

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

**PRESENCIA DE ONDAS DE INFRAGRAVEDAD EN LA COSTA DE CENTRAL  
CHILE DURANTE MAREJADAS  
CASO DE APLICACIÓN EN LA AVENIDA PERÚ, VIÑA DEL MAR**

**CÉSAR ESPARZA A.<sup>1</sup>**  
**RODRIGO CIENFUEGOS C.<sup>2</sup>**

**RESUMEN**

Este estudio se centra en la propagación de las olas en la zona costera de Av. Perú, analizando dos eventos: el 3 de julio de 2013 y el 8 de agosto de 2015. El objetivo principal es analizar la influencia de las ondas de infragravedad (IG) cerca de la protección costera. Se utilizaron modelos numéricos (WAVEWATCH III, STWAVE y SWASH) para abordar la generación, propagación y rompiente de las olas en la zona costera. Los resultados indicaron que, durante el evento del 3 de julio de 2013, el oleaje rompió cerca de la estructura debido a que llegó a Av. Perú con alturas significativas relativamente bajas y periodos peak largos ( $H_{m0} = 2$  m y  $T_p = 20$  s). Durante este evento, las ondas IG, aunque con una energía menor que las olas tipo swell, mostraron una amplificación fuerte en zonas someras, alcanzando alturas de  $H_{m0,IG} = 0.7$  m, lo que llegó a modular las alturas de las olas individuales (SS) en el pie de la estructura. Por otra parte, en el evento del 8 de agosto de 2015, las olas SS impactaron en Av. Perú con mayor energía y un período peak más corto ( $H_{m0} = 5$  m;  $T_p = 12$  s), rompiendo más lejos de la estructura, aproximadamente a unos 200 m y en una profundidad de 8 m NRS. Las ondas IG generadas en este caso presentaron alturas de  $H_{m0,IG} = 0.8$  m a unos 20 m NRS; no obstante, al igual que el caso previo, en zonas más someras se amplificaron de manera abrupta, alcanzando alturas de hasta  $H_{m0,IG} = 1.4$  m. Estos resultados subrayan la importancia de realizar investigaciones más exhaustivas sobre la influencia de las ondas IG en los sobrepasos individuales (profundidades y velocidad de flujo) en estructuras de protección costera.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Doctorado Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile - email: cnesparza@uc.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: racienfu@ing.puc.cl

## INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería costera, comprender la interacción de las olas con la costa durante eventos de marejadas es esencial para mitigar los impactos potenciales en la infraestructura costera y garantizar la seguridad de las zonas cercanas al mar. Uno de los fenómenos de relevancia en este contexto es la presencia y comportamiento de las ondas de infragravedad (ondas IG). Las ondas IG, caracterizadas por sus bajas frecuencias, en el intervalo de 30 segundos a 5 minutos desempeñan un papel crucial en la propagación de la energía del oleaje en la zona de rompientes (Bertin et al., 2018).

En ingeniería costera, se establece una distinción clave entre el "oleaje" generado por el viento, los cuales incluyen tanto al mar de fondo (*swell*) como al mar de viento (*wind-sea*), con periodos de 4 a 30 s (en adelante olas SS), y las ondas IG. Estas últimas se originan mediante tres mecanismos principales: El primero, conocido como "Long Bound Wave" (Onda Ligada Larga), propuesto por Longuet-Higgins y Stewart (1962), puede explicarse a partir de un grupo de ondas bicromáticas (dos olas SS con frecuencias ligeramente diferentes. Fig. 1a) que se desplazan a velocidades de fase distintas. Esto crea momentos de interferencia, generando grupos de olas con alturas variables. Así se forma una onda IG sincronizada o "ligada" al grupo de ondas, que crece al transferir energía de las olas cortas a la onda ligada (Battjes et al., 2004). En la naturaleza, este fenómeno se produce con grupos de ondas reales e irregulares. El segundo mecanismo, "*moving breakpoint*" (punto de rompimiento móvil), propuesto por Symonds et al. (1982), describe cómo el punto de rompimiento cambia debido a diferencias en la altura de las olas en un grupo (Fig. 1b). Este cambio afecta el nivel del agua inducido por el *setup* de las olas, especialmente en pendientes pronunciadas. El tercer mecanismo, "*bore merging*" (fusión de *bores*; Huntley and Bowen, 1975), ocurre tras la ruptura. Las olas cortas se reorganizan en la zona de rompientes formando "*bores*" que pueden fusionarse, transfiriendo energía de frecuencias altas a bajas y aumentando el período de las olas en la zona de rompientes. Al romper, las ondas del grupo liberan a las ondas IG ligadas, que pueden reflejarse, propagarse como "*leaky waves*" hacia aguas profundas, refractarse o propagarse longitudinalmente en la costa como "*edge waves*" (Bertin et al., 2018). Dada la significativa relevancia de las ondas IG en la zona de rompientes, y considerando el escaso conocimiento sobre su presencia en la costa de Chile, el objetivo principal de este estudio es explorar la existencia de estas ondas en la costa de la Zona Central de Chile. Esto se llevará a cabo durante dos eventos de marejada, los cuales suelen reflejar condiciones extremas de oleaje en la mencionada región del país. Una atención especial será dirigida hacia el área de la Avenida Perú en Viña del Mar. Previo a la reestructuración de la protección costera en esta zona, los sobrepasos de agua eran un fenómeno recurrente de manera anual. Con este propósito, se utilizarán simulaciones numéricas para analizar la evolución del campo de oleaje en un perfil unidimensional. Estas simulaciones tienen la capacidad de capturar procesos físicos distintivos en la zona de rompientes, los cuales son a menudo pasados por alto en modelos con promedio de fase.

