

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTUDIO DE LA RESUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS PRODUCIDO POR EL
MOVIMIENTO DE LAS OLAS EN EL LAGO LLANQUIHUE**

IGNACIO ANDRÉS SEGOVIA FARIÁS¹
JUAN PABLO TORO LABBÉ²
PATRICIO ALEJANDRO MORENO-CASAS³

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a un estudio numérico de la resuspensión de sedimentos provocada por la acción de las olas en el lago Llanquihue. Se recopilieron mediciones de campo por medio de una estación meteorológica ubicada dentro del lago, la que registra direcciones y velocidades de viento. Se utilizó también un medidor de onda direccional (AWAC) que provee información de alturas y periodos significativos de olas. Una tercera fuente de información se obtuvo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) con datos de direcciones y velocidades de vientos, valores registrados en tierra en la ciudad de Puerto Varas.

Por medio del software STWAVE se obtuvieron las alturas y periodos simuladas de olas y el esfuerzo de corte de fondo en los sectores de Puerto Octay, Las Cascadas y Llanquihue, al igual que su efecto en la resuspensión de una partícula característica de 0,15 mm de diámetro. Los resultados numéricos indican que, para el sector de Las Cascadas, el 10,7% de los vientos tendría asociado resuspensión de partículas, mientras que para Puerto Octay la resuspensión de partículas ocurriría para un 7,2% de los vientos. Para la localidad de Llanquihue, se obtuvo que tan sólo el 1% de los vientos logra sobrepasar el esfuerzo crítico. De los resultados también se desprende que las velocidades de vientos que contribuyen a la resuspensión son superiores a los 5,5 m/s, mientras que las alturas de olas asociadas con la resuspensión son de al menos 0,38 m con periodos mínimos de 3,8 s. Finalmente, las direcciones preferentes de viento que generan la resuspensión de la partícula característica en el lago están en el rango de valores de 42° a los 310°.

¹Ingeniero Civil, Universidad Andres Bello – ignacio.segoviaf@gmail.com

²Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Andres Bello – juan.toro.l@unab.cl

³Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad de los Andes – patriciomoreno@miuandes.cl

1. INTRODUCCION

En Chile existen aproximadamente 380 lagos con una superficie mayor a 3 km² (Dirección General de Aguas, 1999). Estos lagos forman parte de ecosistemas poseedores de una riqueza única, entre los que destacan el lago Llanquihue, el segundo de mayor envergadura en el territorio nacional (Ortiz, 2020). Los lagos patagónicos son particularmente importantes debido a la diversidad de especies que albergan, el rol que cumplen en el flujo de energía y los ciclos biogeoquímicos, como el del carbono (Borja et al., 2011). Asimismo, los lagos pueden ser considerados centinelas del cambio climático, ya que en ellos es posible medir niveles de agua, distribuciones de temperatura y presencia de nutrientes (Adrian et al., 2009), entre otros factores. Las actividades antrópicas, por su parte, modifican el transporte de sedimentos en suspensión, aumentan la erosión en las cuencas (Hindrawati, 2015), provocan pérdida de suelo, además de aumentar la contaminación y turbidez de sus aguas (Ongley, 1997). Las corrientes y olas impulsadas por el viento juegan un rol fundamental en la sedimentación en zonas poco profundas de estos lagos (García y Lago, 2021). El aumento de la turbidez a causa de los sedimentos resuspendidos (Roberts, 2019) puede limitar el crecimiento de plantas, debido a que las partículas suspendidas cubren los tallos, bloqueando la luz e impidiendo la fotosíntesis en los productores primarios (Malcuori, 2011). Adicionalmente, los sedimentos pueden obstruir el sistema de filtrado de animales invertebrados, afectando su normal proceso metabólico y crecimiento, produciendo incluso la muerte del organismo (Irving, 2002). La eutrofización es otro fenómeno derivado de la resuspensión de sedimentos. Cuando los sedimentos poseen una alta cantidad de nutrientes ricos en fósforo y nitrógeno provenientes del lecho (Salas y Martino, 2001), al ser resuspendidos generan una proliferación descontrolada de algas, las que forman una capa en la superficie, que impide el paso de la luz solar y la fotosíntesis para las algas que se encuentran debajo de esta capa, por lo que la producción primaria no puede existir a mayores profundidades, cortando la cadena alimenticia (Belmonte, 2018).

La mayoría de los trabajos que estiman la incidencia de campos de olas en zonas poco profundas, se han basado en modelos paramétricos, apoyándose en datos de estudios similares para la obtención de ecuaciones (Boyd y Weaver, 2021). La instrumentación para la obtención de datos in situ, requiere de la instalación de dispositivos de medición de elevado costo y de un mantenimiento periódico (Li et al., 2017), como ocurre en el caso del lago Taihu, China. Por otro lado, la utilización de modelos numéricos, como los softwares SWAN y STWAVE, constituye otra alternativa para caracterizar las olas producidas por el viento. En el trabajo de Buonaiuto et al. (2011), por ejemplo, se presenta una cuantificación de las olas producidas por tormentas tropicales, mientras que en el estudio de Beyá (2016), se describen los requerimientos estructurales y otros aspectos de diseño en proyectos portuarios que utilizan la altura del oleaje como parámetro de diseño.

En este estudio se utilizó el software STWAVE para caracterizar las olas en el lago Llanquihue para un intervalo aproximado de tiempo de cinco meses. El software ha sido validado con datos de campo en el sur del lago Tahoe (Reardon et al., 2014; Reardon et al., 2016). En este documento se plantean las siguientes preguntas científicas para el estudio del oleaje en el lago Llanquihue:

1. ¿Cuáles son las velocidades de viento que contribuyen a la resuspensión de sedimentos?
2. ¿Cuáles son las direcciones de vientos que contribuyen a la resuspensión de sedimentos?
3. ¿Cuáles son las alturas y periodos de olas que se requieren para que ocurra resuspensión de sedimentos?

