

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTIMACIÓN DE FORZANTES DE OLEAJE A PARTIR DE MEDICIONES
REMOTAS: CASO APLICACIÓN DESEMBOCADURA RÍO MAIPO**

SEBASTIÁN A. VÉLIZ.¹
RAÚL P. FLORES.²
FRANCISCO J. SÁEZ³

RESUMEN

Este artículo aborda el estudio del forzante del oleaje en el contexto de la interacción río-oleaje, fenómeno de especial relevancia en zonas cercanas a desembocaduras fluviales. A partir del análisis de balance de energía se desprende una expresión que permite estimar la fuerza del oleaje asociada a la presencia del roller, considerando tres parámetros clave: la disipación de energía por rompiente, la velocidad de fase y el número de onda. Utilizando las imágenes remotas, se plantea una metodología para estimar de manera automatizada cada uno de estos parámetros, utilizando técnicas de segmentación basadas en redes neuronales profundas —como la arquitectura U-Net— y funciones de optimización aplicadas al análisis de trayectorias y patrones en las imágenes. Para validar la herramienta desarrollada, se aplica la metodología en un caso de estudio localizado en la costa cercana a la desembocadura del río Maipo, comparando los resultados obtenidos con los valores esperados según la literatura especializada.

¹ Estudiante de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Universidad Técnica Federico Santa María - email: sebastian.veliz@sansano.usm.cl

² Profesor titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – email: raul.flores@usm.cl

³ Investigador Asistente, Centro de Investigación para la Gestión del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) – email: francisco.saez@sansano.usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

La interacción entre las descargas fluviales y las condiciones oceánicas en desembocaduras de ríos es un proceso clave para comprender la dinámica costera, ya que influye directamente en la dispersión de sedimentos, nutrientes y contaminantes, además de modificar la morfología de la playa y los ecosistemas asociados (Rodríguez et al., 2018; Kastner, 2019; Roco et al., 2024). Las forzantes oceánicas, en particular la fuerza y dirección del oleaje, pueden modular significativamente la extensión, forma y mezcla de las plumas de agua dulce en el mar. Por ejemplo, a escalas reducidas, el oleaje puede dominar sobre el flujo fluvial, desviando o incluso bloqueando la pluma hacia la costa, mientras que en condiciones de mayor caudal, la pluma puede extenderse mar adentro, más allá de la zona de rompiente (Kastner, 2019; Roco et al., 2024). Comprender la magnitud relativa de estas forzantes es esencial para predecir la dispersión de materiales en la zona costera (Rodríguez et al., 2018) y diseñar estrategias de manejo frente a eventos extremos o al cambio climático.

El estudio de la zona de rompiente, sin embargo, presenta importantes desafíos debido a la alta complejidad y variabilidad de los procesos físicos involucrados. Esta región se caracteriza por flujos turbulentos, formación de espumas y rápidos cambios en el nivel del agua, lo que dificulta tanto la observación directa como la interpretación automática de los datos (Roco et al., 2024). A esto se suman factores como la geometría costera y las variaciones temporales en las condiciones del oleaje, que añaden ruido y ambigüedad a las mediciones. No obstante, si bien todas estas características son altamente dinámicas, hoy en día es posible obtener información de calidad sobre estos ambientes complejos gracias al uso de técnicas de medición remota. Herramientas como las imágenes adquiridas por drones, combinadas con métodos avanzados de procesamiento y segmentación —por ejemplo, mediante redes neuronales profundas— han demostrado ser útiles para enfrentar estas limitaciones (Buscombe, 2019; Sáez et al., 2021; Stringari et al., 2021).

Este artículo se apoya en el uso de la red neuronal U-Net desarrollada por Sáez et al. (2021), la cual permite segmentar de forma automática y precisa la zona de rompiente a partir de imágenes de alta resolución adquiridas con drones. Esta segmentación no solo permite identificar la posición y extensión de la zona de rompiente, sino que también facilita la estimación de la disipación de energía por rotura, mediante el análisis espacial y temporal de los parámetros geométricos que se obtienen de los patrones de rotura, y utilizando la formulación propuesta por Duncan (1981). Sobre esta base, se desarrolla una metodología para estimar de forma remota la fuerza del oleaje asociada a la presencia de roller, basada en el seguimiento espacial y temporal de la zona de rompiente para calcular la celeridad del oleaje, así como en la estimación la dirección del forzante. Este enfoque automatiza e integra las observaciones en balances de momentum que describen la interacción entre el oleaje y el flujo fluvial en desembocaduras.

