



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Cíviles

**ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN EL
ESTUARIO DEL RÍO MAIPO MEDIANTE MÉTODOS ACÚSTICOS Y
ÓPTICOS**

Memoria de Título presentada por

Nicolás Jusari Razazi

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

y el grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil

Profesor Guía
Raúl Flores Audibert

ABRIL, 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TÍTULO DE LA TESIS:

ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO MEDIANTE MÉTODOS ACÚSTICOS Y ÓPTICOS

AUTOR:

Nicolás Jusari Razazi

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL y grado de MAGISTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Profesor Guía:

Nombre Miembro 1 Comisión:

Nombre Miembro 2 Comisión:

Valparaíso, Chile, 4 de abril de 2024

ESTIMACIÓN DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN EL ESTUARIO DEL RÍO MAIPO MEDIANTE MÉTODOS ACÚSTICOS Y ÓPTICOS

Nicolás Jusari¹, Raúl Flores¹, Megan Williams²

1 Universidad Técnica Federico Santa María

2 Pontificia Universidad Católica de Chile

Resumen

Los sedimentos costeros han sido fuertemente estudiados dentro de los procesos costeros, producto que poseen un rol fundamental para la mantención de playas, humedales y la morfología costera. Por lo mismo, el presente estudio tiene como objetivo estimar el flujo de sedimentos en suspensión presente en el estuario del Río Maipo, utilizando instrumentos acústicos y ópticos durante dos periodos estacionales distintos, con diferencias significativas en cuanto a su régimen de caudales (periodo de invierno y primavera). El primer periodo corresponde a septiembre 2021 (invierno), donde se realizaron mediciones en la zona cercana a la desembocadura (Sección 1) y a 2.5 km aguas arriba de la misma (Sección 2). Se utilizaron dos perfiladores de corriente Doppler acústico (ADCP Teledyne RDI Stream Pro y ADCP Teledyne Sentinel V20 respectivamente) con los que se mide la velocidad de flujo paralela al río a lo largo de toda la sección transversal de este a partir de transectos con el instrumento. Además se utilizaron sensores de retrodispersión óptica los cuales miden turbidez (TU) y sensores CTD (Conductivity-Temperature-Depth) mediante los cuales se obtiene salinidad (S). El segundo periodo corresponde a octubre 2022 (primavera), en donde también se utilizó un perfilador de corriente Doppler acústico (ADCP RDI Sentinel Workhorse de 1200 kHz) para medir el perfil de velocidad de flujo en la columna de agua de manera puntual en el estuario (cercano a la desembocadura en Sección 1), registrando velocidades temporales de flujo. También se empleó el uso de sensores CTD-RBR + TU para la obtención de perfiles de salinidad y turbidez. Además, en ambas campañas se realizó una recolección de muestras de agua con el fin de obtener concentración de sedimentos en suspensión (CSS) y correlacionarla con las mediciones sincrónicas de TU.

La metodología consiste en realizar una regresión lineal entre las mediciones de TU y CSS obtenidas de las muestras de sedimentos, para luego con la velocidad de flujo y perfiles de CSS-TU estimar un flujo de sedimentos entrante, saliente y por ende neto del estuario del Río Maipo en ventanas de tiempo definidas, además de estudiar el comportamiento del mismo y las variables que influyen en estos resultados.

En septiembre 2021, en Sección 1 se registra un flujo de agua dulce completamente saliente del estuario hacia la costa (régimen de bajamar), visualizando un perfil de CSS lineal creciente en la primera capa superficial (profundidad < 0.5 m), para luego pasar a un perfil prácticamente constante en la columna de agua (profundidad > 0.5 m). A partir de esto se estima un caudal (Q) y flujo de sedimentos en suspensión (F_s) de 32.35 m³/s y 1.56 kg/s respectivamente, registrando a la vez por parte de los transectos una sección transversal de 26 m y una profundidad máxima de 2.4 m. Por otro lado, en Sección 2 se analizan dos regímenes de marea (pleamar; donde se presencia una fuerte cuña salina; y bajamar), en los cuales se visualiza un perfil variable de CSS en la columna de agua, estimando un Q medio de 5.3 y 11.7 m³/s, y un F_s total igual a 0.10 y 0.23 kg/s entrante y saliente al estuario respectivamente, con una sección transversal de aproximadamente 90 m y una profundidad máxima de estuario de 4 m. Con esto último, es posible afirmar que durante las ventanas de tiempo analizadas en la zona de estudio existe un transporte neto de sedimentos costeros en suspensión hacia la costa equivalente a 1.56 y 0.13 kg/s en Sección 1 y Sección 2 respectivamente. Estos últimos resultados varían bastante entre sí, siendo que ambos son F_s con dirección hacia la costa y fueron extraídos durante el mismo

