

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA RESPUESTA RESONANTE DE BAHÍAS DE CHILE AL ROL DE LA FUENTE TSUNAMIGÉNICA

VALENTINA AGUILERA CARVAJAL¹
PATRICIO CATALÁN MONDACA²

RESUMEN

Debido a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, la costa occidental de América del Sur es una de las zonas más sismogénicas del mundo, y por consecuencia, Chile ha sido afectado históricamente por terremotos que habitualmente generan tsunamis devastadores, provocando gran impacto en la vida e infraestructura costera. Estudios tales como *Rabinovich et al. (1997)* han demostrado una importante amplificación de ondas de tsunami en áreas costeras debido al fenómeno de resonancia en bahías, el cual está influenciado fuertemente por la topo-batimetría del lugar. Sin embargo, no existe claridad respecto al proceso que domina la respuesta: si el sismo generador o la configuración de la bahía.

La finalidad del estudio es determinar la influencia de la fuente tsunamigénica en la distribución de frecuencias que domina las oscilaciones de respuesta en localidades ubicadas en la costa de la zona central de Chile, tales como las bahías de San Antonio, Valparaíso, Quintero, Tongoy, Coquimbo y Ensenada los Choros. En específico, se busca analizar la sensibilidad de las localidades mencionadas a las características de la fuente tsunamigénica a través del análisis espectral de series de tiempo obtenidas de la modelación de distintos escenarios de ruptura asociados a un rango de magnitudes de terremoto.

¹ Ingeniera Civil, Universidad Santa María - email: valentina.aguiler.13@sansano.usm.cl

¹ Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: patricio.catalan@usm.c

Se modelarán 350 escenarios de ruptura con distintos deslizamientos cosísmicos, los cuales permitirán realizar una comparación inter-evento de la respuesta espectral de las bahías, es decir, la variación en la respuesta espectral de cada localidad entre las distintas magnitudes de sismo modeladas, como también la variación intra-evento, observando cómo la distribución de deslizamiento cosísmico para una magnitud de sismo determinada, afecta a la respuesta espectral de cada una de las localidades en estudio.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA RESPUESTA RESONANTE DE BAHÍAS DE CHILE AL ROL DE LA FUENTE TSUNAMIGÉNICA

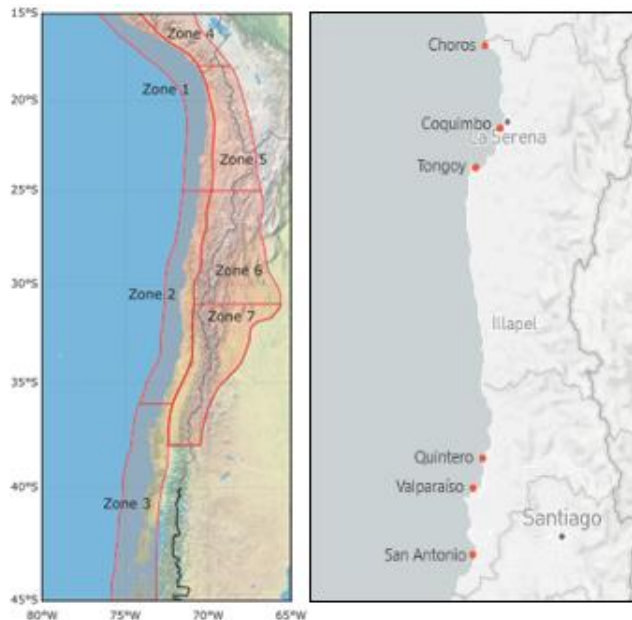
El presente trabajo busca caracterizar la influencia de la fuente tsunamigénica en la respuesta resonante de distintas bahías ubicadas en la zona central de Chile, para lograr identificar la sensibilidad de las distintas localidades a las características de deslizamiento cosísmico y la deformación inicial del océano. Esta información será trascendental para entender el papel topo-batimétrico en la sensibilidad a la fuente, y para ello, es necesario estudiar la respuesta espectral de las distintas bahías ante diferentes escenarios de ruptura. Para ello, se realizaron simulaciones de escenarios estocásticos en el programa computacional HySea, en el cual se colocaron boyas virtuales en seis bahías ubicadas en la zona central de Chile, tales como San Antonio, Valparaíso, Quintero, Tongoy, Coquimbo y Choros. El programa computacional otorga las series de tiempo en cada boya para cada uno de los escenarios modelados, las cuales se les realiza análisis espectral con la intención de comparar la reacción de las bahías a cada una de las condiciones de borde interpuesta, y así analizar el comportamiento de cada localidad ante distintos escenarios.