2. DATOS

Las mediciones remotas utilizadas en este estudio fueron capturadas el día 19 de octubre de 2024 a las 12:00 horas en la zona de la desembocadura del río Maipo, mediante un dron DJI Air 3. Este equipo cuenta con dos cámaras de 35,8 mm, capaces de registrar imágenes estáticas de 48 megapíxeles y video en resolución 4K a 60 cuadros por segundo (fps), utilizando el modo de color D-Log M con una profundidad de 10 bits. El video obtenido tiene una duración total de 3 minutos y 43 segundos, del cual se extrajo una secuencia de imágenes con una resolución temporal de 2 fps, generando un conjunto de 447 imágenes RGB de alta resolución, con dimensiones nativas de 3200×2800 píxeles. El procesamiento de las imágenes considera varias etapas previas a su análisis, las cuales se presentan dentro de la Figura 1.

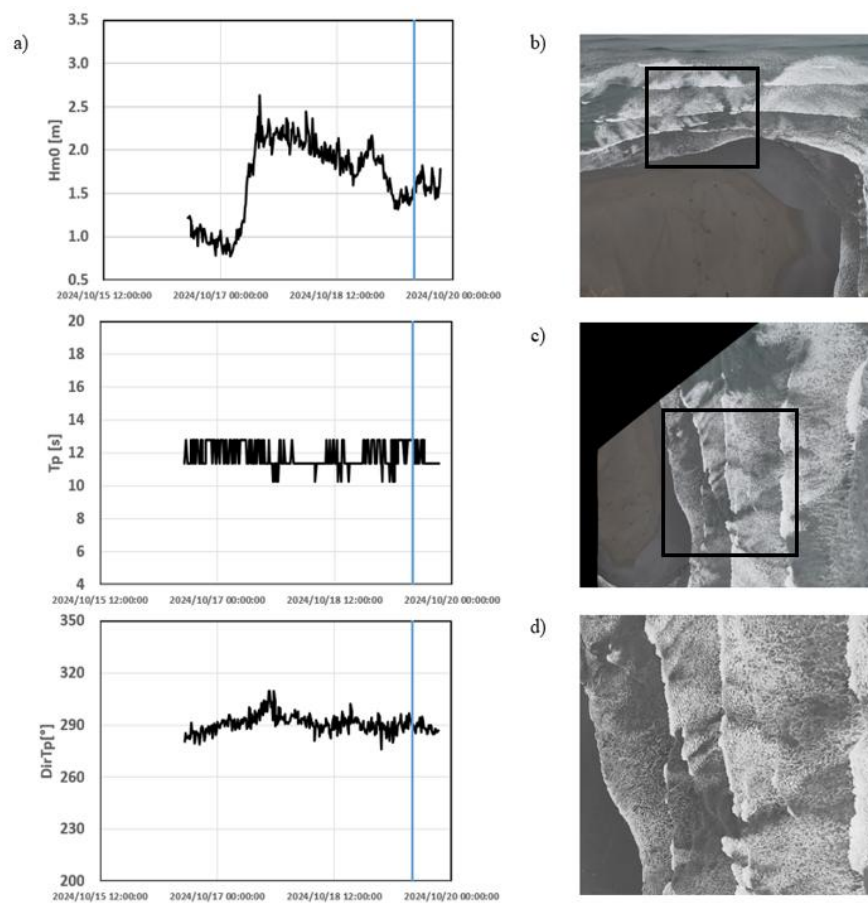


Figura 1: a) Datos de altura significativa, periodo y dirección del oleaje, b) Imagen de dron, c) Imagen rectificada, d) Imagen rectificada recortada.

Primero, cada fotograma es convertido a escala de grises y rotado en 90° sentido horario (dirección de propagación del oleaje de derecha a izquierda); y luego, se aplica un proceso de rectificación geométrica para corregir la perspectiva oblicua de la toma aérea. Esta etapa se realiza utilizando el Quantitative Coastal Imaging Toolbox (Bruder & Brodie, 2020), una colección de herramientas en MATLAB que permite transformar imágenes a vista ortogonal (en planta), mediante una calibración fotogramétrica basada en parámetros extrínsecos. Una

vez rectificada la imagen, se recorta un área de interés de 512×512 píxeles centrada en la zona de rompiente, que es el sector donde se concentra el análisis de celeridad, rompiente y disipación de energía. Este recorte permite estandarizar el tamaño de entrada para los modelos de procesamiento posteriores y reducir la carga computacional, enfocando el análisis exclusivamente en la región de interés.

