

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**ESTIMACIÓN DE DAÑOS POR TSUNAMI EN IQUIQUE, UTILIZANDO  
MODELACIÓN NUMÉRICA Y CURVAS DE FRAGILIDAD**

**LUISA URRÁ<sup>1</sup>**  
**ERICK MAS<sup>2</sup>**  
**RAFAEL ARÁNGUIZ<sup>3</sup>**  
**BRUNO ADRIANO<sup>4</sup>**  
**SHUNICHI KOSHIMURA<sup>5</sup>**

**RESUMEN**

El último terremoto que generó un tsunami de gran intensidad en la zona norte de Chile ocurrió en 1877 con una magnitud estimada de 8.8. El área de ruptura abarcó desde el sur de Arica hasta el norte de Antofagasta y registró alturas de inundación de hasta 10 m en Iquique. En el presente trabajo se modeló un escenario de similares características utilizando el código TUNAMI, sin embargo, la inundación en la costa no superó los 4 m y el flujo avanzó hasta una cota de terreno de 3m. Al incrementar los desplazamientos del primer escenario se obtiene un evento de  $M_w = 9.0$ , con el cual la inundación en la costa fue cercana a 7 m y el agua ingresó a la ciudad hasta una elevación ligeramente menor a 10 m. Posteriormente se estimaron los posibles daños que los escenarios mencionados anteriormente podrían ocasionar a las edificaciones de Iquique. Para ello se utilizaron los mapas de inundación, Sistema de Información Geográfica, clasificación de estructuras y curvas de fragilidad. Los resultados mostraron que el sector antiguo de la ciudad es el más afectado en ambos casos debido a la materialidad de sus construcciones, mayoritariamente de madera. La segunda zona con mayor probabilidad de daño es el sector central de Zofri, donde la elevación del suelo decrece y por ende se registran mayores profundidades de inundación.

---

<sup>1</sup>Asistente de Investigación, CIGIDEN

<sup>2</sup>Profesor Asistente, IRIDeS, Tohoku University - [mas@irides.tohoku.ac.jp](mailto:mas@irides.tohoku.ac.jp)

<sup>3</sup>Profesor Asistente, Depto. de Ingeniería Civil, UCSC. Investigador Asociado, CIGIDEN - [raranguiz@ucsc.cl](mailto:raranguiz@ucsc.cl)

<sup>4</sup>Candidato a PhD, IRIDeS, Tohoku University - [adriano@geoinfo.civil.tohoku.ac.jp](mailto:adriano@geoinfo.civil.tohoku.ac.jp)

<sup>5</sup>Profesor Titular, IRIDeS, Tohoku University - [koshimura@irides.tohoku.ac.jp](mailto:koshimura@irides.tohoku.ac.jp)

## 1. INTRODUCCIÓN

En la zona norte de Chile existe una brecha sísmica cercana a 140 años. La última gran ruptura tuvo lugar en 1877 con una magnitud estimada de 8.8 y una extensión que abarcó desde Arica hasta Antofagasta, producto de la cual se registraron alturas de inundación de 10 m en Iquique, sobre 11 m en Arica y Mejillones, y una máxima de 24 m en Tocopilla (Hatori, 1968).

Durante los últimos años han ocurrido sismos de menor magnitud en el extremo sur y en el sector norte de esta brecha. El primero de ellos tuvo lugar cerca de Tocopilla en 2007 con una magnitud de  $M_w = 7.7$ , y el segundo ocurrió en 2014 frente a las costas de Iquique con  $M_w = 8.1$ . Antes del terremoto de Iquique en 2014, diversos autores señalaban que la energía acumulada en la brecha era suficiente como para generar una ruptura de magnitud cercana a  $M_w = 8.8$  (Chlieh, et al., 2011; Yagi, et al., 2014). Debido a que la extensión de este evento fue menor a un tercio de la longitud total de ruptura esperada, aún es altamente probable que un sismo de gran magnitud se desencadene al norte o al sur de la reciente falla (Riquelme, et al., 2014), e incluso podría romper la porción oeste que no falló en 2014.

Chlieh, et al. (2011) propusieron un modelo para estimar el desplazamiento co-sísmico acumulado en la brecha desde 1877. Basándose en éste modelo, Yagi, et al. (2014) definieron un posible escenario sísmico considerando la extensión del evento de 1877 y el desplazamiento acumulado hasta justo antes del sismo de 2014.

