

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

PROPAGACIÓN DE OLEAJE EN UN CANAL MAREAL DE ALTO FLUJO

MARICARMEN GUERRA P.¹
NICOLÁS SAGREDO R.²
ALEX E. HAY.³

RESUMEN

Los canales mareales conectan bahías cerradas o estuarios con el océano abierto. En grandes sistemas de estuarios o regiones de fiordos, los canales mareales son fundamentales para la circulación costera, permiten la migración de organismos y mamíferos, constituyen rutas de navegación y, más recientemente, son de interés para la extracción de energía mareomotriz. Los canales mareales de alto flujo ($Re \sim O(10^8)$) se caracterizan por fuertes corrientes bidireccionales acompañadas de alta intensidad turbulenta. Como en la mayoría de los ambientes costeros, los flujos mareales se ven afectados por el viento y el oleaje, sobre todo durante eventos meteorológicos severos. La ocurrencia combinada de fuertes corrientes y oleaje es un proceso acoplado no lineal en el que se modifica tanto el oleaje incidente como la corriente y la turbulencia a lo largo de la columna de agua. Estas interacciones pueden crear condiciones peligrosas para el tráfico marítimo y aumentar las cargas sobre la infraestructura costera. En este trabajo se evalúa la evolución de los parámetros resumen del oleaje en un canal mareal de alto flujo para distintas condiciones de oleaje y de marea. Se utilizan datos sincrónicos de corrientes y oleaje medidos por un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP). Los resultados indican que el crecimiento y la propagación del oleaje están acoplados con la magnitud y dirección relativa de la corriente. Se observa consistentemente un aumento importante de la altura significativa y disminución de la longitud de onda cuando el oleaje se propaga opuesto a la corriente, mientras que la altura significativa es prácticamente nula para el caso contrario.

¹ Profesora, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción - email: marguerra@udec.cl

² Ingeniero Civil - email nicosagredo2016@udec.cl

³ Professor, Department of Oceanography, Dalhousie University – email: alex.hay@dal.ca

1. INTRODUCCIÓN

Los canales de marea conectan bahías cerradas o estuarios con el océano abierto. En grandes sistemas de estuarios o regiones de fiordos, los canales mareales son fundamentales para la circulación costera, para la ecología y la calidad del agua en su ecosistema, permiten la migración de organismos y mamíferos, constituyen rutas de navegación y, más recientemente, son de interés para la extracción de energía mareomotriz.

La hidrodinámica de los canales mareales es compleja. Éstos se caracterizan típicamente por un gran rango de marea, y fuertes corrientes bidireccionales acompañadas de alta intensidad turbulenta (Lueck & Lu, 1997; Aiken, 2008). Observaciones de turbulencia en canales mareales de alto flujo indican que las estadísticas de turbulencia como espectros y tasas de disipación de energía cinética turbulenta (en ausencia de oleaje) son moduladas por la magnitud y dirección de las corrientes de marea (McMillan & Hay, 2017; Guerra & Thomson, 2017; Guerra et al., 2017).

La ocurrencia combinada de fuertes corrientes, turbulencia y oleaje juega un papel importante en la hidrodinámica del canal al modificar tanto el oleaje incidente como la velocidad y la turbulencia a través de la columna de agua. La propagación de ondas de gravedad superficiales en presencia de corrientes fuertes y variables afecta las propiedades del oleaje, la estructura de la corriente y la intensidad de la turbulencia en la parte superior de la columna de agua (Groeneweg & Klopman, 1998). Varias investigaciones han abordado este problema tanto en la región cercana a la costa: en las desembocaduras de los ríos y dentro de la zona de surf (Olabarrieta et al. 2011, Dodet et al., 2013, Olabarrieta et al. 2014, Akan et al. 2017 y otros), como en grandes corrientes como la Corriente del Golfo (Heggermiller et al., 2019) o la Corriente Circumpolar Antártica (Rapizo et al. 2018).

Las interacciones oleaje-corriente fueron introducidas por primera vez por Longuet-Higgins y Stewart (1960 y 1964). Desarrollaron el concepto de tensor de radiación y demostraron la transferencia de momentum entre el oleaje y la velocidad de la corriente. Posteriormente, en 1979, Grant y Madsen introdujeron modificaciones del perfil de velocidad a través de una mayor fricción de fondo aparente causada por la presencia de olas. Olabarrieta et al. (2010) demostraron que cuando hay interacción oleaje-corriente el perfil vertical de corriente pierde su forma logarítmica. Cuando el oleaje y la corriente se propagan en dirección opuesta, la velocidad de la corriente aumenta cerca de la superficie libre y disminuye en el fondo, y viceversa para oleaje propagándose a favor de la corriente.