Un paso esencial en esta metodología es la conversión de distancias de píxeles a metros, necesaria para la interpretación física de los resultados. Para ello, se utilizó el software QGIS (QGIS Development Team, 2024), mediante la generación de un ráster georreferenciado. Se implementó una grilla de control de 50×50 píxeles en la imagen rectificada, sobre una zona con dimensiones reales conocidas. A partir de esta grilla, se calcularon los factores de conversión, obteniendo coeficientes de 0.40 m/píxel en la dirección de propagación del oleaje y 0.26 m/píxel en la dirección perpendicular. Además, para complementar la información in situ, se recopilieron las condiciones oceanográficas del mismo día y hora de vuelo mediante los registros del puerto de San Antonio (Empresa Portuaria San Antonio, s.f.), los cuales se encuentran señalados con la línea azul (Figura 1). Este registro incluye datos cada media hora de periodo, altura significativa y dirección de propagación del oleaje, permitiendo contextualizar el estado del mar durante la adquisición de las imágenes y sirven de referencia para contrastar los resultados obtenidos mediante las mediciones remotas.

3. METODOLOGÍA

3.1 ESTIMACIÓN FORZANTE DE OLEAJE

En la ecuación de vorticidad, la componente de S_{xx} prácticamente desaparece y quedando principalmente la componente asociada al roller (el flujo de energía disipado en la zona de rompiente). En cambio, en la ecuación de momentum, la contribución de S_{xx} de la ola permanece, ya que sigue transportando cantidad de movimiento. Por ello, la fuerza total del oleaje puede conceptualizarse como la suma de la fuerza asociada al roller y la fuerza debida a la ola reflejando cómo diferentes partes del espectro de energía contribuyen en la dinámica del flujo. En este caso el enfoque está en la fuerza causada por el roller, el cual se deriva del balance de energía de las olas, donde la variación temporal y espacial de la energía está compensada por la disipación ($-Dw$). El signo menos indica que la energía disminuye debido a disipación. Dado que el momentum de las olas es proporcional a la energía ($S \sim k/\omega E$), una pérdida de energía se traduce en un cambio en el flujo de momentum (ΔS). Este cambio temporal de momentum corresponde físicamente a una fuerza ejercida sobre el fluido, de modo que $W\vec{F} \sim k/\omega (-Dw)$. Al aplicar la relación de dispersión $\omega = |k| \cdot c$, se obtiene la Ecuación (1).

$$W\vec{F} = \frac{Dw \cdot \vec{k}}{|\vec{k}| \cdot c} \quad (1)$$

En la ecuación se incorpora explícitamente la dirección del vector número de onda \vec{k} , permitiendo cuantificar no sólo la magnitud, sino también la orientación del forzamiento ejercido por el oleaje sobre la pluma de la boca mareal. Esta formulación integra mediciones de disipación de energía en la zona de rompiente (Dw) y la velocidad de fase de la ola (c), elementos fundamentales para representar el efecto de las olas sobre el flujo. Dimensionalmente, Dw corresponde a una tasa de disipación de energía por unidad de

superficie, por lo que sus unidades son $[W/m^2]$. El número de onda, definido como $|\bar{k}| = 2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de onda en metros, tiene unidades de $[1/m]$. Por su parte, la velocidad de fase (c), asociada a la propagación de las ondas, se expresa en $[m/s]$. Al sustituir estas dimensiones en la expresión para estimar $W\bar{F}$, se obtiene que sus unidades finales son $[N/m^2]$, es decir, una presión o fuerza por unidad de área. Esta dimensionalidad es coherente con el papel de la fuerza de oleaje como una fuerza de superficie distribuida dentro del modelo hidrodinámico, donde contribuye a la aceleración del flujo al aparecer como un término adicional en las ecuaciones de momento, representando de manera efectiva la influencia del rompimiento de olas en zonas someras.