2. MEDICIONES DE CAMPO

Las variables hidrodinámicas se obtuvieron a unos 3 km aguas adentro de la costa en el extremo sur del lago Llanquihue. Existe además una estación meteorológica que captura las direcciones y velocidades de vientos a 10 m de altura por sobre el nivel del agua. Las alturas y periodos de olas se obtuvieron por medio de un medidor de onda direccional (AWAC) que fue montado próximo al fondo del lago. El AWAC-400 khz de Nortek puede realizar perfiles de hasta 100 m de profundidad, con celdas de 1 a 8 m (sampling rate velocity of 0.75 Hz, range of waves + - 15 m y hasta 1 cm de resolución de alturas significativas, mide periodos de 1 a 50 s). Las mediciones se tomaron a una profundidad de 85 m entre el 14 de octubre de 2021 y el 7 de abril de 2022 con la estación meteorológica, mientras que con el AWAC se recopiló un conjunto de datos completo desde el 21 de marzo al 7 de abril de 2022 (Tabla 1). La ubicación de ambos instrumentos se denominará de ahora en adelante Boya P4.

Existe una estación de la DMC llamada estación Puerto Varas ESSAL 410040 que se encuentra a unos 250 m de la ribera sur del lago Llanquihue. Los datos de esta estación fueron comparados con los de la estación Boya P4 para establecer un método que permita determinar la correlación de la magnitud de los vientos entre ambas estaciones. El periodo seleccionado para dicha comparación se extiende entre el 14 de octubre del 2021 hasta el 30 de marzo del 2022 (Tabla 1).

Tabla 1. Mediciones de campo. V= velocidad de viento [kn/s]; Dir= dirección de viento [°]; H= altura significativa de ola [m]; Tp= Periodo significativo de ola [s].

Instrumento	Ubicación	Parámetros medidos	Operativa desde/hasta	Periodo muestreo	Intervalo medición
Estación meteorológica Boya P4	Lat -41.28242 Lon -72.93801	V Dir	14/10/2021 hasta la fecha	14/10/2021 – 07/04/2022	10 min.
AWAC	Lat -41.28242 Lon -72.93801	H Tp	21/03/2022 – 07/04/2022	21/03/2022 – 07/04/2022	3 hrs.
Estación meteorológica DMC	Lat -41.32444 Lon -72.97666	V Dir	01/09/2018 hasta la fecha	14/10/2021 – 30/03/2022	1 hr.

Para estudiar la resuspensión de sedimentos, se escogieron 3 puntos de interés en el interior del lago, en las costas de Puerto Octay, Las Cascadas y Llanquihue, a una profundidad aproximada de 1 m. Se analizó el comportamiento de un sedimento tipo, bien clasificado, no cohesivo y sin formas aparentes en el lecho (Herold et al. 2007). Se consideró una masa específica de 2650 kg/m³ (Reardon et al., 2014) asociado a partículas esféricas de arena.

3. MODELO STWAVE

STWAVE (Steady State Spectral Wave) es un software que utiliza diferencias finitas, de estado estacionario con un enfoque espectral, que resuelve la ecuación de balance de la acción de las olas, incorporando los fenómenos de generación y transformación de olas por refracción y descarga, rompimiento de olas, generación por entrada de viento e interacción ola-ola (Smith, 2007; Holthuijsen, 2007; Massey et al., 2011). En el modelo STWAVE la ecuación que caracteriza el proceso de transformación de onda en el dominio computacional (Ji, 2017) es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{c} \quad (1)$$

Donde σ es la frecuencia relativa, θ es la dirección de la onda, $N(\sigma, \theta)$ corresponde a la densidad del espectro de acción de ola, $S(\sigma, \theta)$ son las fuentes y sumideros de energía de las olas y c es la velocidad de propagación de la acción de las olas.

Cuando el esfuerzo de corte en el fondo del lago supera el esfuerzo de corte crítico, se produce la resuspensión de sedimentos, mecanismo mediante el cual se incorporan las partículas a la columna de agua contribuyendo de esta manera a la cantidad de sedimento transportado (Guillén et al., 1999). El diagrama de Shields (Shields, 1936), que caracteriza las condiciones para el inicio del movimiento de las partículas de sedimento en un flujo unidireccional, constante y uniforme también ha sido validado para caracterizar las condiciones incipientes bajo flujos oscilatorios (Raudkivi, 1998) y por lo tanto es el criterio utilizado en este trabajo. El esfuerzo crítico que define el movimiento incipiente de partículas se calcula de la siguiente manera:

$$\tau_{crítico} = \tau_c^* \rho_s R g D \quad (2)$$

Donde R es la gravedad sumergida.

$$R = (\rho_s - \rho) / \rho \quad (3)$$

ρ_s y ρ corresponden a la masa específica del sedimento y del agua, respectivamente; g es la aceleración de gravedad y D el tamaño de grano representativo del sedimento (Parker, 2004). El parámetro de Shields crítico adimensional (Parker et al., 2003) se calculó de la siguiente forma:

$$\tau_c^* = 0.5 [0.22 Re_p^{-0.6} + 0.06 \times 10^{(-7.7 Re_p^{-0.6})}] \quad (4)$$

Donde Re_p es el número de Reynolds basado en la partícula (Ecuación 5) y ν = viscosidad cinemática del agua (10^{-6} m²/s).

$$Re_p = \sqrt{g R D^3} / \nu \quad (5)$$

El esfuerzo cortante de fondo debido a las olas se calculó como:

$$|\tau_{fondo}| = 0.5 \rho C_f u_{b,rms}^2 \quad (6)$$

Donde τ_{fondo} corresponde a la magnitud del esfuerzo de corte de fondo debido a las olas; C_f es el coeficiente de fricción del fondo y $u_{b,rms}^2$ corresponde a la magnitud de la velocidad orbital media cuadrática en el fondo del lago. STWAVE calcula las velocidades orbitales en forma intrínseca, por lo que el esfuerzo de corte es calculado a partir de este parámetro. El cálculo de las velocidades orbitales en el fondo es realizado por STWAVE utilizando la ecuación descrita en la página 8832 del trabajo de Reardon et al. (2014). Este cálculo se realiza en función de la profundidad del lecho

del lago, y es con estas velocidades que se puede calcular el esfuerzo de corte. A pesar de que los resultados obtenidos en STWAVE de las velocidades orbitales no han sido validados directamente, el esfuerzo de corte (calculado con las velocidades orbitales) en el fondo del lago utilizando STWAVE ha sido validado con datos de campo medidos en el fondo del lago Tahoe, en CA, USA, y se puede revisar en Reardon et al. (2014), figura 11.

