

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN DEL DAÑO ECONÓMICO A LA INFRAESTRUCTURA
RESIDENCIAL DE LA COMUNA DE MEJILLONES ANTE UNA INUNDACIÓN
POR TSUNAMI**

JOAQUÍN MORIS B.^{1 2}
GONZALO BRAVO O.³
JUAN GONZALEZ C.^{2 4}

RESUMEN

En este artículo se evalúa el daño económico de la infraestructura de la zona urbana de la comuna de Mejillones que podría provocar un tsunami generado por un sismo Mw 9,0. La simulación del tsunami se realiza con un sistema de mallas anidadas con el modelo NEOWAVE. Se utilizan curvas de fragilidad para estimar la probabilidad de daño en función de la profundidad de inundación máxima. Las curvas de fragilidad se utilizan en conjunto con el avalúo fiscal de la construcción de cada bien raíz para analizar la potencial pérdida económica en términos absolutos y porcentuales. Los resultados indican que aproximadamente se podrían perder unos 15 mil millones de pesos chilenos, lo que es equivalente a aproximadamente un 30% del avalúo de la construcción de las propiedades ubicadas en la zona de Mejillones. El orden de magnitud de estas cifras es independiente de las curvas de fragilidad utilizadas. Se plantean ideas de trabajo futuro para robustecer los resultados encontrados, como por ejemplo la inclusión de factores sísmicos en futuras investigaciones y la realización de un análisis estocástico que considere variabilidad en los parámetros del sismo utilizado para generar la simulación del tsunami.

¹ Académico, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte - email: joaquin.moris@ucn.cl

² Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN).

³ Estudiante de pregrado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte – email: gonzalo.bravo@alumnos.ucn.cl

⁴ Carrera de Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello - email: juan.gonzalez.carrasco@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El arribo de tsunamis en zonas urbanas es una amenaza costera significativa, cuyo impacto puede resultar en pérdida de vidas humanas y daños a infraestructura. En los últimos 20 años han ocurrido devastadores tsunamis en toda la zona del Cinturón de Fuego del Pacífico (Suppasri et al., 2012; Davis et al., 2012; Fritz et al., 2011). En particular, el Tsunami de Chile en 2010 dejó una pérdida económica total estimada en 30 mil millones de dólares estadounidenses (Khew et al., 2015). Se espera que las ciudades costeras continúen en expansión (McGranahan et al., 2007), resultando en más infraestructura expuesta a amenazas debido a tsunamis. Por lo tanto, tener estimaciones del daño económico a la infraestructura que un próximo tsunami podría ocasionar es fundamental.

Un método para estimar el daño a infraestructura provocado por tsunamis es mediante curvas de fragilidad. Una curva de fragilidad de tsunami es una representación estadística que cuantifica la probabilidad de daño estructural en infraestructura para una variable asociada con la inundación por tsunami. Usualmente se utiliza la profundidad de inundación como variable, aunque también se han creado curvas de fragilidad que dependen de la velocidad del flujo y del flujo de momento. Estas curvas se determinan en localidades específicas a partir de alturas de inundación medidas después de un evento de tsunami, las cuales son válidas para dicha localidad. Se han obtenido curvas de fragilidad en diferentes localidades del mundo (ver Tabla 2 en Aránguiz et al., 2018). En Chile, se han desarrollado curvas de fragilidad para la localidad de Dichato después del tsunami de 2010 (Mas et al., 2012) y para la localidad de Coquimbo después del tsunami de 2015 (Aránguiz et al., 2018). Estas curvas pueden ser utilizadas por los tomadores de decisiones para tomar medidas preventivas y así generar planes que reduzcan el potencial impacto de un tsunami.

El territorio que comprende el norte de Chile y el sur de Perú se encuentra en una zona de subducción activa que se ha identificado como un área donde el último gran terremoto (Mw 8,7) data del año 1877. Este terremoto causó grandes inundaciones en ciudades costeras chilenas, incluyendo la comuna de Mejillones, donde la altura de ola se estima que fue del orden de 20 m (González et al., 2020). Debido a este antecedente y debido a que el gap sísmico existente podría generar terremotos de hasta Mw 9,0 en Mejillones (González et al., 2020) resulta importante estudiar el impacto de un tsunami en la infraestructura en Mejillones, pues es una ciudad que tiene la gran parte de su infraestructura residencial e industrial bajo la cota de 30 msnm, incluyendo el puerto de Mejillones, el cual tiene un rol estratégico para el desarrollo de la minería en Chile.

