

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

INFLUENCIA DE LA GEOMORFOLOGÍA DE LA DESEMBOCADURA EN LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA DE MAREA: EL CASO DEL ESTERO NILAHUE EN LAGUNA CÁHUIL

ERNESTO BERTELSEN D.^{1,2}
RODRIGO CIENFUEGOS C.^{1,2,5}
PATRICIO A. CATALÁN^{3,2}
MARICARMEN GUERRA P.^{4,2}
RAÚL FLORES A.^{3,2}
FELIPE LUCERO⁵

RESUMEN

En el presente estudio se investiga la propagación de la onda de marea y la variabilidad espaciotemporal en la desembocadura del estero Nilahue, conocida como la laguna Cáhuil. Las condiciones climáticas mediterráneas de la zona se reflejan en las variaciones estacionales del caudal del estero, el cual tiene una escorrentía promedio anual de 9,8 m³/s alcanzando valores máximos en los meses invernales entre junio y septiembre y valores prácticamente nulos en meses de verano. En función de los cambios estacionales (invierno-verano) y las forzantes asociadas a la escorrentía fluvial, el viento, las mareas y el oleaje, es que el estuario de Cáhuil se puede clasificar en base al término *Intermittently Open/Closed Estuaries* (IOCE), en los cuales su boca se conecta y desconecta al océano de manera intermitente. A modo de cuantificar y predecir la dinámica estuarina, se implementa un modelo numérico hidrodinámico en tres dimensiones (Delft 3D) realizando simulaciones numéricas para su calibración y validación en base a condiciones observadas en terreno. Los resultados destacan la importancia de la batimetría como un factor esencial para reproducir correctamente la propagación de la onda de marea. Complementando lo anterior, se implementa un método de percepción remota en base a imágenes de video rectificadas de la desembocadura a modo de reconstruir el perfil de la sección transversal real. La incorporación de esta información en el modelo permite mejorar notablemente la representación de la hidrodinámica del estuario, reforzando la importancia que tiene la geomorfología de la desembocadura en la propagación de la onda de marea.

¹ Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

² Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN/ANID/Fondap/15110017)

³ Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

⁴ Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción

⁵ Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC)

1. INTRODUCCIÓN

Los estuarios conectados de manera intermitente al océano se denominan de múltiples maneras en la literatura científica-técnica, siendo uno de los términos más usados el propuesto por McSweeney et al. (2017a) denominado **Intermitently Open/Closed Estuaries (IOCE)**. Los IOCE corresponden a sistemas estuarinos altamente dinámicos que se caracterizan por la presencia de una barra de arena en la desembocadura y conexiones y desconexiones intermitentes con el mar en función de las forzantes fluviales y marinas (McSweeney et al, 2017b). A nivel mundial existen alrededor de 2225 IOCE distribuidos en los seis continentes y estos comprometen entre el 4-5% de los estuarios en las zonas costeras. Se distribuyen globalmente en Australia, África, México, Norteamérica, Sudamérica, y Europa (Khojatesh et al., 2025).

Los IOCE en Chile han sido poco estudiados a pesar de dar origen a ecosistemas de alto valor ambiental, turístico y productivo. La Laguna Cahuil es un ejemplo de lo anterior, ya que su boca se conecta y desconecta al mar en función de los cambios estacionales (invierno-verano) asociados a la escorrentía fluvial, el viento, las mareas y el oleaje. Esta dinámica ofrece condiciones propicias para el cultivo artesanal de la sal, la ostricultura, el turismo, además de una gran diversidad ecosistémica (GEF, 2021). En este trabajo se busca estudiar y caracterizar las dinámicas estuarinas de la Laguna Cahuil que inciden en los procesos de transporte y mezcla de la salinidad cuando el estero está conectado al mar.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El humedal costero de la Laguna Cahuil está ubicado en la cuenca del Estero Nilahue, Región de O'Higgins, comuna de Pichilemu en las coordenadas UTM WGS Huso 19 S 222.740 E; 6.180.634 N (ver Fig. 1). El sector se extiende aproximadamente 8,5 km a lo largo del curso del estero, desde la barrera litoral hacia aguas arriba hasta el sector de las Salinas de Barrancas (Andrade et al., 2005). La profundidad media de la laguna es de 2 m aproximadamente, alcanzando valores mínimos de 30 cm en la desembocadura y máximos aproximados de 5 m. De acuerdo con estudios asociados al proyecto de humedales costeros GEF (2021), Cahuil es un sistema que, dependiendo del régimen hidrológico del estero Nilahue, las características del oleaje y los ciclos de marea, puede alternar entre un estuario con conexión al mar, o una laguna costera que se desconecta del mar debido a la formación de una barra de arena. En este sentido, la laguna Cahuil puede clasificarse y definirse en base a la nomenclatura específica de *Intermitently Open/Closed Estuaries* (IOCE).

