

Modelación numérica del tsunami 2010 en la Bahía de Concepción utilizando deformación inicial estática no uniforme

Numerical modelling of the 2010 tsunami in the Concepción Bay using non-uniform static initial deformation

Fecha de entrega: 29 de octubre 2010
Fecha de aceptación: 16 de diciembre 2010

Rafael Aránguiz

Centro de Investigación Marítimo Portuario, CIMP, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Alonso de Ribera 2850, Concepción, Chile, raranguiz@ucsc.cl

En el presente trabajo se estudia de manera preliminar el comportamiento del tsunami del 2010 en la Bahía de Concepción. Para ello se utiliza el modelo numérico TUNAMI-N con mallas de resolución 81", 27", 9" y 3". La condición inicial se define a partir de una deformación estática no uniforme, que se obtiene mediante superposición de varias deformaciones uniformes calculadas usando la formulación de Okada. Los resultados de la simulación son comparados con mediciones de altura de inundación y registros del nivel del mar de la WCATC en el Puerto de Talcahuano. Los resultados muestran que hay una muy buena representación tanto en la hora de llegada como la amplitud de las olas. Del mismo modo se observa que el área de inundación determinada por el modelo numérico se aproxima bastante bien a la inundación observada en el tsunami del 2010. Finalmente, mediante el análisis de los resultados entregados por el modelo numérico se observó que la primera ola no fue la de mayor amplitud y que osciló al interior de la bahía durante una hora aproximadamente hasta que ingresó la siguiente ola de mayor amplitud que causó la mayor inundación. Se demuestra, además, que la gran cantidad de olas registradas en varios lugares al interior de la bahía se debió a la oscilación interna que la geomorfología de ésta genera.

Palabras clave: modelo numérico, deformación estática no uniforme, altura de inundación, *run-up*

In this preliminary work the 2010 tsunami behaviour in Concepción Bay is studied. To that end, the numerical model TUNAMI-N with a resolution grid of 81", 27", 9" y 3" is used. The initial condition is defined from a non uniform static condition, which is obtained by means of superposition of several uniform deformations calculated following the Okada formulation. The simulation results are compared with measurements of inundation height and records of the sea level by WCATC in the Port of Talcahuano. The results show that there is a good representation of the arrival time and wave amplitude. In the same way, it is observed that the flooded area determined by the numerical model is a good approximation of the observed in the 2010 tsunami. Finally, through the analysis of the results given by the numerical model, it was observed that the first wave had not the highest amplitude and oscillated inside the bay during one hour approximately until the next wave of higher amplitude entered and caused the largest inundation. It is proved, in addition, that the great number of waves recorded in several places inside the bay was due to an internal oscillation caused by the bay own geomorphology.

Keywords: numerical model, non uniform static deformation, inundation height, *run-up*

Introducción

La Región del Bío Bío está ubicada en una zona de gran actividad sísmica, en efecto, registros históricos muestran que en febrero de 1570, marzo de 1657, julio de 1730 y mayo de 1751, violentos sismos y maremotos afectaron la ciudad de Concepción (Encina 1956, 1970). Se debe resaltar que Concepción hasta el año 1751 se emplazaba en lo que hoy día es Penco. Luego del sismo y maremoto

de 1751 se decide el traslado de la ciudad a su actual ubicación, entre los ríos Andalién y Bío Bío (Encina 1970).

El último gran terremoto que había afectado la región, y que fue generado en esta zona sísmica, ocurrió en 1835, destruyendo Concepción y Talcahuano (Gil 1945). Esta última ciudad, fue afectada además por el tsunami que llegó a las costas 30 minutos después de ocurrido el sismo

generando, por ejemplo, un *run-up* de 13 m en la isla Quiriquina, ubicada en el centro de la bahía de Concepción (Gil 1945). Adicionalmente, el maremoto ocasionado por el sismo de 1960 afectó una vez más esta bahía, aun cuando sólo significó un aumento en el nivel del mar de 3 m, requirió la evacuación del sector Rocuant en Talcahuano (Angelfire 2010).

