

Estudio

Área de inundación por Tsunami Arica - 2015

Dr. Marcelo Lagos

GeoScience EIRL

Noviembre de 2015

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	2
2	OBJETIVOS	3
	2.1 Objetivo general	3
	2.2 Objetivos específicos	3
3	METODOLOGÍA	4
	3.1 Aplicación de escenario de peligro de tsunami	4
	3.2 Determinación de alturas máximas de tsunami	8
	3.3 Determinación de área de inundación máxima por tsunami	8
	3.4 Determinación de parámetros hidrodinámicos de inundación por tsunami	8
4	RESULTADOS	10
	4.1 Determinación de alturas máximas de tsunami en la costa	10
	4.2 Determinación de área de inundación máxima por tsunami	11
	4.3 Determinación de parámetros hidrodinámicos de inundación por tsunami	12
5	CONCLUSIÓN	18
	REFERENCIAS	19

1 INTRODUCCIÓN

Recientes tsunamis en Chile confirman su peligrosidad para asentamientos humanos costeros. Su magnitud e impacto se ha visto reflejado en los tsunamis ocurridos entre el año 2010 y 2015 (Lagos, et al. 2010; Lagos & Haro, J. 2011; Lagos, 2013; Lagos et al. 2014; Lagos & Fritz, 2014; Lagos & Fritz, 2015). Los hechos justifican la necesidad de comprender el peligro e incorporarlo en la planificación urbana de nuestras ciudades; con el fin de disminuir el riesgo para las urbanizaciones existentes y la exposición para los nuevos desarrollos urbanos.

Dada su localización y desarrollo urbano costero, la ciudad de Arica está expuesta al riesgo de tsunami. Hecho confirmado por su historia, como las grandes inundaciones producidas por los tsunamis de finales del siglo XIX. Como también eventos recientes, registrados en sus costas pero con menor magnitud.

En este contexto, el presente estudio actualiza y completa el área de inundación por tsunami en la zona costera de la ciudad de Arica, contenida en el límite urbano definido para la actualización de su nuevo Plan Regulador.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Actualizar y completar área de inundación por tsunami en la zona costera contenida en el límite urbano definido para la actualización del Plan Regulador de la Ciudad de Arica.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Determinación de alturas máximas de tsunami.

2.2.2 Determinación de área de inundación por tsunami.

2.2.3 Determinación de parámetros hidrodinámicos de inundación por tsunami.

3 METODOLOGÍA

3.1 Aplicación de escenario de peligro de tsunami

Se utiliza el potencial peor escenario descrito en el Diagnóstico de Riesgo de Tsunami en la Ciudad de Arica, realizado por Lagos (2014). Lo anterior justificado en dar continuidad al área de inundación por tsunami en el segmento norte y sur de la extensión del nuevo límite urbano de la ciudad. Los parámetros utilizados para modelar la condición inicial del tsunami se presentan en la Tabla 1.

El área de ruptura que da origen al tsunami, se localiza en la calma sísmica del norte de Chile. Representa el comportamiento potencial de un tsunami similar al ocurrido el 9 de mayo de 1877, producido por un terremoto magnitud (M_w) 9.0. Este escenario corresponde a una ruptura de 630 km de longitud, localizada entre las costas de Arica y el sur de Antofagasta, sobrepasando la barrera impuesta por la península de Mejillones.

Tabla 1: Parámetros macro-sísmicos utilizados para simular tsunami

Length, L (km)	Width, W (km)	Slip, u (m)	Strike, θ (deg)	Dip, δ (deg)	Rake, λ (deg)	Depth, H (km)	Lat*, (deg S)	Lon*, (deg W)	M_o^{**} (Nm)	M_w^{***}
630	150	15	359	19	90	10	24.3061	71.3118	4.2525×10^{22}	9.0

* Esquina SW

** M_o estimado con la relación $M_o = \mu u L W$. Módulo de rigidez (μ) = 30 GPa o $3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

*** M_w estimado utilizando la relación $M_w = \log M_o - 9.1 / 1.5$

Para simular el escenario de peligro de tsunami, se utilizó el código TUNAMI-N2 (Goto et al., 1997), modelo numérico ampliamente utilizado y validado con datos de recientes tsunamis (Dao & Tkalich, 2007; Sugawara & Goto, 2012; Lagos, 2012; Oishi et al. 2015).

El método incluye las ecuaciones de movimiento no-lineales para aguas someras, integradas verticalmente (1) y la ecuación de continuidad (2), sin el término de efecto Coriolis.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} MQ = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} NQ = 0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

en que: η = desplazamiento vertical de la superficie del agua por sobre el nivel de reposo, M y N = componentes verticalmente integradas del transporte entre unidad de ancho horizontal y vertical (flujo), g = aceleración de gravedad, $Q = (M^2 + N^2)^{1/2}$ = magnitud del transporte, D = profundidad total, y n es un coeficiente de fricción de fondo (*Manning*) que permite simular de forma diferenciada la rugosidad del fondo marino y la superficie inundada.

La condición inicial del tsunami se determina utilizando un modelo que supone una deformación instantánea de la superficie del océano idéntica a la deformación vertical del fondo marino (3).