Dada (1) la relevancia de la comuna de Mejillones en la actividad minera, (2) el gap sísmico existente y (3) la vulnerabilidad frente a una inundación por tsunami de la zona urbana de Mejillones, en este artículo se explora la aplicación de curvas de fragilidad para estimar el potencial daño económico en la infraestructura de la ciudad de Mejillones frente a una inundación por tsunami.

2. METODOLOGÍA

Se utilizó un sismo Mw 9,0 para la generación del tsunami debido a que es el peor escenario determinado en González et al. (2020). El tsunami fue simulado utilizando el modelo 2D, no

hidrostático e integrado en la vertical NEOWAVE utilizando un sistema de mallas anidadas. Las simulaciones de la propagación del tsunami se realizaron por una duración de 4 horas, con el fin de garantizar que las profundidades máximas simuladas consideren eventuales arribos tardíos del tsunami. La metodología de simulación empleada es similar al enfoque determinístico reportado en González et al. (2020).

Las curvas de fragilidad que se aplicaron en este trabajo utilizan la altura de inundación máxima como variable dependiente, por lo tanto, se extrajo dicha variable de la modelación hidráulica del tsunami en la comuna de Mejillones y se asignó una profundidad de inundación a cada bien raíz reportado en la base de datos pública del Servicio de Impuestos Internos de Chile (SII). La cantidad total de bienes raíces de la base de datos utilizada es de 2796.

La materialidad de las estructuras de la comuna de Mejillones se presenta en la Figura 1. Predominan en la comuna las estructuras de madera y albañilería; sin embargo, también hay una cantidad no menor de estructuras de hormigón armado y de acero (Figura 1 y Figura 2).

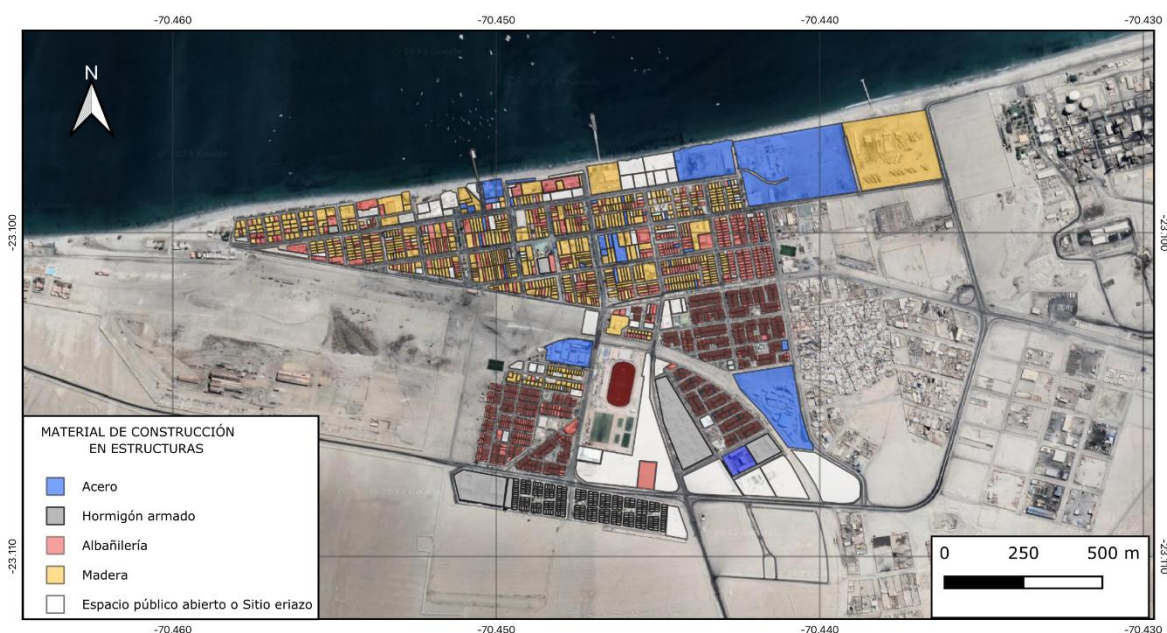


Figura 1. Materialidad de las construcciones en la comuna de Mejillones.

