

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**INFLUENCIA DE LA APERTURA MECANIZADA DE LA DESEMBOCADURA
SOBRE PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE MAREA EN UN RÍO**

Camila Bastías¹
Maricarmen Guerra^{1,2}
Raúl Flores³
Rodrigo Cienfuegos⁴

RESUMEN

En costas micromareales dominadas por el oleaje, es común encontrar estuarios cuyas bocas se cierran periódicamente durante periodos de bajo caudal fluvial, debido a que el flujo de agua no es suficiente para contrarrestar la acumulación de sedimentos transportados por las olas. Estos sistemas, conocidos como estuarios intermitentemente abiertos y cerrados (IOCE, por sus siglas en inglés), presentan una dinámica natural de apertura y cierre que regula su conexión con el mar. Sin embargo, en el actual contexto de cambio climático y aumento de escenarios de sequía, se ha observado una prolongación de los periodos de cierre, e incluso situaciones en las que, tras el aumento posterior del caudal, el estuario no logra reabrirse de forma natural. Esta desconexión prolongada genera desequilibrios ecológicos significativos, como el estancamiento del agua, eventos de hipoxia, además de un mayor riesgo de inundación ante crecidas.

En este contexto, el objetivo de este estudio es analizar el comportamiento hidrodinámico asociado a la apertura mecanizada de estuarios IOCE, con el fin de evaluar su efectividad como medida de gestión frente a escenarios de cierre prolongado. El caso de estudio corresponde al estuario de la Laguna Cahuil, ubicado en la Región de O'Higgins, Chile. Para ello, se utiliza el software de modelación numérica IBER, previamente calibrado con mediciones de terreno, con el cual se simulan distintas configuraciones geométricas en la boca del estuario, bajo escenarios de crecida y caudal constante. El propósito es identificar los factores que favorecen una apertura eficiente desde el punto de vista hidrodinámico.

Los resultados muestran que la geometría de la boca del estuario influye directamente en la elevación del nivel del agua y en las corrientes dentro del sistema estuarino. Por lo tanto, tanto la forma como la ubicación de la apertura son variables críticas a considerar al momento de reconectar artificialmente el estuario con el mar. Estos hallazgos permiten avanzar hacia la elaboración de protocolos que orienten una gestión costera más eficaz y sustentable frente a este tipo de eventos.

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, cabastias2018@udec.cl

² Centro de Investigación Oceanográfica COPAS COASTAL, Universidad de Concepción

³ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

⁴ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

1. INTRODUCCIÓN

Un estuario es un sistema fluvio-marino influenciado por mareas y oleaje, caracterizado por la mezcla dinámica de aguas dulces y saladas. La interacción entre estos cuerpos de agua determina las corrientes y el nivel del agua dentro del estuario, siendo los principales forzantes la marea, el oleaje y el caudal fluvial. Este estudio se centra en los efectos de la marea y el caudal. La marea ha sido ampliamente investigada por la complejidad que implica su propagación en estuarios, ya que la onda mareal sufre efectos como retraso de fase, deformación, y amplificación o atenuación (Sandbach et al., 2018; Guo et al., 2014; Dalrymple & Choi, 2007).

En cuanto al caudal, muchos estuarios de bajo afluente se encuentran en regiones montañosas y con clima mediterráneo, como el centro-sur de Chile (Largier, 2023). Estos sistemas suelen presentar una alta dinámica morfológica, con acumulación estacional de sedimentos en la desembocadura, formando una barra que puede cerrar completamente el estuario. Esta barra tiende a abrirse o cerrarse de forma intermitente según la estación del año, dando origen a los llamados IOCE (Intermittently Open/Closed Estuaries) (McSweeney et al., 2017).

El cierre de la barra provoca la desconexión del estuario con el océano, lo que genera estancamiento, aumento del tiempo de residencia del agua y riesgo de hipoxia (Levin et al., 2022). También puede elevar el nivel del agua, incrementando el riesgo de inundación en zonas aledañas. Frente a estas condiciones, la apertura mecanizada de la barra — mediante retroexcavadoras u otros equipos— se ha vuelto una práctica común en países como Australia, Estados Unidos, Brasil y Sudáfrica (McSweeney et al., 2023). Sin embargo, en Chile no existe un protocolo estandarizado para su aplicación, a pesar de que se han identificado al menos 49 humedales costeros con barra cerrada (López et al., 2023).