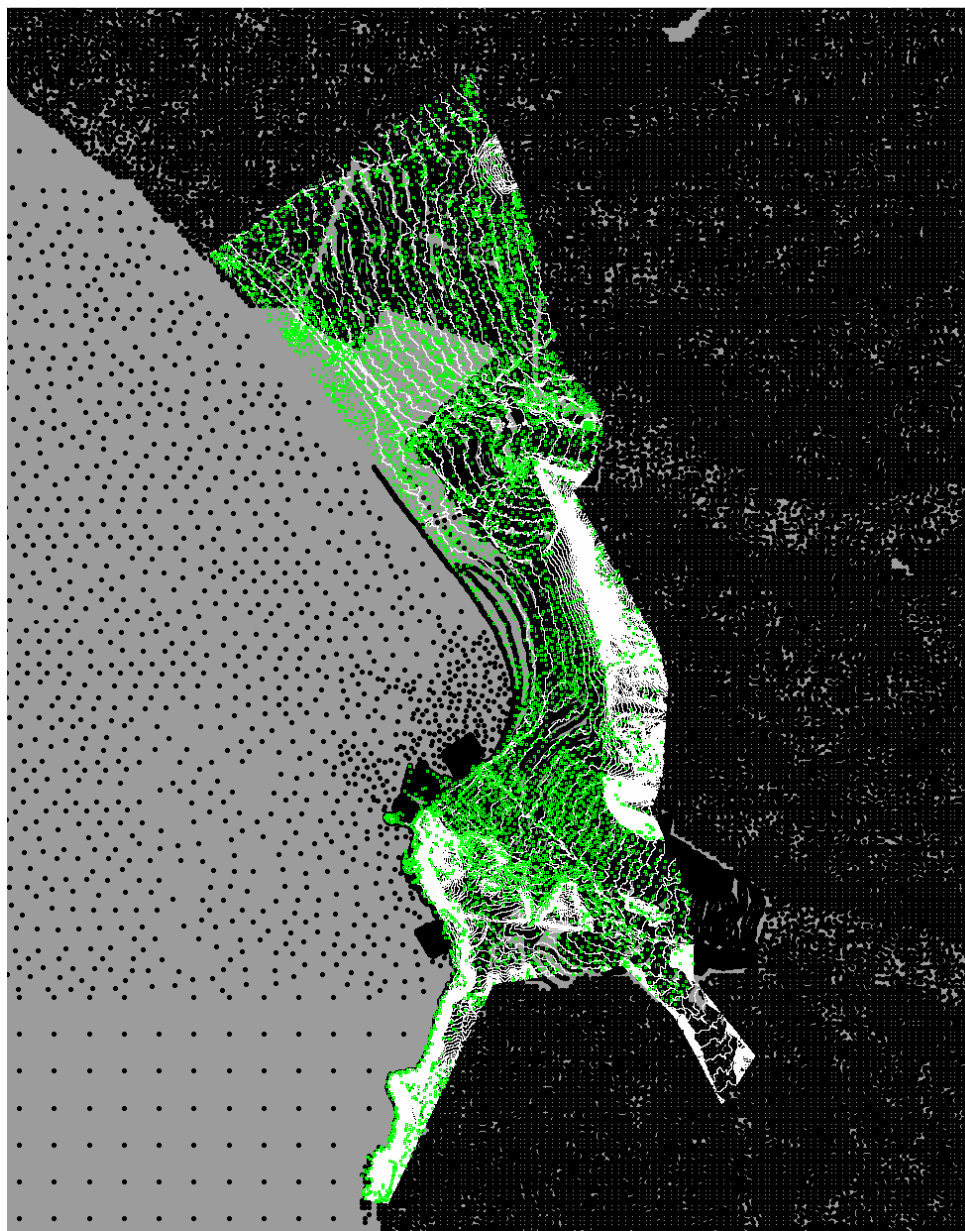
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \mu U \iint \left[\left(\frac{\partial \xi_1^2}{\partial \xi_2^2} - \frac{\partial \xi_1^2}{\partial \xi_3^2} \right) \sin 2\delta - \left(\frac{\partial \xi_1^2}{\partial \xi_2^2} + \frac{\partial \xi_1^2}{\partial \xi_3^2} \right) \cos 2\delta \right] d\xi_2 d\xi_3 \quad (3)$$

dónde: μ = constante elástica de Lamé $\approx 5 \times 10^{11}$ dynas/cm², U = deslizamiento del plano de falla, u_i = componentes de la magnitud de la dislocación, δ = ángulo de deslizamiento del plano de falla, y ξ_2 y ξ_3 = coordenadas espaciales horizontales del plano de falla.

La propagación del tsunami se modeló mediante el método de diferencias finitas que integra numéricamente las ecuaciones de aguas someras. La inundación de las zonas costeras se determinó empleando una condición de frontera móvil. El dominio de integración, se discretizó mediante un conjunto de grillas anidadas de diferente resolución espacial, siendo las más detalladas donde se espacializa la inundación producida por el tsunami. La máxima resolución espacial utilizada fue de un segundo (~ 30 metros).

Para generar el dominio de integración que sustenta la modelación numérica de tsunami, se elaboró un mosaico digital de información topográfica y batimétrica de alta resolución. Con énfasis en el emplazamiento de la ciudad de Arica. Para ello, se utilizó la información topográfica y batimétrica del Diagnóstico de Riesgo de Tsunami en la Ciudad de Arica (Lagos, 2014), reemplazando la topografía por datos actualizados del año 2015, levantados por el Servicio Aerofotométrico de la Fuerza Aérea de Chile (SAF), información facilitada por la consultora POLIS Arquitectura Urbana (Ver Figura 1).

Figura 1: Información topográfica y batimétrica disponible en Arica



La información topográfica y batimétrica del estudio de Lagos (2014) se presenta en color negro. La nueva topografía SAF (2015) se presenta en color blanco (curvas de nivel) y verde (cotas). Se observa la baja densidad de información batimétrica en el sector sur de la ciudad de Arica.

3.2 Determinación de alturas máximas de tsunami

Mediante técnicas de modelación numérica (ver punto 3.1), se determinaron las máximas alturas de tsunami esperadas en la costa. Esta información permite comprender el impacto potencial que tendrá un tsunami a gran escala. Particularmente en las costas de la Región de Arica y Parinacota, más allá del uso urbano de su borde costero.

3.3 Determinación de área de inundación máxima por tsunami

Mediante modelación numérica (ver punto 3.1 de la metodología) se definió el área máxima de inundación producida por tsunami en la ciudad de Arica. Para simular la rugosidad del terreno que se impone al flujo que inunda, la modelación utilizó un parámetro de fricción, expresado como un coeficiente de rugosidad de *Manning*, equivalente al de superficies ligeramente rugosas ($n = 0.025$).

