

DINÁMICA Y MODELADO NUMÉRICO DEMAREMOTOS (TSUNAMIS) INGRESANDO EN CAUCES DE RÍOS: APLICACIÓN AL RÍO RÍMAC (PARTE I: INUNDACION COSTERA)

Julio César Martínez Herrera - Hernando Tavera
Dirección de Sismología - Instituto Geofísico del Perú
julio.martinez@igp.gob.pe; Hernando.tavera@igp.gob.pe

Introducción

El Océano Pacífico tiene el más alto peligro de terremotos y maremotos (Tsunamis) en el globo terrestre, al encontrarse bordeado de un cinturón de gran actividad tectónica y volcánica, conocido como “Cinturón de Fuego del Pacífico”. En tal sentido, el Océano Pacífico está estructural, topográfica y sísmicamente acondicionado para servir de campo propicio al desfogue de esfuerzos tectónicos, convirtiéndose así, en el sistema generador de maremotos (tsunamis) más activo de nuestro planeta.

Tsunami es una palabra de origen japonés que proviene de dos vocablos: Tsu (puerto) y nami (ola), literalmente significa, grandes olas en el puerto. No causa daños en alta mar, pero es destructivo en las costas, Figura 1. En países de habla hispana se utiliza la palabra “maremoto” como sinónimo de tsunami.

Los maremotos (tsunamis) son una serie de ondas marinas de gran tamaño generadas por una perturbación en el fondo del océano, principalmente un movimiento sísmico superficial (< 60 km de profundidad) y de magnitud mayor a 7,0 Mw (Magnitud Momento).

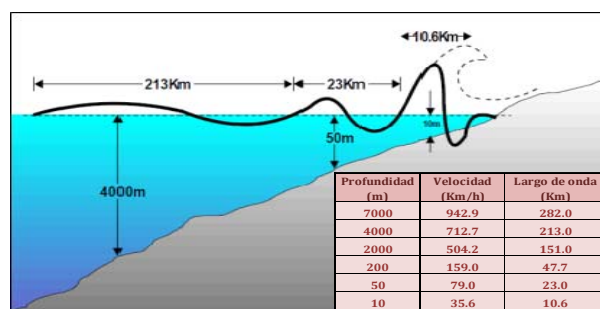


Figura 1. Conforme la profundidad del mar disminuye, la longitud de onda del maremoto también disminuye, pero aumenta la amplitud de la misma cerca de la costa. Manuel R. Sullon 2007.

Un modelo numérico de un fenómeno natural es una conceptualización física y descripción matemática teórica del proceso de gestación y ocurrencia del fenómeno. Por ejemplo, en el modelado de los maremotos, el proceso es típicamente expresado en forma matemática, para una mayor comprensión del comportamiento y desarrollo del peligro, a fin de generar escenarios de riesgo. En el caso de un maremoto producido en una zona de subducción, el comportamiento está regido por las ecuaciones asociadas a la dinámica de fluidos y otros procesos geofísicos como la interacción entre las placas y el océano, la sismicidad, etc. En general, estas son ecuaciones diferenciales parciales, las cuales describen la evolución espacio-temporal de las diferentes variables relevantes.

Este estudio se está desarrollando en dos etapas. La primera, considera la evaluación del peligro de un maremoto (tsunamis) en el Callao, que se reporta en el presente trabajo, y la segunda, el comportamiento del mismo a lo largo del cauce del río Rímac. Los resultados preliminares indican que para un sismo de magnitud de 8,5 Mw, el maremoto (tsunami) llega a la costa de la provincia del Callao con un tiempo de 18-20 minutos después de producirse el sismo, la altura de las olas es del orden de 6,5-7,5 m. Estos resultados serán utilizados en la segunda parte de este estudio.

Justificación

Actualmente, modelos geofísicos y estudios geológicos confirman que la recurrencia de los maremotos presentan cierto grado de ciclicidad, en cuanto a su periodicidad y magnitud (Nanayama et al., 2003; Cisternas, 2005). Lamentablemente, debido a la escala geológica de su ocurrencia, existen muy pocos registros escritos que permitan caracterizar detalladamente el comportamiento de estos eventos en áreas costeras específicas. En este contexto, surge la importancia de estudiar maremotos (tsunamis) pasados como indicadores de lo que puede ocurrir en el futuro, generando información de base para el estudio del

peligro, evaluación del riesgo, el ordenamiento de territorios costeros, el diseño de medidas de mitigación y el manejo de la emergencia.

