

**ANÁLISIS NUMÉRICO DE LOS FACTORES DETERMINANTES EN EL CONTROL DE APERTURA/CIERRE DE LA DESEMBOCADURA DEL RÍO MAIPO**

Felipe Marillán R., Mauricio Villagrán V. y Diego Caamaño A.

**RESUMEN**

Las desembocaduras de los ríos son unidades territoriales de gran importancia social, económica y ambiental, y están sujetas a fuertes presiones tanto antrópicas como climáticas. Las desembocaduras de ríos andinos en Chile suelen estar abiertas al océano debido a los caudales constantes desde la cordillera, pero recientemente se ha observado una tendencia al cierre de ríos importantes como el Aconcagua, el Maipo y el Mataquito. Esta problemática de cierre de barras en ríos conlleva consecuencias ambientales significativas en los estuarios que afectan tanto a los ecosistemas acuáticos costeros como a las comunidades pesqueras, quienes dependen del intercambio de agua entre el río y el mar.

El control de la apertura y cierre de las barras de ríos, como en la desembocadura del Maipo, está influenciado por factores ambientales interrelacionados: la variabilidad del caudal, los procesos de sedimentación y erosión, la acción del oleaje, las variaciones de marea, la geomorfología costera y los patrones climáticos. Además, el río Maipo enfrenta importantes presiones debido a la escasez hídrica, la sobreexplotación, la urbanización acelerada y la contaminación.

A través de herramientas de modelación numérica y los criterios de equilibrio de Escoffier para desembocaduras, se busca obtener una comprensión clara sobre las condiciones hidrodinámicas necesarias para evitar el cierre de la barra en la desembocadura del río Maipo. Esto facilitará la elaboración de estrategias de gestión efectivas y sostenibles que aseguren una apertura estable y sostenible de la barra. Dichas estrategias podrían incluir la regulación de un caudal mínimo en el río para garantizar el intercambio de agua de mar en el estuario, beneficiando a pescadores, embarcaciones comerciales y actividades turísticas en la región.

**Palabras clave:** Estuarios, modelación numérica, Escoffier. desembocaduras.

**ABSTRACT**

River mouths are territorial units of great social, economic and environmental importance, and are subject to strong anthropic and climatic pressures. The mouths of Andean rivers in Chile are usually open to the ocean due to the constant flows from the mountain range, but recently a trend towards the closure of important rivers such as the Aconcagua, Maipo and Mataquito has been observed. This problem of river bar closure has significant environmental consequences in estuaries that affect both coastal aquatic ecosystems and fishing communities, who depend on the exchange of water between the river and the sea.

The control of the opening and closing of river bars, such as at the mouth of the Maipo, is influenced by interrelated environmental factors: flow variability, sedimentation and erosion processes, wave action, tidal variations, coastal geomorphology and climatic patterns. Furthermore, the Maipo River faces significant pressures due to water scarcity, overexploitation, accelerated urbanization and pollution.

Through numerical modelling tools and Escoffier's equilibrium criteria for estuaries, we seek to gain a clear understanding of the hydrodynamic conditions necessary to prevent the closure of the bar at the mouth of the Maipo River. This will facilitate the development of effective and sustainable management strategies that ensure a stable and sustainable opening of the bar. Such strategies could include regulating a minimum flow in the river to ensure the exchange of seawater in the estuary, benefiting fishermen, commercial vessels and tourist activities in the region.

**Key words:** Estuaries, numerical modeling, Escoffier, river mouth.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los estuarios juegan un papel crucial tanto para los ecosistemas como para las sociedades humanas. Estos espacios actúan como zonas de transición entre los ríos y el océano, proporcionando hábitats para una diversidad de especies acuáticas, incluidas muchas que son económicamente importantes. Además, facilitan el intercambio de nutrientes y sedimentos entre los ecosistemas fluviales y marinos, lo que contribuye a la productividad de las pesquerías y a la estabilidad ecológica de las zonas costeras (Dastgheib et al., 2018). La estabilidad de estos sistemas puede verse afectada por diversos factores, como el cambio climático, las alteraciones humanas y los procesos naturales. Asimismo, en obras como la de van de Kreeke y Brouwer, se destaca la importancia de comprender la hidrodinámica y morfodinámica de las entradas mareales para asegurar la estabilidad ecológica de las desembocaduras fluviales (van de Kreeke y Brouwer, 2017).

En Chile, la situación de los ríos andinos ha suscitado preocupación en los últimos años, siendo el río Maipo un ejemplo claro. En las últimas décadas, este río ha experimentado cierres recurrentes en su desembocadura debido a una combinación de factores, como la reducción de caudales por el uso intensivo de agua para riego y consumo humano, además de procesos de sedimentación. La sobreexplotación de sus recursos hídricos ha exacerbado estos problemas (Escenarios Hídricos 2030 Chile). El cierre de la desembocadura del Maipo no solo afecta a los ecosistemas acuáticos, sino también a las comunidades pesqueras locales que dependen del intercambio continuo de agua entre el río y el mar para sus actividades económicas.

En cuanto a los estudios actuales sobre la estabilidad de las desembocaduras, uno de los enfoques clave ha sido el uso de la curva de equilibrio de Escoffier. Este diagrama conceptual permite evaluar la estabilidad de una barra de arena en la desembocadura de un río, considerando los caudales fluviales y las mareas. En la Figura 1 relaciona la curva de cierre con el equilibrio dinámico que busca la sección de entrada respecto al valor de velocidad comparándolo con la velocidad de equilibrio representada por la línea verde.

La versión extendida de esta curva incorpora variaciones estacionales en el Caudal del río y la deriva litoral (Figura 2 y 3), explicando cómo estos factores regulan la apertura y cierre de los canales de entrada y su estabilidad a lo largo del tiempo. T.T., Tran. (2011).

En este contexto, se propone desarrollar un proyecto de investigación en la desembocadura del Río Maipo en base a datos de estudios previos. Machuca Barra (2022). El objetivo principal es generar un modelo numérico bidimensional (2D) basado en información topobatimétrica del estuario para caracterizar el comportamiento de la entrada de marea bajo diferentes condiciones hidrodinámicas, incluyendo caudales, componentes de marea y amplitudes de marea. Este modelo permitirá estudiar el comportamiento de las velocidades de flujo, el prisma mareal y el área de la sección más estrecha de la desembocadura, proporcionando información clave para la gestión y mantenimiento de la estabilidad de la barra de arena en esta zona crítica. Para este análisis, se utilizará el software Delft 3D, lo que permitirá el desarrollo de la curva de Escoffier extendida que se genera en la desembocadura del Río Maipo.

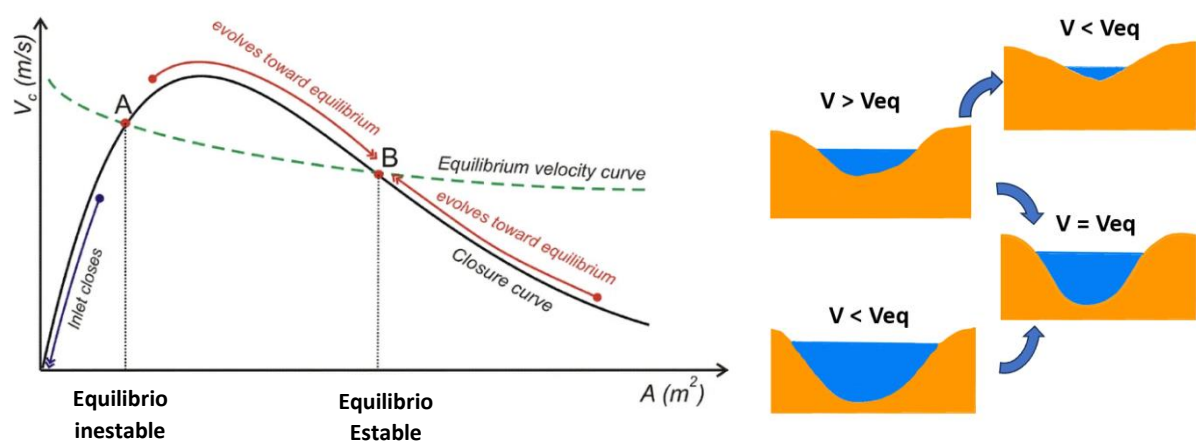


Figura 1. Esquema de Equilibrio dinámico de la sección transversal del canal de entrada de marea.

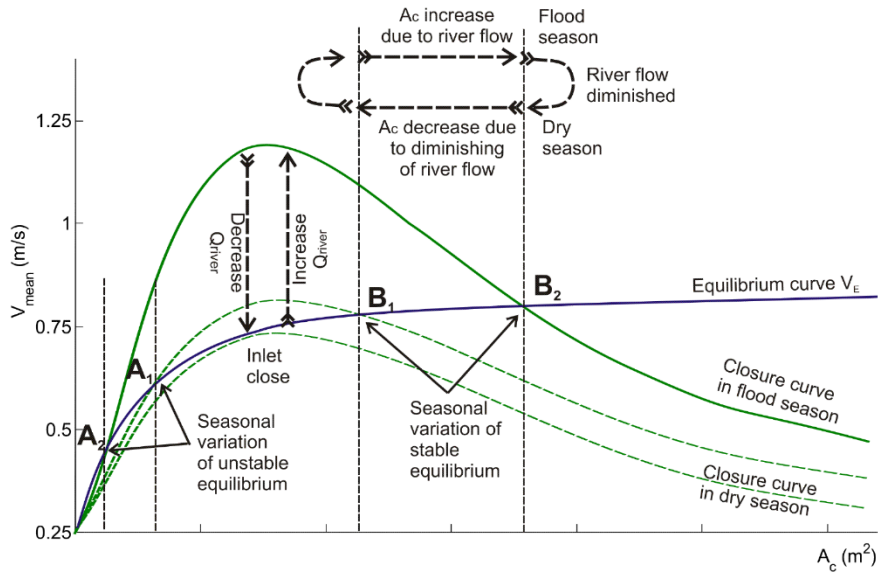


Figura 2. Diagrama de Escoffier extendida para la variación estacional de la curva de cierre producto de la variación del caudal. (fuente Tung et al., 2011)

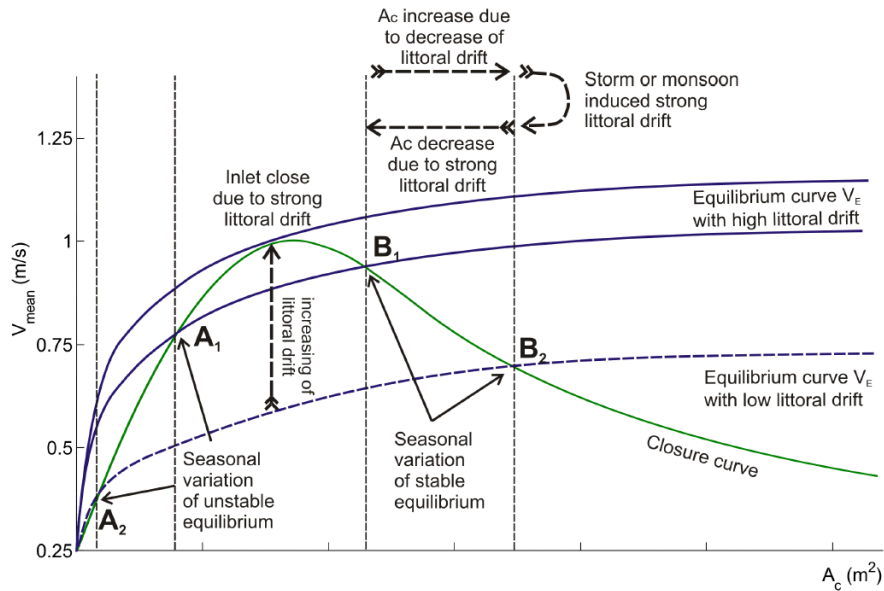


Figura 3. Diagrama de Escoffier extendida para la variación estacional de la curva de equilibrio producto de la variación de la deriva litoral. (fuente Tung et al., 2011)

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

- Analizar las condiciones hidrodinámicas que previenen el cierre de la barra en la desembocadura del río Maipo, empleando técnicas de modelado numérico y simulaciones computacionales.

### 2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo numérico de la desembocadura del río Maipo teniendo en cuenta las características hidrodinámicas de la zona.
- Evaluar los distintos escenarios posibles para el modelo para poder construir el diagrama de Escoffier de la desembocadura.

## 3. METODOLOGÍA

El presente capítulo muestra los métodos aplicados para el trabajo de estudio

### 3.1 Descripción zona de estudio

El río Maipo tiene su origen en las laderas del volcán Maipo, a una altitud de aproximadamente 3,135 metros sobre el nivel del mar, en la cordillera de los Andes. A lo largo de su recorrido de cerca de 250 km, fluye hasta desembocar en el océano Pacífico. La cuenca del río Maipo, que es una de las más intervenidas por la actividad humana en Chile, abarca una superficie de 15,380 km<sup>2</sup>, con la mayor parte localizada en la Región Metropolitana, en el centro del país, entre las coordenadas 32°55'-34°15' S y 69°46' -71°43' W. El río Maipo es una fuente fundamental de agua potable y de riego en la región, abasteciendo aproximadamente el 70% del agua potable y el 90% del agua utilizada para riego (Arróspide et al., 2018).

Debido a su papel fundamental en el abastecimiento hídrico, especialmente para la ciudad de Santiago, el estuario del río Maipo se ve severamente afectado por el uso intensivo del recurso, lo que lo convierte en un sistema bajo gran presión de actividades humanas (Urrutia et al., 2021). El área de estudio de esta investigación se concentra en la desembocadura del río, en una zona que abarca 4.81 km de longitud desde la costa, ubicada entre las comunas de San Antonio y Santo Domingo, en la Provincia de San Antonio, Región de Valparaíso, Chile (Figura 4).