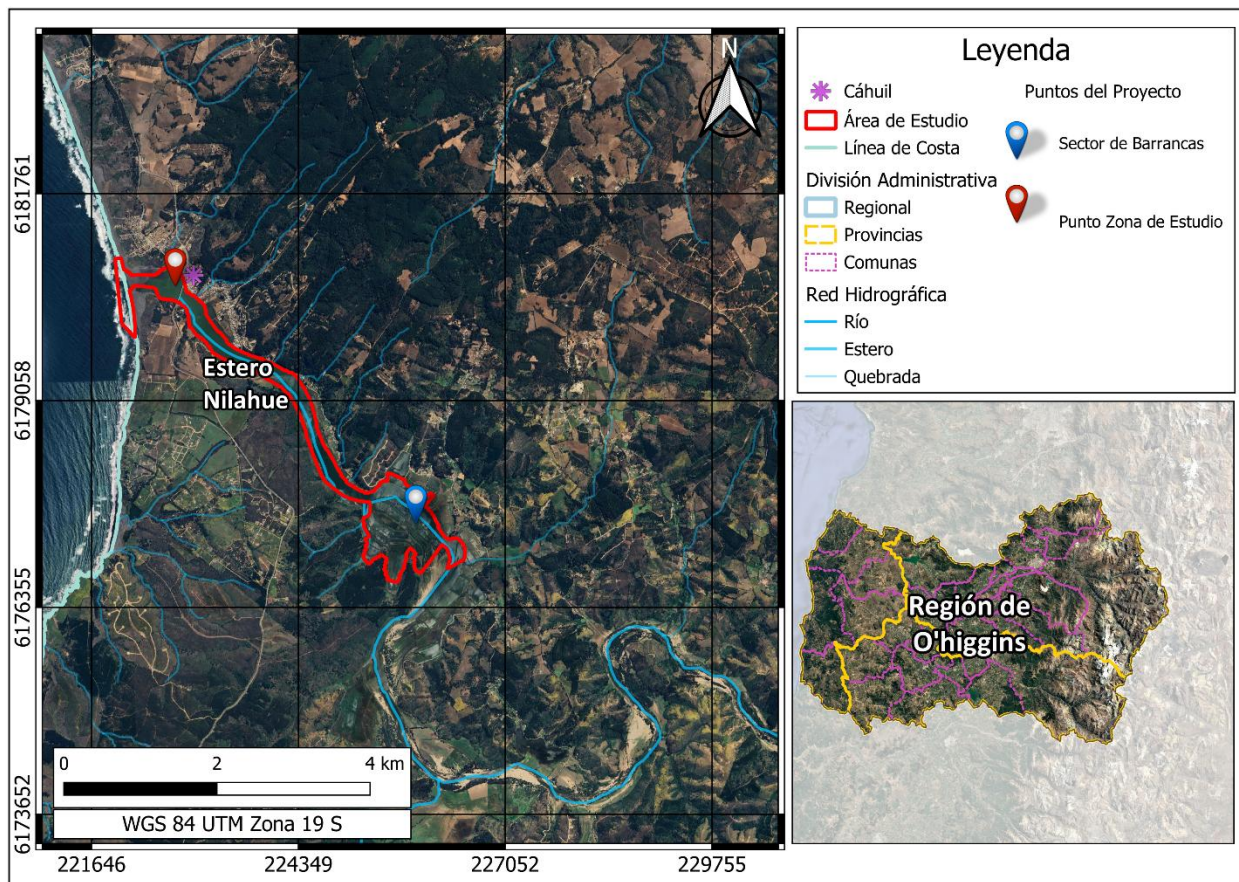


Figura 1: Ubicación general de la zona de estudio.

El área aportante de la zona de estudio es de 1700 km², con una longitud del dren principal de 104,5 km. El aporte fluvial principal al estuario proviene del estero Nilahue con una escorrentía promedio anual de 9,8 m³/s, alcanzando valores máximos entre junio y septiembre y valores prácticamente nulos en verano. Lo anterior ratifica el régimen hidrológico pluvial presente en la cuenca, y el humedal como un estuario estacional fuertemente dependiente del régimen hidrológico del estero (GORE, 2023). Las condiciones climáticas mediterráneas de la zona se reflejan en las variaciones estacionales del caudal del estero Nilahue, el cual es cerrado por una barra arenosa durante los meses de verano debido al transporte sedimentario de la deriva litoral y el viento suroeste predominante en la zona (Andrade et al., 2005). En el periodo invernal las precipitaciones generan pulsos de crecida fluvial aumentando el caudal del estero. Estos caudales de crecida son capaces de inundar las planicies aledañas, aumentar la carga hidráulica de la laguna y encontrar una salida al mar mediante la erosión y reapertura de la barra (GEF, 2021). Durante el tiempo de apertura de la barra y conexión del estuario con el océano ocurre el proceso de intrusión salina el cual se extiende hasta 8,5 km aguas arriba de la desembocadura, comportándose como estratificado y parcialmente mezclado según el ciclo de mareas (Andrade et al., 2005). Por el contrario, durante periodos estivales, la falta de aportes fluviales provoca que el estero se desconecte del océano, dando origen a la laguna.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente estudio se realiza una modelación numérica hidrodinámica utilizando el modelo Delft 3D, el cual permite simular en dos o tres dimensiones el flujo impermanente y fenómenos de transporte en aguas someras (Deltares, 2025). Las forzantes hidrodinámicas principales en el estuario de Cáhuil corresponden al nivel de marea, el oleaje y el caudal fluvial del estero Nilahue.

3.1 Modelo Numérico

El modelo Delft 3D resuelve las ecuaciones de Navier Stokes (RANS) para un fluido incompresible bajo condiciones de aguas someras y una distribución de presión hidrostática en el eje vertical. El sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden en derivadas parciales, en combinación con las respectivas condiciones de borde e iniciales son resueltas en una malla empleando el esquema de diferencias finitas (Deltares, 2025).

En base a las condiciones geográficas y morfológicas de la laguna Cáhuil, se define una malla del tipo σ , correspondiente a una grilla regular, ortogonal y curvilínea en coordenadas cartesianas. La malla numérica tiene mayor refinamiento en la zona fluvial, en particular en la boca del estuario (Fig. 2), con una resolución mínima de 9 m x 9 m y 8 capas en el eje vertical de la modelación.