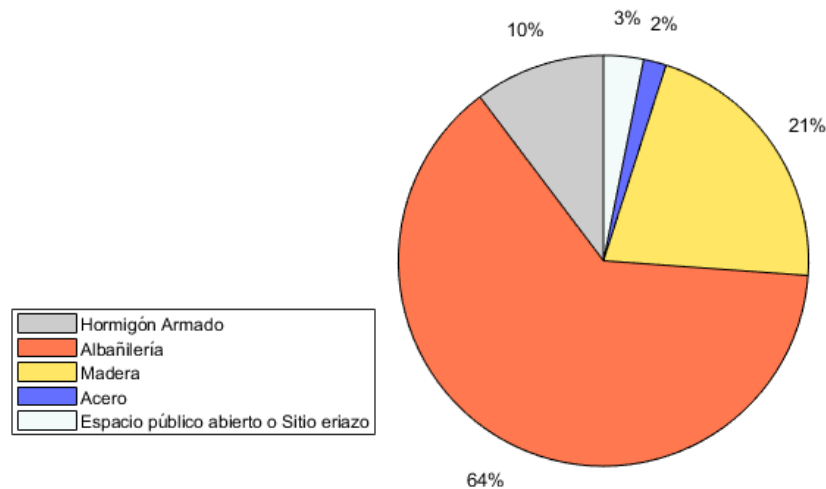


Figura 2. Distribución de la materialidad de las estructuras consideradas.

Se aplicaron curvas de fragilidad diferenciadas según la materialidad de las estructuras. Las estructuras se clasificaron en tres grupos: (1) Material mixto: considera estructuras de madera, albañilería y combinaciones de estos materiales; (2) Acero y (3) Hormigón armado.

Para las estructuras de material mixto, se aplicaron cinco curvas de fragilidad para daño de inundación por tsunami (Figura 3): (1) Dichato, Chile 2010 (Mas et al., 2012); (2) Coquimbo, Chile 2015 (Aránguiz et al., 2018); (3) Okushiri, Japón 2011 (Suppasri et al., 2012b); (4) Banda Aceh, Indonesia 2004 (Koshimura et al., 2009); y (5) Región de Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013). Se seleccionaron estas curvas porque fueron desarrolladas a partir de daño observado en estructuras de madera, albañilería confinada y la combinación de éstos. Para las estructuras de hormigón armado y de acero se utilizó una sola curva de fragilidad por cada material (Figura 4 y Figura 5, respectivamente), las cuales fueron desarrolladas para dichos materiales en la Región de Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013). Para los espacios públicos abiertos (plazas, skatepark, entre otros) y sitios eriazos se consideró que no están sujetos a daños estructurales producto de un tsunami.