Los principales efectos de las corrientes sobre la propagación del oleaje incluyen la refracción producida por gradientes horizontales de velocidad, y un cambio en la frecuencia de la ola a través de una modificación de la relación de dispersión del oleaje (Kirby y Chen, 1989; Nielsen, 2009). Este cambio depende de la magnitud de la corriente y del ángulo relativo entre la dirección de propagación de la onda y la dirección de la corriente (Nielsen, 2009). Si las olas se propagan en contra de las corrientes, se espera una disminución en la longitud de onda, un aumento de la esbeltez (*steepness*) y consecuentemente un aumento del rompimiento (Zippel & Thomson, 2017). Este aumento en el rompimiento de las olas

conduce a un aumento de la intensidad de la turbulencia en la parte superior de la columna de agua (Craig y Banner, 1994; Zippel y Thomson, 2017). El bloqueo del paso de las olas ocurre cuando la corriente de marea opuesta es igual a la velocidad del grupo de olas y las olas no pueden propagarse en contra de las corrientes (Wolf y Prandle, 1999).

A pesar de los avances en interacciones oleaje-corriente, los detalles y la importancia relativa de estos procesos acoplados no-lineales en canales mareales altamente energéticos no se comprenden completamente y su representación precisa en modelos numéricos hidrodinámicos sigue siendo un desafío.

En este trabajo se describen eventos de oleaje local y de fondo en un canal mareal de alto flujo a partir de datos sincrónicos de corrientes, turbulencia y oleaje medidos por un perfilador de corriente acústico Doppler (ADCP). Para cada evento de oleaje identificado se describe también la evolución de los parámetros resumen del oleaje como altura significativa, espectro de frecuencia, periodo peak y longitud, evaluándose el comportamiento de estos parámetros durante uno o más ciclos de marea.

2. METODOLOGÍA

2.1 ZONA DE ESTUDIO Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

Las mediciones de terreno se llevaron a cabo en Grand Passage, un canal de mareal ubicado en la entrada de la Bahía de Fundy, en el suroeste de Nueva Escocia, Canadá (N 44.27°; W 66.34°), una de las bahías con el rango de mareas y corrientes más extremas del mundo. El canal Grand Passage es de aproximadamente 4 km de largo y 1.5 km de ancho el área de estudio. Durante la marea llenante, las corrientes de marea alcanzan velocidades de hasta 3 m/s y fluyen principalmente hacia el norte, desde la Bahía de Santa María hacia la Bahía de Fundy. En cambio, durante la marea vaciante, la dirección de las corrientes es opuesta. En la Figura 1 se presenta un mapa de Grand Passage, su ubicación en la Bahía de Fundy y dos imágenes de Google Earth© en marea llenante. En estas imágenes, se observa la presencia de oleaje en el canal, identificable por la espuma blanca cerca de la ubicación del instrumento, que corresponde a oleaje rompiente (whitecaps)."

Se utilizó un ADCP de 5 sondas acústicas marca Nortek modelo *Signature* de 500 kHz que se instaló en el fondo mirando hacia arriba a una profundidad media de 13.6 metros (44.2671° N; 66.3372° O).

El ADCP registró simultáneamente el perfil de velocidades con una resolución vertical de 0.5 metros utilizando sus cinco sondas acústicas. Además, midió la distancia desde el instrumento hasta la superficie libre mediante el modo altímetro, con una frecuencia de muestreo de 2 Hz (Nortek, 2018).

El ADCP registró sincrónicamente el perfil de velocidades con una resolución vertical de 0,5 utilizando sus cinco sondas acústicas. Además, midió la distancia desde el instrumento a la superficie libre utilizando su modo altímetro (Nortek, 2018) todo con una frecuencia de muestreo de 2 Hz. Las mediciones ocurrieron entre el 8 de marzo y el 3 de abril de 2016. El

instrumento se instaló de tal manera que los pares opuestos de sondas acústicas estaban alineados con la dirección principal y transversal del flujo en este sitio.

Se utilizan también en este estudio la magnitud y dirección del viento registrada en la estación meteorológica Brier Island, mantenida por la agencia ambiental de Canadá (*Environment Canada*).

