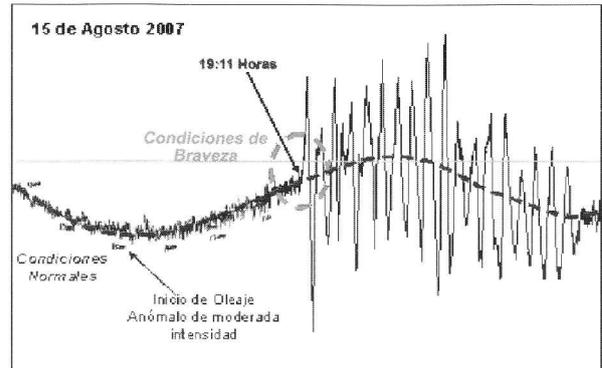


Figura 2. Registro de mareógrafo de San Juan de Marcona. (Fuente: DHN)

1:30 am según el reloj de su celular. Es el único que menciona ver la hora en un reloj, pero esta no concuerda con la ocurrencia de la réplica fuerte de las 12:16 am". Lo que para el poblador costero pareciera ser un segundo maremoto, para el registro mareográfico es la superposición de la onda del maremoto más la marea en el rango de su máxima amplitud. Basándonos en la explicación del párrafo anterior, podemos afirmar que: el fenómeno cósmico principal fue un maremoto compuesto por un tren de varias ondas.

### CONDICIONES DE GENERACIÓN DE UN MAREMOTO

Para que un sismo genere un maremoto es necesario que cumpla los siguientes requisitos:

a) Que el epicentro del sismo, o una parte mayoritaria de su área de ruptura, este bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 km (sismo superficial). Esta profundidad es solo referencial.

Según la relación empírica de Papazachos (2004), entre la magnitud de momento sísmico  $M$  ( $M_w$ ) y los parámetros focales  $L$ (km) y  $W$ (km), largo y ancho del área de ruptura para zonas de subducción:

$$\log(L) = 0.55M - 2.19$$

$$\log(W) = 0.31M - 0.63 \quad (1)$$

El modelo WinITDB (Gusiakov et al. 2007) (Integrated Tsunami Database for the World Ocean) asume (como dato de entrada) que el área de ruptura tiene una geometría elíptica con el eje mayor orientado en la dirección de la línea de costa (ver Figura 4).

$$\text{Semieje menor: } a = 1.11 \frac{W}{\sqrt{\pi}} \quad (2)$$

$$\text{Semieje mayor: } b = 0.90 \frac{L}{\sqrt{\pi}}$$

Para esta superficie de ruptura de geometría elíptica de igual área  $S$  y semiejes  $a$  y  $b$  proporcionales a  $W$  y  $L$ , tenemos los siguientes parámetros (Jimenez, 2008):

De las ecuaciones (1) y (2) podemos obtener la siguiente tabla:

Magnitud	Ancho $W$	Semieje menor
$M_w$	(km)	(km)
8.0	71	44
8.3	88	55
8.5	101	63
8.6	109	68
8.8	125	78
9.0	144	90
9.5	206	129

Para un terremoto catastrófico de 9.5  $M_w$  (comparable al terremoto de Chile de 1960) la longitud del ancho de ruptura sería de 206 km y el semieje menor sería de 129 km.

Por otro lado, el perfil de sismicidad para el Perú muestra una zona de subducción descendente, lo que

significa que la profundidad de un sismo tectónico, a medida que nos adentramos en continente, irá en aumento. Esto disminuye la probabilidad de ocurrencia de maremotos para sismos tectónicos con epicentro en continente (ver Fig. 3).

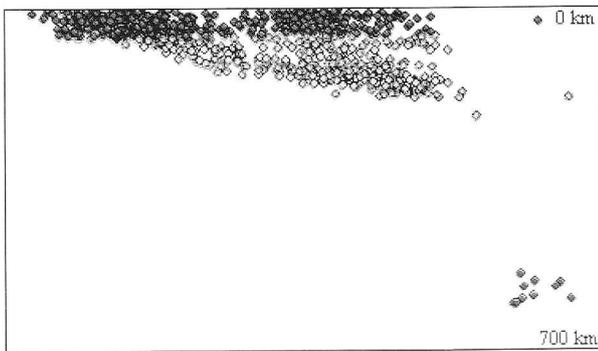


Figura 3. Perfil de sismicidad para la región central del Perú, periodo 1982-2005 (Fuente: IGP)

Tomando en cuenta el ancho de ruptura calculado y el perfil de sismicidad, podemos estimar que el epicentro del sismo debería estar a no más de 60 km (alrededor de la mitad del semieje menor) de la línea de costa (tierra adentro) para que una parte de la proyección del área de ruptura sobre la superficie terrestre esté en el mar y se genere un maremoto, de lo contrario sería casi improbable la generación del maremoto.