En este contexto, el presente estudio busca evaluar el comportamiento hidrodinámico de la apertura mecanizada bajo diferentes condiciones de marea y caudal, con el objetivo de identificar configuraciones eficientes que favorezcan la circulación estuarina. El caso de estudio es la Laguna Cáhuil, un IOCE ubicado en la comuna de Pichilemu, en el poblado de Cáhuil, correspondiente a la desembocadura del estero Nilahue. En este estuario, el cierre total de la barra se ha registrado de forma recurrente, siendo necesaria su apertura artificial para mitigar riesgos de inundación y permitir la entrada de agua salada, especialmente importante por la presencia de salinas artesanales aguas arriba, de relevancia cultural, histórica y turística.

Así, mediante modelación hidrodinámica en el software IBER, se analizan distintos escenarios de apertura para aportar al diseño de estrategias de gestión que garanticen un manejo sostenible y eficiente de estos ecosistemas costeros.

2. METODOLOGÍA

2.1 SITIO DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al estuario Laguna de Cáhuil, ubicado en la desembocadura del estero Nilahue en el poblado de Cáhuil, comuna de Pichilemu, Sexta Región del Libertador Bernardo O'higgins. La Laguna Cáhuil tiene una extensión de 108 hectáreas y pertenece a la cuenca del estero Nilahue que consta de un área de 1455 hectáreas.

2.2 MODELO NUMÉRICO

Se utiliza para las simulaciones el software de modelación hidrodinámica IBER en su versión 3.3.1. Se trata de un software libre desarrollado por la colaboración del Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (GEAMA, Universidade Coruña) y el instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya) (Bladé et al., 2014).

El software permite realizar modelaciones bidimensionales con aplicación a la hidráulica y morfología fluvial, y es ampliamente utilizado para simular flujos en ríos y definición de zonas inundables, entre otros. Los usos de esta herramienta se pueden encontrar en más detalle en el Manual de Aplicaciones del Software IBER (Cea et al., 2019).

Para efectos de este trabajo se utiliza el módulo de hidrodinámica que resuelve a partir de las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones considerando mareas y caudal como condiciones de borde, cambios batimétricos y fricción de fondo. No se considera viento, oleaje ni cambios de densidad por salinidad. El modelo resuelve las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) \quad (2.3)$$

Donde h es la elevación del agua, q_x es el caudal específico en eje x, análogamente q_y lo es en y, para obtener estos caudales se utilizan velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de gravedad, ρ es la densidad del agua, z_b la cota de fondo, τ_b es la fricción de fondo y v_t es la viscosidad turbulenta (Castellet et al., 2014).

2.3 DATOS Y LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

El dominio del modelo abarca 7 km hacia aguas arriba desde la desembocadura, incluyendo la zona de Salinas de Barranca ubicada a 4 km dentro del dominio. La malla no estructurada se compone de 89.596 nodos, con una discretización de 15 m en las zonas inundables, 12 m en el cauce principal y finalmente 5 m en la zona de la playa y desembocadura. Los datos topográficos fueron obtenidos desde un modelo de elevación digital (DEM) de 12 metros de resolución mientras que, para los datos de batimetría, se utilizaron datos del proyecto FONDEF SIMONA Costa, que incluyen tres levantamientos de la desembocadura y el estuario (marzo y agosto de 2023, y abril de 2024), estos datos batimétricos son complementados con la batimetría de la zona de Salinas de Barrancas de un estudio hecho en el marco de un estudio de inundabilidad hecho previamente por la consultora Con Potencial. Además, el modelo incorporó datos de uso de suelo del Catastro de Vegetación (CONAF, 2020) los cuales determinaron los coeficientes de Manning para cada tipo de suelo en el área de estudio.

Para estimar el caudal utilizado como condición de borde, se utilizaron los datos de la única estación fluviométrica de la Dirección General de Aguas (DGA) disponible en la cuenca del estero Nilahue: "Nilahue en Santa Teresa". Esta estación registra caudales desde 1985 hasta 2019. El análisis armónico de la marea se realizó con datos del mareógrafo del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) ubicado en Boyeruca ($34^{\circ}68'73.05''$ S; $72^{\circ}05'78.6''$ O), que registra variaciones del nivel del mar desde el 1 de noviembre de 2021 hasta la fecha.