Para implementar en el lago Llanquihue la versión de plano completo de STWAVE, se utilizaron celdas cuadradas de 50 m que cubren todo el lago, esto es 832 celdas en la dirección X (norte-sur) y 818 celdas en la dirección Y (este-oeste) (Figura 1). Se usaron registros de vientos en la estación meteorológica Boya P4 (Tabla 1) y se asumió un campo de viento constante en el espacio (aunque temporalmente variable), esto es, todas las celdas del lago se simularon utilizando la misma dirección y magnitud de viento. Los registros de la estación meteorológica fueron promediados de tal manera de obtener datos cada 1 y 3 horas.

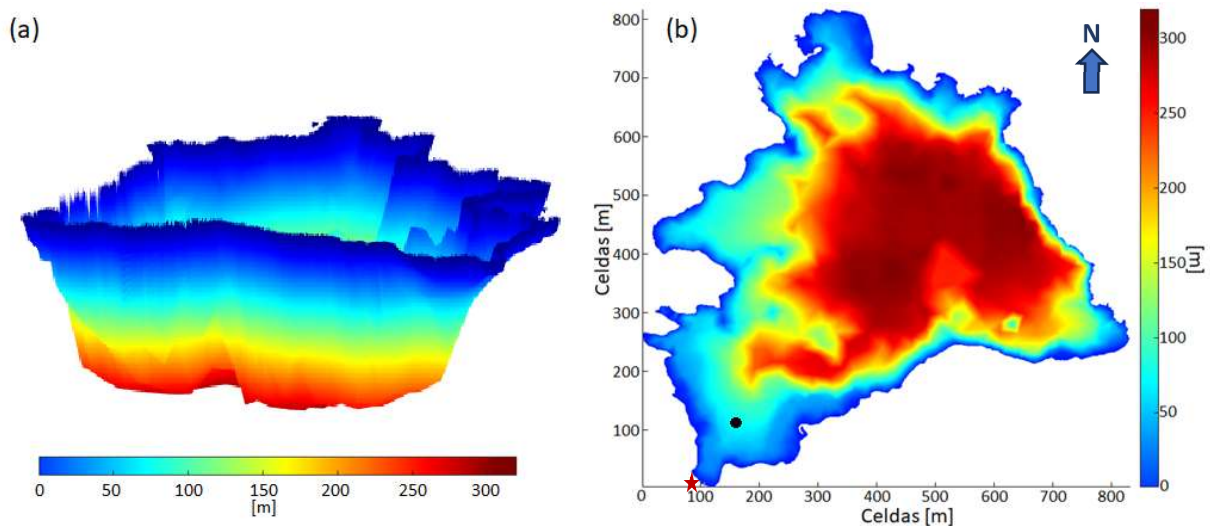


Figura 1. (a) Batimetría del lago Llanquihue en 3D. (b) Vista superior de la batimetría del lago Llanquihue (2D); el punto negro en la figura (b) indica la ubicación de la Boya P4 correspondiente a la celda 157 en X y 104 en Y, mientras que la estrella roja indica la posición de la estación de la DMC. Cada celda cuadrada tiene una arista de 50 m de longitud.

4. RESULTADOS

Para el presente estudio, se extrajeron las alturas y periodos significativos de olas, correspondientes al promedio del tercio de olas más altas registradas en un determinado intervalo de tiempo. Para ello fue necesario inicialmente ingresar las velocidades y direcciones del viento dadas por la estación meteorológica Boya P4 (Figura 2a y 2b) entre el 21 de marzo y el 7 de abril del 2022, promediando su registro cada una hora (406 datos) y cada tres horas (136 datos), en STWAVE. Los valores de alturas y periodos significativos obtenidos de la simulación fueron comparados, para el mismo periodo de tiempo, con aquellos valores obtenidos *in situ* con el instrumento AWAC, instalado en la Boya P4.

El AWAC fue programado para calcular las alturas significativas (promedio del tercio superior) del total de olas medido cada 3 horas, al igual que los periodos. En el caso de STWAVE la altura

significativa de olas puede ser calculada a partir del espectro de olas (Holthuijsen, 2007) que calcula el momento cero de las olas. Esto es análogo para los resultados de simulación, en donde el periodo peak es calculada por el software, por lo que esta variable sería representativa del periodo significativo de olas.

La Figura 2c y 2d muestra la comparación de los resultados de la simulación y los valores obtenidos en el lago, donde se aprecia que las alturas y periodos significativos de olas simulados tienen una buena concordancia cuando el viento y las direcciones son constantes. Cuando uno de estos parámetros cambia abruptamente, se obtienen resultados numéricos que subestiman los valores medidos en la mayoría de los casos, lo cual es indicativo de un modelo que no es capaz de capturar el efecto de las olas producido por cambios abruptos de velocidad o dirección de vientos, por tratarse de un modelo de estado estacionario.

