



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

## **Evaluación del software HEC-RAS para el modelado y estimación de concentración de sedimentos en el estuario del río Maipo**

Memoria de Título presentada por

**Karina Alejandra Rojas Ávila**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Raúl Flores Audibert

AGOSTO, 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** Evaluación del software HEC-RAS para el modelado y estimación de concentración de sedimentos en el estuario del río Maipo

**Nombre del candidato(a):** Karina Alejandra Rojas Ávila

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil

**Campus:** Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Flores Audibert, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

Fecha: 21/10/2025 ; Firma: 

**Estudiante o Candidato(a):**

Fecha: 21/10/2025 ; Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres, por su amor y apoyo incondicional durante todos estos años. A mi hermano mayor, Emmanuel, por acompañarme en los momentos difíciles y creer en mí. A mi hermana menor, Cony, por estar en los momentos importantes y siempre sacarme una sonrisa. Y a todas las personas que estuvieron presentes durante todo este proceso: Muchas gracias.



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

TÍTULO DE LA TESIS:

**Evaluación del software HEC-RAS para el modelado y estimación de concentración de sedimentos en el estuario del río Maipo**

AUTOR:

**Karina Alejandra Rojas Ávila**

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre

Firma

Profesor Guía .....

Miembro 1 Comisión .....

Miembro 2 Comisión .....

Valparaíso, Chile, 18 de Agosto del 2025

# EVALUACIÓN DEL SOFTWARE HEC-RAS PARA EL MODELADO Y ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO

Karina Rojas<sup>1</sup>, Raúl Flores<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Técnica Federico Santa María

## Resumen

El presente estudio se centra en el estudio sedimentario del estuario del río Maipo, por lo que se realizó una revisión a diferentes estudios que emplean el software HEC-RAS para realizar una modelación bidimensionales de sedimento, además de que se investigó las funciones empleadas por el programa para el transporte de sedimento, método de clasificación y velocidad de caída de sedimentos. Se delimitó la zona de estudio en base a la batimetría disponible, se utilizaron caudales diarios del año 2018 de la Estación Cabimbao y se estableció la curva granulométrica que está compuesta principalmente por arena y limo grueso. Se presentó la metodología escogida para realizar el modelo 2D en HEC-RAS, la cual se centra en la geometría, caudal y granulometría. Los resultados que se obtuvieron indican una erosión elevada en la desembocadura del río Maipo, además de sedimentación en la playa debido a la morfología de la zona. Se observó una mayor concentración de sedimento en los periodos de mayo a agosto con un valor promedio igual a 200 [mg/L] en los días con mayor caudal y para el caso de la tasa de transporte de sedimento se obtuvieron valores máximos igual a 10 [Tonn/m/día] considerando un caudal con una probabilidad de excedencia del 20 %. Para el caso de la zona de la desembocadura aumenta considerablemente la concentración y tasa de transporte de sedimento.

*Palabras claves:* HEC-RAS 2D, Transporte de sedimento, Estuario.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>4</b>
1.1	Motivación	4
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>4</b>
2.1	Objetivo General	4
2.2	Objetivos Específicos	4
<b>3</b>	<b>Marco Teórico</b>	<b>5</b>
3.1	Definición de estuario	5
3.2	Propiedades físicas de sedimentos	6
3.3	Procesos de transporte de sedimento en cauces naturales	6
3.3.1	Inicio del movimiento de sedimento	6
3.3.2	Mecanismo de transporte en suspensión y de arrastre	7
3.4	Modelación de transporte de sedimento en HEC-RAS	7
3.4.1	Ecuación del transporte de carga total	8
3.4.2	Función de transporte	9
3.4.3	Método de clasificación	14
3.4.4	Métodos de velocidad de caída	14
3.4.5	Configuración adecuada para un modelo de sedimento 2D	16
<b>4</b>	<b>Definiciones</b>	<b>16</b>
4.1	Zona de estudio	16
4.2	Batimetría y Topografía	17
4.3	Hidrología	17
4.4	Granulometría	19
<b>5</b>	<b>Metodología</b>	<b>19</b>
5.1	Mallado refinado en 2D	20
5.2	Caudal de modelación	22
5.3	Información de sedimento	23
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>24</b>
6.1	Velocidad	25
6.2	Froude	26
6.3	Esfuerzo cortante	26
6.4	Bed Elevation	27
6.5	Bed Change	28
6.6	Total Load Capacity	29
6.7	Total Load Concentration	29
6.8	Total Load Transport Rate	32
<b>7</b>	<b>Discusión</b>	<b>33</b>
<b>8</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>34</b>
	<b>Referencias</b>	<b>35</b>

<b>A Anexo A</b> . . . . .	<b>38</b>
A.1 Mapa subsubcuenca - Ubicación Estación Cabimbao . . . . .	38
A.2 Caudal máximo diario año 2018 - Estación Cabimbao . . . . .	39
<b>B Anexo B</b> . . . . .	<b>40</b>
B.1 Mallado refinado en 2D . . . . .	40
B.2 Sedimento . . . . .	42

## Índice de figuras

Figura 1: Zonificación estuaria tripartita. Fuente: Dalrymple et al. (1992) . . . . .	5
Figura 2: Zonas de transporte de sedimento. Fuente: Toffaleti (1968) . . . . .	12
Figura 3: Velocidad de caída de partículas. Fuente: Sanchez (2021) . . . . .	15
Figura 4: Delimitación Estuario río Maipo. Fuente: Arriagada (2005) . . . . .	17
Figura 5: Gráfico variabilidad estacional. . . . .	18
Figura 6: Caudal máximo mensual año 2018. . . . .	18
Figura 7: Metodología para la modelación bidimensional . . . . .	20
Figura 8: Grilla zona de estudio en RAS Mapper . . . . .	21
Figura 9: Mapa de rugosidades por tipo de zona . . . . .	22
Figura 10: Hidrograma diario 2018 Estación Cabimbao . . . . .	23
Figura 11: Mapa velocidad mínima estuario río Maipo . . . . .	25
Figura 12: Mapa velocidad máxima estuario río Maipo . . . . .	25
Figura 13: Mapa N° Froude máximo estuario río Maipo . . . . .	26
Figura 14: Mapa Esfuerzo cortante mínimo estuario río Maipo . . . . .	26
Figura 15: Mapa Esfuerzo cortante máximo estuario río Maipo . . . . .	27
Figura 16: Mapa elevación del lecho del estuario río Maipo . . . . .	27
Figura 17: Mapa cambio del lecho del estuario río Maipo . . . . .	28
Figura 18: Gráfico erosión y sedimentación del estuario río Maipo . . . . .	28
Figura 19: Mapa capacidad de carga total del estuario río Maipo . . . . .	29
Figura 20: Mapa concentración de sedimento total del estuario río Maipo . . . . .	30
Figura 21: Concentración de sedimento entre Mayo y Agosto . . . . .	30
Figura 22: Perfil de concentración de sedimento en el eje principal - 7 de Julio, 11 de Junio y 30 de Mayo . . . . .	31
Figura 23: Mapa transporte de sedimento del estuario río Maipo . . . . .	32
Figura 24: Perfil transporte de sedimento del estuario río Maipo . . . . .	32
Figura 25: Ubicación Estación Cabimbao . . . . .	38
Figura 26: Detalle mallado refinado - Entrada río Maipo . . . . .	40
Figura 27: Detalle mallado refinado - Estuario río Maipo . . . . .	41
Figura 28: Detalle mallado refinado - Salida río Maipo . . . . .	41
Figura 29: Granulometría - Estuario río Maipo . . . . .	42

## Índice de tablas

Tabla 1: Granulometría Estuario Rio Maipo. Fuente: Gaete et al. (2017) . . . . .	19
Tabla 2: Parámetros de la malla bidimensional RASMapper . . . . .	21
Tabla 3: Configuración del modelo bidimensional (Mayo - Agosto del 2018) . . . . .	24
Tabla 4: Caudal máximo diario 2018 Estación Cabimbao . . . . .	39

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

En años recientes, producto de la sequía y explotación de la cuenca del río Maipo, se han presentado fenómenos en la desembocadura del río, lo cual conlleva efectos adversos al ecosistema presente en el humedal, además de a la población cercana. A principios del año 2023, a través de distintos portales de noticias como el Diario Universidad de Chile (2023) o La Tercera (2023), daban cuenta de que el río Maipo no estaría desembocando en el mar producto del bajo caudal y la intervención en la cuenca. Como resultado, se produjo una acumulación de sedimentos en la zona del estuario, lo cual implica consecuencias perjudiciales tales como: una comunidad desprotegida en presencia de mareas altas, impacto en la biodiversidad y los ecosistemas presentes en el estuario producto del cambio de la morfología de la zona, además de costos asociados a la mantenimiento de la desembocadura.

Es por esta razón que se necesita una metodología para estimar la concentración de sedimento en la zona de la desembocadura con el fin de anticiparse en caso de que vuelva a ocurrir que el río Maipo no desemboque en el mar y tener un plan de estrategia adecuado. Por tanto, se opta por analizar y evaluar la capacidad del software HEC-RAS para realizar una modelación adecuada y estimar la concentración de sedimento en el estuario.

El software HEC-RAS permite desarrollar una modelación hidráulica en dos dimensiones, además de que el programa contiene un módulo específico para el cálculo del transporte de sedimentos horizontal (2D) inestable bidimensional, y el cambio de lecho, la clasificación y la estratificación. Por otro lado, el programa contiene diferentes funciones de transporte de sedimento para la modelación, además de las características poderosas de la modelación en 2D que utilizan las variaciones topográficas, mejorando la precisión de la solución y permiten utilizar mallas relativamente gruesas, disminuyendo los tiempos computacionales que se utilizan para modelar.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad de modelación del software HEC-RAS para estimar la tasa de transporte de sedimento en el estuario del río Maipo, región de Valparaíso. Este estudio se llevará a cabo con el fin de disponer de una herramienta numérica de fácil uso para la evaluación de la capacidad de transporte de sedimentos y cambios en el lecho, estableciendo sus ventajas y desventajas.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Generar grilla de cálculo del estuario aplicados al modelo sobre la base de estudios batimétricos disponibles.
- Analizar datos disponibles de caudal en la desembocadura del río Maipo y determinar el caudal de modelación para el software HEC-RAS.
- Establecer las expresiones representativas del transporte de sedimento, clasificación del espesor del lecho y velocidad de caída para el caso aplicado sobre la base teórica que el software dispone.

### 3. Marco Teórico

#### 3.1. Definición de estuario

Se recogieron diversas definiciones para definir la zona geográfica de un estuario con el fin de delimitar la zona de estudio y de modelado bidimensional. En primer lugar, una de las definiciones más acertadas corresponde a la propuesta por Cameron y Pritchard (1963), el cual plantea que un estuario corresponde a un cuerpo de agua costero semicerrado que tiene una conexión libre con el mar abierto y dentro del cual el agua del mar se diluye de manera mensurable con agua dulce derivada del drenaje terrestre.

Además, Booth y Thomas (2011) plantea tres criterios principales para definir el límite de una zona estuarial aguas arriba en base a distintos criterios tales como la salinidad, la onda de marea y la sedimentación.

En términos de la salinidad, Cameron y Pritchard (1963) define como estuario aquella zona cuya salinidad se encuentra en el rango de 0.1 [g/l] a 35 [g/l]. Por otra parte, en base a la onda de marea, Fairbridge (1980) propone que el límite de la zona del estuario queda determinado por el punto en donde se deje de percibir el efecto de la marea. Y, por último, Dalrymple et al. (1992) define a partir de la sedimentación como “la porción de valles inundados en dirección al mar y que recibe sedimento producto de procesos fluviales como marinos, desarrollando una zonificación estuarina tripartita” como lo que se observa en la Figura 1, además de plantear dos tipos de estuarios: estuarios dominados por la marea y dominados por el río.

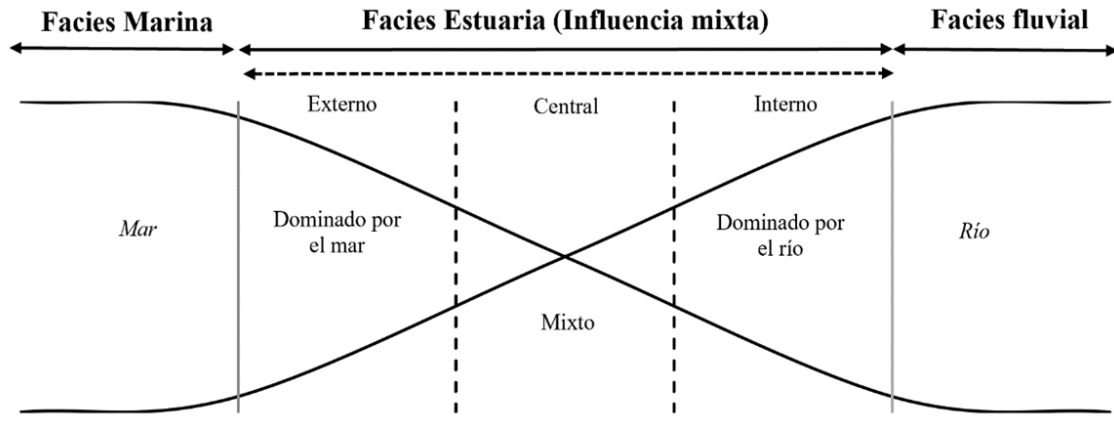


Figura 1: Zonificación estuarina tripartita. Fuente: Dalrymple et al. (1992)

El estuario estaría conformado por una sección externa en donde predominan las corrientes de olas o de las mareas con sedimentación gruesa transportada aguas arriba, una sección central en donde se equilibran las influencias fluvio-marinas y en donde se depositan sedimentos más finos, y finalmente una sección interna dominada por la energía del río produciendo una sedimentación gruesa transportada aguas abajo, según lo descrito por Arriagada (2005).

Además, Arriagada (2005) plantea en base a lo indicado por Araya (1981), que el sistema estuarino se puede dividir en tres zonas:

- Zona lagunar con laguna distal semibloqueada por barrera litoral o flecha, una barrera o flecha exterior.
- Zona deltaica interior con bancos medios y distributarios.
- Zona fluvial con existencia de meandros estuariales.

### 3.2. Propiedades físicas de sedimentos

#### 1. Tamaño de la partícula:

Según lo señalado por Martín (2002), el tamaño de la partícula de sedimento es una de las características más importantes por lo cual se establece describir el tamaño a partir del diámetro medio ponderado ( $D_m$ ) y el diámetro medio aritmético ( $D_{50}$ ), en donde para una muestra con distribución simétrica se tiene que  $D_m$  es igual a  $D_{50}$ . Sanchez (2021) clasifica los sedimentos a partir de su diámetro, que van desde arcilla hasta grava y que es determinante para establecer la curva granulométrica en HEC-RAS.

#### 2. Forma de la partícula:

El modo de movimiento de la partícula queda determinado por la forma, que puede definirse mediante la redondez, esfericidad y el factor de forma según lo indicado por Carrera (2013).

#### 3. Densidad y peso específico:

La densidad de la partícula se establece como la relación entre la masa, el volumen y el peso específico (o, de igual forma, el producto entre densidad y la aceleración de gravedad).

#### 4. Velocidad de sedimentación:

Existen expresiones para determinar la velocidad de sedimentación, que dependerán de factores como la temperatura del fluido, la salinidad, la turbulencia, la forma, el tamaño, la densidad de la partícula, la agregación y la floculación.

### 3.3. Procesos de transporte de sedimento en cauces naturales

Por otra parte, con respecto a los procesos de transporte de sedimento en cauces naturales a través de dos mecanismos diferentes: transporte en suspensión y arrastre de fondo Carrera (2013). Estos procesos dependen de diferentes variables tales como la geología, litología, la precipitación en la cuenca, coeficientes de escorrentía además de las propiedades físicas del material granular por el cual está formado el lecho del cauce.

#### 3.3.1. Inicio del movimiento de sedimento

Carrera (2013) plantea en su estudio de implementación de HEC-RAS para el estudio del transporte de sedimento, indica que se puede deducir que el umbral de movimiento puede ser expresado a partir de diferentes variables geométricas y sobre las características del flujo como se observa en la Ecuación 1. Por tanto, la condición de transporte puede ser expresada en función de los siguientes parámetros:

$$f \left( \frac{V_*}{\sqrt{gd_s}}, \frac{\rho_s}{\rho}, \frac{\rho d_s V_*}{\mu} \right) \quad (1)$$

Donde:

- $V_*$ : Velocidad de corte [m/s]
- $g$ : Aceleración gravitacional [m/s<sup>2</sup>]
- $d_s$ : Diámetro del sedimento [m]
- $\rho_s$ : Densidad del sedimento [kg/m<sup>3</sup>]
- $\rho$ : Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]
- $\mu$ : Viscosidad dinámica del agua [Pa·s]

Por otra parte, se puede realizar una aproximación para conocer el tipo de mecanismo de transporte a partir de la relación entre la velocidad de fricción y velocidad de caída o sedimentación de la partícula en donde se establece que si es mayor a 2.5 corresponde a transporte en suspensión, si la relación está entre 0.4 a 2.5 el transporte es mixto y si es menor a 0.4 ocurre transporte de fondo.