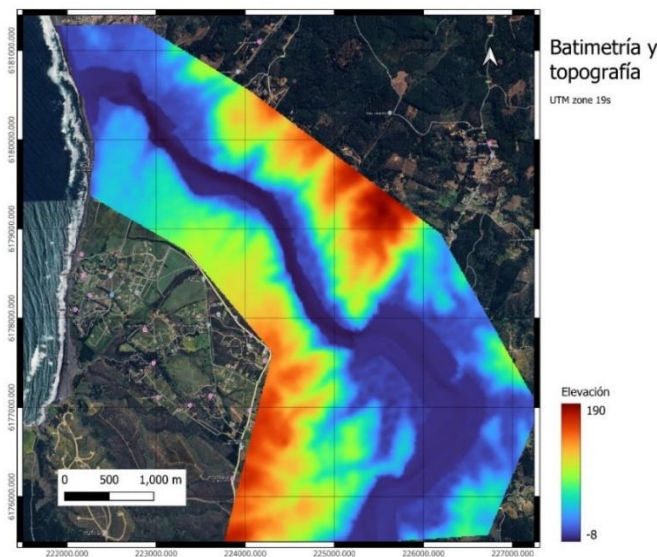


Figura 2.3-1. Unión topobatimetría de la zona de estudio.

2.4 VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo se utilizan las mediciones de presión recolectadas por dos sensores de presión y velocidad (Acoustic Doppler Velocimeters) durante una campaña en terreno llevada a cabo en agosto del 2023 en la desembocadura del estero Nilahue. Los sensores se ubicaron en los puntos de coordenadas indicadas en Tabla 2. El ADV 1 se ubicó a 1.284 metros profundidad, mientras que el ADV 2 se ubicó a 4.082 metros de profundidad. Los sensores recolectaron mediciones de presión cada 1 segundo durante 3 días entre 01/08/2023 a las 8:00 am hasta el 3/08/2023 a las 10:15 am de agosto de 2023.

2.5 ESCENARIOS DE APERTURAS ARTIFICIALES

Para estudiar la hidrodinámica dentro del estuario se corrieron simulaciones numéricas considerando un caudal de crecida con 2 años de periodo de retorno y un caudal promedio anual. Para representar el efecto de la marea, se aplicó una marea sintética obtenida mediante análisis armónico, lo que permitió incorporar la influencia de oscilaciones periódicas propias del sistema estuarino, esta marea sintética corresponde a rangos de sicigia.

Se definieron aperturas con distintas ubicaciones para analizar el efecto de estas dentro de la hidrodinámica estuarina. Dado que la geometría de la apertura original es de en promedio 40 metros de ancho y 0.5 metros de profundidad, se utilizaron estas dimensiones para las aperturas sintéticas. Los largos de estas aperturas se encuentran definidos por el largo de la zona de playa, además es la forma de la playa en el DEM lo que dictamina el ángulo de cada apertura, simulando el uso de retroexcavador para ambos casos.

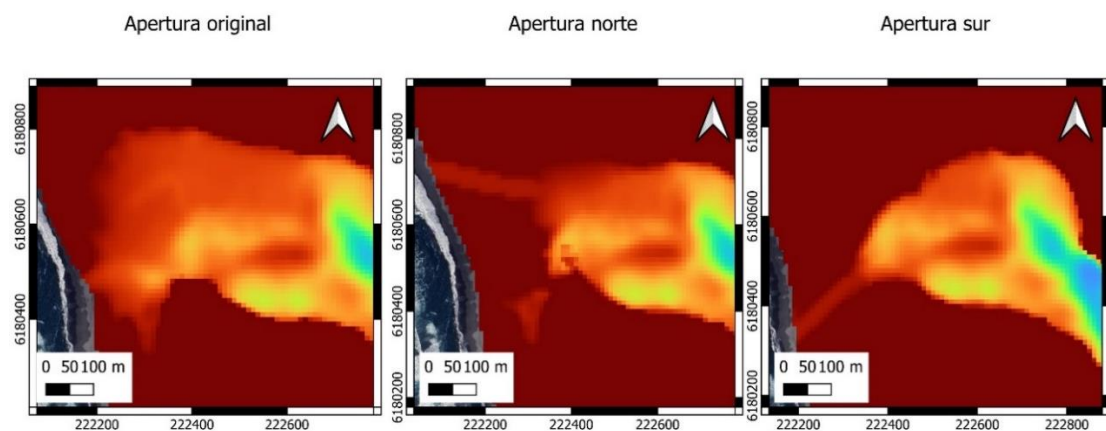


Figura 2.5-1. Escenarios de apertura, original comparada con 2 sintéticas.