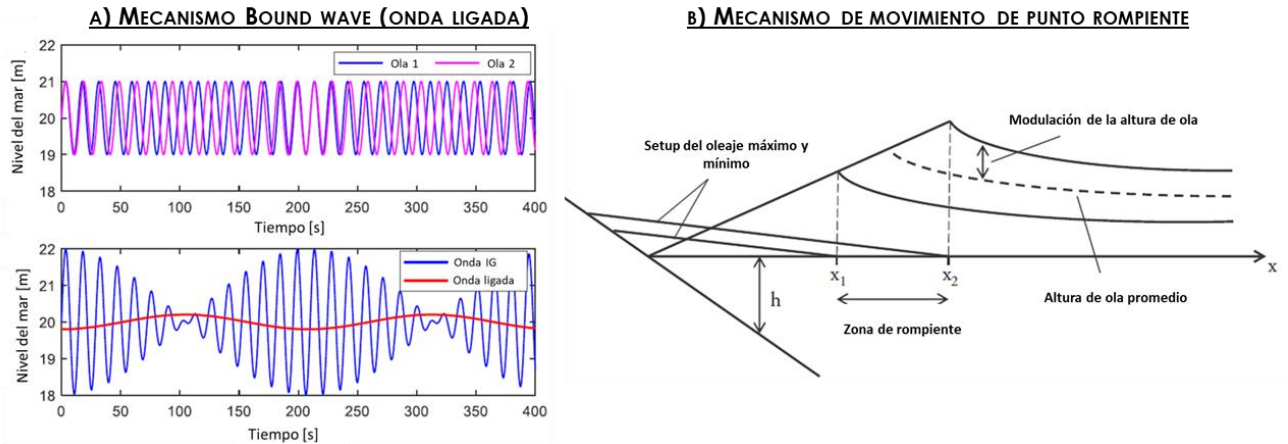


Figura 1. Mecanismos de generación de ondas de infragravedad. a) Mecanismo de onda ligada a los grupos. b) Mecanismo de oscilación del punto de rompiente.

## 1. METODOLOGÍA

### Sector de estudio

La avenida Perú, ubicada en la bahía de Valparaíso (Fig. 2), específicamente entre la desembocadura del estero Marga-Marga y la calle 8 Norte en la comuna de Viña del Mar, ha experimentado a lo largo de su historia eventos notables de inundación costera relacionados con las marejadas. En agosto del 2022, se llevó a cabo una remodelación significativa en esta área la cual representó una inversión cercana a los \$6.700 millones CLP. La renovación consistió en la instalación de una protección costera que se extiende por aproximadamente 800 metros y se compone de 3600 dolos, bloques de entre 5 y 8 toneladas cada uno. El propósito principal de esta protección es mitigar los daños generados por las marejadas, proteger tanto la infraestructura como la seguridad de los peatones y el tráfico vehicular. Es importante destacar que esta obra también se alinea con la necesaria adaptación al cambio climático, ya que busca enfrentar los posibles impactos futuros de los eventos meteorológicos extremos. Dicha estructura de protección es un claro ejemplo de cómo la infraestructura local puede ser fortalecida para enfrentar desafíos climáticos y proteger el patrimonio de la comunidad.

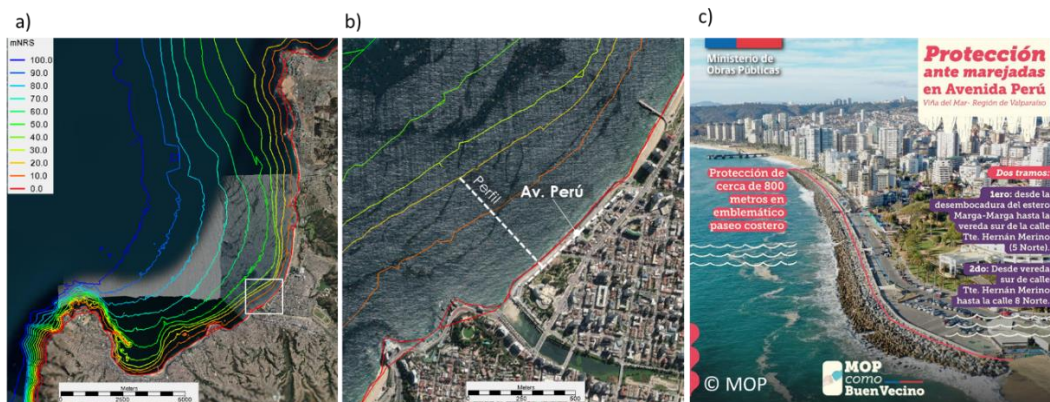


Figura 2. a) Bahía de Valparaíso. b) Sector de Av. Perú y perfil batimétrico utilizado. c) Protección costera de Av. Perú. Nueva defensa implementada para salvaguardar infraestructura y seguridad. Inversión: \$6.700 millones CLP. Adaptación al cambio climático y prevención de marejadas. Fuente: MOP.

## Caracterización de Eventos de Oleaje

Mediante la combinación del modelo numérico espectral de oleaje WaveWatch III v6.07 y el paquete físico ST4 (Ardhuin et al., 2011; Rascle & Ardhuin et al., 2013), se realizó una simulación en modo *hindcast* con un enfoque particular en la obtención del espectro de oleaje bidimensional basado en condiciones meteorológicas reanalizadas. Estas condiciones fueron obtenidas del reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al., 2011). Los detalles completos de la simulación se encuentran en el trabajo exhaustivo de Esparza (2023).

A partir de esta simulación, se seleccionaron dos eventos de oleaje de gran relevancia para la zona central de Chile (Campos et al., 2013): uno ocurrido el 3 de julio de 2013 y otro el 8 de agosto de 2015. Estos eventos destacaron debido a su importancia y al impacto en la zona de estudio. La elección de estos eventos se basó en sus características distintivas y su capacidad para proporcionar información sobre la dinámica del oleaje en la región. El evento del 3 de julio de 2013 se originó en relación con un ciclón extratropical en la región austral de Chile. A raíz de este fenómeno, se generó un oleaje tipo *swell* que se extendió a lo largo de casi toda la costa chilena. En la bahía de Valparaíso ( $73^{\circ}\text{W}$ ;  $33^{\circ}\text{S}$ ), se observaron condiciones marítimas con una altura significativa espectral  $H_{m0}=6\text{ m}$  y períodos *peaks* espectrales  $T_p = 20\text{ s}$ , procedentes del SW. Estos valores indican la presencia de un oleaje de largo período y baja dispersión direccional (Fig. 3a), lo que sugiere que este oleaje es resultado de un *swell* remoto generado en la zona austral de Chile. El evento del 8 de agosto de 2015 se originó debido a un ciclón subtropical, pero esta vez situado entre las latitudes  $30$  y  $35^{\circ}\text{S}$ . Este sistema ciclónico trajo consigo una baja presión atmosférica que, en la bahía de Valparaíso, disminuyó hasta alcanzar alrededor de  $990\text{ hPa}$ . Esta variación de presión atmosférica generó anomalías en el nivel del mar de aproximadamente  $30\text{ cm}$ , según lo documentado por Winckler et al. (2017). Es relevante señalar que esta baja presión se considera como la más extrema registrada históricamente en la región. Además, en aguas profundas ( $73\text{W}$ ;  $33\text{S}$ ), el evento del 8 de agosto de 2015 mostró una altura significativa espectral de  $H_{m0} = 8.54\text{ m}$ , con períodos máximos de  $T_p = 12.5\text{ s}$  y una incidencia desde el norte, acompañada de una dispersión direccional amplia. Esta característica es típica de un mar de viento, como se puede observar en la Fig. 3b.