1. GENERACIÓN DE ESCENARIOS ESTOCÁSTICOS

Para la regionalización del estudio, se utilizó la Zona 2 de las siete zonas propuestas por (Poulos et. al 2019) mostradas en la **Figura 1**, las cuales se componen por tres zonas de subducción interplaca y cuatro zonas de subducción intraplaca. La zona utilizada corresponde a una zona de subducción interplaca, las cuales se extienden desde la fosa oceánica hasta una profundidad de 60km. La geometría de la fosa y los contornos de profundidad son obtenidos de la geometría real de la placa propuesto por (Hayes et al. 2012).

Las boyas virtuales fueron ubicadas en los mareógrafos monitoreados actualmente por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA, por sus siglas), en las bahías de San Antonio, Valparaíso, Quintero, Tongoy, Coquimbo y Choros, mostrados a continuación.

**Figura 1: A la derecha regionalización Zona 2 de Poulos et. al (2019) utilizada.
A la izquierda ubicación boyas virtuales.**



El área de ruptura considerada, en el cual han ocurrido grandes terremotos de magnitudes entre Mw 8.6 a Mw 9.2, está basada en la Zona 2 del estudio de Poulos et al. 2019. La geometría de la fuente se extiende desde la latitud 25°S hasta los 36°S, aproximadamente 1100km de largo y varía en su ancho cerca de los 200km. Los parámetros de la fuente se basan en el modelo de subducción de (Hayes et al. 2012). En esta zona, se generaron 350 escenarios con variación de slip en ambos sentidos, considerando 50 escenarios para cada magnitud modelada entre Mw 8.6 y Mw 9.2, con 0.1 unidades de magnitud de incremento (Tabla 1). Los escenarios modelados no necesariamente usan la totalidad de la extensión de la región, las dimensiones vienen dadas por las leyes de escalamientos propuestos por (Blaser et al. 2010).

Tabla 1: Rango de escenarios para cada magnitud modelada.

Magnitud	Rango de escenarios
Mw 8.6	[0-49]
Mw 8.7	[50-99]
Mw 8.8	[100-149]
Mw 8.9	[150-199]
Mw 9.0	[200-249]
Mw 9.1	[250-299]
Mw 9.2	[300-349]

Para la generación de escenarios, la región es discretizada con dimensiones de 22x22km, en la cual se utiliza la expansión de Karhonen-Loeve para la generación aleatoria de distribución deslizamientos (LeVeque et al. 2016), con la intención de simular la condición de incertidumbre epistémica y aleatoria en la variabilidad intra-evento, es decir, el rango de posibles distribuciones de deslizamientos para una misma magnitud, considerando distintos valores para la profundidad del hipocentro, longitud de falla, ancho de falla, strike, dip, rake y slip.

2. ANÁLISIS ESPECTRAL

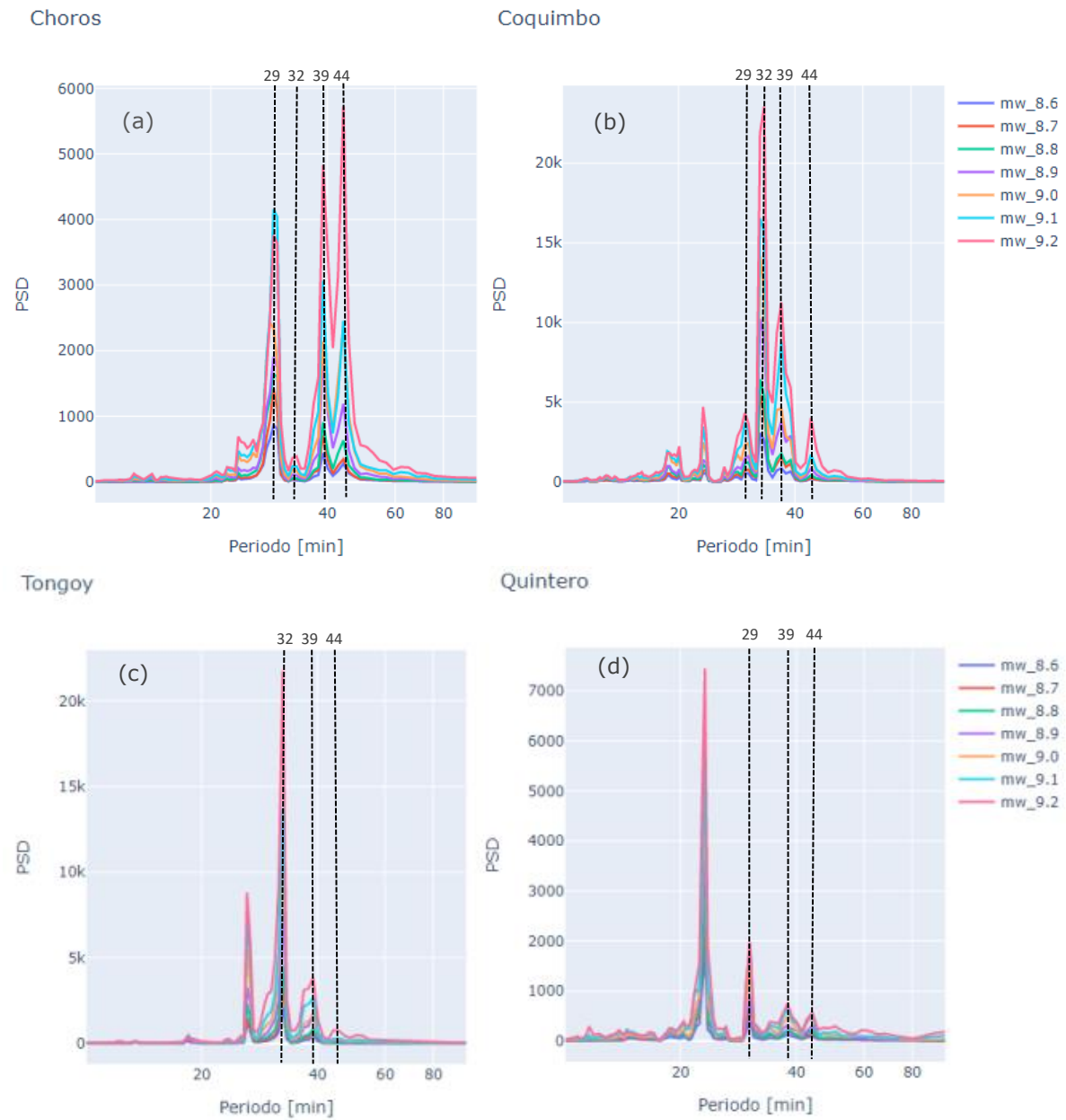
Las series de tiempo en cada boya virtual escogida fueron obtenidas con el software de modelamiento numérico HySea (Macías et. al. 2017), el cual resuelve las ecuaciones bidimensionales de agua poco profundas usando el método de volumen finito. El programa computacional implementa en un mismo código las tres fases que componen la simulación de un tsunami generado por un terremoto submarino, la generación a partir de la fuente sísmica, propagación y la inundación de la zona costera. Para la fase de generación se hace uso del modelo de deformación de Okada (1985) para predecir la deformación inicial del fondo marino, la cual se transmite de forma instantánea a la superficie del mar para generar la onda inicial del tsunami.

