



## Simulación numérica del maremoto de Camaná del 2001

César Jiménez\*

*Fenlab, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú*

Recibido 17 agosto 2009 – Readmitido 19 noviembre 2010 – Aceptado 19 diciembre 2010

El 23 de junio de 2001 a las 15:33 hora local, la ciudad de Camaná y toda la región del sur del Perú fueron remecidas por un fuerte terremoto de magnitud 8.4 Mw y una intensidad de VIII en la escala de Mercalli. El epicentro se ubicó en el mar frente a Ocoña (Arequipa). Luego de una pausa de 15 min. se generó un maremoto local que destruyó el balneario costero de Camaná y produjo la muerte de 24 personas y 62 desaparecidos. Este evento es el objeto de estudio mediante una serie de simulaciones numéricas implementando el modelo TIME para maremotos, los resultados obtenidos son el tiempo de arribo, el *run-up* o la máxima altura de inundación, el mareograma sintético y un mapa de inundación, los cuales permitirán diseñar medidas de mitigación de probables desastres en el futuro por las autoridades competentes.

**Palabras claves:** Maremoto, simulación, tiempo de arribo, *run-up*.

### Numerical simulation of the 2001 tsunami of Camaná

On 23 June 2001, at 15:33 local time, the Camana city and all the peruvian southern region were hit by a strong earthquake of magnitude 8.4 Mw and maximal intensity VIII in Mercalli scale. The epicenter was located on the sea in the forefront of Ocoña (Arequipa). Fifteen minutes later, a localized tsunami was generated, which destroyed the seaside town of Camaná and caused the death of 24 people and 62 missing people. This event is the object study through numerical simulations implementing the TIME model for tsunamis, the results obtained are the arrival time, the run up (maximal height of flooding), synthetic tidal gage recordings and flooding maps, which will permit to design disaster mitigation procedures for future events by the competent authorities.

**Keywords:** Tsunami; simulation; arrival time.

El 23 de junio de 2001 a las 15:33 hora local, la ciudad de Camaná y toda la región del sur del Perú fueron remecidas por un fuerte terremoto de magnitud 8.4 Mw y una intensidad de VIII en la escala de Mercalli. El epicentro se ubicó en el mar frente a Ocoña (Arequipa). Luego de una pausa de 15 min. se generó un maremoto local que destruyó el balneario costero de Camaná y produjo la muerte de 24 personas y 62 desaparecidos.

Un maremoto es un conjunto de ondas de agua de gran longitud, con períodos en el rango de 5 a 60 minutos, o más, generadas por mecanismos tales como explosiones volcánicas en islas; deslizamientos de tierra submarinos; caída de rocas a bahías o al océano y desplazamientos tectónicos asociados con terremotos. 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.

Los maremotos se clasifican, en el lugar de arribo a la costa, según la distancia o tiempo de viaje desde su lugar de origen, en (1) maremotos locales, si el lugar de arribo en la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación del maremoto, delimitada por el área de dislocación del fondo marino o a menos de una hora de tiempo de viaje desde su origen. (2) Maremotos remotos, si el lugar de arribo está a más de 1000 km de distancia de la zona de generación o en costas extremo-opuestas a través del Océano Pacífico y a medio día o más de tiempo de viaje del maremoto desde esa zona[1].

Según los testimonios de los sobrevivientes de la ciudad de Camaná, poco antes del terremoto hubo un retirada del mar en algunos lugares y 15 minutos después

\* cesarsud86@hotmail.com

del terremoto se inició el maremoto, destruyendo los balnearios de Camaná. Este fue un maremoto pequeño y local que sólo afectó a los balnearios costeros de Camaná. La altura de las olas alcanzó hasta 7 m en algunos lugares, con un *run-up* de 7 m y una distancia de inundación máxima de 1,350 m. Hubo 24 muertos, 62 desaparecidos y grandes pérdidas materiales. Este terremoto-maremoto de génesis tectónica es el más fuerte desde 1868 que ocurrió en la región sur del Perú. El periodo de recurrencia de este tipo de evento para la región del Perú y norte de Chile es de 100 años[2]. Los parámetros obtenidos por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) fueron los siguientes:

Hora local	: 23 Jun 2001 15h 33m
Latitud	: -16.20°
Longitud	: -73.75°
Profundidad	: 29 km
Magnitud	: 8.4 Mw
Intensidad	: VIII en Ocoña, Camaná
Localización	: 82 km al Nor Oeste de Ocoña

Con los datos obtenidos por el IGP hemos implementado el programa TIME para simular la ocurrencia de este maremoto y analizar en detalle los efectos del mismo en las regiones costeras de Camaná y comparar con los datos testimoniales, para ello hemos considerado metodológicamente las siguientes etapas que explicamos a continuación.

## Área de estudio

La provincia de Camaná se ubica en la zona centro occidental de la Región Arequipa a 172 km de la capital del Departamento de Arequipa y tiene alrededor de 56 mil habitantes. Predomina como actividad económica la agricultura. Limita por el norte con las provincias de Condesuyos, Castilla, Arequipa (San Juan de Siguaná) por el nor-oeste con la provincia de Caravelí, por el sur con el Océano Pacífico, por el este con las provincias de Islay y Arequipa. Este terremoto remeció a esta región y un maremoto devastó los balnearios costeros de la ciudad de Camaná.

## Cálculo de los parámetros focales

A partir de las relaciones empíricas de Papazachos obtenidas en el 2004[3], que relaciona la magnitud de momento sísmico  $M_w$  y los parámetros focales como la longitud  $L$ (km), ancho  $W$ (km) y la dislocación  $U$ (cm) de la falla para zonas de subducción dadas por

$$\begin{aligned} \log L &= 0.55M_w - 2.19 \\ \log W &= 0.31M_w - 0.63 \\ \log U &= 0.64M_w - 2.78, \end{aligned} \quad (1)$$

se obtuvieron los siguientes resultados para  $M_w = 8.4$ ,

Longitud de ruptura	L	=	269 km
Ancho de ruptura	W	=	94 km
Dislocación de la falla	U	=	3.9 m.

El momento sísmico se define como  $M_o = \mu LWU = 4.9 \times 10^{21}$  Nm, donde  $\mu = 4.5 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> es el módulo de rigidez del medio. Talandier[4] proporciona una relación entre el momento sísmico  $M_o$  y el potencial destructivo de un maremoto. El valor de  $M_o$  indica que el terremoto de Camaná generó un maremoto pequeño[4]. Sin embargo, fue destructivo en la zona de los balnearios costeros debido a la vulnerabilidad de las edificaciones.

Rango de valores	Tipo de maremoto
$M_o < 10^{21}$ Nm	No se genera maremoto
$10^{21} < M_o < 5 \times 10^{21}$ Nm	Maremoto pequeño
$5 \times 10^{21} < M_o < 2 \times 10^{22}$ Nm	Potencialmente destructivo
$M_o > 2 \times 10^{22}$ Nm	Grande y destructivo

**Tabla 1:** Clasificación de maremotos

## Datos y selección de los dominios de integración

Para modelar las zonas de inundación por maremoto se necesitan los siguientes datos:

**Batimetría global** Para simular la grilla más grande donde se propaga el maremoto. Los datos son tomados del modelo Etopo2, con una resolución de 3.6 km[5].

**Batimetría local** Estos datos de batimetría fina se obtienen a partir de sondajes realizados en la zona.

**Topografía local** Para modelar la inundación producida por el maremoto. Se toman datos de levantamiento topográfico *in situ* así como datos de topografía satelital (SRTM 90)[6].

Con todos estos datos se obtiene un modelo digital de elevación y se procede a elaborar 4 grillas anidadas: A, B, C y D (ver figura 1). Donde la grilla A es la más grande y contiene al área de ruptura. La grilla D es la más pequeña, pero los datos son más densos y contiene la región donde se desea evaluar la inundación. Los límites de las grillas son las siguientes:

región_a=	[-20	-13	282.0	290.0],
región_b=	[-17	-15.8	285.5	287.5],
región_c=	[-17	-16.2	286.5	287.5],
región_d=	[-16.85	-16.59	287.258	287.373].