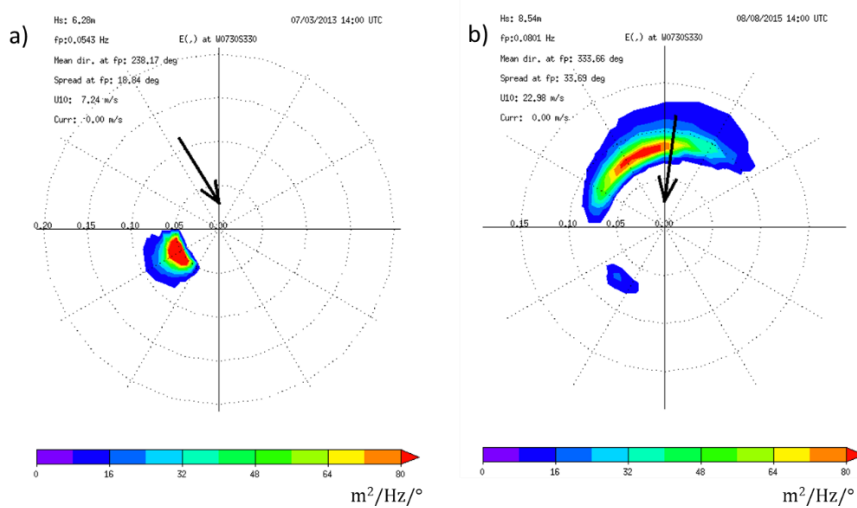


Figura 3. Espectros de oleaje simulados con WAVEWATCH III y extraídos en  $33^{\circ}\text{S}$ ,  $73^{\circ}\text{W}$ . a) Marejada del 3 de julio de 2013. b) Marejada del 8 de agosto de 2015.

## **Propagación de oleaje nearshore**

Los estados de mar asociados a los eventos del 3 de julio de 2013 y del 8 de agosto de 2015 se propagaron hasta una profundidad de 20 m (Fig. 4b), reduciendo la escala de los espectros direccionales obtenidos en aguas más profundas. Con el fin de optimizar los recursos computacionales, se eligió aplicar un método simplificado de propagación basado en una versión extendida del método de Massel (Massel et al., 1996; Winckler et al., 2022). Este enfoque parte de la suposición de que la altura de las olas cerca de la costa, para una onda monocromática individual, puede expresarse como la altura de las olas en aguas profundas multiplicada por un coeficiente de transformación. Dicho coeficiente abarca los procesos físicos de propagación costera, como la refracción, difracción y asomeramiento. Al combinar esta definición con la suposición de que un espectro de oleaje se compone de la superposición lineal de muchas ondas armónicas, cada intervalo de energía del espectro puede ser propagado hacia la costa utilizando la siguiente expresión:

$$S(f, \theta^*) = K_a^2 S(f, \theta) \frac{\partial \theta}{\partial \theta^*} \quad (1)$$

Donde  $S(f, \theta^*)$  representa el espectro direccional cerca de la costa,  $S(f, \theta)$  es el espectro direccional en aguas abiertas y  $K_a$  es el coeficiente de transformación. Este último se generó mediante simulaciones utilizando el modelo espectral de oleaje STWAVE (Massey et al., 2011), basado en 96 casos de altura significativa unitaria ( $H_{m0} = 1$  m). Estos casos se aplicaron como condiciones de borde de aguas profundas en el modelo STWAVE mediante espectros de olas tipo JONSWAP (Hasselmann et al., 1973). Estas simulaciones abarcaron un amplio rango de períodos de ola (6 s a 26 s) y direcciones ( $202.5^\circ$  a  $360^\circ$ ), proporcionando una representación detallada de diversas condiciones de oleaje promedio y extremo en la región. La batimetría utilizada corresponde a la del Atlas Hidrográfico de la Armada de Chile (SHOA).

## **Simulación de oleaje en la zona de rompiente**

Luego de obtener el campo de oleaje a una profundidad de 20 metros, se procedió a emplear el modelo SWASH (Simulating WAVes till SHore), el cual es un modelo desarrollado por la TU Delft (Zijlema et al., 2011), SWASH se basa en la ecuación no lineal de aguas someras con términos de presión no hidrostáticos. El modelo puede operar tanto en modo de profundidad promediada como en modo de múltiples capas. Es posible mantener la dispersión de frecuencias aumentando el número de capas. No obstante, un modelo con dos capas ya proporciona suficiente precisión en términos de dispersión de frecuencias para la mayoría de las aplicaciones costeras (Suzuki et al. 2020). Combinando con HFA (aproximación frontal hidrostática; Zijlema et al., 2011), el modelo puede manejar la rotura de las olas con suficiente precisión incluso en un número limitado de capas verticales. Además, se preservan las propiedades no lineales de las olas bajo olas rompientes, por ejemplo, asimetría y sesgo en la forma de la ola.