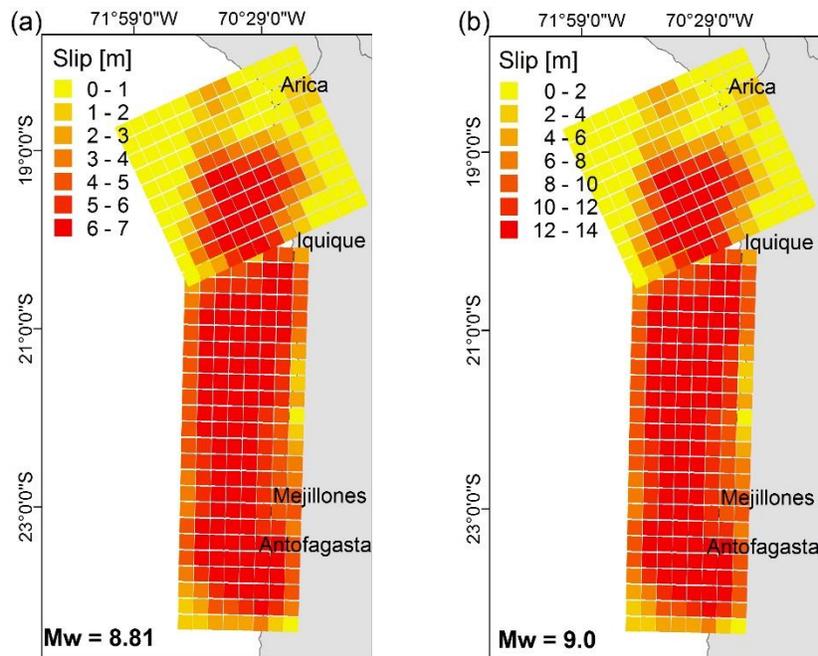
Por otro lado, en 2011 un gran terremoto y tsunami afectó la costa de Japón. Si bien un sismo de gran magnitud era esperado en esta área, el ocurrido superó la magnitud que se había previsto. Luego del evento, el Ministerio de Tierra, Infraestructura, Transporte y Turismo de Japón (MLIT) llevó a cabo numerosas encuestas de campo para registrar las profundidades de inundación en distintas localidades, el nivel de daño estructural de las edificaciones, y las características constructivas de estas (número de pisos, materialidad y ubicación). Utilizando el método de curvas de fragilidad desarrollada por Koshimura, et al. (2009), Suppasri, et al. (2012) procedieron a construir varios sets de curvas para analizar cuantitativamente el daño estructural en las zonas afectadas.

El objetivo del presente trabajo es aplicar una metodología básica e inicial para realizar una estimación de daño, utilizando modelación numérica de escenarios probables de ruptura, integrando las profundidades de inundación máxima con las características de las estructuras inundadas y extrayendo la probabilidad de daño del set de curvas de fragilidad seleccionadas. Para ello, se ha escogido Iquique como área de estudio debido a la inundación que registró en el evento de 1877, su población cercana a 200.000 habitantes, lo antiguas que son muchas de las viviendas en la zona céntrica y a la influencia que posee en la economía tanto Regional como Nacional gracias al turismo, la pesca, los derechos de puerto libre y el gran centro comercial “Zofri”.

En el segundo capítulo se detallan los escenarios de ruptura, así como los parámetros y dominios utilizados en la modelación numérica. El tercer capítulo explica la construcción y aplicación de curvas de fragilidad como método de estimación de daños, y concluye mostrando las curvas y la clasificación de estructuras que se utilizarán. El capítulo número cuatro expone los resultados de éste trabajo, y finalmente, el capítulo número cinco redacta las principales conclusiones.

## 2 ESCENARIOS DE RUPTURA Y MODELACIÓN NUMÉRICA

Basados en el terremoto de 1877 y al desplazamiento intersísmico estimado hasta la fecha, Yagi, et al. (2014) propuso un escenario de ruptura con plano heterogéneo, de magnitud  $M_w = 8.81$  y desplazamiento interplaca máximo cercano a 7.25 m, el cual abarcaría aproximadamente desde Arica hasta Antofagasta. Debido al corto registro de historia sísmica que se posee, es difícil conocer si el área de ruptura de 1877 podría poseer periodos de retorno mucho mayor que los supuestos, como ocurrió con Japón en el año 2011. Por ello, se presenta un segundo evento de estudio, el cual corresponde a una modificación del primer escenario propuesto, pero con un incremento del slip tal que la magnitud del sismo es ahora de  $M_w = 9.0$ . Los escenarios poseen 335 subfallas de  $20 \times 20 \text{ km}^2$  (Figura 1). El ángulo Strike de las subfallas del segmento norte es  $336^\circ$ , mientras que en el segmento sur es de  $2^\circ$ . Se consideraron ángulos Dip y Rake constantes para todas las subfallas de  $20^\circ$  y  $90^\circ$ , respectivamente.



**Figura 1.** Modelos de ruptura. a) Evento  $M_w=8.81$ . b) evento magnitud  $M_w=9.0$ .

Se asume que la deformación en la superficie de agua ocurre de manera instantánea y es idéntica a la deformación del fondo oceánico, la cual se estimó utilizando la formulación de Okada (1985).