día pero en diferentes ventanas de tiempo. Además, si observamos solo el F_s registrado en condición vaciante, se tienen valores de 1.56 y 0.23 kg/s para la Sección 1 y Sección 2 respectivamente. La diferencia sigue siendo significativa pese a que este desfase fue solamente de una hora. Esto demuestra el comportamiento dinámico espacial y temporal que puede tener el estuario en sus diferentes secciones, periodos de tiempo y regímenes de marea analizados.

En octubre 2022, dada la cercanía de los instrumentos a la desembocadura, se registró en la capa superior (profundidad < 1 m) un flujo de agua dulce saliente del estuario con dirección hacia la costa, mientras que la capa inferior (profundidad > 1 m) presentó un flujo de agua salada entrante al estuario, siendo esto característico de un flujo estratificado con intercambio entre dos capas. Este comportamiento varió según el día y la ventana temporal analizada, y bajo el supuesto de que toda la sección transversal (ancho $b = 150$ m) del estuario se comporta de manera similar, a partir del perfil de velocidades se estimó un Q y F_s neto del estuario para cada día en dirección hacia la costa. El Q neto estimado para los días 21, 22, 24, 26 de octubre es de 17.2, 6.64, 13.85 y 40.71 m^3/s , mientras que el F_s es de 0.136, 0.0495, 0.152 y 0.438 kg/s respectivamente. Estos valores no corresponden a valores diarios ni mucho menos a valores medio mensuales producto que fueron estimados a partir de la velocidad media registrada en una ventana de tiempo aproximada de 1 hora para cada día. Además pueden presentar gran sesgo respecto a los valores reales de Q debido al fuerte supuesto de extrapolar el perfil de velocidad registrado en un punto espacial para toda la sección transversal del estuario, aún sabiendo que las velocidades (en magnitud y dirección) y batimetría del estuario no son las mismas en todos los puntos. También es relevante señalar que, si bien en ninguna campaña se contó con instrumentos capaces de medir el tamaño de partícula de los sedimentos en suspensión en la columna de agua (difractores laser), según las fotografías registradas y lo observado en los procesos de filtrado de muestras con sedimentos, se llegó a la conclusión que en ambos periodos el sedimento transportado por el Río Maipo hacia el estuario está compuesto en gran medida de material fino cohesivo, reduciendo su tamaño (posiblemente por la floculación y cantidad-densidad de sedimentos) de septiembre 2021 a octubre 2022. Lo anterior dió paso a una posible resuspensión y retención de sedimentos en suspensión en una zona curva, particularmente durante la campaña de octubre 2022.

Por otro lado, las calibraciones de CSS-TU obtenidas indican una relación lineal de tipo 1:1 entre ambas variables para la mayoría de los casos, viendose influenciada en gran medida por el tamaño de partícula y la prolijidad del proceso de filtrado con partículas de sedimentos demasiado finas.

Los resultados de Q estimados ($Q_{Estuario}$) son comparados con el Q registrado por la Estación Fluviométrica Río Maipo en Cabimbao ($Q_{Cabimbao}$), a una distancia de 20 km aguas arriba de la desembocadura. Sin embargo, el $Q_{Cabimbao}$ para el periodo de septiembre 2021 y octubre 2022 no se condice totalmente con los $Q_{Estuario}$ estimados para cada periodo, sumado además que el $Q_{Cabimbao}$ no es registrado en la misma zona que los $Q_{Estuario}$ y con diferentes ventanas de tiempo. Por otro lado, se concluye que no hay relación directa entre el $Q_{Cabimbao}$ y la CSS extraída durante la campaña de mediciones, posiblemente por el bajo rango de Q -CSS que se posee, la diferencia espacial en donde se registraron los datos y los efectos de marea que afectan la hidrodinámica de la zona.

