

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESQUEMA PREDICTIVO PARA EL DESTINO DE LA DESCARGA DE RÍOS
PEQUEÑOS EN LA ZONA DE ROMPIENTE: APLICACIÓN A LA
DESEMBOCADURA DEL RÍO MAIPO**

IGNACIO JAINAGA¹
ALONSO ROCO²
RAÚL FLORES³
MEGAN WILLIAMS⁴
ALEX HORNER-DEVINE⁵

RESUMEN

En el presente estudio se propone una metodología para evaluar el destino final de las aguas de ríos de pequeña escala que descargan directamente en la zona de rompiente del oleaje. La metodología está basada en el uso combinado de longitudes características asociadas a la dinámica de la interacción río-oleaje costero, propuestas en la literatura y usadas en estudios similares, que son calculadas a partir de parámetros como el momentum del río y las corrientes costeras longitudinales producto del oleaje. En base a pocos parámetros, este esquema conceptual permite evaluar si el agua proveniente del río queda inicialmente atrapada en la zona de rompiente, cerca de la costa, o escapa y se dispersa hacia aguas más profundas. El esquema se pone a prueba y valida en la desembocadura del río Maipo, donde se realizó una campaña de terreno que contempló la recolección de datos de velocidad de flujo, salinidad, niveles de agua y oleaje, junto a una serie de imágenes y videos a través de un dron aéreo. La combinación de datos *in-situ* y remotos permite el cálculo de los parámetros necesarios para la aplicación de la metodología. Los resultados indican que el esquema predictivo discrimina adecuadamente entre la retención y el escape del agua proveniente del río, lo que se confirma mediante imágenes de dron. El esquema es fácilmente replicable y aplicable a otros sistemas de similares características en Chile central y otros lugares del mundo en zonas con climas mediterráneos.

¹ Memorista de pregrado, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María - email: ignacio.jainaga.12@sansano.usm.cl

² Estudiante postgrado, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: alonso.roco@sansano.usm.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: raul.flores@usm.cl

⁴ Profesora Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: megan.williams@usm.cl

⁵ Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington, Seattle – email: arhd@uw.edu

1. INTRODUCCIÓN

Ríos de pequeña escala son una característica común en costas de zonas con climas mediterráneos y en latitudes medias (25°-35°), donde los flujos de agua son altamente estacionales. A nivel global, estos sistemas generan un aporte de agua dulce, sedimentos y nutrientes hacia la costa que es comparable al de los ríos de mayor tamaño (Milliman & Syvitski, 1992; Syvitski et al., 2003; Izzet and Fennel, 2018). Sin embargo, los procesos que determinan el destino final de las aguas en desembocaduras de ríos pequeños permanecen poco estudiados, aún cuando son muy relevantes para la calidad de las aguas, la morfología y los ecosistemas locales (ej. Coynel et al., 2005).

El oleaje costero es un agente dinámico sumamente relevante para la mezcla y dilución de las aguas provenientes de ríos pequeños debido a que las escalas físicas, tanto vertical como horizontal, de la descarga (la pluma del río) y el oleaje pueden ser comparables (ej. Rodríguez et al., 2018). Estudios recientes han demostrado que las forzantes de oleaje pueden confinar el agua dulce del río a la costa (Rodríguez et al., 2018, Kastner et al., 2019), de forma que potenciales impactos nocivos de estas aguas se pueden ver amplificados en áreas de intensa actividad humana y ecológica. Estos efectos pueden ser muy importantes en cuencas urbanizadas, donde los ríos posiblemente transportan gran variedad de basuras, plásticos, fertilizantes y contaminantes peligrosos para la salud humana, así como para la flora y fauna costera (ej. Rech et al., 2014). Por esta razón, se vuelve de suma importancia generar metodologías de monitoreo óptimas y económicas que nos informen sobre el estado y dinámica en estuarios y desembocaduras a lo largo de Chile, con el fin de generar planes de manejo costero integrados sistémicamente con la cuenca aportante.

Este estudio se centra en evaluar extensivamente un esquema conceptual, resultante del uso simultáneo del trabajo de Wong et al. (2013) y Kastner et al. (2019), para la predicción del destino de las aguas provenientes de un río de pequeña escala en el sistema costero, en términos de si la descarga logra escapar la zona de rompiente del oleaje o queda retenida en la costa. Para esto, se utilizan longitudes características (*length scales*, en inglés) calculadas a partir de parámetros dinámicos relevantes en el problema de la interacción río oleaje, tales como el momentum de la descarga (río), la magnitud de las corrientes longitudinales y el ancho de la zona de rompiente (ej. Fischer et al., 1979; Jones et al., 2007, Hetland, 2010; Kastner et al., 2019). La comparación de las magnitudes de estas longitudes características origina un espacio de parámetros que permite discriminar si el agua dulce queda atrapada en la zona de rompiente o es transportada por la corriente costera longitudinal. El esquema se pone a prueba y valida en la zona de la desembocadura del río Maipo, mediante la recolección de datos de terreno e imágenes aéreas de dron que en conjunto permiten la estimación de los parámetros necesarios. El trabajo se organiza como sigue: en la sección 2 se presenta la zona de estudio y la campaña de terreno, se describen las longitudes características usadas y se presenta la metodología para estimar los parámetros necesarios. En la sección 3 se presentan los principales resultados, y su discusión se presenta en la sección 4. Finalmente, las conclusiones del presente trabajo se presentan en la sección 5.