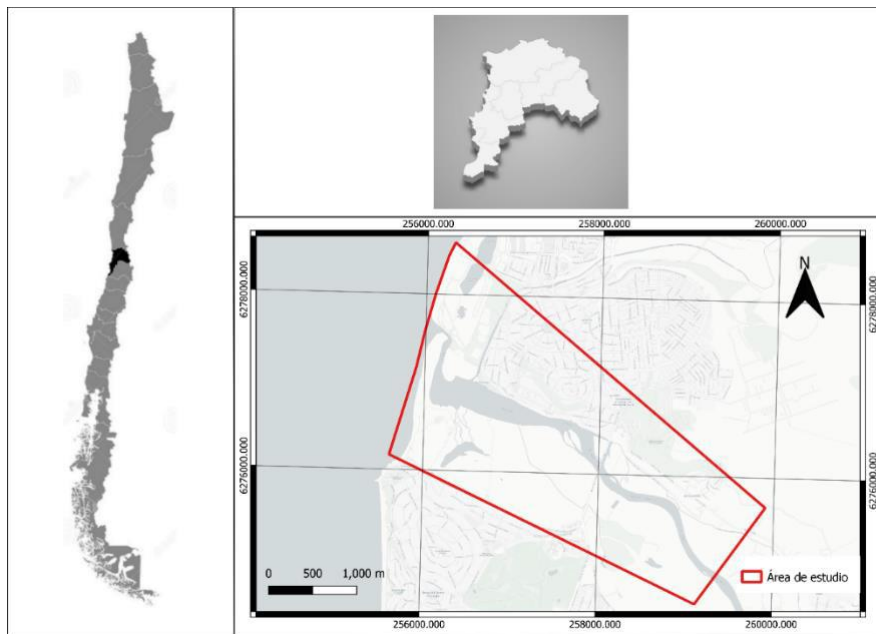


Figura 4, Zona de estudio sector bajo del río Maipo

La imagen de mayo de 2023, obtenida a través de Google Earth Pro (2024), proporciona una representación clara del estado más reciente de la desembocadura del río Maipo. Esta imagen es particularmente relevante ya que presenta características muy similares a las observadas en los datos batimétricos recogidos en marzo de ese mismo año, durante la campaña de verano realizada por la corporación SECOS (Figura 5). Estos datos permiten establecer una base sólida para el análisis morfológico de la desembocadura. Además, se ilustra la evolución de la boca del río a lo largo del tiempo, a partir de registros históricos previos (Figura 6), lo que facilita una comprensión más profunda de los cambios geomorfológicos que han afectado a la zona de estudio.



Figura 5, Imagen desembocadura río Maipo. Fuente: Google Earth Pro

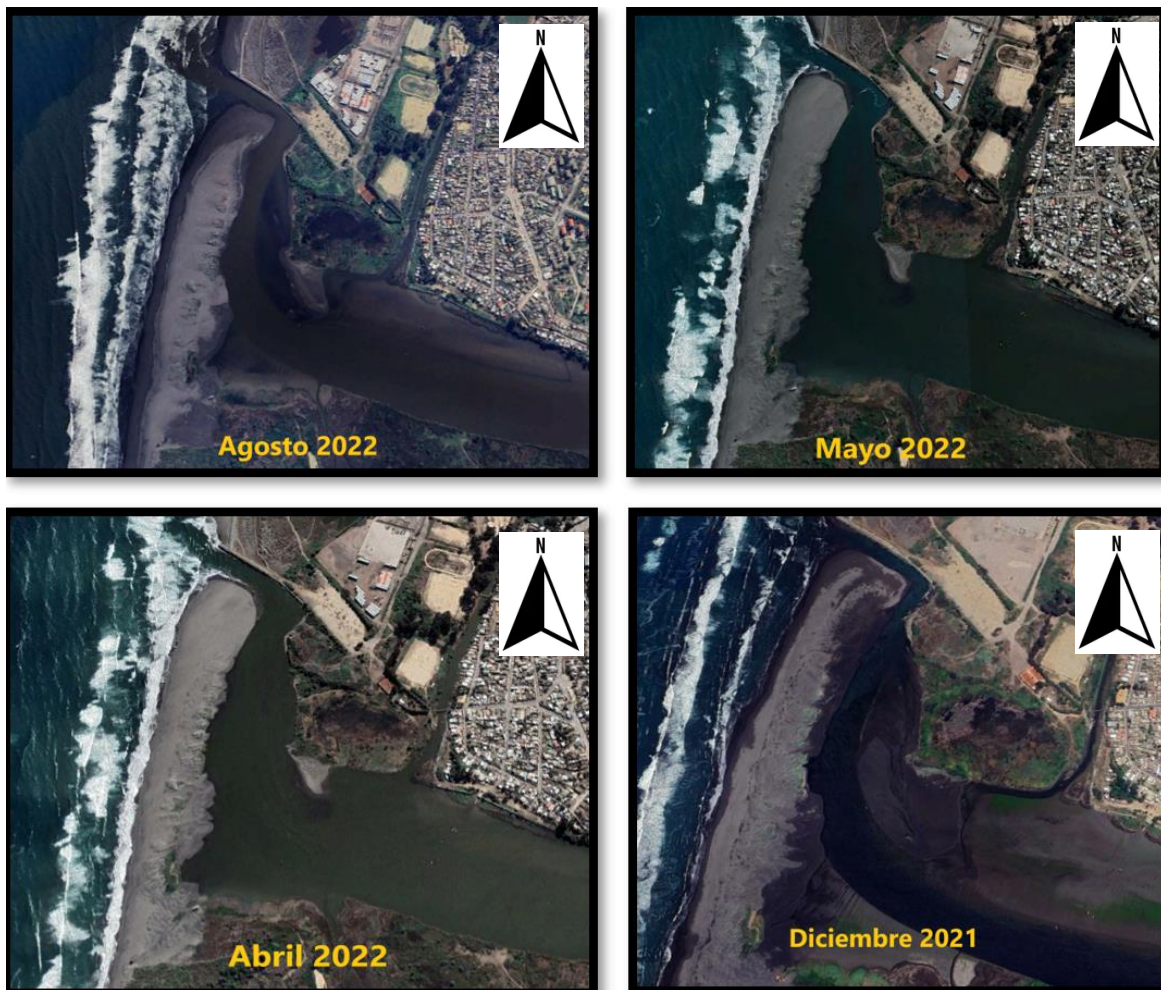


Figura 6, Cambio morfológico histórico de barra de área en desembocadura del río Maipo. Fuente: Google Earth Pro.

### 3.2 Batimetría inicial

#### Levantamiento de datos

Con el fin de caracterizar la morfología de la desembocadura del río Maipo y su dinámica sedimentaria, el Instituto Milenio SECOS llevó a cabo un levantamiento geodésico detallado en la desembocadura y en las zonas adyacentes aguas arriba. Este levantamiento permitió obtener información clave sobre las líneas de bajamar, pleamar, topografía detallada y datos topobatemétricos de la zona.

Durante este estudio, se realizaron seis campañas de medición: tres en el periodo de verano y tres en invierno, recolectando información representativa de las variaciones estacionales. En esta investigación, se emplearon los datos obtenidos en la campaña 4, realizada en marzo de 2023 durante el verano, ya que ofrecen una visión precisa de la estructura morfológica de la

desembocadura en este periodo.

El levantamiento batimétrico se organizó en dos componentes: una parte topográfica y otra batimétrica. La componente topográfica, con mayor nivel de detalle, se concentró en la zona de la barra de arena en la desembocadura, mientras que la batimetría cubrió una longitud de 4.73 km aguas arriba, abarcando el cauce del río. La **Figura 7** muestra la distribución de los puntos topográficos recolectados durante la campaña, mientras que la **Figura 8** ilustra los puntos de batimetría registrados.

### Procesamiento en el Software

Para el procesamiento de los datos topo-batimétricos, se utilizó el software Global Mapper. Los datos de elevación de la campaña fueron cargados en este programa y sometidos a una interpolación, generando así un Modelo Digital de Terreno (DTM). Además, se creó una cobertura de puntos obtenidos de los sondeos y posteriormente, los datos fueron exportado en formato XYZ para ser procesados en el software Quickin de Delft3D, donde se generó una capa de profundidad adecuada para el modelado hidrodinámico. La **Figura 9** muestra el DTM resultante, que integra los puntos topográficos y batimétricos.

A fin de optimizar la precisión en la triangulación e interpolación de los datos, se limitó la generación de la capa de profundidad en Quickin, concentrándose en las áreas de mayor relevancia dentro de la zona de estudio. Esta restricción permitió mejorar la convergencia entre las elevaciones topográficas y las profundidades batimétricas del cauce, proporcionando un modelo confiable para los análisis posteriores.

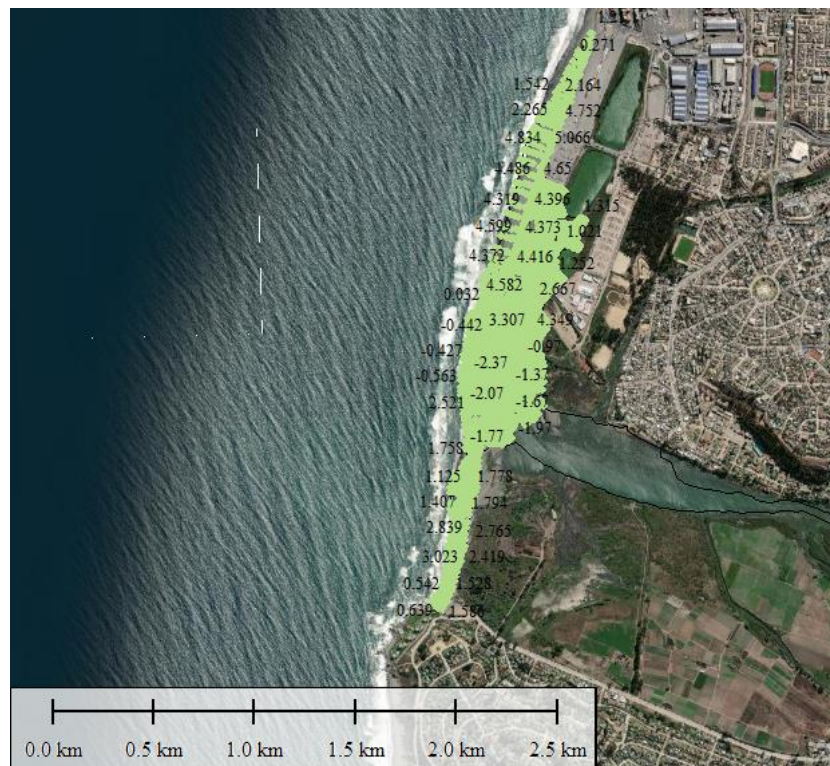


Figura 7, Puntos de topografía campaña 4 marzo 2023. Fuente: SECOS

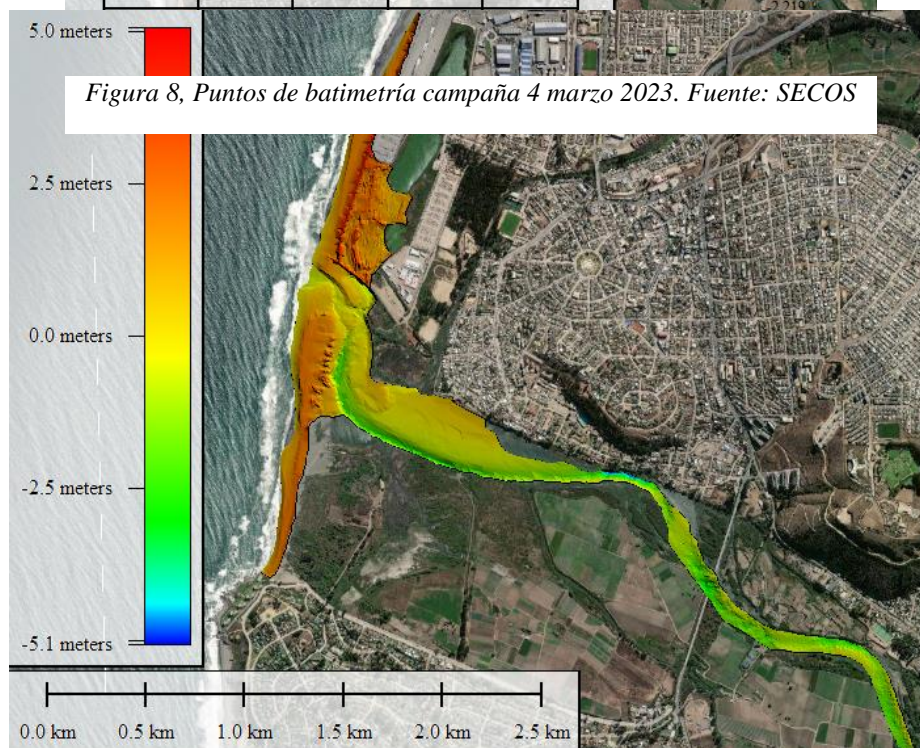


Figura 8, Puntos de batimetría campaña 4 marzo 2023. Fuente: SECOS

Figura 9, Modelo digital de terreno (DTM) con punto topo batimétricos. Fuente Propia

### 3.3 Confección de malla

Para la modelación numérica de la desembocadura del río Maipo, se utilizó el software Delft3D, una herramienta especializada en simulaciones hidrodinámicas y morfodinámicas en ambientes fluviales y costeros. La creación de la malla es fundamental en este proceso, ya que determina la precisión y estabilidad de los resultados del modelo.

La malla fue generada en el módulo GRID-RGFGRID de Delft3D, cubriendo toda el área definida previamente en el estudio. Durante la construcción de la malla, se prestó especial atención a garantizar tanto la calidad de los resultados como la estabilidad del modelo. Este objetivo se alcanzó mediante el cumplimiento de dos indicadores clave de calidad en la malla:

- **Ortogonalidad:** Este parámetro mide el ángulo entre los lados de cada elemento de la malla, y se utilizó el valor recomendado de  $\cos(\theta) < 0.002$  (Deltares, 2014) para asegurar la precisión en las zonas de mayor interés.
- **Numero de Courant (C):** La estabilidad temporal del modelo está determinada por el criterio de Courant, definido por la expresión:

$$C = \frac{\Delta t \cdot \sqrt{g \cdot H}}{\min(\Delta x, \Delta y)}$$

Donde:

$\Delta t$	:	Paso de tiempo (s).
$g$	:	Aceleración de gravedad ( $m/s^2$ ).
$H$	:	Profundidad total del agua (m)
$(\Delta x, \Delta y)$	:	Intervalo de espaciamiento en la malla (m).

Para mantener la estabilidad, se utilizó un paso de tiempo de 6 segundos, logrando un equilibrio óptimo entre precisión y eficiencia computacional (Deltares, 2016).

Posteriormente, la malla fue recortada para limitar el análisis a las áreas cercanas al río, lo que optimizó el tamaño del archivo y redujo la carga computacional sin comprometer la calidad de los resultados. La Figura 10 muestra la malla recortada utilizada en el modelo, donde se aprecia el valor de Courant en las zonas de mayor interés.

Este enfoque permitió concentrar el análisis en las áreas críticas de la desembocadura, garantizando al mismo tiempo la estabilidad y precisión del modelo hidrodinámico.

