

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN POR
TSUNAMI EN ZONAS URBANAS**

LUIS BURGOS G.¹
CARLOS ROZAS R.²
BENJAMÍN CARRIÓN A.³

RESUMEN

En Chile existe cada vez más conciencia sobre el riesgo de tsunami de nuestras ciudades costeras y se ha hecho evidente la necesidad de cuantificar y gestionar ese riesgo con el fin último de salvar vidas. Al mismo tiempo, ha habido avances tanto en el conocimiento de la física e hidrodinámica de los tsunamis, como en las herramientas numéricas empleadas para modelarlos. Sin embargo, existe escasa literatura sobre el carácter urbano de la inundación por tsunami, lo que plantea desafíos para el modelado de mayor resolución.

Utilizando como ejemplo un estudio desarrollado por PRDW (Consulting Port and Coastal Engineers) para la Asociación de Aseguradoras de Chile, se plantea la necesidad de incluir las edificaciones urbanas en el modelado, ya que tienden a canalizar el flujo sobre un área menor, acelerándolo localmente. Esta canalización tiene efectos tanto en la extensión del área inundada como en las velocidades máximas del flujo, las que determinan la probabilidad de sobrevivencia de las personas, y las solicitaciones sobre la infraestructura.

La metodología se compara con datos de un modelo físico a escala reducida de un pueblo costero, con resultados satisfactorios. Luego, se presentan mapas de inundación para las principales ciudades costeras de Chile, considerando sismos máximos creíbles por cada zona de interés.

¹Ingeniero de Proyectos, PRDW – lburgos@prdw.com

²Ingeniero de Proyectos, PRDW – crozas@prdw.com

³Ingeniero Senior, PRDW – bcarrion@prdw.com

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del desarrollo de un modelo de cálculo de la Pérdida Máxima Probable (PML) para la Asociación de Aseguradores de Chile A.G. (AACH), se desarrolló un estudio para evaluar el riesgo por tsunami y elaborar mapas de inundación en 11 localidades del litoral chileno: Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta, La Serena, Coquimbo, Quintero, Viña del Mar, Valparaíso, San Antonio, y Talcahuano. Estas zonas resultan de interés debido a la alta densidad urbana y la presencia de infraestructura pública y privada aledaña al borde costero. La amenaza de tsunami sobre estas zonas urbanas se evaluó en términos de la profundidad de inundación y la velocidad del flujo.

Se definió una metodología de modelado numérico en dos escalas físicas separadas; a escala regional se modeló la propagación en aguas oceánicas de la deformación inicial de la superficie libre del mar inducida por el sismo, mientras que a escala local, se modeló la propagación en profundidades menores a 100 m y la inundación de superficie originalmente seca. Esta diferencia se justifica por los procesos físicos fundamentalmente distintos entre ambas escalas, y a la utilización de herramientas específicas para su modelado.

Adicionalmente, las edificaciones urbanas se esquematizaron como bordes reflejantes en el modelo de inundación, lo que permitió reproducir la canalización del flujo a través de las calles y caracterizar correctamente las velocidades del flujo. Este último parámetro resulta muy relevante en variadas aplicaciones de ingeniería, como el cálculo de cargas hidrodinámicas, estimación de socavación u otras. A su vez, la reducción del área efectiva del dominio del modelo permitió aumentar su resolución en las áreas activas, mejorando la precisión de los resultados obtenidos.

2. METODOLOGÍA

Para cada ciudad analizada un equipo de especialistas en geofísica definió un sismo máximo creíble. La deformación cortical producida por los sismos definidos fue calculada siguiendo la metodología de Okada (1985) y se utilizó como condición inicial de la superficie del mar. Esta perturbación se propaga luego de manera radial, como una onda lineal de pequeña amplitud y gran longitud, sin sufrir grandes modificaciones mientras se propaga en océano abierto. La interacción con la pendiente de la plataforma continental es el fenómeno más relevante en esta etapa, ya que determina la generación de ondas de orilla y pueden controlar el comportamiento del tsunami en un punto particular.

Una segunda etapa se produce cuando la onda se acerca a la costa, donde las profundidades son menores. En aguas someras comienzan a ser importantes las interacciones no lineales entre la celeridad, el nivel del mar y la profundidad local. Además, se produce la interacción con la línea de costa y la posible inundación del terreno, lo cual es un desafío numérico en sí mismo.

Ambos procesos presentan características físicas, y escalas de espacio y tiempo distintas entre sí, por lo que en este estudio se modelaron en forma independiente, utilizando los

resultados del modelado de escala regional como condición de borde para el modelo de escala local o de inundación.

Modelo de Propagación

Para la propagación en el océano abierto se utilizó el módulo hidrodinámico de la suite numérica MIKE 21 del Danish Hydraulic Institute (DHI, 2013). El modelo utiliza coordenadas geográficas para resolver las ecuaciones no lineales de aguas someras en una malla irregular, lo que permite usarlo en dominios extendidos. Se debe tener en cuenta que los esquemas numéricos tienden a producir difusión numérica, lo que puede ser relevante en el proceso de propagación de tsunamis de campo lejano, sin embargo, no resultan relevantes a la escala modelada en este estudio.

Para la construcción topo-batimétrica se utilizaron datos de batimetría global de GEBCO (2009), Cartas Náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), topografía del proyecto de la NASA Shuttle Radar Topography Mission (Jarvis et al., 2008) y batimetrías locales disponibles.

Las ecuaciones de aguas someras se componen de las siguientes ecuaciones de conservación de la masa y del momentum en x e y .

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = fv - gn^2 \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = -fu - gn^2 \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (3)$$

Donde η corresponde a la desnivelación instantánea de la superficie libre, h a la profundidad instantánea, u y v a las componentes de velocidad en x e y respectivamente y g a la aceleración de gravedad. El efecto de Coriolis se incorpora en el parámetro $f = 2\Omega \sin\phi$, donde Ω es la tasa de rotación de la tierra y ϕ la latitud geográfica. La fricción de fondo se considera proporcional al cuadrado de la magnitud de la velocidad del flujo, caracterizada por el parámetro de rugosidad de Manning n .

Para la discretización y resolución de las ecuaciones no lineales de aguas someras, se utiliza el método de volúmenes finitos. El dominio se discretizó en elementos triangulares bidimensionales, considerando que las ecuaciones se encuentran promediadas en la coordenada vertical. Estas ecuaciones son luego resueltas de manera vectorial.