Durante el evento de 2010, sin embargo, el trabajo de campo realizado por el CIMP reportó que la altura de inundación superó los 6 m en Talcahuano y 5 m en Penco, sin inundar mayormente Tomé. Adicionalmente, las investigaciones de campo mostraron que la ola que inundó gran parte del sector las Salinas en Talcahuano, arribó a las 6:00am y correspondió a la tercera ola y no a la primera, como ocurrió en Tumbes, también en Talcahuano. Lo anterior demuestra que los efectos del tsunami varían enormemente al interior de la bahía, por lo tanto, para proponer medidas de mitigación adecuadas es necesario comprender muy bien su comportamiento.

Los modelos numéricos son una herramienta muy útil para representar la generación, propagación e inundación del maremoto. Estos modelos han sido utilizados desde la década de los 90 no solo para comprender su comportamiento sino también para la construcción de mapas de inundación.

El principal objetivo de este artículo es un estudio preliminar del comportamiento del tsunami al interior de la Bahía de Concepción. Para ello, se utiliza el modelo numérico TUNAMI-N, desarrollado en la Universidad de Tohoku en Japón (Imamura *et al.* 2006). Como primera aproximación, se utiliza un modelo de deformación estático no uniforme y mallas anidadas de resolución 81", 27", 9" y 3".

Primeramente se describe de manera general el evento que dio origen al tsunami, identificando la zona de ruptura y los desplazamientos entre placas tectónicas.

A continuación se presentan algunas mediciones y observaciones de campo realizadas en la bahía de Concepción, tal como niveles de marea y alturas de inundación. Se describe, además, la condición inicial utilizada en el modelo numérico y su metodología de construcción. Finalmente, se presentan los resultados de la simulación y su comparación con la información recopilada y mediciones de terreno.

Antecedentes del sismo del 27 de febrero

El terremoto del 2010 tuvo una magnitud momento de 8.8 grados y ocurrió a las 03:34 a.m. (hora local) en la zona central de Chile. La zona de falla abarcó unos 450 km de longitud y unos 150 km de ancho, que incluye la península de Arauco por el sur hasta Pichilemu por el norte (Barrientos, 2010). El foco del sismo se ubicó en las coordenadas geográficas 36°17'23" S y 73°14'20" W a una profundidad estimada de 30 km. En la Figura 1 se puede observar la longitud y ubicación de la zona de ruptura. La figura muestra, además, la amplitud del desplazamiento relativo entre las placas (Delouis *et al.*, 2010), donde se puede observar que los máximos desplazamientos son del orden de los 10 m en la parte norte de la zona de ruptura, mientras en las zonas cercanas al hipocentro y a la ciudad de Concepción, se alcanzaron desplazamientos del orden de los 5 m. De lo anterior se puede concluir que un modelo numérico representativo del evento, debe contemplar una condición inicial no uniforme a lo largo de la zona de ruptura.

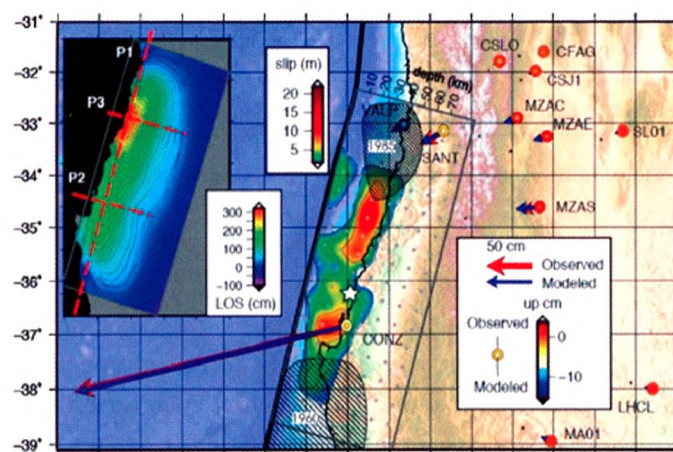


Figura 1: Zona de ruptura del sismo del 27 de febrero 2010 indicando el desplazamiento vertical de las placas. Se muestra la distribución del levantamiento en la superficie de la tierra (izquierda) y el desplazamiento horizontal de algunos puntos (flechas) (tomado de Delouis *et al.*, 2010)