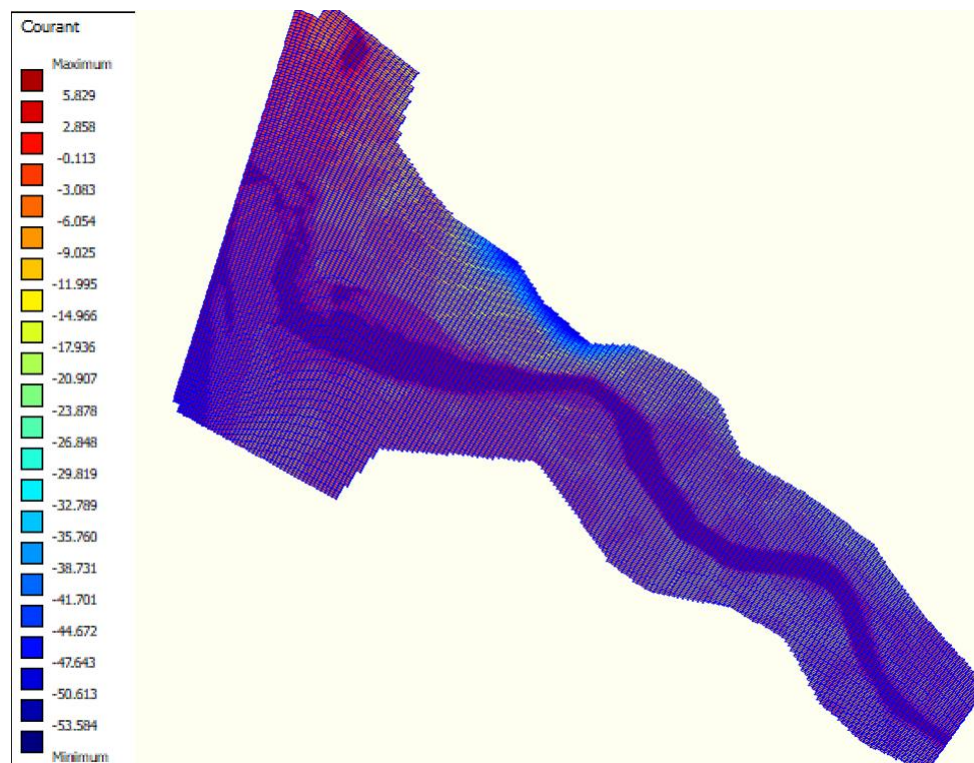


Figura 10. Malla recortada utilizada en modelos con valor de Courant. Fuente propia

### 3.4 Análisis armónico de la marea astronómica

El análisis de las mareas astronómicas es fundamental en los estudios costeros, especialmente en áreas de estuarios y desembocaduras, donde la interacción entre el caudal y el ciclo de mareas influye significativamente en la dinámica hidrodinámica de la boca. Para este estudio, se utilizó la marea astronómica, compuesta por ondas regulares generadas por la interacción gravitacional entre el Sol, la Luna y la Tierra, con periodos de aproximadamente 12 a 24 horas.

Para realizar el análisis armónico de la marea astronómica, se emplearon datos de la estación de San Antonio, procesados con MATLAB y el código 'U\_tide'. Este enfoque ha sido aplicado en estudios previos de modelación hidrodinámica de estuarios en Chile (Rifo Herrera, 2015), proporcionando una representación precisa de los componentes de marea en zonas costeras similares.

Los datos de entrada fueron obtenidos de la estación de monitoreo de San Antonio ( $-33^{\circ}58'S$ ,  $-71^{\circ}61'W$ ), la más cercana a la desembocadura del río Maipo, a través de la página del IOC Sea Level Monitoring (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>). Los datos cubren el periodo desde enero hasta septiembre de 2023, ya que los registros posteriores presentaban vacíos que podrían haber alterado la precisión de los resultados.

La **Tabla 1** presenta los principales componentes de marea obtenidos en el análisis armónico, mostrando su período, amplitud y fase, que son fundamentales para la modelación hidrodinámica del estuario. Estos componentes de marea permiten caracterizar la influencia astronómica en la variabilidad del nivel del agua en la zona de estudio, que será incorporada en los modelos

posteriores para simular las condiciones de flujo en la desembocadura del río Maipo.

*Tabla 1, Resultados componentes de marea por código U\_tide para la zona costera de San Antonio. Fuente Propia*

Componente de marea	Período (Horas)	Amplitud (m)	Fase (grados)
M2	12.42	0.4155	115.37
S2	12.00	0.1456	231.54
K1	23.92	0.1487	321.25
O1	25.83	0.1049	132.23
N2	12.66	0.0940	34.34
P1	24.05	0.0536	258.04

### 3.5 Rugosidad

Para las simulaciones hidrodinámicas, se utilizó un coeficiente de rugosidad de Manning constante de 0.03 en todo el modelo. Este valor fue seleccionado de acuerdo con las referencias de los coeficientes de rugosidad presentados por Chow (1982) y en el informe Roughness Characteristics of Natural Channels (1967).

Aunque la rugosidad en la zona de estudio es claramente variable, como se puede observar en las fotografías satelitales debido a las diferencias visibles en la vegetación y otras características del terreno, se optó por mantener un valor constante. Esta decisión se tomó debido a la falta de datos detallados que permitieran caracterizar adecuadamente cada tramo del área de estudio. Si bien la heterogeneidad de la rugosidad podría influir en el comportamiento del flujo, el uso de un coeficiente uniforme es una aproximación razonable dado el alcance de la información disponible.

### 3.6 Viscosidad, difusividad, densidad y sedimento.

En el caso de la zona de estudio, no se disponen de datos específicos sobre la viscosidad, difusividad, densidad y características de los sedimentos. Por lo tanto, se decidió utilizar los valores predeterminados sugeridos por el software para estos parámetros (ver Tabla 2). Esta aproximación introduce un cierto grado de incertidumbre en los resultados del modelo, ya que la falta de datos locales precisos puede afectar la representación de las condiciones reales en el área de estudio.

Para la caracterización del sedimento, se utilizaron parámetros típicos de suelos arenosos no cohesivos, ampliamente empleados en estudios costeros. Se asumió un espesor de 1 metro para este tipo de sedimento, con sus correspondientes propiedades físicas. En la Tabla 3 se presentan los valores específicos empleados para la arena no cohesiva, que incluyen su densidad y otros parámetros relevantes para la simulación. Aunque se reconoce que estas suposiciones pueden generar incertidumbre, proporcionan una base razonable para modelar el comportamiento sedimentario en la desembocadura del río Maipo, dentro de los límites de la información disponible.

*Tabla 2, Variables por defecto en modulo FLOW. Fuente propia*

Viscosidad (m <sup>2</sup> /s)	Difusividad (m <sup>2</sup> /s)	Densidad del agua (kg/m <sup>3</sup> )
1	10	1000

*Tabla 3, Variables por defecto para sedimento en modulo FLOW. Fuente Propia*

Densidad específica (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad lecho seco (kg/m <sup>3</sup> )	Diámetros medio del sedimento (D50) (µm)	Espesor inicial de sedimento (m)
2650	1600	200	1

### 3.7 Modelación Hidrodinámica y morfológica con Delft 3D

El modelo numérico cuenta con dos conjuntos de cálculo:

- Hidrodinámico: Encargado de la simulación de la dinámica del flujo del agua, teniendo en cuenta las ecuaciones de Navier-Stokes simplificadas, como la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento en 2D o 3D.
- Morfológico: Encargado del transporte de sedimento y por ende la evolución del lecho, generando variación de la morfología. La ecuación del movimiento de partículas Van Rijn es la usada por defecto el software.

La interacción de ambos conjuntos de datos genera una respuesta dinámica del modelo numérico, generando más realismo al modelo en sí y mayor carga computacional.

El modelo numérico será bidimensional, para una simulación de 7 días con un Factor morfológico de 1.

### 3.8 Caudales de entrada

Para el presente estudio, se utilizaron tres caudales de entrada diferentes con el fin de analizar cómo varían las condiciones hidrodinámicas en la desembocadura del río Maipo bajo distintos escenarios de flujo. Esta variación permite identificar el rango de caudales que influye en la estabilidad de la barra de arena y en la dinámica de sedimentación y erosión en la zona de estudio. Evaluar distintos caudales es fundamental, ya que proporciona información sobre cómo se comporta el sistema en condiciones de bajo flujo, flujo medio y alto flujo, facilitando la construcción de la curva de equilibrio de Escoffier y tener un rango entre curvas.

Los caudales fueron:

- Caudal bajo: 2.5 m<sup>3</sup>/s, representando una condición crítica mínima de flujo en la desembocadura.
- Caudal intermedio: 20 m<sup>3</sup>/s, simulando un escenario de flujo promedio.
- Caudal Alto: 100 m<sup>3</sup>/s, representando el efecto en la dinámica de la desembocadura a un flujo elevado.

Con estos valores, se busca determinar los umbrales de caudal que aporta a la estabilidad, identificando la variación de la curva de cierre y los puntos de equilibrio debido a esa variación.

### 3.9 Obtención de parámetros para creación de diagrama

Para construir el diagrama de Escoffier, se utilizan la velocidad y el área promedio de la sección transversal del canal de entrada. Es fundamental definir primero la sección de entrada que se analizará, ya que esto permitirá estudiar los parámetros obtenidos a través de la simulación numérica del modelo. Estos datos son esenciales para evaluar cómo las condiciones hidrodinámicas afectan la estabilidad del canal de entrada, así como para comprender la interacción entre el flujo de agua y la morfología del estuario

#### Definición sección transversal de estudio

La sección transversal de estudio para el cálculo de variables de área y velocidad promedio durante la modelación se refirió a la sección más estrecha posible de entrada y con el criterio que sea lo más paralelo a la malla ortogonal, para no perder datos de componente de velocidad. (Figura 11).

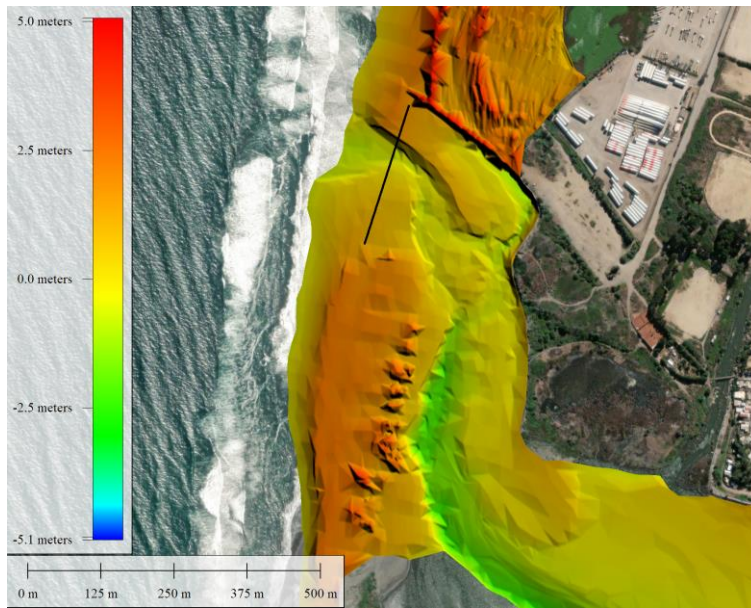


Figura 11. Ubicación sección transversal de estudio para variación del lecho

### Variación del lecho de la sección de estudio

Dado que la curva de cierre en el diagrama de Escoffier simula el comportamiento de la boca, es decir, la variación de su área debido a las fuerzas que interactúan, se decidió crear varias secciones para simular diferentes etapas de la curva y acelerar el cálculo, que de otra manera requeriría días de simulación. Este criterio se respalda en la hipótesis que, si la velocidad es mayor, se erosiona la sección, y si es menor, el sedimento se deposita, reduciendo la sección. Esto permite identificar en qué zona de la curva se ubica la sección ante las forzantes de marea y caudal dadas.

La figura 12 muestra la variación de la sección transversal al inicio de cada modelación. La línea verde indica la batimetría inicial, mientras que las variaciones en el lecho corresponden a las secciones erosionadas o ampliadas: dos reducciones y tres ampliaciones. No se tuvieron criterios precisos de ampliación y reducción, pero se verificó una amplitud y reducción tanto en profundidad como en ancho, siempre conservando la forma de la sección. Además, el lecho erosionable se limitó a un metro de espesor para evitar erosiones profundas y promover más erosión en los bordes en casos de caudales elevados ( $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

También se muestra la variación del canal de entrada de marea debido a la variación del lecho propuesta (Figura 13).