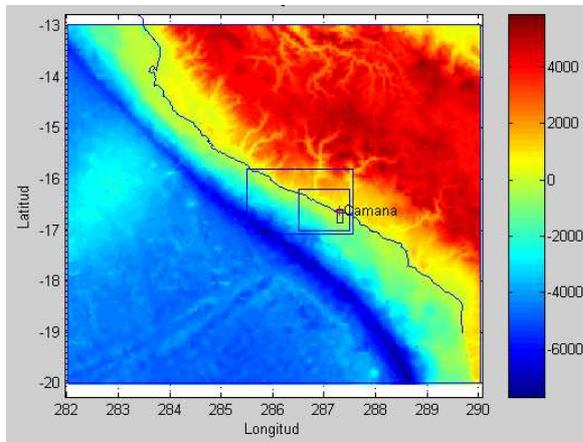


Figura 1: Grillas anidadas para el presente modelo.

### Fase de generación del 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, esté bajo el lecho marino y a una profundidad menor a 60 km a estos eventos se les suelen denominar como sismos superficiales. (b) Que ocurra en una zona de hundimiento de borde de placas tectónicas en el mar, es decir que la falla tenga movimiento vertical y no sea solamente de desprendimiento con movimiento lateral. (c) Que el sismo libere suficiente energía en un cierto lapso de tiempo y que esta sea eficientemente transmitida, generando una magnitud  $M_w > 7.0$ .

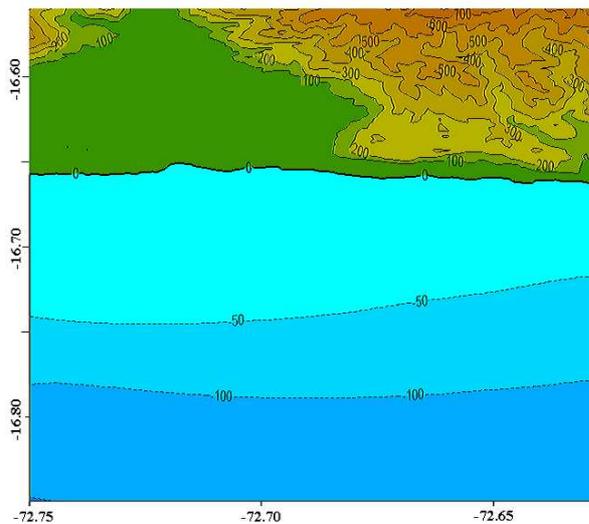


Figura 2: Topografía de la región de inundación D.

La condición inicial del maremoto es el campo de deformación debido a la dislocación o a la falla geológica que se determina empleando el modelo de Mansinha *et al.* y Smylie[7] que asume una deformación instantánea de la superficie del océano igual a la componente vertical del campo de deformación del lecho marino. Este es un modelo de fractura y requiere conocer el mecanismo focal del terremoto[7,8].

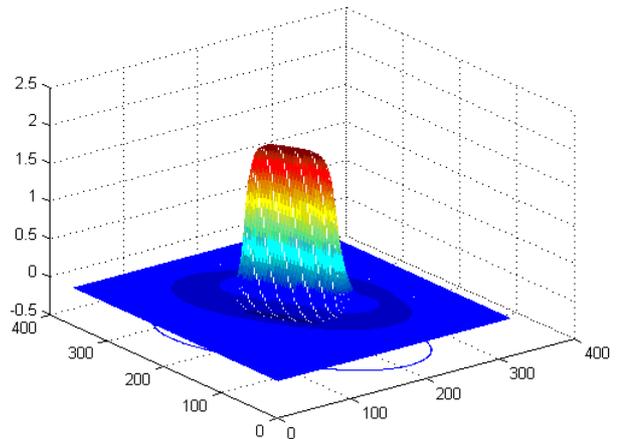


Figura 3: Modelo de la deformación co-sísmica.

Para el presente modelo la máxima altura de la deformación es de 2.04 m. Esto genera el efecto pistón que desestabiliza la columna de agua produciendo las ondas del maremoto.