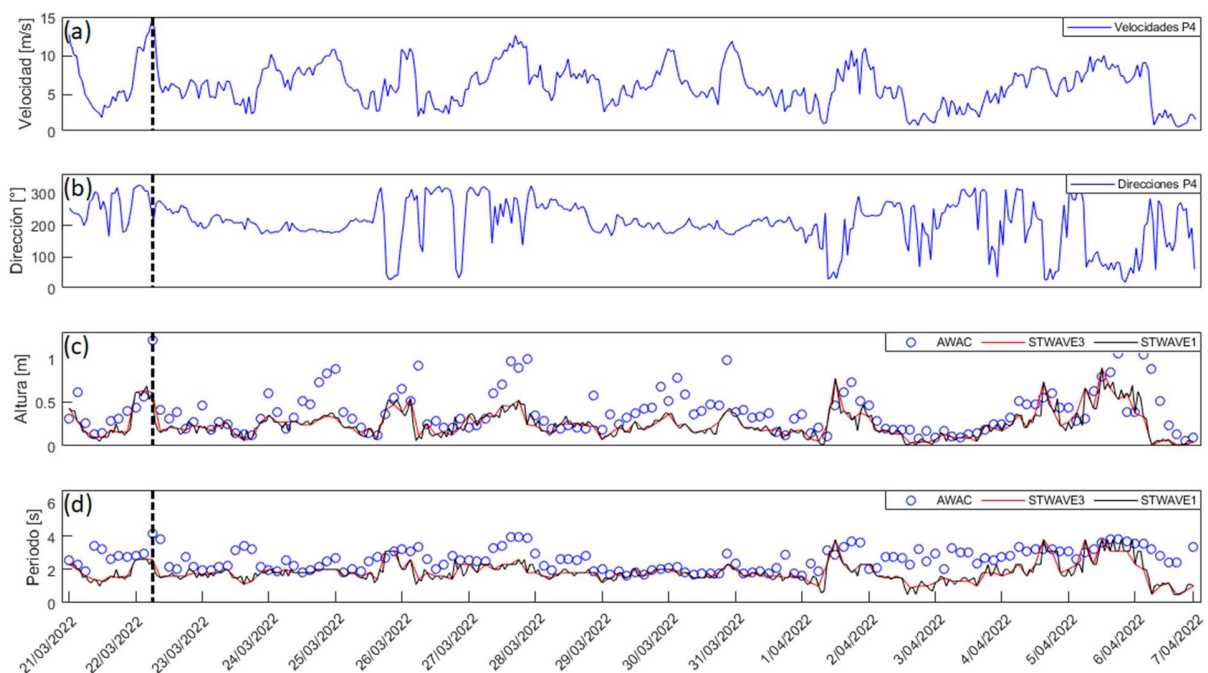


Figura 2. (a) Velocidades de vientos registradas en la Boya P4. (b) Direcciones de vientos registradas en la Boya P4. (c) Altura significativa de olas. (d) Periodo significativo de olas. Para las figuras (b) y (c), círculos azules corresponden a datos de campo medidos con AWAC; línea roja corresponde a valores obtenidos con STWAVE cada 3 horas; línea negra corresponde a valores obtenidos con STWAVE cada 1 hora. La línea vertical segmentada color negro muestra la velocidad más alta del registro acompañada de su dirección, altura y periodo de ola. Celda 157 X, 104 Y.

4.1. AJUSTE PARA DATOS DE LA DMC

Existe un total de 3960 datos de direcciones y velocidades de vientos obtenidos de la DMC cada 1 hora en el periodo comprendido entre el 14 de octubre de 2021 y el 30 de abril de 2022. Estos valores fueron comparados con las magnitudes y direcciones de vientos registrados por la estación meteorológica instalada en la Boya P4. Es importante indicar que la estación de la DMC se encuentra ubicada en tierra, por lo que está expuesta a los efectos de fricción que impone la

topografía del lugar. En cambio, los registros de la Boya P4 son medidos al interior del lago, y por lo tanto se espera que esta información sea más representativa de los vientos que generan la transferencia de momentum (viento-agua). En las magnitudes de velocidad del viento (Figura 3a) se aprecia que los datos de la DMC siguen un comportamiento proporcional al de los datos de la Boya P4, pero con menores magnitudes, mientras que para las direcciones de viento (Figura 3b) se observa un patrón similar, por lo que se asume que los datos de dirección de viento de la DMC son concordantes con los de la Boya P4, pero los valores de la DMC son menores debido a las rugosidades del terreno y los accidentes geográficos que generan una reducción de la magnitud de la velocidad por fricción. De esta manera fue posible cuantificar que existe un factor promedio de 2,69 entre las magnitudes de viento de la Boya P4 y las de la estación de la DMC; esto es, las magnitudes de viento de la DMC son 2,69 veces más pequeñas que aquellas registradas en la estación meteorológica localizada dentro del lago. Esto permitiría aplicar este factor a registros de vientos de la DMC en periodos anteriores a los obtenidos en la Boya P4 con el fin de modelar y conocer eventos pasados, aplicando la misma metodología explicada.

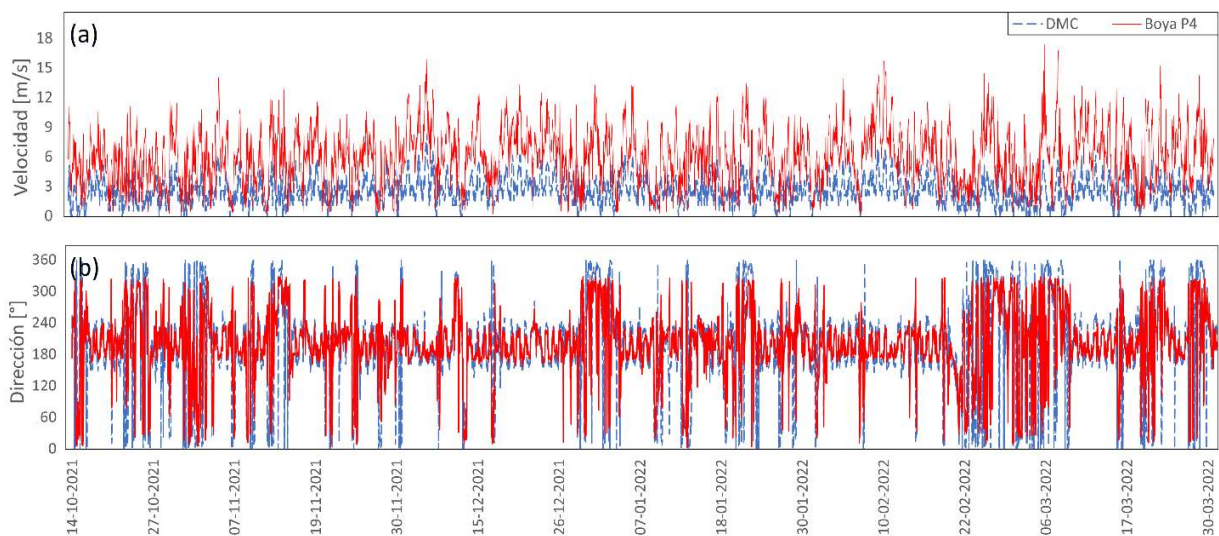


Figura 3. (a) Velocidades del viento en la estación meteorológica DMC y en la estación meteorológica de la Boya P4. (b) Direcciones de viento en la estación meteorológica DMC y estación meteorológica de la Boya P4. Color azul, registros de la DMC; color rojo, registros de la Boya P4.