2. METODOLOGÍA

2.1 ZONA DE ESTUDIO

El presente trabajo se desarrolla en la zona de la desembocadura del Río Maipo, ubicada entre las localidades de San Antonio y Santo Domingo (V Región). El río Maipo nace en la cordillera de los Andes, posee una extensión total de 250 km y drena una cuenca hidrográfica de aproximadamente 15.000 km². La cuenca del Río Maipo es de las cuencas más expuestas a intervenciones antropogénicas en Chile, con usos de aguas que consideran riego de diversos cultivos, centrales hidroeléctricas de paso, captación para agua potable y actividad minera, además de diversas descargas de aguas servidas y residuos industriales líquidos, que históricamente han generado un fuerte deterioro en la calidad de las aguas de los cursos superficiales (DGA, 2004). El humedal costero del Río Maipo fue declarado Santuario de la Naturaleza en 2020 debido a que presenta una gran biodiversidad, particularmente en términos de avifauna.

Cerca de la desembocadura, el Río Maipo presenta un caudal medio anual histórico de 50 m³/s (Estación Río Maipo en Cabimbao, BNA 57480001-7, período 2011-2021). El caudal presenta un régimen altamente estacional, siguiendo eventos de precipitaciones en invierno y el derretimiento nival en épocas de primavera-verano. La zona costera aledaña a la desembocadura está expuesta a un clima de oleaje intenso, con altura de ola media de 1.5 m provenientes predominantemente del Oeste (Beyá et al., 2017). Al igual que muchas otras zonas en climas mediterráneos, la combinación de flujos estacionales con un clima de oleaje intenso resulta en la formación de una gran barra litoral de arena en la desembocadura del río (Figura 1). El régimen de mareas en la zona puede clasificarse como micromareal, con una amplitud de aproximadamente 1.5 m.

2.2 CAMPAÑA DE TERRENO

La campaña de terreno se realizó entre los días 10 y 19 de diciembre de 2019, y contempló el uso de una serie de instrumentos para medir velocidad del flujo, conductividad, temperatura, niveles de agua y oleaje en la zona cercana a la desembocadura y en la zona de rompiente (Figura 1a). Series de tiempo de salinidad y densidad del agua fueron obtenidas mediante sensores CTDs (Conductivity-Temperature-Depth) ubicados en el canal de descarga y en la zona de rompiente. La velocidad del flujo en el canal de descarga (Figura 1a) fue obtenida mediante un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) RDI de 1200 kHz y mediante un perfilador Nortek Aquadopp, en distintas etapas de la campaña según la disponibilidad de los equipos. Un sensor de presión se instaló en la zona de la curva del canal (Figura 1a) para medir niveles de agua y la variación de las mareas. El ADCP ubicado en la zona de descarga fue posteriormente instalado en una profundidad de 13 m, frente a la desembocadura, para medir parámetros espectrales de oleaje. En este trabajo se utilizarán primordialmente los datos obtenidos de los sensores de velocidad y CTDs en el canal, y el ADCP en aguas profundas. Adicionalmente, se hizo uso extensivo de un dron marca DJI modelo Mavic Pro, con el que se realizaron gran cantidad de vuelos para caracterizar la dinámica costera y evaluar el comportamiento de la pluma del río en la zona de rompiente. Las imágenes y videos fueron rectificadas según los procedimientos descritos en Holman et al. (2017), a través del uso de puntos de control (tomados con GPS) ubicados en el campo visual del dron. Mediante el procesamiento de los videos rectificados es posible obtener el ancho de la zona de rompiente del oleaje, así como estimaciones de la batimetría costera mediante el algoritmo cBathy (Holman et

al., 2013). Finalmente, es importante notar la existencia de un dique aproximadamente 3 km aguas arriba de la desembocadura, construido provisionalmente para acumulación y captación de agua dulce para abastecimiento local. Dicho dique contaba con una abertura para permitir el paso de agua dulce hacia la desembocadura.