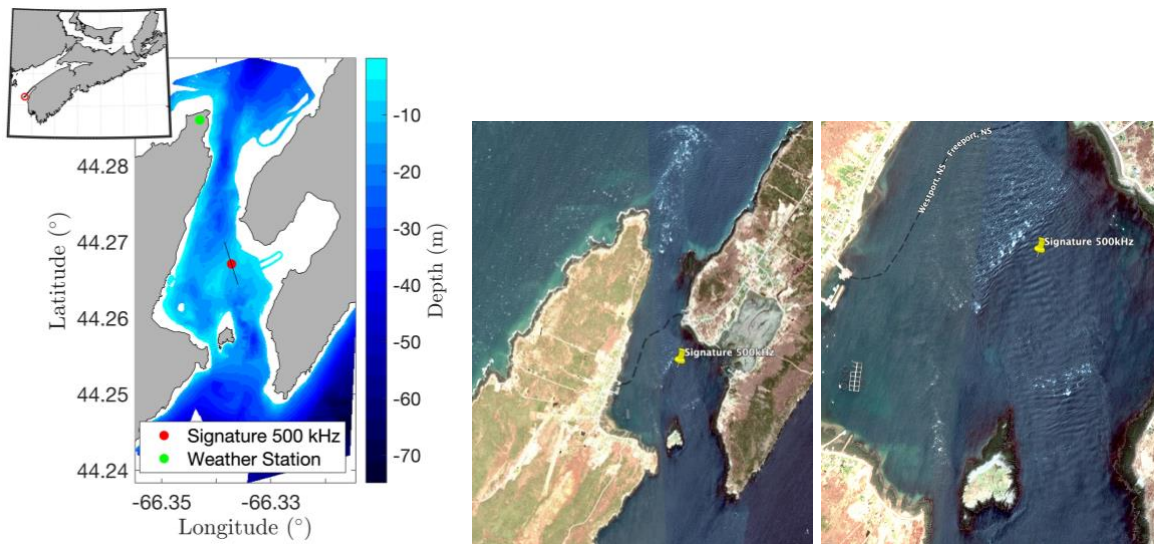


Figura 1. Panel izquierdo: Mapa del Canal Mareal Grand Passage, ubicación del instrumento y de la estación meteorológica utilizada en este estudio. Panel central y derecho: Imagen satelital obtenida de Google Earth© durante marea llanante (2013) y vista cercana al instrumento. Notar la presencia de oleaje rompiente en las cercanías de la ubicación del instrumento y en la salida norte del canal.

2.2 ANALISIS DE DATOS

Para identificar los periodos con presencia de oleaje se analizan las mediciones obtenidas con el altímetro (seguimiento de la superficie libre) del instrumento. La señal de marea es removida de las mediciones de la superficie libre utilizando un filtro pasa alto, obteniéndose variaciones de la superficie libre asociadas principalmente a oleaje y a pequeñas variaciones generadas por vórtices turbulentos de gran escala típicamente observados en este sitio.

Los datos de corriente y del altímetro filtrado son posteriormente procesados en intervalos de 10 minutos para asegurar la estacionariedad en términos de la velocidad de la corriente (McCaffrey et al., 2017). Cada intervalo de 10 minutos se examinó para determinar la presencia de oleaje. Se estimó el espectro de frecuencia de la señal filtrada del altímetro y de las velocidades verticales registradas por el ADCP y se identificó la existencia de un máximo en la banda de frecuencia del oleaje generado por viento (3 s a 20 s). Se aplicó también, un proceso de *zero-down crossing* para identificar alturas individuales de ola y determinar también así su presencia. Luego se estimó la altura significativa del oleaje (H_s) a y el periodo pico (T_p) a partir del espectro de oleaje calculado con los datos del altímetro filtrados.

La longitud de onda fue estimada resolviendo la relación de dispersión modificada por el desplazamiento Doppler soportado por el oleaje en presencia de una corriente:

$$\omega = \sigma + kU \cos \theta \quad (1)$$

donde ω es la frecuencia absoluta de las olas (observador fijo), σ es la frecuencia relativa de las olas, k es la magnitud del número de onda, U es la magnitud horizontal de la corriente, y θ es el ángulo relativo entre la dirección de propagación del oleaje y de la corriente. En este caso se utiliza la magnitud de la velocidad observada en la parte superior de la columna de agua, asumiendo que el gradiente vertical de velocidad en esa zona es mínimo.

La frecuencia de onda relativa se expresa en función del número de onda a partir de la relación de dispersión:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (0)$$

donde d es la profundidad media. La frecuencia absoluta del oleaje se define en este estudio como:

$$\omega = \frac{2\pi}{T_p} \quad (0)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación (1), se obtiene una ecuación implícita para el número de onda.

3. RESULTADOS

3.1 Señal acústica, velocidad media, y varianza

La Figura 2 muestra una porción de las series de tiempo medidas y que será analizada en este estudio, incluyendo la señal acústica registrada por el instrumento (corregida por atenuación del sonido debido a distancia, EL (dB)), la magnitud de la velocidad horizontal a lo largo de la columna de agua, y la varianza de la velocidad vertical registrada por la sonda vertical del instrumento (corregida por ruido Doppler). En todos los paneles se incluye la distancia del fondo a la superficie libre medida por el altímetro.