Para la realización del análisis espectral, se empleó de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), la cual pasa del dominio del tiempo dado por las series de tiempo obtenidas del modelamiento o por registros de mareógrafos al dominio de las frecuencias, con la intención de obtener la cantidad de energía presente en cada período de onda entre los 10 minutos y los 100 minutos. Debido a que el enfoque es el estudio de anomalías presentes en eventos de Tsunami, para registros de mareógrafos es necesario filtrar la marea astronómica de los registros, lo cual fue realizado con el paquete UTIDE con 35 constituyentes armónicas que representan procesos astronómicos. Adicionalmente, para evitar un espectro ruidoso, se utiliza un filtro de convolución que va suavizando la serie de tiempo, conocido como ventana de Hanning, la cual minimiza problemas relacionados con leakage energético. Con ello, los resultados obtenidos permiten distinguir en forma clara los picos energéticos relevantes para cada bahía en estudio. Para el análisis espectral en mareógrafos y escenarios modelados, se utilizó un muestreo de 10 segundos con 3 grados de libertad.

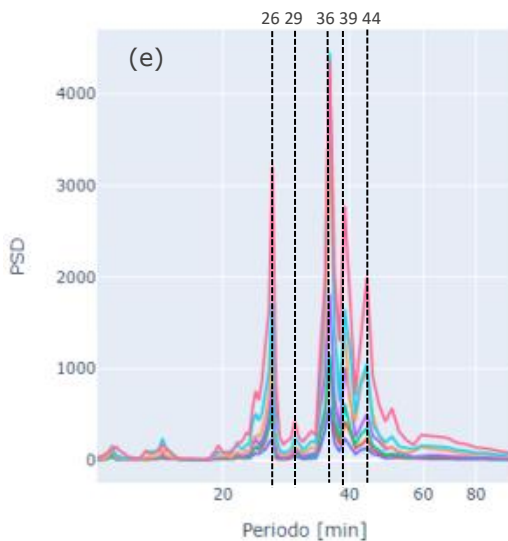
3. ANÁLISIS INTER-EVENTO

Con la intención de comparar la distribución energética entre períodos resonantes de cada localidad ante distintas magnitudes, se realiza un promedio espectral de los 50 escenarios estocásticos modelados para cada uno de los eventos, permitiendo comparar las bandas de períodos excitados y la distribución de energía entre magnitudes (**Figura 2**).