Los parámetros y variables para sensibilizar y ajustar corresponden a la batimetría de la laguna y la geomorfología de la desembocadura. Se utilizan dos métricas de error y un índice de desempeño a modo de comparar los resultados observados con los simulados. Se considera el error relativo (E_r) y el error cuadrático medio (RMSE) como métricas de error y, por otro lado, se utiliza el índice de Willmott (I) para evaluar el desempeño del modelo. Estas métricas se detallan a continuación.

$$E_r \% = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|S_i - O_i|}{S_i} * 100 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |O_i - S_i|^2}{N}} \quad (2)$$

$$I = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (|S_i - O_i|)^2}{\sum_{i=1}^N (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

Donde O_i representa la variable observada en terreno, mientras que S_i la variable modelada. Además, el término \bar{O} representa el valor promedio observado. Por otra parte, el índice de Willmott I (correspondiente al índice de desempeño) varía entre 0 y 1, indicando una total discrepancia o un acuerdo perfecto entre los valores simulados y observados, respectivamente. Se considera que el ajuste del modelo es bueno para valores del índice I superiores a 0,5 mientras que el ajuste es excelente si $I > 0,65$ (Allen et al., 2007).

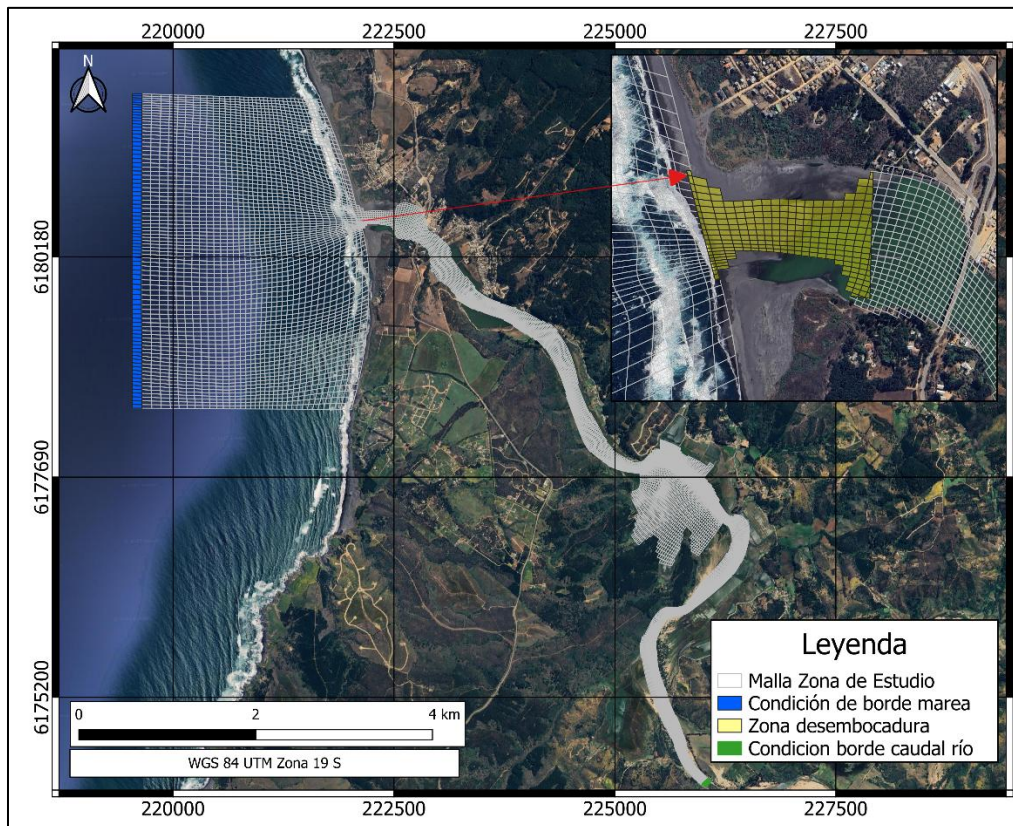


Figura 2: Malla implementada para el modelo numérico con las condiciones de borde.

3.2 Datos de campo

Para la información de las variables hidrodinámicas en la zona de estudio, se utilizan los datos de la campaña en terreno realizada entre los días 1 y 3 de agosto del año 2023 (Cienfuegos et al., 2025). Debido a la variabilidad temporal de los parámetros requeridos para el análisis, se tomaron mediciones durante la condición vaciante y llenante del estuario. También, se registran series de tiempo de salinidad y nivel de agua en diferentes puntos a lo largo de todo el estuario, el perfil transversal de profundidad y salinidad (CTD) junto con el caudal instantáneo en un transecto del estuario (Fig. 3A y 3B).

Las mediciones de nivel de agua se registran en los puntos AQUATEC, ADV 1, ADV2, ADV3, ADV 4 y Barrancas (Fig. 3A). Para el estudio de la estructura vertical y distribución espacial de la salinidad, se considera el transecto ubicado en el punto del ADCP, ubicado 50 m aguas arriba del puente de Cáhuil (Fig. 3B). Se obtienen mediciones del perfil vertical de salinidad en la columna de agua utilizando el instrumento Castaway CTD Brand Sontek. Finalmente, para las mediciones del caudal instantáneo, se utiliza un River Surveyor Sontek RS5 como instrumento de aforo, que mediante un perfilador de corrientes acústico Doppler, permite determinar el perfil de velocidades a lo largo de una sección transversal (transecto). Para la obtención del caudal instantáneo se integran las velocidades instantáneas sobre la sección transversal, obteniendo un caudal máximo en condición llenante de $61,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y un mínimo de $21,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en la vaciante.