Se observa en los datos recolectados el carácter sinusoidal del nivel del mar y de las corrientes mareales, lo que es esperado para un canal mareal como *Grand Passage*. Se observa un rango máximo de marea de 4.7 m y corrientes de hasta 2.8 m/s en la dirección llenante, y 2.3 m/s en la dirección vaciante.

La señal acústica muestra, en ocasiones, altos niveles de eco que se extienden desde la superficie hacia el fondo del canal, principalmente en marea llenante. Como se mostrará más adelante, estas plumas son observadas en presencia de oleaje local y corresponden probablemente a burbujas inyectadas en la superficie libre durante oleaje rompiente (*whitecaps*) y transportadas a lo largo de la columna de agua por la turbulencia generada por las corrientes mareales (Guerra & Hay, 2022).

La varianza de la velocidad vertical registrada por el instrumento (estimada también para intervalos de 10 minutos) corresponde a una aproximación de la energía cinética turbulenta (TKE) disponible en la columna de agua.

Se observan altos niveles de TKE en la zona cercana a la superficie. En particular, estos niveles elevados coinciden con la presencia de plumas de burbujas a lo largo de la columna de agua. También se observan niveles altos de TKE cerca del fondo, especialmente durante marea llenante.

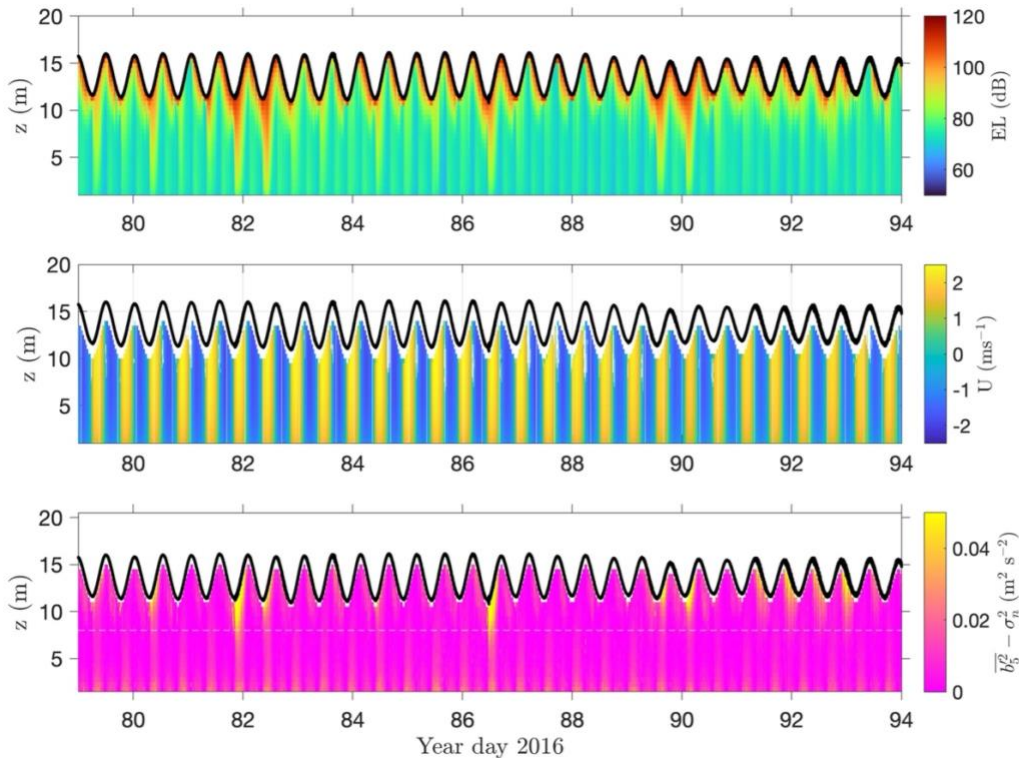


Figura 2. Panel superior: Señal acústica corregida por atenuación registrada por el ADCP. Panel intermedio: Magnitud de la velocidad con signo asociado a vaciante (negativo) y llenante (positivo). Panel inferior: Varianza de la velocidad vertical medida por la sonda acústica vertical del instrumento. En el eje X se utiliza como referencia temporal la variable *Year Day* que corresponde a los días transcurridos desde el 1 de enero de 2016.

3.2. Eventos de Oleaje

A partir de la señal del altímetro filtrada, la señal acústica y los datos de magnitud y dirección del viento obtenidos de la estación Brier Island, se identifican al menos 4 eventos de oleaje en el periodo de tiempo considerado en este estudio: días 79 a 94 de 2016. El registro de la superficie libre, el mismo registro filtrado en valor absoluto, y la magnitud y dirección del viento (referencia desde el norte el verdadero), se muestran en la Figura 3. Los eventos de oleaje se identifican en esta figura con los rectángulos verdes.