3. RESULTADOS

3.1 VALIDACIÓN

La simulación con mejores estadísticos se logró utilizando la batimetría obtenida en la campaña de terreno de marzo de 2023. Cabe destacar que los cambios en los coeficientes de Manning fueron despreciables en cuanto a los resultados, ya que el modelo demostró una mayor sensibilidad a las variaciones en la batimetría. Además, durante el proceso el modelo mostró requerir mayor tiempo de calentamiento para llegar a un estado estacionario y mostrar deformaciones de onda similares a la de los datos. Luego de fijar referencias de marea a la batimetría y agregar el tiempo de calentamiento que permita la estabilización del modelo se obtuvieron los siguientes resultados.

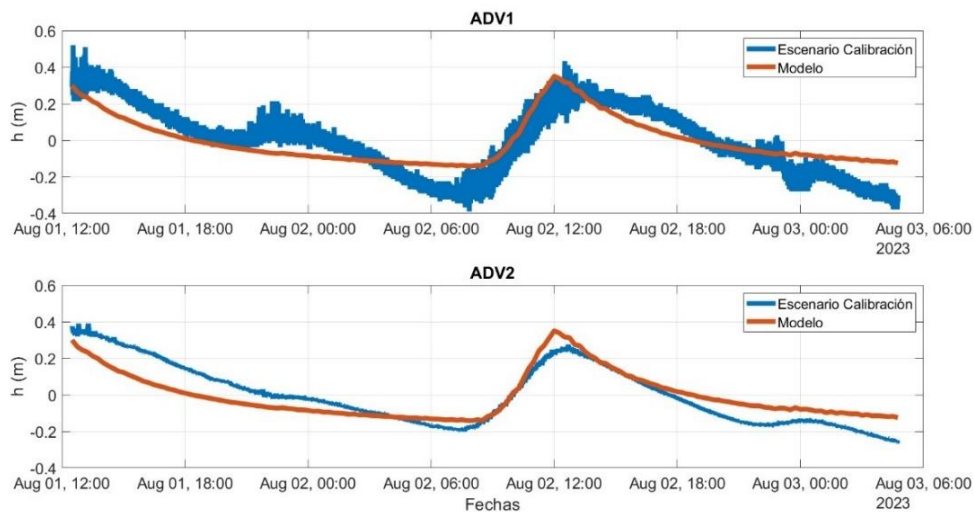


Figura 3.1-1. Comparación escenario de calibración para ambos ADV y los resultados del modelo en esos puntos.

Se puede observar en la Figura 3.1-1 que el modelo reproduce adecuadamente la tendencia del ciclo mareal. Sin embargo, se observa una subestimación sistemática de los valores simulados respecto a los observados, especialmente en los máximos y mínimos. Esta diferencia es más marcada en la estación ADV1 debido a que la medición presenta mayor ruido debido a la medición de oleaje entrante en el estuario. Se identifica además que el modelo puede reproducir satisfactoriamente la pleamar más alta, pero no reproduce la pleamar baja pues esta no alcanza a propagarse dentro del estuario en el modelo.

Tabla 3.1-1. Estadísticos obtenidos en el proceso de Calibración

Escenario	ECM	NSE
-----------	-----	-----

ADV 1	0.083	0.79
ADV 2	0.074	0.78

3.2 SIMULACIONES

Se extrajeron las series de tiempo del nivel del agua y velocidad longitudinal en 3 puntos para analizar la influencia de la apertura en la hidrodinámica. Los puntos 1 y 2 corresponden a la entrada y salida de cada apertura, mientras que el punto 3 corresponde al comienzo de la zona de Salinas de Barrancas.

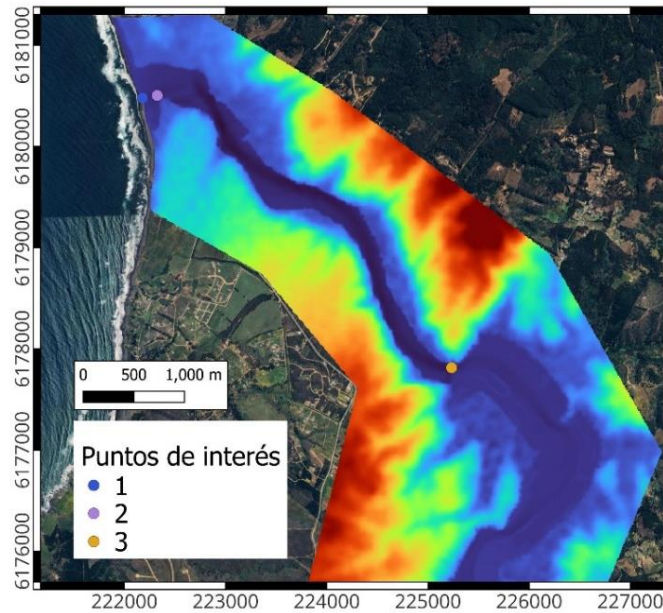


Figura 3.2-1. Puntos de interés para extraer series de tiempo.