A este cambio de elevación de la superficie de agua se le conoce normalmente como “Condición Inicial” y representa la perturbación que utilizan los modelos numéricos para realizar tanto la propagación por el océano, como la posterior inundación de las ondas del tsunami.

La modelación numérica del tsunami se realizó con el código TUNAMI, el cual utiliza la teoría lineal de onda larga sin fricción de fondo en aguas profundas, considerando despreciable la aceleración vertical de las partículas y por consiguiente el movimiento vertical no tiene efecto en la distribución de presiones. En aguas someras calcula con las ecuaciones de movimiento no lineal integradas verticalmente y en tierra modela la inundación con la ecuación de run up.

Se utilizaron 5 mallas anidadas con resolución espacial de 810, 270, 90, 30 y 10 m desde el 1<sup>er</sup> al 5<sup>to</sup> dominio. La topobatimetría se construyó a partir de información obtenida de GEBCO, con cartas náuticas, batimetría de detalle y topografías LIDAR de 2m de resolución. El modelo TUNAMI trabaja con datos de batimetría positiva y topografía negativa, por ello los dominios se presentan con dichos valores (Figura 2). Se consideró además una resolución temporal constante de 0.2 seg que se refleja en un número de Courant constante de 0.5. Por último, se trabajó con una rugosidad de 0.025 para el fondo oceánico y en tierra se cambió por un Coeficiente de Manning de 0.04 (Kotani, et al., 1998).

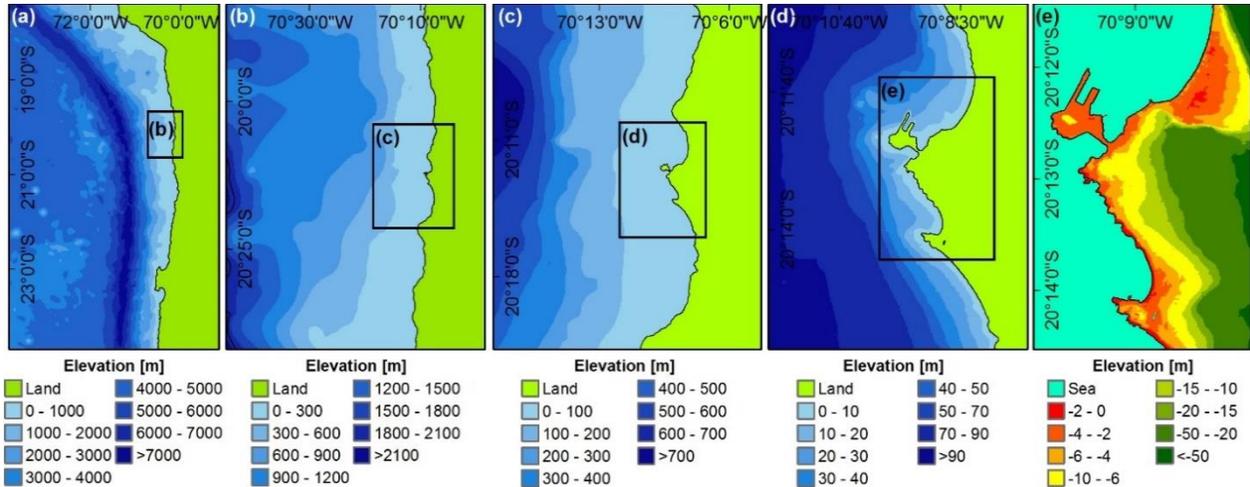


Figura 2. Dominios utilizados en la modelación numérica.

### 3 CURVAS DE FRAGILIDAD

Las curvas de fragilidad son distribuciones de probabilidad Normal (1) o Lognormal (2) que se utilizan para estimar el daño en una localidad luego del impacto de un tsunami Koshimura, et al. (2009).