El área resultante representa la zona que será potencialmente inundada, permitiendo diferenciar un umbral entre la seguridad y el riesgo. Las zonas inundadas se representan con las máximas alturas de tsunami referidas al nivel medio del mar.

3.4 Determinación de parámetros hidrodinámicos de inundación por tsunami

Considerando que la inundación producida por un tsunami presenta un comportamiento diferenciado, se determinó al interior del área potencial de inundación, los principales agentes de peligrosidad asociados a la inundación, estos parámetros hidrodinámicos son: I. Profundidad de la inundación; y II. Velocidad de la corriente.

Mediante técnicas de modelación (ver punto 3.1 de la metodología) se calculó a intervalos de un minuto, el comportamiento espacio-temporal de

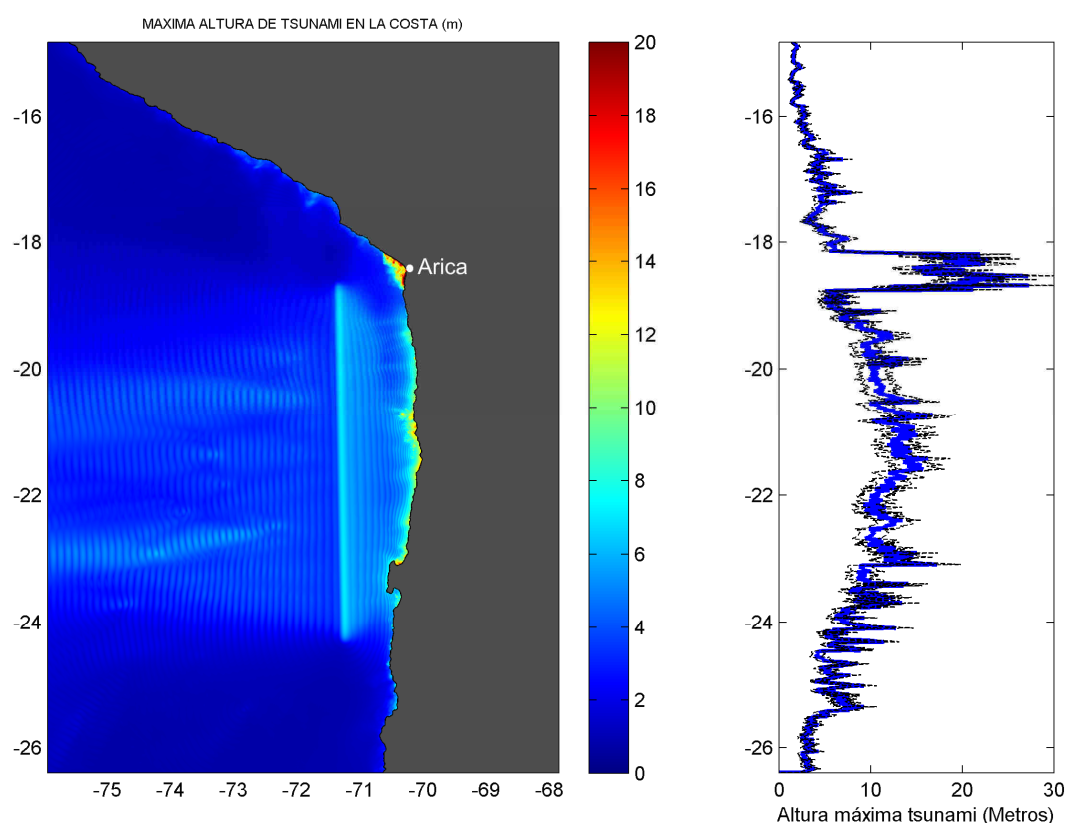
cada parámetro hidrodinámico por un total de seis horas. Luego, al interior del área de inundación, se determinó el máximo valor de profundidad de inundación (metros) y la máxima velocidad del flujo (m/s) registrados durante las seis horas de simulación para cada celda. Esta información fue la base para espacializar la amenaza de tsunami diferenciada.

4 RESULTADOS

4.1 Determinación de alturas máximas de tsunami en la costa

El escenario modelado registra alturas máximas de tsunami¹ peligrosas para la ciudad de Arica y su borde costero, alcanzando alturas superiores a 10 metros (Ver Figura 2). Particularmente al sur de Arica, en los sectores acantilados se registran alturas cercanas a los 20 metros, atenuándose su magnitud en dirección norte y sur.