Las series de tiempo del nivel de elevación del agua para el escenario de crecida con un caudal correspondiente a un periodo de retorno de 2 años se presentan en las Figuras 3.2-2, 3.2-3 y 3.2-4. En el Punto 1 se observa una marcada influencia de la onda de marea, incluso durante el evento de crecida. En el Punto 2, ubicado en la entrada de la zona de la laguna, predomina la influencia del flujo fluvial. En tanto, el Punto 3, el más alejado de la costa, también se ve dominado por el aporte fluvial, presentando las mayores cotas de elevación producto de este mismo factor.

Durante el peak del evento de crecida, la apertura original presenta los niveles de agua más altos en los Puntos 1 y 2, con diferencias aproximadas de 10 cm respecto a la apertura Sur y hasta 20 cm respecto a la apertura Norte. Esta última alcanza los niveles más bajos de elevación, lo que sugiere que es la opción más eficaz para controlar eventos de crecida entre los tres escenarios analizados. Además, tras el evento, tanto la apertura Sur como la Norte muestran una mayor reducción del nivel del agua, indicando una descarga más eficiente del volumen almacenado en el estuario.

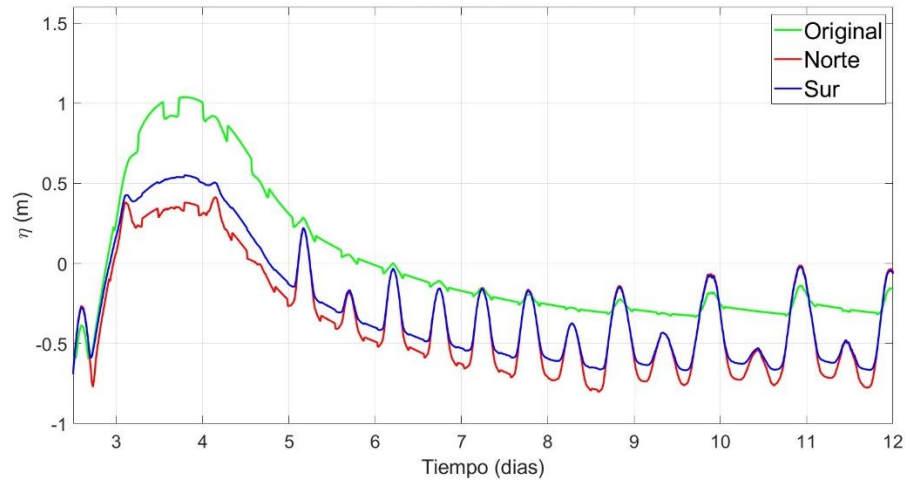


Figura 3.2-2. Comparación elevación nivel del agua escenario de crecida, Punto 1.

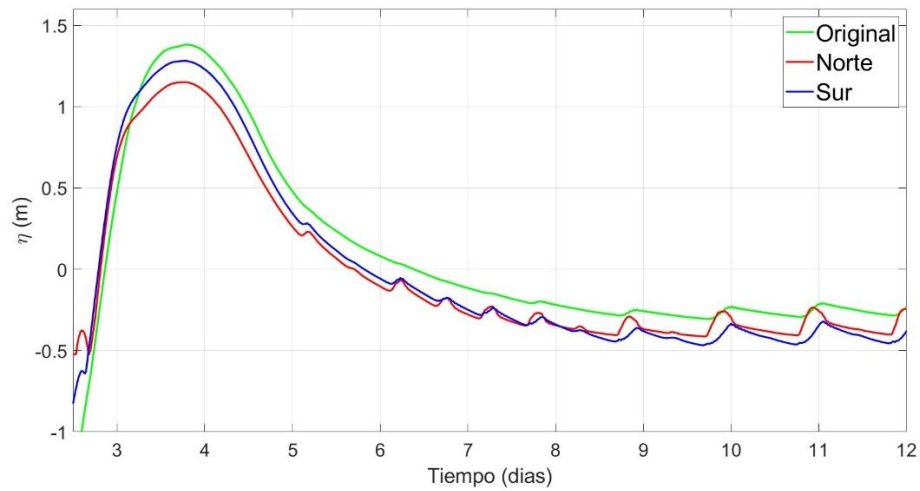


Figura 3.2-3. Comparación elevación nivel del agua escenario de crecida, Punto 2.