A lo largo de la línea de costa se utilizó una condición de borde cerrada, donde la componente de velocidad normal a la costa es forzada a ser cero. En otras palabras, no se acepta inundación, ni modificación al dominio activo del modelo, aumentando su velocidad de cálculo. Para los bordes en agua se utilizó una condición de borde tipo Flather (1976), una de las condiciones de borde abiertas más eficientes (DHI, 2012), donde se asume que

tanto las velocidades en las direcciones x e y , como el nivel del mar en la frontera del modelo son nulos.

Modelo de Inundación

Para modelar la interacción de la onda de tsunami con la costa y la inundación de zonas secas, se utilizó el modelo ANUGA (Nielsen et al., 2005), desarrollado en conjunto por la Australian National University, y Geoscience Australia. El modelo simula la propagación de ondas de tsunami en una malla irregular flexible. Es particularmente eficaz en el modelado de la inundación, ya que no considera la línea de costa como una condición de borde explícita, sino que se calcula naturalmente por el esquema numérico.

Para incorporar la morfología urbana en el modelo, se identificó la presencia de edificaciones que significarán un obstáculo para el flujo de inundación. Estas edificaciones se excluyeron de la zona inundable y se les asignó una condición de borde reflejante. La información para esta tarea se obtuvo de los Planos de Uso del Borde Costero (SHOA, s/fecha), complementados con información de Google Earth®.

El modelo resuelve las mismas ecuaciones de aguas someras (ecuaciones (1), (2) y (3)) expresadas ahora en su forma conservativa, es decir, en términos de la altura (h) y momentum (hu y hv). Para la discretización y resolución de las ecuaciones se utiliza el método de volúmenes finitos, siguiendo un esquema explícito de captura de shock para asegurar siempre la positividad de la profundidad del flujo. Este esquema permite además tener discontinuidades en la superficie libre, y disipar energía por rompimiento, aunque con un mayor costo computacional.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \\ uvh \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} vh \\ vuh \\ v^2 + gh^2/2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh \left(z_x + \frac{un^2\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right) \\ -gh \left(z_y + \frac{vn^2\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

En estas ecuaciones, la evolución de las variables conservadas depende del flujo de masa y cantidad de movimiento a través de los bordes de cada celda del dominio y de los términos fuente, denominados como \mathbf{S} , que hacen referencia a las fuerzas externas, en este caso asociadas a la fuerza de gravedad y a la fricción de fondo. Los términos z_x y z_y corresponden a las pendientes en dirección x e y respectivamente.

La condición de borde del modelo local en el borde de agua, corresponde a las series de tiempo de desnivelación y momentum obtenidas con el modelo de propagación, interpoladas a lo largo del borde del dominio. La condición de borde de tierra, es forzada para que tanto la superficie libre y los flujos de momentum en x e y sean nulos. Finalmente la condición reflejante, utilizada en el contorno de la estructuras, asigna la misma variable

de superficie libre al borde que la del volumen vecino y la misma magnitud de momentum en x e y , pero con dirección opuesta.

Validación

El modelo de inundación urbana se comparó con mediciones realizadas en un tanque de pruebas en la universidad de Oregon (Park et al. 2013). El experimento consistió en una sola onda larga propagándose sobre una batimetría con dos pendientes consecutivas en la que se incorporó un modelo a escala del pueblo de Seaside, Oregon, como se ilustra en el panel izquierdo de la Figura 1. El procedimiento incluyó el rompimiento de la onda antes de la inundación de la ciudad.

En los puntos señalados en el panel derecho de la Figura 1 se midió la profundidad y velocidad del flujo mediante resistencias y ADVs¹, respectivamente. A partir de esos datos se calculó la cantidad de movimiento del flujo. Estos puntos se encuentran a lo largo de las calles del modelo a escala y son representativos de las máximas velocidades esperables durante una inundación urbana. La batimetría, incluyendo las elevaciones de los edificios, fue proporcionada por los autores con el fin que investigadores e ingenieros puedan probar y validar sus modelos

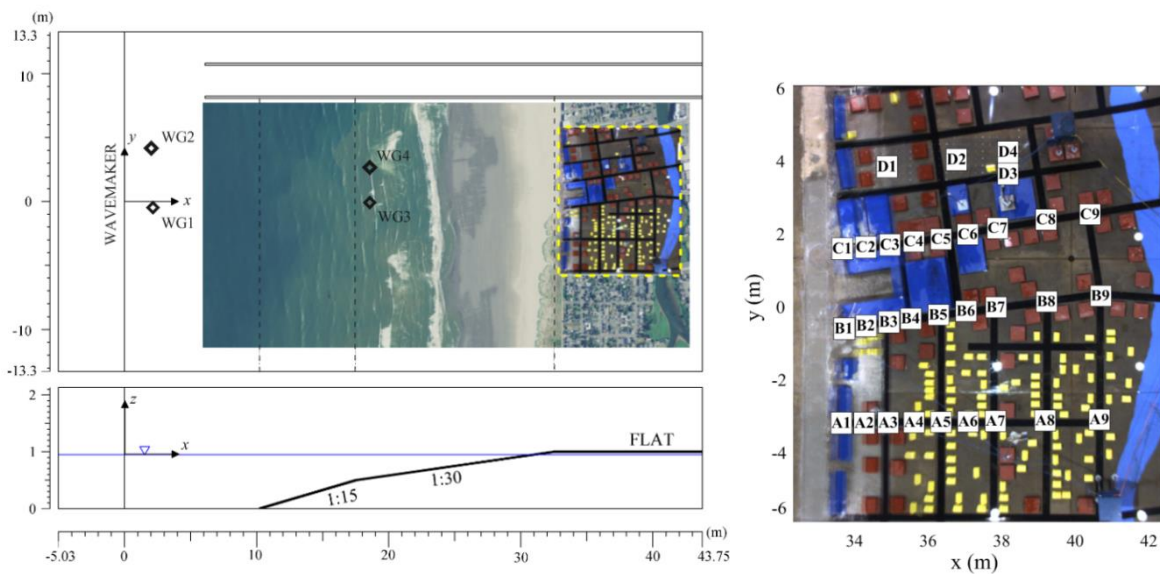


Figura 1. Configuración del modelo físico. Izquierda: batimetría compuesta por fondo plano y dos pendientes consecutivas. Derecha: ubicación de edificaciones y puntos de medición a lo largo de las calles. (Fuente: Park et al. 2013).