En el marco de la simulación de la propagación de las olas en la zona de la Av. Perú, se tomó en cuenta un perfil transversal a la costa, el cual fue diseñado considerando la batimetría de la zona y la geometría de la estructura antes de su remodelación, según lo obtenido de Repetto

(2010; Fig. 4). Las características geométricas de este perfil abarcan un ancho de berma de 5.4 m, una cota de coronamiento de enrocado a +5.4 m NRS y una cota de coronamiento del muro posterior a +6 m NRS. No se tuvieron en cuenta los efectos de disipación de las olas ocasionados por los elementos de la escollera, y además se asumió que la estructura es impermeable.

Las condiciones de borde empleadas en el modelo SWASH (*wavemaker*) se basaron en un espectro de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) con un parámetro  $\gamma$  de 3.3. La integración en el tiempo se realizó de manera explícita, y se estableció un número de Courant máximo de 0.5 para manejar las olas de gran amplitud y altamente no lineales utilizadas en este estudio. Para representar la fricción en el fondo en todo el dominio, tanto en la playa arenosa como en el dique, se utilizó con un coeficiente de Manning de  $0.019 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ . Se realizaron simulaciones con una duración total de 1800 segundos, de los cuales se restaron los primeros 100 segundos como periodo de "warm-up".

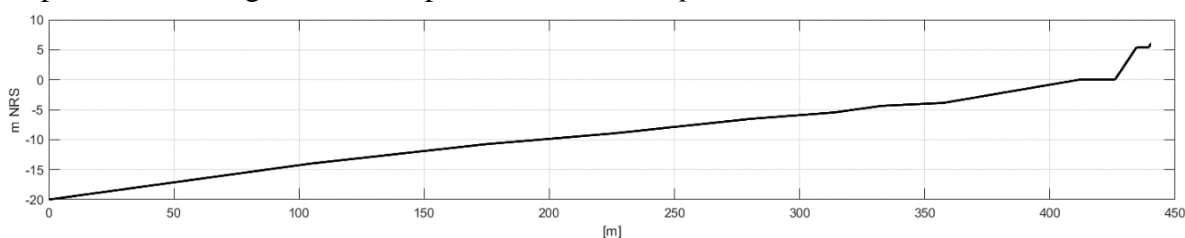


Figura 4. Perfil transversal a la costa, representativo de la zona de playa de Av. Perú. Este perfil batimétrico ha sido extraído desde -20 m NRS hasta la cota de coronamiento de la estructura de protección costera.

Los resultados se presentarán en forma de parámetros de resumen. Es importante mencionar que la altura significativa de las olas swell (SS) se define en este trabajo como la altura correspondiente a un periodo menor a 30 segundos, mientras que la altura significativa espectral de las ondas IG se calcula mediante la integración de toda la energía del espectro en el rango de periodos entre 30 segundos y 5 minutos. Además, se exhibirán series temporales en las que se aplicará un filtro pasa-bajas a las ondas IG, y se mostrarán espectros de frecuencia que ilustrarán la evolución de las bandas de energía tanto para las olas *swell* como para las ondas IG en el perfil.

## 2. RESULTADOS

### Oleaje al pie de la estructura

La Fig. 5 presenta una serie temporal de 24 horas que ilustra la evolución de la altura significativa y el período pico de las marejadas que ocurrieron el 3 de julio de 2013 (Figura 5a) y el 8 de agosto de 2015 (Figura 5b). En relación con la marejada del 3 de julio de 2013, se puede observar que presentó alturas significativas locales de aproximadamente  $H_{m0} = 2 \text{ m}$  y períodos peak de  $T_p = 20 \text{ s}$ , la atenuación se debe al abrigo natural brindado al oleaje SW por Punta Angeles. Además, conforme evolucionaba la marejada, su periodo peak disminuía gradualmente hasta los  $T_p = 15 \text{ s}$ , siguiendo un patrón común asociado a las olas dispersivas, donde las de períodos más largos arriban primero. Por otro lado, la situación fue diferente para el evento del 8 de agosto de 2015, donde se registraron alturas significativas que superaron los  $H_{m0} = 5 \text{ m}$ . Aunque el período peak fue de aproximadamente  $T_p = 12 \text{ s}$ , los períodos más cortos se debieron a que este evento se generó en zonas más cercanas a la bahía de Valparaíso, lo que resultó en una propagación de las olas a una distancia menor. En

consecuencia, las olas llegaron en una condición tipo mar de viento. Además, la orientación de la bahía de Valparaíso favorece que estos eventos, que inciden desde el cuarto cuadrante, puedan llegar de manera más directa al sector de la Avenida Perú.

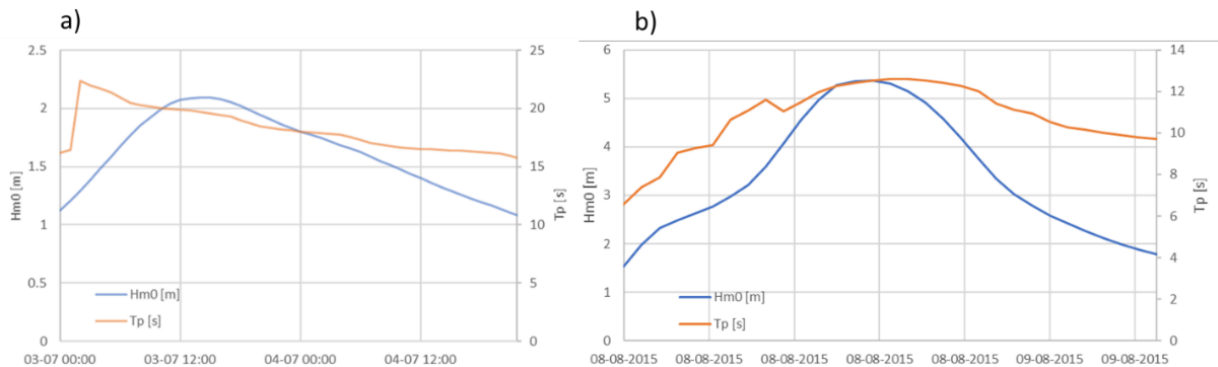


Figura 5. Altura significativa (línea azul) y periodo peak (línea naranaja) para: a) Marejada del 8 de agosto de 2015. b) Marejada del 3 de julio de 2013.