$$P_D(x) = \Phi \left[ \frac{x-\mu}{\sigma} \right] \quad (1)$$

$$P_D(x) = \Phi \left[ \frac{\ln x - \mu'}{\sigma'} \right] \quad (2)$$

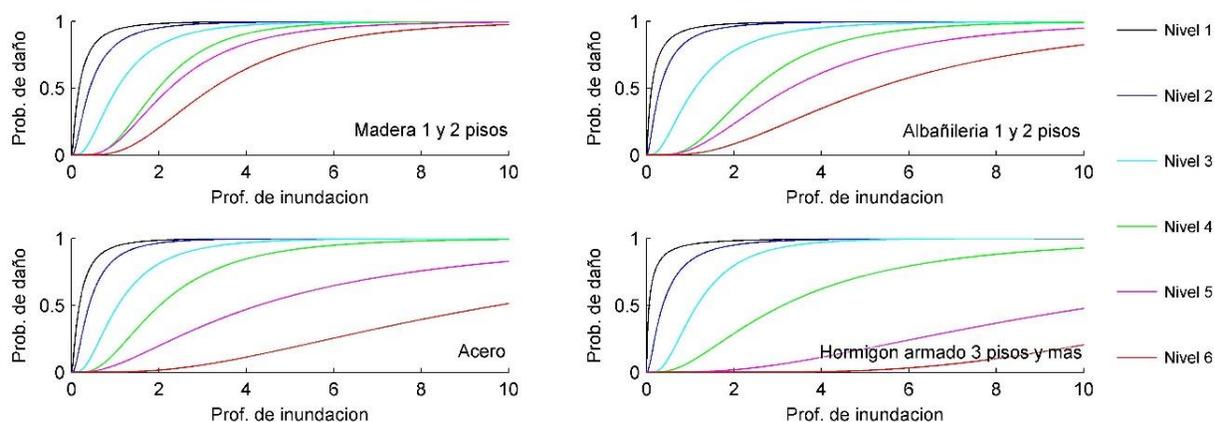
Donde  $\Phi$  representa la función de distribución estandarizada,  $x$  es una variable hidrodinámica (la máxima profundidad de inundación, velocidad o fuerza hidrodinámica) y  $(\mu, \sigma)$  o  $(\mu', \sigma')$  corresponden a la combinación de media y desviación estándar de  $x$  o  $\ln x$  respectivamente.

De manera muy resumida, la construcción de una curva de fragilidad requiere de 5 pasos:

- Clasificación del nivel de daño de cada una de las estructuras dentro de la zona inundada.
- Distribución de las profundidades de inundación máximas. Normalmente con modelación numérica.
- Correlación en GIS de la profundidad de inundación máxima que afectó a cada una de las estructuras.

- Probabilidad de daños discreta considerando rangos y tamaños de muestra similar.
- Análisis de regresión por el método de mínimos cuadrados para obtener el valor de media y desviación estándar que mejor se ajustan.

Para estimar los posibles daños estructurales que podría provocar un tsunami en la zona Norte de Chile, se aplicarán a Iquique el set de curvas desarrolladas por Suppasri , et al. (2012) para el Gran Terremoto y Tsunami de Japón en 2011 (Figura 3). Estas curvas son resultado de una extensa evaluación de daños post-tsunami considerando la materialidad de las construcciones al momento del registro. Se observó que la materialidad de las edificaciones en la costa de Japón es similar a la que se encuentra en Iquique, por lo que sería posible agruparlas en las categorías utilizadas en la confección de las curvas.



**Figura 3.** Curvas de fragilidad del Gran Terremoto y Tsunami de Japón en 2011. Fuente: Suppasri et al.

**Tabla 1.** Descripción de cada nivel de daño presente en las curvas de fragilidad del Gran Terremoto y Tsunami de Japón en 2011 (Suppasri , et al., 2012).

Nivel de daño	Clasificación	Descripción	Condición
1	Menor	No hay daño estructural, posiblemente solo inundación menor	Se podría usar inmediatamente después de una limpieza
2	Moderado	Daño menor en elementos no estructurales	Posible usar después de una reparación moderada
3	Mayor	Daño mayor en muros pero no en columnas	Posible usar después de reparaciones mayores
4	Completo	Daño mayor en muros y columnas	Posible usar después de reparación completa
5	Colapso	Daño destructivo en muros (más del 50% de la densidad de muros) y varias columnas (flectadas o destruidas)	No reparable, o gran costo de re-equipamiento
6	Arrasado	Estructura removida de su posición original, sólo las fundaciones permanecen.	No reparable, requiere reconstrucción total.

Estas curvas se construyeron con los seis niveles descritos en la Tabla 1, sin embargo, sólo se utilizará la curva “Arrasado” para analizar la probabilidad que existiría de que las estructuras

presenten una destrucción total dejando sólo los cimientos, versus la posibilidad de que estas sobrevivan, independientemente del nivel de daño que presenten.

