



XVIII Congreso Peruano de Geología

Estimación de la fuente sísmica del terremoto de Huacho 1966 (8.1 Mw) a partir de inversión de registros de tsunami

César Jiménez^{1,2}, Nabil Moggiano², Sheyla Yauri³, Martín Calvo¹ y Daniel Olcese²

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Av. Venezuela S/N, Lima, Perú (cjimenezt@unmsm.edu.pe)

² Dirección de Hidrografía y Navegación, Centro Nacional de Alerta de Tsunamis, Jr. Roca 118, Callao (nmoggiano@dhn.mil.pe)

³ Instituto Nacional de Defensa Civil, Calle Ricardo Angulo 694 Urb. CORPAC, San Isidro, Lima, Perú (syauri@indec.gov.pe)

1. Resumen

El 17 de octubre de 1966 a las 21:41 UTC, un fuerte sismo remeció la región central del Perú, ocasionando 100 víctimas mortales. La máxima severidad de sacudimiento se reportó en la ciudad de Huacho (VIII a IX MM). Como efecto cosísmico se produjo un tsunami que inundó algunos poblados y balnearios costeros, como Casma y Tortugas. A partir del análisis y procesamiento de tres señales mareográficas registradas en las estaciones de Chimbote, Callao y Marcona, se estimaron los parámetros de la fuente sísmica mediante un proceso de inversión, en el que se comparó la señal simulada con la señal observada usando el método de mínimos cuadrados no-negativos. La máxima dislocación (slip) fue de 6.6 m ubicada en la parte sur del área de ruptura, lo que sugiere que la mayor aspereza se encuentra ubicada en el océano frente a la ciudad de Huacho, coherente con los máximos valores de intensidad reportados. El momento tsunamigénico escalar obtenido fue de $M_0 = 2.1 \times 10^{21}$ Nm, lo que equivale a una magnitud de 8.1 Mw.

2. Introducción

Las formas de onda de un tsunami contienen información en cuanto a los procesos de generación (en la fuente sísmica) y su propagación (que depende de la batimetría, que es un parámetro conocido). Teniendo en cuenta la respuesta del instrumento (antiguo mareógrafo mecánico y analógico de antes del año 1966), es posible realizar la inversión de las formas de onda del tsunami para estimar la distribución de asperezas (zonas de mayor liberación de energía sísmica) sobre el área de ruptura.

El terremoto de Huacho de 1966, se generó debido a la liberación de los esfuerzos tectónicos acumulados en la

zona de interacción de las placas tectónicas de Nazca y Sudamérica. Estas dos placas convergen a una razón de 7-8 cm/año (Norabuena et al., 1998). El mecanismo focal de este sismo es del tipo de falla inversa en la interface entre las dos placas, con la placa de Nazca moviéndose por debajo de la placa Sudamericana, proceso conocido como subducción. Debido a este proceso, el Perú tiene una historia de grandes terremotos.

Durante el siglo XX y a inicios del siglo XXI se han producido en Perú varios terremotos destructores de magnitud ≥ 7.9 Mw entre la dorsal de Nazca y la fractura de Mendaña: 1940 en Lima (8.0 Mw), 1966 en Huacho (8.1 Mw), 1970 en Ancash (7.9 Mw), 1974 en Cañete (8.1 Mw) y 2007 en Pisco (8.1 Mw) (Beck and Ruff, 1989). Todos estos eventos sísmicos se han generado dentro del área de ruptura del gran sismo del Callao de 1746 (≈ 9.0 Mw).

Como efecto cosísmico, el terremoto de Huacho de 1966 generó un tsunami y según el reporte de Silgado (1978), se sabe que: *“a unos 50 minutos después del terremoto se produjo un tsunami moderado, registrándose la primera onda en los mareógrafos de la Punta, Chimbote y San Juan. En Casma y Tortugas hubo inundación, sufriendo grandes pérdidas varias fábricas pesqueras”*. La máxima intensidad (IX MM) ocurrió en la hacienda San Nicolás ubicada a 3 km al sur de Supe, en Huacho se reportó una intensidad de VIII MM y en Lima VII MM. También se reportó 100 víctimas mortales debido al sismo, pero ninguna debido al maremoto.

En la presente investigación se estimó la distribución de la fuente sísmica del terremoto de Huacho de 1966 a partir de la inversión de 3 registros mareográficos en el campo cercano (Figura 1). Se espera contribuir al conocimiento de la fuente sísmica de este evento

utilizando una metodología (inversión de ondas de tsunami) relativamente nueva en nuestro medio.