Finalmente, a partir del presente análisis, se seleccionaron 2 casos para ser simulados utilizando el modelo SWASH. 1)  $H_{m0} = 2$  m;  $T_p = 20$  s (caso representativo de la marejada del 3 de julio de 2013). 2)  $H_{m0} = 5$  m;  $T_p = 12$  s (caso representativo de la marejada del 8 de agosto de 2015). Además, para ambos casos se consideró un nivel de marea de +1 m NRS, el cual se incluyó como un desplazamiento al perfil batimétrico.

### **Evolución de la energía del oleaje en la costa de Av. Perú**

En la Fig. 6a se presenta la evolución de la altura significativa asociada a la banda de las olas *swell* (SS) (línea azul) y a las ondas IG (línea morada) durante el evento del 3 de julio de 2013. Se observa que la ola SS muestra oscilaciones a medida que se propaga hacia la costa, con una tendencia a incrementar la altura debido al asomeramiento. La ola SS rompe muy próxima a la estructura en aproximadamente la distancia de 50 a 100 m de distancia con una altura significativa de  $H_{m0,SS} = 2.7$  m en una profundidad de 3m NRS. Las oscilaciones de la altura significativa SS que se presentan a lo largo del perfil podrían atribuirse al cambio de pendiente entre las distancias de 50 a 150 m, lo que podría inducir reflexiones de las ondas incidentes. En cuanto a la onda IG (línea morada), en el área cercana al *wavemaker*, presenta una altura inferior a 0.3 m y se mantiene prácticamente constante hasta una distancia de 200 m y una profundidad de 10 m NRS. A partir de este punto, la altura de la onda IG comienza a amplificarse, alcanzando alrededor de  $H_{m0,IG} = 0.5$  a 0.7 m en la base de la estructura. En el caso del evento del 8 de agosto de 2015 (Fig. 6b), se observa una propagación relativamente uniforme de la ola SS, la cual tiende a romper a una distancia de 200 m y a una profundidad de 8 m NRS. A diferencia del caso anterior, debido al periodo peak más corto, la ola SS presenta un menor asomeramiento. Sin embargo, su mayor altura contribuye a que rompa en profundidades mayores y en una ubicación más alejada de la estructura. En relación con la ola IG, se puede apreciar que su altura es mayor. En el área cercana al *wavemaker*, la altura de la ola IG alcanza aproximadamente 0.8 m. Además, se observan dos sectores donde la altura de la ola IG aumenta: a los 250 m (aproximadamente donde inicia la rotura) y a los 50 m (al pie de la estructura). En estos puntos, la altura de la ola IG se eleva por encima de 1 m y llega a alcanzar 1.4 m, respectivamente.

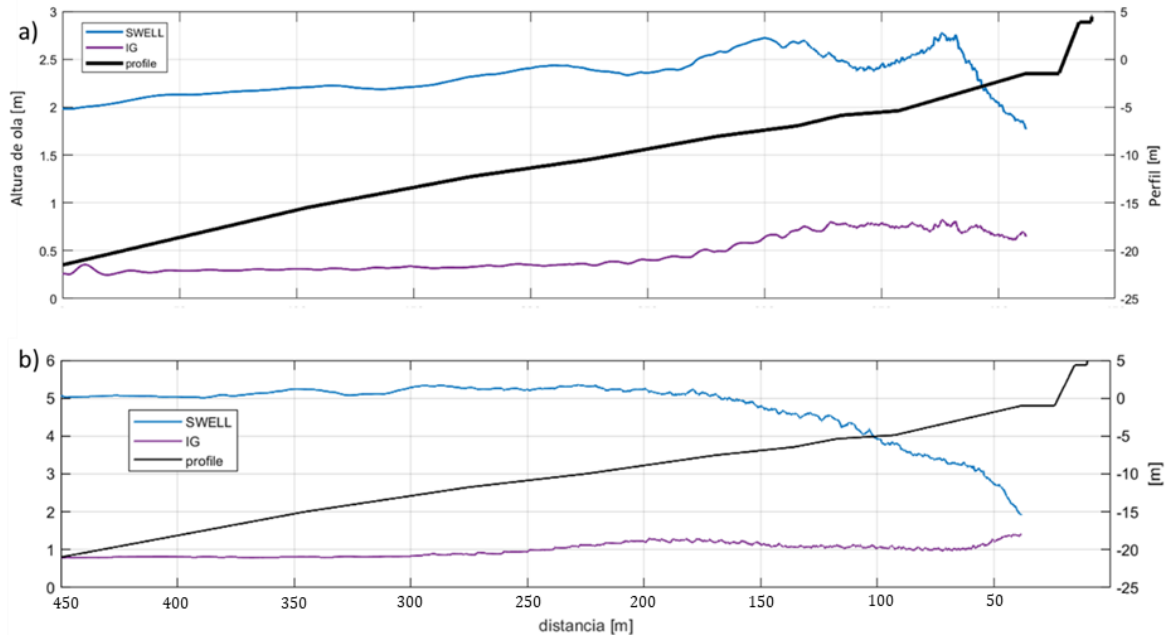


Figura 6. Distribución en el perfil de la altura significativa correspondiente a las olas tipo swell (SS) y la altura relacionada con las ondas de infragravedad ( $H_{m0,IG}$ ). a) Evento del 3 de julio de 2013. b) Evento del 8 de agosto de 2015.

En las Fig. 7 y 8 se presentan las series temporales de las variaciones en la superficie del mar correspondientes a los eventos del 3 de julio de 2013 y el 8 de agosto de 2015, desde la paleta (*wavemaker*) ubicada a 20 metros NRS hasta la base de la estructura. Durante el evento del 3 de julio de 2013, se observa que tanto en la paleta como a una profundidad de 10 m NRS (Fig. 7 a y b), la señal de la onda IG (línea roja), exhibe oscilaciones mínimas, aunque es evidente su presencia en los grupos de olas incidentes. A medida que se desciende a una profundidad de 5 m NRS (Fig. 7c), estas oscilaciones se intensifican, alcanzando su máxima amplitud en el pie de la estructura (Fig. 7d). En esta zona, los periodos registrados varían entre 1 y 3 min, y tienden a modular las amplitudes de las olas individuales swell (SS).