La curva “Arrasado” de cada categoría corresponde a una distribución de probabilidad LogNormal con los parámetros indicados en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros estadísticos de la Curva de daño “Arrasado”

Material	N° de pisos	Media	Desv. Estandar
Madera	1 - 2	1.1733	0.5756
Albañilería	1 - 2	1.6583	0.6913
Hormigón armado	≥ 3	2.7121	0.4966
Acero	-	2.2790	0.7362

La clasificación de estructuras en Iquique se realizó hasta una cota cercana a 10 m, pues sobre ella la inundación es nula o demasiado leve. El nivel de detalle en un comienzo consideraba en categorías distintas las edificaciones de 1 piso de aquellas que contaban con dos niveles, y en una tercera categoría estaban las que poseían tres niveles o más, sin embargo, en los resultados de las curvas de fragilidad se observó que el nivel de destrucción en edificaciones de un mismo grupo de materialidad no varía significativamente si estas cuentan con uno o dos niveles, pero sí influye que estas posean 3 niveles o más (Suppasri , et al., 2012). Por ello, la clasificación de estructuras en Iquique considera sólo 4 grupos (ver Figura 4):

- Edificaciones de Madera de 1 o 2 niveles.
- Edificaciones de Albañilería de 1 o 2 niveles.
- Edificaciones de Hormigón Armado de 3 o más niveles.
- Bodegas o estructuras Metálicas, no considera niveles.

Las combinaciones restantes, por ejemplo, Edificaciones de madera de tres niveles o más, no se encontraron presentes en Iquique o la cantidad de ellas era casi nula, lo que no permitió considerarlo como una categoría.

Para asignar el nivel de daño, primero debe extraerse en GIS la máxima profundidad de inundación a cada una de las estructuras. Individualmente dentro de cada categoría se deben ordenar estos valores de manera decreciente, luego dividir cada categoría en muestras de similar tamaño y rango y obtener la mediana de cada una de ellas (Figura 5-a).

La curva se utilizará para determinar el porcentaje de estructuras, en cada una de las muestras, que poseen la mayor probabilidad de ser arrasadas. Para ello, por cada muestra se ingresa a la curva con el valor de la mediana (profundidad de inundación) obteniendo una probabilidad de daño, con éste valor se estima el número de edificios que serán catalogados como “Arrasado” (Figura 5-b), y se asigna a aquellos que registraron la mayor profundidad de inundación (Figura 5-c).

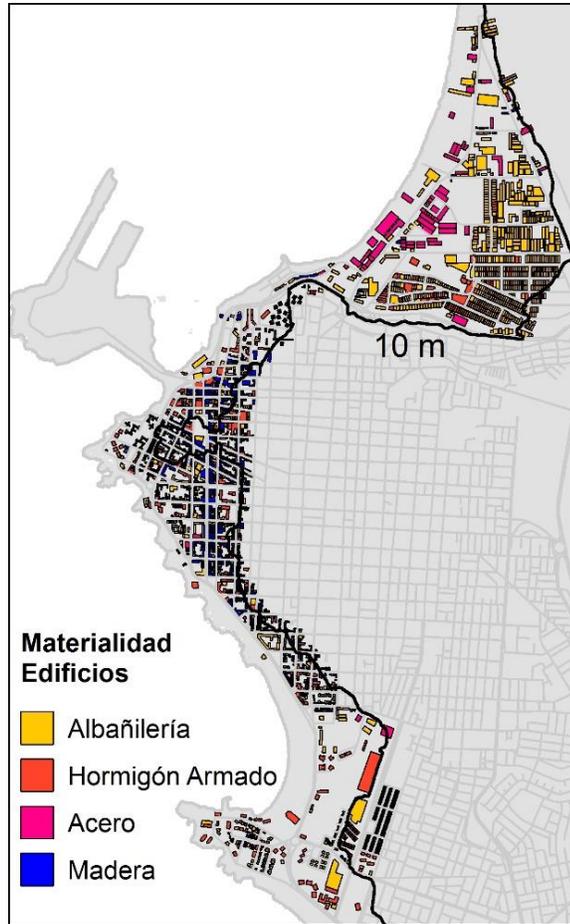


Figura 4. Clasificación de estructuras en zona inundable de Iquique.