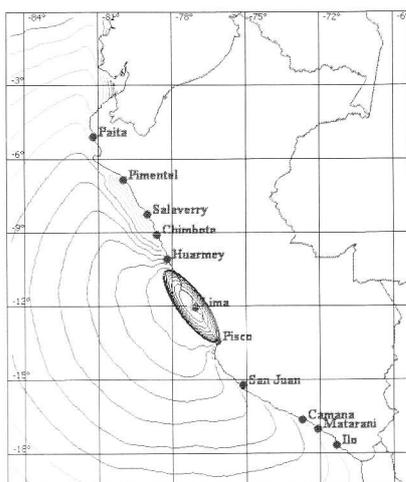


Figura 4 Área de ruptura e isócronas (10 min) de propagación del maremoto de Callao 1746.

En el artículo “Características Generales del Tsunami del 15 de agosto de 2007” del volumen “El Terremoto de Pisco del 15 de Agosto de 2007”,

pag. 372, el autor (Yauri & Tavera, 2007) muestra un mapa de sismos generadores de maremotos en el Perú, en el cual se presentan sismos con epicentro en Apurímac, Huancavelica, en la sierra de Arequipa y en la sierra de Moquegua, etc., los cuales, lógicamente, no producirán ningún maremoto (en el mar). Dicho artículo está basado en el trabajo “Estructura de un Catálogo de Tsunamis para el Perú” (Carpio et al, 2002), el cual está basado, en parte, en la información de la Siberian Division Russian Academy of Sciences. Un error de los rusos al considerar, por ejemplo, que el maremoto de 1582 fue generado por un sismo ( $M_s=8.6$ ) en tierra ( $lat=-16.0^\circ$ ,  $lon=-72.0^\circ$ ) ;Con epicentro a 95 km de la línea de costa!

Según la Tabla 2, el semieje menor sería de 68 km, lo que significa que el área de ruptura no tocaría el mar y por lo tanto no se generaría maremoto (ver Figura 5).

Los catálogos históricos de países sísmicamente activos, como el Perú, están basados en la valoración de la intensidad macrosísmica mediante una escala descriptiva, dando como resultado, en algunos casos, un sesgo exagerado en la estimación del epicentro. En el mapa de la Fig. 6, se muestran los sismos que han generado maremotos sentidos en el Perú, donde se han filtrado algunos eventos con epicentro en continente.

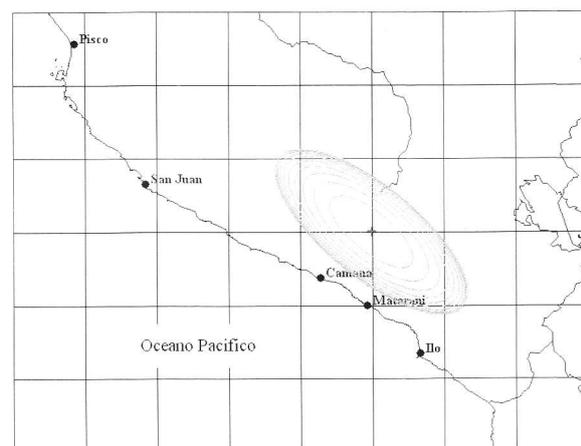


Figura 5. Modelo del área de ruptura para el sismo de Arequipa de 1582

b) Que ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas, es decir que la falla tenga movimiento con componente vertical y no sea solamente de desgarre con movimiento lateral. Como condición inicial de la dinámica del maremoto

debe darse el llamado “efecto pistón”. Si ocurriese un sismo y no hubiera desplazamiento diferencial en el fondo marino entonces no se generaría un maremoto. Un sismo con una componente de movimiento horizontal también podría generar un maremoto, siempre que el área de ruptura abarque parte de la fosa marina, la cual actuaría como una pared casi vertical que movería un gran volumen de fluido.