En el evento del 8 de agosto de 2015, se presenta una condición similar, donde la onda IG, asociada al grupo de olas, muestra una oscilación mínima en las zonas del *wavemaker* y a una profundidad de 10 m NRS (Fig. 8 a y b). No obstante, esta oscilación tiende a manifestarse con mayor amplitud a una profundidad de 5 m NRS (Fig. 8c), y alcanza su máxima intensidad en el pie de la estructura (Fig. 8d). En esta área, es evidente cómo la onda IG influye en las oscilaciones de las olas individuales SS, afectando tanto sus valores máximos como mínimos. Vale la pena señalar que, en contraste con el evento anterior, en este caso la onda IG incidente exhibe periodos en el rango de 30 a 100 s.

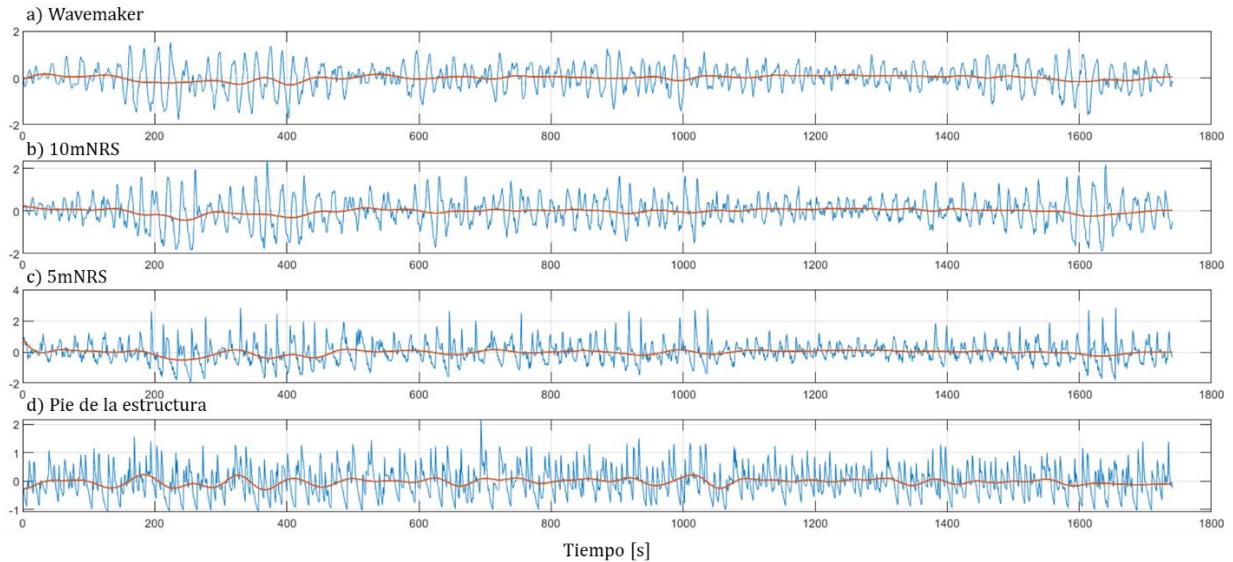


Figura 7. Series de tiempo de las variaciones en la superficie del agua (línea azul) y la serie filtrada con un pasa bajos de 2 horas (línea roja) para el evento del 3 de julio de 2013. a) Profundidad de 20 metros NRS en el área del wavemaker. b) Profundidad de 10 mNRS. c) Profundidad de 5 m NRS. d) Base de la estructura.

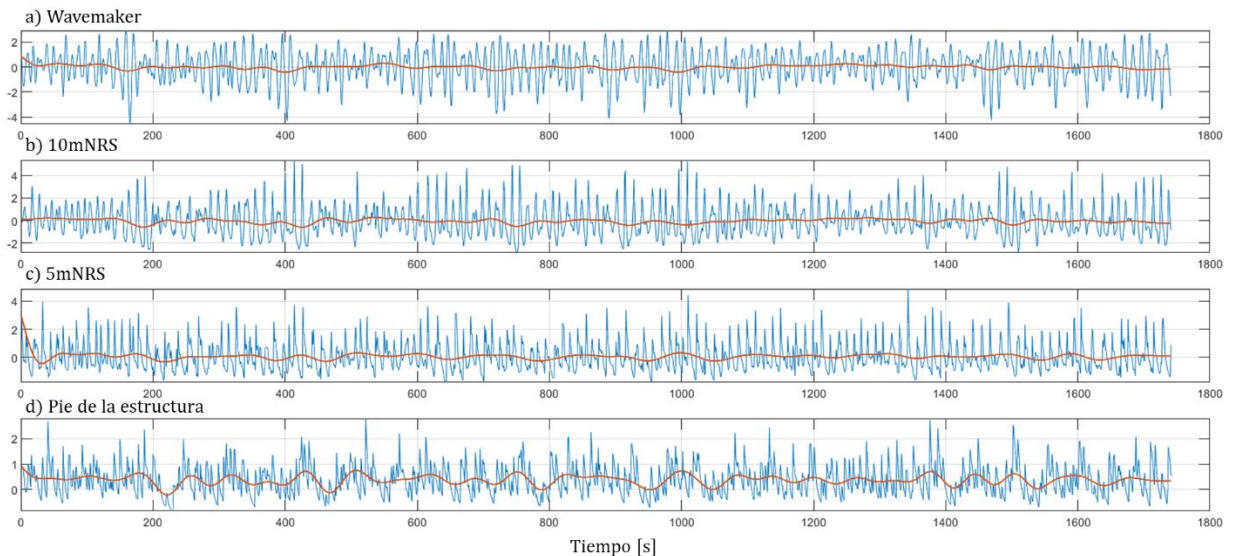


Figura 8. Series de tiempo de las variaciones en la superficie del agua (línea azul) y la serie filtrada con un pasa bajos de 2 horas (línea roja) para el evento del 8 de agosto de 2015. a) Profundidad de 20 mNRS en el área del wavemaker. b) Profundidad de 10 m NRS. c) Profundidad de 5 mNRS. d) Base de la estructura.