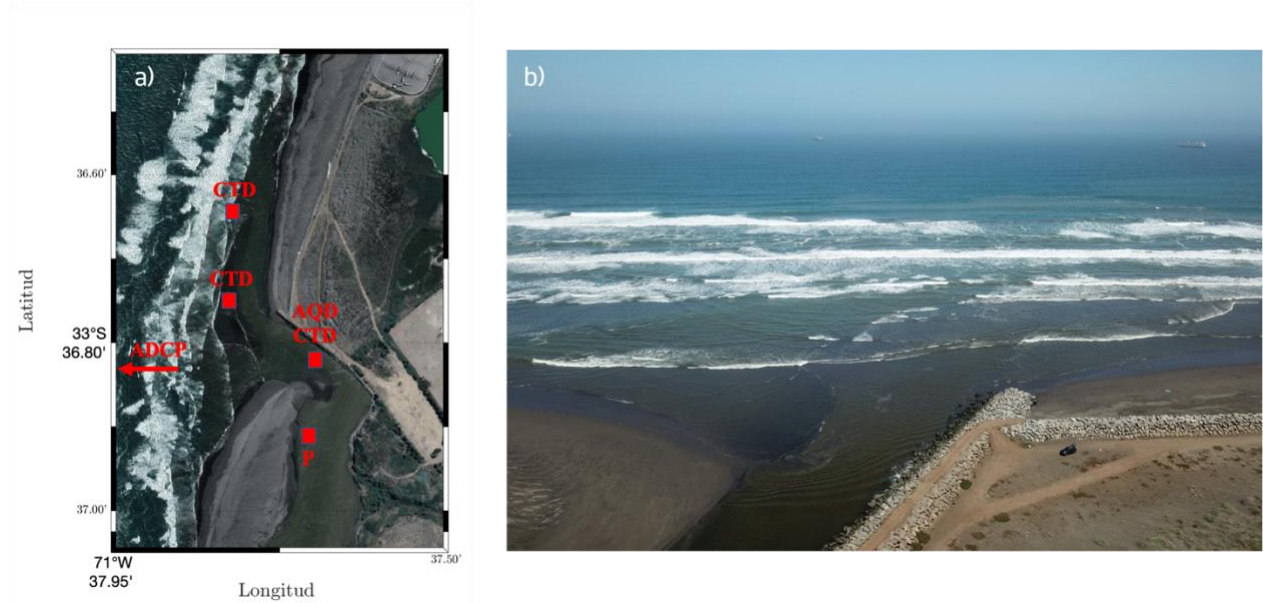


Figura 1. Zona de estudio e instrumentación. (a) Imagen Google Earth con instrumentación, donde CTD corresponde a sensor de conductividad, temperatura y presión, P es un sensor de presión, AQP es un perfilador de velocidad Nortek Aquadopp y ADCP es un perfilador de velocidad RDI 1200kHz con capacidad para medir oleaje. (b) Imagen de dron de la desembocadura, captada el día 14 de diciembre de 2019.

2.3 LONGITUDES CARACTERÍSTICAS

Modelos conceptuales basados en el uso de longitudes características (*length scales*) han sido propuestos para determinar el destino de las aguas del río en la zona de rompiente (ej. Wong et al., 2013; Kastner et al., 2019). En particular, tres longitudes características son relevantes para el problema de interacción río-oleaje en zonas con oleaje intenso y presencia de fuertes corrientes costeras longitudinales producto del oleaje. La primera corresponde al ancho de la zona de rompiente, L_{SZ} , cuya variabilidad es determinada por el clima de oleaje, nivel de la marea y batimetría. La segunda, es una longitud llamada de campo cercano del río (o *near-field*, en inglés), L_{NF} , basada en el momentum de la descarga del río y su flotabilidad (buoyancy) (ej. Fischer et al., 1979; Jones et al., 2007; Hetland, 2010; Kastner et al., 2019):

$$L_{NF} = \frac{U^{3/2} Q^{1/4}}{g^{1/2} w_e^{3/4}} \quad (1)$$

donde U corresponde a la velocidad del flujo en la boca del río, Q es el caudal, $g' = g\Delta\rho/\rho_0$ es la gravedad reducida asociada a la estratificación, con $\Delta\rho$ igual a la diferencia de densidad entre la pluma del río y el mar y ρ_0 es la densidad del agua marina, y w_e es una velocidad de entrada de agua salada a la pluma que puede obtenerse en base a valores propuestos en la literatura (ej. Kastner

et al., 2019). Conceptualmente, L_{NF} predice la región en la que el momentum del jet de descarga controla el flujo (en vez de su buoyancia). La tercera longitud característica se denomina de “flujo paralelo a la costa” (o cross-flow, en inglés), L_A , y está basada en el momentum de la descarga junto a una medida representativa de la velocidad de corriente longitudinal producto del oleaje (Jones et al., 2007; Wong et al., 2013)

$$L_A = \frac{U^{1/2} Q^{1/2}}{U_{SZ}} \quad (2)$$

donde U_{SZ} corresponde a la velocidad de corriente longitudinal producto del oleaje. Conceptualmente, L_A puede ser interpretada como la distancia para que la trayectoria del jet de descarga sea modificada por las corrientes longitudinales, y se torne paralela a la costa. La magnitud relativa de L_{NF} y L_A comparada con L_{SZ} entrega un esquema conceptual que permite predecir el destino de las aguas del río en la zona de rompiente (Wong et al., 2013; Kastner et al., 2019). Basado en mediciones de terreno, Wong et al. (2013) propuso que si $L_A/L_{SZ} > 1/10$, el agua del río se dispersa más allá de la línea de rompiente del oleaje dado que las corrientes longitudinales no son lo suficientemente fuertes para retenerla. De manera similar, y en base a mediciones en un río en la costa de Oregon (USA), Kastner et al. (2019) propuso que si $L_{NF} > L_{SZ}$ el agua del río escapa la zona de rompiente dado que el momentum del jet excede el del forzante de oleaje. En este trabajo, consideraremos ambas relaciones (L_{NF}/L_{SZ} y L_A/L_{SZ}) en un esquema conjunto para determinar las predicciones respecto al destino del agua del río.

Como se puede apreciar desde (1), el cálculo de L_{NF} se realiza directamente a partir de los datos medidos. El cálculo de L_A requiere de una estimación de la corriente longitudinal generada por el oleaje, de las que no se disponen mediciones. Por tanto, se procede a generar un modelo de oleaje que permita generar una estimación de la magnitud de estas corrientes.