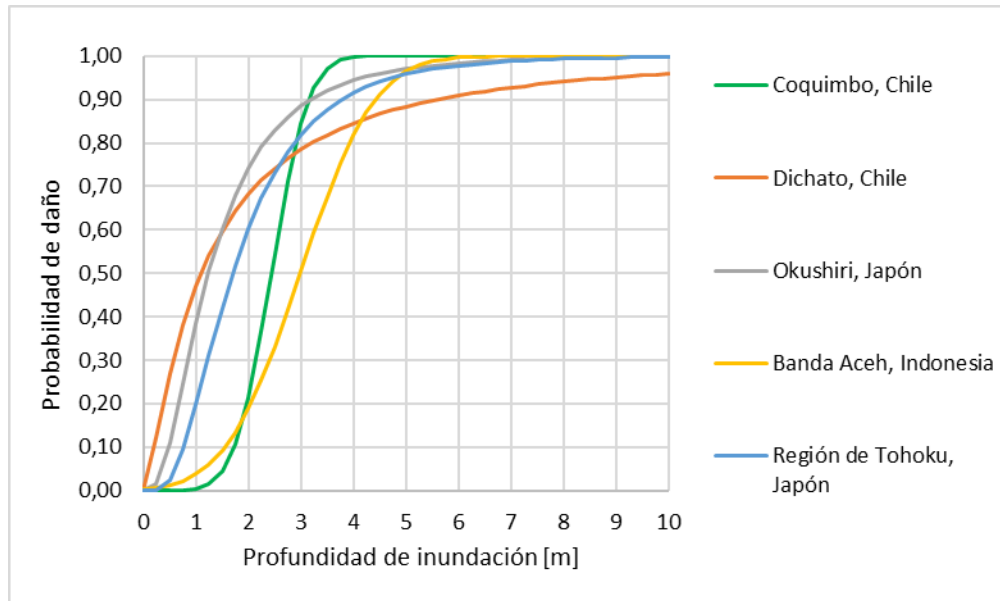


Figura 3. Curvas de fragilidad para daño de inundación por tsunami para estructuras de material mixto. Cada curva fue obtenida en la localidad que se indica en la leyenda de la figura.

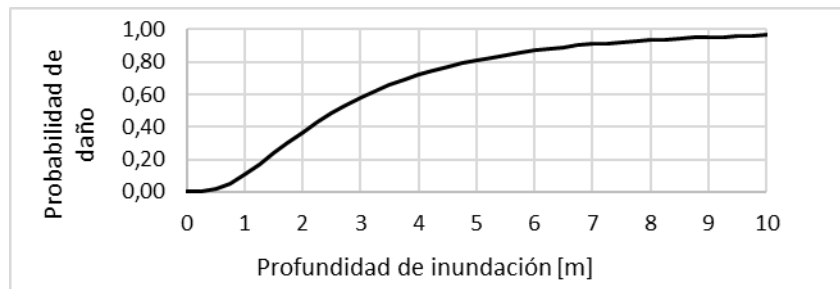


Figura 4. Curva de fragilidad para daño de inundación por tsunami para estructuras de hormigón armado. La curva de fragilidad fue obtenida en la Región de Tohoku en Japón.

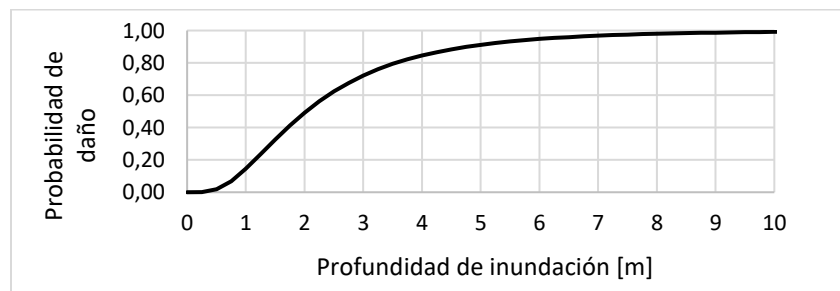


Figura 5. Curva de fragilidad para daño de inundación por tsunami para estructuras de acero. La curva de fragilidad fue obtenida en la Región de Tohoku en Japón.

Se obtuvo el daño económico probable del i -ésimo bien raíz (DP_i) frente al evento de tsunami generado por el sismo Mw 9,0 según la ecuación (1)

$$DP_i = P_i \cdot V_i \tag{1}$$

donde P_i es la probabilidad de daño al i -ésimo bien raíz obtenida de las curvas de fragilidad y V_i es el avalúo fiscal de la construcción del i -ésimo bien raíz. El avalúo fiscal de la construcción para cada bien raíz se calculó restandole el avalúo fiscal del terreno al avalúo total de dicho bien raíz. Esta información se obtuvo de la base de datos de acceso público del SII, la cual se presenta procesada en la Figura 6. El daño económico probable total (DPT) en la comuna de Mejillones frente a la inundación simulada se obtuvo según la ecuación (2):

$$DPT = \sum_{i=1}^N DP_i \quad (2)$$

donde $N = 2796$ es la cantidad total de bienes raíces de la comuna de Mejillones que reporta el SII.