La influencia de las ondas IG en la propagación de las olas se hace evidente al examinar los espectros de frecuencia generados para ambos eventos de oleaje (Fig. 9 y 10). En estos espectros, se observa claramente cómo la energía asociada a la componente de infragravedad comienza a aumentar de manera significativa a una profundidad de 5 m NRS, y esta tendencia se intensifica aún más en el pie de la estructura. Este patrón de aumento en la amplitud de la componente de infragravedad a medida que se acerca a aguas más someras sugiere una interacción cada vez más influyente entre las ondas IG y las características del fondo marino. Este comportamiento puede ser influenciado por cambios en la geometría del fondo y la presencia de la estructura de protección costera en la zona.

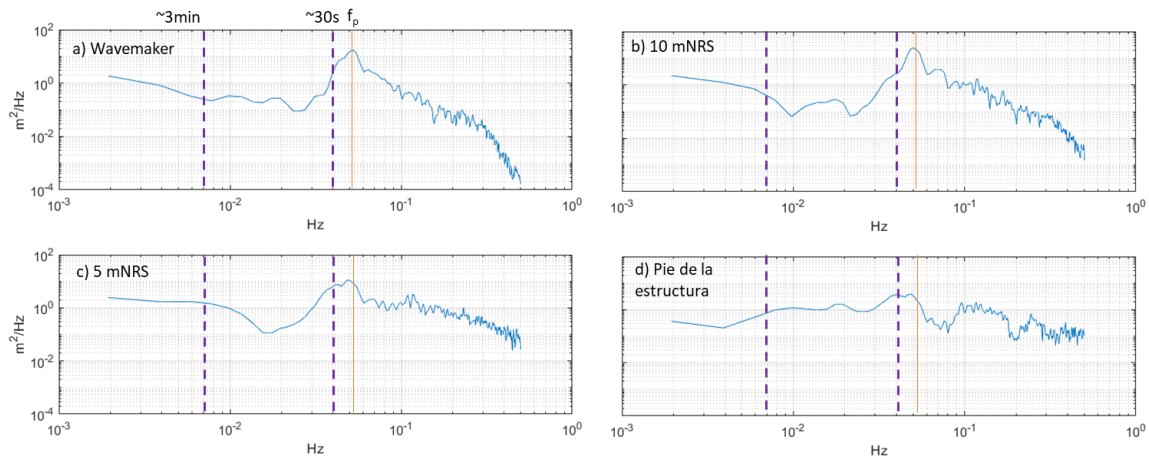


Figura 9. Espectros de frecuencia para el evento del 3 de julio de 2013. a) En la paleta generadora. b) A una profundidad de 10 m NRS. c) A una profundidad de 5 m NRS. d) En el pie de la estructura. Las líneas de trazos morados representan la banda de frecuencias asociada a las ondas de infragravedad (IG), mientras que la línea continua naranja muestra la banda de frecuencias pico.

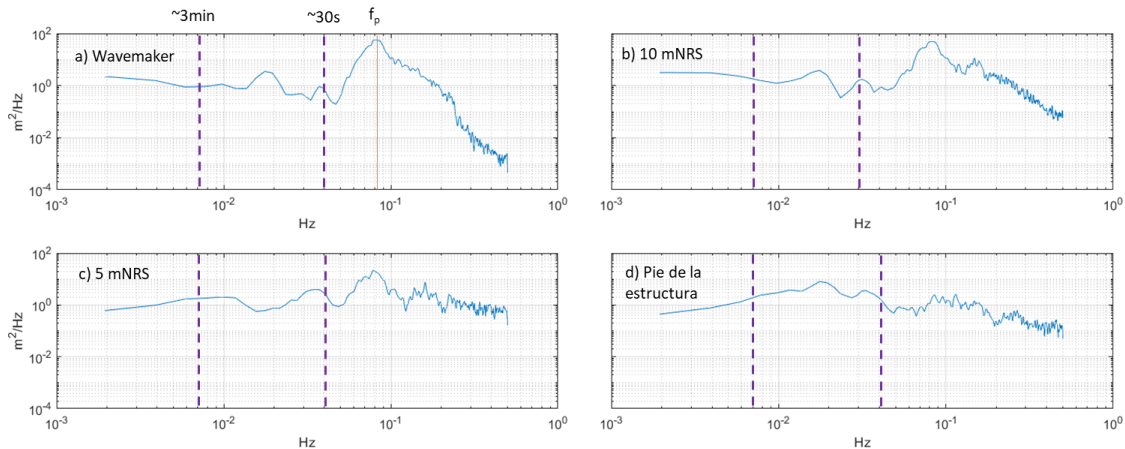


Figura 10. Espectros de frecuencia para el evento del 8 de julio de 2015. a) En la paleta generadora. b) A una profundidad de 10 m NRS. c) A una profundidad de 5 m NRS. d) En el pie de la estructura. Las líneas de trazos morados representan la banda de frecuencias asociada a las ondas de infragravedad (IG), mientras que la línea continua naranja muestra la banda de frecuencias pico.

### 3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este estudio, se llevó a cabo un análisis detallado de la propagación de olas en la zona de la Avenida Perú, considerando dos eventos de oleaje significativos: el 3 de julio de 2013 y el 8 de agosto de 2015. Mediante el uso del modelo SWASH, se logró caracterizar la propagación de las olas SS en la zona de rompiente y la generación las ondas IG en la proximidad de la estructura costera emplazada en Av. Perú.

En el evento del 3 de julio de 2013, las ondas de IG mantuvieron una altura por debajo de 0.3 m en profundidades superiores a los 10 m NRS. No obstante, a medida que avanzaban hacia aguas más someras y se aproximaban a la estructura costera, estas ondas IG comenzaron a aumentar gradualmente en altura. Cerca de la base de la estructura, la altura de la onda IG

alcanzó valores de alrededor de 0.5 a 0.7 m. Esto pone de manifiesto que, aunque las alturas iniciales de las ondas IG fueran modestas, su influencia en la modulación de las olas swell (SS) y en la dinámica cerca de la estructura se hizo evidente a medida que se acercaban a aguas más someras y a la zona de la estructura. Por otro lado, en el caso del evento del 8 de agosto de 2015, las ondas IG alcanzaron alturas aún mayores, superando 1 m en dos puntos específicos, aproximadamente a 250 metros y 50 metros de la estructura. Este evento se caracterizó por la propagación relativamente uniforme de las olas swell SS, y aunque tenían un período *peak* más corto, su mayor altura contribuyó a que rompieran en profundidades mayores y a una ubicación más alejada de la estructura. Las ondas IG, en este caso, jugaron un rol significativo al influir en las oscilaciones de la superficie libre, modulando tanto sus valores máximos como mínimos.