Área de estudio

La Provincia Constitucional del Callao se encuentra ubicada en la costa central del Perú, su capital es la ciudad del Callao. Territorialmente abarca una extensión de 147,850 km² y en la actualidad cuenta con una población de 876 877 habitantes (INEI - Censo 2007). Por lo cual cuenta con una densidad poblacional de 5930,86 hab/km². La provincia Constitucional del Callao, concentra aproximadamente el 80% de las industrias de Lima; así mismo, el puerto y el aeropuerto del Callao, que son receptores de aproximadamente 85% de pasajeros y carga, tanto de ingreso como de salida.

El río Rímac se ubica en la vertiente del Pacífico. Se origina en la Cordillera de los Andes a una altitud de 5,508 msnm, en el nevado de Paca, tiene una longitud de 160 km aproximadamente, y desemboca en el mar del Callao. Los tributarios más importantes del Rímac son los ríos Chinchán, Aruri, Santa Eulalia, Blanco yHuaycoloro.

Para realizar el *modelado numérico de maremotos (tsunamis) ingresando en cauces de ríos*, se definió un área de estudio comprendida entre las siguientes coordenadas geográficas: 12°00' a 12°04' de latitud sur y entre 77°07' a 77°13' de longitud oeste; Para tal área se cuenta con datos batimétricos y topográficos de alta resolución así como un levantamiento topográfico de más de 2 km de longitud de río Rímac el cual se llevó a cabo en el 2011. Figura 2.

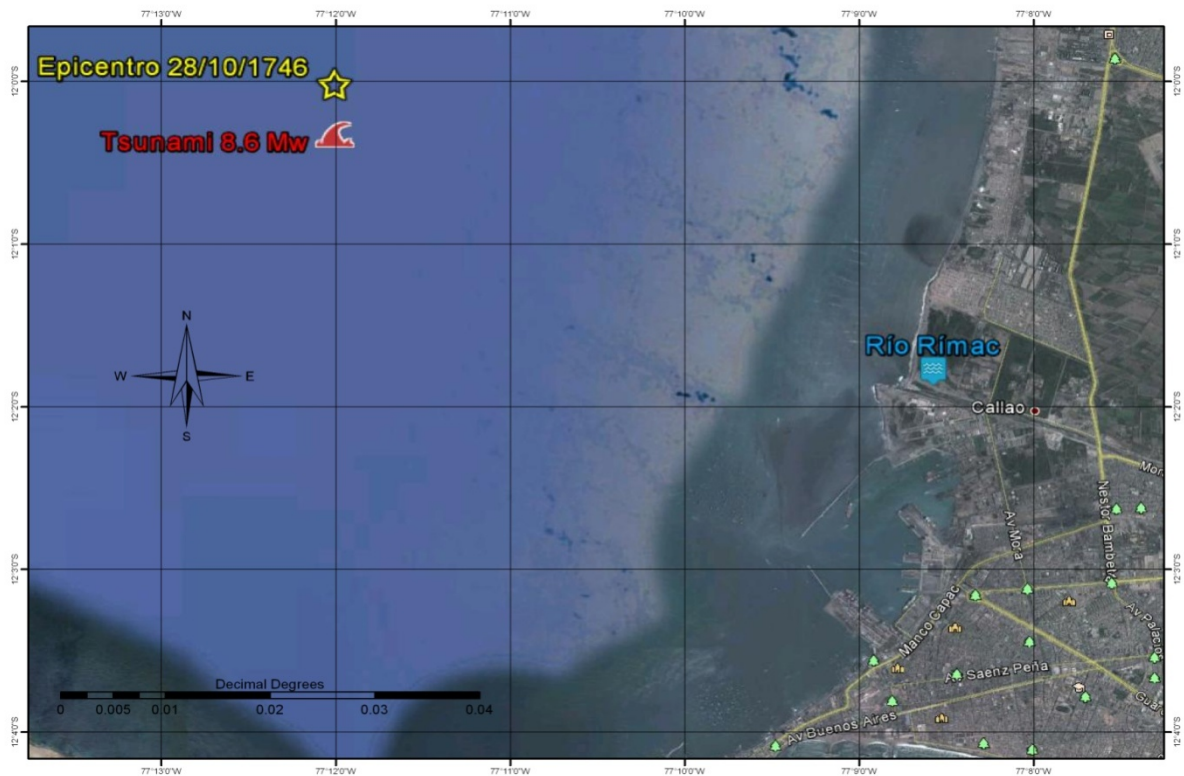


Figura 2. Área de estudio y ubicación de la desembocadura del río Rímac.