El evento 1 (día 82), muestra un aumento en el tamaño de variaciones de la superficie libre, y viento superior a 10 m/s, suficiente para generar oleaje local. Durante este evento el viento

proviene principalmente desde el oeste-noroeste y es cuasi-perpendicular a las corrientes de marea.

El evento 2 (día 86.5), muestra un aumento en el tamaño de variaciones de la superficie libre durante marea vaciante, y viento moderado cercano a los 10 m/s principalmente proveniente desde el norte.

El evento 3 (día 90), muestra un aumento sostenido en el tamaño de variaciones de la superficie libre, y viento fuerte cercano a los 15 m/s principalmente proveniente desde el oeste-noroeste. En este caso el viento es también cuasi-perpendicular a las corrientes de marea.

Finalmente, el evento 4 (días 91 a 94), muestra un aumento sostenido en el tamaño de variaciones de la superficie libre en marea llenante, vientos inferiores a los 10 m/s, pero principalmente proveniente desde el sur.

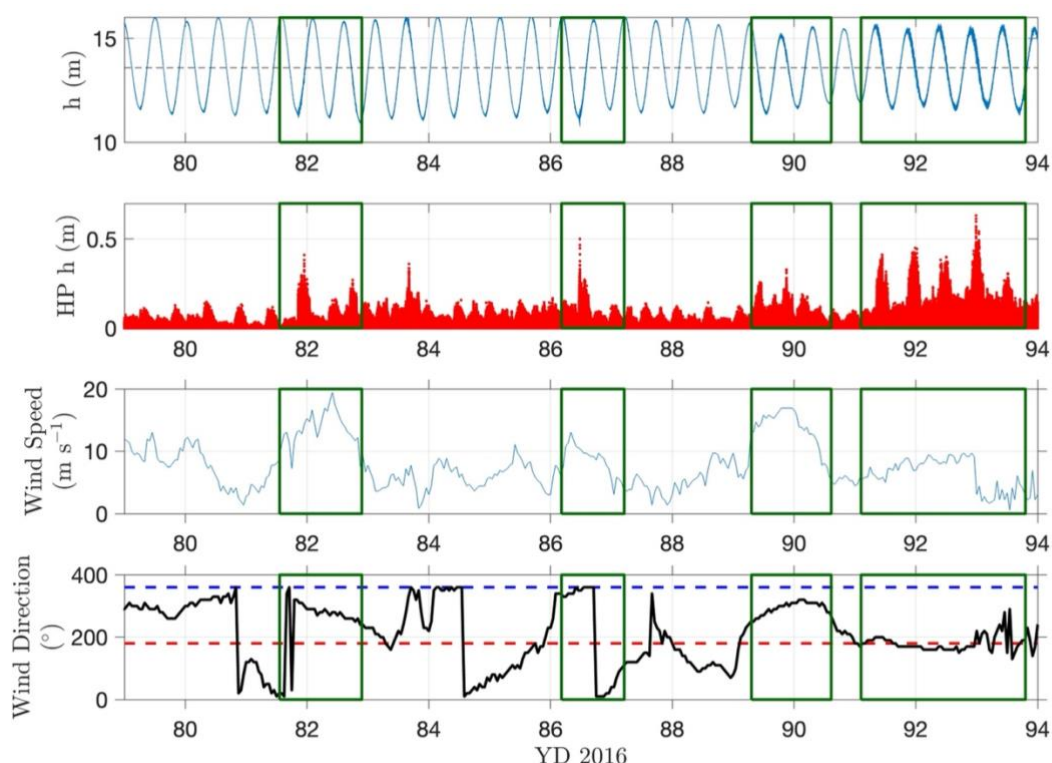


Figura 3. Panel superior: Registro de superficie libre medido con el modo altímetro del ADCP. Segundo panel: registro superficie libre filtrada. Tercer panel: velocidad del viento. Panel inferior: dirección del viento, referencia desde el norte verdadero.

La velocidad de la corriente promediada en la parte superior de la columna de agua, desde los 8 m desde el fondo hasta la superficie libre, y la altura significativa estimada para todos los intervalos de tiempo analizados se muestran en la Figura 4.

Para los cuatro eventos identificados se confirma que la altura significativa es modulada por la magnitud y dirección de la corriente.

Para el evento 1 se observa un aumento de la altura significativa en marea llenante (día 82), y luego, a medida que el viento modifica su intensidad y dirección, se observa un aumento en la altura significativa en marea vaciante (día 83). En este caso el viento no está alineado con dirección principal del flujo, y estimaciones de la dirección de propagación del oleaje utilizando las velocidades crudas registradas por el ADCP indican que el oleaje incide principalmente desde el nor-oeste en el día 82.