Observaciones y mediciones de campo

En la presente sección se entregan los datos recopilados tanto en los medios de información y organismos oficiales como los recolectados en campo por equipos de investigadores. La medición en terreno se realizó siguiendo las recomendaciones de la "Guía de campo para levantamientos posteriores a un Tsunami" de la Comisión Oceanográfica Internacional (UNESCO, 1998).

a. Registros de marea

La Tabla 1 muestra los datos entregados en el boletín N°15 de la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional de los Estados Unidos para Talcahuano. Considerando que el tsunami se genera junto con el sismo, esto es a las 03:34 hora local, se pudo observar que la primera ola inicia su arribo a Talcahuano solo 19 minutos después de ocurrido el evento. Adicionalmente, la Armada de Chile emitió un informe en el cual se detalla la hora de llegada de las diferentes olas en algunas localidades. La Tabla 2 muestra los datos entregados para Talcahuano. La información ha sido recolectada tanto con instrumentos como por otros medios.

Tabla 1: Hora de llegada de la primera ola, altura de ola H y periodo de tiempo con la siguiente ola T . Fuente: Boletín N°15 NOAA (2010)

Localidad	Lat.	Long.	Hora llegada	H m	T min
Talcahuano	36.7S	73.4W	3:53 a.m.	2.34	88

Tabla 2: Hora de llegada de las olas en Talcahuano (Larrañaga 2010)

Localidad	1° ola	2° ola	3° ola	4° ola
Talcahuano	3:54	5:30*	6:00*	6:40*

* indica información proveniente de distintas fuentes

La Figura 2 muestra el nivel del mar registrado en la estación de Talcahuano (WCATWC 2010). La línea roja vertical indica el inicio del sismo y, por consiguiente, el tsunami. Se observa que a partir de ese momento, se produce una disminución del nivel del mar de unos 55 cm, alcanzando el nivel más bajo a las 3:55am, para luego aumentar hasta el nivel máximo registrado a las 4:17am, que corresponde al máximo de la primera ola. Posteriormente, el nivel disminuye por debajo de lo que el instrumento puede medir, para posteriormente aumentar, cerca de las 5:20am, que corresponde a la llegada de la segunda ola.

Desafortunadamente, el instrumento no registró mediciones posteriores que permitieran determinar instrumentalmente la hora de llegada de las demás olas. Otro aspecto importante que se puede observar, es que las olas alcanzaron la costa de Talcahuano durante la bajamar, lo que ayudó a mitigar el efecto del tsunami.

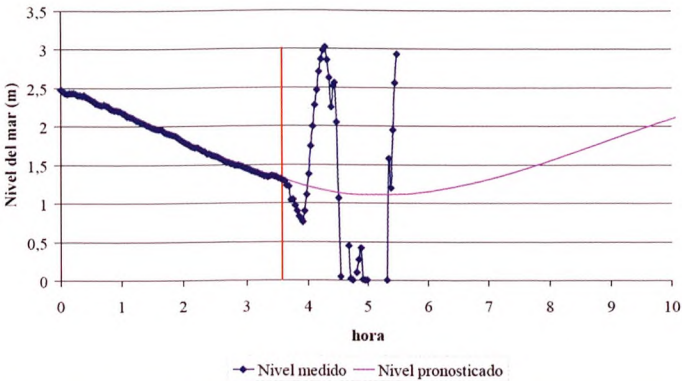


Figura 2: Nivel del mar medido y marea pronosticada la madrugada del 27 de febrero del 2010

b. Alturas de inundación

El equipo del CIMP midió tanto alturas de inundación como *run-up* en varios lugares de la bahía de Concepción, tales como Tumbes (Puerto Inglés), Talcahuano y Penco. Los resultados se muestran en la Figura 3. Se puede observar que el máximo valor se midió en Puerto Inglés, que correspondió a *run-up* en un acantilado. Mientras que en Penco se midió 5,36 m en la costanera. En Talcahuano alcanzó los 6.39 m. La Figura 3 muestra, además, tres puntos donde se medirá la variación del nivel del mar en el modelo numérico a través de mareógrafos virtuales, estos son Tomé, Tumbes, y Puerto de Talcahuano. Lo anterior con el fin de comparar y analizar el comportamiento del tsunami al interior de la bahía.