Datos para el modelado numérico

Para modelar numéricamente el proceso de generación de un maremoto (tsunami) por un sismo, su propagación e inundación, se necesita de los siguientes datos:

a) Batimetría:

Batimetría global	Batimetría local
Los datos son tomados del modelo Etopo1, con resolución de 1,80 km.	Se obtienen a partir de sondajes realizados por el DHN (2011-2012), en la zona del Callao con resolución aproximada de 5 m.

b) Topografía:

Topografía global	Topografía local
Los datos son tomados del modelo Etopo1, con resolución de 1,80 km.	Se toman los datos de imágenes satelitales de alta resolución del Callao y del levantamiento topográfico del río Rímac (Noviembre del 2011) generando curvas de nivel a metro.

c) Parámetros hipocentrales:

Para este estudio, se ha visto por conveniente tomar en cuenta los datos correspondientes al sismo de 1746 y que se obtiene del Catálogo de Tsunamis para el Perú elaborado por Carpio y Tavera (2002), Tabla 1.

Latitud	12,0° S
Longitud	77,2° O
Profundidad	30 km.
Magnitud	8,5Mw y 9,0Mw
Epicentro	12 km. al N-O del Callao

Tabla 1. Parámetros hipocentrales.

Parámetros de la fuente:

A partir de las relaciones empíricas de Papazachos (2004) y la magnitud M_w (momento sísmico) se obtienen los parámetros: longitud de ruptura L (km), ancho de ruptura W (km), y dislocación en el área de ruptura U (m). Para zonas de subducción, se utilizan las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \log(L) &= 0,55M - 2,19 \\ \log(W) &= 0,31M - 0,63 \\ \log(U) &= 0,64M - 2,78 \end{aligned} \quad (1)$$

Para un sismo de **8,5 Mw** se obtiene los siguientes resultados:

* Longitud de ruptura	$L = 305,49$	km
* Ancho de ruptura	$W = 101,16$	km
* Dislocación	$U = 4,57$	m

Para un sismo de **9,0 Mw** se obtiene los siguientes resultados:

* Longitud de ruptura	$L = 575,44$	km
* Ancho de ruptura	$W = 144,54$	km
* Dislocación	$U = 9,55$	m

Con los parámetros de la fuente sísmica definidos, es posible calcular el campo de deformación del fondo marino mediante la aplicación de modelos numéricos de deformación sísmica.

En este estudio, se utilizó la "simulación numérica de tsunamis con el sistema escalonado de leap-frog (salto de rana) (código numérico de TUNAMI-N2)" del Dr. Fumihiko Imamura (1995), el cual permite caracterizar el proceso de generación, propagación e inundación del maremoto (tsunami).

Generación de un maremoto (tsunamis).

La condición inicial del maremoto (tsunamis) (campo de deformación debido a la dislocación o falla geológica) se determina empleando el modelo de Mansinha y Smylie (1971) que asume una deformación instantánea de la superficie del océano igual a la componente vertical del campo de deformación del fondo marino.

El modelo numérico predice una máxima altura para la deformación es de 4,75 m, lo cual genera el denominado "efecto pistón" que desestabiliza la columna de agua, produciendo las ondas del maremoto (tsunami), Figura 3.