El oleaje identificado durante el evento 3 corresponden principalmente a oleaje local, y su dirección de propagación coincide con la dirección del viento. En este caso, se observa una modulación de la altura significativa en ambas condiciones de marea, siendo más altas las olas durante marea vaciante.

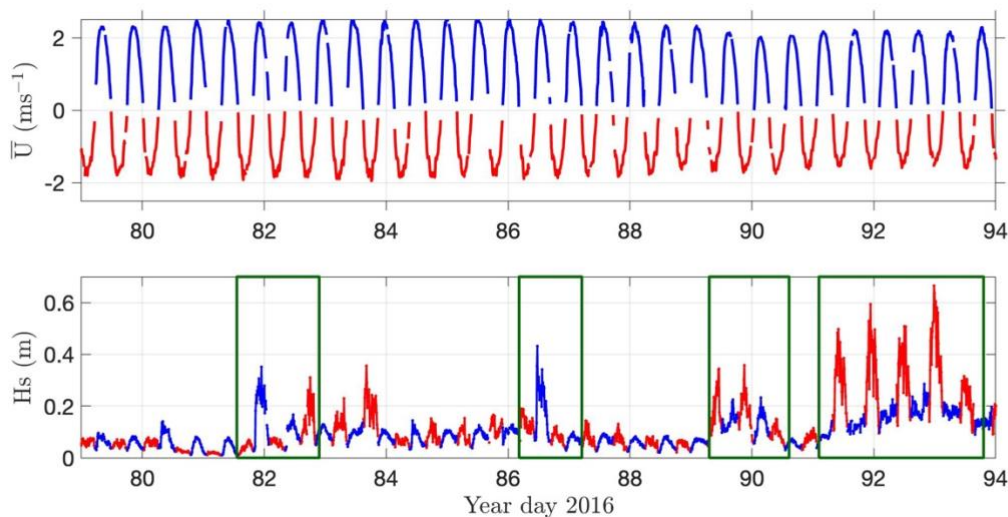


Figura 4. Panel superior: Velocidad promediada en la vertical en la parte superior de la columna de agua. Panel inferior: altura significativa estimada a partir de la integral del espectro de frecuencias de oleaje. En ambos paneles el color rojo denota corriente vaciante (hacia el sur), y el color azul corriente llenante (hacia el norte).

Las Figuras 5 y 6 muestran en detalle los resultados obtenidos para los eventos 2 y 4.

Si bien la velocidad del viento es baja durante el evento 2, su dirección de propagación es opuesta a la corriente llenante. Para este evento en particular se observa un aumento sostenido de la altura significativa durante marea llenante, mientras que la altura significativa es prácticamente nula en marea vaciante a pesar de que la velocidad del viento se mantiene constante durante el ciclo mareal. Durante marea llenante el periodo pico de las olas es aproximadamente 5 segundos, consistente con oleaje generado localmente. La longitud de las olas ha sido obtenida para este caso particular durante la marea llenante, y se observa un pequeño aumento de la longitud de onda a medida que disminuye la magnitud de la corriente, consistente con la literatura existente.

El evento 4 es un caso particular. La velocidad del viento es baja, sin embargo, durante este periodo se observan las alturas significativas más grandes del periodo estudiado. Utilizando las velocidades crudas registradas por el ADCP se establece que el oleaje incide principalmente desde el sur. La altura significativa es claramente modulada por la corriente,

aumentando sistemáticamente de tamaño durante marea vaciante (en contra del oleaje). El periodo pico de las olas varía entre los 8 y 10 segundos. La longitud de onda estimada muestra el comportamiento esperado: las olas son más cortas cuando se propagan en contra de una corriente y más largas (aunque pequeñas) cuando se propagan a favor de la corriente. En este caso particular, la señal acústica no muestra transporte de burbujas a lo largo de la columna de agua como si se observa en los eventos anteriormente descritos.