Figura 2: Alturas máximas de tsunami en la costa

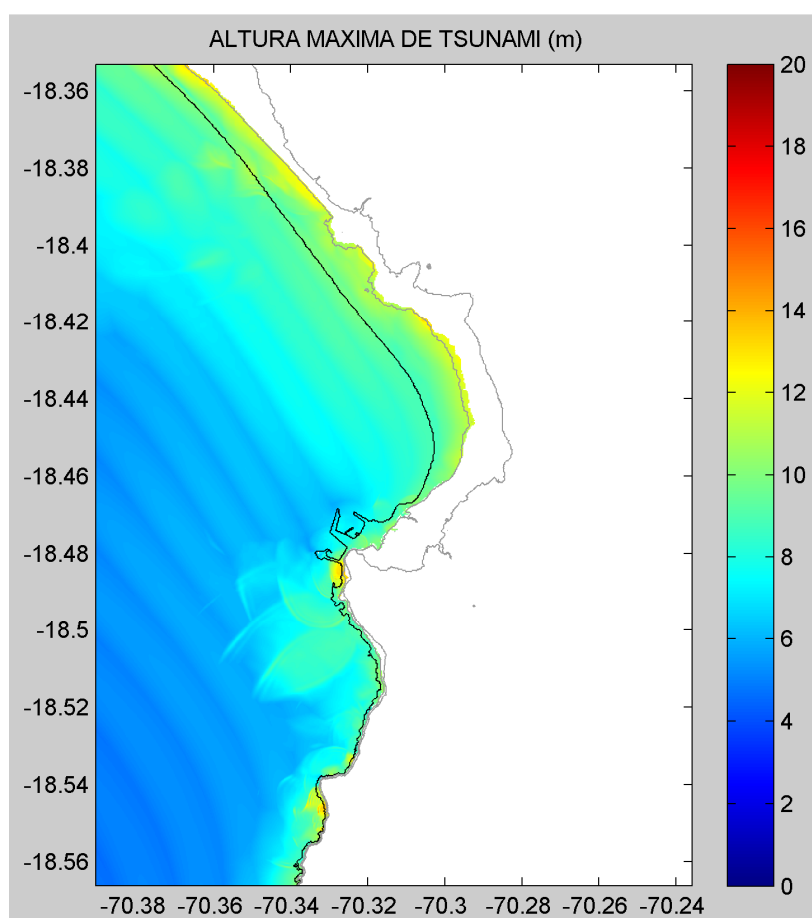


¹ Se debe destacar que las alturas máximas de tsunami obtenidas en la costa, no representan la máxima cota de inundación; generalmente, las alturas de un tsunami en el borde costero, se atenúan al inundar superficie seca. Sin embargo, en zonas costeras acantiladas, sí puede coincidir la máxima altura de un tsunami con la cota de inundación (Run-up).

4.2 Determinación de área de inundación máxima por tsunami

El borde costero de la ciudad de Arica presenta inundación por tsunami (Ver Figura 2). La inundación alcanza hasta los 10 metros sobre el nivel medio del mar; umbral que es parcialmente sobrepasado en puntuales lugares del sector norte de la ciudad, área que además concentra la mayor superficie de inundación, junto con la desembocadura del Río San José; sector portuario y centro histórico. Los sectores costeros bajos y estrechos localizados al sur del Morro de Arica, se inundan alcanzando alturas de tsunami similares pero en una menor superficie. Este patrón se mantiene hasta las cuevas de Anzota. La Ex – Isla Alacrán es cubierta por la inundación.

Figura 2: Áreas de inundación máxima por tsunami en Arica

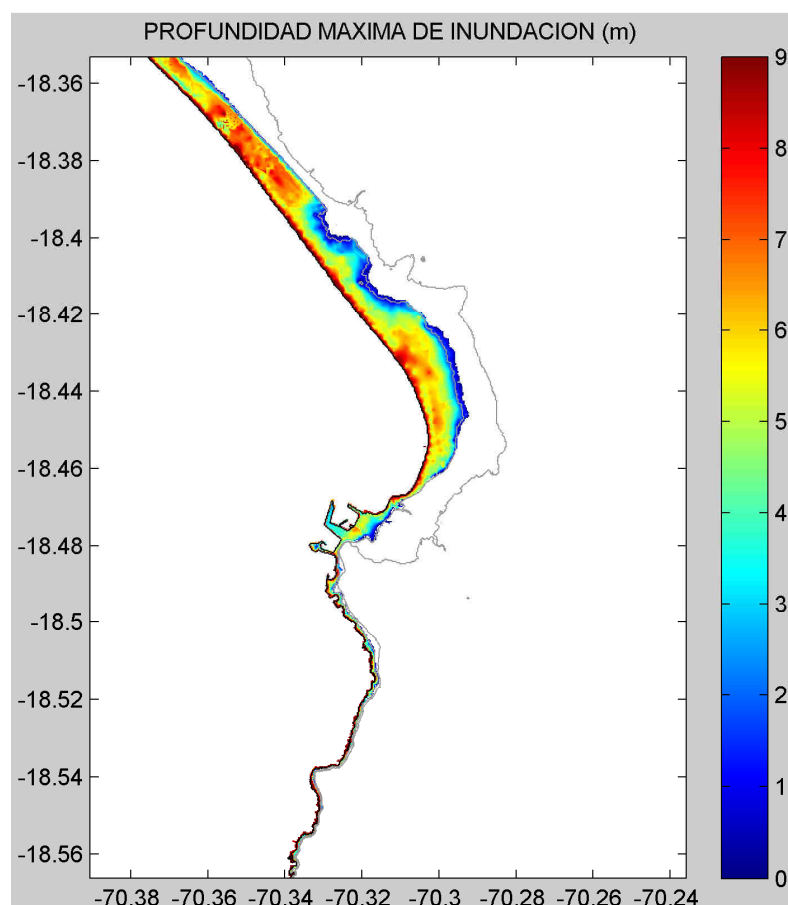


* Las curvas de nivel representan la altitud 10 y 30 metros respectivamente.

4.3 Determinación de parámetros hidrodinámicos de inundación por tsunami

Los parámetros hidrodinámicos máximos de profundidad de inundación y velocidad de la corriente, confirman la peligrosidad de la inundación resultante en la zona costera de la ciudad de Arica (Ver Figuras 3 a 8). Las máximas columnas de agua sobre el terreno se presentan en la costa alcanzando alturas superiores a los 8 metros. Columnas que gradualmente se atenúan a medida que avanza la inundación sobre las zonas costeras bajas.