Figura 6. Avalúo fiscal de la construcción de los bienes raíces registrados en el SII.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que un tsunami provocado por un sismo Mw 9,0 generaría un daño considerable en la comuna de Mejillones. La profundidad de inundación máxima obtenida (Figura 7) indica que en las estructuras de la primera línea presentarían una inundación máxima de al menos 8 m.

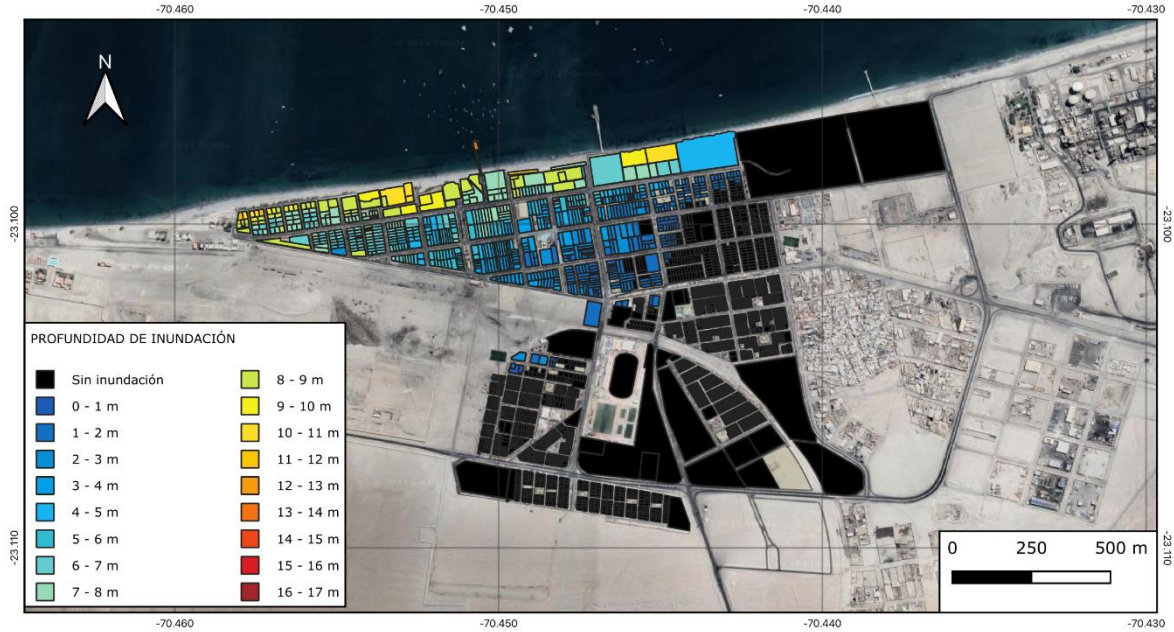


Figura 7. Profundidad de inundación ocasionada por un tsunami generado por un sismo Mw 9,0.

A partir de los datos de profundidad máxima de inundación, se obtuvo la probabilidad de daño utilizando las cuatro curvas de fragilidad mencionadas. Se ejemplifica el uso de la curva de fragilidad de Coquimbo (Aránguiz et al., 2018) en la Figura 8, donde se aprecia una cantidad considerable de estructuras con un alto valor de P_i . El daño económico probable de cada bien raíz (DP_i), obtenido a partir del uso de la curva de fragilidad de Coquimbo (Aránguiz et al., 2018), se presenta en la Figura 9.