La onda de tsunami se generó con una paleta del ancho del tanque a una profundidad de 0.97 m. El registro de la desnivelación de la superficie libre al pasar la onda por $x = 5$ m se presenta en la Figura 2. Esta serie de tiempo (y su correspondiente celeridad) se usó en este trabajo para forzar el modelo numérico. En la Figura 3 se presenta el dominio numérico utilizado para simular el experimento con ANUGA. Se observa cómo las edificaciones han

¹ Acoustic Doppler Velocimeter

sido explícitamente dejadas fuera del dominio de cálculo. Cabe mencionar que el supuesto detrás de este procedimiento es que el flujo sobre casas y edificios es inexistente, o bien, suficientemente poco probable como para ser descartado.

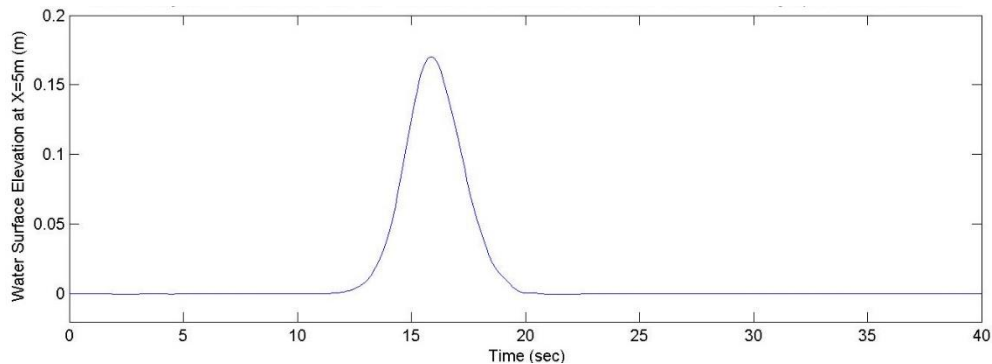


Figura 2. Serie de tiempo de onda incidente en $x = 5$ m, usada como input para el modelo matemático. (Fuente: Park et al. 2013).

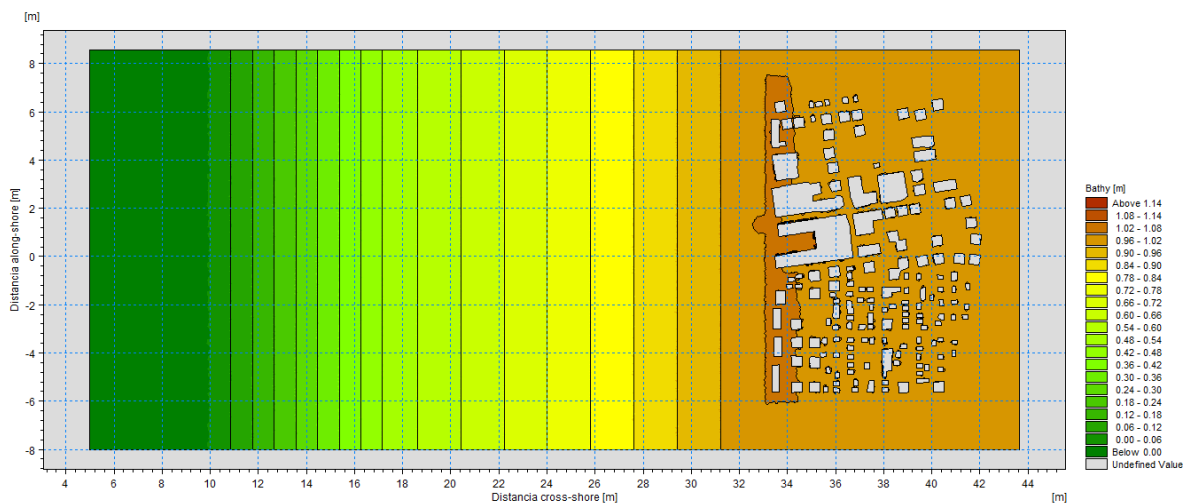


Figura 3. Batimetría y edificaciones representadas en ANUGA.

El dominio numérico se construyó sobre una malla triangular de 100 cm^2 de resolución en el dominio mojado y 50 cm^2 en la zona urbana, equivalentes a elementos de lado equivalente de 15.2 y 10.7 cm aprox., respectivamente. Esta resolución es suficiente como para incluir varios triángulos a lo ancho de cada calle. Con respecto a la calibración, sólo se consideró una sensibilización de la rugosidad de fondo, usando los coeficientes de Manning $n = 0.013, 0.011, 0.008,$ y 0.005 . Cabe mencionar que este tipo de modelos explícitos de captura de shock en volúmenes finitos, y particularmente ANUGA, presentan muy pocos parámetros numéricos, por lo que la calidad del modelado depende en gran medida de la resolución adoptada, las condiciones de borde y la fricción de fondo. Este comportamiento es deseable ya que la operación del modelo es más transparente para el modelador.