Por otro lado, y según información del INE, los efectos del tsunami en Tomé no fueron significativos y sólo se registró un ingreso del mar por el estero en el sector de Playas Bellavista (INE, 2010a).



Figura 3: Mediciones de *run-up* y altura de inundación en la bahía de Concepción, donde * indica la ubicación de mareógrafos virtuales del modelo numérico

Condición inicial del tsunami

La deformación inicial se construye a partir de una deformación estática que es generada mediante la formulación de Okada. Okada (1985) plantea una solución analítica para el problema estacionario de la teoría de la elasticidad. Para ello se requieren datos realistas del desplazamiento de las placas tectónicas (Levin y Nosov 2009). Esta formulación entrega una deformación del lecho marino, y se asume entonces, que la deformación inicial del mar es idéntica a la obtenida para el fondo oceánico.

Los parámetros requeridos para la generación de la condición inicial mediante esta formulación se muestran en la Figura 4.

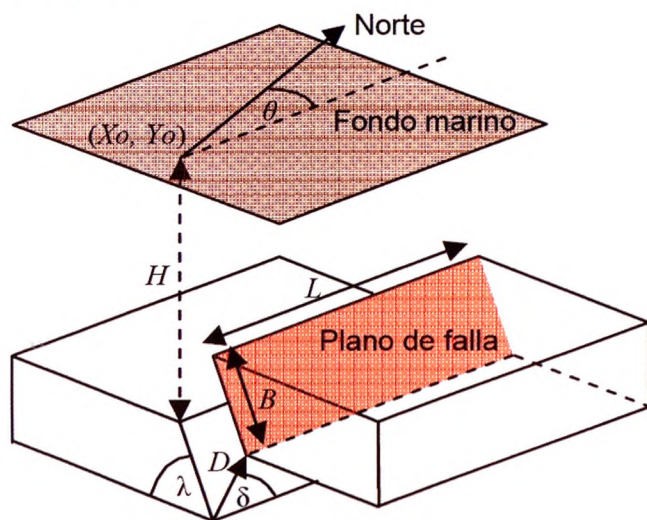


Figura 4: Parámetros usados en la formulación de Okada para la generación de la condición inicial (adaptado de Imamura *et al.* 2006)

Donde (X_o, Y_o) corresponde a la ubicación de la coordenada de inicio de la zona de ruptura, H es la profundidad focal, B es el ancho de la zona de ruptura, L es la longitud de la zona de ruptura, θ es el rumbo en dirección del eje de la falla medido desde el norte en sentido horario, δ es el ángulo de desplazamiento, λ es el ángulo de buzamiento y D es el desplazamiento de las placas.

La deformación inicial del evento del 2010, para esta simulación, se obtiene a partir de la zona de ruptura y desplazamientos entre placas propuestos por Delouis *et al.* (2010) mostrados en la Figura 1. Para ello se utiliza superposición, es decir, la zona de ruptura total se subdivide en varias pequeñas zonas de ruptura, las cuales poseen sus propios parámetros H , B , L , D y el origen de la falla, mientras que los ángulos del rumbo, buzamiento y desplazamiento permanecen constantes,

considerando los siguientes valores $\theta = 15^\circ$, $\lambda = 18^\circ$ y $\delta = 110^\circ$, respectivamente (Delouis *et al.*, 2010). La Figura 5 muestra la condición inicial obtenida. Se puede observar que este resultado es coherente con los desplazamientos de placas mostrados en la Figura 1.