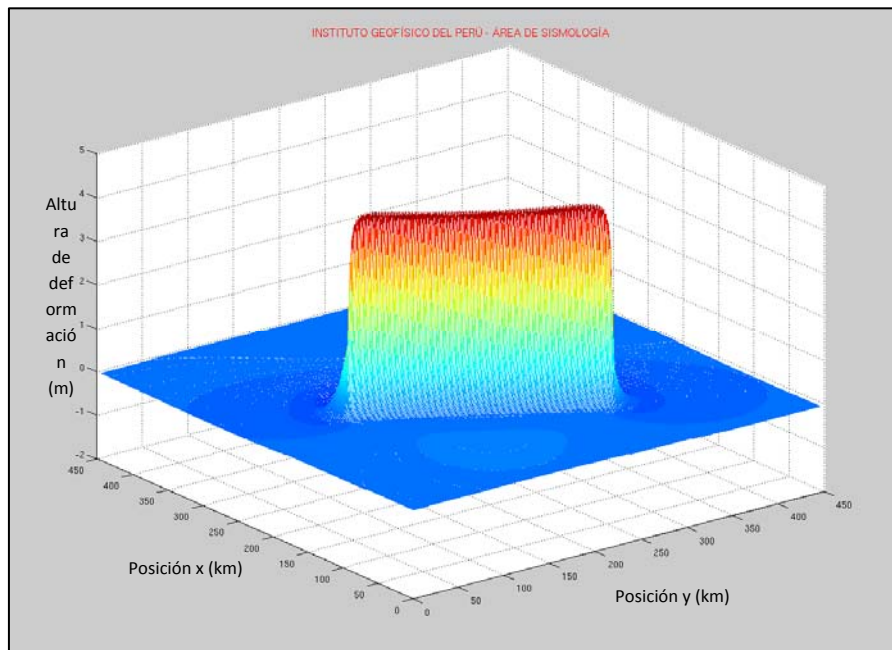


Figura 3. Se muestra el campo de deformación en 3D, calculado para el mecanismo focal

Propagación del maremoto (tsunamis)

Para este proceso se emplean modelos numéricos de propagación de ondas de periodos largos en aguas someras (e.g. Titov y Synolakis, 1996; Goto y Ogawa, 1997). En estos casos, la aceleración sísmica vertical de las partículas es despreciable comparada con la aceleración gravitacional; por lo tanto, el movimiento vertical de las partículas no tiene efecto sobre la distribución de presiones y la velocidad horizontal de las partículas de agua es uniforme en la vertical (Goto et al., 1997). Partiendo de estas aproximaciones, el movimiento de las ondas de periodos largos está controlado por las ecuaciones de conservación de momentum y masa.

El modelo numérico TUNAMI-N2 en el ítem de propagación del maremoto (tsunami) emplea ecuaciones de conservación de momentum y de masa las cuales se discretizan en un esquema de diferencias finitas centrales. La integración numérica se efectúa por medio del algoritmo de “salto de rana”, que consiste en un esquema explícito con aproximación de segundo orden. Este modelo utiliza la aproximación lineal (por lo cual, los términos de convección y fricción no son tomados en cuenta) en las ecuaciones de conservación de masa y de momentum, cuando la onda transita por aguas de gran profundidad, lo que disminuye el tiempo de procesamiento sin sacrificar precisión en los resultados (Goto y Ogawa, 1997; Goto et al., 1997).

La representación de la propagación del maremoto (tsunamis) se ve en la Figura 4.

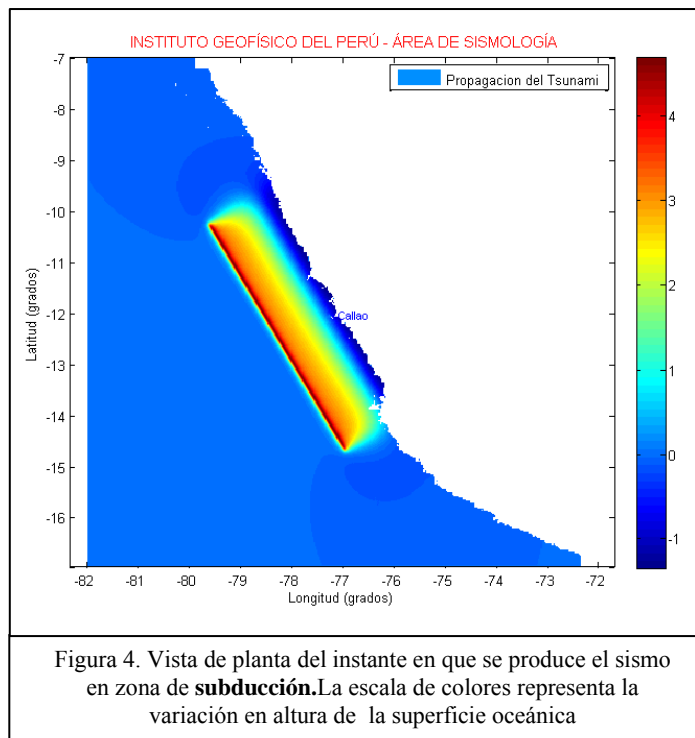
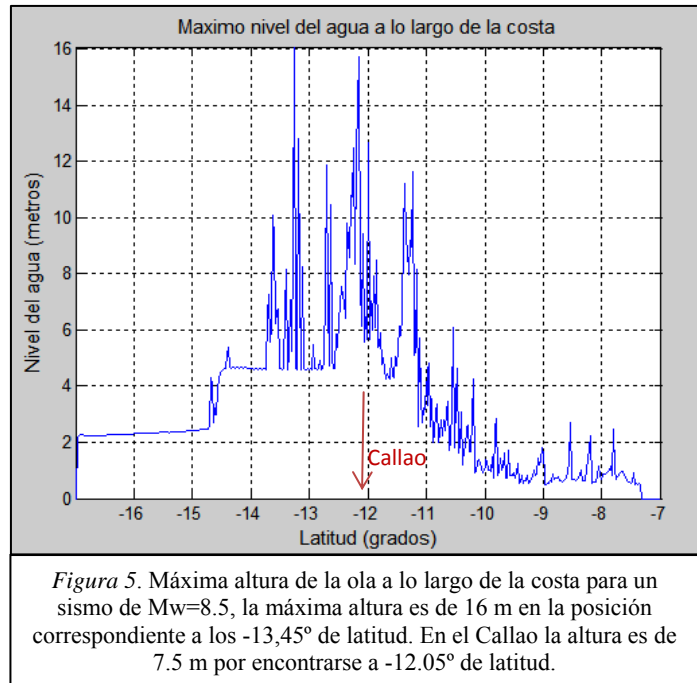