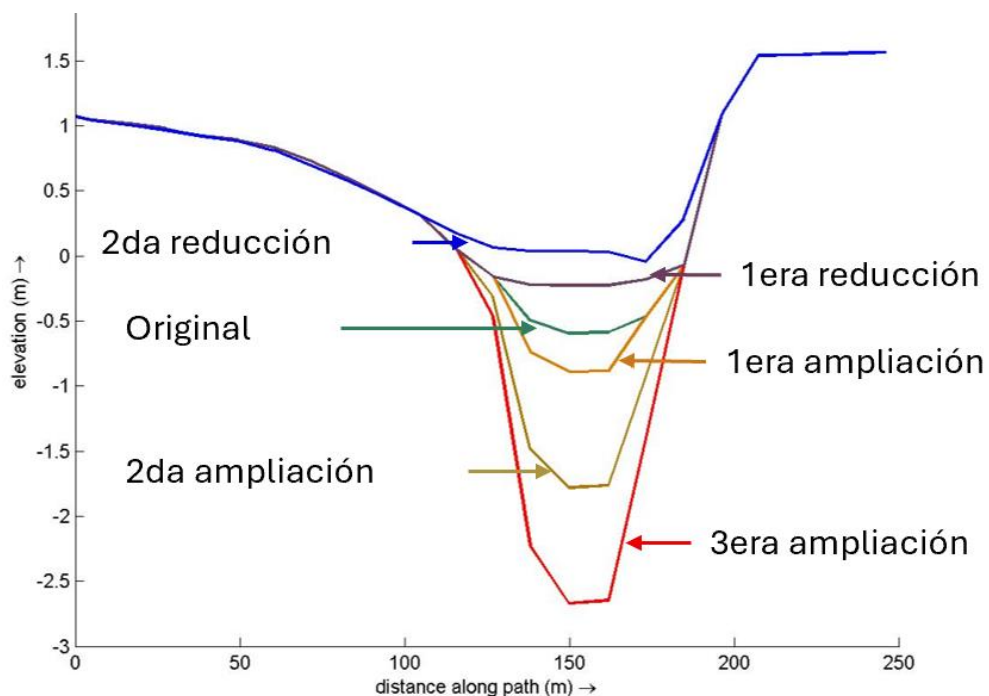


Figura 12 Forma del lecho inicial

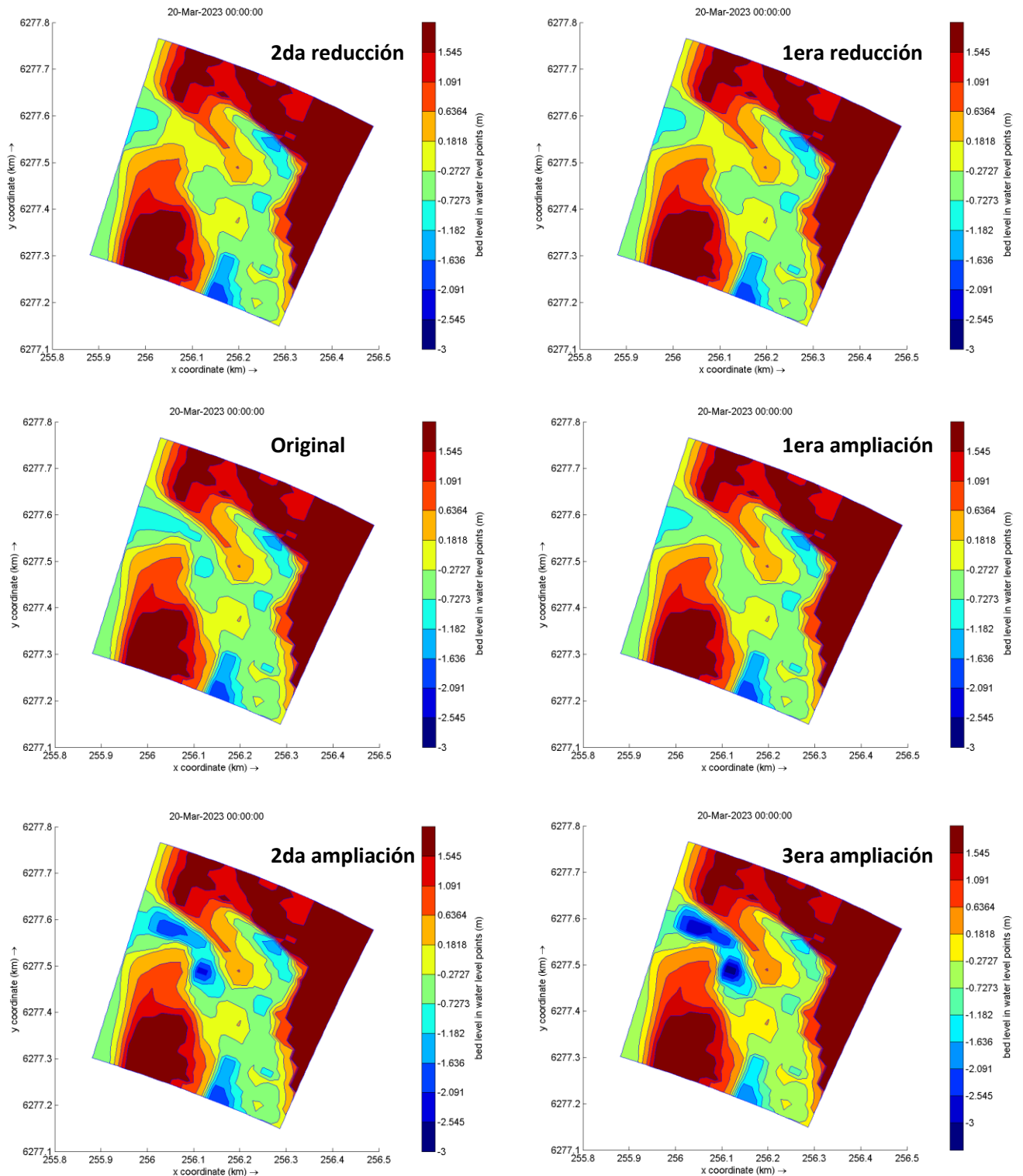


Figura 13. Variación canal entrada de marea según modificación vista en planta, Fuente propia.

### Nivel de la marea, rangos de marea a estudiar y prisma de marea.

Para analizar el nivel de marea en el área del estuario, se definió una zona de cobertura de datos en el modelo (Figura 14). Dentro de esta cobertura, se registró el nivel del agua en cada paso de tiempo, calculando un promedio general de altura en cada intervalo, lo cual facilitó el manejo y análisis de los datos. Este promedio permitió identificar la variación de altura en la ensenada, generando una onda de nivel de agua que se vincula con la señal de marea que ingresa a la cuenca por el canal de entrada previamente definido (Tabla 1).

En la Figura 15 se presenta la señal de marea obtenida a partir de sus componentes, comparada con el nivel de agua en la ensenada, lo que permite corroborar su similitud. La diferencia de tiempo entre ambas señales se debe a la distancia que la onda de marea recorre hacia el interior de la desembocadura.

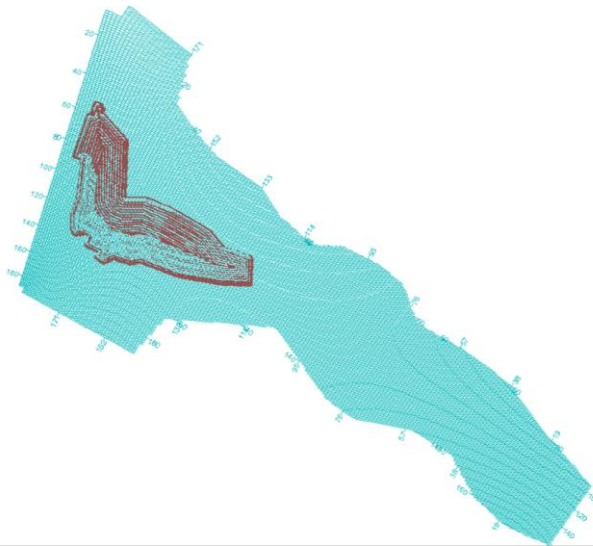


Figura 14. Cobertura de datos para nivel del agua por paso del tiempo de simulación. Fuente: QUICKPLOT

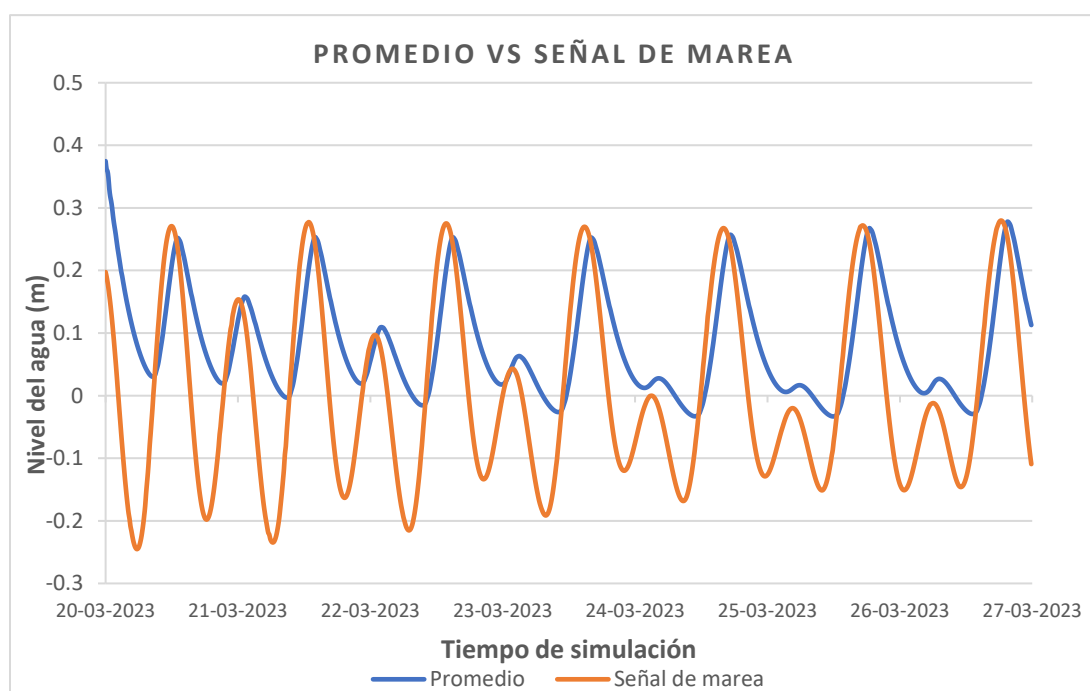


Figura 15. Nivel del agua por paso del tiempo altura promediada vs señal de marea

El rango de marea que se estudia corresponde al momento en que la marea se encuentra en refluo, permitiendo capturar la máxima velocidad de flujo en dirección de salida de la desembocadura hacia el mar. Para identificar estos momentos, se utiliza un código en Python que detecta los puntos máximos y mínimos de la marea, así como el momento exacto de la simulación en el que ocurren. Esta información permite definir los rangos de marea como un intervalo de paso de tiempo (delta de tiempo), descartando aquellos de menor magnitud y concentrándose en los de mayor amplitud, donde la diferencia entre marea alta y baja es significativa, además obtener la diferencia del nivel del agua  $\Delta H$ , en la Figura 16 se muestra un esquema de obtención de ambos datos.

Con el delta de tiempo definido, se recopilan los datos de velocidad y área correspondientes a cada intervalo, promediando estos valores para obtener un conjunto de datos representativo de área y velocidad en cada rango mareal.

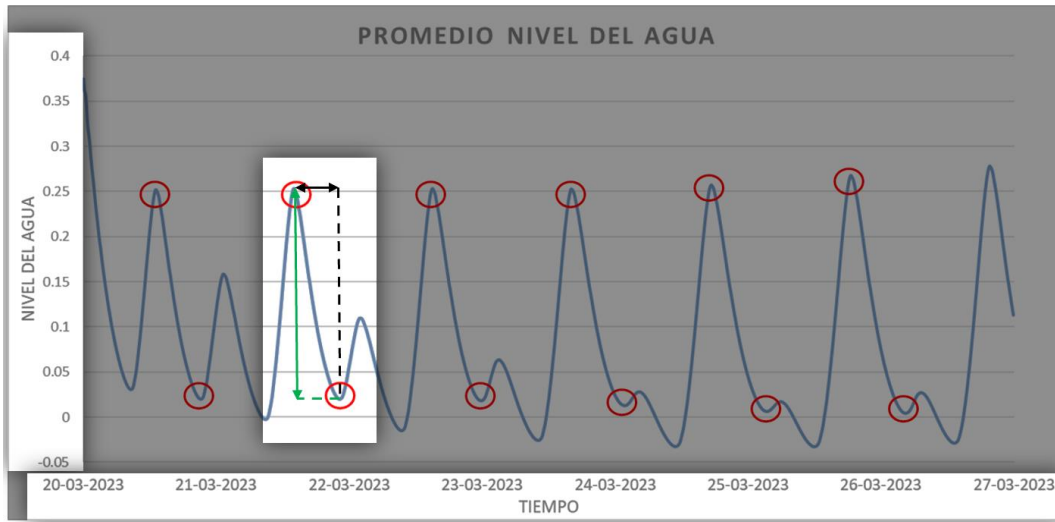


Figura 16. Explicación puntos máximos y mínimos; y rango mareal (delta de tiempo)

### Obtención Prisma mareal

El prisma mareal corresponde al volumen de agua que genera la marea alta sobre la cuenca respecto cuando se encuentra en marea baja. Para el cálculo del prisma de marea se utiliza la ecuación 1 en donde se encuentra el valor de Delta H y las áreas de la superficie del agua que se puede encontrar del modelo mismo.

$$P = \Delta H \times \frac{(A_1 + A_2)}{2}$$

1

En donde

- $\Delta H$  : Diferencia del nivel del agua entre punto máximo y mínimo.
- $A_1$  : Área de la superficie del agua en marea alta
- $A_2$  : Área de la superficie del agua en marea baja.

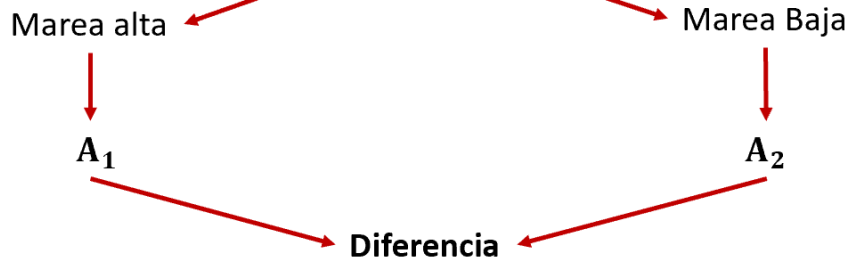
Para el cálculo del  $A_1$  y  $A_2$  se utilizó el software Global Mapper en donde se definieron un total de 7 polígonos (Figura 17) para el cálculo del área, además se define una función para el cálculo de la superficie del agua (zona blanca) por cada polígono estudiado para una marea alta y marea baja.

Se evalúa la diferencia de área encontrada entre marea alta y marea baja, considerando el polígono donde la diferencia de área es constante para los polígonos subsiguientes, dando a entender que la influencia de la marea no llega hacia aguas arriba, en la Figura 18 se muestra un esquema explicativo del proceso de cálculo y ejemplo de elección de polígono a usar.



Figura 17. Variación de polígonos para obtención de área de la superficie del agua para el prisma mareal

$$Area_{sup} = Area\ poligono - n^{\circ}de\ celdas_{encerradas} \times (10m \times 20m)$$



	Pol. 1	Pol. 2	Pol. 3	Pol. 4	Pol. 5	Pol. 6	Pol. 7
Diferencia (m <sup>2</sup> )	5	8	10	12	12	12	12

Figura 18. Esquema explicativo para proceso de elección de polígono para cálculo de prisma mareal

### 3.10 Velocidad media, Área transversal y velocidad de equilibrio.

#### Obtención de velocidad

Al ser un modelo 2D, la velocidad de la sección se calcula como un promedio vertical por cada punto de la sección transversal de estudio. Consideraremos los datos de velocidad vertical mayores a 0.01 m/s (Figura 19) para el cálculo de la velocidad promedio general de la sección y se aplicará este criterio en cada paso del tiempo de simulación. Aplicando este criterio en cada intervalo temporal, se obtiene una lista de velocidades promedio, en donde los datos resultantes se seleccionan en los rangos mareales definidos. En el diagrama de la Figura 20 se muestra el flujo del proceso para ordenar y presentar estos datos.

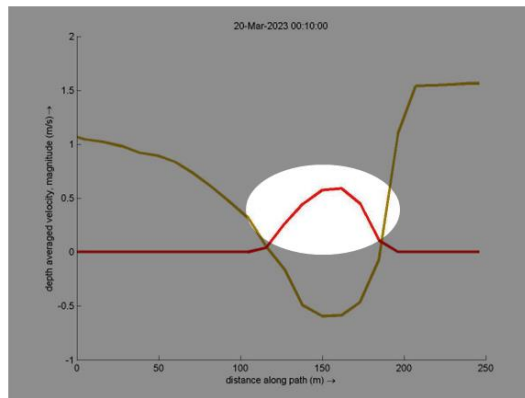


Figura 19. Ejemplo velocidades mayores a 0.01 m/s

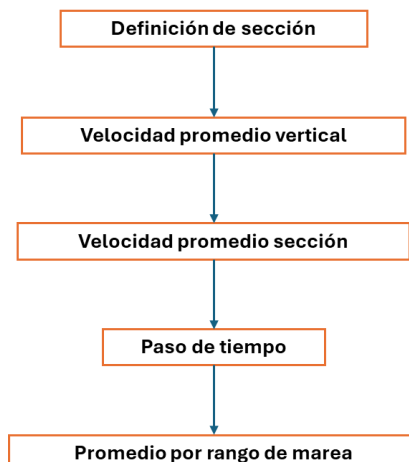


Figura 20. Diagrama de pasos para cálculo de velocidad para Diagrama de Escoffier

#### Obtención de Área de la sección transversal del canal de entrada

Para obtener el área de la sección, se define una cota de referencia que permite calcular el área bajo esta. En este estudio, se establece una cota de 0 m, ya que el nivel del agua varía en torno a este

valor a lo largo de la simulación. El área tenderá a aumentar o disminuir dependiendo de si hay erosión o deposición de sedimentos. La Figura 21 ilustra el flujo del proceso para la obtención de este dato.