### 3.3.2. Mecanismo de transporte en suspensión y de arrastre

Se establece que para que se inicie el movimiento de sedimento en el lecho, se debe cumplir con la siguiente condición:

$$\tau_* > (\tau_*)_c \quad (2)$$

Donde:

- $\tau_*$ : Esfuerzo cortante [Pa]
- $(\tau_*)_c$ : Esfuerzo cortante crítico [Pa]

### 3.4. Modelación de transporte de sedimento en HEC-RAS

Para realizar la modelación bidimensional utilizando el software HEC-RAS, se revisaron diversos estudios que plantean una metodología adecuada para distintas situaciones.

En primer lugar, Carrera (2013) realizó un estudio detallado utilizando HEC-RAS 1D para calcular el transporte de sedimento en el caso específico de un proyecto hidroeléctrico, en donde hace una revisión completa de las opciones del software y las consideraciones adecuadas para el modelo.

Por otra parte, Noriega Garzón (2023) presenta una metodología para la elaboración del modelo hidráulico y geomorfológico en 2D utilizando HEC-RAS, en donde plantea realizar un modelo DEM utilizando el software ArcGIS Pro como complemento para importar la batimetría al HEC-RAS Mapper y definir el área de estudio, luego menciona que se obtienen caudales diarios aguas arriba de la zona de estudio utilizando HEC-HMS y finalmente hace mención de determinar la sedimentación a través de la curva granulométrica medida en terreno.

Presenta dos modelos para evaluar la capacidad del software para determinar el transporte de sedimento para el caso en específico de la desembocadura de un río. Estos dos modelos corresponden a un modelo hidráulico y geomorfológico en una y dos dimensiones (Noriega Garzón, 2023).

Rahaman et al. (2019) planteó un modelo en HEC-RAS para el río Maumee en Ohio y recalca la importancia de realizar el estudio del cambio de morfología del río debido a que podría perjudicar gravemente en la navegación en esta zona debido a la disminución de su profundidad. Entrega resultados asociados al cambio de lecho y los tramos en donde se produce erosión y deposición.

Para el caso específico de la modelación de un estuario, Rahman y Ali (2024) presentó un estudio de modelación en 1D para el estuario fluvial del Pussur utilizando HEC-RAS simulando a escalas estacionales. Se menciona que se debe ocupar un modelo en una dimensión debido a la longitud del área de estudio ya que cubre aproximadamente 158 km aguas arriba de la desembocadura del río. Esta opción permite reducir el tiempo computacional del programa para ejecutar múltiples modelos con diferentes variables.

Finalmente, Pratama et al. (2025), realizó un modelo de acumulación de sedimento en un embalse utilizando HEC-RAS 2D para un periodo de estudio que abarca 10 años y plantea una metodología a través de una serie de pasos enfocados en los datos de entrada de la topografía, granulometría y caudales.

Pratama et al. (2025), realizó la modelación debido a que el embalse altera la dinámica del flujo generando erosión en distintos sectores del cauce, por lo que identificar dichas zonas permite tomar decisiones adecuadas con respecto al manejo de los sedimentos. Además, se menciona la importancia de calibrar de manera correcta la condición del número de Courant para garantizar la estabilidad y precisión en el proceso de simulación numérica (Yazdan et al., 2022).

Se tiene como base el manual del programa que plantea los pasos a seguir para realizar un modelo del transporte de sedimento en dos dimensiones Sanchez (2021), en donde menciona las opciones disponibles para realizar la modelación en base a una granulometría determinada y las funciones disponibles del programa. El análisis debe realizarse para un flujo inestable, por lo que los parámetros como el caudal y la altura de la marea que resultan condiciones de borde en el caso de un estuario, deben estar en función del tiempo. A continuación se presentan la expresión de carga total de transporte de sedimento, además de las función de transporte, método de clasificación y método de velocidad de caída en la cual se basa el programa.

### 3.4.1. Ecuación del transporte de carga total

El software HEC-RAS realiza sus cálculos en base a la expresión de la carga total del transporte de sedimento, en la cual se incluye el transporte de fondo y en suspensión de sedimento.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{hC_{tk}}{\beta_{tk}} \right) + \nabla \cdot (hUC_{tk}) = \nabla \cdot (\varepsilon_{tk}h\nabla C_{tk}) + E_{tk}^{HF} - D_{tk}^{HF} + S_{tk} \quad (3)$$

Donde:

- $C_{tk}$ : Concentración de sedimentos de carga total ( $C_{tk} = \frac{q_{tk}^*}{U_h}$ ) [M/L<sup>3</sup>]
- $\beta_{tk}$ : Factor de corrección de carga total [-]
- $h$ : Altura o profundidad del flujo [L]
- $U$ : Velocidad media del flujo [L/T]

- $\varepsilon_{tk}$ : Coeficiente de difusión de carga total [-]
- $E_{tk}^{HF}$ : Tasa de erosión de carga total [M/L<sup>2</sup>/T]
- $D_{tk}^{HF}$ : Tasa de deposición de carga total [M/L<sup>2</sup>/T]
- $S_{tk}$ : Término fuente/sumidero de carga total [M/L<sup>2</sup>/T]

### 3.4.2. Función de transporte

Las condiciones iniciales y parámetros de transporte que se establecen para realizar la modelación incluyen el seleccionar alguna de las once funciones de transporte que se asemeje de mejor forma a la zona de estudio. Estas funciones para la concentración potencial de la carga total de sedimento ( $q_{tk}^*$ ) en el software HEC-RAS son las siguientes:

1. Ackers y White (Ackers & White, 1973; Day, 1980; Proffitt & Sutherland, 1983): La tasa de transporte de sedimento desarrollada por Ackers y White viene dada por la Ecuación 4. Resulta útil de aplicar en sedimentos uniforme, sin embargo puede sobrestimar para el caso de sedimentos con un diámetro menor a 0.2 [mm].

$$q_{tk}^* = \rho_w g h U X_{tk}^* \quad (4)$$

Donde:

- $q_{tk}^*$ : Potencial de transporte de sedimentos [M/L/T]
  - $\rho_w$ : Densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
  - $g$ : Aceleración de la gravedad [L/T<sup>2</sup>]
  - $h$ : Altura o profundidad del flujo [L]
  - $U$ : Velocidad media del flujo [L/T]
  - $X_{tk}^*$ : Potencial de concentración de sedimentos [-]
2. England y Hansen (Engelund & Hansen, 1967): Se indica que esta ecuación es validad para diámetros medios inferior a 0.15 [mm] y que su aplicación se debe limitar a sistemas de arenas.

$$q_{tk}^* = \begin{cases} 0.05 \eta_k \rho_{sk} U^2 \sqrt{\frac{d_k}{g R_k}} \left( \frac{\tau_b}{g(\rho_{sk} - \rho_w) d_k} \right)^{3/2}, & \text{for } \tau_b > \tau_{crk} \\ 0, & \text{for } \tau_b \leq \tau_{crk} \end{cases} \quad (5)$$

Donde:

- $q_{tk}^*$ : Potencial de transporte de sedimentos [M/L/T]
- $\tau_b$ : Esfuerzo cortante del lecho [M/L/T<sup>2</sup>]
- $\tau_{crk}$ : Esfuerzo cortante crítico [M/L/T<sup>2</sup>]
- $U$ : Magnitud de velocidad [L/T]
- $R_k = \frac{\rho_{sk}}{\rho_w} - 1$ : Gravedad específica de una partícula sumergida [-]

- $\rho_{sk}$ : Densidad de sedimentos [M/L<sup>3</sup>]
  - $\rho_w$ : Densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
  - $d_k$ : Diametro del grano [L]
3. Fórmula de Laursen-Copeland (Copeland & Thomas, 1989; Laursen, 1958): Las expresiones planteadas por Laursen-Copeland son válidas para sedimentos tipo limo hasta grava y fueron desarrolladas experimentalmente en canales.

$$q_{tk}^* = a\rho_w U h \left(\frac{d_k}{h}\right)^{7/6} \left(\frac{\theta'_b}{\theta_{crk}} - 1\right)^n f_{tk}^{LC} \left(\frac{u'_*}{\omega_{sk}}\right) \quad (6)$$

Donde:

- $q_{tk}^*$ : Potencial de transporte de sedimentos [M/L/T]
  - $a$ : 0.01
  - $\theta'_b$ : Número de Shields [-]
  - $\theta_{crk}$ : Número de Shields crítico [-]
  - $U$ : Magnitud de velocidad [L/T]
  - $h$ : Altura del agua [L]
  - $n$ : Coeficiente empírico (valor = 1.0) [-]
  - $\rho_w$ : Densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
  - $\omega_{sk}$ : Velocidad de cauda de la partícula [L/T]
  - $d_k$ : Diametro del grano [L]
4. Meyer-Peter y Müller (1948): Se indica que la expresión de Meyer-Peter Müller (MPM) es recomendable en lechos de grava uniforme y tiende a subestimar el transporte de arenas finas y limos.

$$\frac{q_{bk}^*}{\sqrt{R_k g d_k^3}} = A_M \rho_{sk} (\theta'_b - \theta_{crk})^{E_M} \quad (7)$$

Donde:

- $\theta'_b = \frac{\tau'_b}{(\rho_{sk} - \rho_w) g d_k}$ : Número de Shields [-]
- $\rho_{sk}$ : Densidad de sedimento [M/L<sup>3</sup>]
- $\rho_w$ : Densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
- $\theta_{crk}$ : Número de Shields crítico [-]
- $A_M$ : Coeficiente empírico (valor = 3.97) [-]
- $E_M$ : Coeficiente empírico (valor = 1.6) [-]

5. Toffaleti (1968): La formulación propuesta por Toffaleti (1968) es aplicable para el caso de ríos grandes, sin embargo no funciona de manera adecuada para sedimento tipo grava. La fórmula calcula la concentración de sedimento en cada una de las cuatro zonas presentadas en una aproximación del perfil de concentración de Rouse (2).

$$g_{ssL} = M \cdot \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-0.756z} - (2d_m)^{1+n_v-0.756z}}{1 + n_v - 0.756z} \quad (\text{zona inferior}) \quad (8)$$

$$g_{ssM} = M \cdot \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} - \left[\left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{11.24}\right)^{1+n_v-z}\right]}{1 + n_v - z} \quad (\text{zona media}) \quad (9)$$

$$g_{ssU} = M \cdot \frac{\left(\frac{R}{11.24}\right)^{0.244z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{0.5z} \cdot \left[R^{1+n_v-z} - \left(\frac{R}{2.5}\right)^{1+n_v-z}\right]}{1 + n_v - 1.5z} \quad (\text{zona superior}) \quad (10)$$

$$g_{sb} = M \cdot (2d_m)^{1+n_v-0.756z} \quad (\text{zona de lecho}) \quad (11)$$

$$M = 43.2 \cdot C_L \cdot (1 + n_v) \cdot V \cdot R^{0.756z-n_v} \quad (12)$$

$$g_s = g_{ssL} + g_{ssM} + g_{ssU} + g_{sb} \quad (13)$$

Donde:

- $g_{ssL}$ : Transporte de sedimento en suspensión en zona inferior.
- $g_{ssM}$ : Transporte de sedimento en suspensión en zona media.
- $g_{ssU}$ : Transporte de sedimento en suspensión en zona superior.
- $g_{sb}$ : Transporte de sedimento de carga de lecho.
- $g_s$ : Transporte total de sedimento.
- $M$ : Parámetro de concentración de sedimento.
- $C_L$ : Concentración de sedimento en la zona inferior.
- $R$ : Radio hidráulico.
- $d_m$ : Diámetro medio de partícula.
- $z$ : Exponente que describe relación entre sedimento y características hidráulicas.
- $n_v$ : Exponente de temperatura.

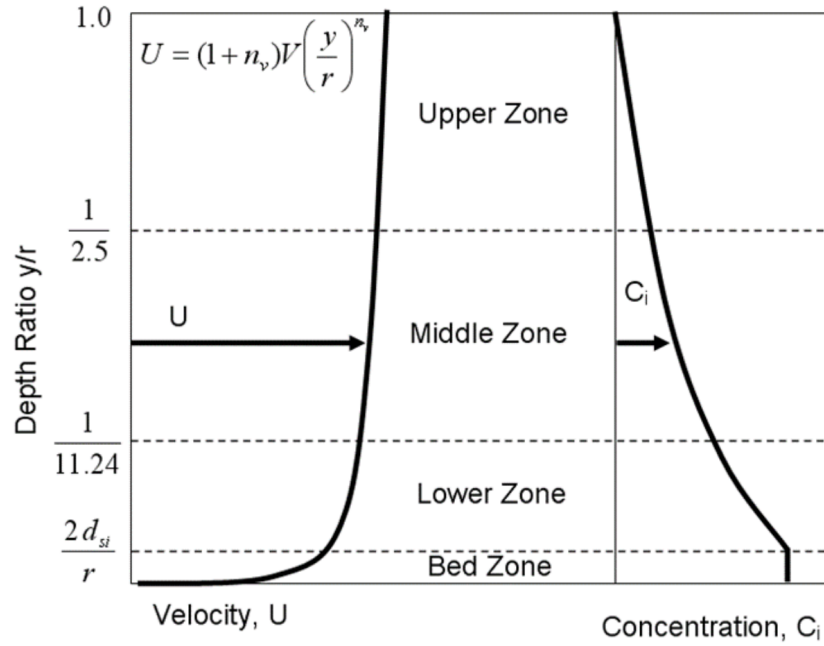


Figura 2: Zonas de transporte de sedimento. Fuente: Toffaleti (1968)

6. MPM-Toffaleti (Meyer-Peter & Müller, 1948; Toffaleti, 1968): La función MPM-Toffaleti combina las dos funciones anteriores y se complementan debido a que Toffaleti solo resuelve para el caso de arenas y limos y MPM resulta útil aplicar para partículas gruesas.
7. Yang (1984): Esta función es útil para arenas y gravas, sin embargo puede sobrestimar en el caso de arenas muy gruesas.

$$\log_{10}(C_{tk}^*) = \begin{cases} M + N \log_{10} \left[ \frac{S_f}{\omega_{sk}} (U - U_{crk}) \right] & \text{for } U > U_{crk} \\ 0 & \text{for } U \leq U_{crk} \end{cases} \quad (14)$$

Donde:

- $C_{tk}^*$ : Concentración de sedimentos en partes por millón [ppm]
- $u_*$ : Velocidad de corte del lecho [L/T]
- $\omega_{sk}$ : Velocidad de caída del sedimento [L/T]
- $\nu$ : Viscosidad cinemática del agua [L<sup>2</sup>/T]
- $U$ : Velocidad promedio [L/T]
- $U_{crk}$ : Velocidad crítica promedio [L/T]
- $S_f$ : Pendiente [-]

8. Wilcock y Crowe (Wilcock & Crowe, 2003): Ecuación de transporte basada en lechos graduados con arena y grava. La expresión queda por la siguiente expresión:

$$q_{bk}^* = \frac{u_*^3 W_k^*}{R_k g} \quad (15)$$

Donde:

- $q_{bk}^*$ : Potencial fraccionario de transporte de sedimentos por carga [L<sup>2</sup>/T]
- $u_*$ : Velocidad de corte del lecho [L/T]
- $W_k^*$ : Función de transporte [-]
- $R_k = \rho_{sk}/\rho_w - 1$ : Gravedad específica sumergida de la clase de grano [-]
- $\rho_{sk}$ : Densidad del sedimento [M/L<sup>3</sup>]
- $\rho_w$ : Densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
- $g$ : Constante gravitacional [L/T<sup>2</sup>]

9. Soulsby-van Rijn (Soulsby, 1998; van Rijn, 1993): La siguiente formulación fue propuesta originalmente para sedimentos de tamaños similares.

$$q_{bk}^* = \begin{cases} 0.005 U h \left( \frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{2.4} \left( \frac{d_k}{h} \right)^{1.2} & \text{for } U > U_{crk} \\ 0 & \text{for } U \leq U_{crk} \end{cases} \quad (16)$$

$$q_{sk}^* = \begin{cases} 0.012 U h \left( \frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{2.4} \left( \frac{d_k}{h} \right) d_k^{-0.6} & \text{for } U > U_{crk} \\ 0 & \text{for } U \leq U_{crk} \end{cases} \quad (17)$$