4.2. ESFUERZO DE CORTE CRITICO Y RESUSPENSION DE SEDIMENTOS

Para estudiar el fenómeno de resuspensión de sedimentos producido por el esfuerzo de corte de fondo generado por las olas, se asume un tamaño de diámetro representativo D_{10} de 0,15 mm, no cohesivo, indicativo que el 10% de la masa de la muestra está compuesta por partículas con un tamaño menor que este valor (ver por ejemplo Reardon et al., 2016). Este diámetro es razonable de acuerdo con granulometrías obtenidas de playas del mismo lago recientemente.

Aplicando la Ecuación (2) es posible calcular un esfuerzo de corte crítico de 0,21 Pa para la partícula de 0,15 mm de diámetro. De esta forma, cuando el esfuerzo de corte producido por las olas en el lecho del lago supera el valor del esfuerzo de corte crítico, se asume potencial de resuspensión para las partículas de diámetro inferior a 0,15 mm.

De un total de 1223 registros de velocidades y direcciones de vientos obtenidos de la estación meteorológica (Boya P4) promediados cada 3 horas entre el 14 de octubre de 2021 y el 16 de marzo de 2022, se modeló con STWAVE el máximo valor de velocidad de viento igual a 15,3 m/s para todo el lago Llanquihue (Figura 4a). Luego, se verificaron los sitios del lago que superan el esfuerzo de corte, obteniendo así las zonas (o celdas) costeras donde existe potencial de resuspensión de sedimentos tal como se muestra en la Figura 4b.

El primer poblado costero bajo estudio de resuspensión de partículas es Puerto Octay (punto 1 en Figura 4). En esta zona, el esfuerzo de corte de las olas supera el esfuerzo de corte crítico en un 7,2% del total de los vientos simulados (Figura 5e). Cuando las magnitudes de las velocidades son iguales o inferiores a 7 m/s, el esfuerzo de corte producido por las olas del lago no logra generar resuspensión. La resuspensión de sedimentos simulada con el modelo modificado de STWAVE ocurrió con mayor frecuencia en direcciones de vientos provenientes entre los 116° y 182° con velocidades que van desde los 7,3 a los 15,4 m/s. El intercambio de momentum entre el viento y el agua, permite generar un promedio de altura significativa de ola de 0,14 m (Figura 5c) y periodos que tienen un valor promedio de 1,8 s (Figura 5d). Hay que resaltar que Puerto Octay se encuentra en el lado norte del lago y el 83% de las direcciones de viento evaluadas en este estudio tienen esa dirección.

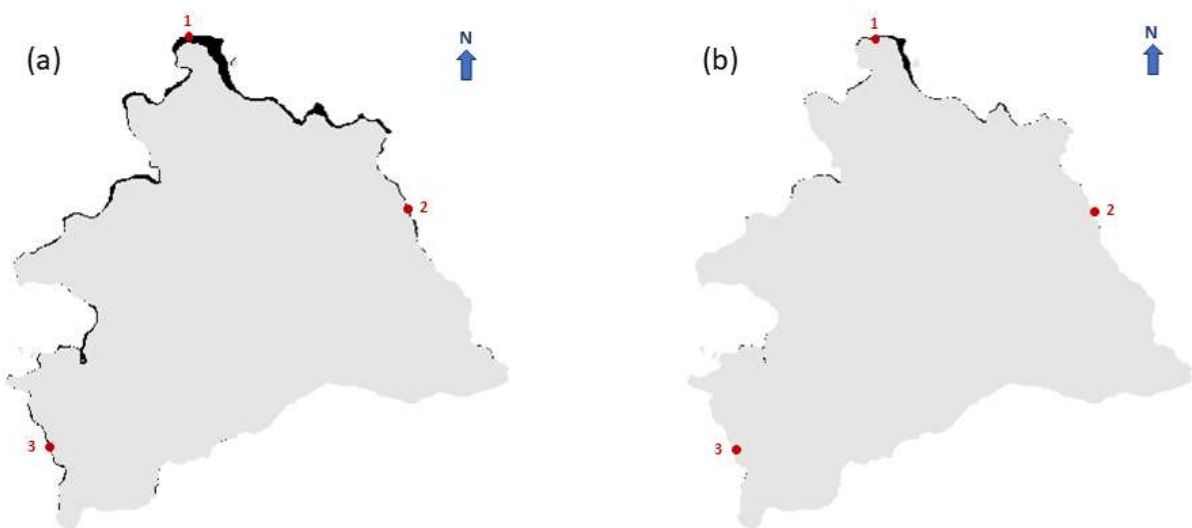


Figura 4. (a) Esfuerzos de corte. (b) Resuspensión. Simulaciones realizadas para todo el lago Llanquihue con el viento más fuerte del registro (15,3 m/s). El círculo rojo 1 indica la ubicación de la celda (290, 801) correspondiente a la costa de Puerto Octay. El círculo rojo 2 indica la ubicación de la celda (659, 544) correspondiente a la costa de Las Cascadas. El círculo rojo 3 indica la ubicación de la celda (57, 187) correspondiente a la costa de Llanquihue. La resuspensión es representada en color negro, mientras que el lago se encuentra representado en color gris.

El segundo poblado costero bajo estudio corresponde a Las Cascadas (Figura 4, punto 2). En esta zona, el esfuerzo de corte producido por las olas superó al esfuerzo de corte crítico de la partícula de 0,15 mm de diámetro en un 10,7% del total de los vientos simulados (Figura 6e). Cuando las velocidades de vientos son iguales o menores a 7 m/s, el esfuerzo de corte no genera resuspensión. La resuspensión de sedimentos simulada con el modelo modificado de STWAVE ocurrió con mayor frecuencia en direcciones de vientos entre los 166° y 310° con magnitudes de velocidad que

van desde los 7,1 a los 15,4 m/s. Esta resuspensión se debe a olas con un promedio de altura de 0,22 m (Figura 6c) y con periodos de ola promedio de 2,5 s (Figura 6d). En esta localidad, el 59% de los vientos evaluados en este estudio corresponden a direcciones que van en dirección Noreste, justamente donde se encuentra el poblado de Las Cascadas.