Feddersen et al. (2016) utilizan esta ecuación para calcular la fuerza de oleaje mediante un modelo acoplado, combinando ROMS para circulación y transporte de trazadores con SWAN para el cálculo del oleaje. A partir de esta implementación numérica, generan campos espaciales distribuidos en grilla con valores de celeridad del oleaje, vector número de onda y tasa de disipación de energía para analizar la dinámica de la zona de rompiente. En este estudio, se desea aplicar de manera similar la Ecuación (1), pero con la salvedad que es el procesamiento de imágenes el que permite obtener los valores de disipación de energía por rotura, celeridad y dirección del forzante, utilizando los datos obtenidos según las especificaciones de la Sección 2, y los pasos señalados en las siguientes secciones (Secciones 3.2, 3.3 y 3.4).

3.2 ESTIMACIÓN DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA POR ROTURA

La red U-Net desarrollada por Sáez et al. (2021) permite segmentar de manera automática los patrones de rompimiento presentes en imágenes de alta resolución. Esta segmentación es esencial para identificar estructuras clave como el roller, las cuales se presentan en la Figura 2. Una vez identificados los patrones de rompimiento, se hace relevante comprender la dinámica energética asociada a estos procesos. En este contexto, el roller corresponde a la masa de agua espumosa que se forma en la parte frontal de una ola al romper, y que se desplaza sobre la cara de la ola hacia la costa. Este volumen turbulento contiene una fracción significativa de la energía disipada durante el rompimiento, por lo que su caracterización es clave para estimar la dinámica energética en la zona de surf. Duncan (1981) propuso un modelo conceptual de balance energético en el roller, asumiendo un flujo cuasi-estacionario impulsado por la gravedad y frenado por el corte viscoso en su base. Posteriormente, Díaz et al. (2018) reformularon esta idea, proponiendo que la disipación puede estimarse como el trabajo de una fuerza descendente a lo largo de la trayectoria del roller, lo que permite calcular directamente la energía disipada por ciclo y por unidad de ancho. La segmentación obtenida con la red U-Net, al seguir espacialmente la evolución del roller, facilita la implementación práctica de este enfoque energético.

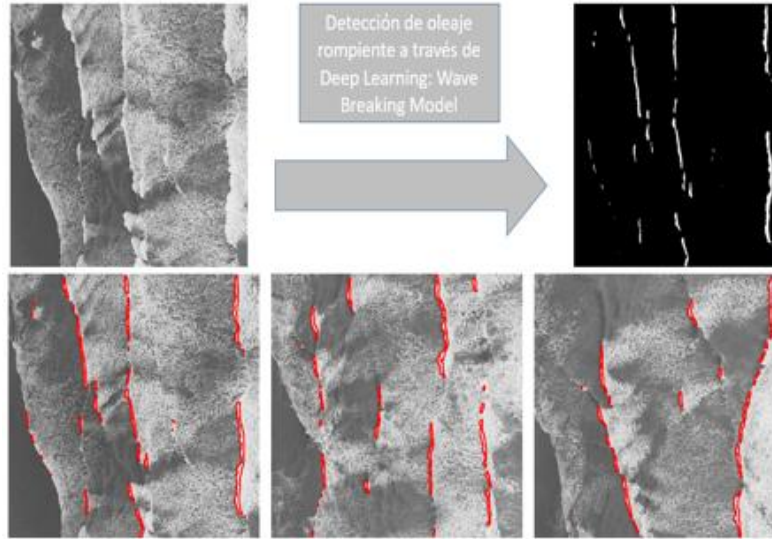


Figura 2: Detección de oleaje rompiente con Wave Breaking Model y Resultado de la aplicación del modelo para la segmentación de la zona rompiente.

Para aplicar este enfoque, se identifica la posición del roller en cada imagen rectificadas y recortadas (512×512 píxeles), generadas durante el pre-procesamiento descrito anteriormente en la sección “Datos”. Sobre esta imagen se aplica una red neuronal de tipo U-Net (Sáez et al., 2021), entrenada específicamente para detectar zonas de rompimiento. El resultado del modelo consiste en una máscara binaria (Figura 2), donde los píxeles asociados al roller son marcados en blanco y el resto en negro. Esta segmentación permite identificar automáticamente los contornos del roller en cada fotograma, facilitando su seguimiento en el tiempo. En la Figura 2 se agregan tres imágenes en distintos tiempos de la secuencia de video para visualizar su efectividad en el trabajo de segmentación. A partir del resultado de la aplicación del modelo para la segmentación de la zona rompiente, se puede proceder a evaluar la Ecuación (2), formulada en la investigación de Duncan (1981), que muestra que la disipación de energía durante el rompimiento.

$$D_w = \rho_0 \cdot g \cdot A \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