c) Que el sismo libere suficiente energía en un cierto lapso de tiempo y que esta sea eficientemente transmitida. Por lo general: magnitud de momento  $M_w > 7.0$

El momento sísmico  $M_o$  se define como:

$$M_o = \mu LWU \quad (3)$$

donde  $\mu = 4.5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$  es el módulo de rigidez del medio y  $U$  es la dislocación de la falla. Talandier (1993), proporciona una relación entre el momento sísmico  $M_o$  y el potencial destructivo de un maremoto. Por regla general, en los centros internacionales de alerta de maremos del Pacífico el umbral de alerta por maremoto se establece en 1020 Nm (que corresponde a una magnitud  $M_w = 7.2$ ). Todos aquellos terremotos con momento sísmico igual o mayor son potencialmente generadores de maremos. El valor del momento sísmico  $M_o$  determinará el tamaño y los efectos destructivos del maremoto.

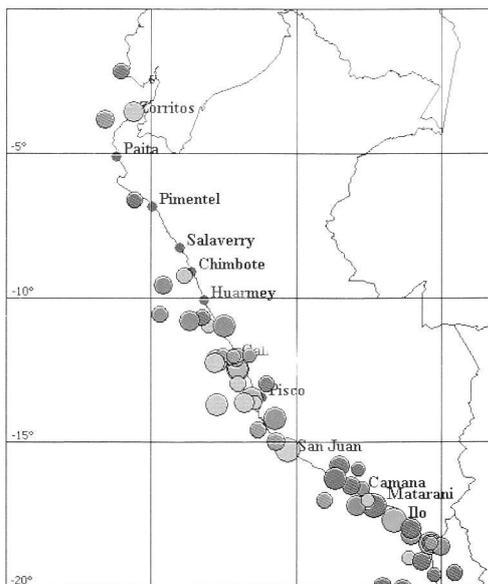


Figura 6. Sismos generadores de Maremos en la región de Perú.

Tabla 3. Clasificación de maremos.

Rango de valores	Tipo de maremoto
$M_o < 10^{20} \text{ N.m}$	No se genera maremoto
$10^{20} < M_o < 10^{21} \text{ N.m}$	Probable maremoto pequeño y local
$10^{21} < M_o < 5 \cdot 10^{21} \text{ N.m}$	Maremoto pequeño
$5 \cdot 10^{21} < M_o < 2 \cdot 10^{22} \text{ N.m}$	Potencialmente destructivo
$M_o > 2 \cdot 10^{22} \text{ N.m}$	Grande y destructivo

### IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

Con la información y las condiciones para la generación de maremos desarrollado en el presente trabajo, se ha implementado un software con una interfaz gráfica de usuario desarrollado en lenguaje de programación Matlab (ver Figura 7), en el cual los datos de entrada son: magnitud  $M_w$ , profundidad focal, latitud, longitud, hora origen, obteniendo como datos de salida: semieje menor, semieje mayor, dislocación de ruptura, momento sísmico y grafica sobre el mapa del Perú la probable geometría del área de ruptura, además permite decidir si se producirá o no un probable maremoto y lo clasifica en pequeño, moderado o destructivo de acuerdo al valor del momento sísmico calculado (ver Tabla 3). Los datos obtenidos sirven, a su vez, como datos de entrada del modelo WinITDB.

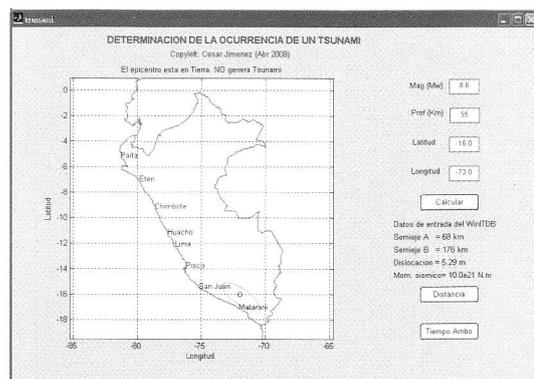


Figura 7. Software para determinación de maremos en la región de Perú.