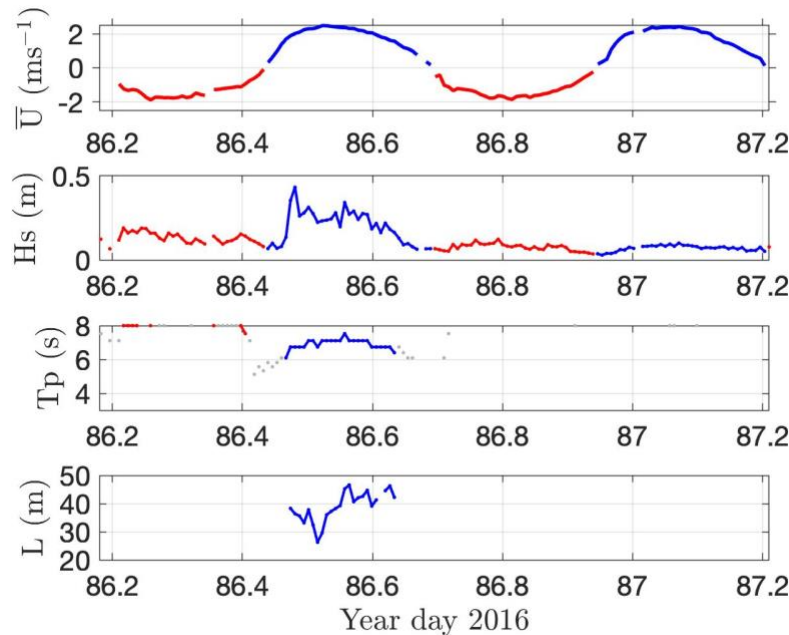


Figura 5. Resultados Evento 2. Panel superior: Velocidad promediada en la vertical en la parte superior de la columna de agua. Segundo panel: altura significativa estimada a partir de la integral del espectro de frecuencias de oleaje. Tercer panel: periodo peak estimado a través del espectro de frecuencias de oleaje. Panel inferior: Longitud de onda estimada resolviendo la ecuación de dispersión en presencia de corrientes. En todos los paneles el color rojo denota corriente vaciante (hacia el sur), y el color azul corriente llenante (hacia el norte).

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evalúa la interacción no lineal de dos procesos físicos que son fundamentales para comprender y gestionar el medio ambiente costero. Gran parte de nuestro conocimiento sobre las interacciones ola-corriente proviene de modelos numéricos, y relativamente pocos estudios abordan este problema mediante observaciones de terreno.

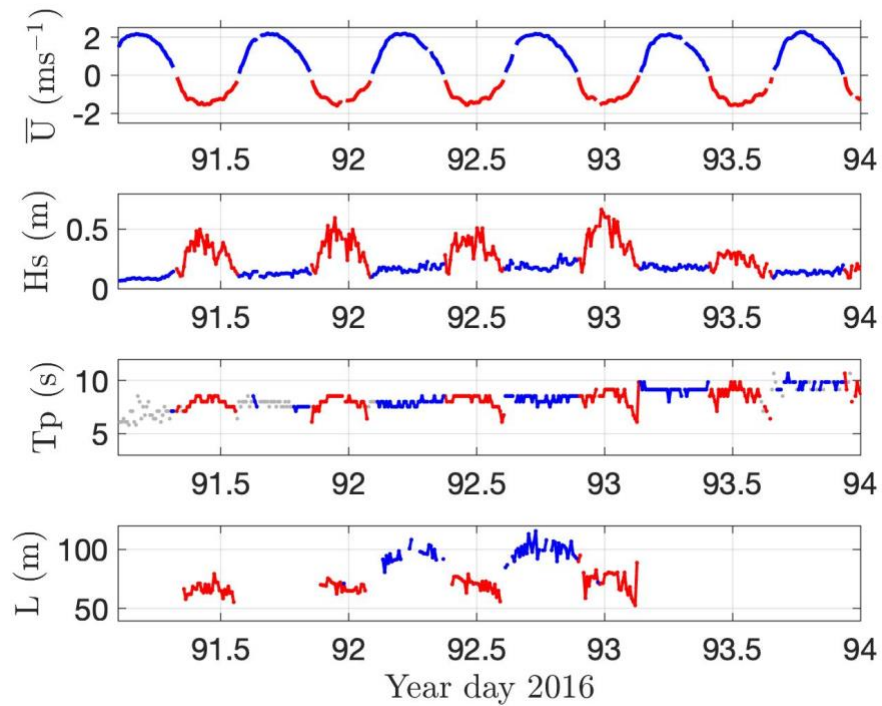


Figura 6. Resultados Evento 4. Panel superior: Velocidad promediada en la vertical en la parte superior de la columna de agua. Segundo panel: altura significativa estimada a partir de la integral del espectro de frecuencias de oleaje. Tercer panel: periodo peak estimado a través del espectro de frecuencias de oleaje. Panel inferior: Longitud de onda estimada resolviendo la ecuación de dispersión en presencia de corrientes. En todos los paneles el color rojo denota corriente vaciante (hacia el sur), y el color azul corriente llenante (hacia el norte).

En este trabajo se evalúa el comportamiento de los parámetros resumen del oleaje cuando éste se propaga en un canal mareal de alto flujo. Se analizan datos sincrónicos de corriente y oleaje obtenidos utilizando un ADCP de cinco sondas el cual permite rastrear la distancia desde el instrumento hasta de la superficie libre con alta precisión.

Se identificaron en este trabajo cuatro eventos de oleaje durante el periodo estudiado. Para cada evento se estimaron parámetros estadísticos de oleaje y se evaluó su evolución durante uno o más ciclos mareales.