Donde:

- $q_{bk}^*$ : Potencial fraccionario de transporte de sedimentos por carga lecho [L<sup>2</sup>/T]
- $q_{sk}^*$ : Potencial fraccionario de transporte de sedimentos con carga suspendida [L<sup>2</sup>/T]
- $R_k = \rho_{sk}/\rho_w - 1$ : Gravedad específica sumergida de una partícula [-]
- $\rho_{sk}$ : Densidad de sedimentos [M/L<sup>3</sup>]
- $\rho_w$ : Densidad de agua [M/L<sup>3</sup>]
- $U$ : Velocidad de corriente promedio en profundidad efectiva [L/T]
- $U_{crk}$ : Velocidad crítica promedio en profundidad para movimiento incipiente [L/T]

10. van Rijn (1984, 2007): Estas ecuaciones fueron originalmente propuestas para sedimentos bien clasificados, pero han sido modificadas para el caso de sedimentos no uniforme.

$$q_{bk}^* = 0.015 U h \left( \frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{1.5} \left( \frac{d_k}{h} \right)^{1.2} \quad (18)$$

$$q_{sk}^* = 0.012 U h \left( \frac{U - U_{crk}}{\sqrt{R_k g d_k}} \right)^{2.4} \left( \frac{d_k}{h} \right) d_k^{-0.6} \quad (19)$$

Donde:

- $q_{bk}^*$ : potencial fraccionario de transporte de sedimentos por carga de lecho [L<sup>2</sup>/T]
- $q_{sk}^*$ : potencial fraccionario de transporte de sedimentos en suspensión [L<sup>2</sup>/T]
- $R_k = \rho_{sk}/\rho_w - 1$ : gravedad específica sumergida de una partícula [-]
- $\rho_{sk}$ : densidad de sedimentos [M/L<sup>3</sup>]

- $\rho_w$ : densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
- $U$ : velocidad media de la corriente en profundidad efectiva [L/T]
- $U_{crk}$ : velocidad crítica media en profundidad para el inicio del movimiento [L/T]

11. Wu et al. (2000): La formulación original puede que considere solo carga en suspensión lo cual resulta poco realista, por lo que se agregó una condición adicional a la ecuación.

$$q_{bk}^* = \begin{cases} 0.0053\sqrt{R_k g d_k^3} \left( \frac{\tau'_b}{\tau_{crk}} - 1 \right)^{2.2} & \text{si } \tau'_b > \tau_{crk} \\ 0 & \text{si } \tau'_b \leq \tau_{crk} \end{cases} \quad (20)$$

$$q_{sk}^* = \begin{cases} 2.62 \times 10^{-5} \sqrt{R_k g d_k^3} \left[ \left( \frac{\tau_b}{\tau_{crk}} - 1 \right) \frac{U}{\omega_{sk}} \right]^{1.74} & \text{si } \tau_b > \tau_{crk} \text{ y } \tau'_b > \tau_{crk} \\ 0 & \text{si } \tau_b \leq \tau_{crk} \text{ o } \tau'_b \leq \tau_{crk} \end{cases} \quad (21)$$

Donde:

- $q_{bk}^*$ : Potencial fraccionario de transporte de sedimentos por carga de lecho [L<sup>2</sup>/T]
- $q_{sk}^*$ : Potencial fraccionario de transporte de sedimentos en suspensión [L<sup>2</sup>/T]
- $R_k = \rho_{sk}/\rho_w - 1$ : Gravedad específica sumergida de una partícula [-]
- $\rho_{sk}$ : Densidad de sedimentos [M/L<sup>3</sup>]
- $\rho_w$ : Densidad del agua [M/L<sup>3</sup>]
- $\tau_b$ : Esfuerzo cortante total en el lecho [M/L/T<sup>2</sup>]
- $\tau'_b$ : Esfuerzo cortante efectivo (skin) en el lecho [M/L/T<sup>2</sup>]
- $\tau_{crk}$ : Esfuerzo cortante crítico [M/L/T<sup>2</sup>]
- $d_k$ : Diámetro del sedimento [L]
- $U$ : Velocidad media de la corriente [L/T]
- $\omega_{sk}$ : Velocidad de caída del sedimento [L/T]

### 3.4.3. Método de clasificación

Por otro lado, el método de clasificación de lechos realiza un seguimiento de la graduación del lecho para calcular la capacidad de transporte. Existen tres opciones diferentes para definir el método de clasificación: Thomas (Ex5), Copeland (Ex7) y Capa activa.

### 3.4.4. Métodos de velocidad de caída

La fórmula de caída que se utiliza para sedimentos cohesivos como no cohesivos. En el software se dispone de siete funciones diferentes las cuales son:

1. Rubey (1933)
2. Toffaleti (1968)
3. van Rijn (1993)

4. Informe 12 (Método predeterminado en HEC-6)
5. Dietrich (1982)
6. Soulsby (1998)
7. Wu y Wang (2006)

A continuación se muestra la velocidad de caída para cada uno de los caso, según el diámetro del sedimento en la Figura 3.

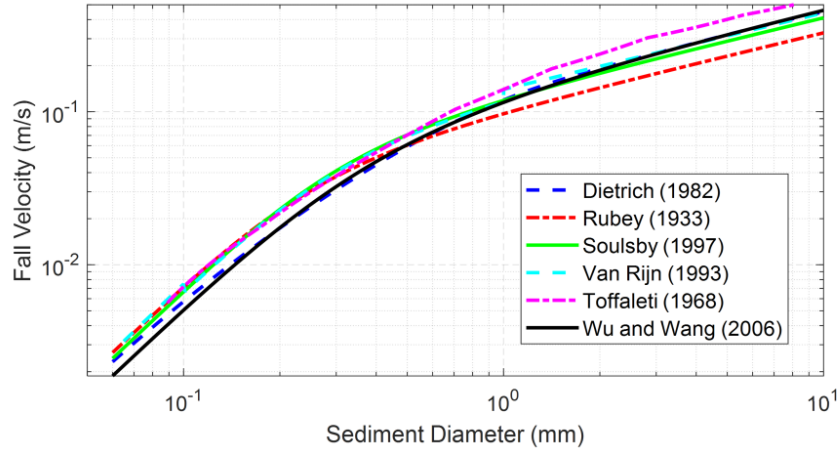


Figura 3: Velocidad de caída de partículas. Fuente: Sanchez (2021)

Para el caso en específico de van Rijn (1993), planteó la siguiente expresión para la velocidad de caída considerando un factor de forma igual a 0.7 y temperatura del agua igual a 20° C.

$$\omega = \begin{cases} \frac{(s-1)gd}{18\nu}, & \text{si } 0.001 < d < 0.1 \text{ [mm]} \\ \frac{10\nu}{d} \left[ \left( 1 + \frac{0.01(s-1)gd}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right], & \text{si } 0.1 < d < 1 \text{ [mm]} \\ 1.1\sqrt{(s-1)gd}, & \text{si } d \geq 1 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (22)$$

Donde:

- $\omega$ : Velocidad de caída de la partícula. [L/T]
- $\nu$ : Viscosidad cinemática del fluido. [L<sup>2</sup>/T]
- $s$ : Gravedad específica de la partícula ( $s = \rho_s/\rho$ ) [-]
- $d$ : Diámetro de la partícula. [L]
- $g$ : Aceleración gravitacional. [L/T<sup>2</sup>]

### 3.4.5. Configuración adecuada para un modelo de sedimento 2D

Por otra parte, Sanchez (2021) indica que es necesario realizar una configuración apropiada con respecto al “Hydraulic Warm Up” o periodo de calentamiento hidráulico ya que, si no se ajusta adecuadamente, el modelo considera un terreno seco al principio de la modelación por lo que mostrará una erosión excesiva y los resultados no serán realistas.

Por otra parte, se menciona que se debe delimitar de manera correcta la zona de estudio utilizando la opción de RAS Mapper y que la calidad de la malla este orientada con respecto al flujo para mejorar la precisión computacional, además de realizar un refinamiento en la zona del río.

En tercer lugar, al realizar el análisis para un flujo inestable, se debe escoger ajustar el paso del tiempo para el número de Courant, el cual está delimitado por la siguiente condición:

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta x} \quad (23)$$

$$\text{Si } C = 1 \Rightarrow \Delta T = \frac{\Delta x}{V} \quad (24)$$

Donde:

- $C$ : Número de Courant [-]
- $V$ : Velocidad del flujo [L/T]
- $\Delta T$ : Intervalo computacional (Time Step) [T]
- $\Delta x$ : Tamaño de celda [L]

Finalmente, se debe considerar cambiar la ecuación de onda de difusión ya que generalmente genera una excesiva erosión en el canal, por lo que debe optar a las ecuaciones de flujo de agua poco profunda (SWE-ELM). La ecuación de SWE deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes con ciertas simplificaciones suponiendo un flujo incompresible, densidad uniforme y se rige por la presión hidrostática (Pratama et al., 2025). Estas derivan de las ecuaciones de conservación de momentum.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f_v \quad (25)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial h}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f_u \quad (26)$$

## 4. Definiciones

### 4.1. Zona de estudio

El estuario del río Maipo, Araya (1981) plantea tres zonas: la zona proximal, la zona media y la zona distal. El estuario lo define Arriagada (2005) como se observa en la Figura 4, en el cual se observa que queda delimitado aguas arribas por la convergencia entre el río Maipo y el estero San Juan y aguas abajo por la desembocadura al océano pacífico.

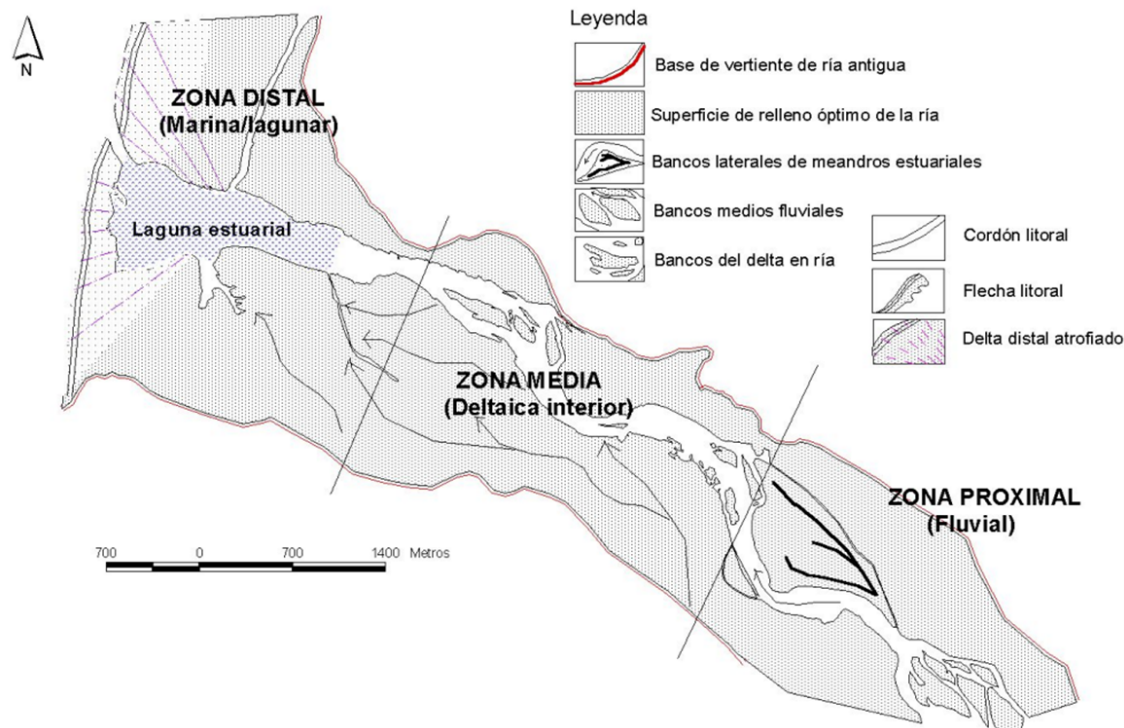


Figura 4: Delimitación Estuario río Maipo. Fuente: Arriagada (2005)

## 4.2. Batimetría y Topografía

La base de datos que se tuvo disponible para realizar la modelación corresponde a datos topográficos obtenidos a partir del satélite avanzado de observación terrestre “Daichi” (Japan Aerospace Exploration Agency, 2024) y la batimetría proviene de datos otorgados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) (2024) y campañas de campo. Esta base de datos correspondía a una serie de puntos con información sobre la ubicación espacial y elevación, con la cual se va a desarrollar el modelo DEM para la modelación.

## 4.3. Hidrología

A partir de los datos de la estación de la DGA Cabimbao ( $33.7219^{\circ}$  S  $71.5550^{\circ}$  O, 35 m) se realizó un análisis de variabilidad estacional para determinar cuáles son los meses con mayor caudal con diferentes probabilidades de excedencia, como se observa en la Figura 5. Se observan dos crecidas de caudal, una en los meses de invierno y otra en la época estival. Por otro lado, para una probabilidad de excedencia igual al 5%, 10% y 20% se tienen caudales máximos cercanos a los 700, 300 y 200  $[m^3/s]$ . La ubicación de la estación se puede observar en A.1

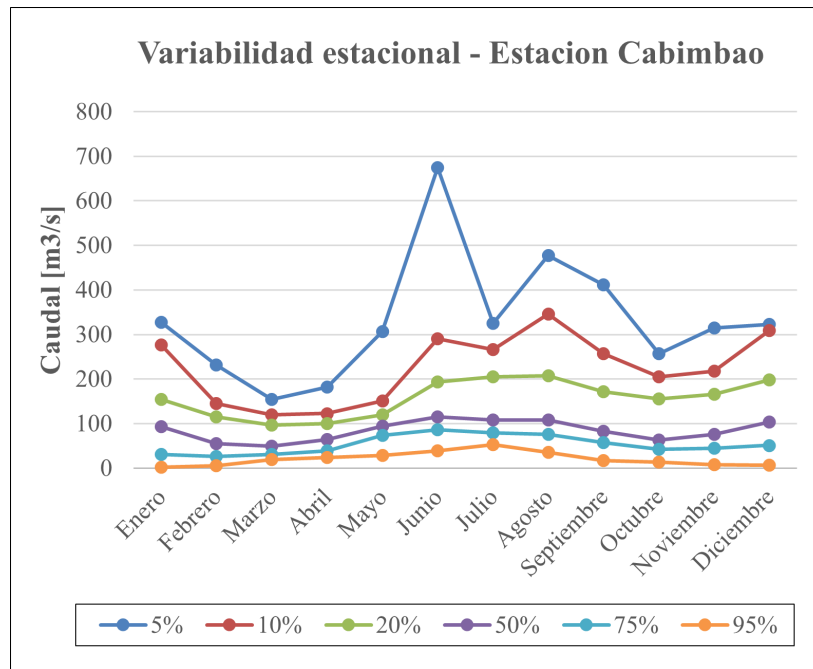


Figura 5: Gráfico variabilidad estacional.

Es por esta razón que se selecciona un año representativo, que muestre estas dos crecidas de caudal y que estén cercanos a un caudal con probabilidad de excedencia igual al 20 %, por lo que se escogió el año 2018. En la Figura 6 se observan los caudales máximos mensuales, además de que el caudal máximo ocurre el 7 de Julio con un valor igual a 195 [m<sup>3</sup>/s] (CR 2 , 2025). El detalle de los caudales diarios se observa en el Anexo A.2

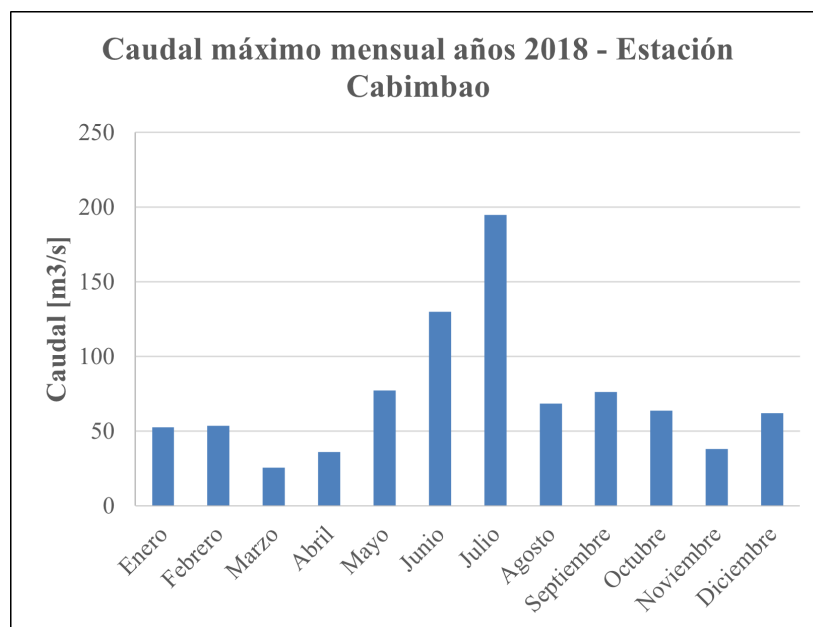


Figura 6: Caudal máximo mensual año 2018.