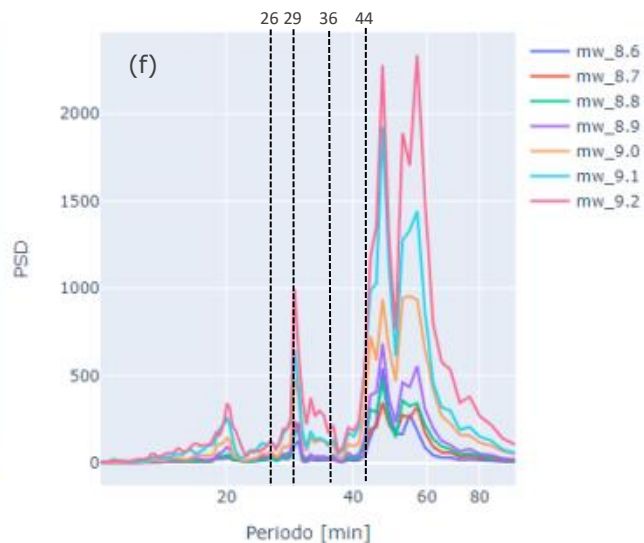
Figura 2: Promedio espectral para cada magnitud en las seis bahías en estudio.



Valparaíso



San Antonio



En la figura se observa que, a distintas magnitudes, en general, son los periodos resonantes de las bahías los que son excitados, en el cual, a mayor magnitud de sismo, mayor es la energía otorgada a cada modo de vibración, el cual va disminuyendo a medida que decrece la magnitud. Además, se visualiza la cantidad de energía presente en cada localidad estudiada, donde Coquimbo y Tongoy amplifican en mayor medida la energía otorgada por la fuente, llegando a 4 órdenes de magnitud.

Las bahías ubicadas al sur de la regionalización (Quintero, Valparaíso y San Antonio), en general, no amplifican en gran cantidad la energía otorgada por la fuente, alcanzando tan solo 3 órdenes de magnitud de energía en comparación con las bahías del sector norte. Coquimbo y Tongoy presentan una gran cantidad de energía amplificada, llegando a energías de 4 órdenes de magnitud, en específico 20000 cm²s, logrando excitar en cada una de las magnitudes estudiadas los periodos resonantes de cada bahía, evidenciando la baja sensibilidad a la fuente tsunamigénica. Por su parte, Choros, no superan las 3 órdenes de magnitud de energía.

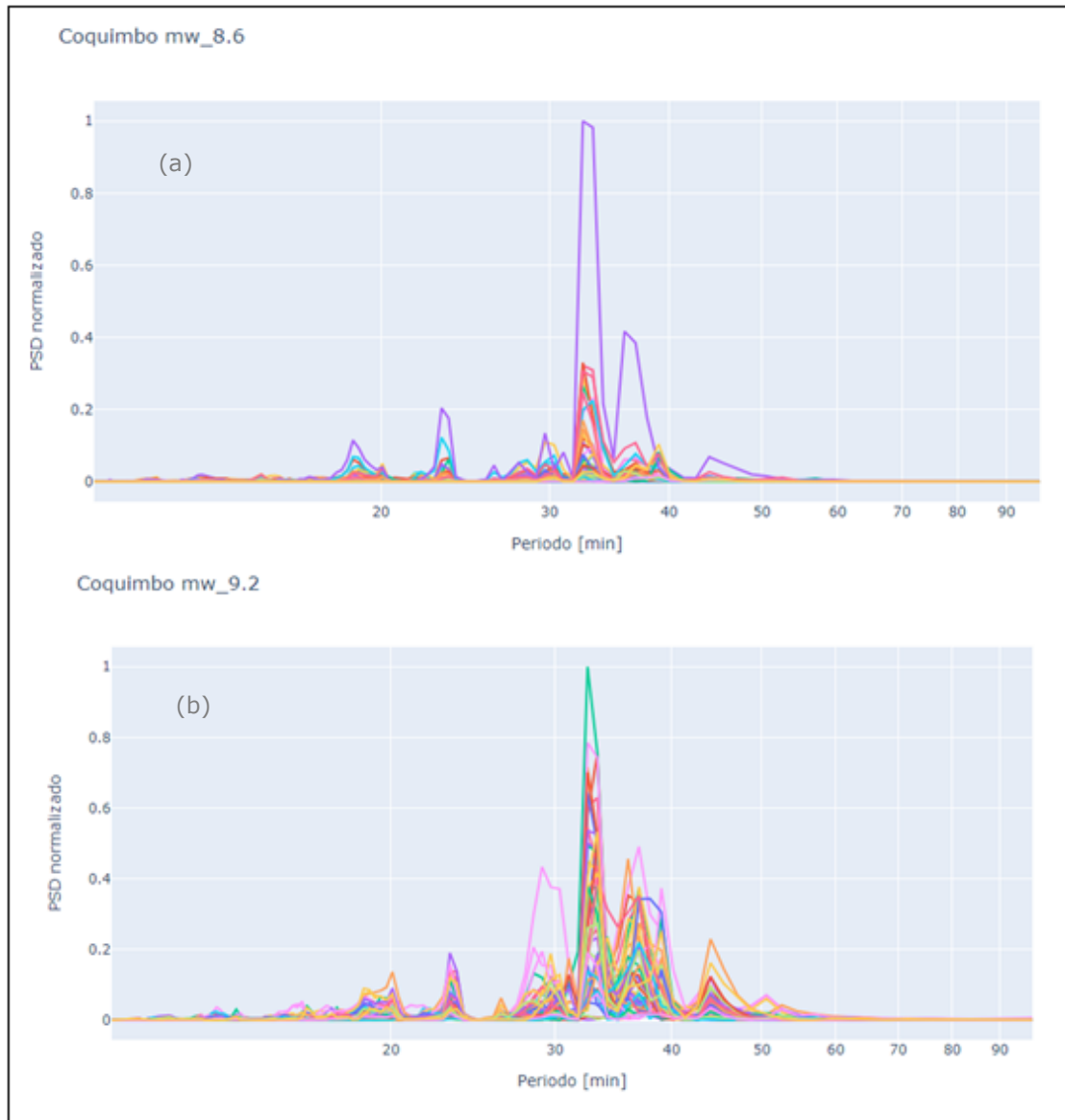
San Antonio destaca por la baja cantidad de energía filtrada, siendo la bahía que menor cantidad de energía distribuye entre sus modos de las seis localidades estudiadas, alcanzando tan solo 2000 cm²s. Adicionalmente se observa poca definición en la excitación de sus modos de vibración ante las distintas magnitudes, lo que en primera instancia daría indicios de una alta sensibilidad de la bahía a la fuente tsunamigénica.