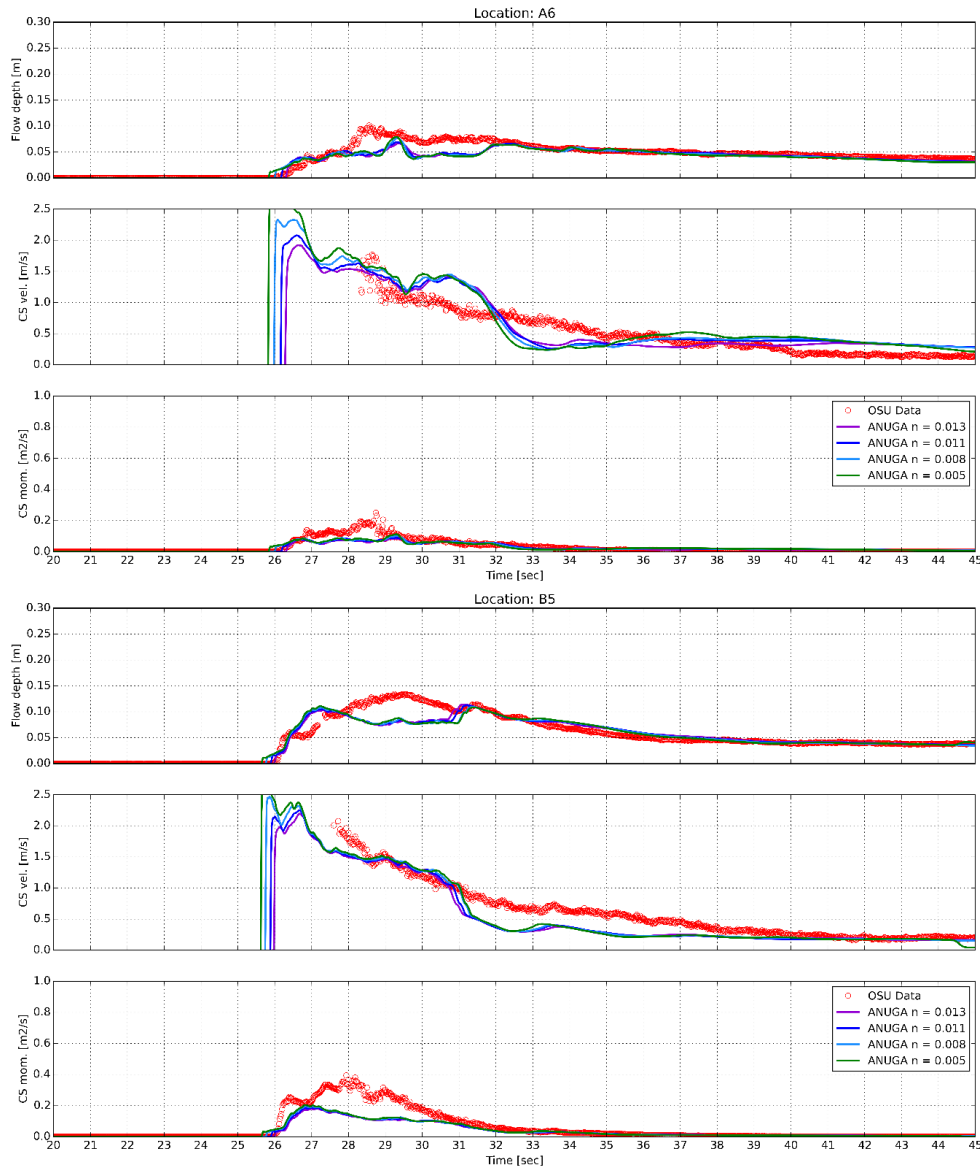


Figura 4. Comparación entre mediciones (puntos rojos) y metodología aplicada a ANUGA (líneas de colores para distintas rugosidades, $n = 0.013, 0.011, 0.008, 0.005$). Para cada punto se indica la profundidad de flujo, la velocidad y el momento cross-shore.

Los resultados obtenidos se compararon con las mediciones disponibles, mostrando una alta correspondencia en la mayoría de los puntos analizados. Las mayores diferencias se presentaron, esperablemente, para los puntos más alejados a la línea de costa y para tiempos posteriores.

Algunas de las series de tiempo comparadas se presentan en la Figura 4, para los puntos A6 y B5. En términos generales se observa que la fricción de fondo, al menos a esta escala, presenta una baja incidencia en los resultados, a excepción de del tiempo de arribo y la amplitud de la primera onda. El mejor ajuste se obtiene para $n = 0.011$, el cual corresponde al valor recomendado para concreto bien terminado, que es el material reportado del tanque de pruebas. En las series de tiempo mostradas, y en la mayoría de las otras comparadas,

existe una tendencia a subestimar el flujo de momento, aunque la magnitud de la velocidad de flujo es normalmente bien estimada.

3. RESULTADOS

En las siguientes Figuras 5 a 10 se presentan las 5 condiciones iniciales junto con las alturas y magnitudes de velocidad de inundación para las 11 localidades estudiadas.

En la esquina superior derecha de cada imagen de condición inicial, se describen las localidades que se modelaron con cada una de dichas condiciones, cuya ubicación geográfica se indica mediante el correspondiente número en la imagen.

En general se observan inundaciones con una alta intrusión horizontal en áreas relativamente bajas, como la zona norte de Arica, La Serena y Talcahuano. Esto también se observa en desembocaduras de ríos y esteros. Un caso notable es la inundación de Quintero en la zona del estero Campiche y los bajos donde se ubica la base aérea; mismo efecto observado en el estero Marga Marga en Viña del Mar.

En Talcahuano se observa que, a diferencia de lo ocurrido el año 2010, ocurre una importante intrusión horizontal desde la bahía de San Vicente, motivada por un desplazamiento vertical cortical relevante frente a esas costas.

Respecto a las velocidades máximas, en general se observan valores entre a 2 y 6 m/s, con excepción de algunas situaciones puntuales, como el caso de Arica, que presenta velocidades superiores al rango anterior, en buena parte del dominio modelado, principalmente en la zona norte de la ciudad, la más inundada.

4. CONCLUSIONES

Se presenta una metodología de modelado de tsunami que considera dos escalas; una escala regional para modelar la propagación en aguas oceánicas y una escala local para modelar la inundación en el borde costero. Cada escala se modeló con el esquema numérico más idóneo a los fenómenos físicos asociados.

La importancia de la metodología planteada, radica en que se hace cargo de la necesidad de incorporar el efecto de edificaciones en la inundación de zonas urbanas, con el objetivo de simular con mejor resolución los complejos patrones de flujo esperables en un entorno con construcciones. Adicionalmente, la exclusión del dominio numérico de gran parte de la extensión de la ciudad a analizar hace posible alcanzar mayores resoluciones sin comprometer la operatividad del modelo, i.e. en tiempos de cálculo razonables. Este enfoque, y el modelo utilizado para llevarlo a cabo, fueron validados mediante comparaciones satisfactorias con datos de ensayos en un modelo físico a escala reducida.

A pesar del significativo avance que se estima que implica esta metodología, es evidente que el modelado matemático de inundación por tsunami aún presenta altas cuotas de

incertidumbre (sismológica, hidrodinámica, matemática), especialmente en casos de inundaciones urbanas, donde adicionalmente a la canalización por calles y avenidas, los procesos de erosión y transporte de sedimentos y escombros pueden ser muy relevantes.