#### 4.4. Granulometría

La granulometría que se va a utilizar corresponde a la presentada por Gaete et al. (2017), el cual presenta parámetros físicos, químicos y granulometría de diversos estuarios. La información que se utilizó durante la modelación corresponde a la que se observa en la Tabla 1 y se observa que predomina sedimentos tipo arena y limo grueso.

Tabla 1: Granulometría Estuario Rio Maipo. Fuente: Gaete et al. (2017)

Granulometría estuario Rio Maipo			
Parámetro		Medida [mm]	Valor [%]
Arena muy gruesa (Very Coarse Sand)	VCS	[2 – 1]	0
Arena gruesa (Coarse Sand)	CS	[1 – 0.5]	0
Arena media (Medium Sand)	MS	[0.5 – 0.25]	21.9
Arena fina (Fine Sand)	FS	[0.25 – 0.125]	23.1
Arena muy fina (Very Fine Sand)	VFS	[0.125 – 0.0625]	5.9
Limo grueso (Coarse Lime)	CM	[0.0625 – 0.032]	49.1

### 5. Metodología

Para realizar la modelación bidimensional del transporte de sedimento, se siguen las recomendaciones entregadas en el manual del usuario de HEC-RAS. Esto se resume en tres principales ejes: Establecer geometría, definir caudales diarios aguas arribas del río Maipo y definir la granulometría del estuario. A continuación se enumera los pasos a seguir para realizar la modelación en 2D en el software HEC-RAS además de un diagrama de flujo en donde se establece la metodología (Figura 7)

1. Utilizando QGIS, establecer mapa de elevación a partir de los puntos de topografía y batimetría.
2. Importar mapa de elevación a HEC-RAS Mapper, definir zona del estuario del río Maipo utilizando las herramienta perímetro en la cual se establece el tamaño de las celdas del mallado, además de realizar un refinamiento en la zona del río y utilizar líneas de ruptura para orientar el sentido de las celdas con respecto a la dirección del río.
3. Agregar condiciones de frontera aguas arribas para el río Maipo, el estero San Juan y estero el Sauce. Además establecer condiciones de frontera aguas abajo en la desembocadura del río.
4. Utilizando la opción de flujo no estacionario, se establece el hidrograma diario para el periodo de estudio a partir de los datos entregados por CR2 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), 2025).
5. En la opción sedimentos, importar curva granulométrica, información entregada por (Gaete et al., 2017).
6. Establecer función de transporte, método de clasificación y función para la velocidad de caída de la partícula.
7. Establecer el plan para realizar un análisis de flujo inestable.

8. Realizar configuraciones adecuadas para un modelo estable tal como configurar adecuadamente el periodo de calentamiento hidráulico, ajustar el paso del tiempo para el número de Courant y establecer ecuaciones de flujo tipo SWE-ELM.
9. Realizar la modelación e iterar en caso de modelo inestable o problemas en la malla.

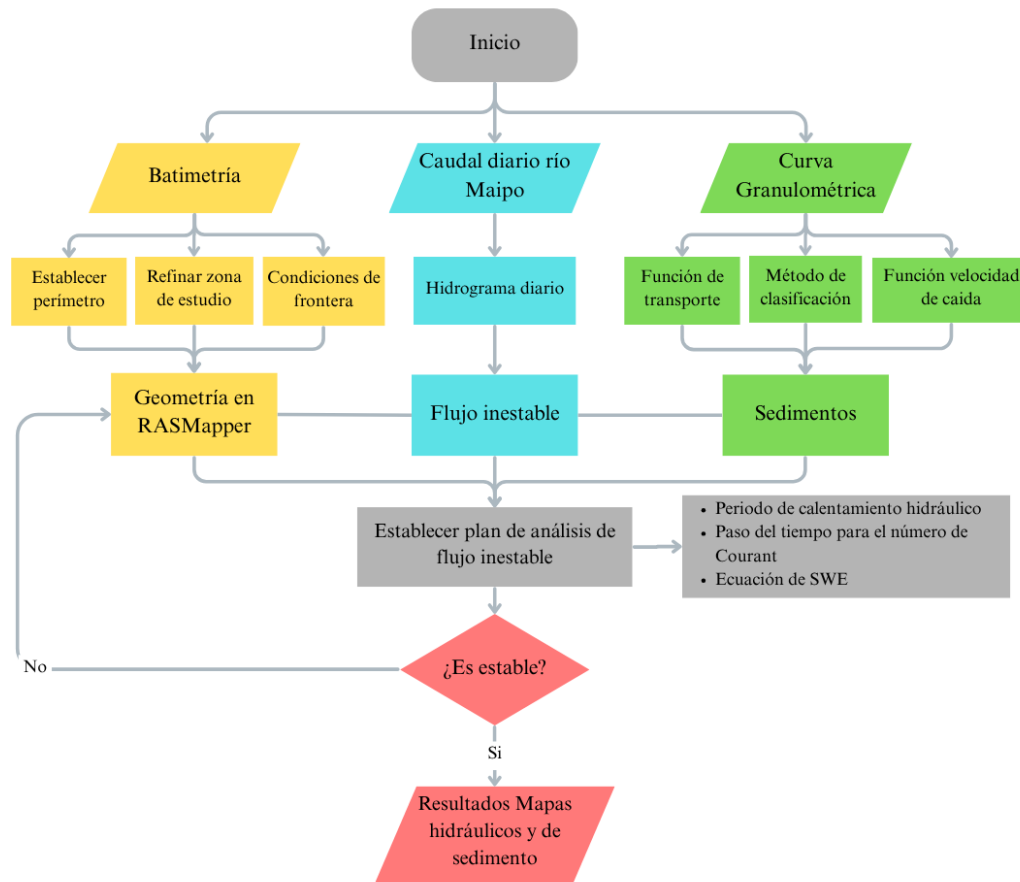


Figura 7: Metodología para la modelación bidimensional

### 5.1. Mallado refinado en 2D

En primer lugar, para comenzar a realizar la modelación, se debe establecer la geometría y zona de estudio del proyecto en base a la información que se tiene de la batimetría y topografía.

De manera preliminar para desarrollar el modelo en HEC-RAS, se realizó en el software QGIS. 3.32.0 a partir de la herramienta “TIN interpolation”, una interpolación tipo red irregular triangulada con la cual se generó una superficie continua o modelo digital de elevación (DEM) de la zona de

estudio. La capa tipo ráster que se obtuvo se realizó con una resolución igual a 1 metro por píxel.

Seguidamente se procedió a abrir el HEC-RAS 6.6, se seleccionó la opción RAS Mapper en donde primeramente se especificó la proyección referencial espacial y se agregó la capa obtenida anteriormente como un archivo tipo .GeoTIFF. A partir de las herramientas disponibles del programa, se seleccionó el área de estudio para generar la malla bidimensional correspondiente en donde las celdas cuadradas tienen un tamaño igual a 30 [m] y la grilla tiene un total de 4780 celdas.

Por otra parte, se realizó un refinamiento en la zona del río Maipo para mayor precisión en los cálculos, en la cual se definieron celdas con largo igual a 20 [m] y se orientaron conforme a la dirección del flujo del río Maipo. La zona de estudio en RAS Mapper se ejemplifica en la Figura 8 y el detalle aparece en el Anexo B.1

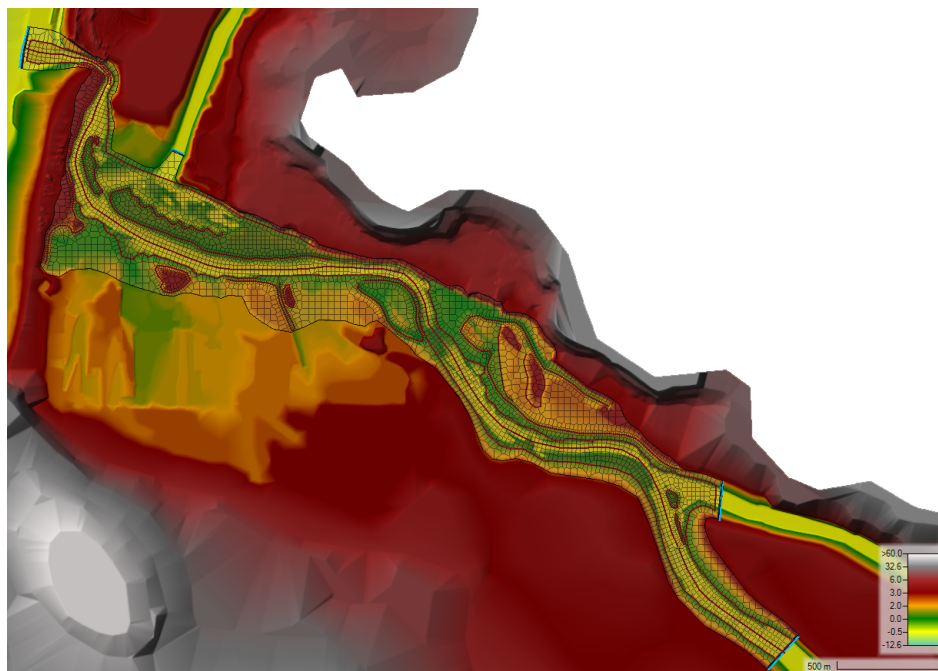


Figura 8: Grilla zona de estudio en RAS Mapper

A partir de la elaboración de la malla bidimensional, se puede resumir los parámetros en la Tabla 2, en donde se indica la cantidad y tamaño de las celdas.

Tabla 2: Parámetros de la malla bidimensional RASMapper

Parámetro	Unidad	Valor
Número de celdas	[-]	4780
Longitud promedio de celdas	[m]	19
Tamaño promedio de celda	[m <sup>2</sup> ]	374
Tamaño máximo de celda	[m <sup>2</sup> ]	2115
Tamaño mínimo de celda	[m <sup>2</sup> ]	38

Por otra parte, se agrega un mapa en el RASMapper con los diferentes valores de manning en base al uso de suelo que se obtiene de lo entregado por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) (2020). Se definen diferentes zonas para uso de suelos como playa (amarillo), bosque (verde), río (celeste), cultivo agrícola (rosa) y zona urbana (gris) con los coeficientes de manning que se observan en la Figura 9.

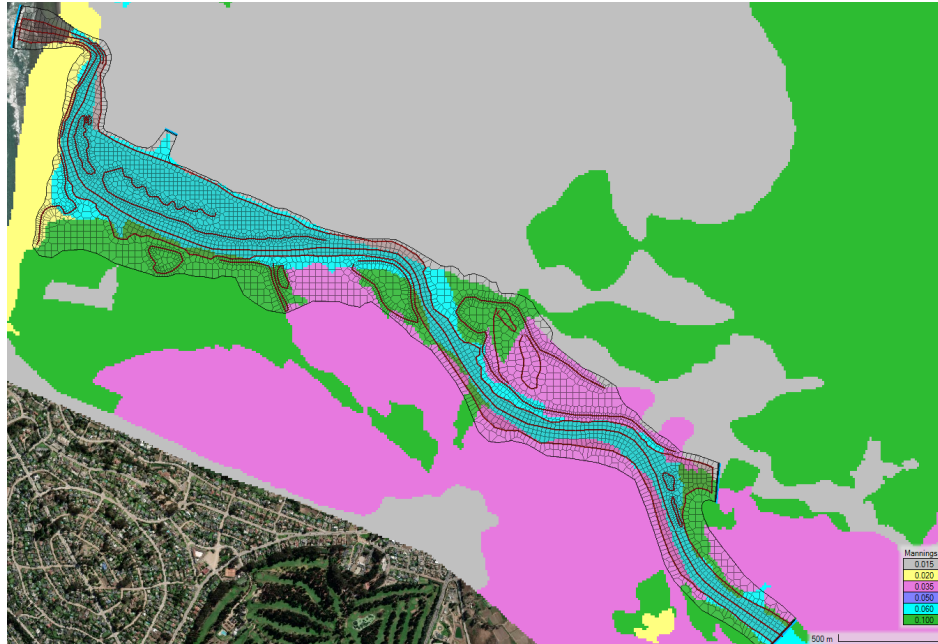


Figura 9: Mapa de rugosidades por tipo de zona

Finalmente, se aplicaron condiciones de borde en la malla aguas arriba para el río Maipo, Estero San Juan, Estero El Sauce y agua abajo en la desembocadura al océano Pacifico.

## 5.2. Caudal de modelación

El manual de HEC-RAS recomienda realizar una simulación considerando un flujo inestable, por lo que se procede a realizar una modelación utilizando hidrograma para el caso de las condiciones de borde aguas arriba y establecer diferentes alturas del mar para el caso de aguas abajo.

Para el análisis diario, se utilizaron los caudales máximos registrados en la estación Cabimbao durante el periodo comprendido entre mayo y agosto de 2018, ya que estos meses presentan los mayores valores de caudal lo cual permite evaluar el comportamiento del transporte de sedimento y la dinámica fluvial asociada a eventos de mayor energía. Además, es posible comparar la concentración de sedimentos en los días en que se producen los peaks de caudal y en que valores oscila con respecto a la magnitud del evento hidrológico. Se observa los datos ocupados en la Figura 10 donde los caudales varían entre los 10 a 200 [m<sup>3</sup>/s].

Los caudales para el estero San Juan y el estero El Sauce se estimaron de manera aproximada utilizando una razón porcentual del informe medioambiental de San Antonio (SUR PLAN, 2016). Para la condición aguas abajo se consideró una altura igual a 1 [m].

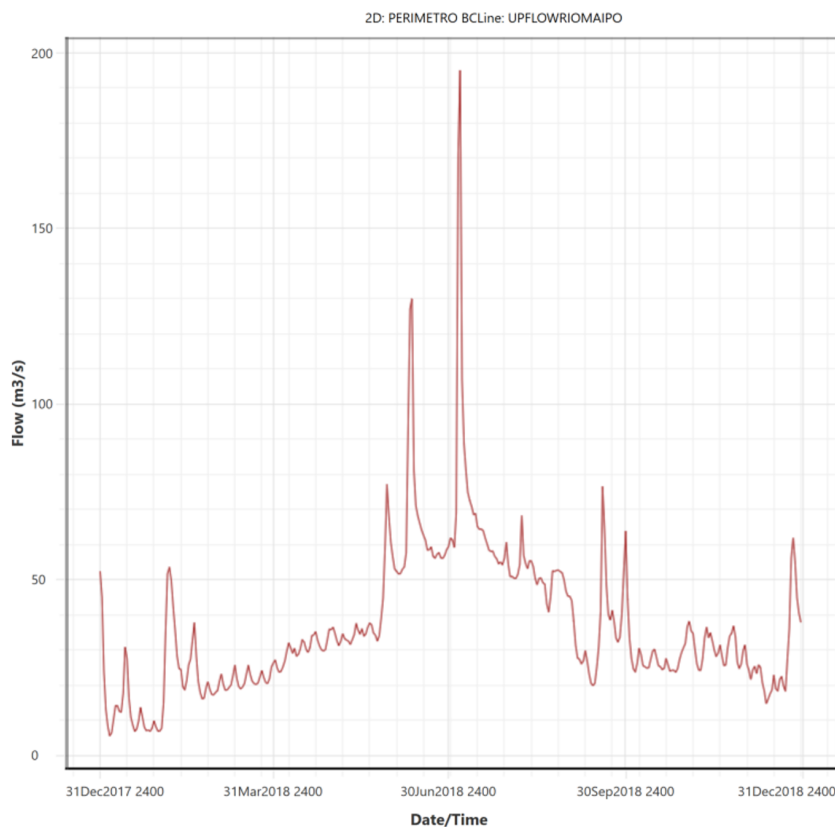


Figura 10: Hidrograma diario 2018 Estación Cabimbao

### 5.3. Información de sedimento

En primer lugar, se debe realizar una capa vacía en el RASMapper de la zona de interés denominada capa “Sediment Bed Material Layer”, y se definen las zonas por donde circula el flujo, islas dentro del río y bancos laterales del estuario. Esta capa creada se asocia con la geometría y el coeficiente de rugosidad definido anteriormente. Para realizar el análisis de transporte de sedimento utilizando HEC-RAS, se selecciona la opción de “Sediment Data”, en la cual se debe de especificar la función de transporte, el método de clasificación y método de velocidad de caída. La curva granulométrica se observa en el Anexo B.2

Para el caso de la función de transporte se selecciona la ecuación planteada por Toffaleti (1968), ya que sugiere que es principalmente usada para partículas tipo arena además de sugerir que se aplica para río grandes como es el caso del río Maipo.