4. ANÁLISIS INTRA-EVENTO

Una vez realizado el análisis espectral de cada escenario propuesto, se agrupan por magnitudes y se presentan de forma relativa al máximo de cada evento. Por ejemplo, para una magnitud Mw 8.6, se tienen 50 escenarios modelados, a los cuales, una vez realizado el análisis espectral, cada espectro se normaliza por el máximo valor encontrado dentro de los escenarios del evento. Del análisis anterior se seleccionarán las bahías de Coquimbo, Tongoy y San Antonio, las cuales tienen un comportamiento muy diferente entre sí, en la que se logra identificar las distintas sensibilidades de cada bahía a la fuente, siendo Tongoy la menos sensible, San Antonio la más sensible a la fuente tsunamigénica y Coquimbo el punto intermedio. A continuación, se presentan los resultados para magnitudes extremas, Mw 8.6 y Mw 9.2.

4.1 COQUIMBO

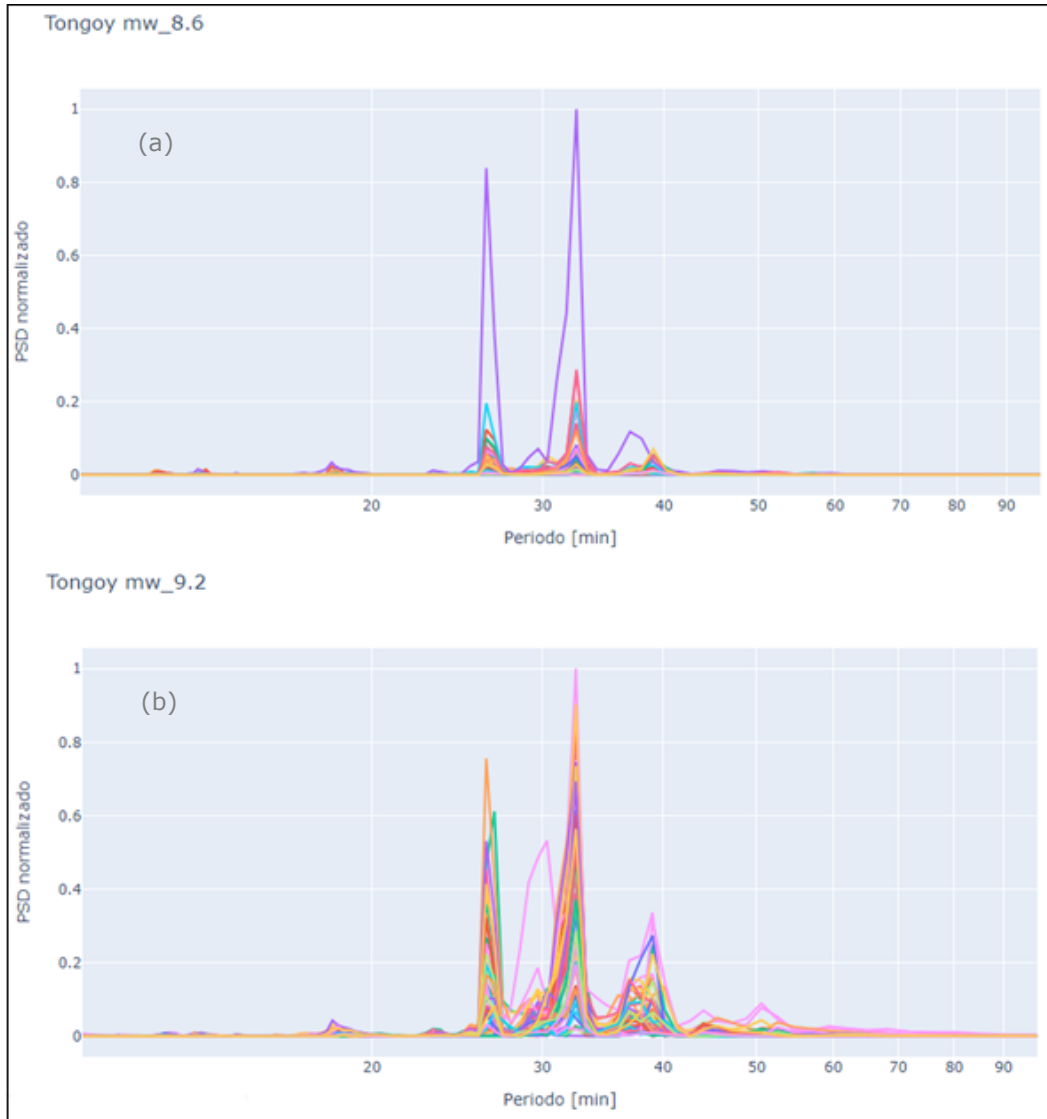
Figura 3: Espectro normalizado de los 50 escenarios simulados para a) magnitud Mw 8.6 y b) magnitud Mw 9.2 Bahía Coquimbo.