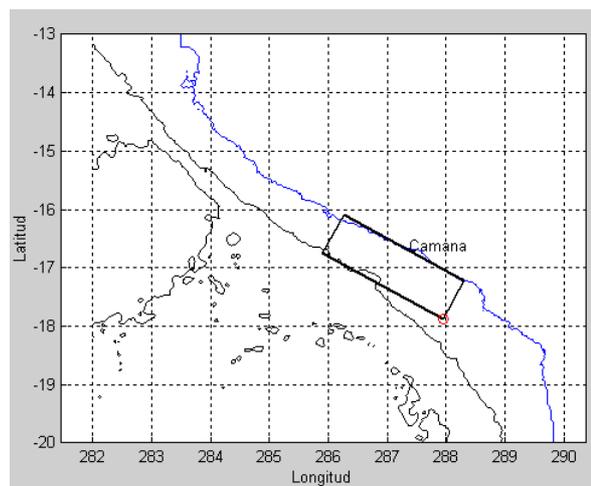
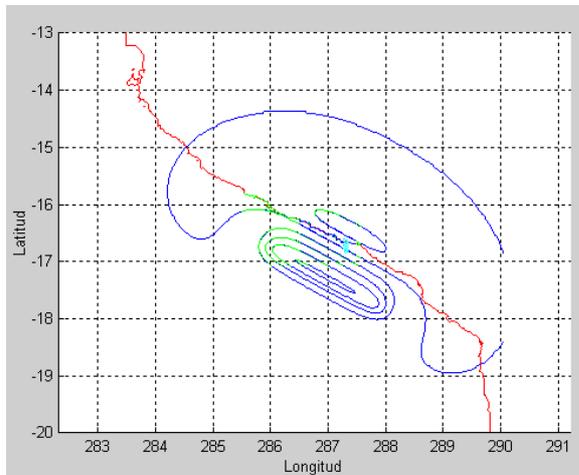


Figura 4: Área de ruptura del presente modelo.



**Figura 5:** Curvas de nivel de la deformación co-sísmica inicial.

### Fase de propagación del maremoto

La propagación del maremoto se simula con el modelo de Goto y Ogawa[9] que integra las ecuaciones de agua somera por el método numérico de diferencias finitas. El modelo TIME, así como otros modelos, utiliza las ecuaciones lineales de la hidrodinámica para la propagación del maremoto a través del fondo oceánico en aguas someras[9]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

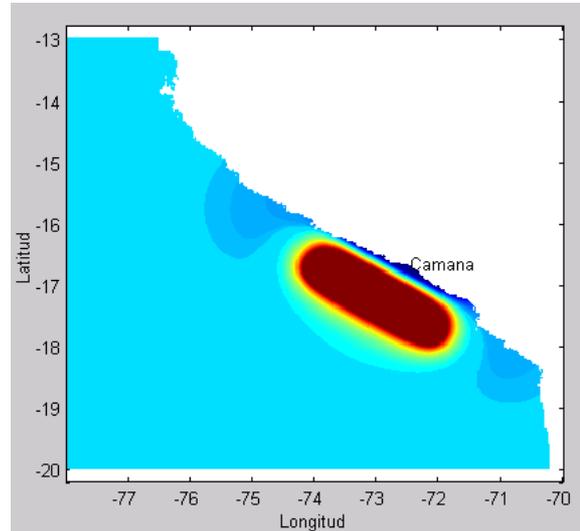
$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + gh \nabla \eta = 0 \quad (3)$$

donde  $\eta$  es la perturbación del nivel del mar,  $\mathbf{U}$  representa el campo de velocidades,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $h$  es la profundidad y  $t$  es el tiempo. En la figura 6 se puede observar el momento inicial de la propagación de las ondas del maremoto y en la figura 7 se puede observar un mapa de isócronas que corresponden a los tiempos de arribo.