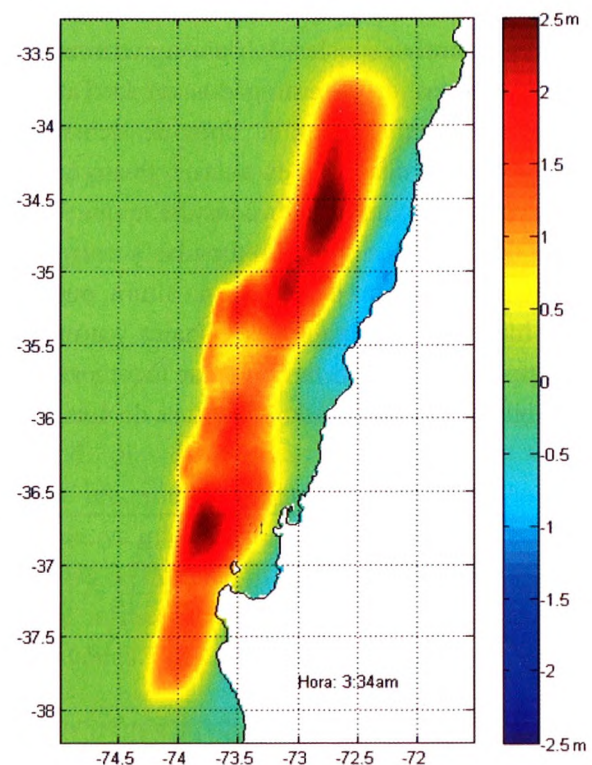


Figura 5: Condición inicial del tsunami del 2010 utilizado para la simulación

La máxima altura de ola se obtiene en el norte de la zona de ruptura, alcanzando el valor de 2.65 m, mientras que el lado sur alcanzó un máximo de 2.49 m. Se puede observar, además, que este modelo representa adecuadamente el descenso del nivel del mar que se registró en las costas de Chile.

Para realizar la simulación se consideró tanto el efecto de la baja marea como el levantamiento del terreno. Para ello, se consideró el nivel del mar a 0.21 m sobre el NRS, que corresponde al nivel de marea más bajo pronosticado por el SHOA para la madrugada del 27 de febrero. Además, se estimó un levantamiento post-sísmico promedio en toda la bahía de 20 cm (Sladen, 2010). Es decir, el nivel medio del mar utilizado en la simulación coincide aproximadamente con el NRS.

Resultados y discusión

La Figura 6 muestra la comparación del registro de nivel del mar en el Puerto de Talcahuano y la serie de tiempo

obtenida en el modelo numérico. Para realizar esta comparación, se descontó el efecto de la marea en el registro real. En general, se puede observar que el modelo representa muy bien el descenso del nivel del mar y la llegada de la primera ola y la segunda ola que registró el mareógrafo, aun cuando se observa una ola intermedia en el modelo numérico a las 5:10am aproximadamente. Además, según los datos entregados en la Tabla 2, el modelo representa muy bien la hora de ocurrencia de la tercera y cuarta ola, esto es a las 6:00am y 6:40am respectivamente. Es importante considerar que las horas de llegada de estas olas son aproximadas y corresponden principalmente al registro de la máxima altura, pues fueron obtenidas mediante observaciones visuales y no mediante instrumentos. Se demuestra también que la tercera ola es la máxima registrada, alcanzando una altura de 4 m.

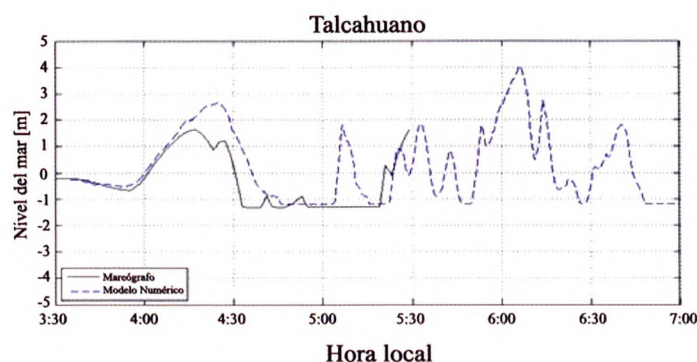


Figura 6: Comparación de la variación del nivel del mar medido en el Puerto de Talcahuano y el obtenido mediante el modelo numérico