2.4 MODELO DE OLEAJE

Para generar estimaciones de las corrientes longitudinales producto del oleaje, se utiliza el modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore; Booij et al., 1999) en combinación con un balance de momentum simplificado. El modelo SWAN es un modelo numérico capaz de simular y propagar campos de oleaje irregular (altura de ola, período, dirección) en zonas costeras, incluyendo fenómenos tales como asomeramiento, refracción y rotura del oleaje. En este trabajo, se utilizan condiciones de borde de altura de ola, período y dirección obtenidas desde el ADCP instalado en una profundidad de aproximadamente 13m. Debido a que durante la campaña de terreno no se midió batimetría, se entregan al modelo las batimetrías obtenidas de los videos del dron y generadas mediante el algoritmo cBathy (Holman et al., 2013). El modelo se implementa en modo estacionario, entregando los valores de condiciones de borde correspondientes a los tiempos en que se dispone de videos de dron, y, por ende, de batimetrías.

Desde los modelos SWAN se obtiene la fuerza inducida por el oleaje por unidad de superficie (gradiente del tensor de radiación, ej. Longuet-Higgins and Stewart, 1962,1964), los que a su vez son incorporados en un balance de momentum en dirección longitudinal (*alongshore*) para obtener una estimación de la corriente generada por oleaje. El balance de momentum en dirección paralela a la costa es (Feddersen et al., 2003)

$$\rho(\bar{\eta} + h) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = -\rho g(\bar{\eta} + h) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} - \tau_y + R_y \quad (3)$$

donde \bar{u} y \bar{v} son las velocidades promedio en la profundidad en las direcciones perpendicular (x) y paralela a la costa (y), respectivamente, τ corresponde a la fricción de fondo, h corresponde a la profundidad de la columna de agua y η es la elevación de la superficie libre medida desde el nivel medio, R es un término relacionado con la mezcla, y finalmente S_{xy} y S_{yy} corresponde a los términos del tensor de radiación (Longuet-Higgins and Stewart, 1962, 1964). Asumiendo condiciones estacionarias ($\partial/\partial t = 0$) y uniformes a lo largo de la costa ($\partial/\partial y = 0$) en primera aproximación, la ecuación (2) se simplifica de forma que:

$$0 = \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \tau_y + R_y \quad (4)$$

Finalmente, asumiendo que el término R es pequeño, y que la fricción de fondo se puede expresar como $\tau_y = \rho C_d v^2$ (ej. Feddersen et al., 2003), donde C_d es un coeficiente de fricción (adimensional), la velocidad longitudinal puede estimarse según,

$$v^2 = \frac{1}{\rho C_d} \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \quad (5)$$

El término $\frac{\partial S_{xy}}{\partial x}$ se obtiene desde la modelación en SWAN para cada simulación disponible.

3. RESULTADOS

3.1 SALINIDAD EN DESEMBOCADURA

La Figura 2 muestra resultados de perfiles de salinidad tomados en el canal de descarga del estuario en los días 10, 11 y 17 de diciembre. Es importante destacar que durante la campaña de terreno el caudal del río Maipo en la estación Cabimbao se mantiene en un valor bajo (5-10 m³/s) y con la presencia del dique instalada por de la empresa de agua, es esperable la poca presencia de agua completamente fresca en el estuario y desembocadura. Se puede observar que la estructura de la columna de agua del canal de salida del estuario está fuertemente influenciada por la marea, mostrando una mayor cantidad de agua fresca y cierto grado de estratificación en marea vaciante durante los días 10 y 11 (Figuras 2e,f). Por otro lado, en el día 17 se observa la presencia de agua mayormente salada tanto en el canal de salida como en la curva (Figuras 2g,h) en fase de marea llenante. En la Figura 2 también se observa que el grado de estratificación disminuye en dirección hacia la desembocadura. Por ejemplo, en la Figura 2e los perfiles del interior del canal (colores rojo, cian y magenta) presentan valores de salinidad superficial menores a 10 PSU y cierto grado de estratificación, mientras que los perfiles más cercanos a la desembocadura (colores verde y azul) presentan una estructura vertical más uniforme, pero de mayor salinidad, llegando a 13 PSU. Esto puede ser resultado de procesos de mezcla inducidos por oleaje justo en la desembocadura y la variación fuerte batimétrica en esa zona, donde la profundidad se vuelve muy somera.