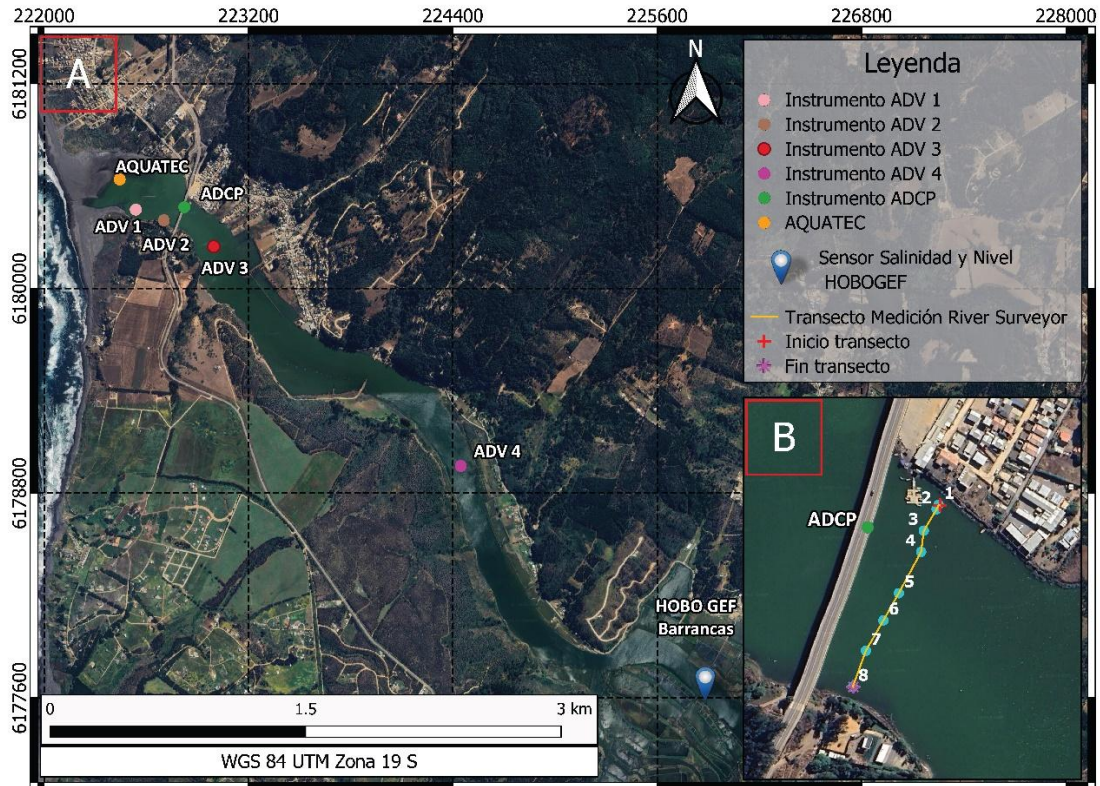


Figura 3: A) Ubicación instrumentos durante la campaña de terreno entre el 1 y 3 de agosto de 2023. B) Ubicación transecto para la medición del caudal instantáneo.

3.3 Condiciones de borde

Las condiciones de borde del dominio de modelación corresponden al nivel de marea por el contorno litoral exterior aguas abajo (franja azul Fig. 2) y el caudal fluvial del estero en la frontera aguas arriba (franja verde). Mediante un análisis armónico de los datos del mareógrafo del SOHA ubicado en Boyeruca, 23 km al sur de Cáhuil se desprende que el régimen de mareas es del tipo micromareal según la clasificación de Hayes (1975) con un rango entre los 1-1,8 m en cuadratura y sicigia respectivamente. Asimismo, el tipo de mareas se clasifica cómo mixta principalmente semidiurna con los armónicos principales diurnos (K_1 : 0.16 m; O_1 : 0.12 m) y semidiurnos (M_2 : 0.41 m; S_2 : 0,15 m). En cuanto al criterio según Courtier (Pugh, 1996) se tiene un factor de forma (F) de $\sim 0,5$ lo cual ratifica el régimen mixto principalmente semidiurno del estuario.

En base a los datos recopilados de la Estación Fluviométrica Santa Teresa DGA, durante los días de la campaña en terreno, el caudal del estero Nilahue oscila entre los $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y los $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Para la condición de borde fluvial, se asume un caudal de descarga constante de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ aguas arriba del dominio (franja verde Fig. 2).

4. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

La calibración del modelo consiste en ajustar las variables de batimetría y la geometría de la desembocadura, a modo de evaluar el desempeño de este y su comparación con mediciones observadas en terreno. Se comparan los resultados simulados y observados de los niveles de agua y caudales instantáneos en la laguna Cáhuil para los días 1,2 y 3 de agosto de 2023, fechas en las que se realiza la campaña de terreno y recolección de datos.

Se realizan inicialmente escenarios de simulación con una batimetría de referencia obtenida a partir del estudio desarrollado en el marco del proyecto de humedales costeros GEF (2021). La desembocadura se modela como un canal artificial de sección trapezoidal, con un largo de 290 m, ancho basal de 40 m, ancho superficial de 130 m y una altura de umbral variable en función del nivel de marea (GEF, 2021). Debido a la incertidumbre en la batimetría en el sector de estudio, así como la geomorfología de la desembocadura, se emplea un método de ajuste de batimetría y reconstrucción de la boca del estuario en base a imágenes de video rectificadas para las fechas de la campaña en terreno.

4.1 Ajuste paramétrico de la batimetría

Basado en la simulación para el escenario con la batimetría de base y la sección trapezoidal en la desembocadura se aprecian errores significativos al comparar con los datos medidos en terreno para las profundidades de agua. Se obtiene un índice de desempeño mínimo de 0,26 y un error cuadrático medio RMSE máximo de 2,54 m para la serie temporal de profundidades de agua, ubicada en el punto de control ADV 3 (ver Fig. 3A). Se procede entonces a ajustar la batimetría base utilizando mediciones obtenidas durante la campaña de agosto de 2023. En particular, se dispone de la profundidad en los puntos donde se ubicaron los instrumentos, además de recorridos en bote utilizando el "bottom tracking" del instrumento *River Surveyor Sontek RS5*. De esta manera, se corrigen los valores para los puntos con resultados conocidos y se realiza una interpolación lineal para suavizar diferencias en las secciones en donde no se tienen datos. La Fig. 4 presenta el perfil longitudinal de la profundidad en el estuario para el escenario base y el escenario con la batimetría corregida. Se evidencia que con el ajuste batimétrico la profundidad media logra ajustarse a las profundidades observadas en terreno.