Por otra parte, para el caso de método de clasificación o método de mezcla, se selecciona la opción Active Layer ya que resulta en un método simplificado y se recomienda utilizar para el modelo bidimensional, en donde se establece que el espesor de la capa activa se establece igual a  $D_{90}$ .

Finalmente, para el caso del método de velocidad se utiliza la expresión de van Rijn (1993), quien elaboró sus ecuaciones para un factor de forma ( $S_f$ ) igual a 0.7 en un río con temperaturas cercanas a los  $20^\circ$ . Las ecuaciones usadas, dependen de el tamaño de la partícula.

## 6. Resultados

Este modelo considera una malla con una cantidad igual a 4780 celdas, en donde se realizó un refinamiento en la zona del estuario con un tamaño promedio de celdas en esta zona igual a 20 [m]. Para que el modelo no resulte inestable se consideró un tiempo base para realizar los cálculos computacionales igual a 5 minutos, además de que se siguieron las recomendaciones de Sanchez (2021) para ajustar el paso del tiempo en base al número de Courant.

Además se simuló utilizando las ecuaciones de para aguas poco profundas, método euleriano-lagrangiano (SWE-ELM). El tiempo total en el que se demoró el software para realizar los cálculos es igual a 8 horas, por lo que en general para cada mes se demoró aproximadamente 2 horas y para un día aproximadamente igual a 4 minutos. Los parámetros que se utilizaron se indican en la Tabla 3.

Tabla 3: Configuración del modelo bidimensional (Mayo - Agosto del 2018)

<b>Configuraciones del modelo bidimensional (Mayo - Agosto)</b>		
<b>N°</b>	<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>
1	Intervalo de simulación	01 de mayo de 2018 0:00 - 01 de septiembre de 2018 0:00 (122 días)
2	Tiempo base computacional	5 minutos
3	Intervalo mapa de salida	1 día
4	Computation Time Step Max Courant	1.2
5	Computation Time Step Min Couran	0.45
6	Computation Time Step Count To Double	4
7	Computation Time Step Max Doubling	4
8	Computation Time Step Max Halving	4
9	Duración real de ejecución del modelo	8:00:57
10	Set de ecuaciones	SWE-ELM

## 6.1. Velocidad

Primero se observa que las velocidades mínimas están alrededor de 0.1 - 0.2 [m/s], para los días con un caudal menor como se observa en la Figura 11. Por otro lado, se produce la mayor velocidad en el río Maipo, específicamente en las zonas donde hay curvas, al entrar y salir de la laguna estuarial. Como máximo se tiene una velocidad igual a 1.20 [m/s] cercano a la desembocadura. En la Figura 12 se muestra las velocidades para el caso en específico del 7 de Julio con un caudal máximo igual a 195 [m<sup>3</sup>/s].

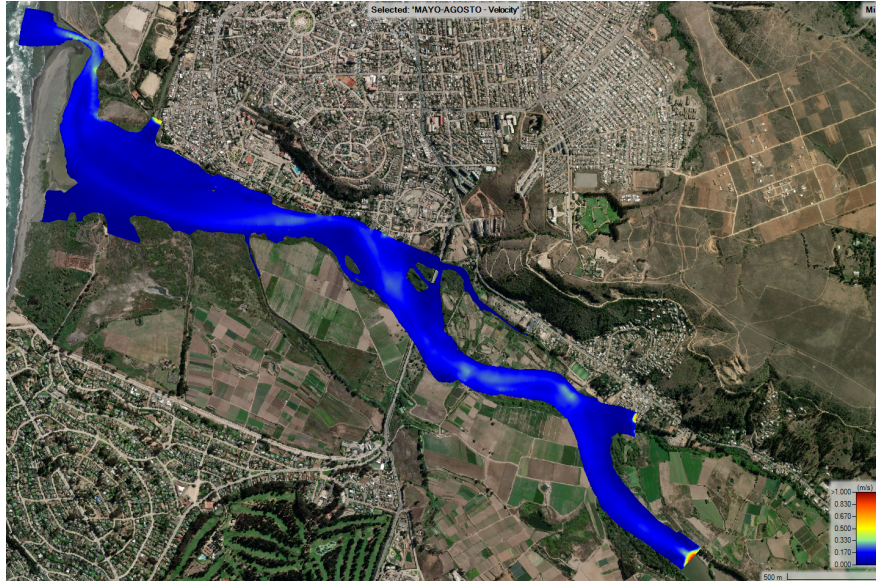


Figura 11: Mapa velocidad mínima estuario río Maipo

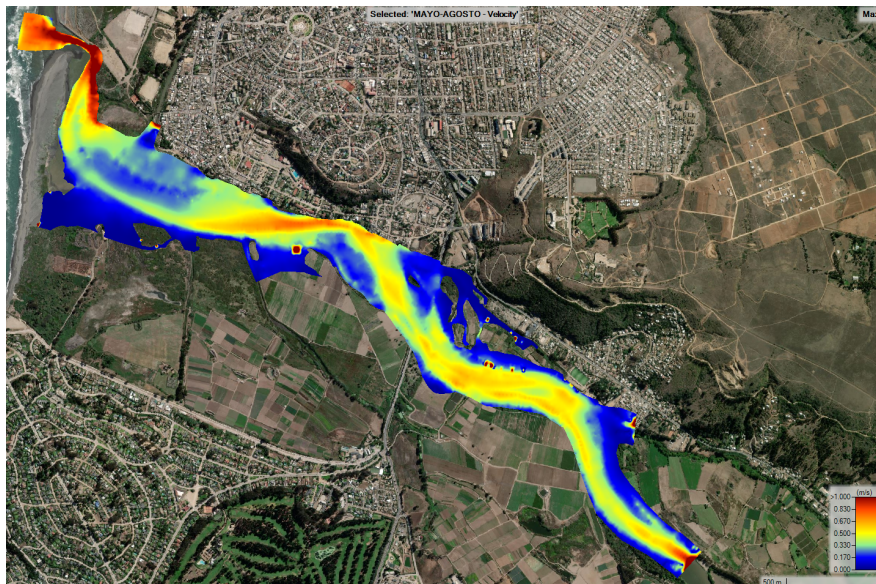


Figura 12: Mapa velocidad máxima estuario río Maipo

## 6.2. Froude

Se verifica en la Figura 13 que el tipo de flujo sea subcrítico y no existan zonas de turbulencia, ya que en toda zona el número de Froude es menor a 1 para el día de mayor caudal.

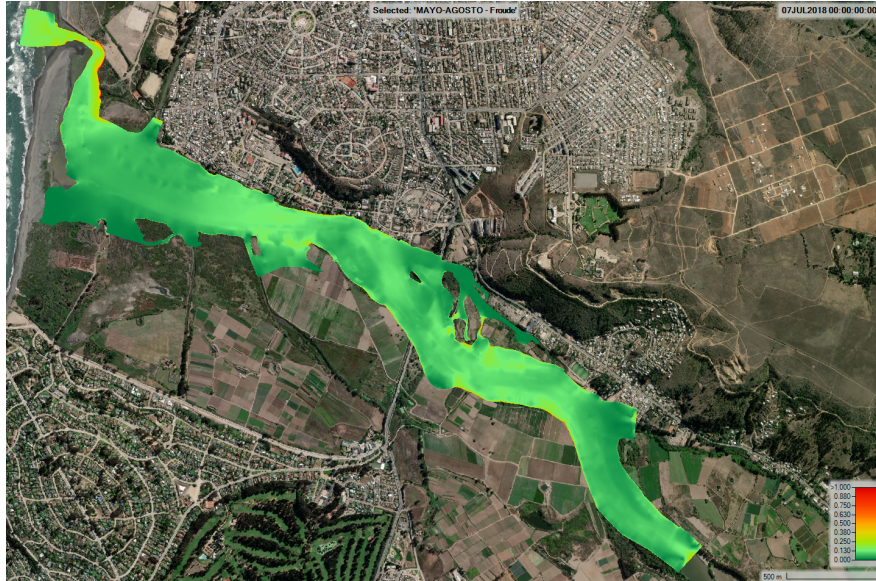


Figura 13: Mapa N° Froude máximo estuario río Maipo

## 6.3. Esfuerzo cortante

A continuación se presentan mapas que representan el esfuerzo cortante mínimo y máximo en el lecho del río (Figura 14 y Figura 15). Para el caso del esfuerzo cortante máximo, los valores máximos están entre 10 - 30 [Pa].

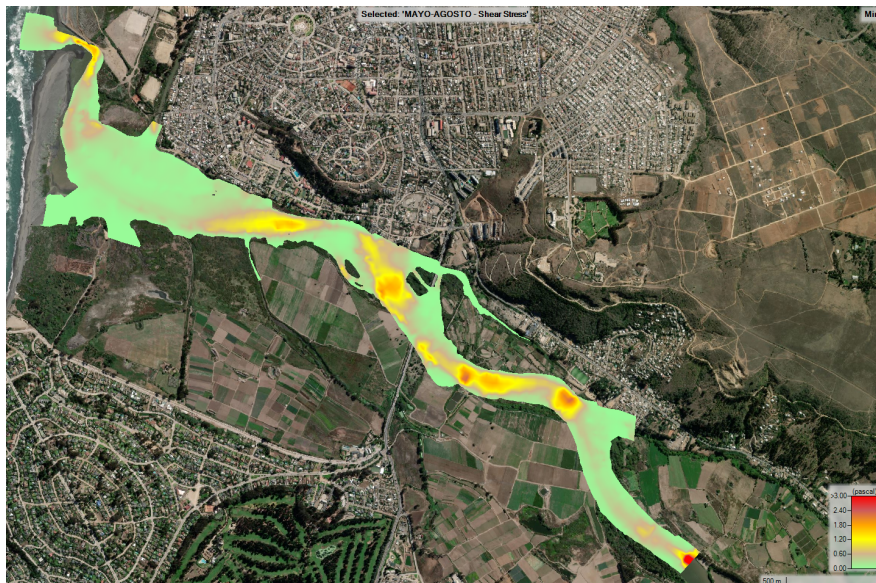


Figura 14: Mapa Esfuerzo cortante mínimo estuario río Maipo

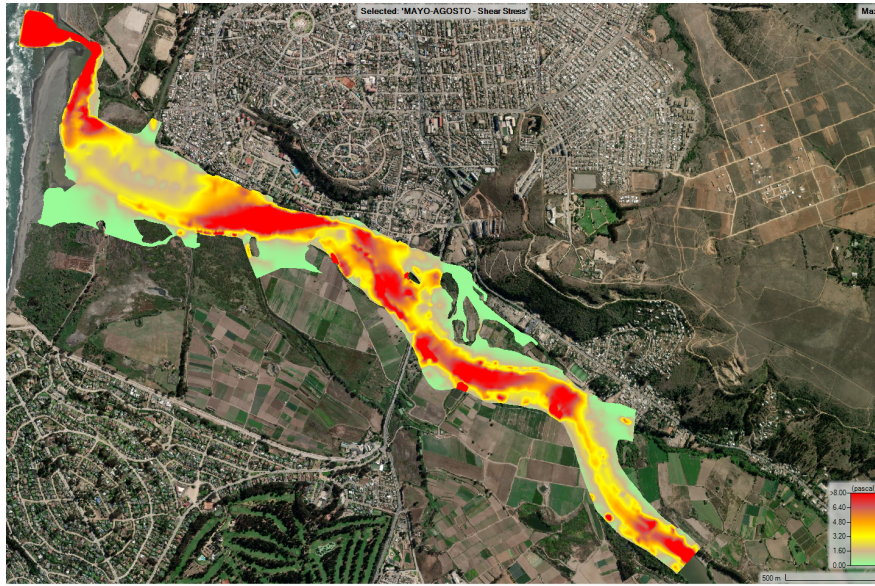


Figura 15: Mapa Esfuerzo cortante máximo estuario río Maipo

#### 6.4. Bed Elevation

Se muestra en la Figura 16, la altura del fondo del estuario, donde se observa que existe mayor profundidad al salir de la laguna estuarial y algunas curvas del río. Las zonas de mayor profundidad están representadas por el color verde, y por otro lado los colores anaranjados y rosados indican zonas de altitud y la existencia de bancos en el estuario.

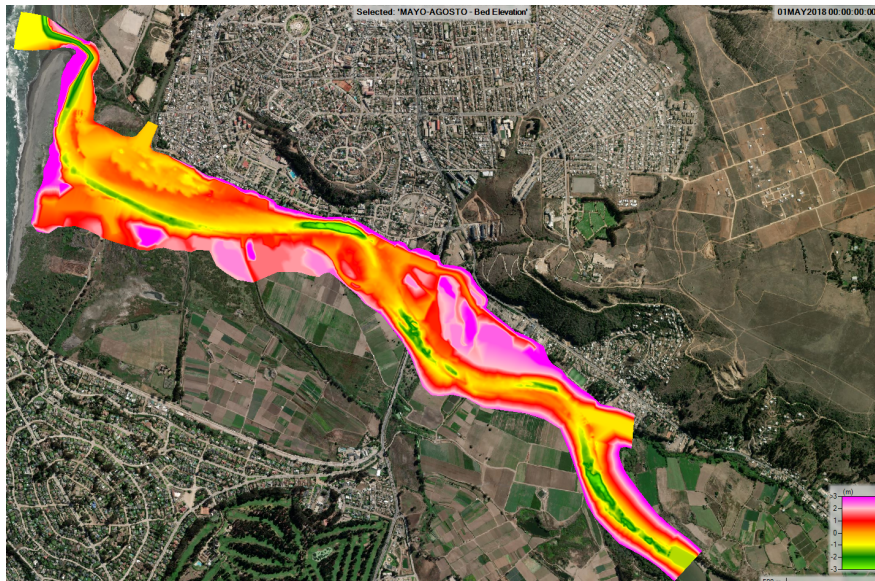


Figura 16: Mapa elevación del lecho del estuario río Maipo

## 6.5. Bed Change

De manera análoga, se observa en la Figura 17 cómo cambia el fondo del estuario al final del evento ocurrido, donde se observa en azul las zonas de acumulación de sedimento, y por otro lado en las zonas rojas se observa la erosión del suelo. La mayor erosión se produce en la zona de la desembocadura del río y en las zonas donde el río es más angosto. Por otro lado, se observa en menor cantidad sedimentación al entrar a la laguna estuarial y en la zona de la playa.

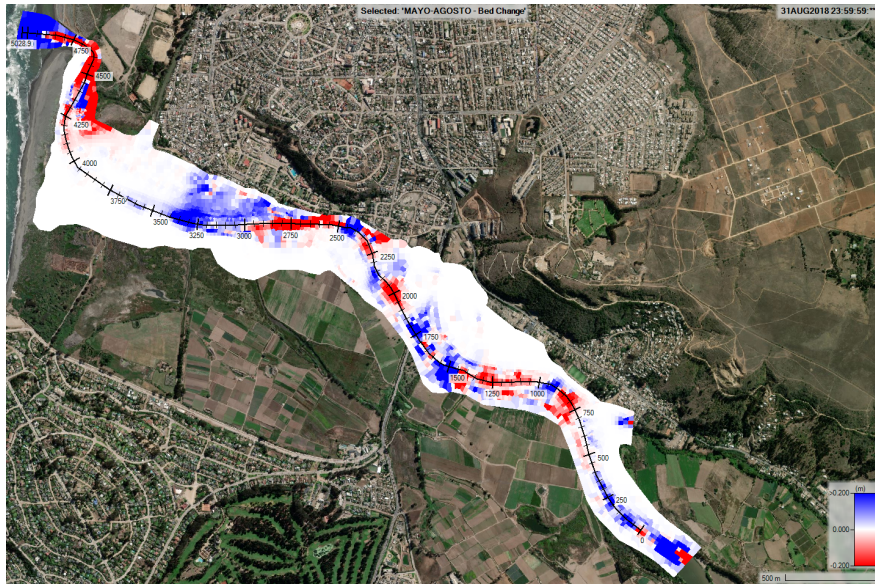


Figura 17: Mapa cambio del lecho del estuario río Maipo

En el eje principal del río Maipo, se puede observar el cambio de morfología producto de la erosión y sedimentación mencionada. El mayor cambio de altura se produce debido a la erosión y es cercana a 3.5 [m] en la salida angosta al mar. Esto queda representado en la Figura 18.