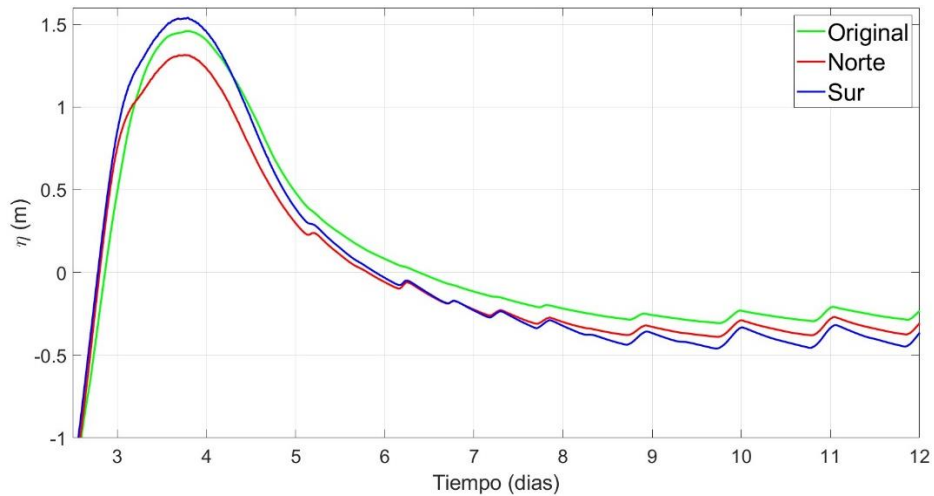


Figura 3.2-4. Comparación elevación nivel del agua escenario de crecida, Punto 3.

Las series de tiempo de las velocidades longitudinales de flujo para el escenario de crecida con un caudal correspondiente a un periodo de retorno de 2 años se presentan

en las Figuras 3.2-5, 3.2-6 y 3.2-7. Cabe señalar que las velocidades se consideran positivas para el flujo llenante y negativas para el flujo vaciante. Al igual que en el caso de la elevación del nivel del agua, se observa una clara influencia de la onda de marea en el Punto 1, mientras que en los Puntos 2 y 3 predomina la influencia del flujo fluvial.

En el Punto 1, las velocidades siguen el comportamiento de la onda de marea, y el escenario con apertura original presenta velocidades de mayor magnitud en comparación con los otros dos escenarios. En el Punto 2, sin embargo, las velocidades más altas corresponden al escenario de apertura por el norte. Aunque ninguno de los tres escenarios logra recuperar completamente las velocidades previas al evento de crecida dentro del tiempo de simulación, la apertura norte es la que más se aproxima a esa condición.

En el Punto 3, las velocidades son considerablemente bajas, aunque se observa que el primer escenario en registrar flujo llenante es el de apertura por el norte. Cabe destacar que la dirección del flujo es relevante para el transporte advectivo de sal, ya que influye directamente en la llegada de salinidad al sector de las Salinas de Barrancas.

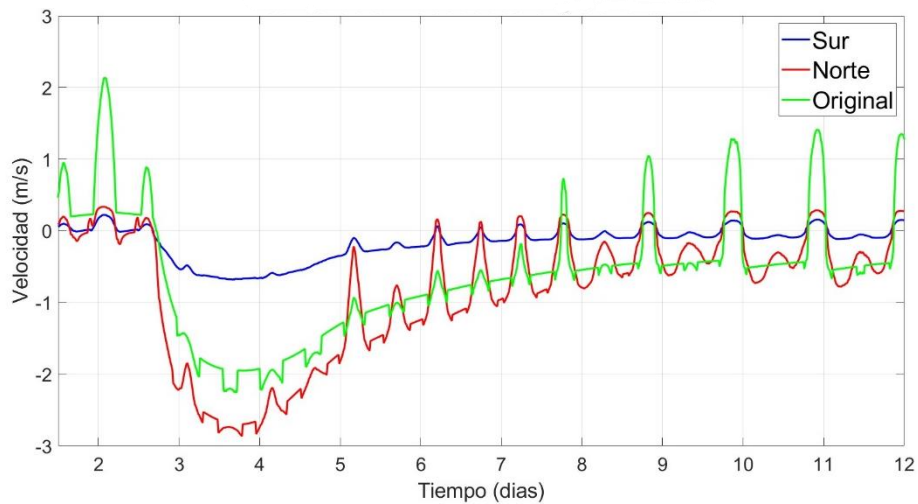


Figura 3.2-5. Comparación velocidades longitudinales escenario de crecida, Punto 1.