Coquimbo distribuye su energía en los mismos períodos resonantes, sin embargo, ante distintos escenarios esa distribución varía, excitando distintos períodos dependiendo de la característica de la fuente. También se observa que, a mayor magnitud, mayor energía se concentra en los períodos largos.

4.2 TONGOY

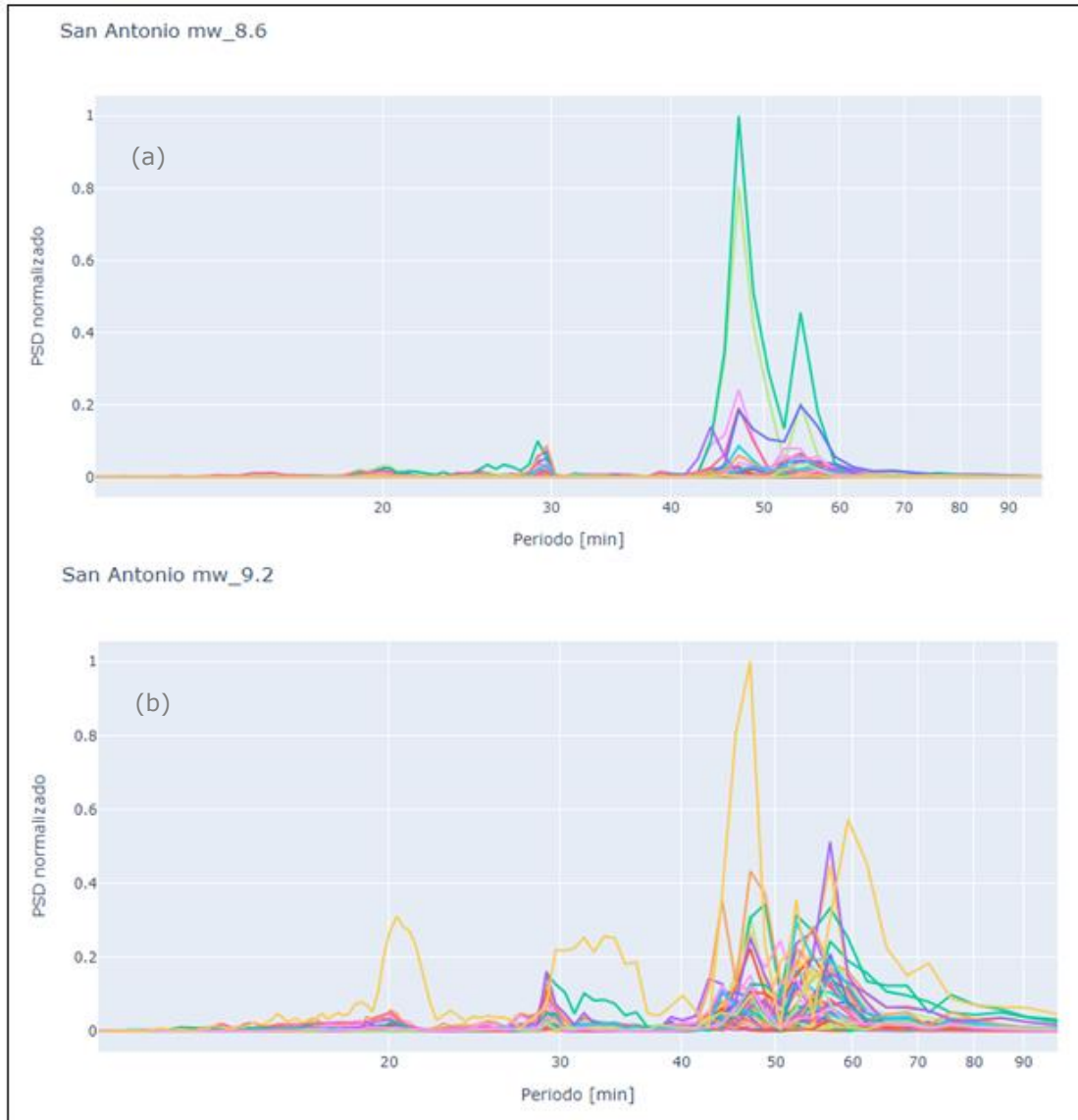
Figura 4: Espectro normalizado de los 50 escenarios simulados para a) magnitud Mw 8.6 y b) magnitud Mw 9.2 Bahía Tongoy.