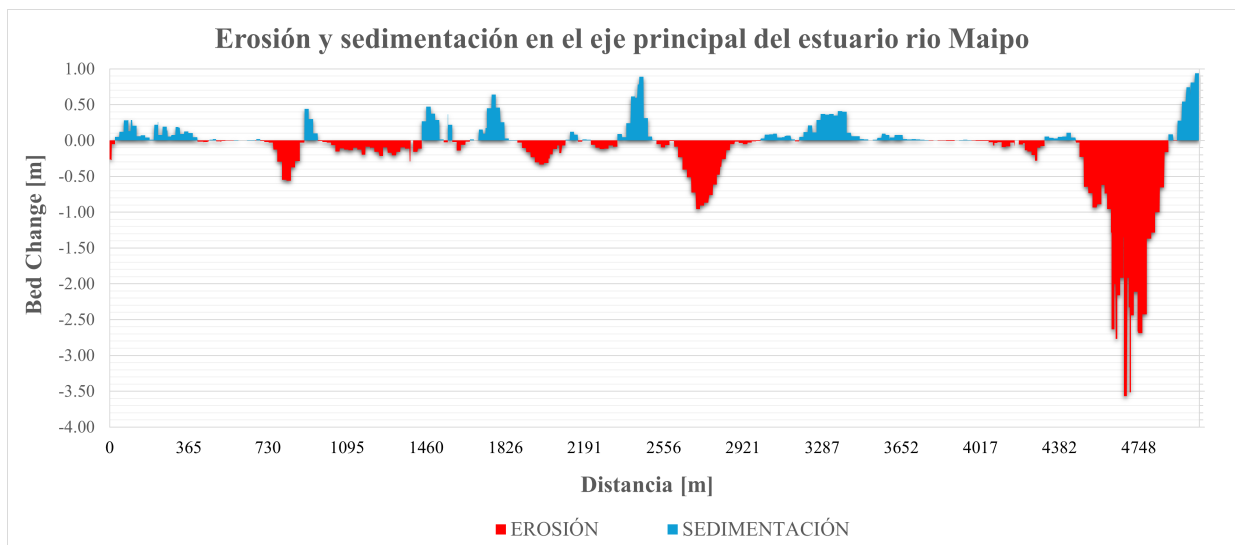


Figura 18: Gráfico erosión y sedimentación del estuario río Maipo

## 6.6. Total Load Capacity

La capacidad de carga del estuario se observa que en las zonas color celeste es relativamente baja del orden entre 0 – 50 [mg/L], sin embargo, existen una mayor cantidad de zonas con capacidad de carga alta en donde aumenta en el orden de 200 [mg/L] que se observa de color café en la Figura 19 para un caudal mayor. Finalmente para el caso de la desembocadura aumenta de manera significativa y se encuentra entre 500 - 900 [mg/l].

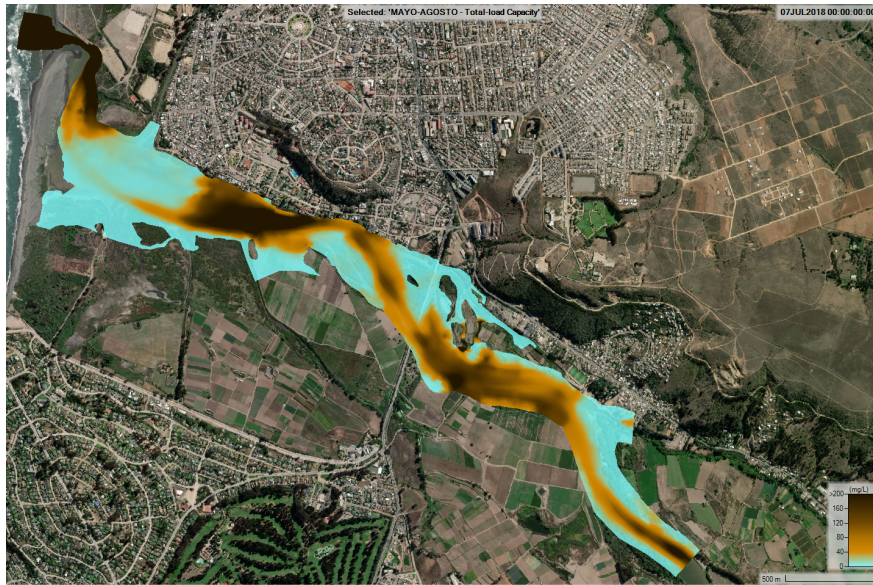


Figura 19: Mapa capacidad de carga total del estuario río Maipo

## 6.7. Total Load Concentration

A continuación se presenta el mapa de concentración de sedimento total (Figura 20). En las zonas amarillas se observa la mayor carga de concentración total, el cual corresponde a un orden de magnitud igual o mayor a 200 [mg/L] que corresponde para el caso de arenas medias, arenas muy finas y limo grueso.

Por otro lado, en la Figura 21, se observa en que periodos se encuentra la mayor concentración de sedimentos en la laguna estuarial (zona con mayor ancho del río), en donde para el día 7 de Junio se tiene un máximo de concentración total de sedimento igual a 250 [mg/L], el 11 de junio se tiene una concentración cercana a los 150 [mg/L] y para el día 30 de mayo se tiene una concentración aproximadamente igual a 40 [mg/L].

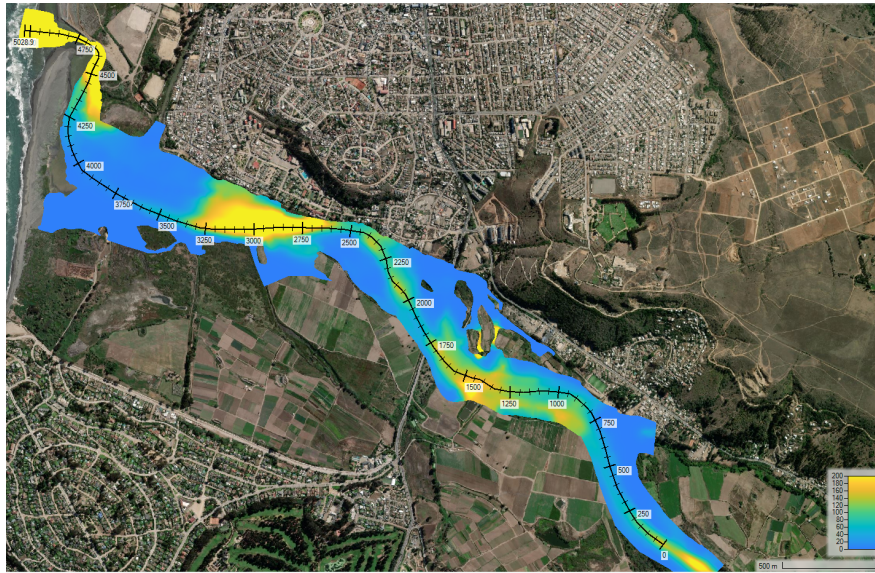


Figura 20: Mapa concentración de sedimento total del estuario río Maipo

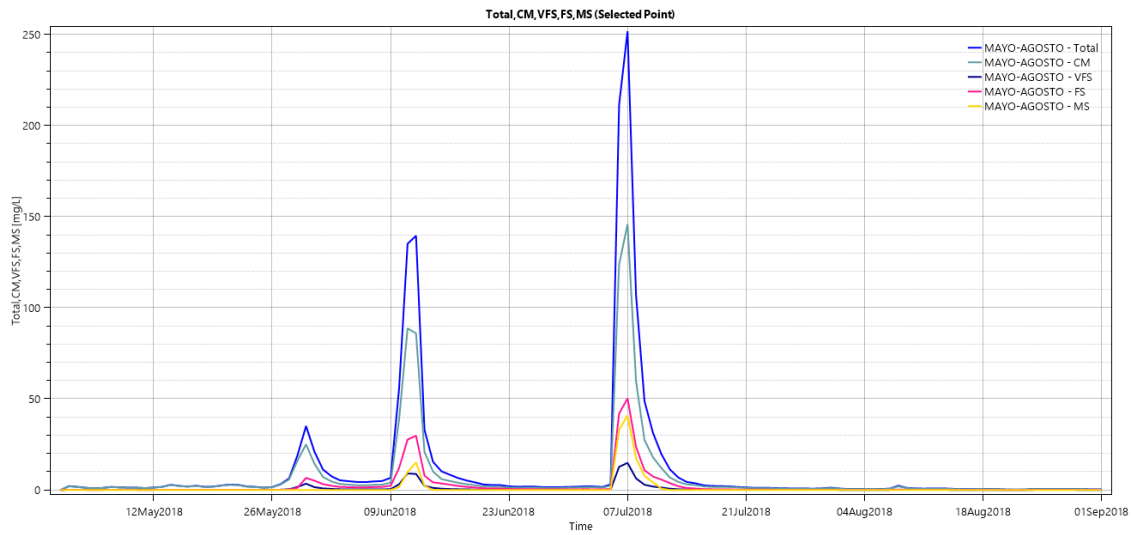


Figura 21: Concentración de sedimento entre Mayo y Agosto

Se presenta los gráficos correspondientes a la concentración de sedimento en el eje principal del río Maipo para distintos periodos, donde se observa que la mayor acumulación ocurre en la desembocadura. En la Figura 22, se observa que para la salida del río Maipo, el 7 de junio se presenta una concentración igual a 900 [mg/L], el 11 de junio se tiene una concentración igual a 600 [mg/L] y para el 30 de mayo hay una concentración en la desembocadura igual a 300 [mg/L].

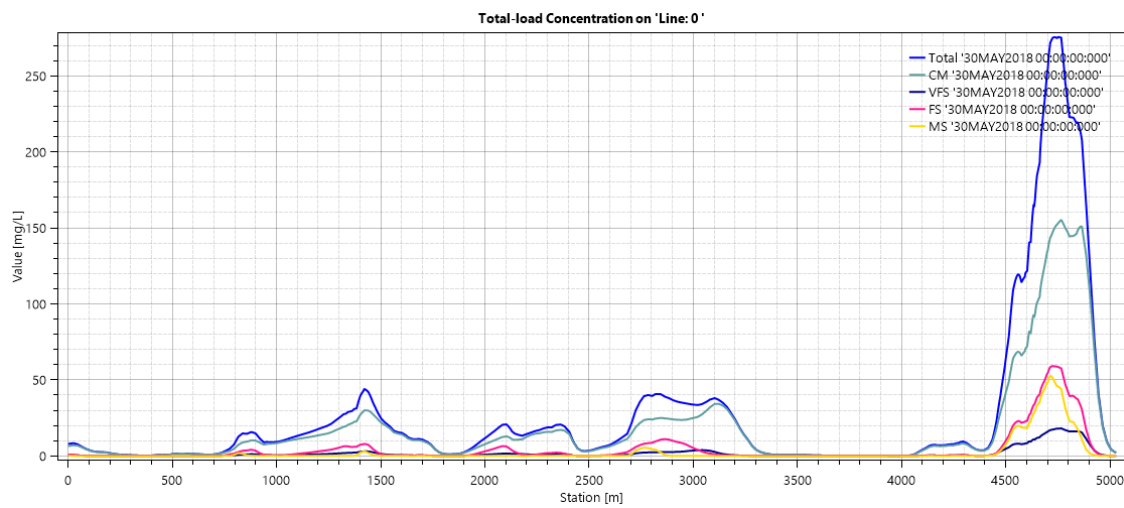
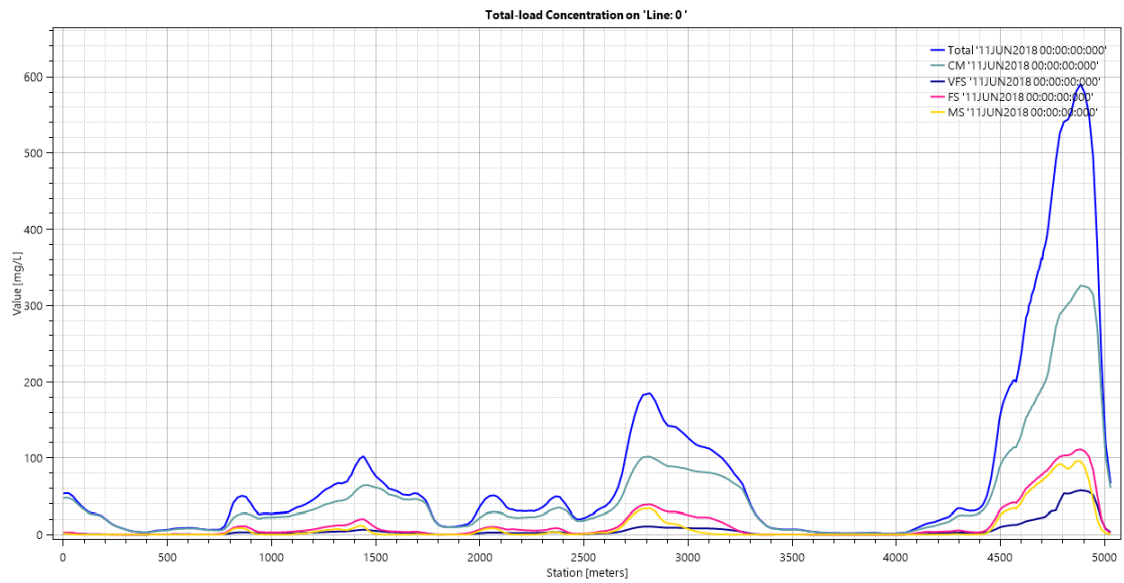
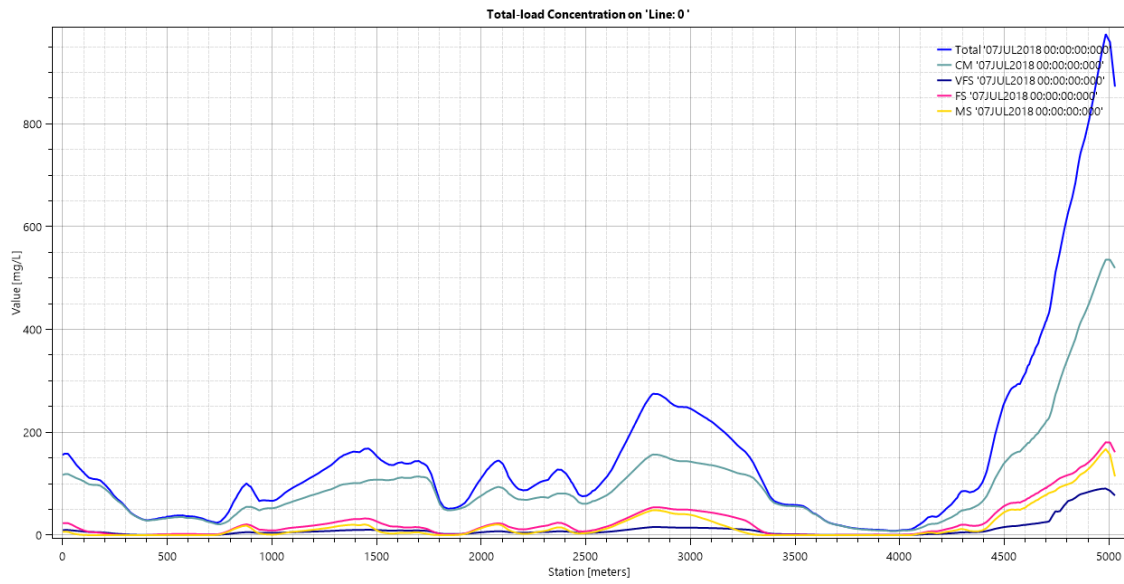


Figura 22: Perfil de concentración de sedimento en el eje principal - 7 de Julio, 11 de Junio y 30 de Mayo

## 6.8. Total Load Transport Rate

La tasa de transporte total se produce generalmente en las zonas de mayor erosión, y esta del orden de 0 – 30 [Tonn/m/día] en las regiones del mapa donde se observa un color rojo (Figura 23). En el río Maipo en general se observa en la Figura 24 que la tasa de transporte no supera los 5 [Tonn/m/día] y para la desembocadura aumenta significativamente a un valor cercano a 30 [Tonn/m/día].