4.2 Método reconstrucción de la geomorfología de la desembocadura

En base a un método de percepción remota, se reconstruyen las secciones transversales de la desembocadura analizando imágenes rectificadas de video durante los días de la campaña en terreno obtenidas desde el Sistema de Monitoreo y Anticipación de la Resiliencia Costera, SIMONA Costa (Cienfuegos et al., 2023). Se obtienen las curvas de nivel asociadas a cada contorno del canal en la desembocadura entre las 8:00 am y las 18:00 hrs (Fig. 5A). Se definen 7 perfiles transversales y en cada uno se registran los anchos de escurrimiento utilizando las curvas de nivel asociadas al nivel de marea (Fig. 5B). Para la reconstrucción del perfil, se asocia una profundidad referida al nivel de marea correspondiente al horario de la imagen rectificada (Fig. 6) a cada curva de nivel. Por último, se considera un canal rectangular de altura 0,5 m bajo el nivel mínimo de marea del perfil reconstruido. Se presenta el perfil reconstruido y la sección transversal final con el canal inferior de altura 0,5 m para los primeros dos ejes en la Fig. 6.

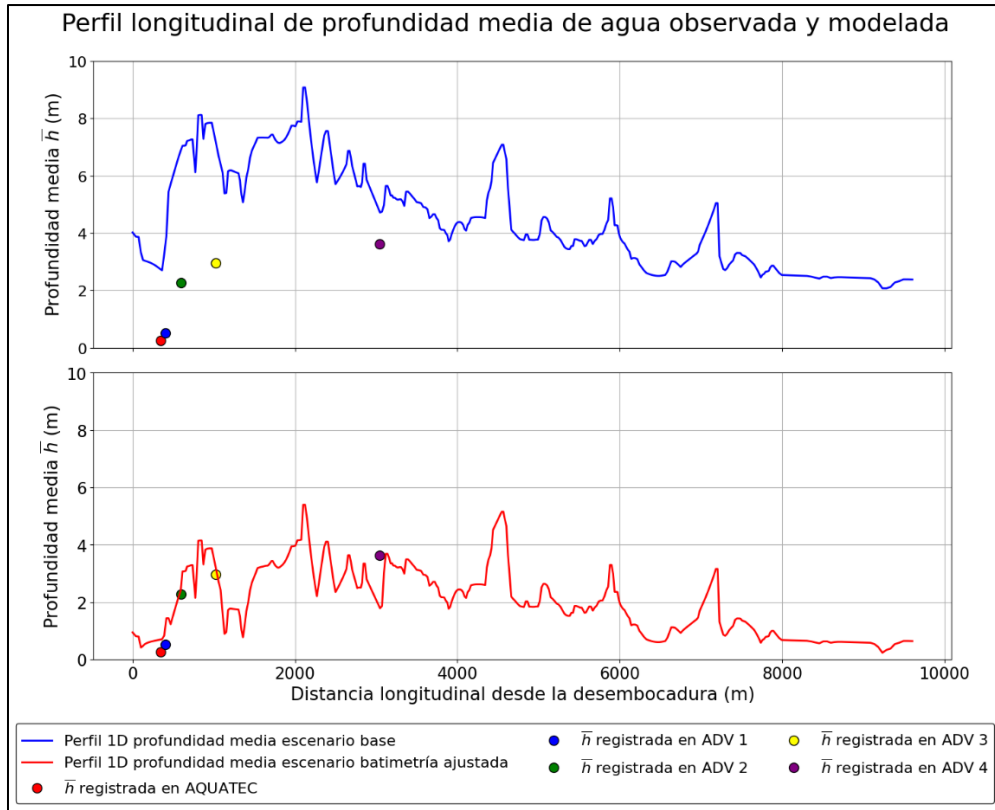


Figura 4: Perfil Longitudinal de la batimetría base (panel superior) y ajustada (panel inferior).

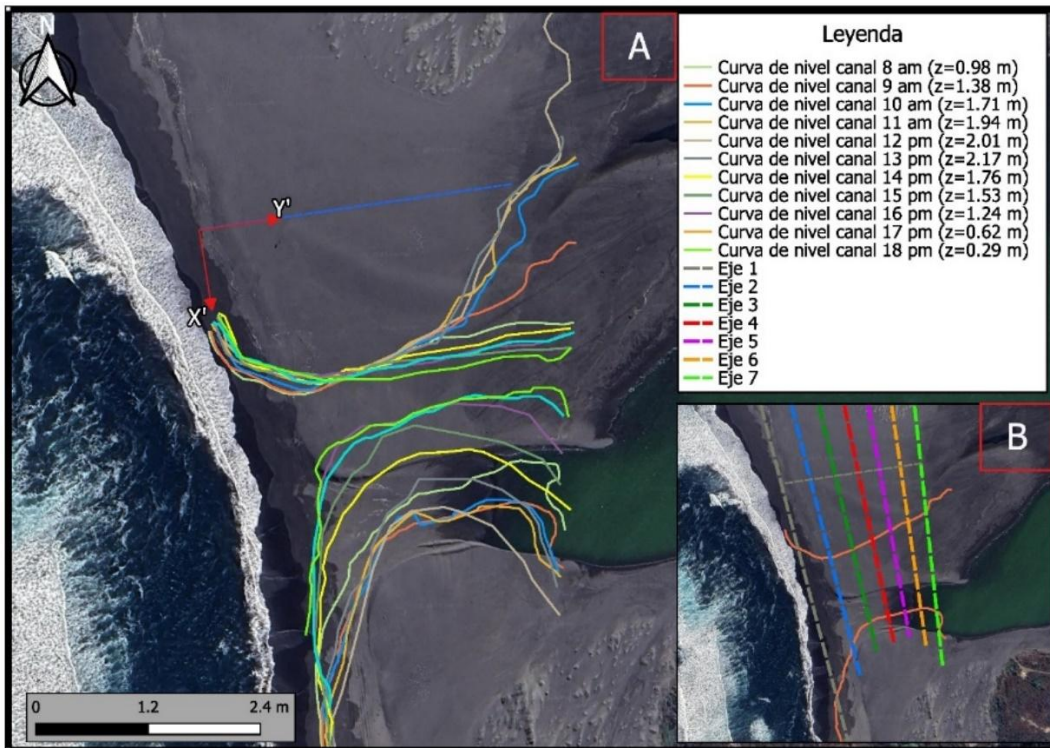


Figura 5: Curvas de nivel y secciones para la reconstrucción de la desembocadura. A) presenta las curvas de nivel. B) las secciones para la reconstrucción del perfil.