Se puede observar, sin embargo, una diferencia de altura y periodo de la primera ola. Esto es, el modelo indica que el arribo se produce antes de lo registrado y con una altura de ola mayor. Esto puede deberse a que la condición inicial se construyó asumiendo una deformación estática instantánea, y no una deformación gradual o dinámica, la cual supone una deformación que comienza en el hipocentro y se propaga a lo largo de toda la zona de ruptura. Adicionalmente, algunas diferencias puede deberse al modelo de ruptura propiamente tal y al efecto de la marea, aun cuando este último efecto no sería de gran importancia, pues la variación del mar desde que se genera el tsunami hasta que la ola llega a la costa (10 cm aproximadamente) no generará ningún aumento en la propagación del tsunami, muy por el contrario, a menor profundidad menor velocidad de propagación.

Del mismo modo, la ola intermedia puede deberse a un comportamiento local al interior del puerto producto de la

batimetría digital utilizada, la cual no representa bien pequeñas estructuras, como rompeolas, ya que posee una resolución de 3" (93 m aproximadamente). Adicionalmente, los muros costeros que tengan diferencias pequeñas de alturas con el lecho marino, son modelados como playas, lo que influye en el comportamiento del tsunami en esta zona. Investigaciones futuras contemplan la modelación de zonas costeras utilizando mallas de resolución 1".

En la Figura 7 se muestran los registros virtuales frente a las localidades de Tumbes y Tomé, ubicados en los costados oeste y este de la Bahía de Concepción, respectivamente, ver Figura 3. Se puede observar muy claramente que la primera ola llega a ambos lugares al mismo tiempo, pero sin embargo, oscila de un lado al otro entre las 4:20am y las 5:40am, cuando una segunda ola ingresa a la bahía. Por lo tanto, se podría concluir que la segunda ola registrada en el Puerto de Talcahuano, ver Tabla 2, es todavía la primera ola que se ha mantenido oscilando al interior de la bahía.

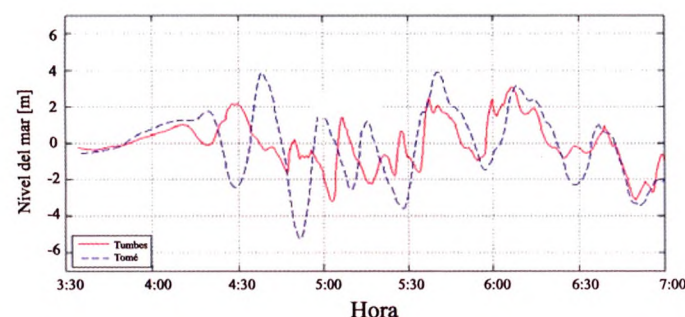


Figura 7: Variación del nivel del mar en Tumbes y Tomé obtenidos del modelo numérico para el evento de 2010

Por otro lado, a partir del registro sintético de Tomé, es posible identificar 3 olas bien definidas entre las 4:30am y las 5:30am, las que poseen periodos de 22, 17 y 18 minutos, respectivamente. La máxima amplitud de ola fue de 4 m y se debió principalmente a la oscilación al interior de la bahía, a diferencia de la quinta ola, que se originó por llegada de una nueva ola desde el exterior de la bahía. De lo anterior, se puede concluir que un estudio de la resonancia es de gran importancia para comprender de mejor manera el comportamiento del tsunami al interior de la bahía de Concepción.