Figura 4. Vista de planta del instante en que se produce el sismo en zona de **subducción**. La escala de colores representa la variación en altura de la superficie oceánica

Inundación por maremoto (tsunami)

La altura alcanzada por un maremoto (tsunami) al arribar a la costa se debe a la interacción de varios factores físicos y morfológicos tales como: características de las ondas en mar abierto, batimetría, pendiente del fondo marino, configuración del contorno de la costa, presencia de islas, difracción, refracción, reflexión y dispersión, de los modos normales de resonancia de las formaciones costeras, formación de bordes en playas, estuarios, fluviales y lagunas costeras. Estos factores determinan que el arribo del maremoto (tsunami) a la línea de costa sea un proceso complejo, lo cual genera diferencias notables en la altura de la ola del maremoto (tsunami) aún a cortas distancias a lo largo de la costa, (Farreras, 1995).

En la Figura 5, se puede observar que la máxima altura de la ola en la línea de costa, según el modelo, sería de 16 m en la posición correspondiente a los $-13,45^\circ$ de latitud (fuera del área de estudio).



En las Figuras 6a y 6b, se observa el mapa de inundación por tsunami, según el presente modelo, para la zona del Callao, realizado para dos escenarios de maremoto (tsunami). El primer escenario generado por un sismo de magnitud 8,5 Mw y el segundo por un sismo de 9,0 Mw. En el primer escenario, se observa que la altura de ola en la línea de costa para la zona del Callao (Chuchito y La Punta) es de alrededor de los 6,5 m y 7,5 m respectivamente, la máxima inundación alcanza una distancia de 1,3 km desde la desembocadura del río Rímac. Para el segundo escenario se observa que la altura de ola en la línea de costa para la zona del Callao (Chuchito y La Punta) es de alrededor de los 10,5 m y 11,0 m respectivamente y la inundación alcanza una distancia de 2,0 km desde la desembocadura del río Rímac.

La Figura 7 muestra la comparación entre las áreas de inundación propuestas por la DHN (Dirección de Hidrografía y Navegación) la cual se encuentra en la siguiente página web: <http://www.dhn.mil.pe/> y en el resultado del presente estudio, se observa que ambas cartas de inundación son similares para un sismo de magnitud de 9.0 Mw. Sin embargo, en ambos resultados no se ha considerado el nivel de inundación a través del cauce del río Rímac y esto se debe a la resolución de los datos disponibles (30 m de resolución). Para solucionar este problema, se ha realizado el levantamiento topográfico en noviembre del 2011 y se abarcó una longitud de 2 km del río Rímac generando curvas de nivel a 1 m, así como la obtención de imágenes satelitales de alta resolución en lo concerniente a la topografía. En lo concerniente a la batimetría, ahora se cuenta con un sondeo hecho por la DHN a resolución horizontal de 5 m. Por otro lado, se mejoró la eficiencia del modelo numérico al mostrar resultados en un tiempo menor, esto gracias a una serie de cambios realizados en el código matemático del modelo numérico TUNAMI-N2 y automatizando algunos procesos secuenciales del mismo.