Los parámetros involucrados en la estimación de la disipación incluyen el área transversal del roller (A) y el ángulo de inclinación del frente de la ola respecto al plano horizontal (Θ). Además, se considera la densidad del roller (ρ_0), adoptada como un 60 % de la densidad del agua de mar (es decir, $615 \text{ [kg/m}^3\text{]}$), y la aceleración gravitacional ($g = 9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$). Dado que el ángulo de inclinación del frente de la ola no puede medirse directamente a partir de imágenes bidimensionales, se adopta un valor de referencia de $\Theta = 25^\circ$, dentro del rango propuesto por Díaz et al. (2018), quienes, a partir de observaciones experimentales, sugieren que este ángulo suele ubicarse entre 15° y 35° para rompimientos del tipo *plunging*. Este valor representa una condición intermedia y razonable para aplicaciones en zonas costeras con rompimiento activo.

3.3 ESTIMACIÓN DE CELERIDAD

Las imágenes de las máscaras binarias (Figura 2), son procesadas mediante funciones de la biblioteca OpenCV o CV2 (Bradski, 2000) para extraer contornos, calcular áreas y determinar los centroides de las regiones segmentadas. A partir de esta información, se implementa un sistema de seguimiento a lo largo de la secuencia de imágenes, mediante la asignación de un identificador único (ID) a cada área detectada en el primer fotograma. En los fotogramas siguientes, los centroides de las nuevas regiones se comparan con los anteriores, y se asigna el mismo ID a aquella región cuya posición presenta la menor distancia euclidiana respecto a la previamente registrada. Este proceso está regulado por un umbral máximo de desplazamiento, el cual impide asignar un ID a una región cuya distancia exceda lo esperado, evitando así errores de identificación cuando una ola desaparece o es reemplazada por otra no relacionada espacialmente. En caso de identificarse una región que no cumpla con la condición impuesta por el umbral máximo de desplazamiento, se le asignará un nuevo identificador (ID), correspondiente al valor consecutivo al mayor ID asignado hasta ese instante, interpretándose como la aparición de una nueva ola rompiendo.

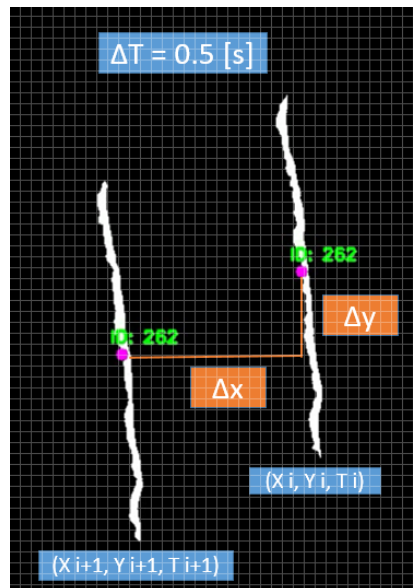


Figura 3: Concepto de la implementación de la metodología para estimar la celeridad.

En la Figura 3, se muestra al centroide como punto representativo del área, con lo cual es posible estimar el desplazamiento entre imágenes, obteniendo así los valores de Δx y Δy . El intervalo temporal Δt se conoce a partir de la frecuencia de muestreo del video (en este caso $\Delta t = 0.5 [s]$). Con esta información, se calcula la celeridad asociada a cada ID, entendida como una estimación de la velocidad media de desplazamiento del área segmentada de la zona de rompiente. Para determinar la magnitud de la celeridad, se utilizan sus componentes en las direcciones X e Y, y se calcula la norma euclidiana correspondiente. El campo de celeridad se construye promediando, para cada píxel del mapa, todas las magnitudes de celeridad asociadas a ese punto a lo largo de la secuencia temporal, lo que permite obtener una representación espacial de la velocidad observada media de los patrones de rotura durante el intervalo analizado.

3.4 ESTIMACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FORZANTE

La Ecuación (1) incluye entre sus términos el cociente entre el vector número de onda (\vec{k}) y su norma ($|\vec{k}|$), lo que permite definir únicamente la dirección de la fuerza generada por el roller, sin alterar su magnitud. A partir de las máscaras segmentadas, es posible aplicar funciones de la biblioteca OpenCV (Bradski, 2000) para identificar las direcciones principales (débil y fuerte) de cada área de ola rompiente. En este contexto, la dirección fuerte se asocia con el eje longitudinal del área segmentada, mientras que la dirección débil es perpendicular a ella y, por tanto, representa la dirección de propagación del oleaje. Tomando como referencia un eje con una línea recta proyectada perpendicular a la línea de costa y otra paralela a ésta, se puede calcular el ángulo formado entre la línea paralela a la costa (en dirección Norte) y la dirección de propagación estimada del oleaje. Repitiendo este procedimiento para cada área identificada, se obtiene un conjunto de ángulos que permite caracterizar estadísticamente la dirección media del oleaje en el tramo de estudio (291.42°), según su dispersión y máxima concentración presentada en el histograma de la Figura 4.