Finalmente, frente a la imposibilidad de comparar los Q y F_s estimados con valores del mismo sistema en otras épocas (no hay estudios sobre estos parámetros) o bien de otros sistemas similares (condiciones de Q variables), se comparan los resultados de CSS con sistemas que poseen características similares al estuario del Río Maipo en cuanto a régimen de caudales, razón de aspecto (profundidad/ancho) y tipo de sedimentos. Del análisis se concluyó que las CSS estimadas en el estuario del Río Maipo para septiembre 2021 eran concordantes con lo esperado en este tipo de sistemas, no así para octubre 2022, viendo una reducción de la CSS principalmente por el Q entregado por el río (megasequía y cambio climático) y la cantidad de sedimentos

arrastrados a lo largo de la cuenca en periodo de deshielo (primavera), además de afectar la zona curva en la que se posicionaron los instrumentos. En base a esto último, se evidencia que el F_s calculado en base a la velocidad de flujo y CSS, está determinado por el caudal del río, el cual afecta directamente a estas dos variables.

Palabras claves: *Estuario, Concentración de Sedimentos en Suspensión, Flujo de Sedimentos en Suspensión, Estratificación.*

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. Introducción

Los ríos son los encargados de drenar las cuencas hidrológicas, transportando agua y material particulado desde las montañas a la costa. El aporte de este material hacia el sistema costero, compuesto en gran medida por sedimentos, es fundamental para la mantención de playas, humedales, la morfología costera, y la adaptación al cambio climático (D. E. Walling, 2009; Brand et al., 2019; da Silva et al., 2019; Masselink et al., 2020). En este sentido, el aporte de sedimentos posee un rol clave en cuanto a la protección frente a procesos de erosión costera producto de oleaje, inundaciones por marejadas, tsunamis, además del sustento entregado a los ecosistemas costeros (Carter et al., 1987; Vericat y Batalla, 2010; Vercruyssen et al., 2017; Slabon y Hoffmann, 2024).

En el caso particular de Chile se ha visto un aumento de la erosión costera durante los últimos años, debido a una mayor frecuencia de eventos extremos como tormentas y marejadas (Martínez et al., 2018), asociadas en gran medida a la variabilidad climática y al cambio climático global (Zhang y Sheng, 2015). Si bien, hasta la fecha la erosión costera en Chile central no ha generado efectos significativos en las costas, Martínez et al., 2018 presenta la evolución de la línea de costa de cuatro playas en Chile central, predominando una tasa de erosión positiva durante la década analizada. Por otro lado, desde el año 2010 ha existido una mega sequía en Chile central, reduciendo la capa de nieve de la cordillera de los Andes y generando por consiguiente una disminución importante (hasta 90 %) del caudal de ríos presentes en la zona (Garreaud et al., 2017). Además, el calentamiento continuo en Chile ha acelerado la evapotranspiración potencial, modificando la vegetación y caudal de la zona (Garreaud et al., 2017). Estos efectos, sumado de las variaciones climáticas (tormentas y marejadas) ha contribuido paulatinamente a los procesos de erosión costera (Martínez et al., 2018). Por otro lado, los ríos de Chile central presentan gran actividad antropogénica, viéndose modificadas las características del transporte de sedimentos en suspensión y de fondo (Alcayaga et al., 2019), especialmente por diques y/o represas las cuales atrapan gran parte del sedimento en suspensión entrante a los ríos aguas abajo (Vörösmarty et al., 2003; D. E. Walling, 2012; Frings et al., 2019). Esto se ve reflejado en cambios directos en la cuenca estuarina y cambios bruscos de batimetría, límites de laderas y desembocadura (Largier, 2023), en donde la ganancia de profundidad disminuye la disipación de energía de mareas y por tanto se producen cambios en la mezcla vertical y transporte de sedimentos en suspensión (de Nijs et al., 2010; Van Maren et al., 2015). Dado que cada sistema de Chile central posee un forzante de oleaje e hidrodinámica costera definida, lo anterior

hace necesaria una evaluación de cada sistema en particular, cuantificando sus aportes de sedimentos costeros a los estuarios-playas, más aún frente a un escenario actual de cambio climático.