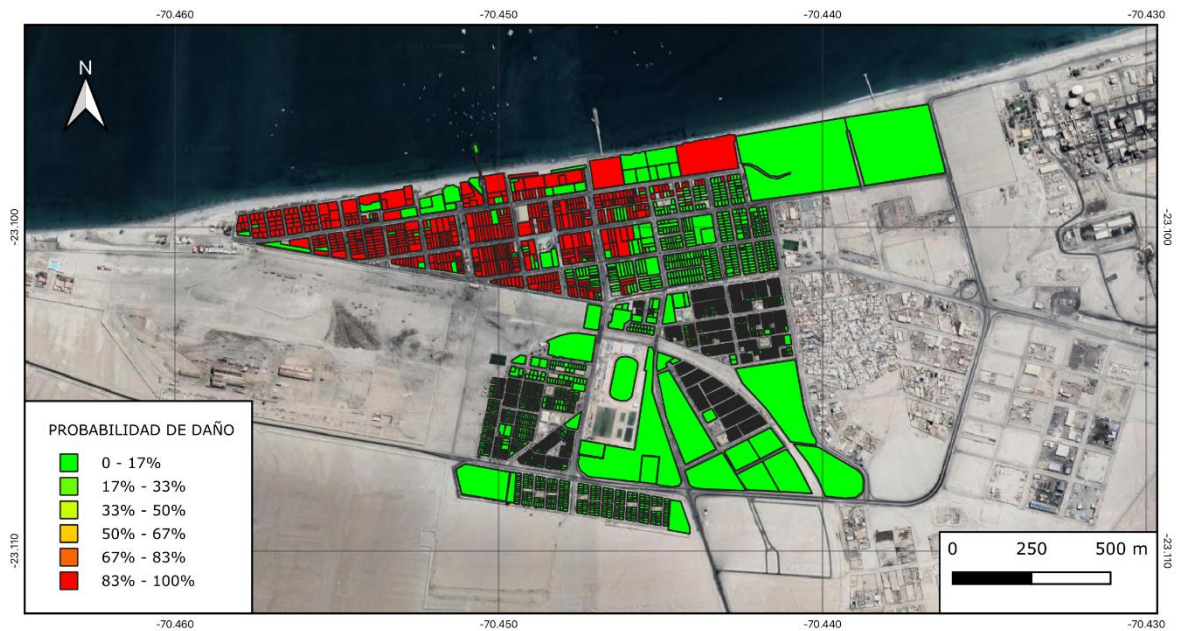


Figura 8. Probabilidad de daño ocasionado por un tsunami generado por un sismo Mw 9,0 en la comuna de Mejillones