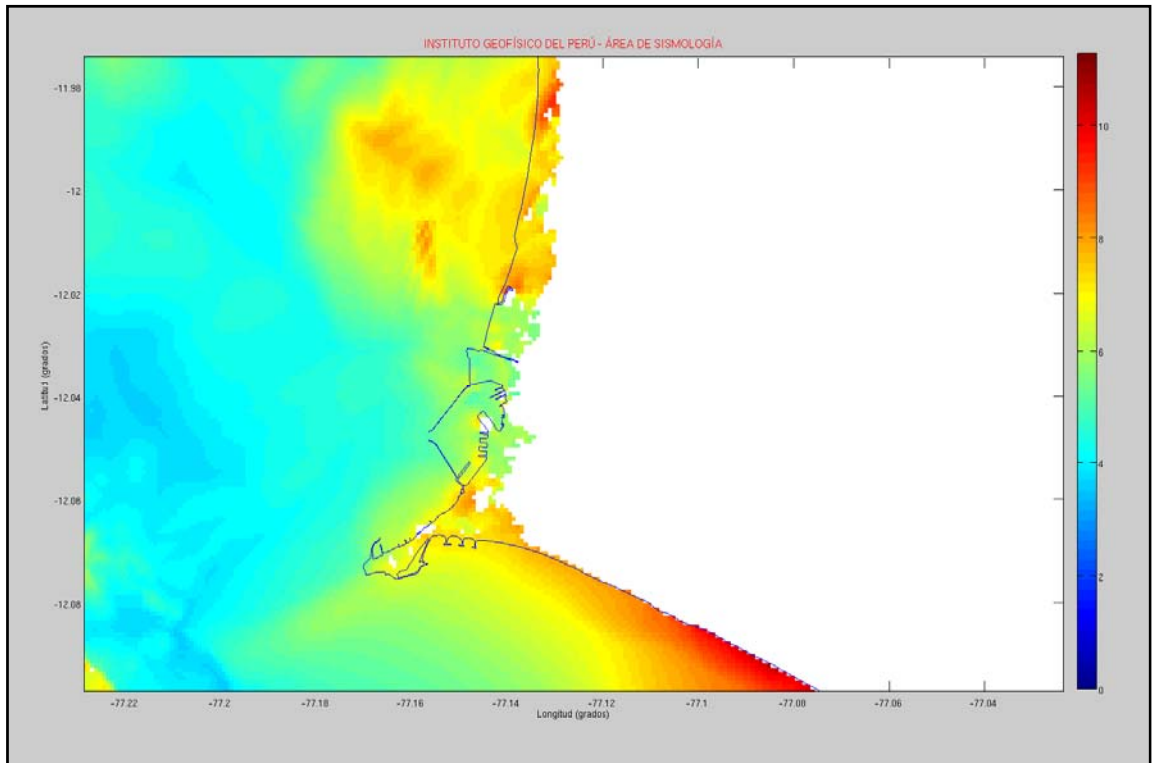


Figura 6a. Mapa de inundación obtenido en este estudio para $M_w=8,5$. Donde la escala de colores representa el run-up en (metros) que alcanza la inundación en la zona de estudio ya mencionada.