En las últimas décadas se han incorporado nuevas metodologías para la estimación de la concentración de sedimentos (CSS) en ambientes acuáticos mediante instrumentos ópticos y acústicos con buenos resultados (Y. H. Kim y Voulgaris, 2003; H. Kim et al., 2004; Minella et al., 2008). El instrumento óptico mide turbidez, basado en la atenuación de un haz de luz que atraviesa una suspensión compuesta por agua y material particulado (Guillén et al., 2000; Downing, 2006), que generalmente responde de manera lineal con la concentración de sedimentos (Merten et al., 2014; Wang et al., 2020). Por otro lado, instrumentos que funcionan en base a principios acústicos, como los ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), han comenzado a ser utilizados para la calibración de concentraciones de sedimentos en suspensión (J. Gartner, 2002; Y. H. Kim y Voulgaris, 2003; J. W. Gartner, 2004). Estos instrumentos permiten obtener mediciones del perfil de velocidad en la columna de agua a través de principios de backscatter acústico (Baranya y Józsa, 2013; Parsons et al., 2013). Usando la señal de backscatter, que responde a las partículas en suspensión, es posible calibrar CSS mediante la estimación de parámetros dependientes de las condiciones de flujo en las que se esté midiendo, como por ejemplo, el coeficiente de atenuación del sonido en el agua y el del sonido debido a los sedimentos en suspensión (Rehman, 1990; Richards et al., 1996; Deines, 1999). Este método ha sido aplicado con éxito en ambientes costeros y estuarinos, para sistemas estratificados e hidrodinámicamente complejos (Y. H. Kim y Voulgaris, 2003; Parsons et al., 2013; Vermeulen et al., 2014). La ventaja del uso de instrumentos tipo ADCP en investigaciones asociadas a transporte de sedimentos es la potencial obtención de señales sincrónicas de velocidad de flujo y CSS, pudiendo estimar el flujo de sedimentos en la columna de agua (Thorne y Hanes, 2002; Baranya y Józsa, 2013; Thorne y Hurther, 2014).

La complejidad del proceso de estimación del flujo de sedimentos en suspensión dada su gran variabilidad espacial y temporal hace que frecuentemente no se disponga de esta información para el manejo morfológico de zonas de interés, como son desembocaduras y costas (D. Walling y Webb, 1985; Morehead et al., 2003). Las investigaciones respecto del transporte de sedimentos en desembocaduras de ríos y estuarios se centran en gran medida en sistemas de gran escala, aún cuando el aporte de sedimentos de ríos pequeños tiene impacto significativo a nivel local (Izett y Fennel, 2018; Basdurak et al., 2020). En Chile, donde abundan sistemas de ríos montañosos y de pequeña escala (Largier, 2023), si bien existen mediciones de CSS otorgadas por la Dirección General de Aguas (DGA), estas buscan generalizar el comportamiento de toda la sección transversal a partir de una muestra de agua extraída únicamente en un punto e instante dado (DGA, 2020). En base a lo anterior, se desconoce el aporte de sedimentos de ríos hacia sistemas costeros como estuarios, humedales y playas, así como su variabilidad en respuesta a cambios en las condiciones de caudal, oleaje, mareas y vientos (Vercruyse et al., 2017). Livsey et al., 2020, por otro lado en su estudio investiga la distribución de la CSS en la vertical, detallando que en sistemas de sedimentos cohesivos en suspensión; como ocurre en algunos ríos de Chile central (Jaramillo et al., 2001); la mezcla turbulenta vertical y el asentamiento descendente del sedimento en suspensión, afectado a la vez por la floculación de los sedimentos cohesivos son factores determinantes en la distribución vertical de la CSS, los cuales varían constantemente a lo largo de cada marea, evidenciando diferencias significativas entre marea de flujo y reflujo. Esto demuestra la alta variabilidad de estos sistemas y el gran desafío que representa este tipo de investigaciones.