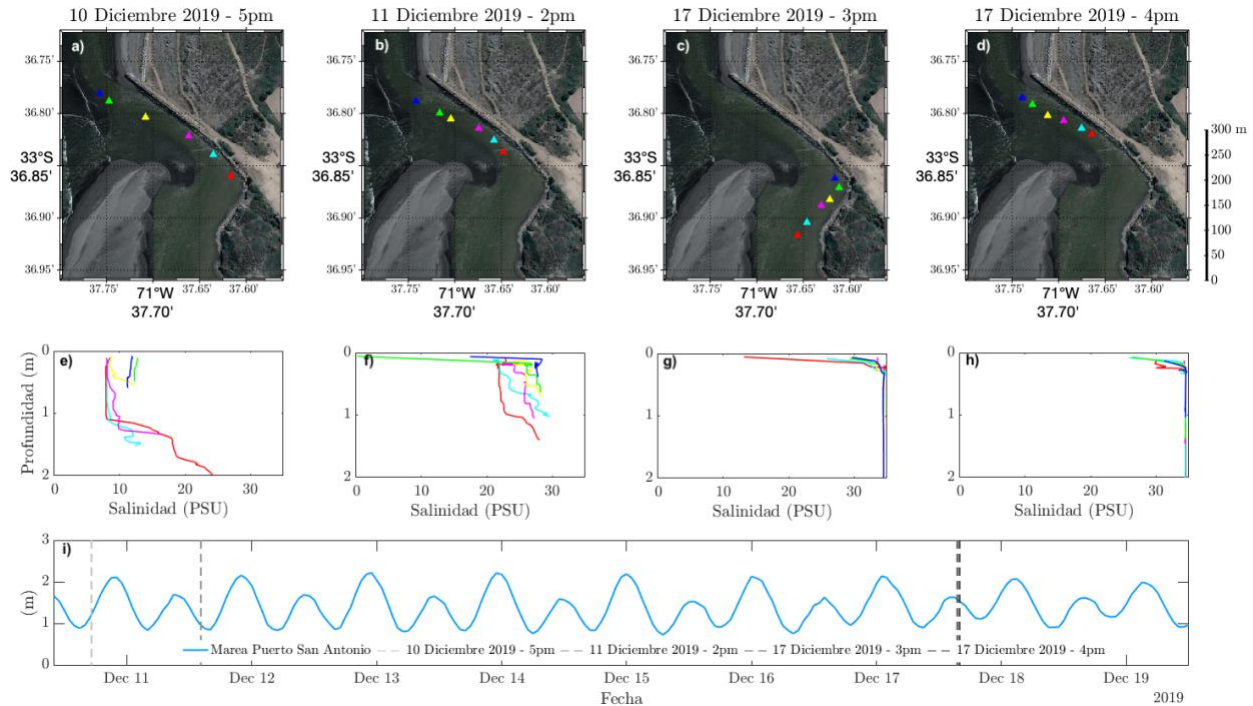


Figura 2. Perfiles de salinidad en la desembocadura del Río Maipo. (a)-(d) Mapas y ubicación de los perfiles. (e)-(h) Perfiles de salinidad. Colores de los perfiles corresponden a las ubicaciones señaladas en los paneles (a)-(d). (i) Nivel de marea en el puerto de San Antonio. Líneas segmentadas verticales indican fecha de los perfiles mostrados en (a)-(h).

3.2 MODELO DE OLAJE Y VELOCIDAD LONGITUDINAL

Se implementan 14 modelos estacionarios, para los cuales se tienen datos de video. Los datos de video son utilizados para validar los modelos en SWAN en términos de la dinámica de oleaje observada, primordialmente la ubicación de las zonas de rotura intensa y la extensión total de la zona de rompiente. La Figura 3 muestra un ejemplo de los resultados del modelo, junto a un timex (promedio de 15 minutos de video) rectificado obtenido mediante el dron. Desde la Figura 3a es posible notar que el oleaje rompe en varias ubicaciones, generando una dinámica compleja. En la Figura 3b se observa que la disipación por rotura entregada por el modelo se corresponde bastante bien con el oleaje observado (Figura 3a), existiendo una zona de alta disipación (rotura intensa) alrededor de la coordenada $x = 200\text{m}$. La altura de ola (Figura 3c) se corresponde con lo anterior y muestra un fuerte gradiente alrededor de la misma coordenada x , indicando rotura y disminución de altura. Similares resultados se obtienen para la mayoría de los modelos, es decir, buena correspondencia entre la dinámica observada en los videos y los modelos SWAN (no mostrado). Los valores obtenidos para la corriente longitudinal producto del oleaje se muestran en la sección 3.3.

3.3 LONGITUDES CARACTERÍSTICAS

Las longitudes características (*length scales*) L_A y L_{NF} son estimadas con base en las ecuaciones (1) y (2). El ancho de la zona de rompiente es determinado mediante un análisis de los timex de video y los resultados de la modelación SWAN (Figura 3). Desde estas modelaciones se extrae

además una medida de la velocidad longitudinal producto del oleaje, según lo explicado en la sección anterior.

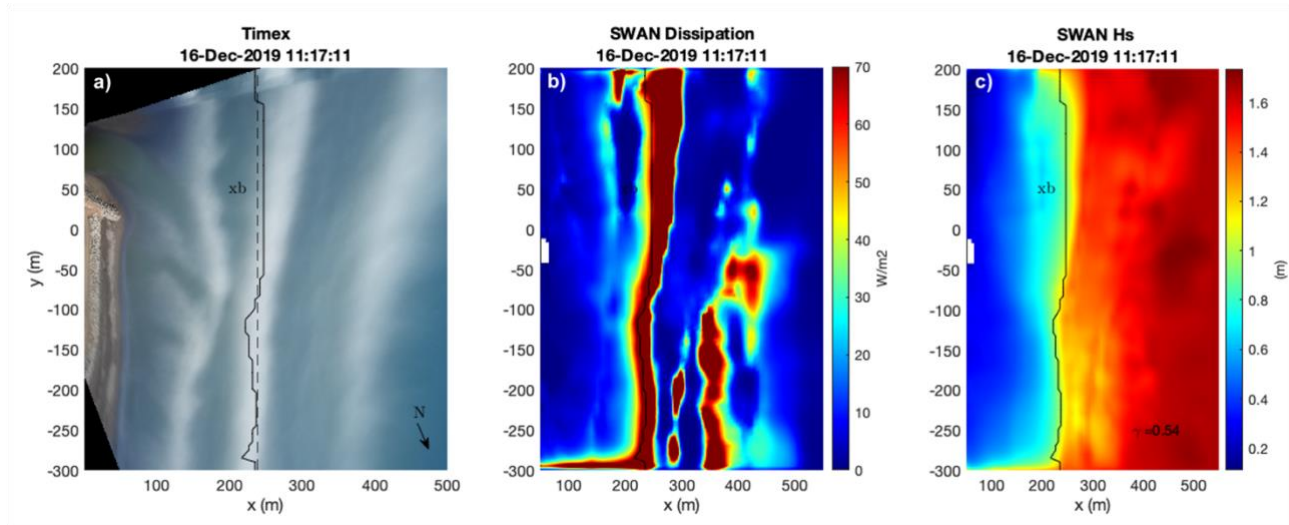


Figura 3. Resultados modelo SWAN. (a) Timex de video. (b) Disipación por rotura del oleaje modelada. (c) Altura de ola modelada. En todos los paneles, la línea sólida representa el límite de la zona de rompiente (x_b). La línea segmentada en el panel (a) corresponde al promedio espacial de x_b (ancho promedio de la zona de rompiente).