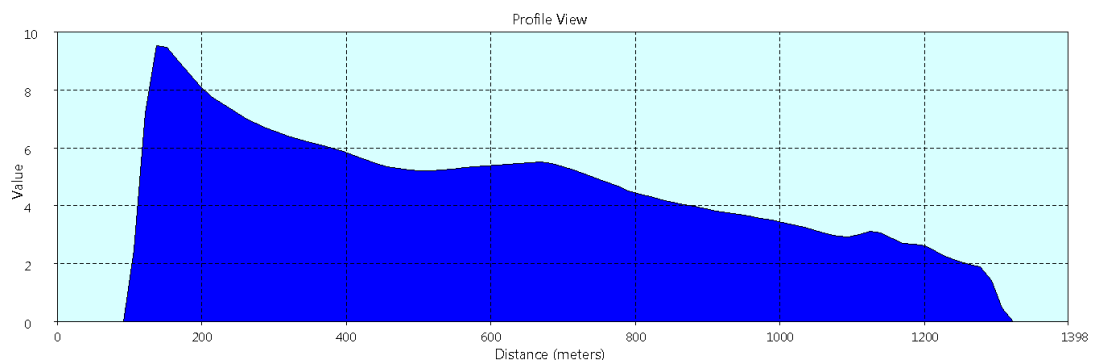
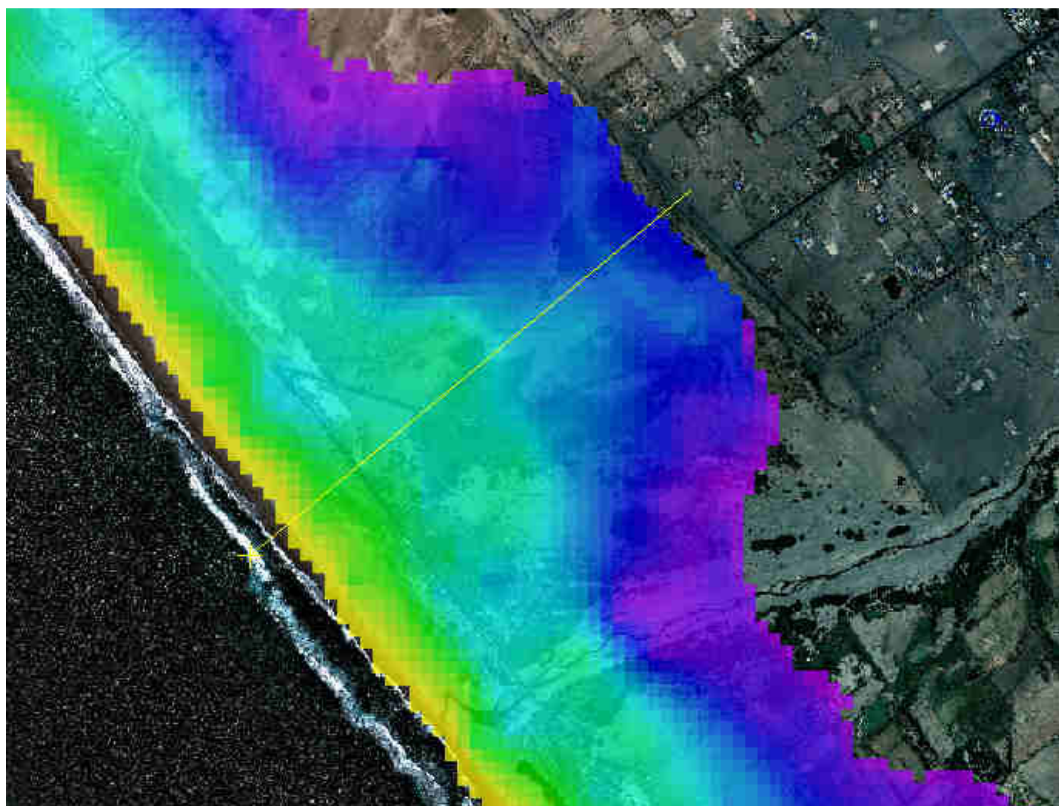
Figura 3: Profundidad máxima de inundación por tsunami en Arica



* Las curvas de nivel representan la altitud 10 y 30 metros respectivamente.

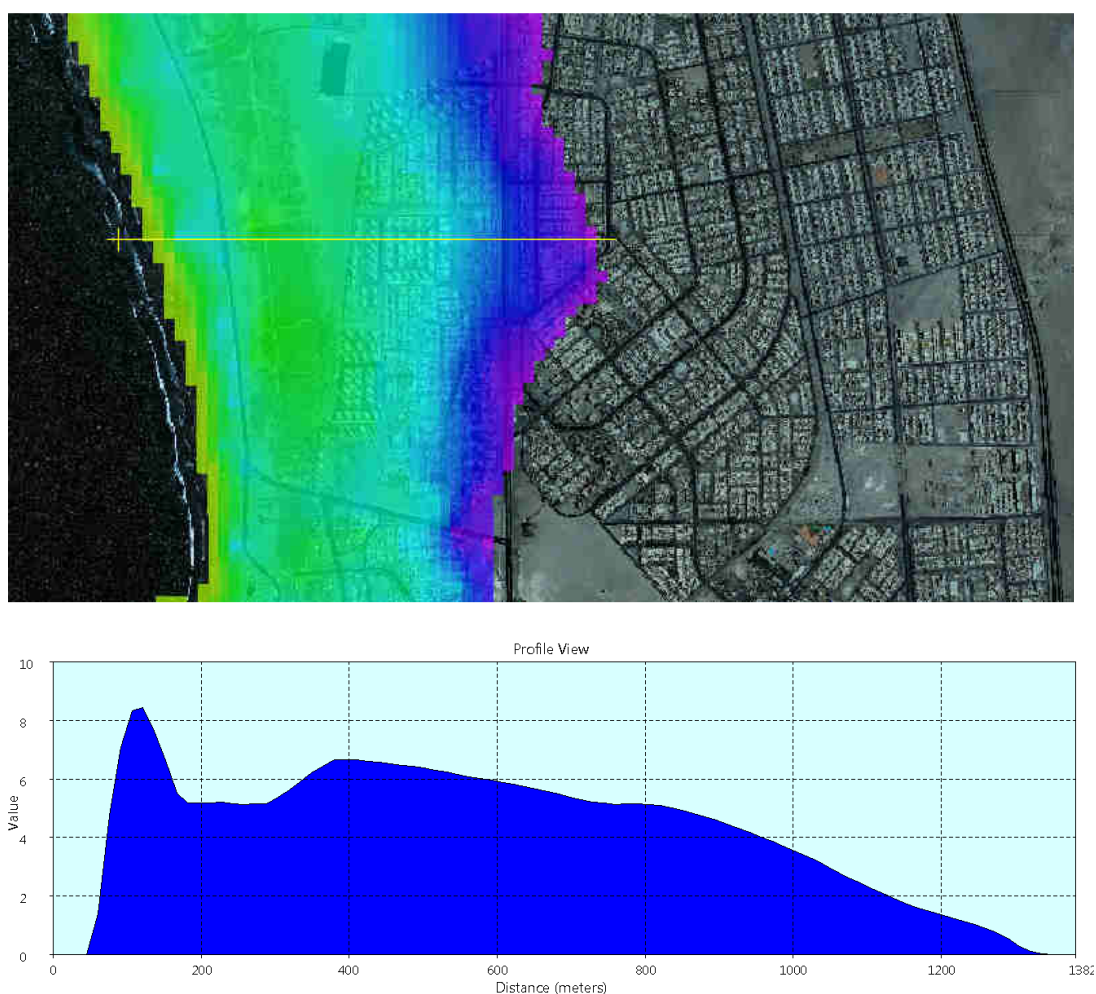
Al norte de la desembocadura del Río Lluta se inunda toda la zona costera hasta aproximadamente los 10 metros sobre el nivel medio del mar. Límite de inundación contenido por el escarpe presente en la zona interior paralelo a la línea de costa. Ejemplo de lo anterior se observa en el sector de Gallinazo (Ver Figura 4), donde la inundación alcanza su máxima extensión hasta la base del escarpe. En toda la zona de inundación las profundidades de inundación revierten un peligro alto para la vida de las personas.