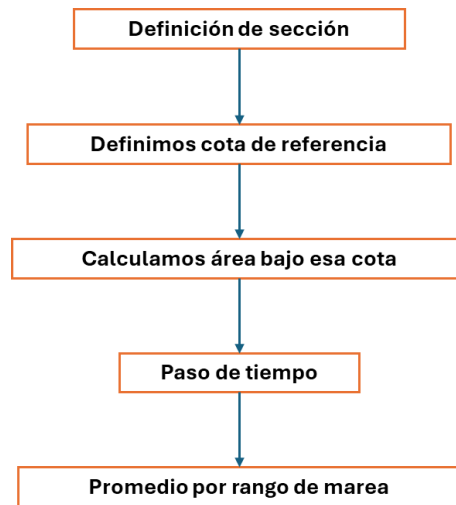


Figura 21 Diagrama de pasos para cálculo de área para Diagrama de Escoffier

### Obtención de velocidad de equilibrio

Representa unas de las curvas del Diagrama de Escoffier donde relaciona el área de la sección transversal, el periodo de marea y parámetros empíricos que son obtenidos empíricamente de estudios previos para zonas específicas, la ecuación 2 refleja el comportamiento de la curva:

$$V_c = \frac{\pi A^{\frac{1}{q}-1}}{TC^{\frac{1}{q}}} \quad 2$$

Donde:

- A : Área sección transversal de entrada (m<sup>2</sup>)
- T : Periodo de marea (seg)
- C y q : Parámetros empíricos basados en estudios en diferentes partes del Mundo.

Dados que los datos de estudios previos de C y q no corresponde a la zona de las costas chilenas, se decide encontrar los datos de C y q mediante modelaciones que sean fenológicamente similares, es decir un comportamiento morfológico e hidrodinamicamente similares. Para cumplir esas condiciones se hicieron tres modelaciones adicionales aparte en donde la diferencia es que no se consideró un flujo fluvial (Q=0m<sup>3</sup>/s) para así obtener la influencia directamente de la marea para la construcción de la curva, dado que por Tung y Stive (2009) la curva de equilibrio está dada por el efecto costero, es decir la deriva litoral.

Para que sea fenológicamente similares las simulaciones numéricas a utilizar deben tener la misma o parecida:

- Deriva litoral
- Diámetro de grano (d<sub>50</sub>)
- Periodo de la Marea (T)

En estudios que se usó este método variaban la amplitud de la marea y el área de la bahía, por ende, aprovechando que se modificaron las secciones de entrada iniciales, hicimos un supuesto que sería nuestra variación de área de bahía para encontrar los datos de C y q.

Para obtener los valores de C y q se estudió la relación empírica inicial entre el Área y el Prisma propuesta por O'Brien (1931) que corresponde a la siguiente ecuación:

$$A = CP^q \quad 3$$

Donde P corresponde al valor del prisma de marea.

Para encontrar los valores de C y q para el caso en la zona de estudio se realizó modelo con un caudal nulo (Q=0m<sup>3</sup>/s) en donde se tuvo un modelo con sección original, otro con la 1era ampliación y uno con la 1era reducción ya antes mencionada.

También para el análisis se optó por incorporar los datos de prisma marea y áreas finales obtenidos para un Caudal de 2.5m<sup>3</sup>/s para el caso de la sección original y con 1era ampliación, obteniendo un total de 5 datos para la relación que serán presentados más adelante.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se puede observar que, en la sección de entrada de marea, la dirección del flujo varía de acuerdo con la fase de la marea astronómica en la simulación. En la Figura 22, se presenta una condición de marea alta, en la cual la influencia de la marea supera al caudal, generando un flujo hacia el interior de la desembocadura. En cambio, la Figura 23 muestra una situación de marea baja, donde el caudal predomina y dirige el flujo hacia el mar, evidenciando el dinamismo constante del modelo bajo la interacción con la marea.

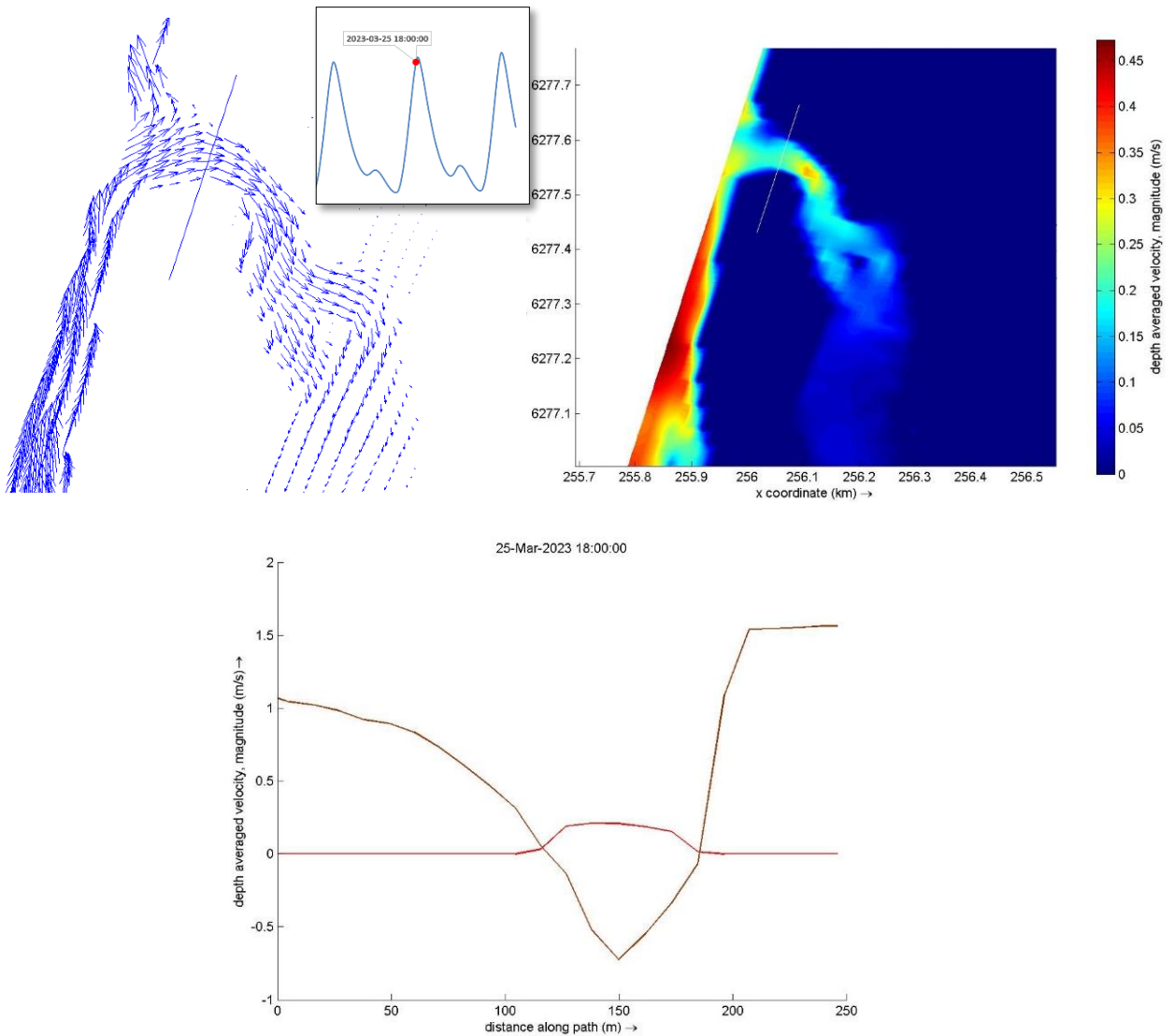


Figura 22. Magnitud y dirección de velocidad promedio vertical para un caudal de 2.5 m<sup>3</sup>/s (Entrada de caudal). Fuente: QUICKPLOT

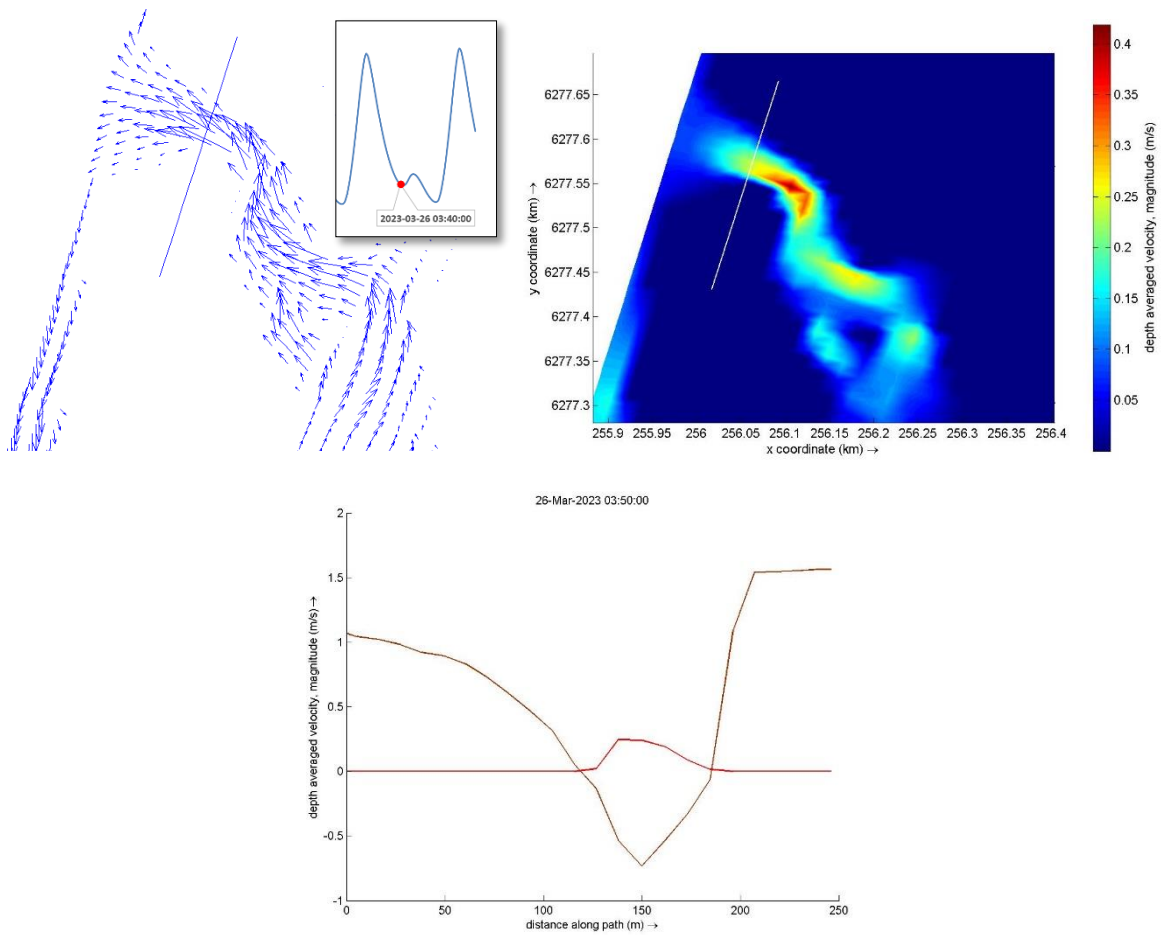


Figura 23. Magnitud y dirección de velocidad promedio vertical para un caudal de 2.5 m<sup>3</sup>/s (Salida de caudal). Fuente: QUICKPLOT

#### 4.1 Caudal bajo (Q=2.5 m<sup>3</sup>/s)

El caudal más bajo representa la condición más crítica para la estabilidad de la desembocadura, ya que la fuerza del flujo es insuficiente para provocar erosión y puede incluso dar lugar a la sedimentación en la sección debido a la menor velocidad. A continuación, se presentan dos gráficos que ilustran dos situaciones contrastantes: erosión (Figura 24) y depositación (Figura 26), según la forma de la sección transversal inicial que se analiza.

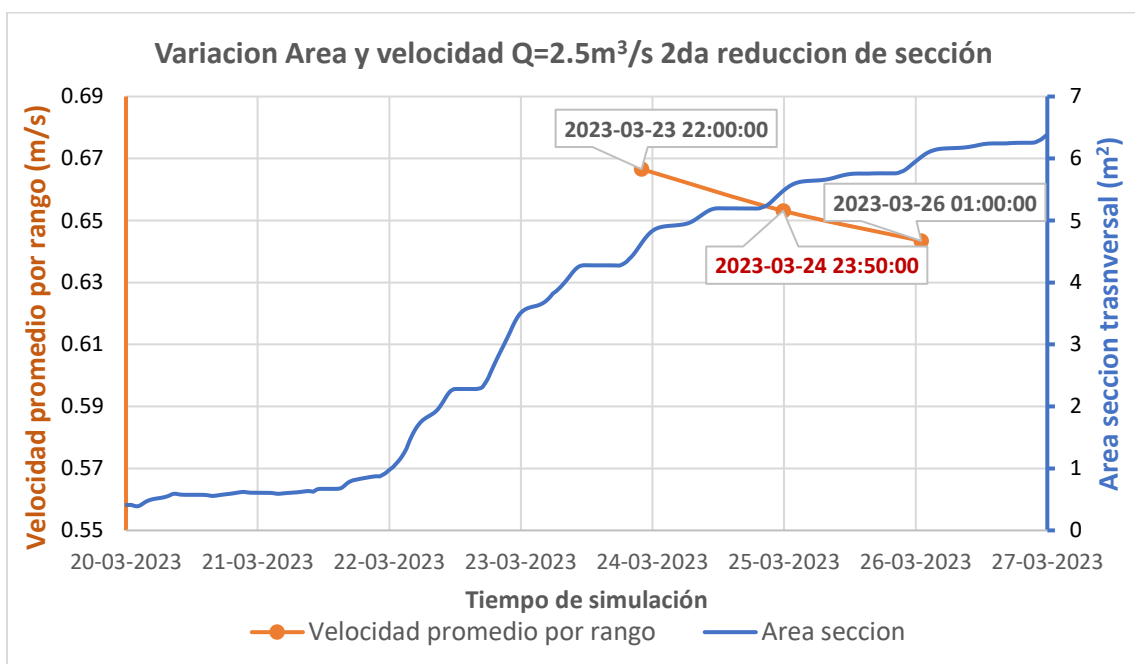


Figura 24. Variación Área de sección transversal y velocidad promediada en rango mareal para caudal del 2.5m<sup>3</sup>/s (2da reducción de sección)