Para el cálculo de L_{NF} , se utiliza un valor de la gravedad reducida (g') de 0.036 m/s^2 , correspondiente al valor medio de las estimaciones disponibles calculadas en base a la salinidad y estratificación medida en el canal de descarga. Estimaciones del caudal de descarga se obtienen en base a las mediciones de velocidad en la desembocadura, utilizando un ancho promedio de la sección transversal de 30 m (obtenido desde los videos de dron rectificadas). La profundidad de agua en el centro del canal se obtiene mediante el sensor de presión ubicado en el fondo, y luego se estima la forma de la sección a través de una aproximación parabólica. La Figura 4 muestra los resultados para la velocidad del flujo en el canal, el caudal de descarga estimado y L_{NF} . Velocidades negativas (Figura 4a) indican que el agua está entrando al estuario, durante marea llenante. Para aquellos casos, $L_{NF} = 0$ debido a que no existe pluma (Figura 4a,c). Si bien L_{NF} alcanza valores máximos cercanos a los 400 m, su valor típico es del orden de 100 m (Figura 4c).

Resultados para L_A sólo se obtienen para los períodos en que se cuenta con videos de dron, puesto que requieren de la estimación de velocidad longitudinal generada por oleaje obtenida mediante SWAN. La velocidad y momentum de la descarga del río se obtienen de manera similar que para L_{NF} . Resultados de L_A se muestran en la Figura 5, donde se aprecia que los valores son bastante más pequeños que L_{NF} .

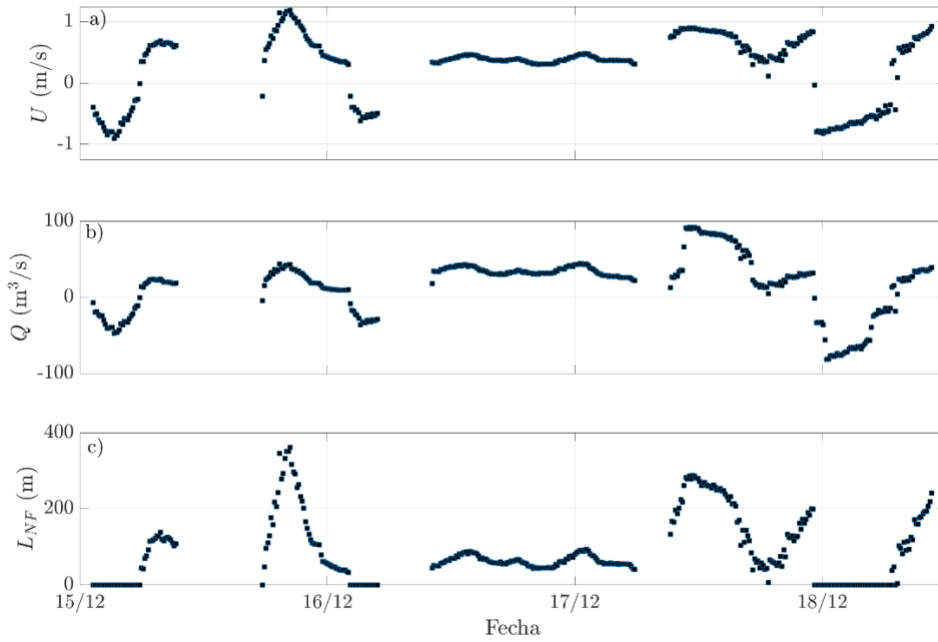


Figura 4. Determinación de L_{NF} . (a) Velocidad del flujo en el canal de salida. (b) Caudal de descarga estimado. (c) Near-field length-scale, L_{NF} .