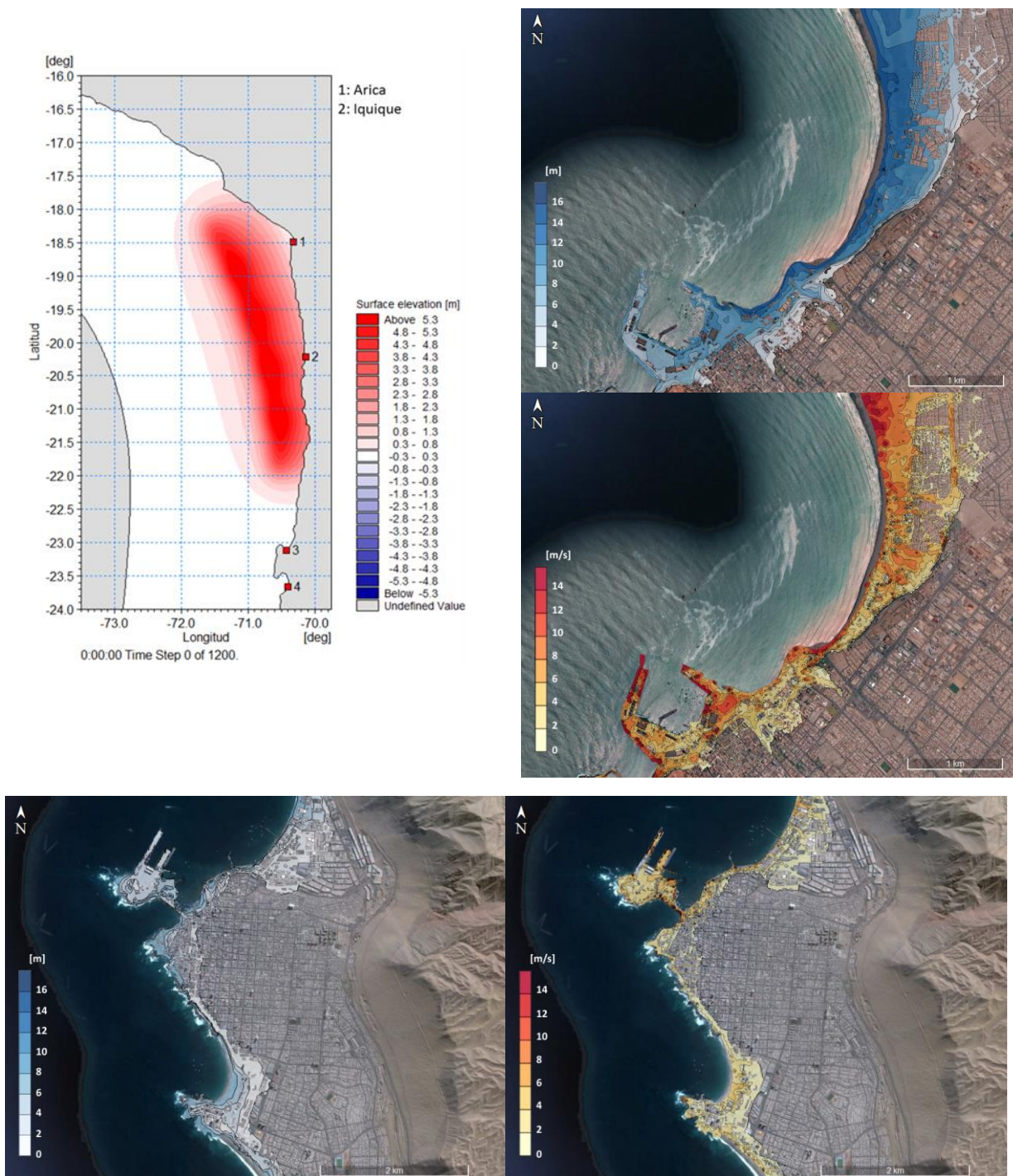


Figura 5. Condición inicial, altura de inundación y magnitud de velocidad para las localidades de Arica e Iquique.