Es posible reconstruir un proceso complejo de ruptura con sólo 3 registros mareográficos, con una adecuada distribución acimutal de las estaciones, tal y como lo realizó An et al. (2014) para la fuente del tsunami de Chile 2014, mediante la inversión de datos de tsunami de solo 3 estaciones DART.

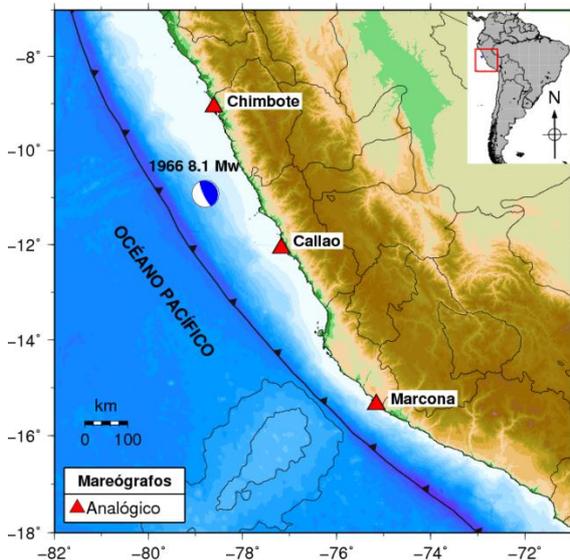


Fig. 1. Distribución de las estaciones mareográficas.

2. Adquisición y procesamiento de datos

El registro mareográfico es una fuente importante de información que permite reproducir o caracterizar y validar los modelos numéricos de maremotos. La secuencia y forma sucesiva de las ondas (registradas en boyas en altamar, como las DART) y forma del primer periodo de la onda en estaciones costeras proporcionan información sobre las características de la fuente sísmica, tales como la geometría de ruptura y la distribución de la dislocación o desplazamientos, entre otros.

Para realizar la inversión, se utilizaron las formas de onda del tsunami de Huacho 1966, registradas en forma analógica (un trazo de lápiz sobre una hoja en un tambor giratorio) en una estación mecánica compuesta por un sistema de poleas y una boya flotante para medir el nivel del mar. El control del tiempo se realizaba con un reloj mecánico de cuerda, el cual era calibrado periódicamente, lo que implica incertidumbre en el control del tiempo. Dichos registros mareográficos fueron obtenidos de la publicación de Murty y Wigen (1975), los que fueron escaneados y digitalizados. Los registros corresponden a tres estaciones mareográficas mecánicas pertenecientes a la Red Mareográfica Nacional ubicadas en los puertos de Chimbote, Callao y San Juan de Marcona. La solución del problema inverso no es única, ya que se elige el conjunto de valores de dislocación o slip que proporcionen la mejor correlación entre los datos observados y simulados.

2.1. Prueba de confiabilidad

Se realizó una prueba de confiabilidad o “test del tablero de ajedrez”, en el cual se simuló una fuente sintética, se obtuvieron los mareogramas en las 3 estaciones de Chimbote, Callao y Marcona, luego se añadió ruido aleatorio al 5% de la amplitud de la señal. Finalmente se realizó la inversión de los datos sintéticos y se logró reproducir la distribución original con una buena aproximación (Figura 2a y 2b).