Figura 4: Perfil de profundidad máxima de inundación sector Gallinazo



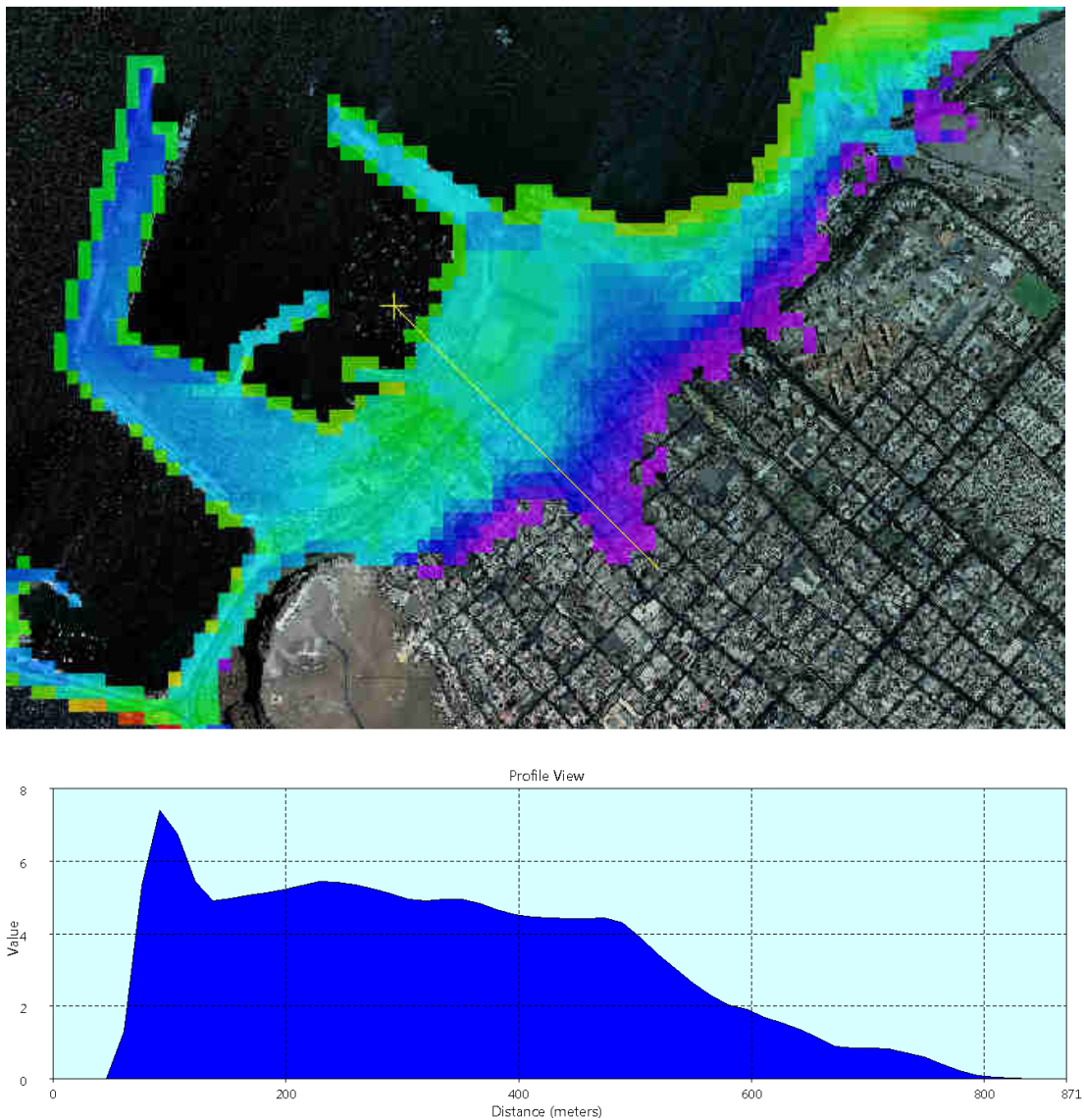
Al sur del Río Lluta hasta playa Las Machas, la inundación presentan un patrón similar, sin embargo, la no presencia del escarpe, combinado con la baja topografía implica el aumento de la superficie inundada (Ver Figura 5). La profundidad de inundación en la costa supera los 8 metros, atenuándose levemente en la depresión interdunaria. Los sectores urbanizados más cercanos a la costa, están expuestos a profundidades de inundación superiores a 5 metros, hecho que implica un peligro alto para los primeros dos pisos de edificaciones. La inundación sobrepasa la ruta 5, alcanzando magnitudes inferiores a los dos metros de profundidad de inundación. En toda esta zona, el uso de suelo residencial presenta profundidades de inundación por tsunami peligrosas para la vida de las personas.