Finalmente, el último poblado costero bajo estudio es Llanquihue en la celda 57 X, 187 Y (Figura 4, punto 3). El esfuerzo de corte producido por las olas del lago supera el esfuerzo de corte crítico en tan solo un 1% del total de los vientos simulados (Figura 7e). La resuspensión de sedimentos simulada con el modelo modificado de STWAVE ocurrió con mayor frecuencia en direcciones de vientos que van entre los 42° y 116°, con velocidades desde los 5,5 a los 10,3 m/s. El mayor de los vientos del registro (denotado por una línea segmentada color negro, Figura 7a) no aporta en este caso a la resuspensión de partículas, ya que no se encuentra en el rango de direcciones que permite el mayor desarrollo de altura de olas en la dirección de la localidad de Llanquihue. El promedio de altura de ola en la costa de esta localidad es muy bajo en comparación a los otros dos poblados analizados, con un promedio de altura de ola de 0,05 m (Figura 7c) y periodos promedio de 0,8 s (Figura 7d). Este poblado costero se encuentra en el suroeste del lago y por lo tanto tan solo el 5,7% de las direcciones de viento analizadas en este estudio se encuentran en el rango de direcciones que puede generar mayores alturas de ola.

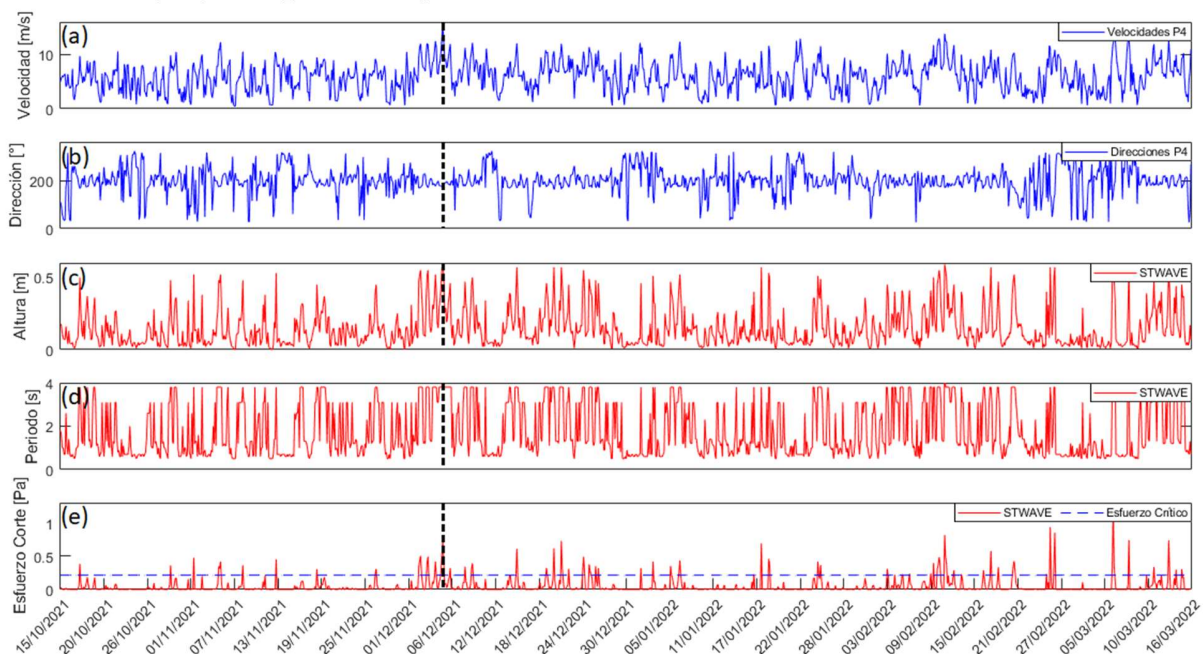


Figura 5. Localidad de Puerto Octay. (a) Velocidades de vientos registradas en la Boya P4. (b) Direcciones de vientos registradas en la Boya P4. (c) Alturas de olas simuladas con STWAVE. (d) Periodos de olas simulados con STWAVE. (e) Esfuerzos de corte; línea roja simulación con STWAVE; línea azul segmentada esfuerzo de corte crítico (0,214 Pa). La línea vertical segmentada color negro muestra la velocidad más alta del registro (15,3 m/s).