El programa contiene una subrutina para el cálculo de los tiempos de arribo a las diferentes ciudades costeras, para esto trabaja con los datos de batimetría del modelo de relieve global ETOPO1 (resolución de 1.8 km), los cuales son interpolados en 2D para la grilla del área de trabajo (Amante et al.). Se realizará la estimación del tiempo de arribo del maremoto teniendo en cuenta que la longitud de onda del maremoto es mucho mayor que la profundidad del mar, en este caso se cumple que la velocidad de la onda es:

$$v = \frac{dr}{dt} = \sqrt{gh(r)} \quad (4)$$

$$dt = \frac{dr}{v} = \frac{dr}{\sqrt{gh(r)}}, \quad \text{de donde:}$$

$$T = \int_c \frac{dr}{\sqrt{gh(r)}} \quad (5)$$

C representa la trayectoria o camino seguido por la onda para un tiempo mínimo. Por interpolación 2D se halla la profundidad del lecho marino en el epicentro. Se divide la trayectoria que une al epicentro con la localidad especificada en "n" particiones. Se calcula la profundidad para cada partición y se forma el perfil  $h(r)$ . Finalmente el tiempo de arribo se calcula mediante integración numérica por el método de Simpson 1/3. En algunos casos se añade un factor de corrección.

Este software es de utilidad práctica para el

operador del Sistema Nacional de Alerta de Tsunamis de la Dirección de Hidrografía y Navegación. Puede ser descargado de la red en:

<http://cjimenez.741.com/tsunami.zip>

## CONCLUSIONES

Un maremoto es un tren de ondas de gran longitud generadas principalmente por un evento sísmico, el cual puede durar varias horas, como el caso del maremoto de Pisco del 2007, que duró más de 7 horas para el mareógrafo de San Juan de Marcona.

Las condiciones del sismo generador son: a) que el epicentro sea en el mar o cerca de la línea de costa, b) que la profundidad sea menor a 60 km, c) que el movimiento tenga una componente vertical y d) que la magnitud de momento sea mayor a 7.0 Mw.

Los catálogos sísmicos históricos están basados en la determinación de la intensidad macrosísmica, dando como resultado, en algunos casos, un sesgo exagerado en la estimación del epicentro por carecer de datos observacionales.

Para que un terremoto con epicentro en continente tenga una alta probabilidad de generar un maremoto, se estima que deberá estar ubicado a no más de 60 km de distancia de la línea de costa.

Se ha implementado un software para realizar determinar en forma rápida la ocurrencia de un maremoto y los tiempos de arribo a las diferentes ciudades costeras, siendo de utilidad práctica para el Sistema de Alerta de Maremotos.

## REFERENCIAS

- Amante, C. and B. W. Eakins, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, National Geophysical Data Center, NESDIS, NOAA, U.S. Department of Commerce, Boulder, CO, August 2008.
- Carpio, J., Tavera, H. (2002). Estructura de un Catálogo de Tsunamis para el Perú basado en el Catálogo de Gusiakov (2002). *Sociedad Geológica del Perú*, V. 94, 45-59
- Gusiakov, V., Marchuk, A., Chuvarov, L., Kalashnikova, T. ITDB/WLD (2007) Integrated Tsunami Database for the World Ocean, version 5.16. CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SDRAS, Novosibirsk, Russia.
- Jiménez, C. 2008. Simulación Numérica del Maremoto del Callao de 1746. *Compendio de Trabajos de Investigación IGP 2007*
- Ortega, E., Jiménez, C., 2008. *Revista de Tsunamis. Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú.*
- Papazachos, B., 2004. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece* vol. XXXVI, p. 1482-1489.
- Talandier J., 1993. French Polynesia Tsunami Warning Center (CPPT). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, p. 237-256.
- Woodman, R., 2008. Observaciones del Tsunami asociado con el Terremoto de Pisco del 15 de agosto de 2007. Vol. *El Terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007 (7.9Mw)*, IGP, p. 351-370.
- Yauri, S. Tavera, H., 2008. Características Generales del Tsunami del 15 de agosto de 2007. Vol. *El Terremoto de Pisco (Perú) del 15 de Agosto de 2007*", IGP, p. 371-386. <http://khatati.igp.gob.pe/Webs/cns06/libro/portada.htm>