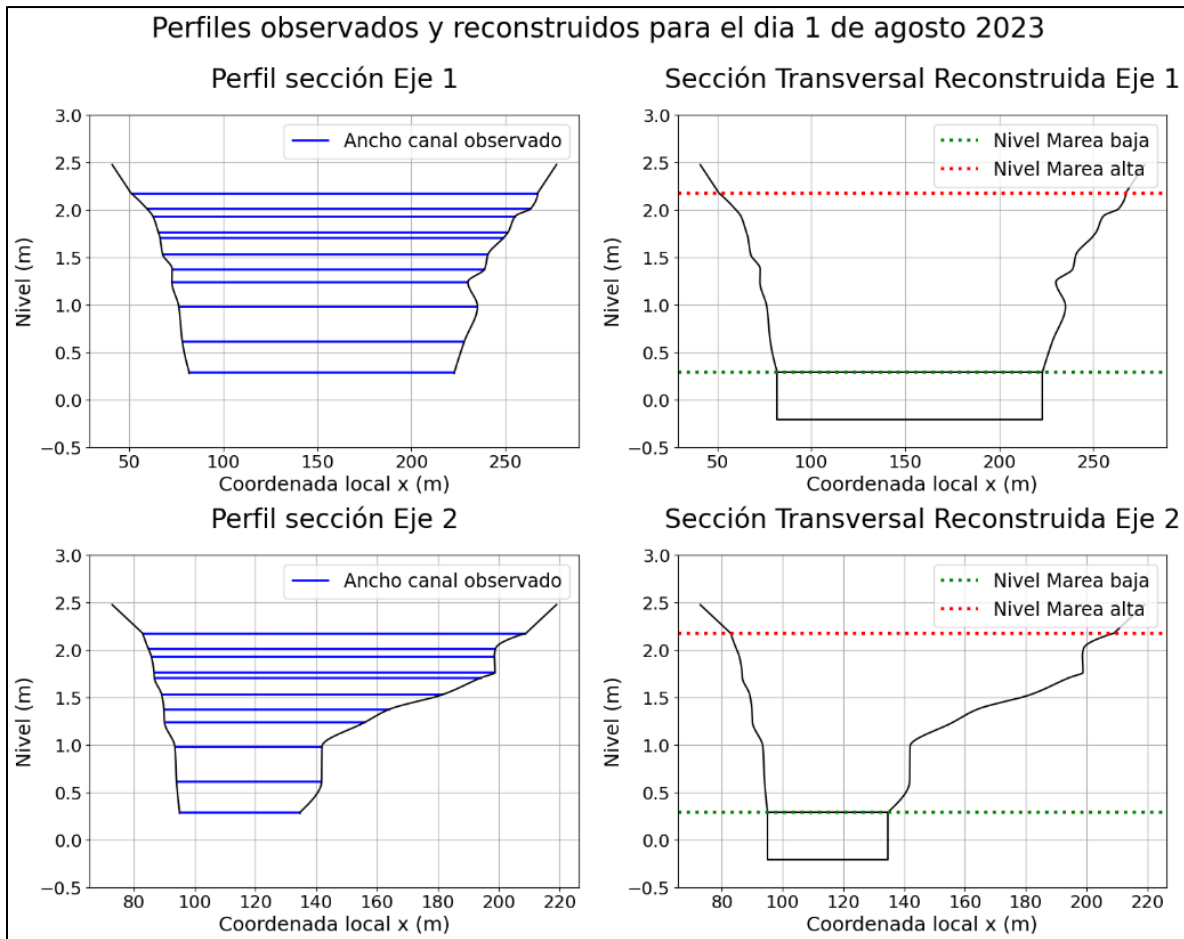


Figura 6: Ejemplo para la reconstrucción de perfiles en las secciones N° 1 y N° 2.

Una vez realizados los ajustes de la batimetría y la geomorfología de la desembocadura, se vuelve a realizar la simulación computacional con el modelo Delft 3D. La Fig. 7 presenta los resultados del nivel de agua modelados (curva azul) y los observados en terreno (curva verde). Se desprende que el ajuste de la batimetría logra mejorar significativamente el desempeño del modelo con respecto a los valores de marea observados. Por otro lado, se observa que la forma de la onda de marea se ajusta de buena manera a los máximos en pleamar en la condición llenante. No obstante, para la condición vaciante, los resultados para los puntos ADV 1, ADV 2 y Barrancas muestran que el modelo sobrestima la profundidad del flujo, alcanzando un vaciado menor del estuario en comparación a la serie temporal medida. Se obtiene un error cuadrático medio de 0,07 m y un índice de desempeño de Willmott ponderado sobre todos los puntos de control de 0,92 lo que implica un desempeño excelente del modelo a partir del criterio propuesto por Allen et al. (2007).