Figura 5: Perfil de profundidad máxima de inundación sector Las Machas



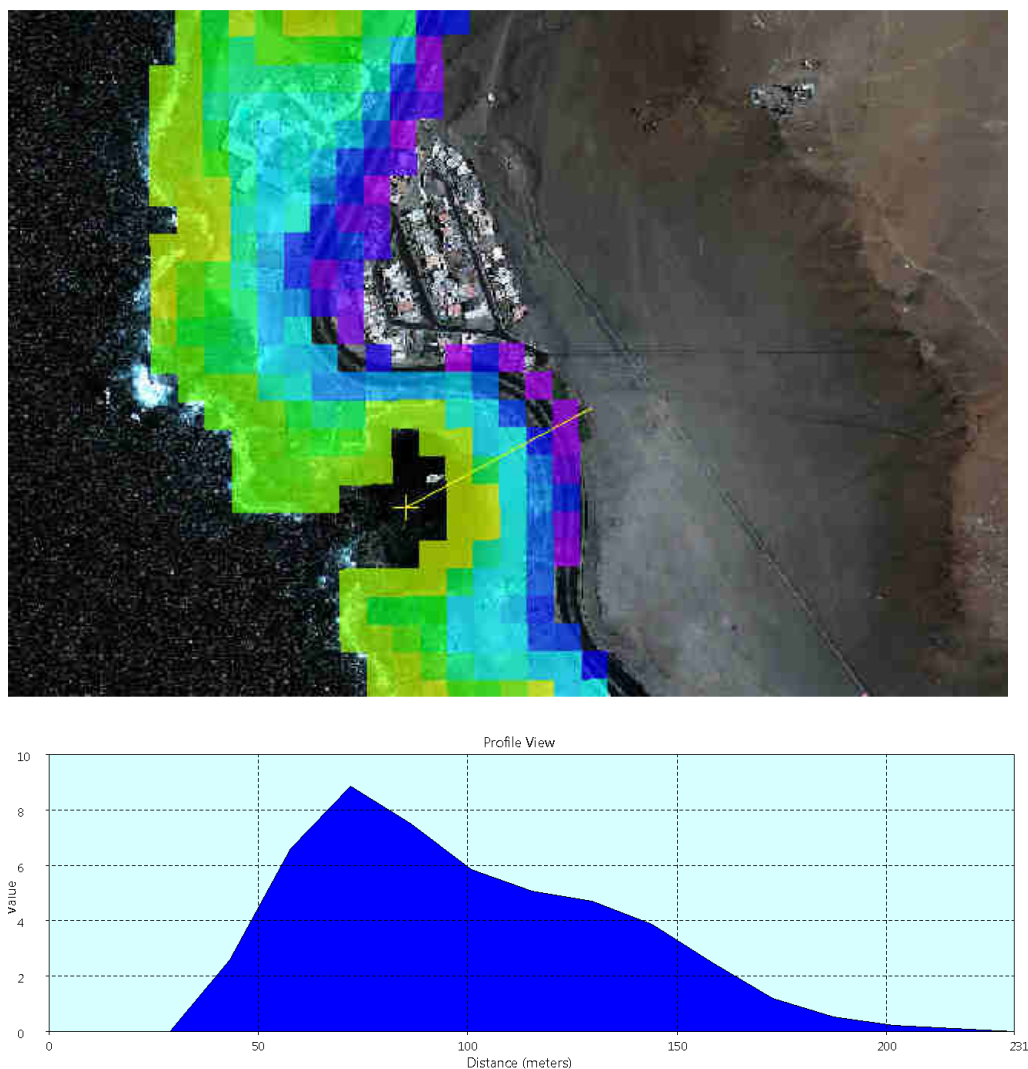
El sector portuario y centro de la ciudad, presenta inundación por tsunami. Las profundidades de inundación en la línea de costa son superiores a 7 metros, disminuyendo a 5 metros en los primeros 200 metros de inundación horizontal (Ver Figura 6). La inundación afecta parte importante del centro histórico de la ciudad, alcanzando el máximo de inundación horizontal por los ejes de calle Maipú y 18 de Septiembre. La inundación llega hasta la Iglesia San Marcos.

Figura 6: Perfil de profundidad máxima de inundación sector Puerto



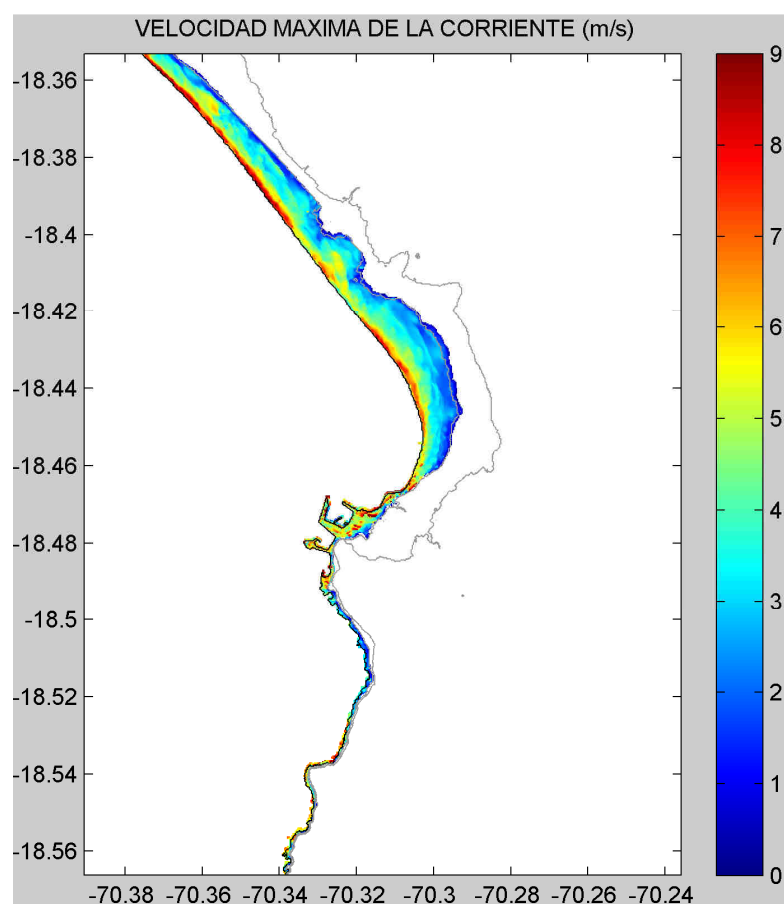
Al sur del Morro de Arica y hasta las cuevas de Anzota se presenta inundación por tsunami. La superficie afectada por inundación es menor debido a las características del relieve y el cambio abrupto de pendiente. Sin embargo, las profundidades de inundación alcanzan más de 8 metros en el borde costero, atenuándose linealmente su magnitud con la distancia horizontal de inundación (Ver Figura 7). El peligro es alto para las personas e infraestructura localizada en el borde costero.