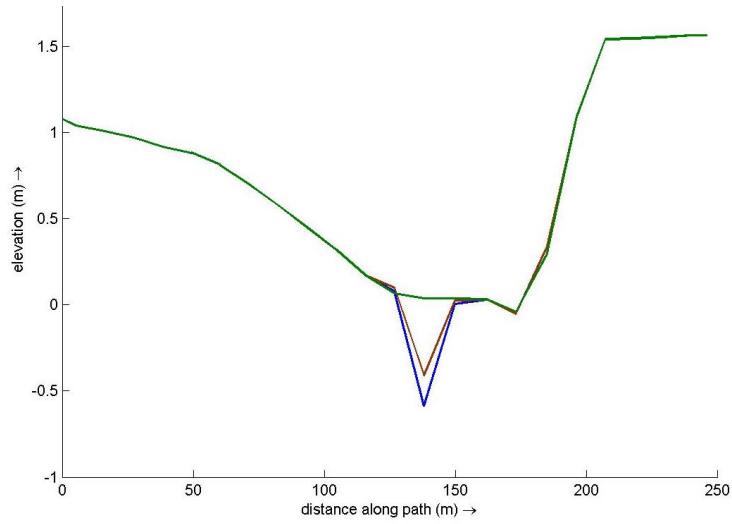


Figura 25. Variación lecho sección transversal  $Q=2.5m^3/s$  (2da reducción). Fuente: QUICKPLOT

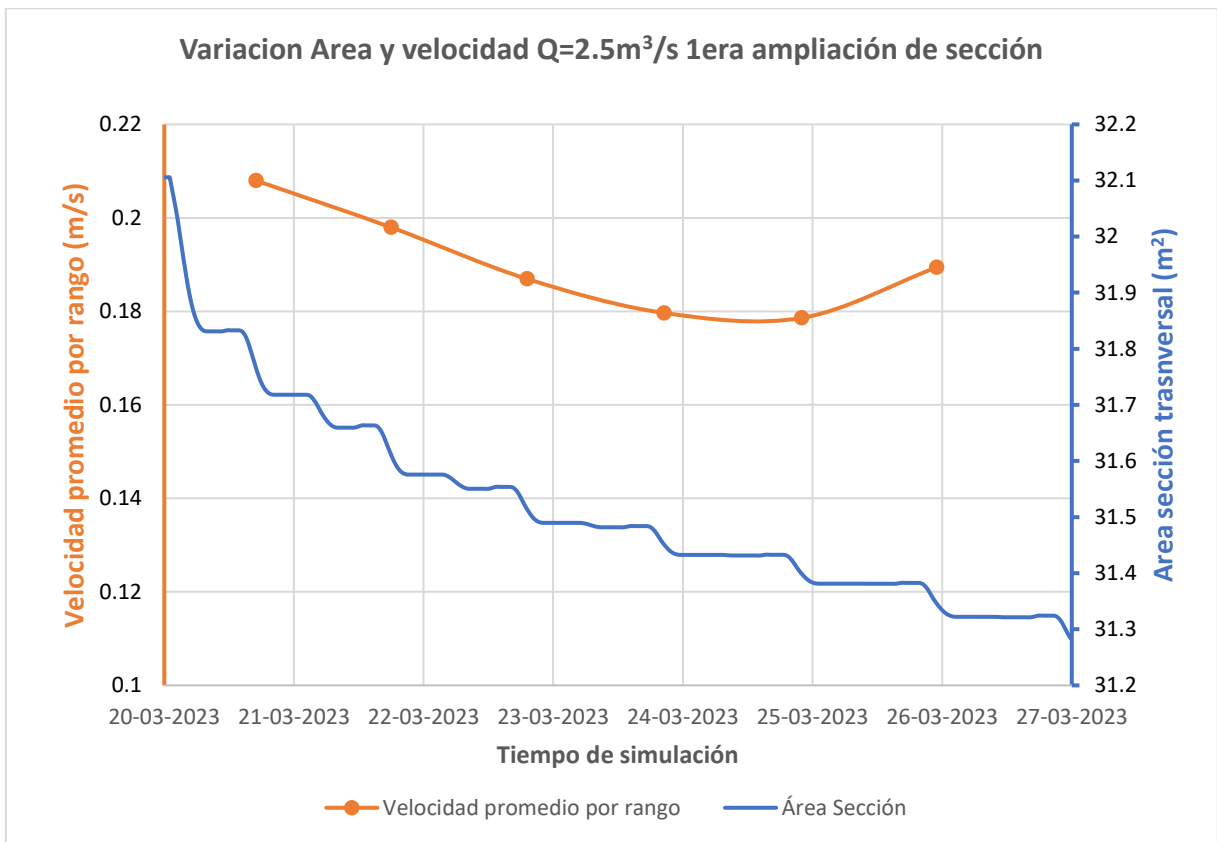


Figura 26. Variación Área de sección transversal y velocidad promediada por rango para caudal de  $2.5m^3/s$  (1era ampliación)

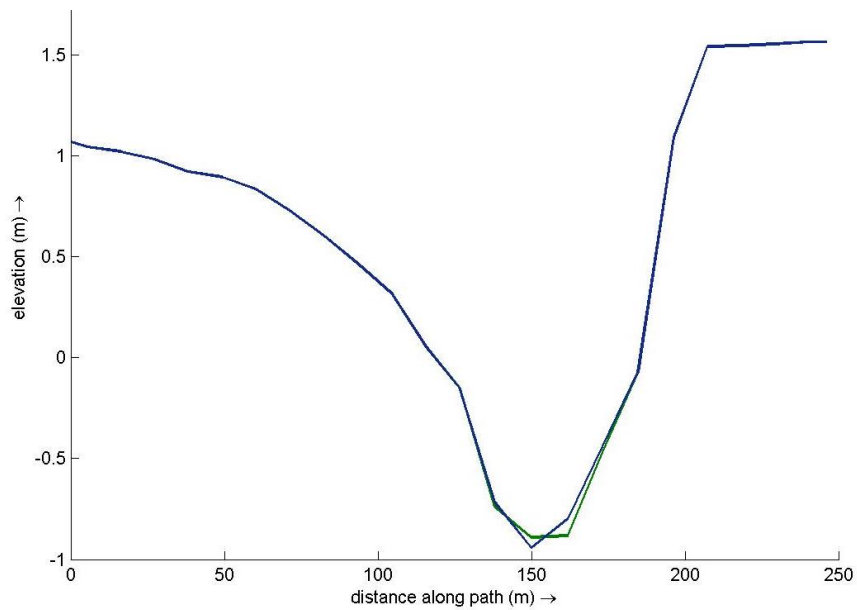


Figura 27. Variación lecho sección transversal  $Q=2.5 m^3/s$  (1era ampliación). Fuente: QUICKPLOT

### 4.2 Caudal intermedio ( $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Para este caudal, la sección tendrá, por defecto, una mayor área transversal debido al incremento en las forzantes. En la Figura 28, se observa cómo, en una condición de sección transversal sin modificaciones (original), el área de la sección comienza a aumentar gradualmente, mientras que la velocidad promedio disminuye, excepto en el último valor, que muestra un ligero incremento. La Figura 29 muestra la variación del lecho en tres puntos correspondientes a las fechas intermedias entre marea alta y baja de su respectivo rango.

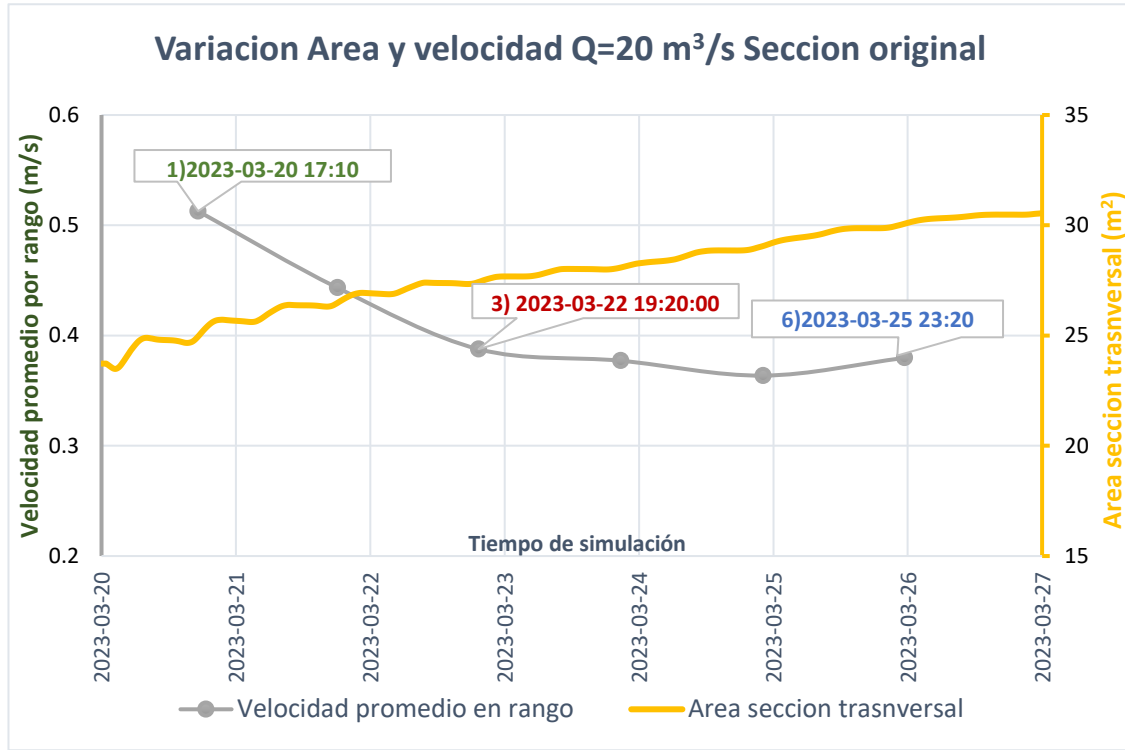


Figura 28. Variación Área de sección transversal y velocidad promediada por rango para caudal de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  (sección original)

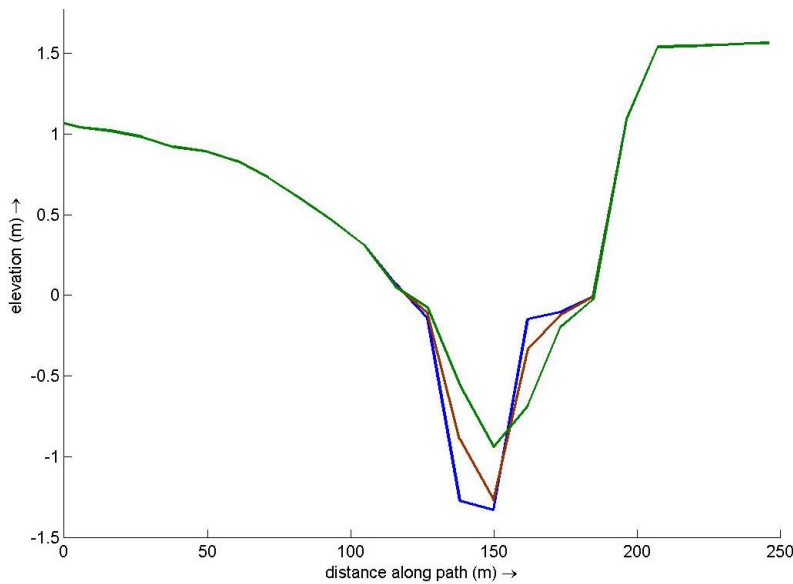


Figura 29 Variación lecho sección transversal  $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$  (Sección original)  
Fuente: QUICKPLOT

### 4.3 Caudal alto ( $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Para el caudal de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , las forzantes son lo suficientemente fuertes como para generar erosión en la sección transversal, incluso en una sección ya ampliada. En la Figura 30, se muestra el incremento del área de la sección, que ya cuenta con la máxima ampliación inicial. Esto sugiere que, para este caudal, el estado de equilibrio está aún lejos de alcanzarse en la sección final obtenida en la simulación.

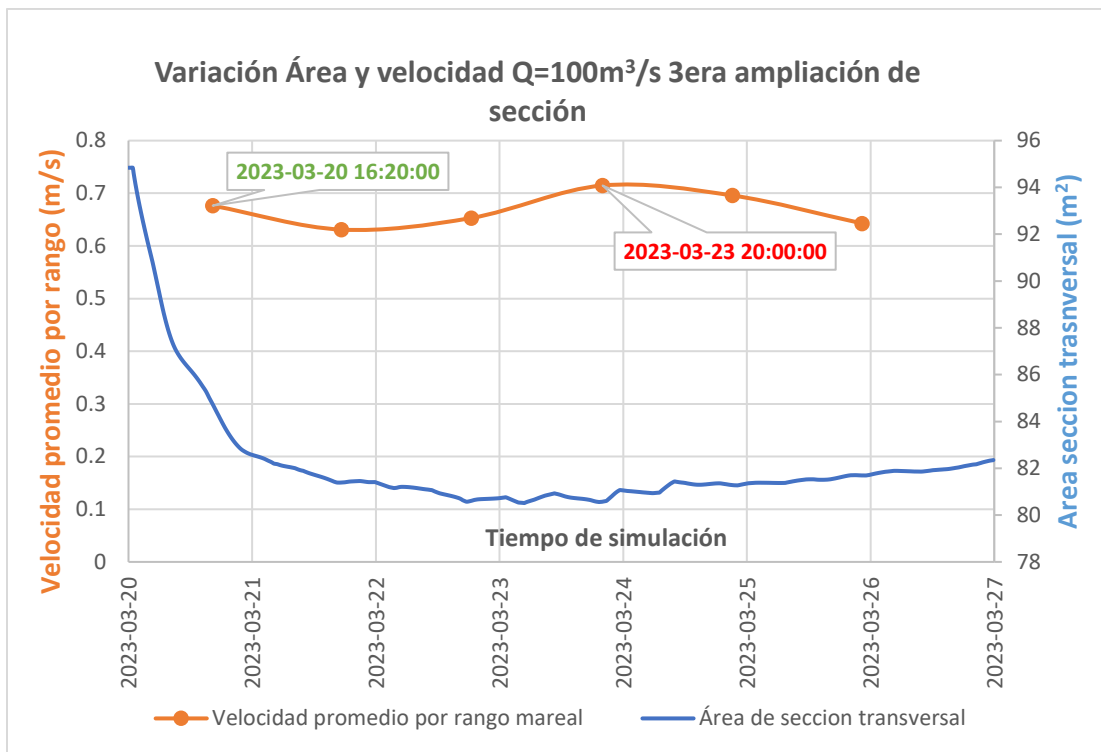


Figura 30. Variación Área de sección transversal y velocidad promediada por rango para caudal de  $100\text{m}^3/\text{s}$  (3era ampliación)

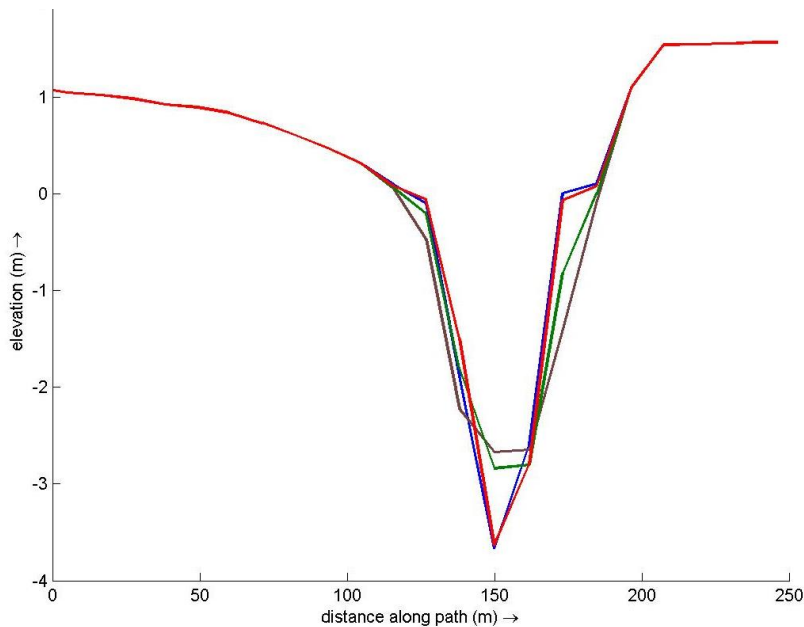


Figura 31. Variación lecho sección transversal  $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$  (3era ampliación)

#### 4.4 Convergencia de área por caudal

Dado que el modelo hidrodinámico también es morfodinámico, se observan variaciones tanto en el nivel del lecho como en el ancho y la profundidad de la sección transversal. En nuestro caso, las forzantes principales, como la marea y el caudal, han generado cambios en la sección, lo que revela dos tendencias predominantes: la erosión y la deposición de sedimentos. A continuación, se analizarán las convergencias entre las áreas de la sección transversal en relación con las variaciones de caudal.