Tongoy, a diferencia de Coquimbo, es altamente resonante y poco sensible a la fuente tsunamigénica. Se observa que ante distintos escenarios de ruptura la bahía concentra su energía en los mismos períodos resonantes, visualizando poca variabilidad en la respuesta espectral de la localidad. Adicionalmente se observa un aumento considerable en la banda de períodos excitados. Para una magnitud Mw 8.6, el rango de períodos excitados se acota entre 26[min] y 40[min], mientras que para una magnitud de Mw 9.2, la banda excitada va entre los 21[min] y 60[min] aproximadamente.

4.3 SAN ANTONIO

Figura 5: Espectro normalizado de los 50 escenarios simulados para a) magnitud Mw 8.6 y b) magnitud Mw 9.2. Bahía San Antonio.



Se observa un espectro altamente caótico, el cual evidencia la sensibilidad de la localidad a las características de la fuente tsunamigénica. Ante distintos escenarios de deslizamiento cosísmico la respuesta de la bahía varía considerablemente. Al comparar magnitudes extremas se puede observar un aumento de la banda de períodos excitados, en el cual a medida que incrementamos la magnitud del sismo, la energía se distribuye aleatoriamente entre los distintos períodos.

5. CONCLUSIÓN

Con la intención de observar la sensibilidad de las bahías bajo distintos parámetros de generación de tsunamis, tales como la magnitud del sismo y la heterogeneidad de deslizamiento cosísmico intraevento, se realizó un estudio a seis bahías de la zona central de Chile. La diversidad de escenarios modelados permite realizar un estudio de variabilidad espectral intra-evento e inter-evento para observar la influencia de la fuente tsunamigénica en la respuesta de las distintas localidades.

En primera instancia, tras comparar la energía promedio presente en la Figura 2 para cada magnitud comprendida entre Mw 8.6 y Mw 9.2, en cada una de las localidades analizadas, se observa en general, una mayor cantidad de energía alcanzada entre los distintos períodos resonantes de las bahías a medida que incrementamos la magnitud del sismo. Adicionalmente, se observa que en las bahías Choros, Valparaíso, Quintero y San Antonio se logra alcanzar hasta 3 órdenes de magnitud, comparado con Coquimbo y Tongoy que llegan a 4 órdenes de magnitud, lo que indicaría que las primeras cuatro bahías mencionadas no amplifican en gran cantidad la energía proveniente de la fuente, en comparación a las dos bahías ubicadas al norte de la regionalización, las cuales logran amplificar la energía de la fuente tsunamigénica.

De la misma figura mencionada anteriormente, se observa que a medida que se incrementa la magnitud del sismo, la banda de períodos excitados también aumenta, es decir, ante un sismo de magnitud menor, la bahía acotará los períodos de excitación a sus períodos más resonantes, y a medida que el sismo aumenta su magnitud, y con ello su deslizamiento cosísmico, períodos que antes no se habían excitado cobrarán mayor participación, tal como vemos en la DISCUSIÓN