En ambos eventos analizados, los espectros de frecuencia mostraron que la energía relacionada con las ondas IG aumentaba de manera significativa a una profundidad de 5 m NRS y se intensificaba aún más en la base de la estructura. Esta tendencia sugiere que es posible que las ondas IG incrementen su altura a medida que las aguas se vuelven más someras, un fenómeno que ha sido descrito por Battjes et al. (2004). En su estudio, destacaron que el aumento de la altura de las ondas IG en función de la profundidad local es mayor que el de las olas largas libres, lo que se conoce como la Ley de Green. No obstante, es importante señalar que dicha investigación se llevó a cabo en un modelo físico a escala tipo playa y no en una estructura costera. Hasta la fecha, no se han realizado experimentos similares en zonas de estructuras de protección costera. Por lo tanto, resulta esencial realizar investigaciones adicionales específicas para comprender la influencia de las ondas IG en estas ubicaciones y cómo interactúan con la presencia de una estructura costera.

La influencia de las ondas IG en los sobrepasos en estructuras de protección costera es actualmente un tema relevante en la ingeniería de costas (Hofland et al., 2017; Suzuki et al., 2020; Lashley et al., 2022). La capacidad de estas ondas para modular el nivel del mar al pie de la estructura puede tener implicaciones importantes en aspectos como los volúmenes individuales de sobrepaso, el espesor y la velocidad del flujo en las inmediaciones de las estructuras. Las formulaciones convencionales de sobrepaso tienden a basarse en valores promedio del flujo, lo cual puede omitir información valiosa sobre la evolución temporal de estos fenómenos, como se ha descrito en la literatura. La evolución temporal del sobrepaso es relevante para cuantificar adecuadamente la amenaza asociada a este tipo de fenómeno (Sandoval y Bruce, 2018). Esto cobra aún más relevancia al considerar que hacia finales de siglo se espera un aumento del nivel medio del mar entre 40 y 60 cm (Oppenheimer et al., 2019).

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al equipo de ingenieros de Meric por la información de oleaje y el apoyo técnico brindado en mi investigación doctoral. También a Cigiden por la gestión y el financiamiento proporcionado para la asistencia a este congreso. Además, mi agradecimiento al INH por la información sobre Avenida Perú y al SHOA por la información sobre la bahía de Valparaíso. Agradezco al NLHPC (National Laboratory for High Performance Computing) de la Universidad de Chile por las horas de cómputo subvencionadas para mi investigación.

## REFERENCIAS

- Ardhuin, F., Hanafin, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queffelec, P., Obrebski, M., ... & Vandemark, D. (2011, October). Calibration of the IOWAGA global wave hindcast (1991–2011) using ECMWF and CFSR winds. In *Proceedings of the 2011 International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting and 3rd Coastal Hazard Symposium*, Kona, HI, USA (Vol. 30, p. 375).
- Battjes, J. A., Bakkenes, H. J., Janssen, T. T., & van Dongeren, A. R. (2004). Shoaling of subharmonic gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C2).
- Bertin, X., de Bakker, A., Van Dongeren, A., Coco, G., André, G., Ardhuin, F., ... & Tissier, M. (2018). Infragravity waves: From driving mechanisms to impacts. *Earth-Science Reviews*, 177, 774-799.
- Campos-Caba, R. (2016). Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile (Tesis de ingeniería oceánica). Escuela de Ingeniería Oceánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso.
- Esparza, C. (2023). Extreme Sea Level Projections in Cartagena Bay towards mid and end of the Twenty-First Century under RCP8.5 scenario (Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería). Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., ... & Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*.
- Hofland, B., Chen, X., Altomare, C., & Oosterlo, P. (2017). Prediction formula for the spectral wave period  $T_{m-1,0}$  on mildly sloping shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 123, 21-28.
- Lashley, C. H., Jonkman, S. N., van der Meer, J., Bricker, J. D., & Vuik, V. (2022). The influence of infragravity waves on the safety of coastal defences: a case study of the Dutch Wadden Sea. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(1), 1-22.
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481-504.
- Massey, T. C., Anderson, M. E., Smith, J. M., Gomez, J. M., & Jones, R. (2011). *STWAVE: Steady-state spectral wave model user's manual for STWAVE, Version 6.0*.
- Massel, S. R. (1996). *Ocean surface waves: their physics and prediction* (Vol. 11). World scientific.
- Oppenheimer, M., Glavovic, B., Hinkel, J., & Frederikse, T. (2019). Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. En *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (Capítulo 4). Cambridge University Press.
- Rasche, N., & Ardhuin, F. (2013). A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization. *Ocean Modelling*, 70, 174-188.
- Repetto, A. (2011). Metodología para la simulación aleatoria de temporales. Aplicación al cálculo del sobrepaso en Av. Perú, Viña del Mar, Chile (Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María).
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Goldberg, M. (2010). NCEP climate forecast system reanalysis (CFSR) monthly products, January 1979 to December 2010.
- Sandoval, C., & Bruce, T. (2018). Wave overtopping hazard to pedestrians: Video evidence from real accidents. In *Coasts, marine structures and breakwaters 2017: Realising the potential* (pp. 501-512).
- Suzuki, T., Altomare, C., Yasuda, T., & Verwaest, T. (2020). Characterization of overtopping waves on sea dikes with gentle and shallow foreshores. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 752.
- Symonds, G., D. A. Huntley, and A. J. Bowen (1982), Two dimensional surfbeat: Long wave generation by a time varying breakpoint, *J. Geophys. Res.*, 87, 492-498.
- Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beyá, J. F., & Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 622-648.
- Winckler, P., Esparza, C., Mora, J., Melo, O., Bambach, N., Contreras-López, M., & Sactic, M. I. (2022). Impacts in ports on a tectonically active coast for climate-driven projections under the RCP 8.5 scenario: 7 Chilean ports under scrutiny.
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*.