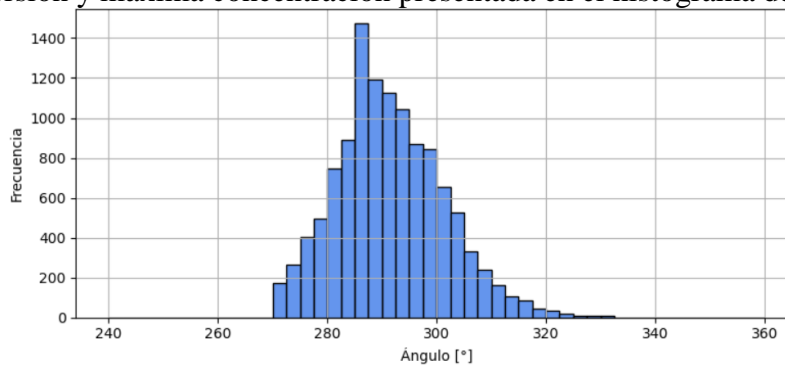


Figura 4: Histograma de todas las direcciones por cada ID de cada imagen de la secuencia.

4. RESULTADOS

En la Figura 5 se presentan los resultados obtenidos para la celeridad, la disipación de energía y la fuerza de oleaje.

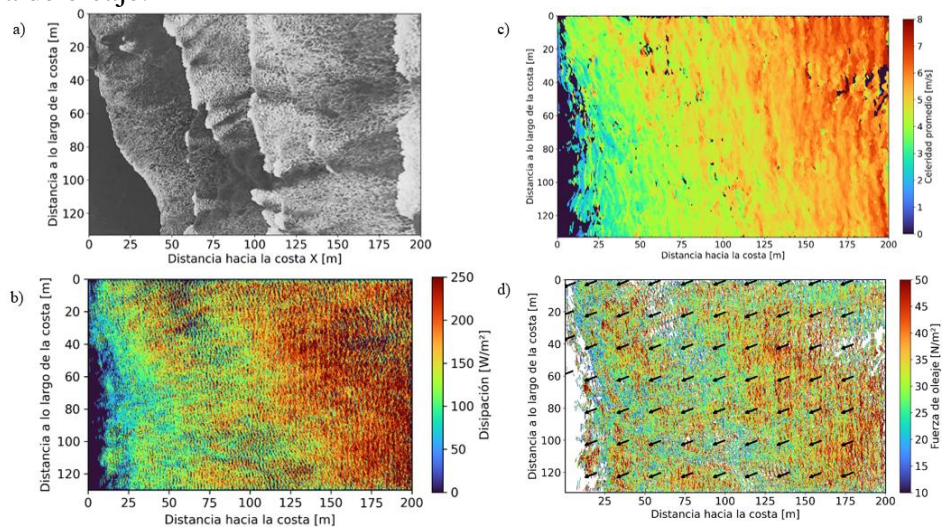


Figura 5: a) Imagen rectificada y recortada, b) Campo de Disipación de Energía por rotura, c) Campo de Celeridad, d) Campo de Fuerza del Oleaje. Elaborado en Python.

Cada subfigura representa un mapa espacial de las variables principales, permitiendo visualizar su distribución en el dominio costero y su relación con los procesos de rompimiento de ola. La disipación de energía (imagen b), los valores obtenidos varían entre 0 y 250 [W/m²], con máximos en torno a los 200 [W/m²] concentrados en el sector comprendido entre los 125 y 200 [m] desde la costa. Esta región coincide con la mayor presencia de olas rompientes de gran extensión, lo que intensifica la pérdida energética. Estos valores se alinean con los reportados por Díaz et al. (2018), quienes también identificaron este orden de magnitud como característico de zonas de rompimiento activo (aproximadamente 200[W/m²]). Este antecedente respalda que los niveles de disipación simulados en este trabajo están dentro del rango esperado bajo condiciones de rompimiento activo en zonas de surf.