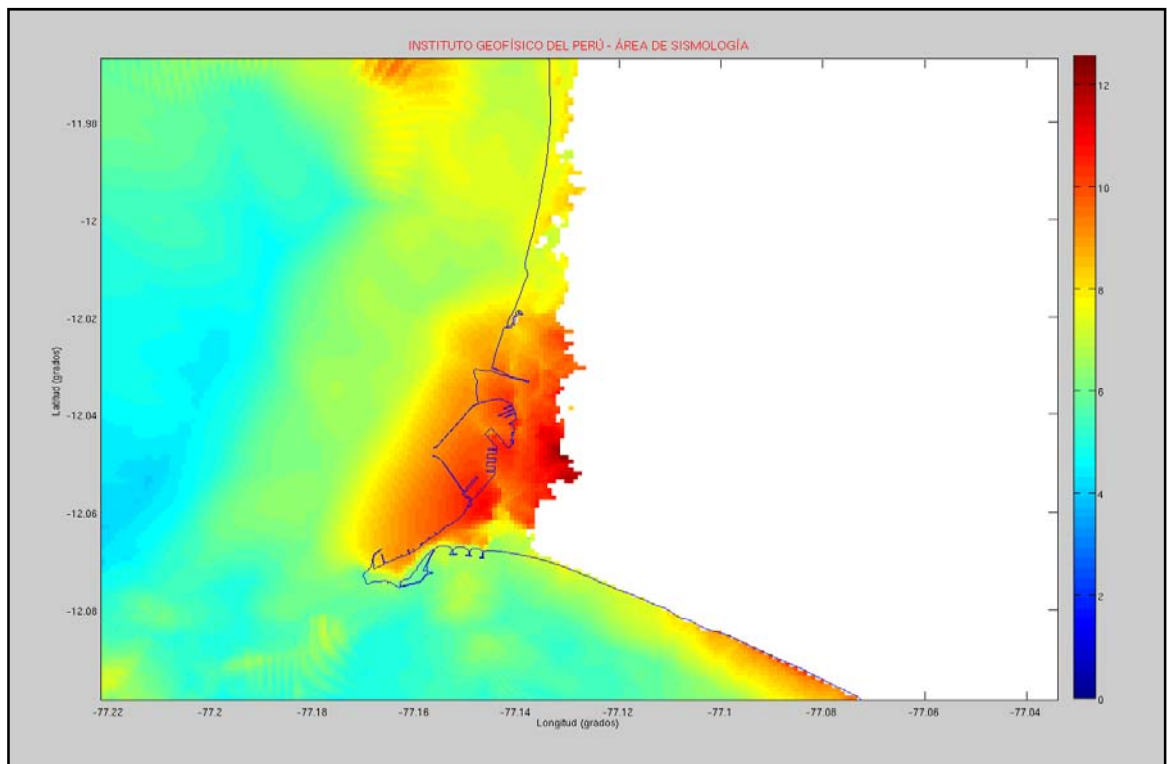


Figura 6b. Mapa de inundación obtenido en este estudio para $M_w=9,0$. Donde la escala de colores representa el run-up en (metros) que alcanza la inundación en la zona de estudio ya mencionada.