Finalmente, la Figura 8 muestra el área de inundación y altura de flujo entregado por el modelo numérico. La línea azul continua indica la inundación real generada en Talcahuano (INE, 2010b). Se observa que el área de inundación calculada concuerda muy bien con la inundación real, aun cuando existen diferencias en la parte

izquierda del área de inundación. Los datos en Penco y Talcahuano concuerdan aproximadamente, y las diferencias, principalmente en Penco, se deben a la resolución de la malla y a la pequeña área de inundación. Un caso particular es lo obtenido en Puerto Inglés, ya que para la resolución utilizada es muy difícil simular el *run-up*, pues esta zona posee pequeñas bahías y acantilados, que no son bien representados con la resolución utilizada. Adicionalmente, se aprecia que no existe una inundación relevante en Tomé, lo que coincide con la información recolectada, donde se observó sólo un leve aumento del nivel, sin olas destructivas. Por otro lado, si bien este equipo no realizó mediciones en los Astilleros y Maestranzas de la Armada ASMAR, se observan alturas de flujo del orden de los 4.6 m y alturas de inundación totales de 8.2 m.

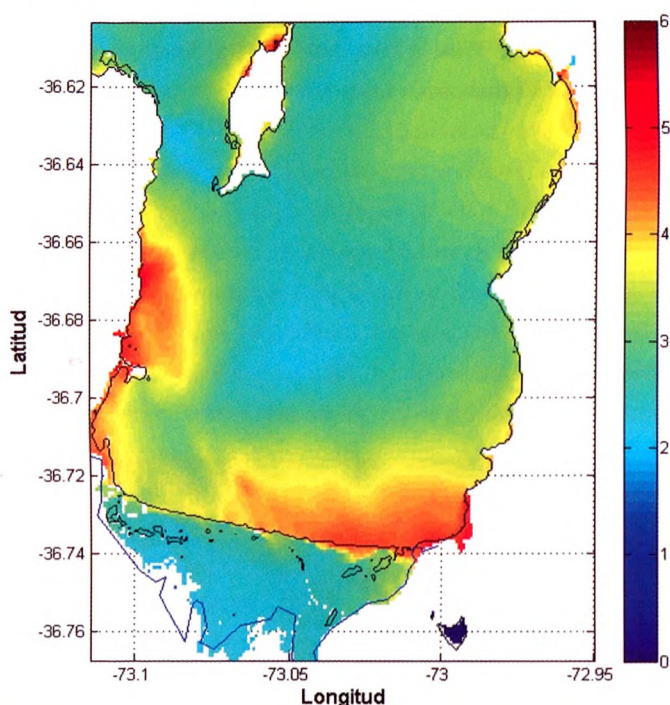


Figura 8: Altura y área de inundación en Talcahuano. La línea azul indica el límite de inundación real para el evento de 2010

Es importante mencionar que en la validación de las modelaciones para eventos de gran escala no siempre resulta posible desagregar y tratar los fenómenos como eventos independientes. Esta situación se puede superar en la medida que exista una gran base de datos (por ejemplo datos en otros puertos) que permita dar robustez estadística a la validación del modelo de análisis.

Conclusiones

Los resultados obtenidos con el modelo numérico demuestra ser coherente con las mediciones de nivel del

mar en el puerto de Talcahuano, así como con la hora de llegada de las olas, según el reporte de la Armada de Chile. Del mismo modo, las alturas de flujos y alturas de inundación obtenidas numéricamente muestran ser coherente con las mediciones, principalmente en Penco y Talcahuano, junto con los reportes entregados para Tomé. Por lo tanto, se puede concluir que la deformación estática no uniforme generada para esta simulación representa de manera adecuada el evento del 2010 para la bahía de Concepción. Sin embargo, es necesario contrastar el comportamiento de esta deformación inicial en otros puntos registrados, lo cual se desarrollará en investigaciones futuras.

En base a los mareógrafos virtuales, es posible concluir que la oscilación al interior de la bahía juega un rol fundamental en la amplificación de la altura de ola y la cantidad de olas que afectan un determinado sector. Por lo cual se recomienda analizar en detalle el fenómeno de resonancia, ya que éste debe ser considerado no solo para las medidas de mitigación propuestas sino también para el diseño de infraestructura portuaria y comportamiento de embarcaciones al interior de la bahía de Concepción.