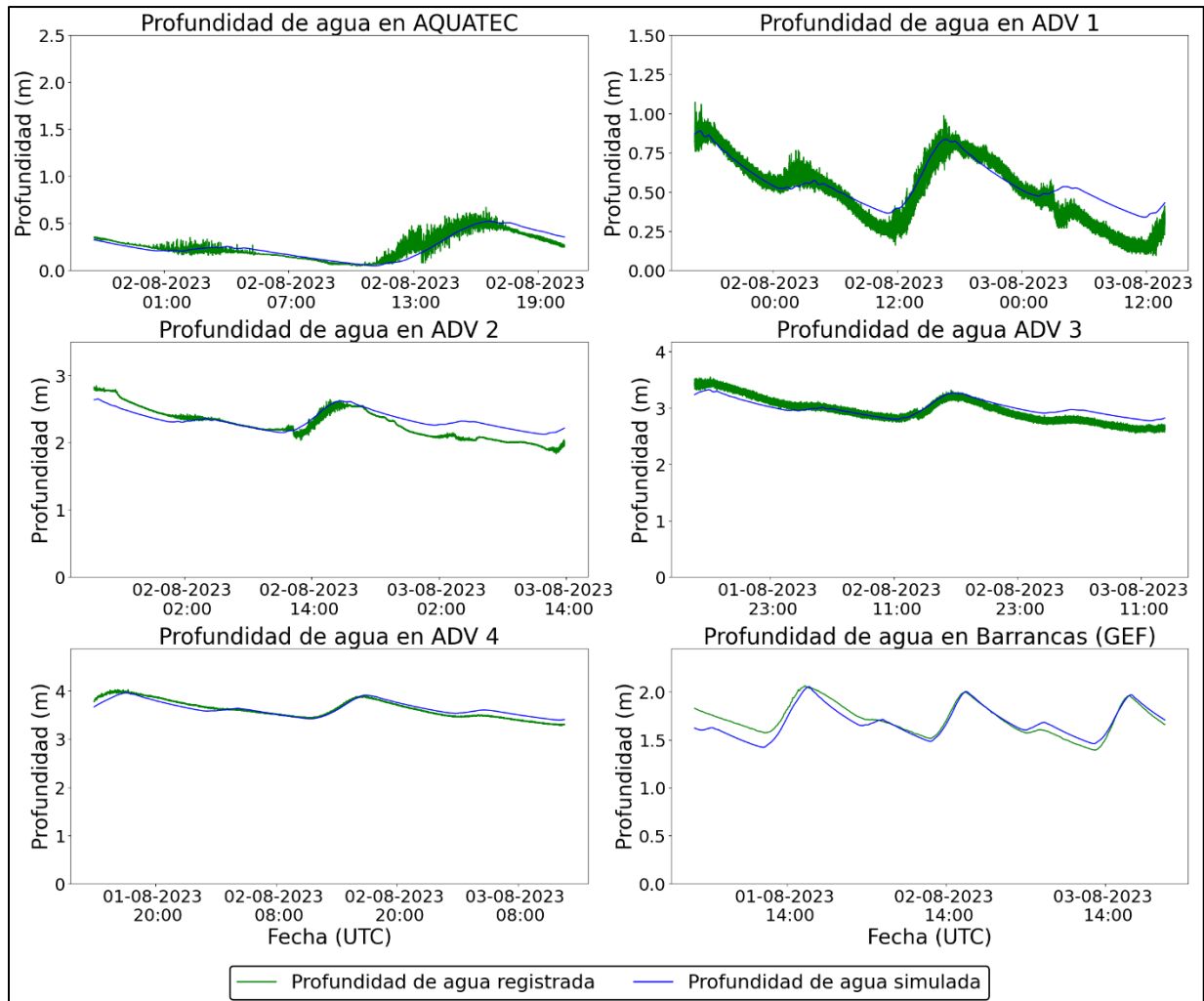


Figura 7: Comparación entre resultados simulados y observados en terreno.

Para la evaluación de los caudales instantáneos, se utiliza el transecto de control presentado en la figura 4B. Se obtiene un caudal máximo simulado en condición llenante de $62,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y un mínimo de $21,9 \text{ m}^3/\text{s}$ en la condición vaciante para el día 1 de agosto. Al comparar con los datos obtenidos de terreno se obtiene un error relativo del 0,2% entre ambas mediciones, lo cual reafirma la mejora en la estimación de los parámetros hidrodinámicos luego del ajuste de la batimetría. Los resultados confirman la asimetría existente entre los flujos de marea llenante y vaciante.

Las asimetrías observadas en las mareas llenantes y vaciantes se asocian a fenómenos no lineales que resultan en diferencias en la velocidad de propagación de las ondas. Considerando que la celeridad depende de la profundidad en aguas someras, en pleamar la celeridad es mayor, mientras que en bajamar ocurre lo contrario (Aubrey et al., 1985). Además, en condiciones de propagación no lineal en aguas someras, la onda de marea se deforma ya que la celeridad depende de la amplitud. En consecuencia, el tiempo entre la bajamar (vaciante) y la pleamar (llenante) se acorta o se alarga según sea el caso de manera apreciable, generando una asimetría en las velocidades del flujo llenante y vaciante (Medina et al., 2001). Esta asimetría se refleja mediante un intervalo más corto, pero de mayor intensidad en una dirección, y un segundo intervalo más largo de menor intensidad en la otra dirección, como se aprecia en la Fig. 8.