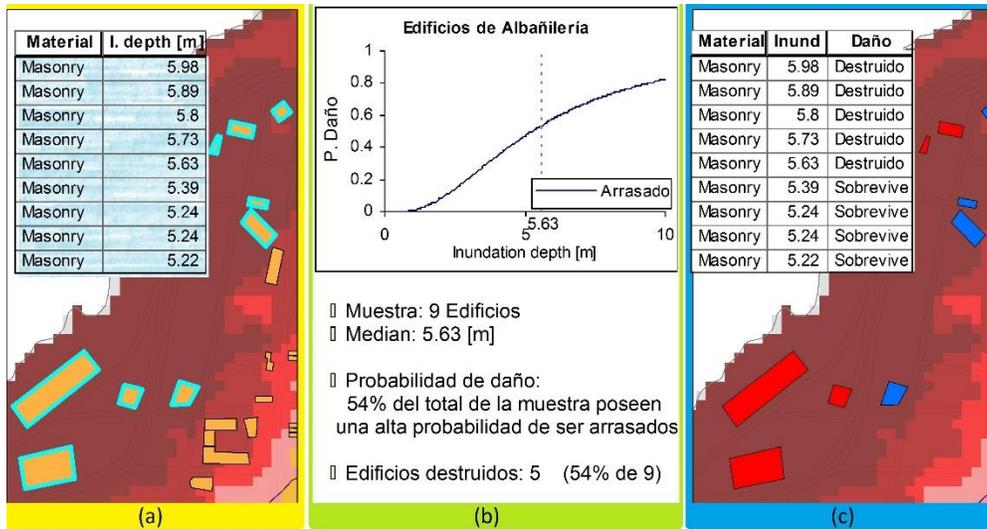
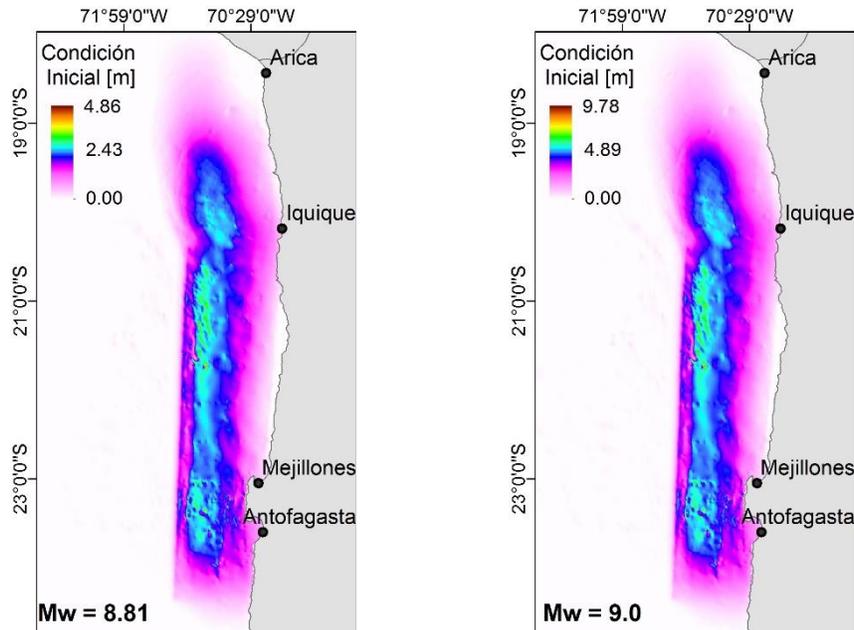


Figura 5. Pasos para asignar el nivel de daño más probable a cada estructura. (Sólo como ilustración)

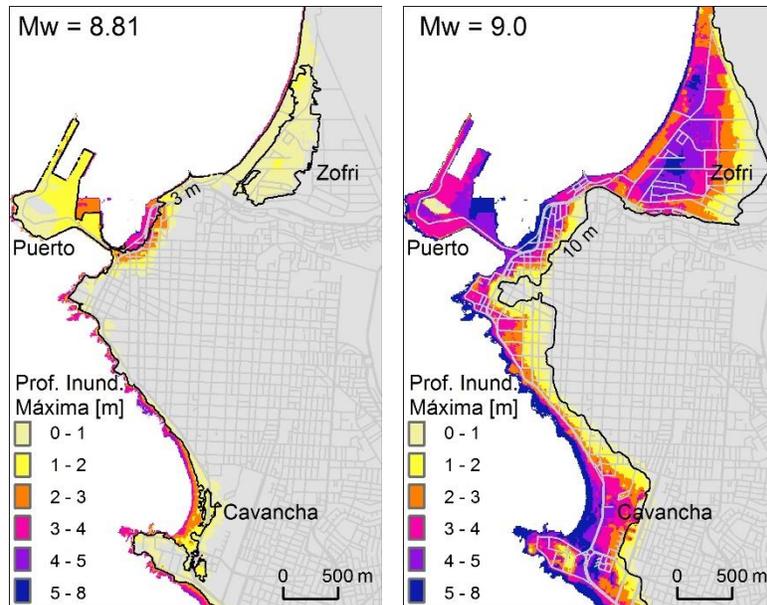
## 4 RESULTADOS

La Figura 6 muestra la deformación inicial de la superficie del mar para ambos escenarios analizados. Se observa que la máxima elevación de la superficie de agua para el escenario de  $M_W = 8.81$  alcanza una altura de 4.86 m, aunque sólo corresponde al resultado de algunas sub-fallas puntuales, por lo que si se considera una deformación máxima más extensa esta sería cercana a los 3m (Figura 6-a). Del mismo modo, para el escenario de  $M_W = 9.0$  ocurre exactamente lo mismo, en que la máxima deformación puntual alcanza los 9.78 m en contraste con los 7 m que correspondería a una máxima de mayor extensión espacial (Figura 6-b).