En lo referente a la celeridad del oleaje (imagen c), los resultados muestran un patrón de incremento progresivo desde la línea de costa hacia mar abierto, con valores que van desde 1–2 [m/s] en los primeros 50 [m], 2–5 [m/s] entre 50 y 100 [m], y hasta 8 [m/s] en la región comprendida entre 125 y 200 [m]. Esta distribución es coherente con la profundización del fondo y con la teoría de propagación de ondas en aguas de transición. Los valores más bajos cercanos a la costa también coinciden con las zonas de mayor disipación, lo que sugiere una interacción entre disminución de velocidad y pérdida de energía. Comparativamente, Ting y Kirby (1994) observaron una reducción significativa de la velocidad de fase en laboratorio durante el rompimiento *plunging*, con celeridades que descendieron hasta un 20 % respecto al valor teórico \sqrt{gh} , lo que se traduce en aproximadamente 1.2–1.4 [m/s] para profundidades del orden de 0.25 [m]. Okayasu et al. (1990) documentaron en condiciones de laboratorio valores de celeridad menores a los lineales durante el proceso de rompimiento, producto de la disipación turbulenta. Por su parte, Feddersen (2014), en un entorno natural, reportó velocidades de fase en el rango de 3 a 5.4 [m/s] para profundidades entre 1 y 3 [m], lo que se sitúa dentro del rango medio del dominio analizado en este estudio. En consecuencia, la evolución espacial de la celeridad observada en este trabajo resulta consistente con lo esperado tanto desde la teoría de aguas someras como desde la evidencia empírica obtenida bajo condiciones no lineales de rompimiento.

Por otro lado, la fuerza generada por el roller (imagen d), los valores modelados se sitúan entre 0 y 60 [N/m²], con magnitudes de 35 a 50 [N/m²] en los primeros 50 [m] desde la costa, disminuyendo a 15–35 [N/m²] entre 50 y 125 [m], y volviendo a elevarse a cerca de 50 [N/m²] en el tramo entre 125 y 200 [m]. Esta distribución espacial refleja claramente dos zonas activas: una cercana a la costa, con fondo somero, baja celeridad y alta fuerza; y una segunda zona de rompimientos más extendidos, con mayor disipación y recuperación de fuerzas mar adentro. Adicionalmente, los vectores representados en el mapa indican una orientación media de propagación del oleaje de aproximadamente 290°, lo que refuerza la coherencia del modelo frente a registros reales del puerto de San Antonio (Empresa Portuaria San Antonio, s. f.).

5. DISCUSIÓN

Una de las limitaciones de esta metodología es la sensibilidad a las condiciones de visibilidad y resolución espacial de las imágenes, lo que puede afectar la precisión en la segmentación del área del roller en zonas con alta turbulencia o espuma dispersa, tal como lo evidencian Sáez et al., (2021). Además, la asignación del ID está limitado por un umbral máximo de desplazamiento, el cual determina en gran medida el valor de celeridad máxima que se puede obtener, indicando que este se debe ajustar según la frecuencia de extracción de las imágenes (fps). La disipación de energía por rotura está influenciada por múltiples parámetros que deben ser analizados con mayor detalle para la zona de estudio, especialmente aquellos que afectan directamente su cuantificación, como el ángulo de inclinación del frente de ola respecto al plano horizontal. Por otro lado, la presencia de zonas sin información en el mapa de celeridad sugiere la necesidad de utilizar videos de mayor duración, con el fin de aumentar la cantidad de datos disponibles y mejorar el registro promedio por píxel. Esto permitiría reducir los vacíos de información causados por la metodología implementada, la cual requiere al menos dos posiciones consecutivas del centroide para poder estimar la velocidad de fase.

Esta investigación demuestra que es posible evaluar la interacción entre la pluma y el oleaje desde observaciones remotas, sin necesidad de recurrir a modelaciones numéricas o mediciones in-situ, lo que valida el enfoque metodológico planteado y respalda su potencial para caracterizar dinámicas complejas en entornos fluvio-marinos. A futuro, esta metodología no solo permite un análisis promedio a través de campos de celeridad, disipación y fuerza de oleaje, sino también la exploración del comportamiento a nivel de ola individual. Asimismo, el patrón de celeridad observado puede utilizarse, mediante relaciones empíricas o modelos inversos, para inferir campos de batimetría, en línea con propuestas desarrolladas en investigaciones recientes por Klotz et al. (2025).