A fin de reducir la brecha de datos existentes en este tipo de sistema y evaluar la capacidad de transporte y/o posible retención de sedimentos que condicione el aporte neto de sedimentos finos hacia la costa, este trabajo busca cuantificar el flujo de sedimentos en suspensión a través del estuario del Río Maipo para dos periodos estacionales diferentes, entregando resultados de flujo de sedimentos en suspensión en dos secciones del río (cercano a la desembocadura y a 2.5 km de esta) durante el régimen de marea llenante y vaciante, logrando estimar un transporte neto de sedimentos hacia la costa.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estimar el flujo de sedimentos en suspensión F_s a través de un estuario andino de pequeña escala, mediante mediciones acústicas y ópticas, cuantificando las componentes netas en régimen llenante y vaciante del mismo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- I. Determinar la calibración de concentración de sedimentos en suspensión (CSS) a partir de la turbidez (TU) mediante mediciones de instrumentos ópticos y muestras de agua.
- II. Analizar mediciones sincrónicas de velocidad de flujo (ADCP) y perfiles de turbidez-salinidad.
- III. Estimar un flujo de sedimentos en suspensión (F_s) entrante y saliente del estuario proveniente del río, mediante mediciones de velocidad de flujo y $CSS_{(TU)}$ realizadas río arriba y río abajo para diferentes periodos de análisis.
- IV. Evaluar la posible retención de sedimentos en suspensión en el estuario para diferentes periodos de tiempo analizados.

Capítulo 2

Metodología

2.1. Zona de Estudio

El presente trabajo se desarrolla en el Estuario del Río Maipo, el cual es un río andino de Chile central y cuya desembocadura está ubicada entre las localidades de San Antonio y Santo Domingo (V región, Chile) (Figura 2.1b). El Río Maipo drena una cuenca hidrográfica de aproximadamente 15.000 km², recorriendo aproximadamente 250 km desde la cordillera de los Andes hasta su desembocadura en el mar. Sin embargo, a pesar de su gran envergadura, la desembocadura del Río Maipo ha sufrido cambios significativos en los últimos años, originados por la gran intervención antropogénica a lo largo de la cuenca, además de la escasez de precipitaciones producto de la mega sequía en Chile central (CR2, 2015; Boisier et al., 2016; Garreaud et al., 2017).

La cuenca del Río Maipo es una de las cuencas más expuestas a intervenciones antropogénicas en Chile, con usos de agua para diversos cultivos, captación de agua potable, centrales hidroeléctricas de paso y actividad minera, además de diversas descargas de aguas servidas y residuos industriales líquidos (DGA, 2004b). En los últimos años, estos acontecimientos se han manifestado en un bajo caudal de ingreso al estuario del Río Maipo, provocando ensanchamientos, angostamientos y cambios bruscos en la profundidad del estuario, derivando finalmente a un cierre total de la desembocadura producto de las marejadas ocurridas a finales de enero de 2023 (Martinez, 2023), y optando posteriormente por una apertura mecánica mediante maquinaria. La Estación Fluviométrica Río Maipo en Cabimbao (BNA 57480001-7), ubicada aproximadamente a 20 km de la desembocadura (Figura 2.1b), es el punto de medición de caudal del Río Maipo más cercano a la zona de estudio (desembocadura), presentando un caudal medio anual histórico de 50 m³/s (periodo 2011-2020), el cual en los últimos dos años (periodo 2021-2022) se ha visto mermado aproximadamente en un 63 %. El Río Maipo posee un régimen de caudales mixto, exhibiendo una alta estacionalidad influenciada por eventos de precipitación durante los meses de invierno y el derretimiento nival durante la época de primavera-verano (Peña-Guerrero et al., 2020; Aranda et al., 2023).