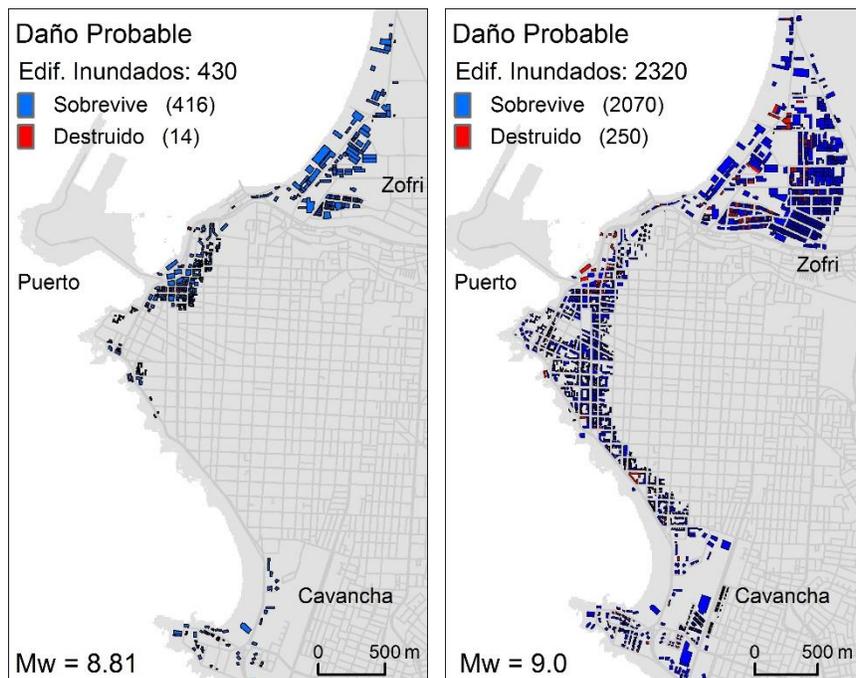
**Figura 6.** Deformación inicial de la superficie del océano para el escenario propuesto por Yagi (a) y para el escenario potenciado (b)

En la Figura 7-a es posible observar que el escenario  $M_W = 8.81$  registra alturas de inundación máxima en la línea de costa de 4m. Provoca además profundidades de inundación de medio metro en Zofri, ingresando alrededor de 400 m y afectando un área cercana a 55 hectáreas. El puerto se ve más afectado por la inundación en el sector norte, con profundidades que varían desde 2.5 m en el borde hasta 1.5 metros en el centro, que corresponde a la zona de mayor elevación. En Cavancha el agua ingresa cerca de 200 m, inundando principalmente la playa. Por el contrario, el escenario  $M_W = 9.0$  (Figura 7-b) genera una altura de inundación de 7 m a lo largo de la línea de costa. En el área central de Zofri se registra profundidades máximas de 5 m. El agua ingresa una distancia de 900 m y afecta aproximadamente 120 hectáreas. Es posible observar que el puerto se inunda completamente con profundidades que van desde 3.5 m a 5.5 m. Al Sureste del puerto, entre Zofri y Cavancha se ubica la zona antigua de Iquique, compuesta principalmente por casa de madera y adobe, y con algunos edificios recientes de hormigón armado. Aquí la pendiente del suelo es favorable, llegando a una cota de 10 m en tan solo medio kilómetro, distancia en la cual la inundación decrece desde 7 m hasta alrededor de 3 m. En Cavancha las profundidades también decrecen hasta 2 m en una distancia de 0.5 km.



**Figura 7.** Profundidades de Inundación Máximas en Iquique para el escenario original (a) y el modificado (b).

De la estimación de daños para el primer escenario se observa que aproximadamente 430 edificios estarían dentro de la zona inundada, de los cuales 14 poseen una alta probabilidad de ser arrasados por el flujo. Todos ellos corresponden a edificios de madera ubicados en el sector antiguo de Iquique, al Sureste del Puerto (Figura 8-a). Para el segundo escenario, el número de estructuras inundadas y el nivel de daño estimado aumentan significativamente. Las pérdidas se concentran en la línea de costa, en la zona central de Zofri y en el sector antiguo de la ciudad. Un poco más de 1200 edificios de albañilería serían impactados por el agua, de los cuales 140 serían arrasados (11%). Las construcciones de madera inundadas serían alrededor de 630, siendo arrasadas 100 (16%). No se observan edificios de hormigón armado que fuesen completamente destruidos (Figura 8-b).