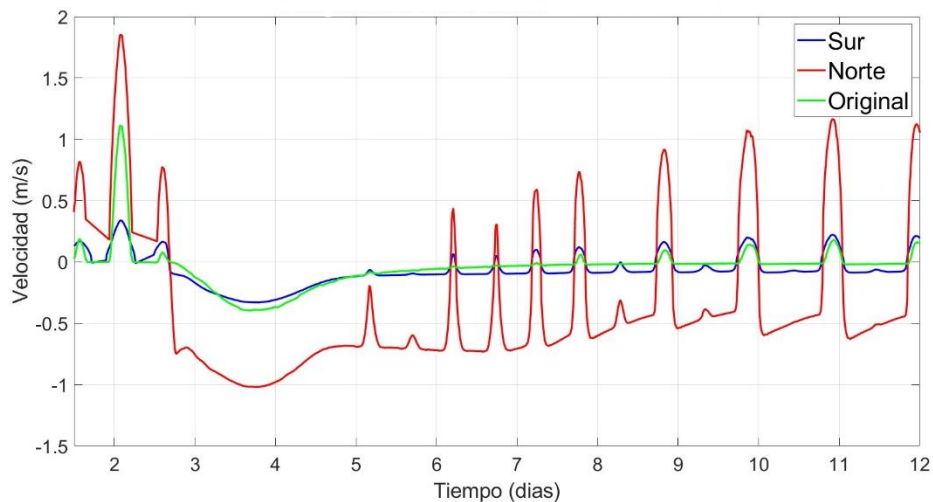


Figura 3.2-6. Comparación velocidades longitudinales escenario de crecida, Punto 2.

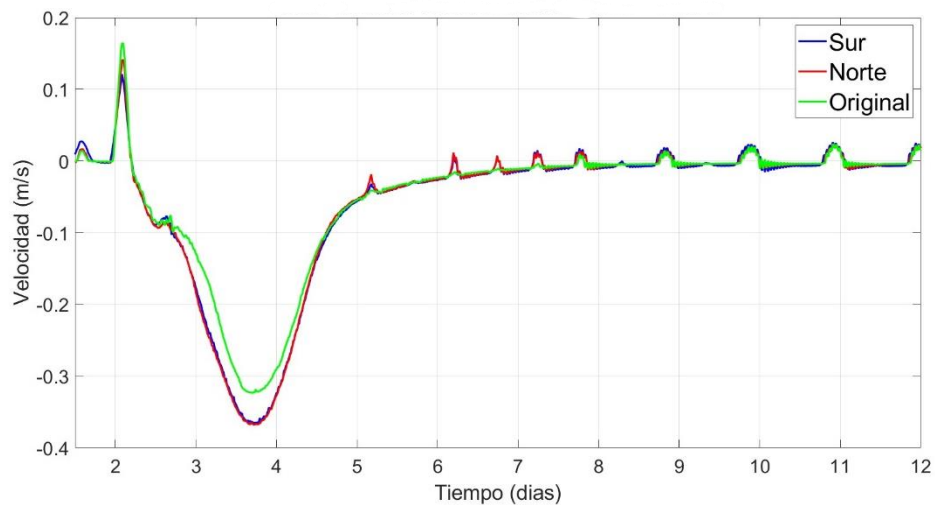


Figura 3.2-7 Comparación velocidades longitudinales escenario de crecida, Punto 3.

4. CONCLUSIONES

En el trabajo se ha implementado un modelo hidráulico bidimensional para el Estuario Laguna Cáhuil con el objetivo de evaluar la influencia de escenarios de apertura de la desembocadura sobre la propagación de la onda de marea. Para esto se hicieron simulaciones combinando distintos escenarios con distintas aperturas, con el fin de contrastar el comportamiento hidrodinámico dentro del estuario.