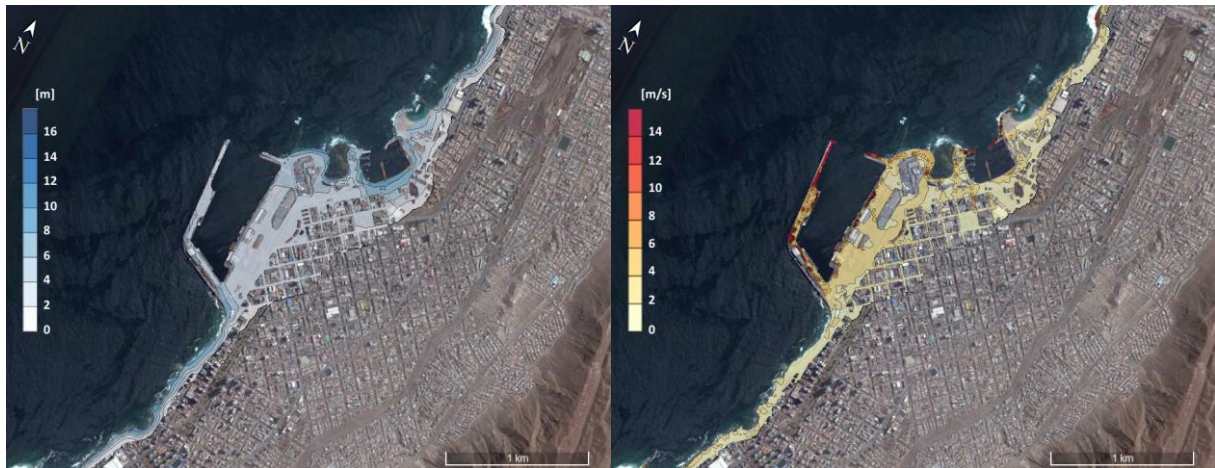
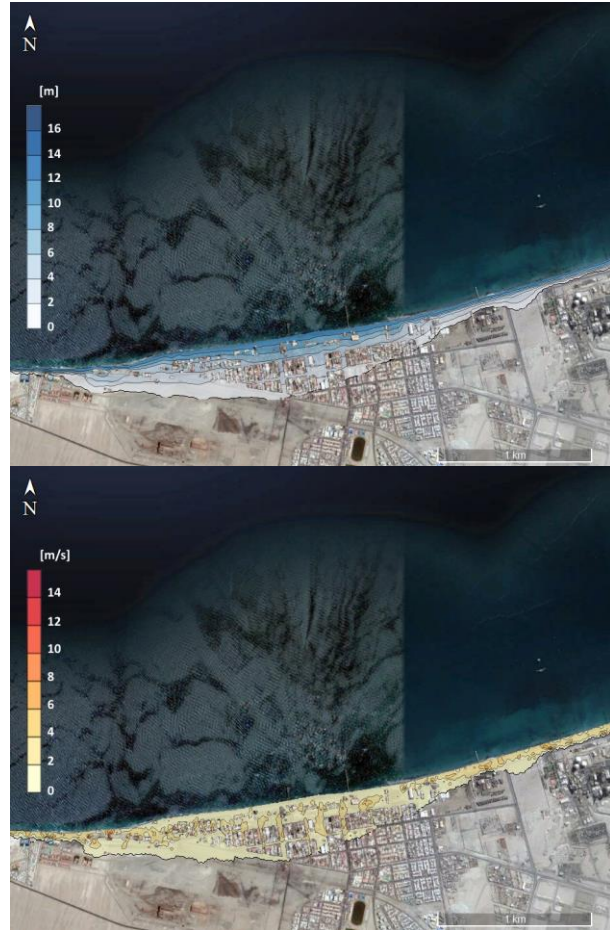
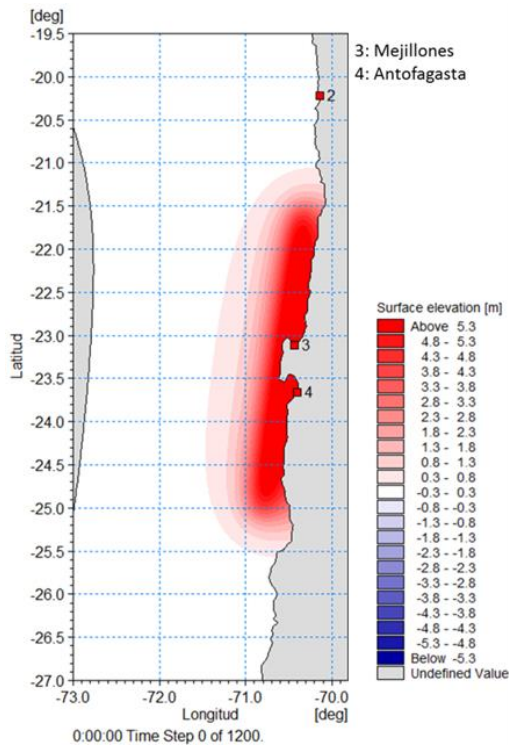


Figura 6. Condición inicial, altura de inundación y magnitud de velocidad para las localidades de Mejillones Antofagasta.

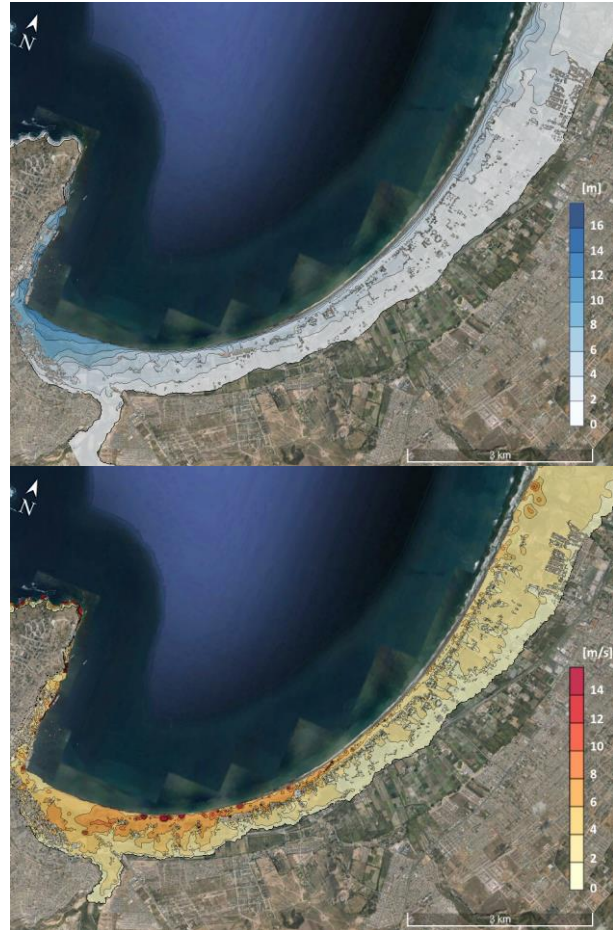
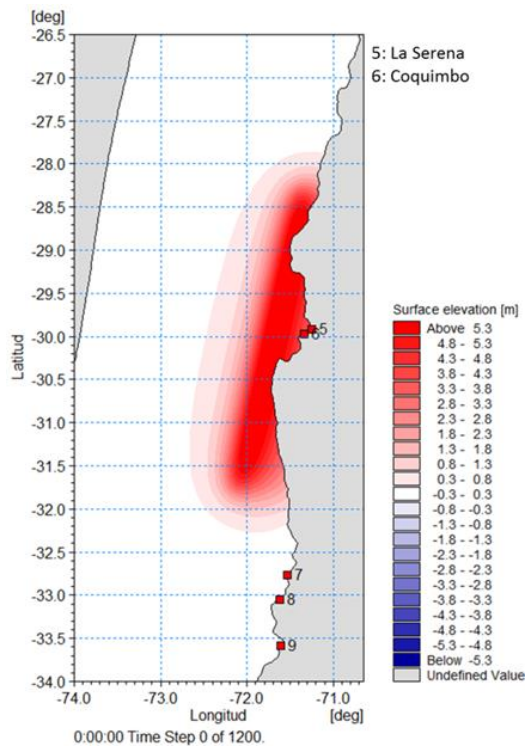


Figura 7. Condición inicial, altura de inundación y magnitud de velocidad para las localidades de La Serena y Coquimbo.