Figura 7: Perfil de profundidad máxima de inundación sector La Lisera



Respecto las velocidades máximas de la corriente (Ver Figura 8), en todo el área de inundación este parámetro hidrodinámico es peligroso para la vida de las personas, sobrepasando los 2 m/s, a excepción de puntuales sectores cercanos a los límites máximos de inundación (*Run-up*). Las máximas velocidades se concentran en la línea de costa, destacando el sector al norte de la desembocadura del Río Lluta, playa las Machas, playa Chinchorro, sector portuario, ex - isla Alacrán y playa el Laucho. Al sur de este sector las velocidades se atenúan, sin dejar de ser peligrosas. Se debe destacar que los parámetros hidrodinámicos registrados en el sector portuario, confirman la posibilidad de transporte de embarcaciones y contenedores de gran envergadura por sobre los sectores urbanizados.

Figura 8: Velocidad máxima de la corriente por tsunami en Arica



* Las curvas de nivel representan la altitud 10 y 30 metros respectivamente.

5 CONCLUSIÓN

El escenario de peligro de tsunami evaluado en Arica, confirma el elevado nivel de exposición que posee su borde costero ante la permanente amenaza de tsunami. Se ha modelado un peor escenario creíble de inundación, similar al tsunami del 9 de mayo de 1877, evento de gran impacto en la fecha de su ocurrencia.

En las costas de Arica se registran alturas de tsunami que superan los 8 metros al nivel medio del mar, hecho que confirma un gran potencial de daño para infraestructura y peligro para las personas. Esta situación se confirma con la espacialización de los parámetros hidrodinámicos máximos profundidad de inundación y velocidad de la corriente, donde ambos presentan rangos de alta peligrosidad.

Todo lo anterior, valida la necesidad de incorporar el riesgo de tsunami en la planificación urbana de la ciudad de Arica, lo que implica tomar acciones que permitan disminuir el riesgo en las urbanizaciones existentes, y evitar la exposición de nuevos desarrollos urbanos en zonas de peligro de tsunami. La combinación de medidas estructurales y no estructurales de mitigación, son la alternativa para que la ciudad de Arica logre un desarrollo urbano riesgo-sustentable.

REFERENCIAS

- Dao, M; Tkalich, P. 2007. Tsunami propagation modeling - a sensitivity study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.7: 741-754.
- Goto, C; Ogawa, Y; Shuto, N; Imamura, F. 1997. Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. Paris: IUGG/IOC TIME Project Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides 35, 1997, Paris, 4 Parts.
- Lagos, M; Ramírez, M; Arcas, D; García, C; Severino, R. 2010. Magnitude and impact from the 2010 Chilean tsunami. *American Geophysical Union (AGU) Chapman Conference: Giant earthquakes and their tsunamis*. Scientific program pp. 29-30.
- Lagos, M; Haro, J. 2011. Magnitude and impact from the 2011 Tohoku Tsunami in the coast of Chile, Abstract NH23-1209813. 2011 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 5-9 Dec.
- Lagos, M. 2012. Tsunami risk zoning in South-Central Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*. 53: 7-21.
- Lagos, M. 2013. Desafíos y lecciones aprendidas de los recientes tsunamis en Chile y Japón, *GEOS Vol.33, nº1*: 190. Abstract SE05-2. Unión Geofísica Mexicana, A.C. Reunión Anual.
- Lagos, M; Schmauck, F; Carvalho, L; Lillo, I; Quense, J. 2014. Escenarios de riesgo de tsunami en el norte de Chile, Abstract SE09-7, Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, 2014. Puerto Vallarta, Jalisco, México (2-7 de noviembre, 2014).
- Lagos, M; Fritz, H. 2014. Field survey of the 1 April 2014 Iquique tsunami along the coasts of Chile and Peru, Abstract S21A-4398 presented at 2014 Fall Meeting, AGU, San Francisco, Calif., 15-19 Dec.
- Lagos, M. 2014. Diagnóstico de Riesgo de Tsunami en la Ciudad de Arica. Gobierno Regional de Arica y Parinacota y Oficina Regional de Emergencia. Código BIP 30118061-0. p. 140.
- Lagos, M; Fritz, H. 2015. Field Survey of the 16 september 2015 Illapel tsunami along the coast of Chile, Abstract SE04-10, Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana, 2015. Puerto Vallarta, Jalisco, México (2-7 de noviembre, 2015).
- Oishi, Y; Imamura, F; Sugawara, D. 2015. Near-field tsunami inundation forecast using the parallel TUNAMI-N2 model: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake combined with source inversions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, Issue 4: 1083–1091.
- Sugawara, D; Goto, K. 2012. Numerical modeling of the 2011 Tohoku-oki tsunami in the offshore and onshore of Sendai Plain, Japan. *Sedimentary Geology*, 2012. Disponible en Internet: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.08.002>