El modelo fue validado satisfactoriamente obteniendo buenos resultados en cuanto a la correlación y errores obtenidos en comparación a datos medidos en dos puntos de medición dentro del estuario. Sin embargo, el proceso de calibración podría mostrar mejores resultados si se trabajara con una batimetría tomada junto con mediciones de nivel y velocidad, teniendo en cuenta la sensibilidad del modelo con respecto a la batimetría, que para la zona de estudio es extremadamente variable. Se debe tener en cuenta que obtener una batimetría exacta es casi imposible ya que la desembocadura puede llegar a presentar variaciones de escala de tiempo horaria, la variabilidad en el lecho responde directamente con los aumentos de caudal que durante crecidas y por la dinámica que se produce cada periodo mareal.

Los resultados indican que la apertura de la barra influye en la hidrodinámica de la laguna. La entrada y propagación de la onda de marea, estudiada en términos de variación del nivel de agua y velocidades longitudinales en dos puntos de la zona de estudio, se ve modificada en los distintos escenarios. De los resultados se desprende que la ubicación por el norte es la más eficiente al momento de descargar el agua de la laguna hacia al mar durante crecidas y es que aquella que permite mejor propagación de la onda de marea hacia aguas arriba.

Como trabajo futuro se propone simular nuevos escenarios con cambios no solo de ubicación sino también de geometría, es decir, de profundidad y ancho de apertura; para estudiar más a fondo la influencia de la forma de la apertura en cuanto a la hidrodinámica

estuarina. Además, se propone utilizar hidrogramas con caudal de mayor periodo de retorno para evaluar las zonas de inundación. Finalmente se propone realizar simulaciones incluyendo la salinidad del agua de mar, para así evaluar la llegada de agua salada hasta las Salinas de Cahuil frente a distintos escenarios de apertura.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del presente trabajo a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID a través del proyecto FONDECYT 11220663. También se agradece el apoyo y la información proporcionada por el proyecto FONDEF ID22I10087 y el proyecto FONDECYT 1231494. Además de agradecer a CIGIDEN.

REFERENCIAS

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

Castellet, E. B. I., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional De Metodos Numericos Para Calculo Y Diseno En Ingenieria*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

Cea, L., Castellet, E. B. I., Sanz-Ramos, M., Bermúdez, M., & Alonso, Á. M. (2019). Iber Applications Basic Guide. Two-dimensional modelling of free surface shallow water flows. En *Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións eBooks*. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497176>

CONAF (2020) Catastro Vegetacional (<https://sit.conaf.cl/>)

Dalrymple, R. W., & Choi, K. (2007). Morphologic and facies trends through the fluvial-marine transition in tide-dominated depositional systems: A schematic framework for environmental and sequence-stratigraphic interpretation. *Earth-science Reviews*, 81(3-4), 135-174.

Guo, L., Van Der Wegen, M., Roelvink, J. A., & He, Q. (2014). The role of river flow and tidal asymmetry on 1-D estuarine morphodynamics. *Journal Of Geophysical Research. Earth Surface*, 119(11), 2315-2334.

Largier, J. L. (2023). Recognizing Low-Inflow Estuaries as a Common Estuary Paradigm. *Estuaries And Coasts*, 46(8), 1949-1970.

Levin, L. A., Mendoza, G. F., Neira, C., Giddings, S. N., & Crooks, J. A. (2022). Consequences of Mouth Closure and Hypoxia-Induced State Changes in Low-Inflow

Estuaries: Benthic Community and Trait-Based Response. *Estuaries And Coasts*, 46(8), 2128-2147. <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01132-3>

López, M. C. (2023). *Riesgo de humedales costeros frente al cambio climático*. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/05/3_Antecedentes-previos_1.pdf

McSweeney, S., Kennedy, D., & Rutherford, I. (2017). A geomorphic classification of intermittently open/closed estuaries (IOCE) derived from estuaries in Victoria, Australia. *Progress In Physical Geography*, 41(4), 421-449.

McSweeney, S. L., & Stout, J. C. (2023). Hydraulic gradient and wave height control the success of estuary artificial entrance openings. *Journal Of Hydrology*, 619, 128902.

Sandbach, S., Nicholas, A., Ashworth, P., Best, J., Keevil, C., Parsons, Prokocki, E., & Simpson, C. (2018). Hydrodynamic modelling of tidal-fluvial flows in a large river estuary. *Estuarine, Coastal And Shelf Science*, 212, 176-188.