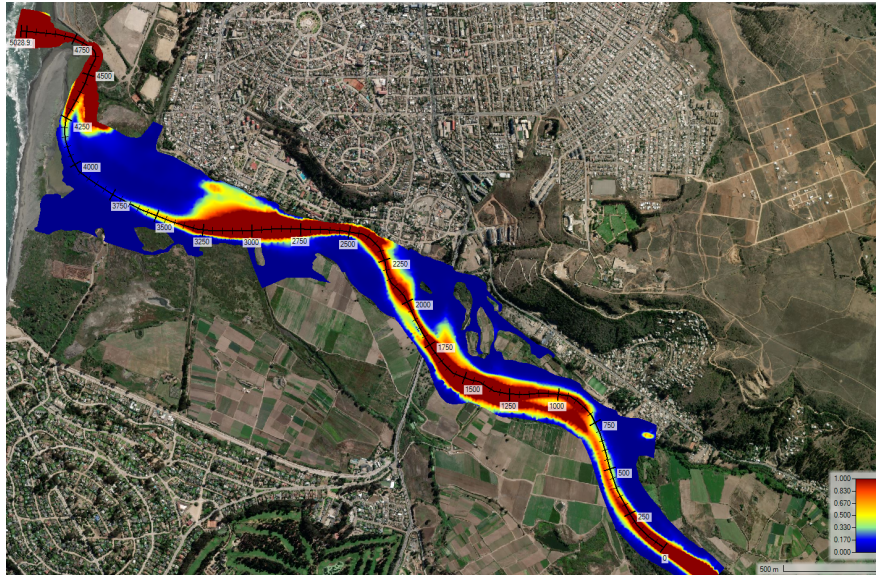


Figura 23: Mapa transporte de sedimento del estuario río Maipo

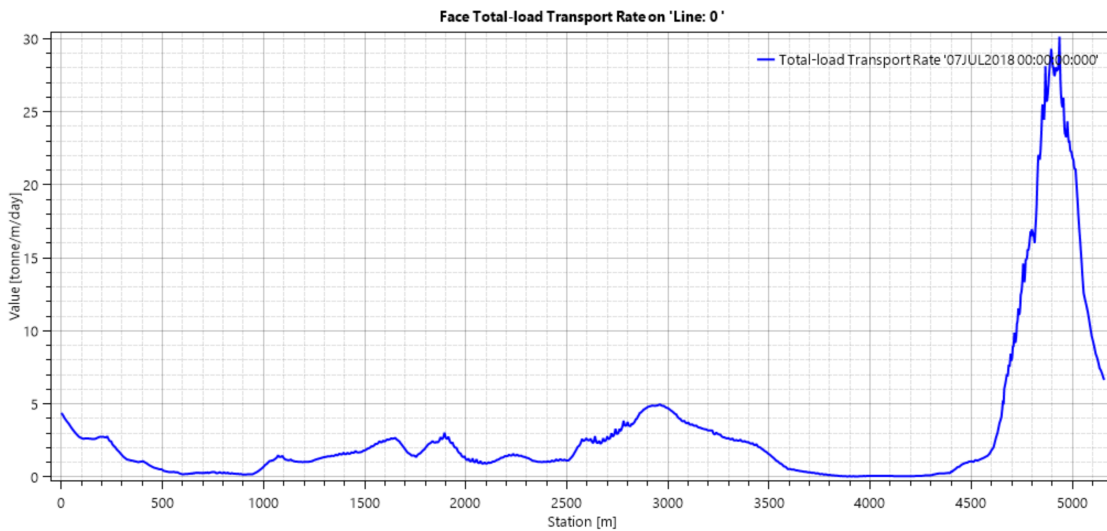


Figura 24: Perfil transporte de sedimento del estuario río Maipo

## 7. Discusión

Con respecto a la elaboración del modelo bidimensional para el estuario del río Maipo, al realizar la delimitación geométrica utilizando RAS Mapper, se pudo elaborar una malla computacional adecuada para la zona de estudio utilizando las opciones de refinar la zona del río y delimitar terrenos elevados que se observaran en el modelo de elevación digital (DEM), además de que es posible delimitar diferentes zonas para establecer coeficientes de rugosidad dependiendo del uso de suelos en el sector y establecer cuál será el área de interés para estimar la concentración y tasa de transporte de sedimentos.

Sin embargo, el software resulta altamente inestable con respecto a la malla computacional, debido a que como corresponde a un modelo bidimensional que abarca el tema de sedimento, el software te obliga a utilizar la opción paso de tiempo adaptativo en base al número de Courant para evitar la inestabilidad de los cálculos realizados por el programa. Por tanto, para el caso en específico de una modelación bidimensional para un periodo superior a un mes se recomienda utilizar celdas de un tamaño promedio entre 10 - 50 [m]. En este caso se utilizaron celdas de un tamaño igual a 20 metros en el cauce principal y en las zonas de delimitación se utilizaron celdas de un tamaño igual a 10 metros.

Por otra parte, con respecto específicamente de las opciones para introducir los datos de sedimento, se otorgan diversas funciones para realizar la modelación, sin embargo el modelo puede ser altamente susceptible a las funciones escogidas y entregar resultados muy variables, por lo cual se decidió optar por la función de transporte de Toffaleti Toffaleti (1968) en base a la granulometría que se disponía y debido a que encaja con la descripción de que es adecuada para el caso de ríos grandes.

Con respecto a los resultados obtenidos, resulta útil estimar la velocidad máxima en los periodos de mayor caudal además de que es posible estimar el número de Froude y el esfuerzo cortante en el lecho del río. Además de que esto da un indicativo inicial a como se va a comportar el modelo con respecto al transporte de sedimento.

En términos del cambio de morfología de la zona, es posible identificar cuales fueron las zonas de mayor erosión y sedimentación, y se distingue claramente un problema en la desembocadura donde se produce la mayor erosión y sedimentación producto de la angosta salida que tenía el río cuando se realizó la batimetría. No obstante, los resultados son limitados debido a que está condicionado a la calidad de la malla y el tamaño de las celdas.

Por otra parte, el modelo entrega resultados de la concentración de sedimentos y se observa que este es mayor en los días de máximo caudal llegando hasta los 250 [mg/L] para la laguna estuarial y 900 [mg/L] para la zona de la desembocadura, además de que la mayor concentración resulta para limo grueso y arena fina y media. Con respecto a la tasa de transporte de sedimento hay zonas donde varía entre 0 a 5 [Tonne/m/día] en el río Maipo y para la desembocadura aumenta a 30 [Tonne/m/día]. Estos resultados podrían ser más precisos en caso de tener varias muestras de sedimento en diferentes puntos del estuario.

Finalmente, con respecto al software HEC-RAS, se observa que funciona adecuadamente para realizar la modelación y se entregan buenos resultados, además es fácil de utilizar si se sigue el

manual del programa, no obstante es altamente inestable si no se configura adecuadamente y los resultados específicamente del cambio de morfología no son tan precisos debido a la calidad de la malla. Se recomienda utilizar equipo con una velocidad de procesador igual o superior a 3.4 GHz, tener un disco duro de estado solido (SSD) y maximizar la memoria RAM para optimizar los cálculos del programa (Brunner, 2020).

## 8. Conclusiones

En el presente estudio, se revisó un modelo bidimensional en el estuario del río Maipo debido a la acumulación de sedimento que se produce en esta zona y realizar una evaluación del desempeño del software para estimar la concentración y transporte de sedimento en el sector. Se realizó una guía de la metodología empleada para el caso específico de estudio y los resultados indican que se pudo identificar las zonas en donde es posible que se encuentre mayor acumulación de sedimento además de en base a la batimetría disponible se pudo observar el cambio de morfología producto a eventos ocurridos en el año 2018, tal como la erosión y sedimentación del suelo, en donde se puede distinguir que principalmente en la salida angosta que se tenía cuando se realizó la batimetría, existe una gran posibilidad que se erosione producto a caudales elevados y posterior a esta zona se produce una acumulación de sedimento, provocando que se cierre la salida del río Maipo al mar.

Sin embargo, como se realizó un análisis general del modelo bidimensional y se utilizaron caudales diarios con una probabilidad de excedencia cercana al 20 %, se recomienda para futuros trabajos realizar simulaciones con un intervalo de análisis de una hora para eventos en específico que se pueda presentar para obtener resultados más precisos y detallados con respecto a un hidrograma de tormenta con diferentes periodos de retorno.

También se recomienda tener diferentes tomas de muestras de sedimento en diferentes puntos del estuario para ajustar de manera más precisa el modelo. Por último, con respecto a la interacción del mar, sería necesario revisar e incluir el factor de salinidad utilizando HEC-RAS, sobre todo para modelaciones donde el caudal es bajo e interactúa la marea con el estuario del río Maipo.

## Referencias

- Ackers, P., & White, W. R. (1973). Sediment Transport: New Approach and Analysis. *Journal of the Hydraulics Division*, 99, 2041-2060. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003791>
- Araya, J. F. (1981). El concepto de delta en ría y su significado en la evolución litoral (ejemplo en Chile Central). *Informaciones geográficas Santiago*, 28, 71-102.
- Arriagada, J. (2005). *Cambios en el sistema estuarial del Maipo y su relación con obras portuarias, Chile Central* [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/100680>
- Booth, R., & Thomas, A. (2011). *Metodología para Determinar Caudales de Dilución en Estuarios*. [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104165>
- Brunner, G. W. (2020). *HEC-RAS 2D User's Manual Version 6.3*. U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>
- Cameron, W. D., & Pritchard, D. W. (1963). Estuaries. En M. N. Hill (Ed.), *The Sea* (pp. 306-324). John Wiley Sons.
- Carrera, J. (2013). *Implementación del Modelo Matemático HEC-RAS para estudio de procesos de flujo en el proyecto hidroeléctrico minas San Francisco* [Tesis de pregrado]. Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/446>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2). (2025). Explorador Climático CR2 [Universidad de Chile]. <https://explorador.cr2.cl>
- Copeland, R. R., & Thomas, W. A. (1989). Corte Madera Creek Sedimentation Study: Numerical Model Investigation. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/112488>
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2020). Sistema de Información Territorial. <https://sit.conaf.cl/#>
- Dalrymple, R., Boyd, R., & Zaitlin, B. A. (1992). Estuarine Facies Models: Conceptual Basis and Stratigraphic Implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1130-1146.
- Day, T. J. (1980). *A study of the transport of graded sediments* (Technical Report No. IT 190). Hydraulics Research Station. <http://eprints.hrwallingford.com/id/eprint/33>
- Diario Universidad de Chile. (2023). ¿Por qué el Río Maipo no está desembocando en el mar?: El análisis de expertos sobre el inédito fenómeno. *Diario Universidad de Chile*. <https://radio.uchile.cl/2023/01/26/por-que-el-rio-maipo-no-esta-desembocando-en-el-mar-el-analisis-de-expertos-sobre-el-inedito-fenomeno/>
- Dietrich, W. E. (1982). Settling velocity of natural particles. *Water Resources Research*, 18, 1615-1626. <https://doi.org/10.1029/WR018i006p01615>
- Engelund, F., & Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Teknisk Forlag*.
- Fairbridge, R. W. (1980). The Estuary: Its definition and geodynamic cycle. En Olausson, E. Cato, I. (Ed.), *Chemistry and Biogeochemistry of Estuaries* (pp. 1-36). John Wiley and Sons Ltd.
- Gaete, H., Álvarez, M., Lobos, G., Soto, E., & Jara-Gutiérrez, C. (2017). Assessment of oxidative stress and bioaccumulation of the metals Cu, Fe, Zn, Pb, Cd in the polychaete *Perinereis gualpensis* from estuaries of central Chile. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 653-658. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651317304955?via%3Dihub>
- Japan Aerospace Exploration Agency. (2024). Advanced Land Observing Satellite "Daichi" (ALOS) data.

- La Tercera. (2023). Campaña científica investiga posibles causas tras el cierre de la desembocadura del Río Maipo. *La Tercera*. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/campana-cientifica-investiga-posibles-causas-tras-el-cierre-de-la-desembocadura-del-rio-maipo/7IONH5BQDNHPJP4JD57NWYQA4Y/>
- Laursen, E. M. (1958). The Total Sediment Load of Streams. *Journal of the Hydraulics Division*, 84, 1-36. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000158>
- Martín, J. P. (2002). *Ingeniería de Ríos* (Edición UPC, S.L.). Universidad Politécnica de Catalunya.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948). *Formulas for Bed-Load transport* (Technical Report). <https://repository.tudelft.nl/record/uuid:4fda9b61-be28-4703-ab06-43cdc2a21bd7>
- Noriega Garzón, A. F. (2023). *Evaluación integral del transporte de sedimentos en la desembocadura del río Matuntugo en Bocas del Atrato entre el año 2019 y 2020* [Tesis de maestría]. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/2741>
- Pratama, F., Wulandari, S., & Rohmat, F. I. W. (2025). Modeling sediment accumulation in Pare Reservoir using HEC-RAS 2D: Assessing storage capacity over a 10-year period. *Results in Engineering*, 25, 104333. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025004141>
- Proffitt, G. T., & Sutherland, A. J. (1983). Transport of nonuniform sediment, *Journal of Hydraulic Research*. *Journal of Hydraulic Research*, 21, 33-43. <https://doi.org/10.1080/00221688309499448>
- Rahaman, M., Joshi, N., Kalra, A., Lamichhane, G. R., & Ahmad, S. (2019). Application of HEC-RAS to Study the Sediment Transport Characteristics of Maumee River in Ohio. *World Environmental and Water Resources Congress 2019*.
- Rahman, M., & Ali, M. S. (2024). Drivers of tidal flow variability in the Pussur fluvial estuary: A numerical study by HEC-RAS. *Heliyon*, 10, e25662. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E25662>
- Rubey, W. W. (1933). Settling velocity of gravel, sand, and silt particles. *American Journal of Science*, 25, 325-338. <https://doi.org/10.2475/AJS.S5-25.148.325>
- Sanchez, A. (2021). *HEC-RAS River analysis System: Two-Dimensional Sediment Transport User Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/h2sd/ras2dsed/latest>
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). (2024). Datos batimétricos del litoral central de Chile, San Antonio.
- Soulsby, R. L. (1998). *Dynamics of marine sands* (Technical Report). Thomas Telford. [https://books.google.cl/books?id=4N1M5lWIyAoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cl/books?id=4N1M5lWIyAoC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- SUR PLAN. (2016). *Informe Ambiental San Antonio* (Technical Report). Ministerio del Medio Ambiente. [https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/02\\_IAC\\_PRC\\_San\\_Antonio.pdf](https://eae.mma.gob.cl/storage/documents/02_IAC_PRC_San_Antonio.pdf)
- Toffaletti, F. B. (1968). *A Procedure for Computation of the Total River Sand Discharge and Detailed Distribution, Bed to Surface*. (Technical Report, Vol. 5). United States Army, Committee on Channel Stabilization and Corps of Engineers. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0746970>
- van Rijn, L. (1984). Sediment Transport, Part III: Bed forms and Alluvial Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1733-1754. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1733))
- van Rijn, L. (1993). Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*, 1-17.