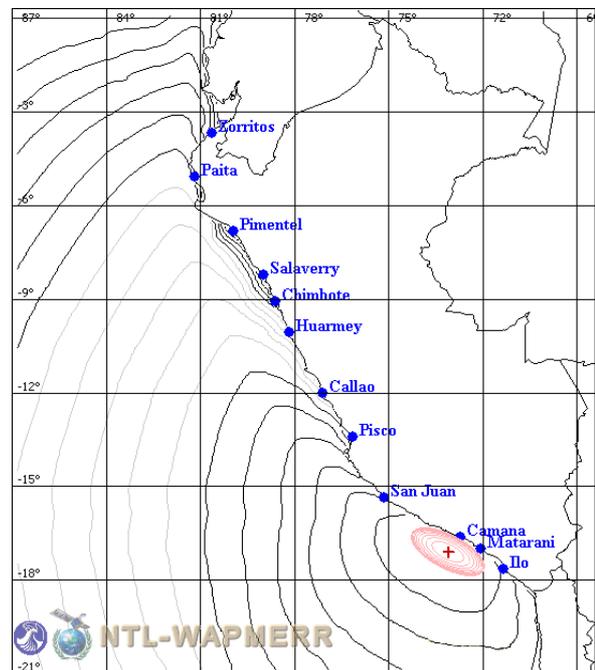
### Fase de inundación del maremoto

La altura alcanzada por un maremoto al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos tales como las características de las ondas en mar abierto, la batimetría, la pendiente del fondo marino, la configuración del contorno de la costa, la difracción, la refracción, la reflexión, la dispersión de las ondas de mar, de los modos normales de resonancia de las formaciones costeras, y la formación de *bores* en playas, estuarios y lagunas costeras. Estos factores determinan

que el arribo del maremoto a la línea de costa sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables de altura del maremoto aún a cortas distancias a lo largo de la costa.



**Figura 6:** Tiempo inicial de la propagación del maremoto.



**Figura 7:** Mapa de tiempos de arribo. Cada isócrona representa 10 minutos según el modelo WinITDB.

En la figura 8 se puede observar que la máxima altura de la ola, según el modelo, en la línea de costa fue de 9 m en la posición correspondiente a los  $-72.75^\circ$  de

longitud, fuera del área de interés que corresponde a la grilla D. Para el valle de Camaná la máxima altura de la ola fue de 7 m.

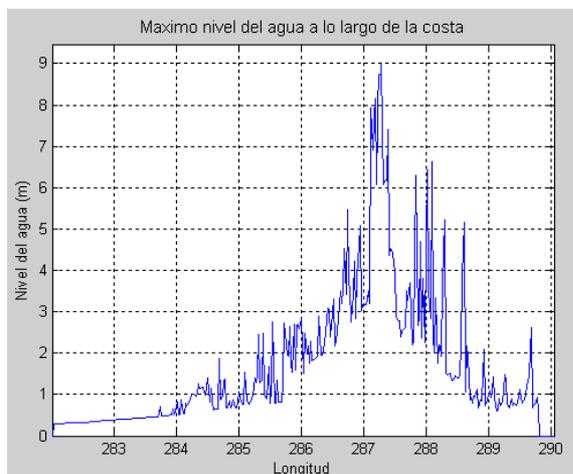


Figura 8: Máxima altura de la ola a lo largo de la costa.

En la figura 9, se puede observar un mapa de inundación por maremoto según el presente modelo para la zona de Camaná. La estrecha franja correspondiente al balneario costero, zona derecha, se inunda totalmente, teniendo como límite la carretera Panamericana Sur y los cerros adyacentes. La distancia de máxima inundación horizontal es aproximadamente de 1350 m, según este modelo.

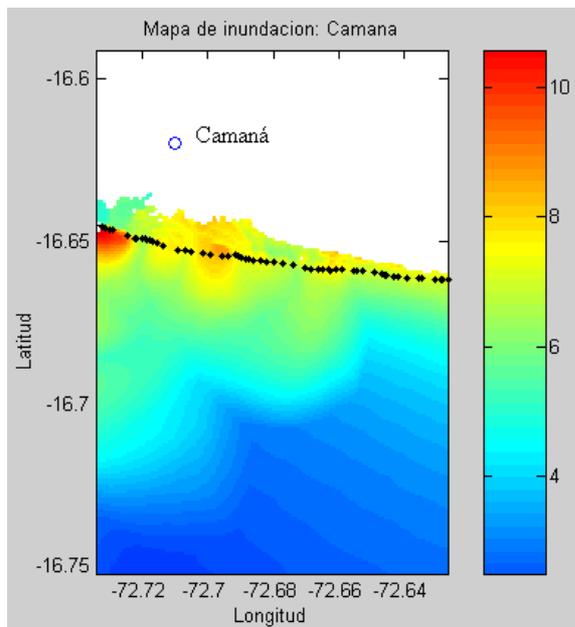


Figura 9: Mapa de inundación según el presente modelo.