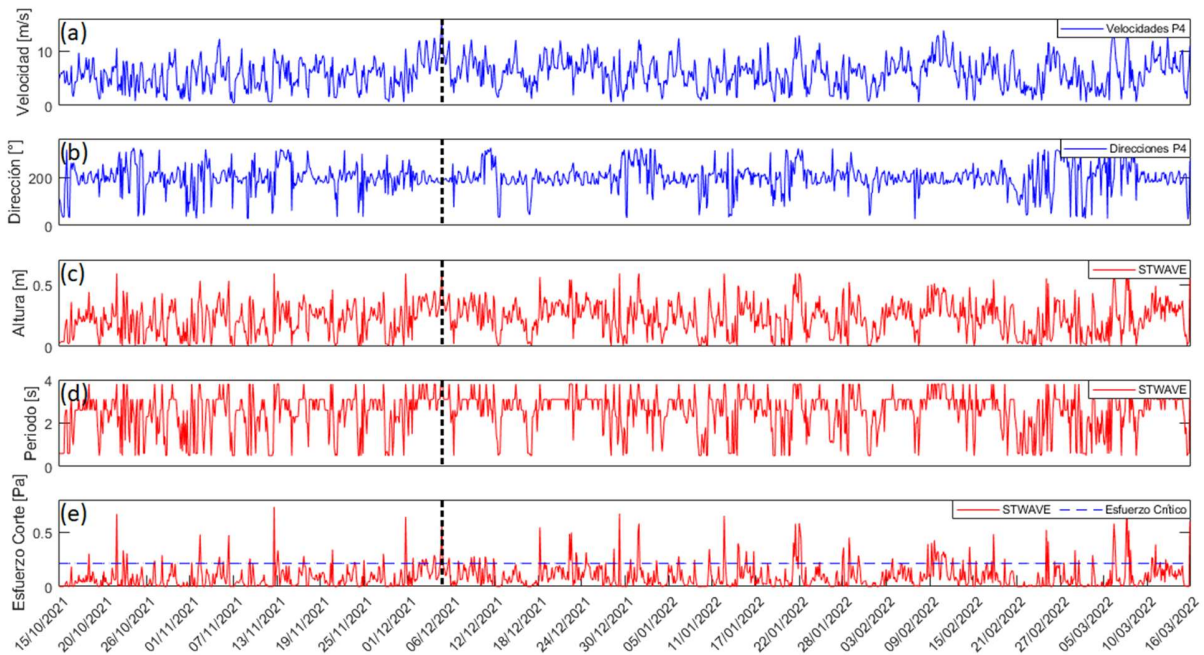


Figura 6. Localidad de Las Cascadas. (a) Velocidades de vientos registradas en la Boya P4. (b) Direcciones de vientos registradas en la Boya P4. (c) Alturas de olas simuladas con STWAVE. (d) Periodos de olas simulados con STWAVE. (e) Esfuerzos de corte; línea roja simulación con STWAVE; línea azul segmentada esfuerzo de corte crítico (0,214 Pa). La línea vertical segmentada color negro muestra la velocidad más alta del registro (15,3 m/s) acompañada de su dirección, altura, periodo y esfuerzo de corte. Celda 659 X, 544 Y.

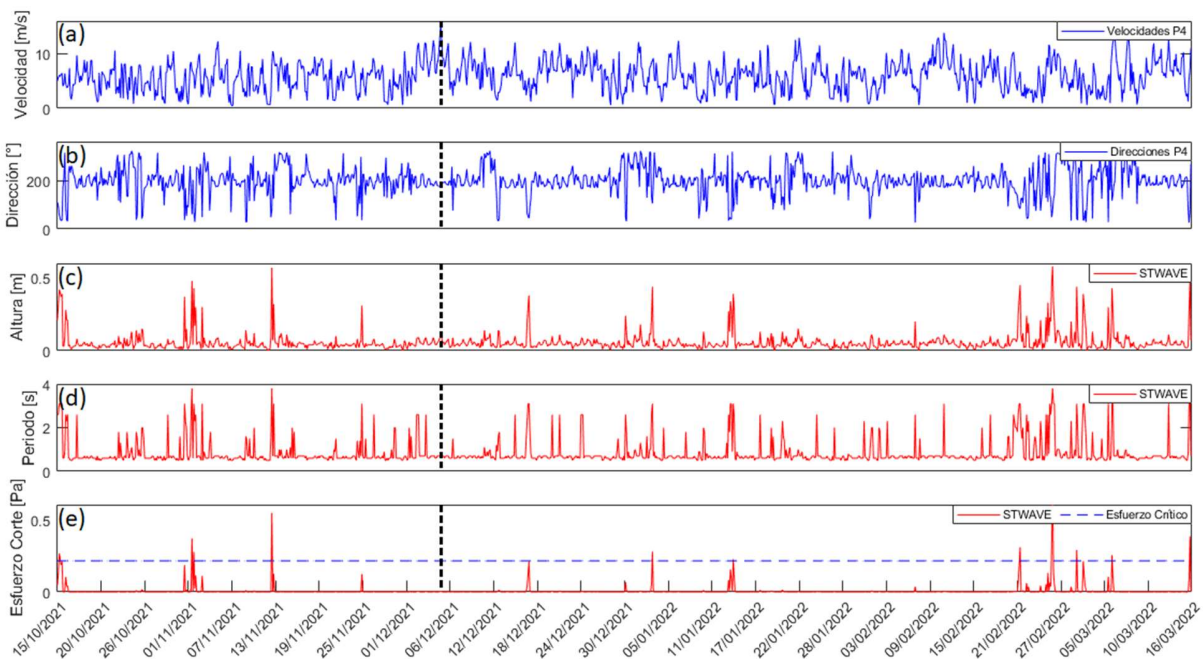


Figura 7. Localidad de Llanquihue. (a) Velocidades de vientos registradas en la Boya P4. (b) Direcciones de vientos registradas en de la Boya P4. (c) Alturas de olas simuladas con STWAVE.

(d) Periodos de olas simulados con STWAVE. (e) Esfuerzos de corte; línea roja simulación con STWAVE; línea azul segmentada esfuerzo de corte crítico (0,214 Pa). La línea vertical segmentada color negro muestra la velocidad más alta del registro (15,3 m/s) acompañada de su dirección, altura, periodo y esfuerzo de corte.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo corresponde a un estudio numérico para cuantificar la resuspensión de partículas en puntos de interés del lago Llanquihue, basado en observaciones de campo, alturas y periodos de olas, cálculos del esfuerzo de corte crítico y simulaciones numéricas realizadas con el software STWAVE. Se utilizaron como variables de entrada la batimetría del lago y series de tiempo de magnitudes de velocidades y direcciones de vientos obtenidas de una estación meteorológica de la DMC ubicada en tierra y de una estación meteorológica denominada Boya P4 ubicada en el interior del lago Llanquihue. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

1. En Puerto Octay, el rango de las magnitudes de velocidades de viento necesarias para producir resuspensión de partículas se encuentra entre 7,3 y 15,3 m/s con un promedio de 10,7 m/s. Este amplio rango de valores se debe justamente a la influencia de la dirección del viento. En el sector de Las Cascadas, por su parte, las velocidades de viento que se requieren para resuspender partículas fluctúan entre los 7,1 y los 15,3 m/s con un promedio de 9,6 m/s. En Llanquihue, finalmente, el rango de velocidades de viento asociadas con resuspensión de partículas, va desde los 5,5 a los 10,3 m/s con un promedio de 7,2 m/s. A pesar de que la resuspensión de partículas se produce en un rango de velocidades de vientos que fluctúan entre los 5,5 m/s y 15,3 m/s (este último, es el mayor registro de velocidad de viento del estudio), solo una pequeña fracción de ellos tiene asociada una dirección de viento que produce resuspensión.

2. La resuspensión de sedimentos está asociada con direcciones de viento que van desde los 42° a los 310°. Ahora bien, del registro de las 1223 direcciones de viento, un 59,3% de los valores corresponde a vientos con direcciones entre Norte y Este (0°- 90°); un 10,5% de los datos va entre Este y Sur (90°-180°); vientos con direcciones entre Sur y Oeste (180°- 270°) corresponden al 5,7% de los registros, mientras que un 24,5% de los registros se mueven en direcciones entre Oeste y Norte (270°- 360°). Por lo tanto, el 83,8% de las direcciones apuntan a la zona norte del lago Llanquihue, donde se encuentran las localidades de Puerto Octay (Figura 4b, punto 1) y Las Cascadas (Figura 4b, punto 2), exponiéndolos a mayores eventos de resuspensión y olas de mayor tamaño por los grandes fetches e intercambios de momentum asociados a estas direcciones.