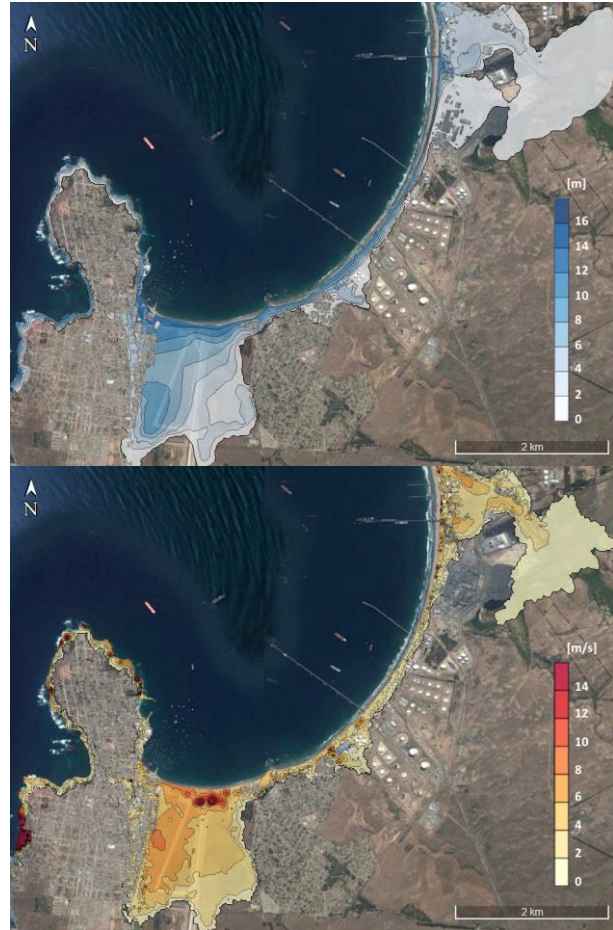
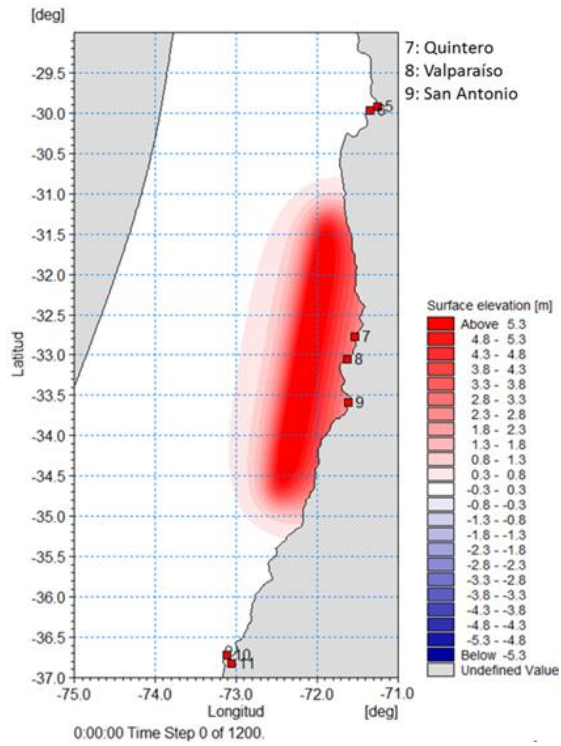


Figura 8. Condición inicial, altura de inundación y magnitud de velocidad para las localidades de Quintero y Viña del Mar.

REFERENCIAS

DHI. 2012. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module. Danish Hydraulics Institute, Denmark.

DHI. 2013. MIKE 21 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, User Guide. Danish Hydraulics Institute, Denmark.

GEBCO. 2009. The GEBCO_08 Grid, version 20091120. Retrieved Marzo 4, 2013, from http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/.

Jarvis, A., H. Reuter, A. Nelson, y E. Guevara. 2008. Hole-filled seamless SRTM data V4, available from <http://srtm.csi.cgiar.org>. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).