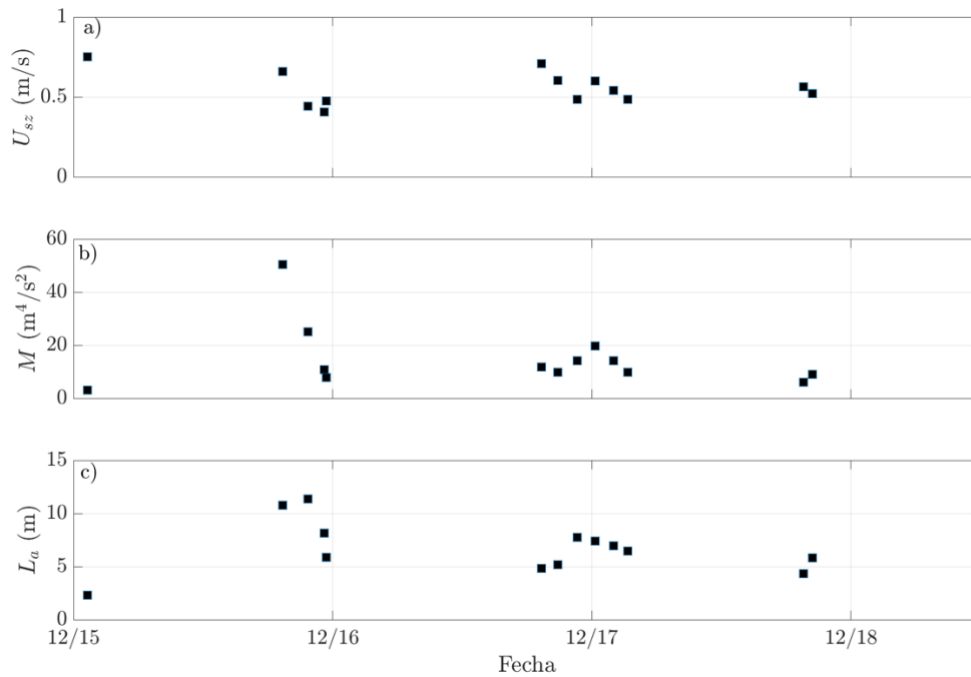


Figura 5. Determinación de L_A . (a) Velocidad del flujo en tiempos de vuelos de dron. (b). Momentum de la descarga del río ($M=Q*U$). (c) L_A

3.4 ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN

Como se ha expuesto anteriormente, el esquema de clasificación se basa en la comparación de L_{NF} y L_A con el ancho de la zona de rompiente. La Figura 6 muestra los resultados para tiempos con vuelos de dron, donde se cuenta con valores para L_A y además es posible confirmar visualmente la predicción del modelo mediante los videos. Se aprecia que la totalidad de los datos cae en la zona de $L_A/L_{SZ} < 1/10$, indicando que la descarga debería quedar atrapada dentro de la zona de rompiente producto de las corrientes longitudinales. Por otro lado, se aprecia que la mayor parte de los puntos cae en la zona $L_{NF}/L_{SZ} < 1$, indicando que la descarga no tendría el suficiente momentum para escapar de la zona de rompiente.

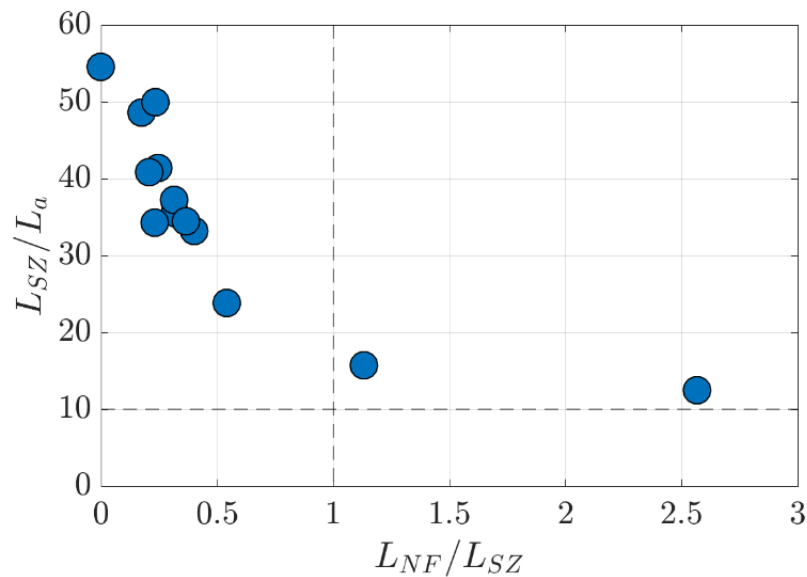


Figura 6. Esquema de clasificación para la descarga de río en la zona de rompiente. La línea segmentada horizontal corresponde al límite propuesto por Wong et al. (2013) para L_{SZ}/L_A . La línea segmentada vertical corresponde al límite utilizado por Kastner et al. (2019) para L_{NF}/L_{SZ} .

4. DISCUSIÓN

4.1 CÁLCULO DE LAS LONGITUDES CARACTERÍSTICAS

Como se observa en la Figura 4 y Figura 5, la magnitud de las longitudes características puede ser muy variables, especialmente L_{NF} . Todas las cantidades dinámicas utilizadas para el cálculo de las longitudes características se ven influenciadas por la marea, y por tanto, deben ser caracterizadas en distintas fases de ésta a fin de obtener un rango de valores representativos que permita extraer conclusiones respecto al destino del agua. La velocidad y el caudal de descarga evidentemente varían con el nivel de marea, y según lo observado, revierten completamente su dirección entre las fases vaciantes y llenantes, además de mostrar gran variabilidad dentro de un ciclo mareal (Figura 4a). Los parámetros que dependen del oleaje, es decir, la corriente longitudinal y el ancho de la zona de rompiente, dependen del clima de oleaje incidente pero también son modulados por la

marea mediante variaciones en la profundidad, que hacen que el oleaje rompa más lejos o más cerca de la costa. Esto también estará controlado por la batimetría, y el hecho que la batimetría en esta zona sea bastante suave y somera (cambios muy graduales de profundidad), hacen que el ancho de la zona de rompiente varíe de forma importante entre marea baja y marea alta. Todo lo anterior hace que el problema de interacción río-oleaje sea complejo y dinámico, y su caracterización debe ser realizada considerando condiciones contrastantes de marea y oleaje.