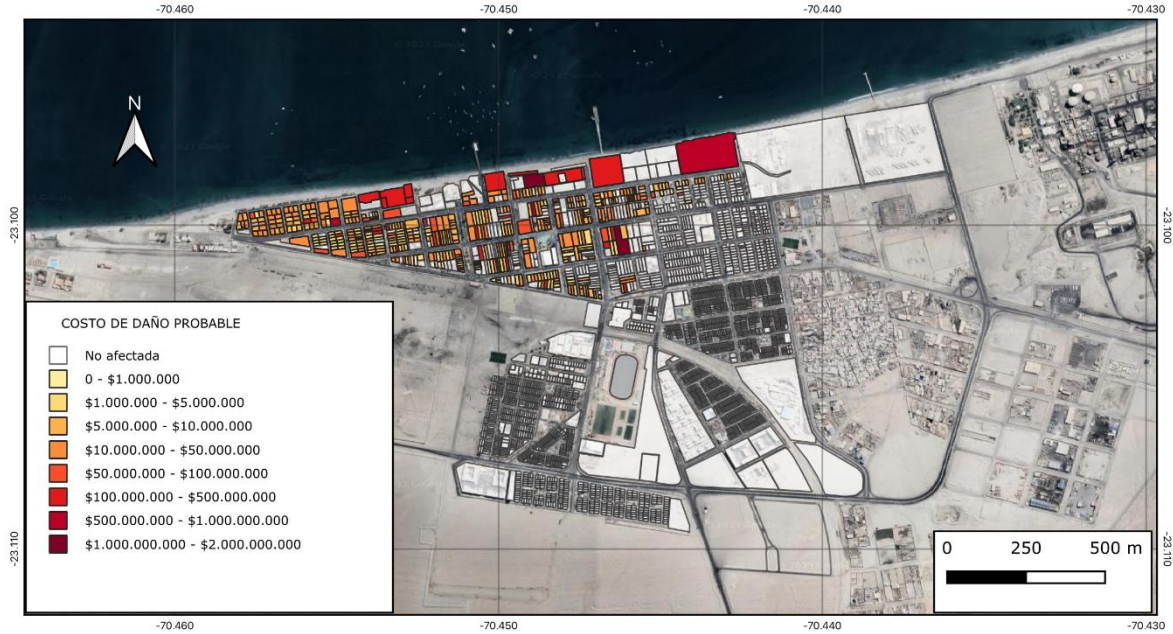


Figura 9. Daño económico probable en la infraestructura causado por un tsunami simulado a partir de un sismo Mw 9,0 en la comuna de Mejillones.

Esta metodología se aplicó a las curvas de fragilidad, de donde se obtuvo el daño económico probable total (*DPT*) para cada los siguientes casos (Tabla 1).

Tabla 1. Daño económico probable total (*DPT*) al aplicar las curvas de fragilidad.

Curva de Fragilidad aplicada a estructuras de material mixto.	Curva de Fragilidad aplicada a estructuras de hormigón armado.	Curva de Fragilidad aplicada a estructuras de acero.	<i>DPT</i> (en millones de pesos chilenos)
Dichato, Chile 2010 (Mas et al., 2012)	Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013)	Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013)	15.010
Coquimbo, Chile 2015 (Aránguiz et al., 2018)			14.457
Okushiri, Japón 2011 (Suppasri et al., 2012b)			15.696
Banda Aceh, Indonesia 2004 (Koshimura et al., 2009)			14.086
Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013)			15.116

4. DISCUSIÓN

Los resultados presentados en la Tabla 1 si bien entregan cifras distintas, éstas tienen órdenes de magnitud similares. Creemos que esto es debido a que, al existir una inundación máxima relevante, todas las curvas de fragilidad otorgan una probabilidad cercana a 1,0 en gran parte de la zona inundable de Mejillones. Notar que en la Figura 9 se presentan bienes raíces en

zonas cercanas a la costa clasificados como “no afectados”. Esto se debe a que dichos bienes raíces corresponden a sitios eriazos o a espacios públicos abiertos, donde se supuso que un tsunami no generaría un daño considerable en dichos espacios.

La suma de los avalúos fiscales de construcción de cada bien raíz reportados por el SII asciende a una suma de 50.196 millones de CLP. Por lo tanto, se puede analizar también el *DPT* desde un punto de vista porcentual, dividiendo el *DPT* por la suma de los avalúos fiscales de construcción de todas las propiedades (Tabla 2). Desde este punto de vista, se esperaría que, aproximadamente, se pierda un 30% del valor fiscal de la construcción de los bienes raíces considerados con el evento considerado.

Tabla 2. Porcentaje de daño esperado frente al avalúo fiscal de construcción de los bienes raíces de la comuna de Mejillones.

Curva de Fragilidad aplicada a estructuras de material mixto.	Curva de Fragilidad aplicada a estructuras de hormigón armado.	Curva de Fragilidad aplicada a estructuras de acero.	$\frac{DPT \cdot 100\%}{\text{Avalúo fiscal (de construcción total)}}$
Dichato, Chile 2010 (Mas et al., 2012)	Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013)	Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013)	29,9%
Coquimbo, Chile 2015 (Aránguiz et al., 2018)			28,8%
Okushiri, Japón 2011 (Suppasri et al., 2012b)			31,3%
Banda Aceh, Indonesia 2004 (Koshimura et al., 2009)			28,1%
Tohoku, Japón 2011 (Suppasri et al., 2013)			30,1 %

A pesar de que la Tabla 2 indica una pérdida de aproximadamente de un 30% del valor fiscal de construcción de las propiedades, este valor solo representa el daño probable asociado a un tsunami generado por el evento Mw 9,0 y no al daño estructural asociado al movimiento telúrico. Dado que es muy plausible que el sismo contribuya al daño del bien raíz, lo que correspondería desarrollar es una curva de fragilidad multivariada, que considere, además de la profundidad de inundación máxima, una variable asociada al sismo, como por ejemplo la aceleración máxima del suelo. Los autores de este trabajo, en colaboración con otros investigadores, tienen la intención de realizar un trabajo en el futuro que permita desarrollar esta idea mediante superficies de fragilidad.