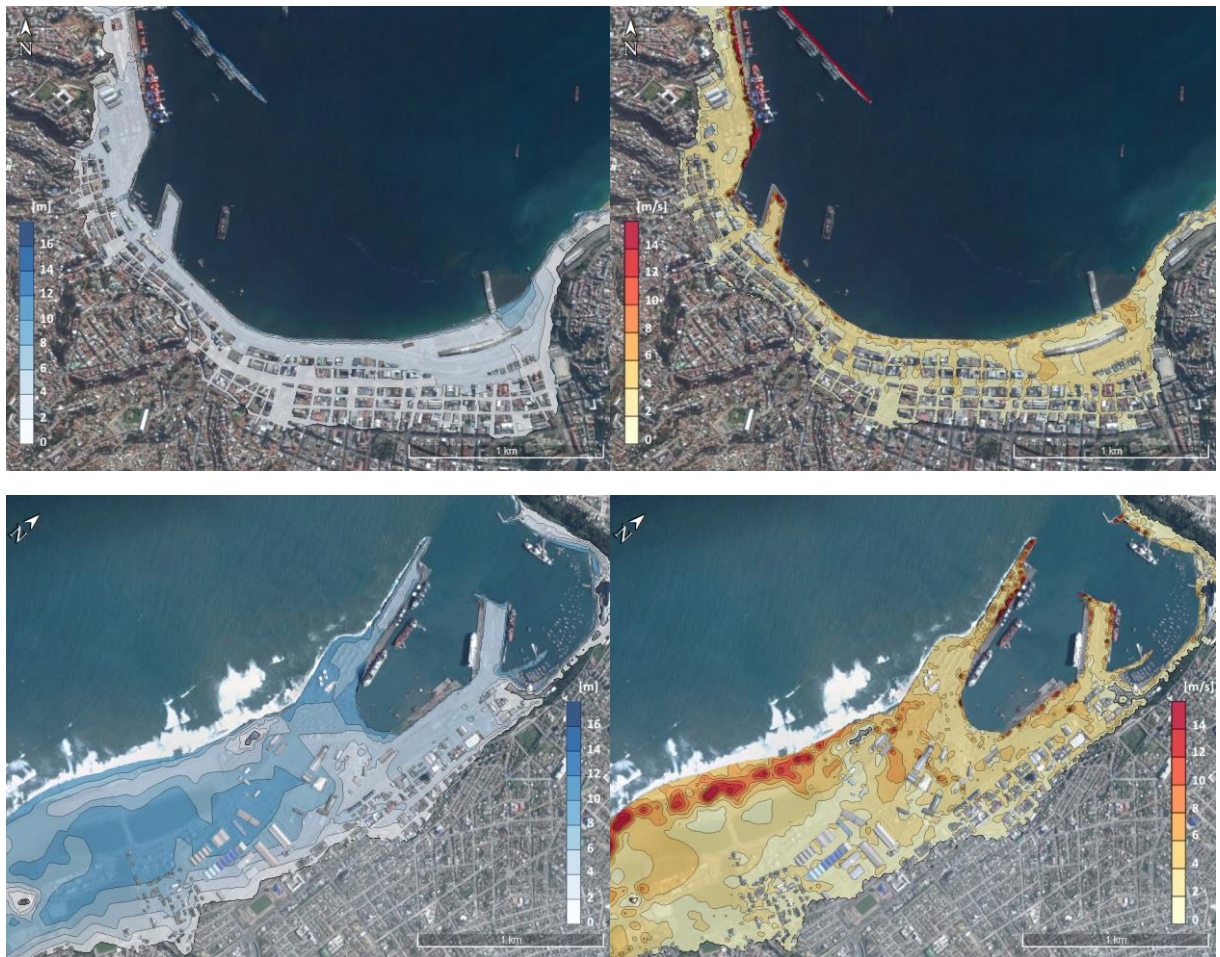


Figura 9. Altura de inundación y magnitud de velocidad para las localidades de Valparaíso y San Antonio.

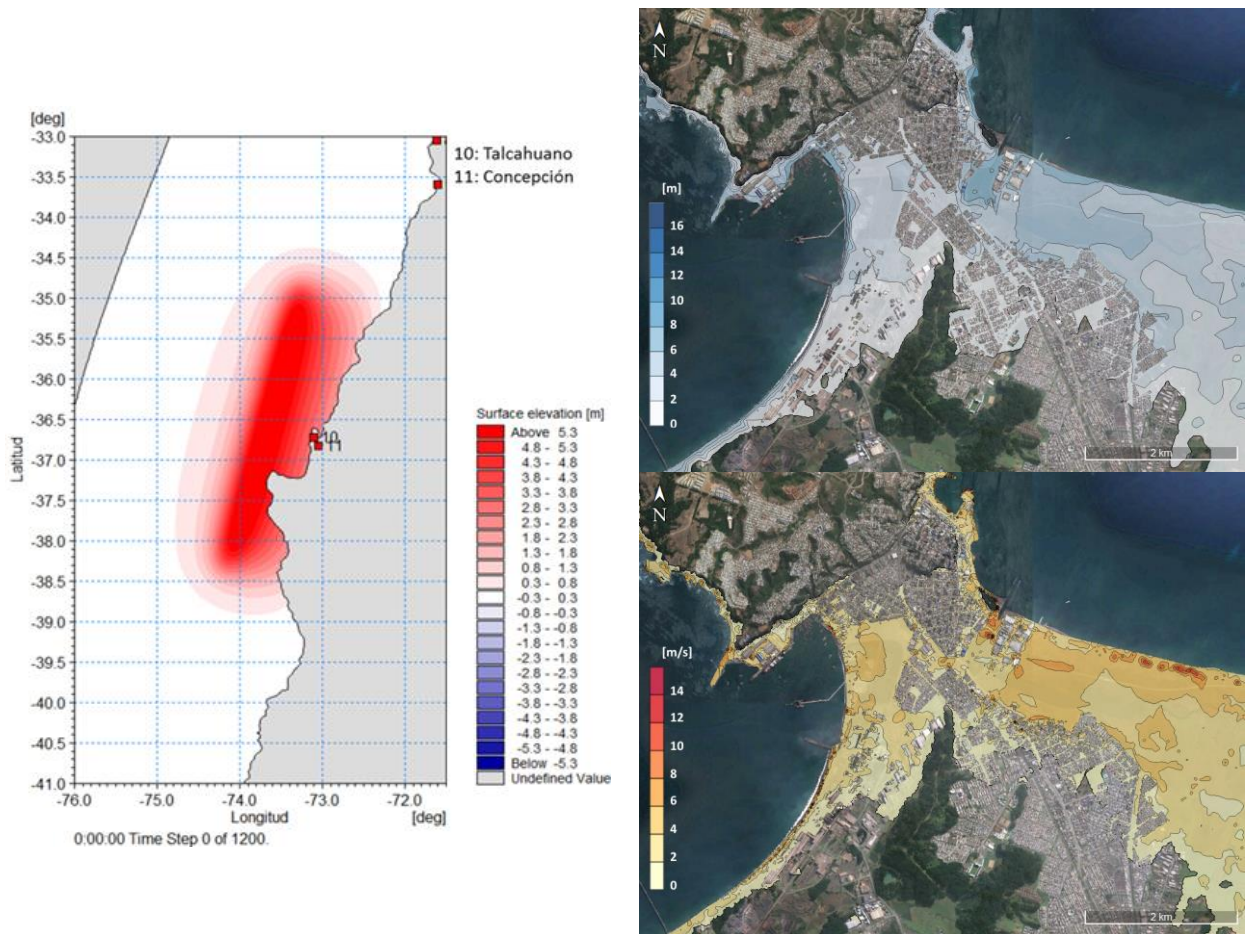


Figura 10. Condición inicial, altura de inundación y magnitud de velocidad para la localidad de Talcahuano.

Nielsen, O., D. Roberts, A. McPherson, y A. Hitchman. 2005. Hydrodynamic modelling of coastal inundation. MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia & New Zealand pp. 518-523.

Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4), 1135-1154.

Parl, H., D. Cox, P. Lynett, D. Wiebe, y S. Shin. 2013 “Tsunami Inundation Modeling in Constructed Environments: A Physical and Numerical Comparison on Free-Surface Elevation, Velocity, and Momentum Flux” Coastal Engineering v. 79, pp. 9-21. doi: 10.1016/j.coastaleng.2013.03.002.

SHOA. S/fecha. Planos de Uso del Borde Costero. I-21B, I-22A, II-19, II-20, II-31, II-32, IV-020, IV-021, IV-022, IV-023, IV-024, V-08, V-10, V-11, V-19, VIII-09, VIII-12, VIII-13, VIII-15, XV-02. Valparaíso, Chile.