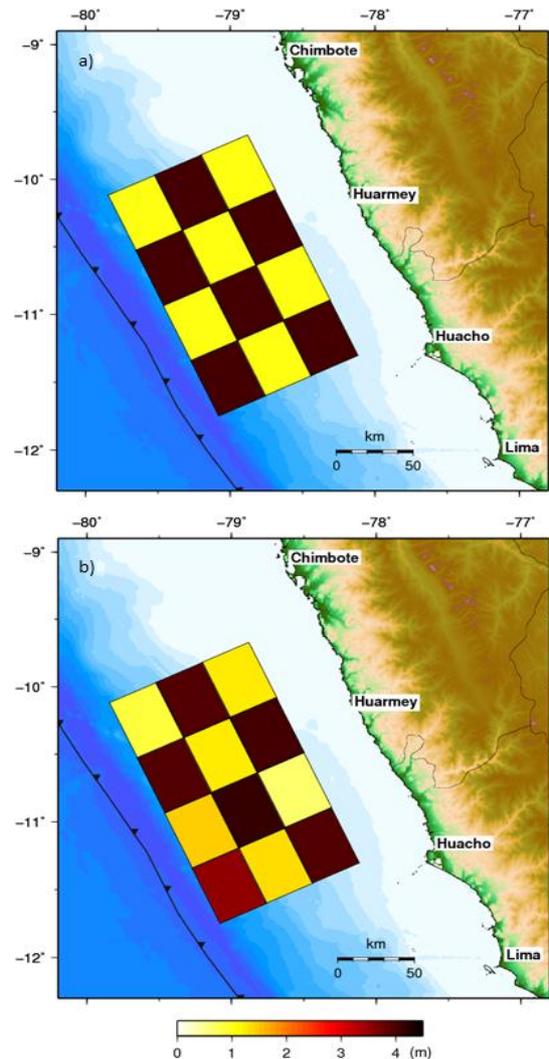


Fig. 2. Prueba de confiabilidad del modelo: a) Fuente sintética. b) Resultado del proceso de inversión.

3. Resultados

Se aplicó el proceso de inversión a las señales mareográficas según la metodología de Jiménez et al. (2014). Las funciones de Green fueron obtenidas a partir de la simulación numérica de tsunamis y la deformación se calculó a partir de la teoría de Okada (1985). A partir de la distribución de los valores de la dislocación (slip) se obtiene el campo de deformación total como una combinación lineal de las deformaciones unitarias, el cual es utilizado como condición inicial para la propagación del tsunami. El máximo valor del slip es de 6.6 m y se ubica en la parte sur del área de ruptura. Esto explica el hecho de que la ciudad de Huacho haya sido la que sufrió el mayor impacto a causa del sismo, puesto que se encuentra frente

a la zona de mayor aspereza. El máximo valor de la componente vertical de la deformación cosísmica fue de 2.2 m.

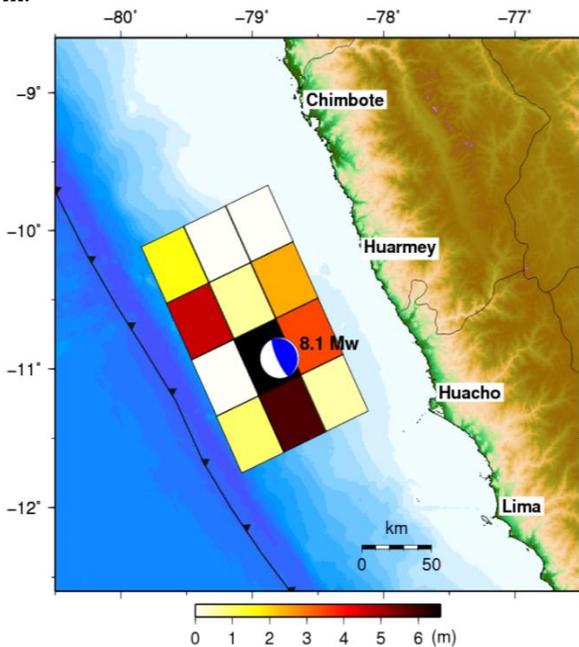


Fig. 3. Distribución de la fuente sísmica del sismo de Huacho 1966. Nótese la gran aspereza frente a la ciudad de Huacho.

Debido a la posición del epicentro y a la geometría del área de ruptura, se puede inferir que el proceso de ruptura se propagó en forma bidireccional, desde el epicentro hacia el norte y en menor grado hacia el sur. En torno al epicentro y en la región sur del área de ruptura se concentra la zona de mayor liberación de energía sísmica (Figura 3). Estos resultados son coherentes con la investigación de Beck y Ruff (1989), mediante la inversión de ondas telesísmicas.

3.1. Momento sísmico escalar

Teniendo la distribución de la dislocación y las dimensiones de cada sub-fuente es posible calcular el momento sísmico escalar (para $L=200$ km, $W=120$ km y slip promedio=2.21 m). A partir del momento sísmico escalar total se obtiene una magnitud en la escala de momento de 8.1 Mw. Lo que significa que a partir de los registros mareográficos se obtiene un valor similar a la magnitud Mw calculada a partir de los registros sísmicos por Kanamori (1977).

3.2. Formas de onda de la inversión

En la Figura 4 se puede observar los resultados de la inversión de las formas de ondas del tsunami mediante la comparación de las ondas simuladas y observadas. Para efectos del cálculo de la inversión, todas las señales han sido desplazadas en el tiempo con respecto al tiempo de arribo a la respectiva estación, de forma que todos los tiempos de arribo están sincronizados en el minuto 55. Los resultados obtenidos muestran una buena correlación entre la onda observada y la onda calculada. Sin embargo, la falta de cobertura de más estaciones mareográficas en el Pacífico sur occidental, no permitió un mejor control en

la obtención de los resultados. Inicialmente se disponía de registros de las estaciones de Talara y Matarani, las que no fueron consideradas debido a que la relación señal/ruido era muy pequeña.