Una limitación relevante de este trabajo es el uso de un solo evento Mw 9,0. Se ha demostrado que sismos de la misma magnitud pueden generar tsunamis con profundidades máximas de inundación diferentes (González et al. 2020), por lo tanto, los autores están trabajando en extender el análisis realizado en este trabajo utilizando un análisis estocástico que permita explorar la variabilidad en las profundidades máximas de inundación dependiendo de las distintas variables de entrada en la generación del sismo.

5. CONCLUSIONES

En este estudio, se exploró la aplicación de curvas de fragilidad para estimar el potencial daño económico en la infraestructura de la ciudad de Mejillones debido a una inundación por tsunami generada por un sismo de magnitud Mw 9,0. La aplicación de curvas de fragilidad indicó que la mayoría de las estructuras presentan una alta probabilidad de daño, lo que resultaría en un daño económico sustancial.

El daño económico probable total (*DPT*) calculado para distintas curvas de fragilidad indicó que, en términos generales, se esperaría una pérdida de alrededor de un 30% del valor de las construcciones de los bienes raíces en la comuna de Mejillones debido al tsunami simulado. Sin embargo, se resalta que este valor solo representa el daño asociado al evento de tsunami y no incluye el riesgo estructural relacionado con el movimiento telúrico.

Para mejorar la precisión del análisis, se plantea la necesidad de desarrollar curvas de fragilidad multivariadas que consideren variables adicionales, como la aceleración máxima del suelo, para capturar mejor el riesgo conjunto del tsunami y el sismo. También se reconoce la limitación de utilizar un solo evento sísmico en este estudio, por lo que los autores proponen extender el análisis mediante enfoques estocásticos que consideren la variabilidad en las profundidades máximas de inundación en función de diversas variables de entrada en la generación del sismo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado a los investigadores Joaquín Moris y Juan González a través del fondo ANID/FONDAP/15110017 (CIGIDEN).

REFERENCIAS

Aránguiz, R., Urra, L., Okuwaki, R., & Yagi, Y. (2018). Development and application of a tsunami fragility curve of the 2015 tsunami in Coquimbo, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2143-2160.

Davis, C., Keilis-Borok, V., Kossobokov, V., & Soloviev, A. (2012). Advance prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A missed opportunity for disaster preparedness. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 1, 17-32.

Fritz, H. M., Petroff, C. M., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., ... & Synolakis, C. E. (2011). Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 1989-2010.

González, J., González, G., Aránguiz, R., Melgar, D., Zamora, N., Shrivastava, M. N., ... & Cienfuegos, R. (2020). A hybrid deterministic and stochastic approach for tsunami hazard assessment in Iquique, Chile. *Natural Hazards*, 100, 231-254.

Khew, Y. T. J., Jarzebski, M. P., Dyah, F., San Carlos, R., Gu, J., Esteban, M., ... & Akiyama, T. (2015). Assessment of social perception on the contribution of hard-infrastructure for tsunami mitigation to coastal community resilience after the 2010 tsunami: Greater Concepcion area, Chile. *International journal of disaster risk reduction*, 13, 324-333.

Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, 51(3), 243-273.

Mas, E., Koshimura, S., Suppasri, A., Matsuoka, M., Matsuyama, M., Yoshii, T., ... & Imamura, F. (2012). Developing Tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(8), 2689-2697.

McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and urbanization*, 19(1), 17-37.

Suppasri, A., Koshimura, S., Imai, K., Mas, E., Gokon, H., Muhari, A., & Imamura, F. (2012). Damage characteristic and field survey of the 2011 Great East Japan Tsunami in Miyagi Prefecture. *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250005-1.

Suppasri, A., Mas, E., Koshimura, S., Imai, K., Harada, K., & Imamura, F. (2012b). Developing tsunami fragility curves from the surveyed data of the 2011 Great East Japan tsunami in Sendai and Ishinomaki Plains. *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250008-1.

Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., ... & Imamura, F. (2013). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, 66, 319-341.