##### Caudal de $2.5\text{m}^3/\text{s}$

Para un caudal de  $2.5\text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 32), el área de la sección transversal presenta una tendencia a la erosión en las dos configuraciones de reducción. En cambio, la sección original y la primera ampliación muestran una disminución en el área, lo que sugiere deposición de sedimentos. Esta tendencia converge en un rango de  $20\text{ m}^2$ , indicando un área de sección transversal de equilibrio, o el punto de intersección, donde las fuerzas de erosión y deposición se equilibran.

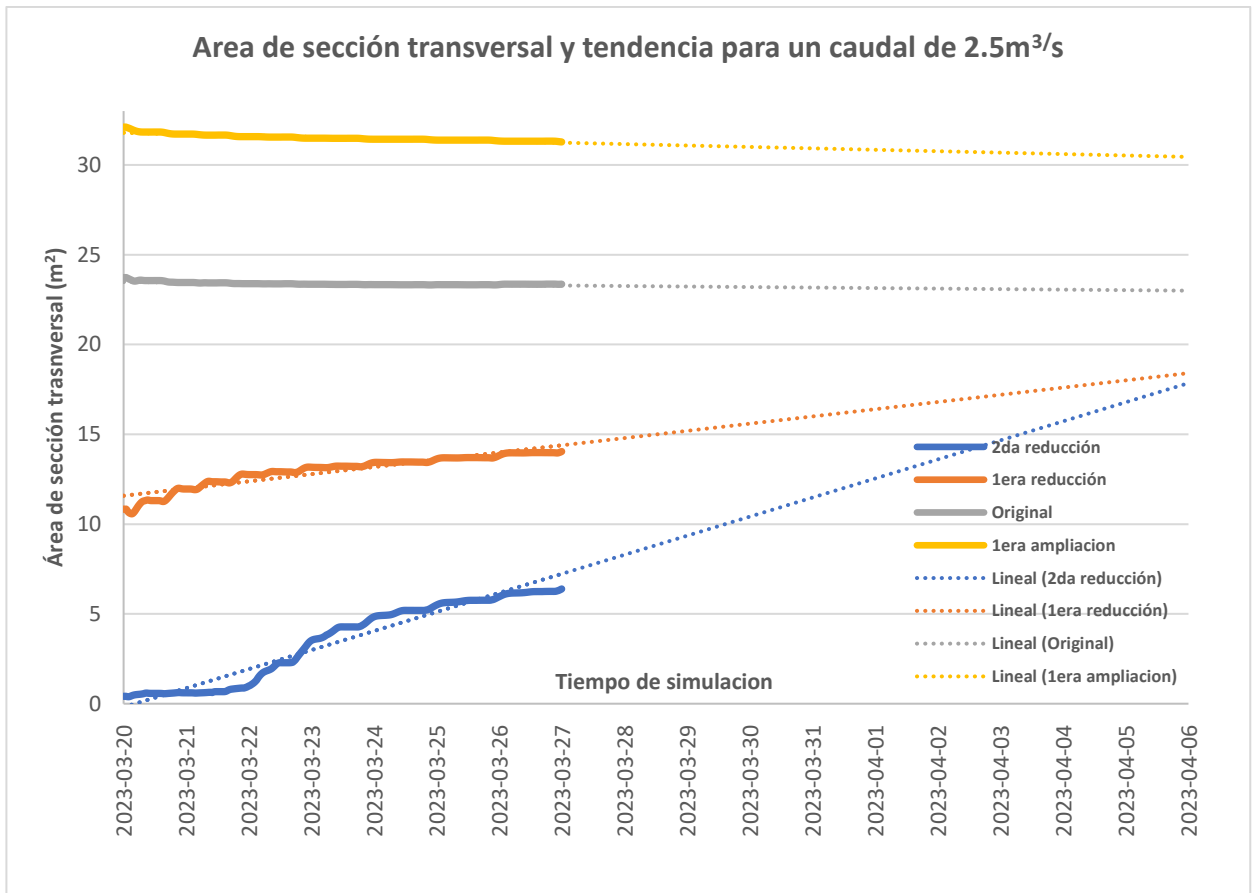


Figura 32. Variación de Área para una caudal de  $Q=2.5\text{m}^3/\text{s}$ .

### Caudal de $20\text{m}^3/\text{s}$

Para un caudal de  $20\text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 33), el modelo con la sección de entrada modificada (segunda ampliación) muestra una tendencia a reducir el área de la sección transversal, lo que sugiere deposición de sedimentos. En contraste, las otras configuraciones iniciales del lecho presentan una tendencia de aumento en el área de la sección, lo cual indica erosión. Esto sugiere que el valor del área de la sección transversal convergería en un rango de **50 m<sup>2</sup>**, lo que representaría un punto de equilibrio en la boca del canal de entrada, donde se balancean los procesos de erosión y deposición.

Cabe señalar que, en comparación con los otros modelos, el caso de la segunda reducción parece no ser tan representativo como se esperaba, ya que muestra una tendencia menos marcada o significativa frente a las condiciones iniciales.

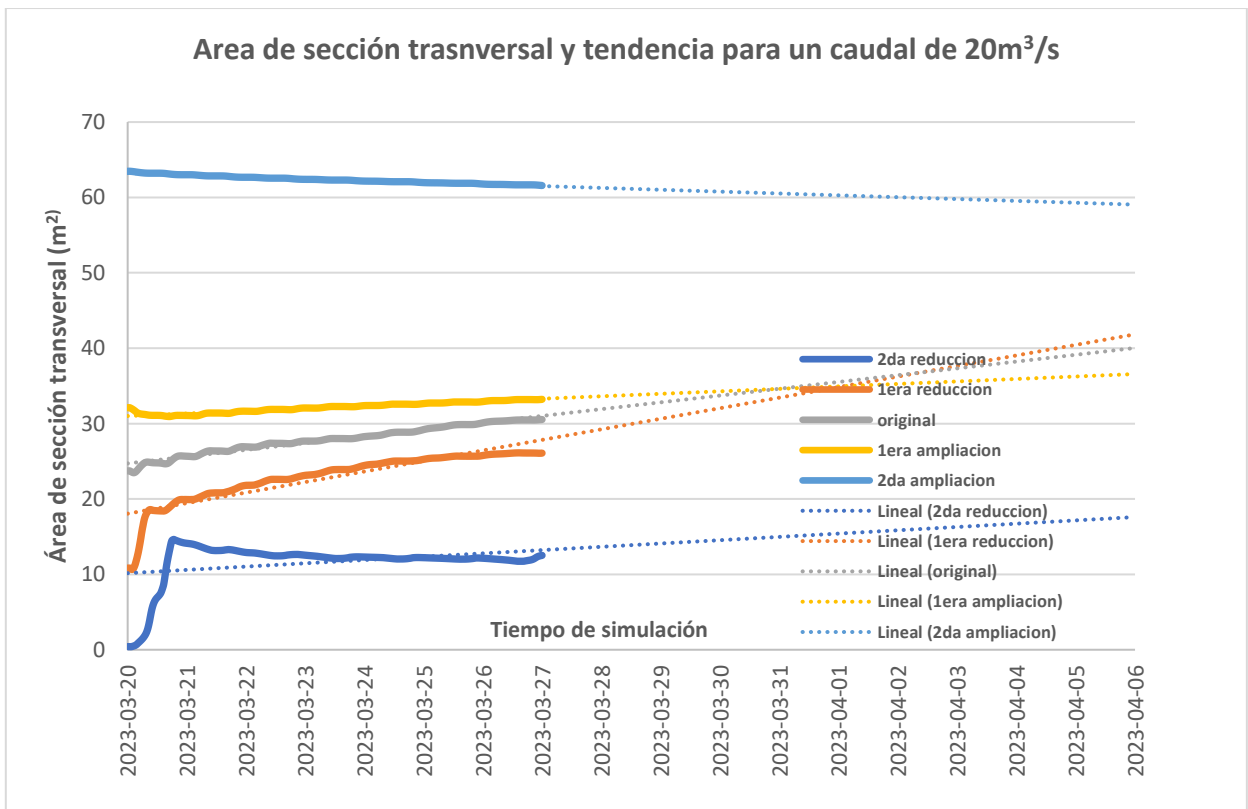


Figura 33. Variación de Área para una caudal de  $Q=100\text{m}^3/\text{s}$ .

### Caudal de 100m<sup>3</sup>/s

Para el caudal de 100 m<sup>3</sup>/s (Figura 34), ya no se observa una tendencia de deposición en la entrada de la desembocadura, lo cual es consistente con la magnitud del caudal. Esto sugiere que la entrada de la desembocadura continúa en un proceso de erosión y aún no ha alcanzado una sección de equilibrio, en la cual las fuerzas de erosión y deposición se compensen prácticamente en su totalidad, pero se puede analizar que la sección podría estar alrededor de los **100-110 m<sup>2</sup>**.

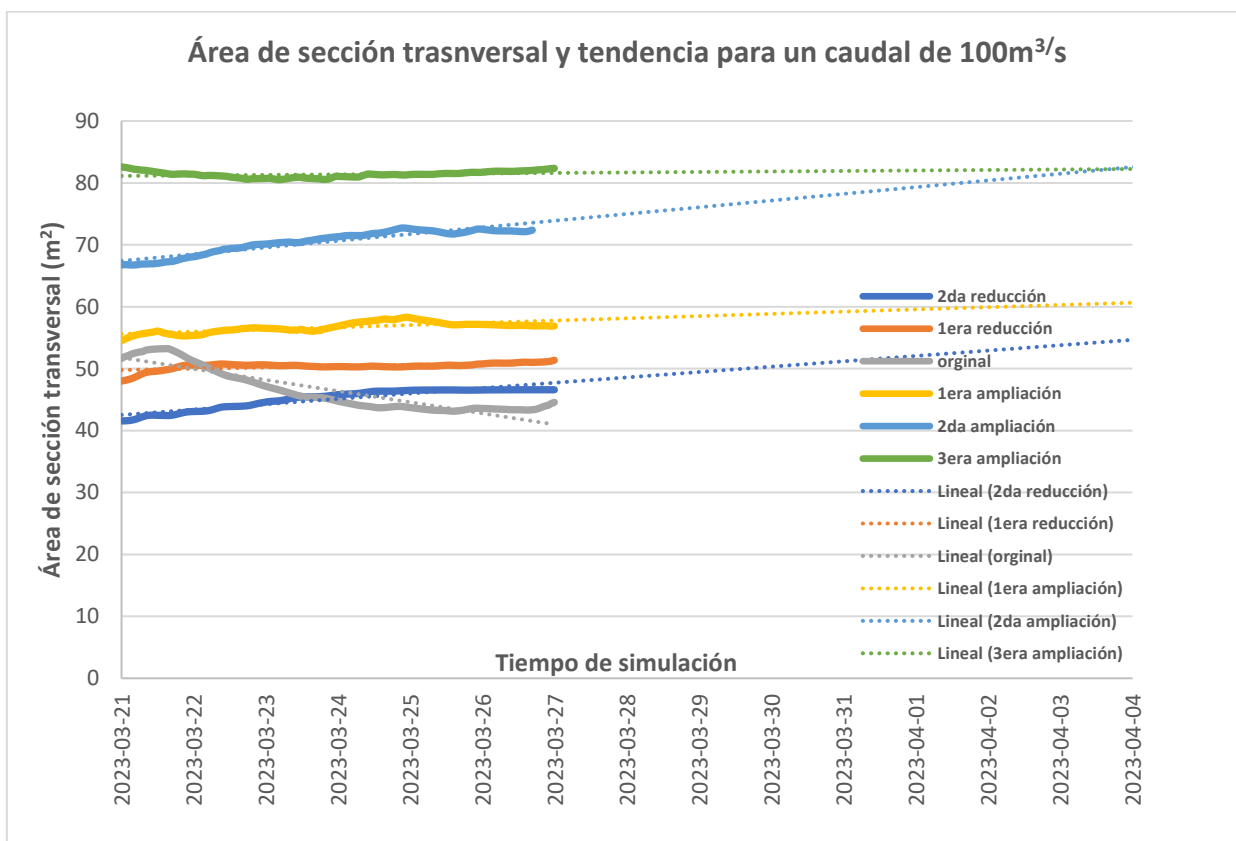


Figura 34. Variación de Área para una caudal de  $Q=100m^3/s$ .

### 4.5 Construcción del Diagrama de Escoffier

#### Datos recopilados

A continuación, se presenta los resultados para la construcción del diagrama de Escoffier, para la curva de cierre se consideró los últimos valores de cada simulación ya considerando el modelo se encontraba estable, en las tablas 5, 6 y 7 se entregan los resultados por tipo de sección según el caudal usado en la simulación.