- van Rijn, L. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133, 649-667. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(649\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(649))
- Wilcock, P. R., & Crowe, J. C. (2003). Surface-based Transport Model for Mixed-Size Sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129, 120-128. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:2\(120\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:2(120))
- Wu, W., & Wang, S. S. Y. (2006). Formulas for Sediment Porosity and Settling Velocity. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132, 858-862. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2006\)132:8\(858\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2006)132:8(858))
- Wu, W., Wang, S. S., & Jia, Y. (2000). Nonuniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 38, 427-434. <https://doi.org/10.1080/00221680009498296>
- Yang, C. T. (1984). Unit Stream Power Equation for Gravel. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110, 1783-1797. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1984\)110:12\(1783\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:12(1783))
- Yazdan, M. M. S., Ahad, M. T., Kumar, R., & Mehedi, M. A. A. (2022). Estimating Flooding at River Spree Floodplain Using HEC-RAS Simulation. *J*, 5(4), 410-426. <https://doi.org/10.3390/j5040028>

## A. Anexo A

### A.1. Mapa subsubcuenca - Ubicación Estación Cabimbao

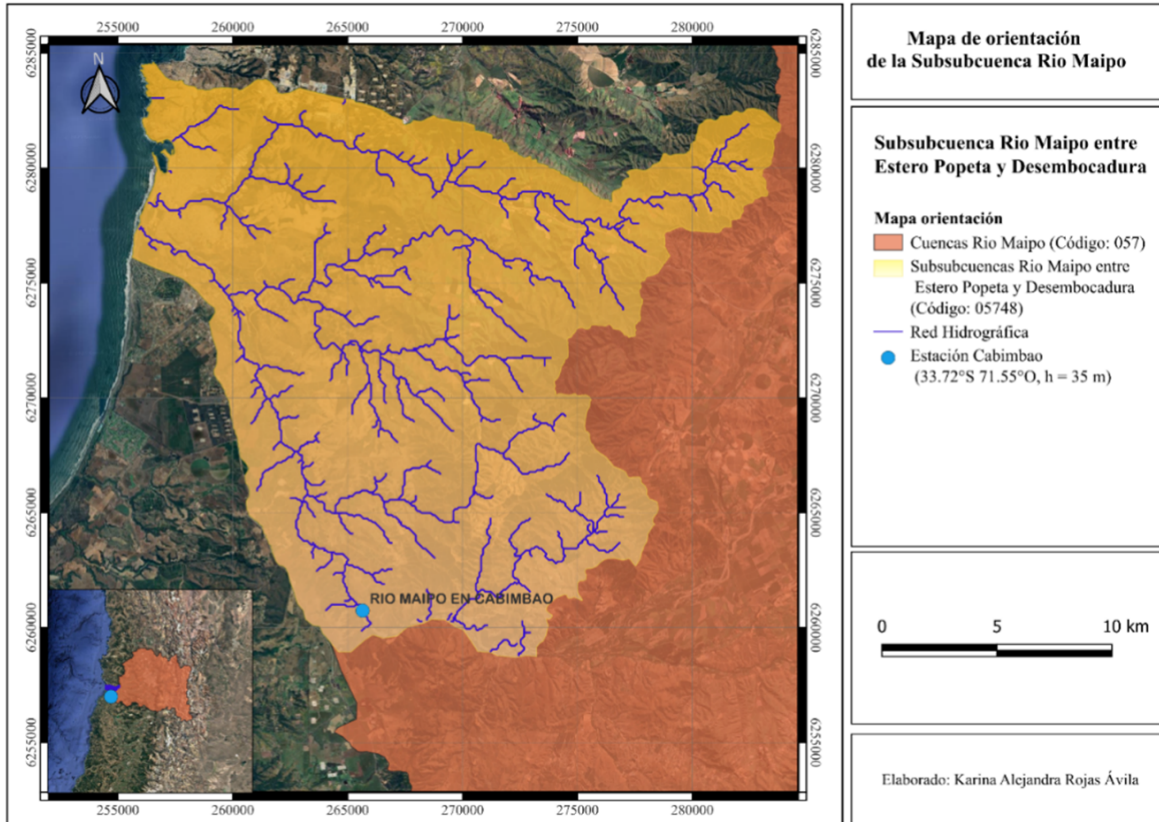


Figura 25: Ubicación Estación Cabimbao

## A.2. Caudal máximo diario año 2018 - Estación Cabimbao

Tabla 4: Caudal máximo diario 2018 Estación Cabimbao

Caudal máximo diario - 2018 (Estación Cabimbao)											
Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio	
Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]
1	52.5	1	6.9	1	17.2	1	26.3	1	35.7	1	60.7
2	45	2	7.7	2	17.9	2	27.1	2	36.5	2	56.5
3	23.8	3	15	3	18.4	3	24.8	3	34.7	3	53
4	13.1	4	34.8	4	21.1	4	23.6	4	32.6	4	52.4
5	8.3	5	51.6	5	23.2	5	23.9	5	31.2	5	51.6
6	5.5	6	53.5	6	20.2	6	25.2	6	32.4	6	51.7
7	6.4	7	49.7	7	18.5	7	26.9	7	34.7	7	52.9
8	10.2	8	42.2	8	18.6	8	29.7	8	33.2	8	53.6
9	14.1	9	35.5	9	19.3	9	32	9	32.8	9	57.6
10	14.1	10	28.2	10	20	10	30.6	10	32.5	10	93.3
11	12.5	11	24.7	11	22.6	11	29	11	31.5	11	127
12	12.3	12	24.4	12	25.7	12	30.5	12	32.9	12	130
13	17.6	13	19.5	13	21.9	13	28.2	13	34.3	13	81.1
14	30.9	14	18.6	14	19.6	14	28.7	14	37.6	14	71.1
15	27.5	15	21.3	15	18.9	15	30.3	15	35.6	15	68.2
16	16.3	16	25.7	16	19.4	16	32.9	16	34.5	16	66.1
17	10.8	17	27.4	17	20.4	17	32.2	17	36	17	64.1
18	8.6	18	32.8	18	23.1	18	30.2	18	33.9	18	62.6
19	6.8	19	37.9	19	25.6	19	29.2	19	34.5	19	61.2
20	7.4	20	28.1	20	23	20	30.6	20	36.4	20	58.4
21	9.7	21	21	21	21.1	21	34	21	37.6	21	58.5
22	13.7	22	17.9	22	20.4	22	34.3	22	37.2	22	59.3
23	10.9	23	16.1	23	20.2	23	35.2	23	34.8	23	56.6
24	8	24	16.2	24	20.5	24	32.7	24	34.2	24	56.1
25	7	25	19.1	25	22.3	25	31.1	25	32.5	25	57.2
26	7.2	26	21	26	24.2	26	30	26	34	26	57.7
27	6.8	27	18.8	27	22.2	27	29.7	27	38.9	27	56.2
28	7.7	28	17.3	28	20.7	28	30	28	44.7	28	56
29	9.9			29	20.4	29	32.7	29	59	29	56.9
30	8.1			30	21.8	30	35.9	30	77.2	30	58.5
31	6.9			31	25.1			31	68.1		
Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]	Día	Caudal [m3/s]
1	59.4	1	54.4	1	45.3	1	63.8	1	31.8	1	29.8
2	61.9	2	50.8	2	45.2	2	44.3	2	36.6	2	31.5
3	61.3	3	50.9	3	44	3	33.2	3	38.2	3	26
4	59.2	4	50.4	4	38.3	4	27.6	4	35.4	4	24.2
5	69.1	5	50.3	5	31.4	5	24.6	5	34.7	5	21.5
6	171	6	51.5	6	27.7	6	23.7	6	30.1	6	24.3
7	195	7	54.3	7	27.3	7	26.2	7	26	7	25.3
8	107	8	68.4	8	26	8	30.5	8	24.2	8	23.2
9	88.9	9	56.9	9	26.8	9	28.6	9	24.2	9	25.8
10	81.2	10	54.6	10	29.8	10	25.5	10	27.6	10	25
11	74.8	11	53.1	11	26.9	11	25.2	11	33.4	11	20.7
12	72.5	12	55.3	12	23.2	12	24.8	12	36.5	12	18.3
13	70.8	13	55.3	13	20.5	13	24.9	13	33.4	13	14.6
14	68.5	14	53.7	14	19.8	14	27.3	14	34.9	14	16
15	68.8	15	50.3	15	20.5	15	29.6	15	32.6	15	17.5
16	65.1	16	48.5	16	25	16	30.2	16	30	16	18.6
17	64.3	17	50.3	17	30.8	17	27.9	17	28.1	17	22.8
18	64.4	18	50.5	18	41	18	25.5	18	29.1	18	18.9
19	63.9	19	49.1	19	76.4	19	25.2	19	31.4	19	18.3
20	61.9	20	48.7	20	64.5	20	24.4	20	28.3	20	21.6
21	60.2	21	43.1	21	48.4	21	24.7	21	25.5	21	22.4
22	58.4	22	40.8	22	40	22	27.6	22	25.7	22	19.7
23	58	23	45.1	23	38.5	23	25.7	23	30.6	23	18.2
24	58.1	24	52.5	24	41.3	24	23.9	24	33.9	24	27.2
25	56.6	25	52.3	25	38.1	25	24.2	25	34.7	25	36.1
26	55.9	26	52.6	26	33.3	26	24.2	26	36.8	26	56.1
27	54.5	27	52.7	27	32.2	27	23.6	27	33.8	27	62
28	55	28	52.3	28	33.6	28	24.7	28	26.4	28	55.1
29	54.2	29	51.9	29	40.2	29	27.3	29	24.7	29	44.8
30	56.1	30	49.9	30	52.2	30	29.2	30	25.9	30	40.4
31	60.6	31	46.7			31	30.6			31	37.8

## B. Anexo B

### B.1. Mallado refinado en 2D

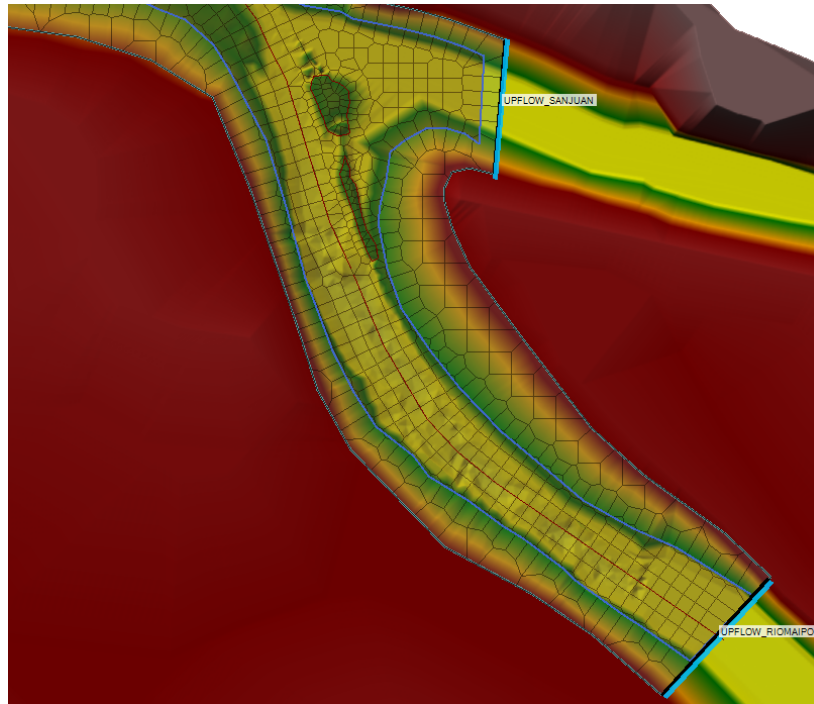


Figura 26: Detalle mallado refinado - Entrada río Maipo

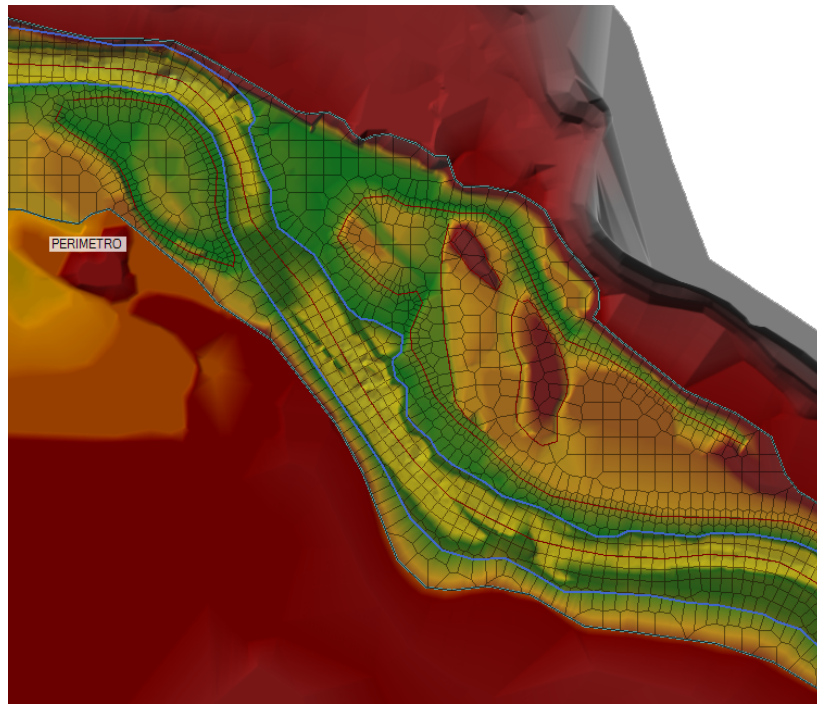


Figura 27: Detalle mallado refinado - Estuario río Maipo

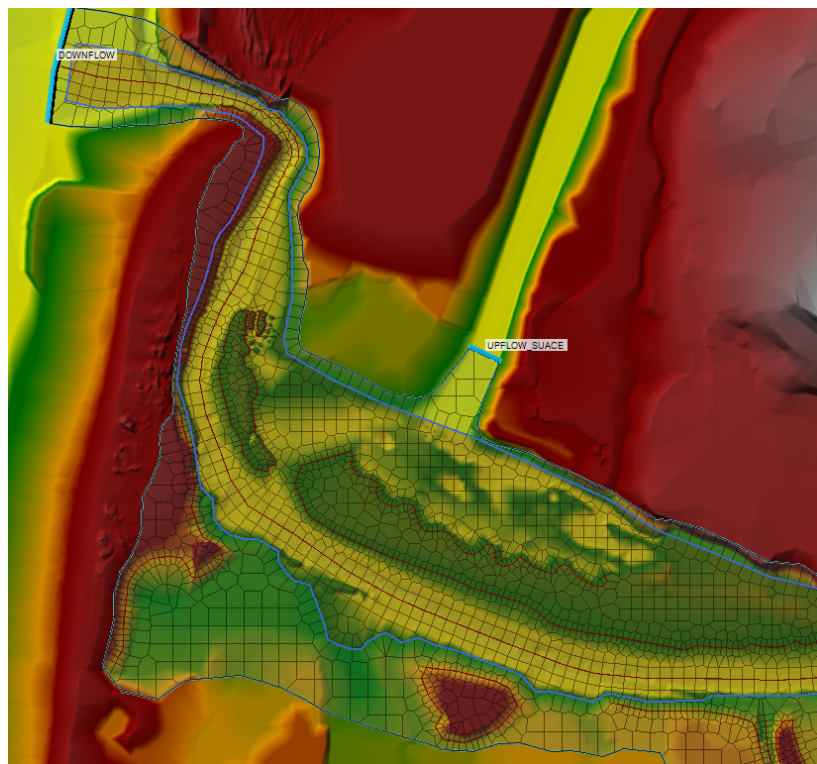


Figura 28: Detalle mallado refinado - Salida río Maipo

## B.2. Sedimento

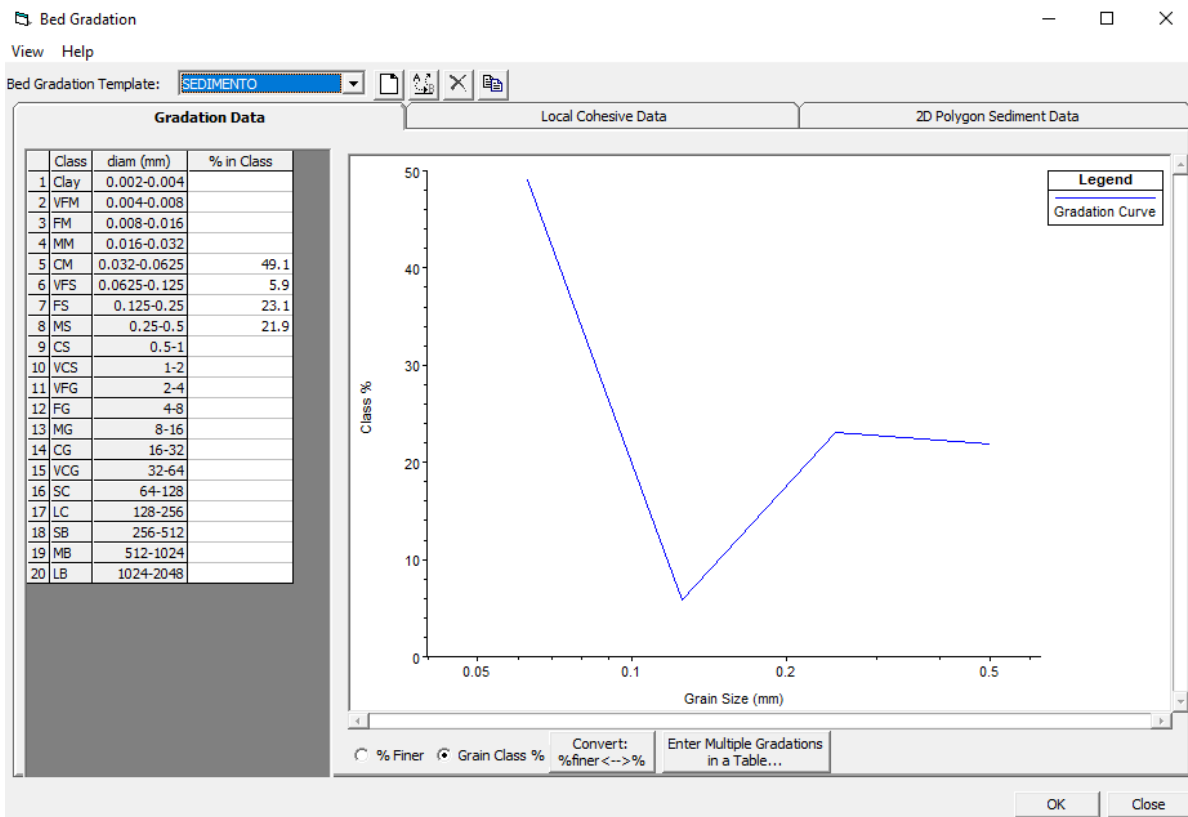


Figura 29: Granulometría - Estuario río Maipo