Los resultados coinciden con la teoría reportada previamente en la literatura y resultados de laboratorio bajo condiciones controladas. En este canal de alta velocidad (3 m/s), la altura del oleaje es modulada por la magnitud y dirección de las corrientes tanto para oleaje local como de fondo.

El trabajo futuro incluye evaluar los cambios experimentados tanto por el perfil de velocidades como por los niveles de turbulencia en presencia de oleaje. Los resultados presentados en este trabajo confirman la necesidad de incluir este fenómeno acoplado en simulaciones numéricas de propagación de oleaje, sobre todo para evaluar las condiciones de navegación en un canal mareal de alto flujo.

Esta investigación permite identificar cuándo y dónde las interacciones ola-corriente son significativas y cuáles son sus implicaciones para la compleja dinámica de los canales de marea. Los resultados también son relevantes para comprender los procesos físicos en las desembocaduras de los ríos. La incorporación de corrientes en los modelos de oleaje mejoraría las predicciones locales de estado del mar y consecuentemente la seguridad de la navegación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es apoyado y financiado por el proyecto ANID Fondecyt de Iniciación 11220663. Se agradece al equipo del Laboratorio de Acústica Oceanográfica de Dalhousie University por haber recolectado y proporcionado los datos utilizados en este trabajo.

REFERENCIAS

Akan, Ç., Moghimi, S., Özkan-Haller, H. T., Osborne, J., & Kurapov, A. (2017). On the dynamics of the Mouth of the Columbia River: Results from a three-dimensional fully coupled wave-current interaction model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(7), 5218-5236.

Craig, P. D., & Banner, M. L. (1994). Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer. *Journal of Physical Oceanography*, 24(12), 2546-2559.

Dodet, G., Bertin, X., Bruneau, N., Fortunato, A. B., Nahon, A., & Roland, A. (2013). Wave-current interactions in a wave-dominated tidal inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3), 1587-1605.

Grant, W. D., & Madsen, O. S. (1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), 1797-1808.

Groeneweg, J., & Klopman, G. (1998). Changes of the mean velocity profiles in the combined wave-current motion described in a GLM formulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 370, 271-296.

Guerra, M., & Thomson, J. (2017). Turbulence measurements from five-beam acoustic Doppler current profilers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(6), 1267-1284.

Guerra, M., Cienfuegos, R., Thomson, J., & Suarez, L. (2017). Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile. *International journal of marine energy*, 20,

Guerra, M., & Hay, A. E. (2022). Acoustic backscatter from bubbles as a (quasi) passive tracer of turbulent mixing in high-flow tidal channels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 152(4), A152-A152.

Kirby, J. T., & Chen, T. M. (1989). Surface waves on vertically sheared flows: approximate dispersion relations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C1), 1013-1027.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1960). Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 8(4), 565-583.

Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964, August). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. In *Deep sea research and oceanographic abstracts* (Vol. 11, No. 4, pp. 529-562). Elsevier.

Lueck, R. G., & Lu, Y. (1997). The logarithmic layer in a tidal channel. *Continental Shelf Research*, 17(14), 1785-1801.

McCaffrey, K., Fox-Kemper, B., Hamlington, P. E., & Thomson, J. (2015). Characterization of turbulence anisotropy, coherence, and intermittency at a prospective tidal energy site: Observational data analysis. *Renewable Energy*, 76, 441-453.

McMillan, J. M., & Hay, A. E. (2017). Spectral and structure function estimates of turbulence dissipation rates in a high-flow tidal channel using broadband ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(1), 5-20.

Hegermiller, C. A., Warner, J. C., Olabarrieta, M., & Sherwood, C. R. (2019). Wave–Current Interaction between Hurricane Matthew Wave Fields and the Gulf Stream. *Journal of Physical Oceanography*, 49(11), 2883-2900.

Nielsen, P. (2009). *Coastal and estuarine processes* (Vol. 29). World Scientific Publishing Company.

Olabarrieta, M., Warner, J. C., Armstrong, B., Zambon, J. B., & He, R. (2012). Ocean–atmosphere dynamics during Hurricane Ida and Nor’Ida: An application of the coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 43, 112-137.

Olabarrieta, M., Geyer, W. R., & Kumar, N. (2014). The role of morphology and wave–current interaction at tidal inlets: An idealized modeling analysis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(12), 8818-8837.

Rapizo, H., Durrant, T. H., & Babanin, A. V. (2018). An assessment of the impact of surface currents on wave modeling in the Southern Ocean. *Ocean Dynamics*, 68(8), 939-955.

Wolf, J., & Prandle, D. (1999). Some observations of wave–current interaction. *Coastal Engineering*, 37(3-4), 471-485.

Zippel, S., & Thomson, J. (2017). Surface wave breaking over sheared currents: Observations from the Mouth of the Columbia River. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(4), 3311-3328.