Agradecimientos

El autor agradece de manera especial al Profesor Imamura de la Universidad de Tohoku, Japón, por facilitar el código TUNAMI. Se agradece también al Profesor Shibayama, de la Universidad de Waseda, Japón, por compartir sus datos de campo. Finalmente, se agradece al Laboratorio de Estudios Urbanos de la Universidad del Bío Bío, por facilitar información topográfica usada en las modelaciones.

Referencias

- Angelfire (2010). El terremoto de Valdivia, Chile, 21 y 22 de mayo de 1960. <http://www.angelfire.com/nt/terremotoValdivia/>
- Barrientos, S. (2010). Informe Técnico Terremoto de Cauquenes 27 de Febrero Del 2010. Servicio Sismológico Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Delouis, B., Nocquet J. and Valec M. (2010). Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR and teleseismic data. *Geophysical Research Letters* 37, L17305
- Encina, F. (1956). Historia de Chile, desde la prehistoria hasta 1891. Vol. 2, 26-28, Editorial Nacimiento, 4ta Edición, Santiago, Chile

Encina, F. (1970). Historia de Chile, desde la prehistoria hasta 1891. Vol. 3, 267-268 y vol. 4, 487-491 y 538-541. Editorial Nacimiento, 4ta Edición, Santiago, Chile

Gil, J. (1945). Charles Darwin, viaje de un naturalista alrededor del mundo. Librería El Ateneo, Buenos Aires Argentina.

Imamura, F., Yalciner, A. C. and Ozyurt, G. (2006). Tsunami Modelling Manual, TUNAMI Model. IOC Manuals and Guides No.30 IUGG/IOC TIME PROJECT

INE (2010a). Área afectada por tsunami, Tomé, Provincia de Concepción, VIII Región del Biobío. http://www.ine.cl/canales/sala_prensa/noticias/2010/marzo/19_03_10/TOME-PERSONAS-LOW.pdf [Consulta 20 Noviembre 2010]

INE (2010b). Área afectada por tsunami, Talcahuano, Provincia de Concepción, VIII Región del Biobío. http://www.ine.cl/canales/sala_prensa/noticias/2010/marzo/pdf/Talcahuano_poblacion.pdf [Consulta 20 Noviembre 2010]

Larrañaga, E. (2010). Anexo IV Análisis del proceso de toma de Decisiones. http://www.armada.cl/prontus_armada/site/artic/20100325/asocfile/20100325094239/anexo_iv.pdf [Consulta 25 de Octubre de 2010]

Levin, B. and Nosov, M. (2009). *Physics of Tsunamis*. Springer Science

NOAA (2010). PACIFIC TSUNAMI WARNING CENTER/NOAA/NWS. <http://www.prh.noaa.gov/ptwc/messages/pacific/2010/pacific.2010.02.27.202736.txt>

Okada, Y. (1985). Surface Deformation to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bulletin of the Seismological Society of America* 75, [4], 1135-1154

Sladen, A., (2010). Preliminary results 02/27/2010 (Mw 8.8) Chile. California Institute of Technology. http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2010_chile/ [Consulta 25 de Octubre de 2010]

UNESCO (1998). Post-Tsunami survey field guide. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO.

WCATW (2010). West Coast and Alaska Tsunami Warning Center. <http://wcatwc.arh.noaa.gov/>



UNIVERSIDAD CATOLICA
DE LA SANTISIMA CONCEPCION



Laboratorio de GeoMateriales

La asesoría que necesita para sus proyectos

Ensayos de laboratorio y en terreno

Mecánica de suelo

- Exploración
- Clasificación y propiedades índices
- Resistencia al corte, triaxial, corte directo, veleta
- Permeabilidad, compactación, consolidación

Proyectos geotécnicos

Tecnología del hormigón

- Control de calidad
- Extracción de testigos
- Inspección técnica
- Investigación

El Laboratorio de GeoMateriales
es parte de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Católica de la
Santísima Concepción



Laboratorio de GeoMateriales UCSC
www.civil.ucsc.cl

Alonso de Ribera 2850, Campus San Andrés, Concepción / Fonos: 56 41 2345566 - 56 41 2345047 - 56 41 2345303 - Fax: 56 41 2345300 lgm@ucsc.cl