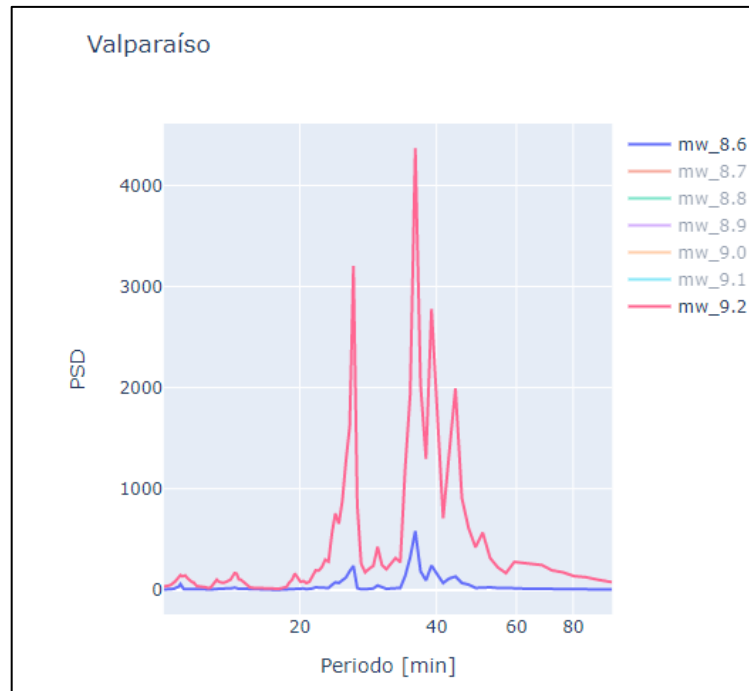
Con la intención de estudiar con mayor detención el aumento de banda de períodos excitados al aumentar la magnitud del sismo, mencionado en la sección anterior, se muestra en la **Figura 6** el espectro promedio para magnitudes extremas de Mw 8.6 y Mw 9.2 en la bahía de Valparaíso.

Figura 6 en la bahía de Valparaíso. Para un sismo de magnitud Mw 8.6, es excitada la banda entre 23 y 50 [min], con energías que no superan las dos órdenes de magnitud. Por otro lado, para una magnitud de Mw 9.2, la banda de períodos excitados está entre los 10 y 85[min], con energías que superan las 3 órdenes de magnitud.

6. DISCUSIÓN

Con la intención de estudiar con mayor detención el aumento de banda de periodos excitados al aumentar la magnitud del sismo, mencionado en la sección anterior, se muestra en la **Figura 6** el espectro promedio para magnitudes extremas de Mw 8.6 y Mw 9.2 en la bahía de Valparaíso.

Figura 6: Espectro promedio para magnitudes extremas en la Bahía de Valparaíso.



El aumento de la banda de periodos excitados al aumentar la magnitud se podría explicar con lo propuesto por Rabinovich et. al (1997), quien realizó una aproximación efectiva de los períodos generados por el tsunami, los cuales pueden ser estimados por:

$$T = \frac{2L}{n\sqrt{gH}} \quad (1)$$

Donde T es el período efectivo de un cierto escenario, L corresponde al largo de correlación, $\sqrt{gH}$ la celeridad. Es la fuente tsunamigénica quien determina el largo de correlación, a mayor magnitud de sismo, mayor es el largo de correlación. Suponiendo que la celeridad es constante, a medida que aumenta el largo, aumenta el período excitado, provocando que el terremoto tenga una estructura de energía con contenido de mayores períodos, explicando el aumento de banda de periodos excitados al aumentar la magnitud del sismo.

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece por sobretodo a mis padres, por el gran esfuerzo detrás de mi educación, sin el apoyo incondicional de ellos nada habría sido posible. También la disposición y tiempo de mi profesor Patricio Catalán, quien, debido a su gran vocación, estuvo siempre pendiente de solucionar mis dudas y enseñar al grupo de memoristas las bases de este hermoso lado de la ingeniería hidráulica.

REFERENCIAS

- [1] Blaser, L., F. Krüger, M. Ohrnberger, and F. Scherbaum (2010), Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 2914–2926.
- [2] Hayes, G. P., D. J. Wald, and R. L. Johnson (2012). Slab1.0: A threedimensional model of global subduction zone geometries, *J. Geophys. Res.* 117, no. B1, doi: 10.1029/2011JB008524.
- [3] Kajiura, K. (1970), Tsunami source, energy and the directivity of wave radiation, *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, 48, 835 – 869.
- [4] LeVeque, R. J., K. Waagan, F. I. González, D. Rim, and G. Lin (2016), Generating random earthquake events for probabilistic tsunami Hazard assessment, *Pure Appl. Geophys.*, doi: 10.1007/s00024-016-1357-1.
- [5] Macías, J., Castro, M. J., Ortega, S., Escalante, C., & González-Vida, J. M. (2017). Performance Benchmarking of Tsunami-HySEA Model for NTHMP's Inundation Mapping Activities. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3147–3183. doi: 10.1007/s00024-017-1583-1
- [6] Poulos, Mauricio Monsalve, Natalia Zamora, Juan Carlos de la Llera (2019), An Updated Recurrence Model for Chilean Subduction Seismicity and Statistical Validation of Its Poisson Nature. *Bulletin of the Seismological Society of America* 2018; 109 (1): 66–74. doi: 10.1785/0120170160.
- [7] Rabinovich, A. B. (1997). Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects, *J. Geophys. Res.*, 102(C6), 12,663–12,676, doi: 10.1029/97JC