**Figura 8.** Distribución de daño en edificios afectados por la inundación del escenario  $M_W = 8.81$  (a) y para aquellos afectados por el escenario  $M_W = 9.0$  (b)

## 5 CONCLUSIONES

Utilizando el modelo numérico TUNAMI, se modelaron dos escenarios de ruptura que cubren la brecha sísmica en la zona norte de Chile. El primero de ellos fue propuesto por Yagi en 2014 (2014) y posee una magnitud de  $M_W = 8.81$ . El segundo escenario posee la misma extensión que el primero y un desplazamiento mayor, alcanzando una magnitud de  $M_W = 9.0$ .

La inundación que podría generar el escenario  $M_W = 8.81$  alcanza una profundidad cercana a 4 m a lo largo de la línea de costa, disminuyendo a una media de 0.5 m en el centro de Zofri, y de 3 m al ingresar al sector antiguo de la ciudad y a Cavancha. Por su parte, el escenario  $M_W = 9.0$  podría registrar una inundación de 7 m a lo largo de la línea de costa y disminuir a una media de 5 m en el centro de Zofri, y de 6 m al interior del sector antiguo de la ciudad y Cavancha. Si se utiliza el nivel medio del mar como referencia, es posible afirmar que el primer escenario podría inundar en promedio hasta la cota 3 m, muy por debajo de la inundación hasta la cota 10 m que alcanzaría el segundo evento ( $M_W = 9.0$ ).

En cuanto al daño, es posible concluir que el porcentaje de edificios destruidos con respecto a la cantidad total de estructuras inundadas sería cercana a un 3% para el primer caso, siendo únicamente viviendas de madera las que sufrirían este tipo de daño. Por su parte, el segundo evento registraría una destrucción cercana a 11%, de los que un 6% corresponderían a estructuras de albañilería, y los restantes a viviendas de madera.

Finalmente, independiente de la magnitud de inundación, el sector antiguo de Iquique presenta un alto nivel de daño estructural debido a la naturaleza de sus construcciones. Zofri se ve muy afectada en el centro debido a las características topográficas que posee, pues luego de la línea de costa la pendiente incrementa rápidamente hasta los 4 m, desde donde comienza a disminuir hasta una elevación cercana a 2 m en su punto más bajo (ver Figura 2-e).

En este análisis no se consideró el tipo de uso de las estructuras (viviendas, escuelas, comercio, etc.), sin embargo, existe una diferencia en el impacto que traería consigo la destrucción de una vivienda en comparación con la destrucción de una escuela o de un patrimonio histórico. Es por ello que sería posible sugerir distintas recomendaciones. Por ejemplo, en el caso de edificios y patrimonios históricos que podrían sufrir daños producto de una inundación (Palacio Astoreca, Museo histórico Militar, Teatro Municipal), la finalidad de una reconstrucción post-tsunami estaría enfocada en recrear sin alteraciones estas estructuras, por lo que un catastro detallado antes de que ocurra un evento sería necesario. Viviendas de madera o albañilería cerca de la costa no son recomendadas, por lo que modificaciones al planeamiento urbano así como mejoras estructurales son una buena alternativa. Por otro lado, las instituciones que posean registro escrito sin respaldo digital deberían optar por guardar esta información en los niveles superiores del edificio para prevenir la pérdida de documentos importantes. Finalmente, el área central de Zofri

se caracteriza por las múltiples bodegas de albañilería que se encuentran, las cuales podrían ser reformadas a estructuras de hormigón armado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece de manera especial al Proyecto JICA – SATREPS Chile y a CIGIDEN. Se agradece también a la Dirección de Obras Portuarias, DOP, por facilitar batimetrías de detalle de Iquique.

## **REFERENCIAS**

Chlieh, M. et al., 2011. Interseismic coupling and seismic potential along the Central Andes subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 116(B12405), pp.1-21.

Hatori, T., 1968. Study on distant tsunamis along the Coast of Japan. Part 2, tsunamis of South American origin. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Issue 46, pp. 345 - 359.

Koshimura, S., Namegaya, Y. & Yanagisawa, H., 2009. Tsunami Fragility – A New Measure to Identify Tsunami Damage –. *Journal of Disaster Research*, pp. 479-488.

Kotani, M., Imamura, F. & Shuto, N., 1998. Tsunami run-up simulation and damage estimation by using geographical information system, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol .45, pp. 356-360.

Okada, Y., 1985. Surface deformation of shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 1135 –1154.

Riquelme, S. et al., 2014. Continuing megathrust earthquake potential in Chile after the 2014 Iquique earthquake. *Nature Letters*, Volume 512, pp. 295 - 298.

Suppasri , A. et al., 2012. Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, Vol. 66, Issue 2, pp. 319-341.

Yagi, Y., Takahashi, . T., Okumura, Y. & Aránguiz, R., 2014. Tsunami hazard estimation: Case of iquique, in *Seminar on Disaster Mitigation for Earthquake and Tsunami Countries of Latin America*, s.l.: s.n.