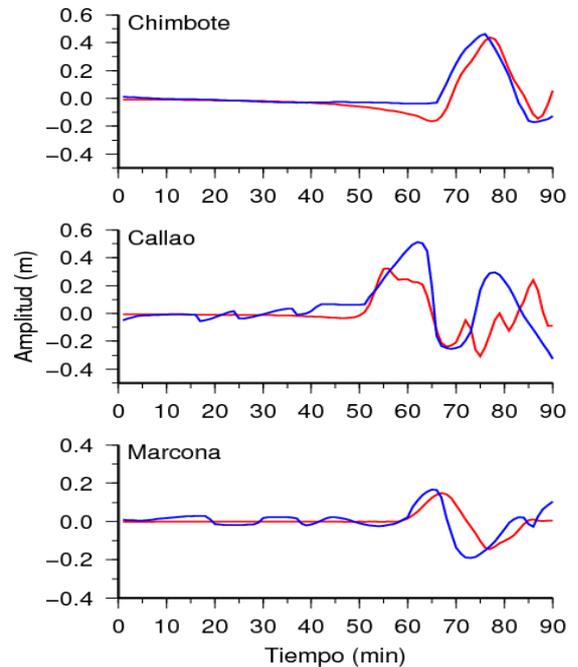


Fig. 4. Comparación de los mareogramas observados (en azul) y simulados (en rojo) para el tsunami de Huacho de 1966.

4. Conclusiones

Los resultados de la prueba de confiabilidad muestran que aún es posible reconstruir, con cierta aproximación, el proceso complejo de ruptura de un evento "sintético", mediante la inversión de 3 registros mareográficos.

La geometría de la fuente sísmica, obtenida en esta investigación para el sismo de Huacho de 1966, muestra gran concentración de asperezas (zonas de mayor liberación de energía sísmica) en la parte sur del área de ruptura frente a la ciudad de Huacho, coherente con los reportes de intensidad macrosísmica en dicha ciudad (VIII a IX MM).

La máxima amplitud de la deformación cosísmica para este modelo es de 2.2 m. La máxima dislocación o slip para el terremoto de Huacho de 1966 es de 6.6 m y se ubica en la parte sur del área de ruptura, alrededor del epicentro y frente de la ciudad de Huacho.

El proceso de ruptura del terremoto de Huacho de 1966, cuyo inicio fue en el foco o hipocentro, presentó una directividad bidireccional a lo largo del azimut en dirección al norte y en menor grado hacia el sur. El momento sísmico escalar calculado fue de 2.1×10^{21} Nm y la magnitud del terremoto inferido a partir de los registros mareográficos es de 8.1 Mw.

Una forma de verificar o validar el modelo de fuente sísmica propuesto es mediante la comparación de las señales mareográficas observadas y simuladas. En este sentido, el conjunto de las señales observada y simulada de la estación de Chimbote tuvo el mayor coeficiente de correlación (0.87). El error o varianza normalizada del proceso de inversión fue de 0.12.

Referencias

- An, C., Sepúlveda, I. 2014. Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, earthquake. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1002/2014GL060567
- Beck, S. and Ruff L. 1989. Great earthquakes and subduction along the Peru trench, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 57, p. 199-224.
- Jiménez, C., Moggiano, N., Mas E., Adriano. B., Fujii Y. and Koshimura S. 2014. Tsunami waveform inversion of the 2007 Peru (8.1 Mw) earthquake. *Journal of Disaster Research*, v. 9, No. 6, 954-969.
- Kanamori, H., 1977. The energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, v. 82, No. 20, 2981-2987.
- Murty, T. and Wigen, S. 1975. Tsunami Water Levels and Spectra for Peru (tide gage recordings), *Tsunami Newsletter*, v. 8, No. 1, pp 2-17.
- Norabuena, E., Leffler L., Mao A., Dixon T., Stein S., Sacks S., Ocola L., Ellis M. 1998. Space Geodetic Observations of Nazca-South America Convergence across the Central Andes. *Science*, v. 279, No. 358.
- Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, *Bull. Seismol. Soc. Am.* v. 75, No. 4, 1135.
- Silgado, E. 1978. Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974), Instituto de Geología y Minería, Lima.