4.2 ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN

El esquema de clasificación propuesto se basa en el trabajo de Wong et al. (2013) y Kastner et al. (2019). Aunque la descarga del río Maipo es variable, siempre estará presente, y por tanto es un parámetro que siempre debería considerarse a la hora de predecir el destino del agua dulce. Las corrientes inducidas por oleaje, por otro lado, pueden no ser siempre relevantes, y dependerá fundamentalmente de la dirección de incidencia del oleaje. Según lo visto durante la campaña de terreno, en la zona del Maipo las corrientes longitudinales son muy importantes, y se estima que en gran medida son las responsables de impedir la propagación de la pluma hacia aguas más profundas. Lo anterior se evidencia en el esquema de clasificación presentado en la **Error! Reference source not found.**, puesto que si bien existen dos puntos donde la relación L_{NF}/L_{SZ} predice escape de la pluma ($L_{NF}/L_{SZ} > 1$), en ningún caso esto fue observado en terreno. Para dichos puntos se observa que $L_A/L_{SZ} < 1/10$, y por tanto, aunque la descarga cuenta teóricamente con momentum suficiente para escapar la zona de rompiente, las fuertes corrientes longitudinales hacen que se curve prematuramente y se propague paralela a la costa (ej. Figura 3a). Por tanto, el efecto de estas corrientes costeras debe ser considerado a la hora de pronosticar el destino del agua en costas abiertas con climas de oleaje intenso y oblicuo. Similares resultados podrían esperarse en otras desembocaduras a lo largo de Chile central. Es necesario mencionar, sin embargo, que durante crecidas y períodos con altos caudales estacionales, la pluma del río logra escapar sin problemas, como se puede observar en imágenes satelitales de la zona (ej. Google Earth).

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se presenta un esquema conceptual para la predicción del destino de la descarga de ríos pequeños en la zona de rompiente, que es validado mediante mediciones en la desembocadura del Río Maipo. El modelo conceptual se condice con lo observado en imágenes de dron, en términos de si el agua queda retenida o escapa. Debido a que el esquema de análisis es simple y no es particular para el sistema del río Maipo, sería posible aplicarlo a otros sistemas similares a lo largo de Chile. Trabajo futuro implica realizar validaciones adicionales, tanto en el Maipo como en otros sistemas a lo largo de Chile central.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen financiamiento provisto por ANID (Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo) mediante Proyecto FONDECYT 11190378 y financiamiento provisto por fondos internos del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María. Además, los autores agradecen apoyo del proyecto NSF OCE-1923941 (National Science Foundation, USA) y la University of Washington.

REFERENCIAS

- Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., & Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 116, 16-32.
- Booij, N. R. R. C., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of geophysical research: Oceans*, 104(C4), 7649-7666.
- Coyne, A., Etcheber, H., Abril, G., Maneux, E., Dumas, J., & Hurtrez, J. E. (2005). Contribution of small mountainous rivers to particulate organic carbon input in the Bay of Biscay. *Biogeochemistry*, 74(2), 151-171.
- Dirección General de Aguas (DGA). Cade-Idepe Consultores en Ingeniería. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del río Maipo julio 2004. <https://mma.gob.cl/diagnostico-y-clasificacion-de-cursos-y-cuerpos-de-agua-segun-objetivos-de-calidad/>
- Feddersen, F., Gallagher, E. L., Guza, R. T., & Elgar, S. (2003). The drag coefficient, bottom roughness, and wave-breaking in the nearshore. *Coastal Engineering*, 48(3), 189-195.
- Feddersen, F., Guza, R. T., Elgar, S., & Herbers, T. H. C. (1998). Alongshore momentum balances in the nearshore. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C8), 15667-15676.
- Hetland, R. D. (2010). The effects of mixing and spreading on density in near-field river plumes. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 49(1), 37-53.
- Holman, R. A., & Stanley, J. (2007). The history and technical capabilities of Argus. *Coastal engineering*, 54(6-7), 477-491.
- Holman, R. A., Brodie, K. L., & Spore, N. J. (2017). Surf zone characterization using a small quadcopter: Technical issues and procedures. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 55(4).
- Holman, R., & Haller, M. C. (2013). Remote sensing of the nearshore. *Annual review of marine science*, 5, 95-113.
- Holman, R., Plant, N., & Holland, T. (2013). cBathy: A robust algorithm for estimating nearshore bathymetry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5), 2595-2609.
- Horner-Devine, A., Flores, R. P., Williams, M. E., Kastner, S. E., & Thomson, J. M. (2020, February). Scaling wave-plume interactions in two coastal river discharges. In *Ocean Sciences Meeting 2020*. AGU.
- Izett, J. G., & Fennel, K. (2018). Estimating the cross-shelf export of riverine materials: Part 2. Estimates of global freshwater and nutrient export. *Global Biogeochemical Cycles*, 32(2), 176-186.
- Jones, G. R., Nash, J. D., Doneker, R. L., & Jirka, G. H. (2007). Buoyant surface discharges into water bodies. I: Flow classification and prediction methodology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), 1010-1020.
- Kastner, S. E., Horner-Devine, A. R., & Thomson, J. M. (2019). A conceptual model of a river plume in the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(11), 8060-8078.
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The journal of Geology*, 100(5), 525-544.
- Rodriguez, A. R., Giddings, S. N., & Kumar, N. (2018). Impacts of nearshore wave-current interaction on transport and mixing of small-scale buoyant plumes. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8379-8389.
- Wong, S. H., Monismith, S. G., & Boehm, A. B. (2013). Simple estimate of entrainment rate of pollutants from a coastal discharge into the surf zone. *Environmental science & technology*, 47(20), 11554-11561.