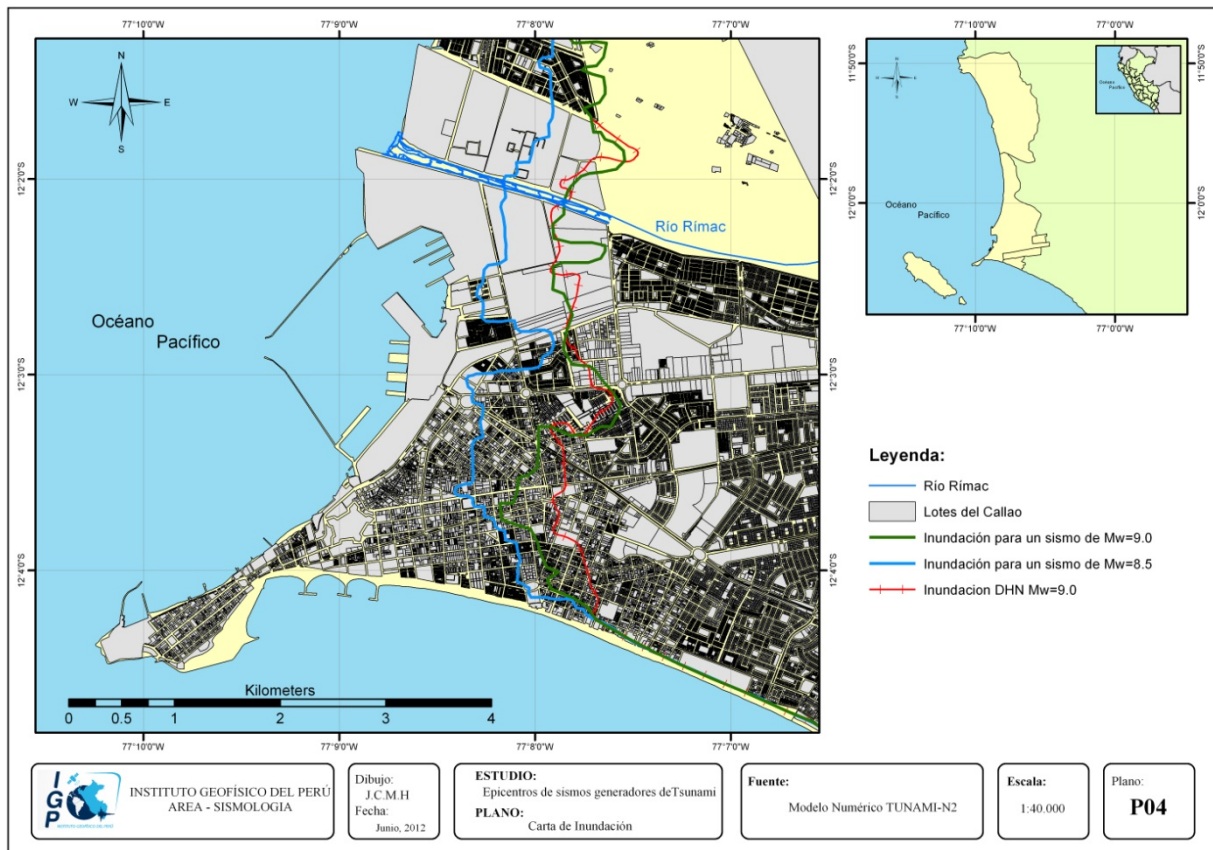


Figura 7. Mapa de inundación para un sismo de magnitud Mw=8.5 y Mw=9.0

Discusión

- Los resultados obtenidos en esta primera etapa del estudio nos muestran una gran similitud con los obtenidos tanto por la Dirección de Hidrografía y Navegación, por el informe presentado por el Proyecto SIRAD, así como con los resultados de Okal yM. Sullón, con lo cual queda validado el presente estudio en lo concerniente a la inundación costera, las diferencias entre las áreas de inundación de los autores antes mencionados se debe básicamente a la resolución de los datos empleados para llevar a cabo el modelamiento numérico, M. Sullón trabajo con una resolución de 90m, en el Proyecto SIRAD trabajaron con una resolución de 30m, este estudio se lleva a cabo con una resolución de 10m para la inundación costera y se trabajara a una resolución de 5m en lo concerniente al río Rímac.

Obtenido el mapa de inundación para el Callao, ahora surgen las siguientes preguntas:

- ¿Cómo sería el comportamiento del maremoto (tsunami). al momento de llegar a la desembocadura del río Rímac?
- ¿Al avanzar el maremoto (tsunami).por el cauce del rio, afectará al run-up, a la zona de inundación y el tiempo de propagación del maremoto (tsunami).?
- ¿Cómo reaccionará el río Rímac ante un maremoto (tsunami). que avanzaría por su cauce, que consecuencias traería al cauce del río?
- ¿Cómo afectaría a los pobladores que viven en las cercanías del río Rímac?

Para dar respuesta a estas preguntas se desarrollará la segunda etapa del estudio, esta será enfocada en el río Rímac y para ello se tomará en cuenta un área de estudio más pequeña que abarque únicamente al río. Los resultados serán obtenidos en un periodo no mayor de 30 días.

REFERENCIAS

- Fumihiko Imamura. 1995. Tsunami modelling manual. School of Civil Engineering, Asian Inst. Tech.(1993-1995) and Disaster Control Research Center, Tohoku University., Sendai, Japan.
- Sullón, M., 2007. El Terremoto de Pisco: algunos cálculos preliminares. FENLAB, Facultad de Ciencias Físicas, UNMSM.
- 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.
- Carpio, J., Tavera, H. 2002. Estructura de un catálogo de tsunamis para el Perú basado en el catálogo de Gusiakov. Boletín de la Sociedad Geológica del Perú v. 94.
- Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú. Tsunamis. Cartas de Inundación <http://www.dhn.mil.pe/>.
- INEI - Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda
- Mansinha, L., Smylie, E. 1971. The displacement field of inclined faults. Bulletin of the Seismological Society of America, V. 61, No 5, pp. 1433-1440.
- Titov, V., Synolakis, C., 1996. Numerical modeling of tidal wave runup. Journal of waterway, port, coastal and oceanengineering. 124 (4) 157-171.
- Goto, C., Ogawa, Y., 1997. Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. IUGG/IOC TIME Project. Unesco. 28 p.
- Goto, C., Ogawa, Shuto, N., Imamura, F., 1997. IUGG/IOC TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme, Intergovernmental Oceanographic Comision of UNESCO, Manuals and Guide No. 35, París, Francia, pp. 38.
- Nanayama, F.; Satake, K.; Furukawa, R.; Shimokawa, K.; Atwater, B.; Shigeno, K. & Yamaki, S. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. Nature, 2003, N° 424, p. 660-663.
- Cisternas, M. Suelos enterrados revelan la prehistoria sísmica del Centro - Sur de Chile durante los últimos dos milenios. Revista de Geografía Norte Grande, 2005, N° 33, p. 19-31.
- Farreras, S. (1995). "Tsunamis en México". Unión Geofísica Mexicana. Monografía N°5.