3. Respecto a las alturas de olas que producen resuspensión de partículas, para Puerto Octay se obtuvieron alturas que van desde los 0,39 a los 0,59 m con un promedio de 0,48 m, mientras que los periodos de olas varían entre 3,1 y 5 s con un promedio de 3,8 s. En el sector de Las Cascadas las alturas significativas de ola fluctúan entre los 0,38 y 0,59 m con un promedio de 0,45 m, mientras sus periodos se encuentran en un rango de 3,1 y 3,8 s con un promedio de 3,7 s. En la localidad de Llanquihue, las alturas significativas de olas varían de 0,39 a 0,58 m con un promedio de 0,46 m, y un periodo de olas que varía entre 3,1 y 3,8 s, con un promedio de 3,3 s. Estos valores son indicativos de que las olas deben tener una altura mínima de 0,38 m con un periodo de al menos 3,1 s para que exista resuspensión.

REFERENCIAS

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., y Winder, M. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54(6 part 2), 2283-2297.
- Belmonte, C. (2018). Análisis del ciclo de vida de un humedal construido para el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas en la zona rural de Jaén, Perú. Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Beyá, J., Gallardo, A., Lucero, F., Catalán, P., y Puelma, A. (2016). Incertidumbre en la estimación de la altura significativa espectral y el período energético en el modelado de propagación de oleaje-caso región de Valparaíso. *Obras y proyectos*, (19), 24-32.
- Borja, C., Camacho, A., y Florín, M. (2011). Lagos y humedales de interior, <http://hdl.handle.net/10578/2487>.
- Boyd, S. C., y Weaver, R. J. (2021). Replacing a third-generation wave model with a fetch based parametric solver in coastal estuaries. *Estuarine, coastal and shelf science*, 251, 107192.
- Buonaiuto, F. S., Slattery, M., y Bokuniewicz, H. J. (2011). Wave modeling of Long Island coastal waters. *Journal of coastal research*, 27(3), 470-477.
- García, A. P., y Lago, B. B. (2021). Estructuras sedimentarias. *Alambique didáctica de las ciencias experimentales*, (106), 18-24.
- Guillén, J., Jiménez, J. A., Palanques, A., Gracia, V., y Sánchez-Arcilla, A. (2000). Resuspensión de sedimento en la plataforma interna del delta. *Geogaceta*, 27.
- Herold, M., J. Metz, y J. S. Romsos (2007). Inferring littoral substrates, fish habitats, and fish dynamics of lake Tahoe using Ikonos data. *Canadian journal of remote sensing*, 33(5), 445-456.
- Hindrawati, A. D. (2015). Procesos de sedimentación y resuspensión en un enclave coralígeno: el caso de la vinyeta. Trabajo final de Master, Universidad Politécnica de Valencia.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in ocean and coastal waters*, Cambridge University Press, Cambridge, U. K.
- Irving, A. D., y Connell, S. D. (2002). Sedimentation and light penetration interact to maintain heterogeneity of subtidal habitats: algal versus invertebrate dominated assemblages. *Marine ecology progress series*, 245, 83-91.
- Ji, Z. G. (2017). *Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley & Sons.
- Li, Y., Tang, C., Wang, J., Acharya, K., Du, W., Gao, X., y Pan, B. (2017). Effect of wave- current interactions on sediment resuspension in large shallow lake Taihu, China. *Environmental science and pollution research*, 24(4), 4029-4039.
- Malcuori, M. A. (2011). Cianotoxinas y cianobacterias en peces de agua dulce.
- Massey, T. C., Anderson, M. E., Smith, J. M., Gomez, J. M., y Jones, R. (2011). *Stwave: steady-state spectral wave model user's manual for Stwave, version 6.0*.
- Ongley, E. D. (1997). Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. (estudio FAO riego y drenaje-55). GEMS/water collaborating center Canada center for Inland Waters, 21-37.
- Ortiz, Á. M. (2020). Análisis temporal del nivel del agua de los lagos: Todos los Santos, Llanquihue y Ranco, basado en datos satelitales.
- Parker, G. (2004). 1D sediment transport morphodynamics with applications to rivers and turbidity currents. E-book available at Gary Parker's Morphodynamics Web Page, last update April, 13, 2006.
- Parker, G., Toro-Escobar, C. M., Ramey, M., & Beck, S. (2003). Effect of floodwater extraction on mountain stream morphology. *Journal of hydraulic engineering*, 129(11), 885-895.
- Raudkivi, A. J. (1998). *Loose boundary hydraulics*, 3rd ed., Pergamon press, Oxford, U. K.
- Reardon, K. E., Bombardelli, F. A., Moreno-Casas, P. A., Rueda, F. J., y Schladow, S. G. (2014). Wind-driven nearshore sediment resuspension in a deep lake during winter. *Water resources research*, 50(11), 8826-8844.

Reardon, K. E., Moreno-Casas, P. A., Bombardelli, F. A., y Schladow, S. G. (2016). Seasonal nearshore sediment resuspension and water clarity at lake Tahoe. *Lake and reservoir management*, 32(2), 132-145.

Roberts, D. C. (2019). Physical processes in the littoral zone of a large lake and the implications for water quality (Doctoral dissertation, University of California, Davis).

Salas, H., y Martino, P. (2001). Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales (No. Ops/Cepis/Pub/01). OPS.

Shields, I. A. (1936). Anwendung der ahnlichkeitmechanik und der turbulenzforschung auf die gescheibebewegung, Mitt. Preuss ver.-anst., 26, Berlin, Germany.

Smith, J. M. (2007). Full-plane Stwave with bottom friction: II model overview. Engineer research and development center Vicksburg Ms costal and hydraulics lab.

Smith, J. M., y A. Zundel. (2006). Stwave-FP in SMS: graphical interface, in coastal and hydraulics engineering technical note CHETN I-69, U.S. Army eng. res. and dev. cent., Vicksburg, miss.