6. CONCLUSIÓN

Este estudio demuestra que es viable usar imágenes de sensores remotos y visión por computador para identificar, segmentar y seguir zonas de rompiente en la costa. Mediante la arquitectura U-Net y análisis espacial, se estimaron la celeridad del oleaje, la disipación de energía por rompimiento y la dirección de la fuerza de oleaje asociado al roller. Los resultados concuerdan con la literatura, mostrando una disminución de la celeridad hacia la costa y una concentración de disipación en zonas específicas donde se concentran las olas rompientes de mayor dimensión. Además, el uso de centroides e identificación por ID permitió generar campos de velocidad de fase sin modelos hidrodinámicos, ni altos recursos computacionales.

Aunque presenta limitaciones como la dependencia de la resolución de imagen y la dificultad de captar procesos tridimensionales, la metodología es robusta, replicable y útil para monitoreo costero. Su aplicación en la desembocadura del río Maipo muestra su potencial en escenarios reales y su capacidad de integrarse con estudios de batimetría invertida y corrientes costeras. Este enfoque es relevante para la gestión costera, ya que facilita la identificación de zonas de riesgo y erosión con menores exigencias computacionales, siendo una alternativa complementaria a la modelación hidrodinámica tradicional.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el respaldo financiero otorgado por el Programa de Iniciación a la Investigación Científica (Convenio N°036/2025) de la Universidad Técnica Federico Santa María. Del mismo modo, se reconoce la inclusión de esta investigación como parte del proyecto FONDECYT 1231494, “The fate of freshwater in the surf zone: assessing the roles of the short and long wave forcings”.

REFERENCIAS

- Bradski, G. (2000). *The OpenCV Library*. Dr. Dobb's Journal of Software Tools.
- Bruder, B. L., & Brodie, K. L. (2020). Quantitative Coastal Imaging Toolbox (Q-CIT): A MATLAB-based software for cross-shore and longshore transformation of oblique coastal imagery. *SoftwareX*, 12, 100619.
- Buscombe, D., & Carini, R. J. (2019). A decadal experiment in monitoring shorelines reveals an emerging role for autonomous systems in coastal change detection. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(9), 1866–1882.
- Catalán, P. A., & Haller, M. C. (2008). Remote sensing of breaking wave phase speeds with application to non-linear depth inversions. *Coastal Engineering*, 55(1), 93–111.
- Díaz, H., Catalán, P. A., & Wilson, G. W. (2018). Quantification of two-dimensional wave breaking dissipation in the surf zone from remote sensing data. *Remote Sensing*, 10(2), 260.
- Duncan, J. H. (1981). An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 377(1770), 331–348.
- Empresa Portuaria San Antonio. (s. f.). *VCMOV: Visibilidad, corriente, marea, oleaje y viento – Puerto de San Antonio*. Recuperado el 23 de julio de 2025, de Puerto de San Antonio.
- Feddersen, F. (2014). The generation of surfzone eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 37(7), 1649–1660.
- Feddersen, F., Clark, D. B., & Guza, R. T. (2016). Coastal buoyant plume dynamics and the fate of freshwater: Observations and numerical modeling of the San Diego River plume. *Continental Shelf Research*, 112, 1–17.
- Foda, M. A., & Mei, C. C. (1981). *Nonlinear interaction of progressing waves with rippled beds*. *Journal of Fluid Mechanics*, 109, 319–345.
- 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.

Klotz, A. N., Gurruchaga, P., Almar, R., Lange, A. M. Z., & Bergsma, E. W. J. (2025). *Deriving nearshore bathymetry and waves characteristics from a single UAV video*. Coastal Engineering.

Okayasu, A., Fujima, K., & Horikawa, K. (1990). Wave-induced nearshore currents in a laboratory surf zone. *Coastal Engineering*, *14*, 93–113.

QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System* (Versión 3.34). Open Source Geospatial Foundation.

Roco, A., Flores, R. P., Williams, M. E., & Saldías, G. S. (2024). Observations of river–wave interactions at a small-scale river mouth. *Coastal Engineering*, *189*, 104380.

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.

Sáez, F. J., Catalán, P. A., & Valle, C. (2021). Wave-by-wave nearshore wave breaking identification using U-Net. *Coastal Engineering*, *170*, 103409.

Ting, F. C. K., & Kirby, J. T. (1994). Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone. *Coastal Engineering*, *24*(1–2), 51–80.