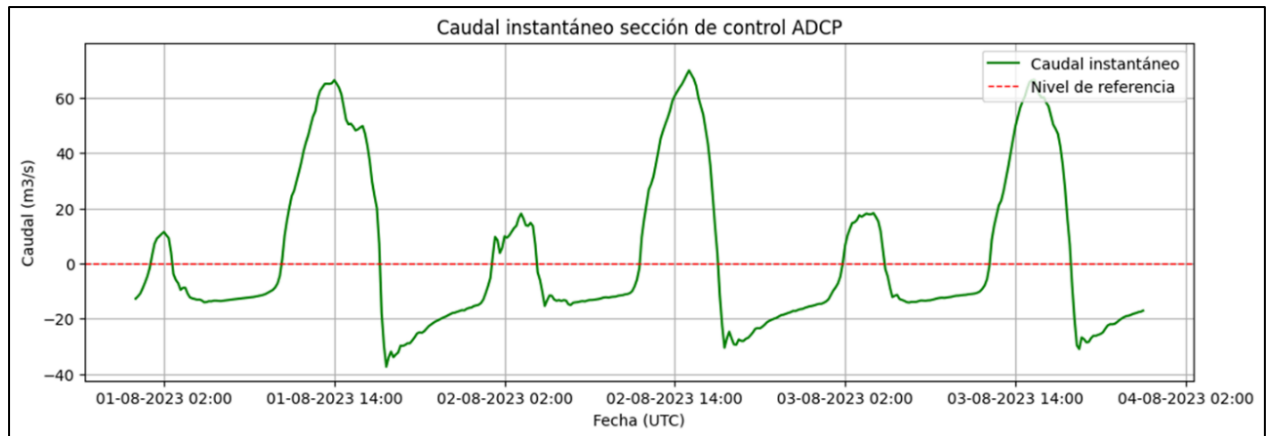


Figura 8: Caudal instantáneo modelado en el transecto de interés, valores positivos corresponden a condición llenante y negativos a condición vaciante.

5. CONCLUSIONES

Mediante la aplicación de un modelo numérico hidrodinámico, se investiga la forzante y la propagación de la onda de marea en la laguna Cahuil. Para ello, en base a datos de campo y un levantamiento topo batimétrico de la zona de estudio, se logra implementar, calibrar y validar un modelo numérico para cuantificar y predecir el comportamiento dinámico de la laguna en respuesta a la forzante de marea y las variables hidrodinámicas de nivel y caudal instantáneo. Los resultados de la simulación destacan la importancia de la batimetría de la laguna y su continua evolución debido a las condiciones ambientales y meteorológicas. En este sentido, la batimetría corresponde a un factor esencial para la determinación de los niveles de agua en el estuario. Es por ello, que se requieren protocolos y métodos para realizar un seguimiento diario de su evolución en sistemas altamente dinámicos como la laguna Cahuil.

En vista de lo anterior, se implementa un método de reconstrucción de la morfología de la desembocadura a escala diaria en base a imágenes rectificadas de video. De esta manera, se logra reconstruir el perfil de la desembocadura e implementarla en el modelo numérico Delft 3D. Los resultados demostraron una mejora significativa en la deformación de la onda de marea y la forma del perfil para los niveles de agua, ajustándose de manera razonable a los máximos *peak* en pleamar en la condición llenante. Finalmente, el paso a seguir corresponde a la calibración y validación de la salinidad mediante el ajuste de los parámetros de mezcla de difusión y viscosidad turbulenta a modo de evaluar la cuña salina, longitud de intrusión y la variabilidad espaciotemporal de la salinidad en el estuario.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo realizado ha contado con el apoyo de la beca Canalistas del Maipo y financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID), a través de los programas ANID/FONDEF/ID22110087, centro de excelencia FONDAP CIGIDEN ANID/Fondap/1522A0005.

REFERENCIAS

Allen, J.I., Somerfield, P.J. y Gilbert, F.J. 2007. Quantifying uncertainty in high-resolution coupled hydrodynamic-ecosystem models. *Journal of Marine Systems*, 64, 3–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.02.010>.

Andrade, B. y Grau, S. 2005. La laguna de Cahuil, un ejemplo de estuario estacional en Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*.

Aubrey, D.G. y Speer, P.E. 1985. A study of non-linear tidal propagation in shallow inlet/estuarine systems. Part I: Observations. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 21, 185–205.

Cienfuegos, R., Catalán, P., Flores, R., Guerra, M., Lucero, F., Díaz, P., Gómez, R., & Esparza, C. 2025. The generation of rogue waves from surf zone infragravity motions penetrating a bar-built shallow estuary. *Coastal Engineering Proceedings*, 38, waves.42. <https://doi.org/10.9753/icce.v38.waves.42>

Cienfuegos, R., Lucero, F., Catalán, P., Martínez, C., Díaz, P., y Caravaca, L. 2023. Sistema de monitoreo y anticipación de la resiliencia costera – SIMONA COSTA. *XXVI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica*. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID), Santiago, Chile.

Deltares. 2025. *Delft3D–FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual*. Deltares.

GEF – Global Environment Facility. (2021). Propuesta de delimitación del humedal Laguna de Cahuil e identificación de áreas prioritarias a restaurar en su cuenca aportante (Informe final, Proyecto GEFSEC ID: 9766).

Gobierno Regional Región de O'Higgins. (2023). Estudio de inundabilidad en el humedal de Cahuil, comuna de Pichilemu, Región de O'Higgins (ID: 4374-14-LQ21). Informe Final. Mayo.

Hayes, M.O. 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. En: Cronin, L.E. (ed.), *Estuarine Research*, Vol. II, 3–22. Academic Press.

Khojasteh, D., Rao, S., McSweeney, S., Ibaceta, R., Nicholls, R.J., French, J., Glamore, W., Largier, J.L., Adams, J., Hughes, M.G., Barry, M., Power, H.E., Du, J., Tucker, T.A., Cienfuegos, R., Catalan, P.A. y Hanslow, D. 2025. Intermittent estuaries deserve global attention as vulnerable and vital ecosystems. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 443. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02428-5>

Lomonaco, P., Medina, R. y Losada, I.J. 2001. *Influencia de la morfología del estuario en la propagación de la onda de marea*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4169.4247>.

McSweeney, S., Kennedy, D. y Rutherford, I. 2017a. A geomorphic classification of intermittently open/closed estuaries (IOCE) derived from estuaries in Victoria, Australia. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41(4), 421–449. <https://doi.org/10.1177/0309133317709745>

McSweeney, S., Rutherford, I. y Stout, J. 2017b. Intermittently closed/open lakes and lagoons: Their global distribution and boundary conditions. *Geomorphology*, 292.

Pugh, D. 1996. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons.

Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. y Rowe, C.M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8995. <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>