La figura 10 muestra una fotografía aérea en la cual se ha trazado la zona de inundación, se observa que los resultados del modelo concuerdan con la observación *in situ* con bastante aproximación, de esta manera se puede validar los resultados obtenidos del modelo de la simulación de la inundación por el maremoto.



Figura 10: Mapa de inundación según observaciones *in situ* (Fuente: Dirección de Hidrología Nacional).

En la figura 11 se puede observar un mareograma sintético ubicado en la región de la grilla D. El arribo de la primera ola ocurre aproximadamente a los 14 min. La máxima altura de la ola es alrededor de 7 m, resultado que concuerda con la observación *in situ*. Al cabo de 4 horas la amplitud de las ondas se ha reducido aproximadamente a 2 m.

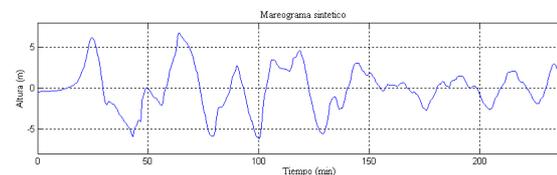


Figura 11: Mareograma sintético en la región de inundación.

## Conclusiones

La ciudad de Camaná está bien ubicada en altitud respecto al nivel del mar, en cambio el balneario costero está en una zona altamente vulnerable ante la posible ocurrencia de un maremoto, lo que significa que en el futuro puede ocurrir un evento similar al de 2001.

El valor del momento sísmico  $M_o = 4.9 \times 10^{21}$  Nm calculado en el presente trabajo indica que el terremoto de Camaná del 2001 generó un maremoto pequeño pero destructivo.

Para un maremoto local, el tiempo de arribo de la primera ola sería aproximadamente de 14 minutos, lo cual proporciona poco tiempo para realizar una evacuación. Sin embargo, no siempre la primera ola es la más grande.

El *run-up*, máxima altura de inundación, alcanzó una cota de 7 m en promedio, lo que implica que algunos lugares, como el balneario costero, serían áreas potenciales de inundación.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo corresponden a un modelo físico matemático que en cierta medida son validados por los datos de campo y

los datos testimoniales de los damnificados.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo deben permitir a las autoridades correspondientes a elaborar planes para la mitigación de desastres en el caso de un terremoto y maremoto e informar a la población costera sobre la magnitud de los efectos de la ocurrencia de estos eventos.

---

## Referencias

- [1] C. Jiménez y E. Ortega, Rev. Inv. Fis., **11**, 20 (2008).
- [2] E. Kulikov, A. Rabinovich y R. Thomson, Natural Hazards **35**, 185 (2005).
- [3] B. Papazachos, Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes, Bull. Geolog. Soc. Greece **36**, 1482 (2004).
- [4] J. Talandier, French Polynesia Tsunami Warning Center (CPPT), Natural Hazards & Earth System Sciences **7**, 237 (1993).
- [5] W. Smith y D. Sandwell; 2006 ETOPO2 v2, 2-minute Gridded Global Relief Data. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center. [www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/06mgg01.html](http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/06mgg01.html).
- [6] A. Jarvis, A. Reuter, A. Nelson y E. Guevara; Hole-filled seamless SRTM data V3 (2006), International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), [srtm.csi.cgiar.org](http://srtm.csi.cgiar.org).
- [7] L. Mansinha y E. Smylie; Bull. Seismolog. Soc. America **61**, 1433 (1971).
- [8] E. Okal y L. Dengler, Seismolog. Res. Lett. **73**, 907 (2002).
- [9] C. Goto y Y. Ogawa; Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, Tohoku University, Sendai (1992).