Tabla 4. Datos finales de Área y velocidad para un Caudal de 2.5m<sup>3</sup>/s

	Área (m <sup>2</sup> )	V promedio (m/s)	V máxima (m/s)
<b>2da reducción</b>	5.99	0.64	0.91
<b>1era reducción</b>	13.84	0.41	0.72
<b>Original</b>	23.34	0.23	0.31
<b>1era ampliación</b>	31.35	0.19	0.25
<b>2da ampliación</b>	63.46	0.11	0.16
<b>3era ampliación</b>	-	-	-

Tabla 5. Datos finales de Área y velocidad para un Caudal de 20m<sup>3</sup>/s

	Área (m <sup>2</sup> )	V promedio (m/s)	V máxima (m/s)
<b>2da reducción</b>	12.10	0.78	0.88
<b>1era reducción</b>	25.77	0.42	0.48
<b>Original</b>	30.04	0.38	0.43
<b>1era ampliación</b>	32.91	0.36	0.42
<b>2da ampliación</b>	61.81	0.25	0.28
<b>3era ampliación</b>	94.71	0.17	0.19

Tabla 6. Datos finales de Área y velocidad para un Caudal de 100m<sup>3</sup>/s

	Área (m <sup>2</sup> )	V promedio (m/s)	V máxima (m/s)
<b>2da reducción</b>	46.55	1.67	1.96
<b>1era reducción</b>	50.69	1.66	1.89
<b>Original</b>	43.55	1.51	1.65
<b>1era ampliación</b>	57.15	1.18	1.31
<b>2da ampliación</b>	72.38	0.84	0.95
<b>3era ampliación</b>	81.71	0.72	0.90

En la tabla 8 se muestra el resumen de datos de área y prisma mareal de las simulaciones a utilizar en la relación de A-P para la obtención de los parámetros empíricos C y q, en donde la Figura 35 se muestra el resultado de la relación con la ecuación y R cuadrado dado.

Tabla 7. Datos finales de Prisma, Área y periodo de marea para curva de equilibrio con marea original.

	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Prisma (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Periodo de marea T (hrs)
<b>1era ampliación</b>	-	119469	32.19	8.7
	2.5	108896	31.35	9.5
<b>Original</b>	-	96404	23.41	9.0
	2.5	93251	23.34	9.8
<b>1era reducción</b>	-	83835	20.13	9.0
			Promedio	9.2

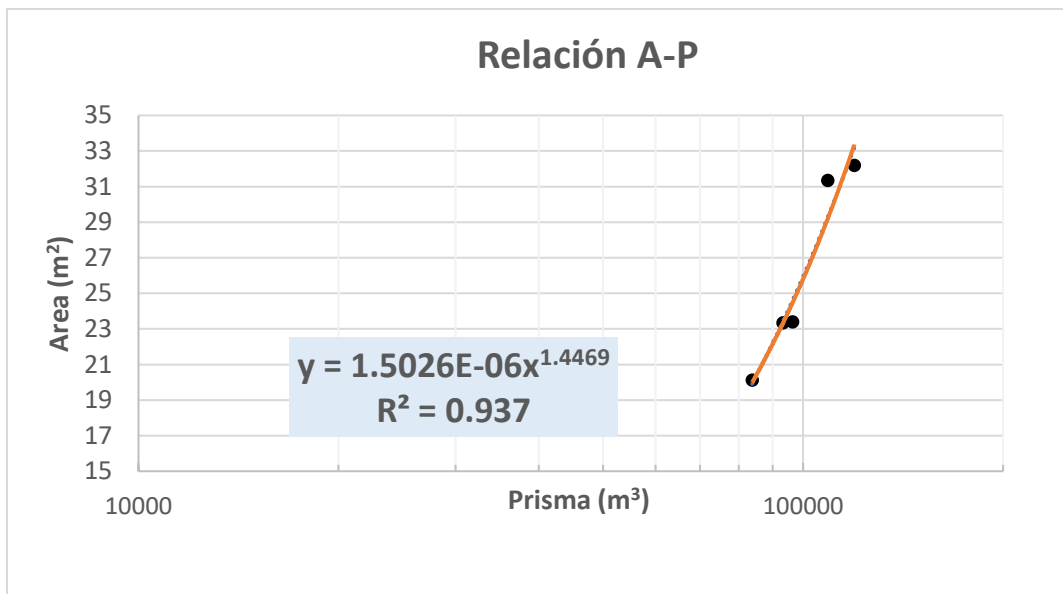


Figura 35. Relación de Área transversal y prisma mareal para datos de tabla 8.

### Curva de cierre y de equilibrio

De la Figura 35 la relación entre el área y el prisma nos entrega un valor de  $C = 1.5026E-06$  y un valor de  $q = 1.4469$ . Teniendo en cuenta el  $T$  promedio obtenido en la tabla 8 se puede generar la ecuación 6 de la curva de equilibrio.

En la Figura 36 se muestra el resultado de la curva de equilibrio y también los puntos resultantes mostrados en la tabla 5, 6 y 7 que genera diferentes curvas de cierre según el caudal en simulación.

Para la curva cierre según el tipo de caudal, la línea continua corresponde a una suposición sólida de la curva mientras que la línea punteada corresponde a la incertidumbre que genera el modelo.

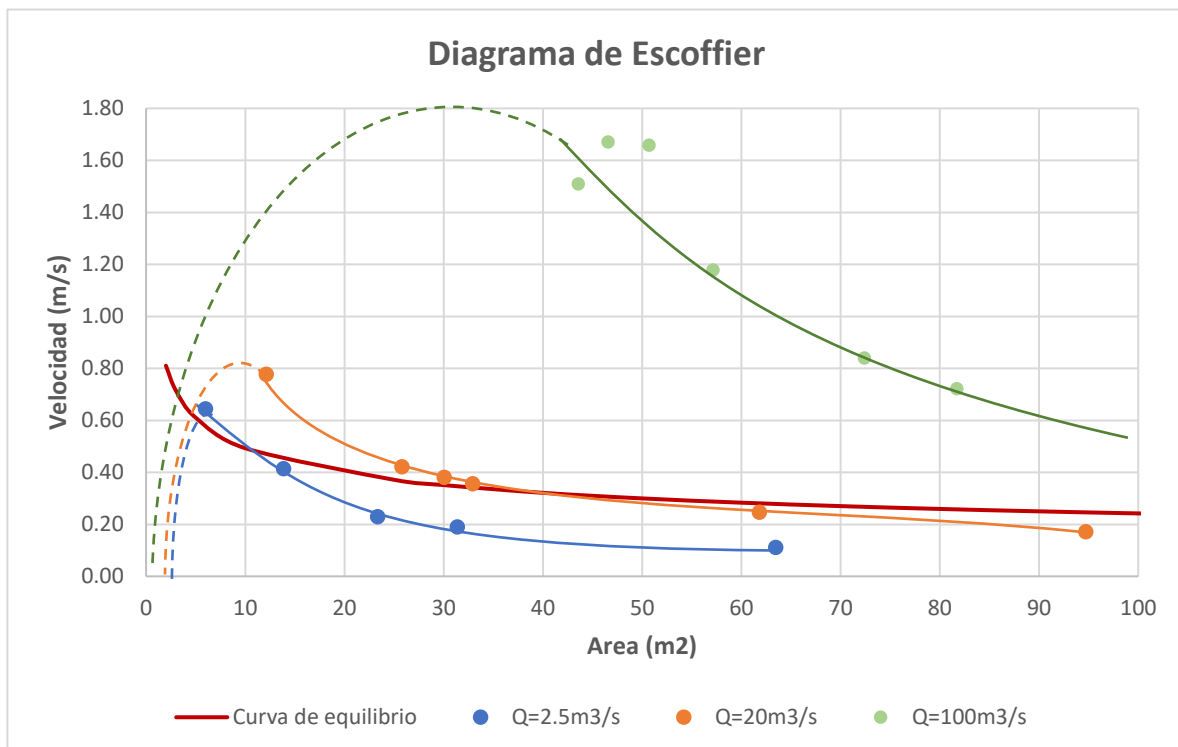


Figura 36. Diagrama de Escoffier con variación de caudal

Para los caudales de  $2.5\text{m}^3/\text{s}$  y  $20\text{m}^3/\text{s}$  se logra encontrar intersecciones entre ambos tipos de curva, en donde para un caudal de  $20\text{m}^3/\text{s}$  el punto de equilibrio estable correspondería para un área de entrada de marea de  $37\text{m}^2$  aproximadamente, en cambio para un caudal de  $2.5\text{m}^3/\text{s}$  se encuentra el equilibrio en un área mucho menor que correspondería a un valor de  $12\text{m}^2$  aproximadamente.

Destacando que a pesar de haber punto de equilibrio estable para un caudal bajo de  $2.5\text{m}^3/\text{s}$ , que es caudal representativo para los últimos veranos, se ve una zona de poca estabilidad e incluso cerca de la no intersección de esta, que implicaría la no estabilidad de la boca de entrada y por ende un futuro cierre.

## 5. DISCUSIÓN

En esta investigación se evaluaron las condiciones hidrodinámicas necesarias para garantizar la estabilidad de la barra en la desembocadura del río Maipo, utilizando modelación numérica y el criterio de estabilidad de Escoffier. Los resultados obtenidos destacan la importancia de mantener un equilibrio dinámico entre el caudal fluvial y las mareas para evitar el cierre de la barra. En este sentido, controlar el caudal que llega a la desembocadura se presenta como una estrategia clave, ya que permite anticipar y mitigar posibles cierres. Este equilibrio no solo es esencial para prevenir alteraciones en la conectividad entre el río y el océano, sino que también resulta fundamental para la conservación de los ecosistemas locales y el sostenimiento de las actividades económicas que dependen de esta conectividad. Estos hallazgos subrayan la necesidad de una gestión integrada que considere tanto los aspectos hidrodinámicos como los socioambientales en la planificación de intervenciones en la desembocadura del río Maipo.

### Limitaciones del modelo

El uso de un coeficiente de rugosidad constante y valores predeterminados para ciertos parámetros, como la viscosidad y difusividad, introduce una simplificación en el modelo que puede afectar la precisión en algunas zonas específicas. Además, la falta de datos batimétricos más extensos hacia el mar abierto limita la representación completa del sistema. Esta limitación se refleja en la zona izquierda de la curva de Escoffier, donde no se incorporó el efecto del oleaje, el cual es un factor clave que genera deriva litoral y por ende en la curva de equilibrio.

### Perspectivas para estudios futuros

Para mejorar la precisión del modelo y reducir la incertidumbre, se recomienda realizar estudios que incluyan datos batimétricos adicionales en zonas más alejadas de la desembocadura, así como incorporar variaciones espaciales en el coeficiente de rugosidad. También sería beneficioso integrar el efecto de la deriva litoral causada por el oleaje, lo que permitiría una representación más completa de la dinámica sedimentaria y una gestión costera más efectiva.

## 6. CONCLUSIONES

Esta investigación aporta conocimientos clave para la gestión y conservación de sistemas estuarinos, con énfasis en la dinámica de la desembocadura del río Maipo. La aplicación de modelos hidrodinámicos permitió evaluar de manera precisa las condiciones necesarias para mantener la estabilidad de la barra de arena, destacando la importancia de comprender las interacciones entre el caudal y las mareas en contextos de variabilidad hídrica.

El enfoque metodológico basado en la construcción de la curva de Escoffier representa una herramienta útil para anticipar el comportamiento de la barra ante diferentes escenarios hidrodinámicos. Este tipo de análisis no solo ofrece un diagnóstico del estado actual de la desembocadura, sino que también facilita el diseño de medidas adaptativas para mitigar los riesgos asociados al cierre de la barra, asegurando así la continuidad de procesos naturales y actividades humanas vinculadas al estuario.

Los resultados obtenidos subrayan la necesidad de integrar estos conocimientos en la planificación costera, promoviendo la implementación de estrategias proactivas que favorezcan tanto la sostenibilidad ambiental como el desarrollo económico de la región. En particular, estas estrategias pueden guiar la gestión del recurso hídrico en escenarios de escasez, optimizando el uso del caudal disponible y minimizando los impactos sobre la conectividad fluvial y marina.

En conclusión, este estudio no solo amplía el entendimiento sobre la estabilidad de barras en desembocaduras arenosas, sino que también establece un marco para futuros trabajos enfocados en la gestión integrada de estuarios, reforzando su papel como sistemas clave para el equilibrio ecológico y el bienestar de las comunidades costeras

## 7. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesor de tesis, Mauricio Villagrán Valenzuela, por su invaluable guía y apoyo a lo largo de este proyecto. Su orientación y conocimiento han sido fundamentales para alcanzar los objetivos de esta investigación.

También agradecer al Instituto Mileno SECOS que fueron quienes recopilaron datos para la base del estudio en años anteriores, por ende, sin ellos estos estudios no serían posible.

A mi familia, por su apoyo incondicional y por ser mi fuente constante de motivación y fortaleza. Sin su confianza y respaldo, este camino habría sido mucho más difícil.

A mis amigos de salsa, quienes no solo me han ayudado a mejorar como persona, sino que también me brindaron su apoyo en la preparación de la presentación. Un agradecimiento especial a Valeria, quien dedicó su tiempo y esfuerzo en la creación del póster, facilitando la presentación de mis



resultados.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de la universidad, quienes me han brindado momentos inolvidables y de amistad. Sin todos ellos, no habría logrado llegar hasta aquí.

Gracias a cada uno por ser parte de este viaje y por contribuir de distintas formas a este logro.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- J., van, de, Kreeke., R., L., Brouwer. (2017). Tidal Inlets: Hydrodynamics and Morphodynamics.
- Ali, Dastgheib., et al. (2018). Investigating the Stability of Double-Inlet Tidal Systems Using a Process-Based Modelling Approach.
- T.T., Tran. (2011). Morphodynamics of seasonally closed coastal inlets at the central coast of Vietnam.
- Tran, T.-T., van de Kreeke, J., Stive, M. J. F., & Walstra, D.-J. R. (2012). Cross-sectional stability of tidal inlets: A process-based morphodynamic model. *Coastal Engineering*, 60, 21-29.
- Escenarios Hídricos 2030 - EH2030. (2022). *Cuencas regenerativas, de la crisis a la seguridad hídrica: Hoja de ruta Maipo y Maule*. Fundación Chile.
- Rifo Herrera, C. J. (2015). *Modelación hidrodinámica del estuario del río Mataquito mediante la herramienta computacional Delft-3D Flow*.
- Stive, M. J. F., Van de Kreeke, J., Lam, T. N., Tran, T. T., & Ranasinghe, R. (2009). *Relaciones empíricas entre la sección transversal de entrada y el prisma de marea: una revisión*. Presentado en *Coastal Dynamics 2009 Conference*, Tokyo, Japón.
- Machuca Barra, L. (2022). *Caracterización hidrodinámica de la desembocadura del río Maipo* (Tesis de pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- Instituto Milenio en Socio-Ecología Costera. (2022).
- **Deltares (2016)**. "Delft3D-RGFGRID User Manual".
- **Deltares (2016)**. "Delft3D-QUICKIN User Manual".
- **Deltares (2016)**. "Delft3D-Flow User Manual".
- **Deltares (2016)**. "Delft3D-QUICKPLOT User Manual".