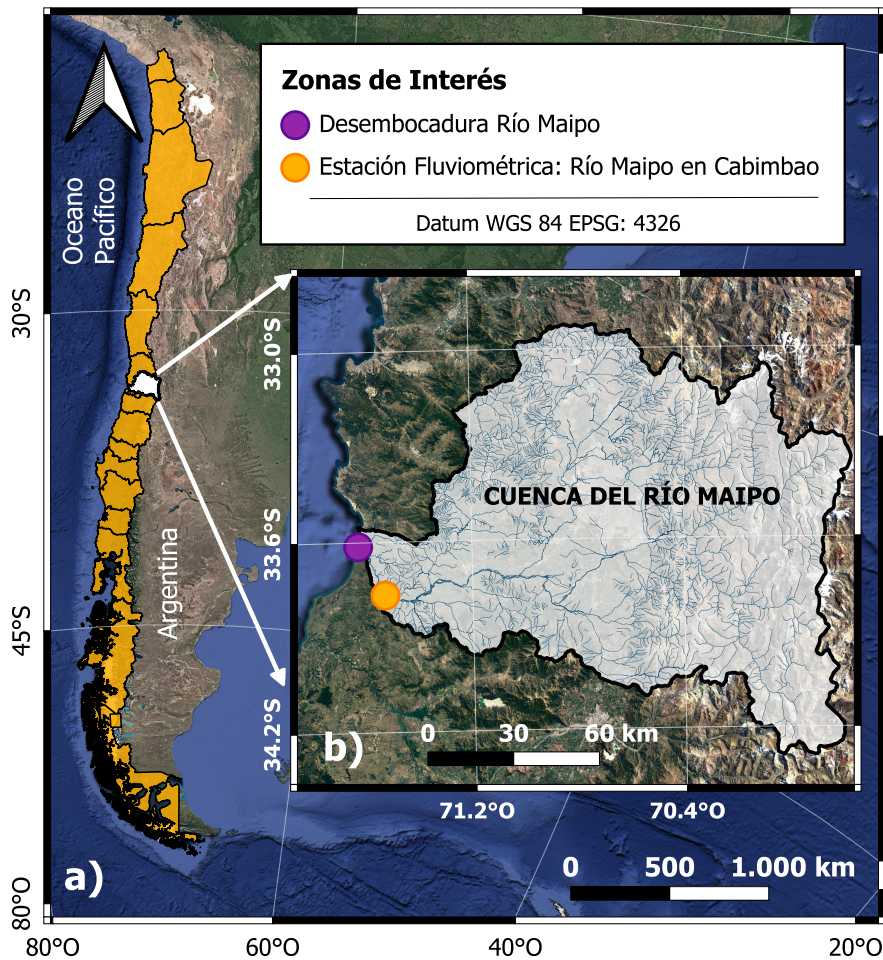


Figura 2.1: a) Mapa de Chile. b) Cuenca del Río Maipo. Punto magenta corresponde a la ubicación de la desembocadura del Río Maipo mientras que el punto anaranjado señala la Estación Fluviométrica Río Maipo en Cabimbao (BNA 57480001-7).

2.2. Campaña de Medición Septiembre 2021

La campaña de terreno se realizó entre los días 04 y 10 de septiembre de 2021, con mediciones tanto en la zona cercana a la desembocadura (Sección 1, Figura 2.2b) como a 2.5 km aguas arriba de esta (Sección 2, Figura 2.2d). Durante la campaña, la desembocadura se encontraba parcialmente abierta, delimitada por la barra de arena y se utilizó una serie de instrumentos para medir velocidad de flujo, turbidez (TU), nivel del estuario, conductividad y temperatura. A partir de estas dos últimas mediciones se obtiene salinidad (S). En la Sección 1 la turbidez fue obtenida con un Turbidímetro AQUAlogger 310TY, la conductividad y temperatura con un sensor CTD (Conductivity-Temperature-Depth) marca YSI, modelo 600LS y el nivel del estuario con un sensor de presión HOBO. Estos sensores se mantuvieron midiendo de manera continua durante la campaña con el fin de registrar las variaciones temporales en el estuario. La ubicación de estos instrumentos se presenta en Figura 2.2b.

Por otro lado, el día 09 de septiembre se realizaron transectos de velocidad y perfiles de turbidez y salinidad a través de la transversal del río en Sección 1 y Sección 2. En Sección 1 (Figura 2.2b) en régimen vaciante se trazó un lazo de ladera Este a Oeste, con el fin de hacer circular un ADCP Teledyne RDI Stream Pro de 2MHz diseñado para sistemas someros (Teledyne-RDI Instruments, 2016). Este ADCP circuló a través de la sección transversal del río mediante un flotador con una pluma y brazo de remolque ideado para el correcto trazado del instrumento, manteniendo el ADCP a una profundidad constante en el agua con una mínima alteración del flujo de agua (Figura 2.2c). En el mismo instante realizados los transectos, aproximadamente 100 m aguas arriba se utiliza un sensor CTD RBR-TU para registrar perfiles de turbidez y salinidad en la columna de agua (Figura 2.2b). En Sección 2 (Figura 2.2d), los transectos de velocidad se llevaron a cabo en régimen llenante y vaciante con un ADCP Teledyne Sentinel V20, el cual fue montado en un kayak y desplazado en el río de ladera Sur-Oeste a ladera Nor-Este (Figura 2.2e). El kayak contaba con un sonar Garmin ECHOMAP UHD 64cv, registrando la posición (latitud, longitud y profundidad) y tiempo de medición. De manera simultánea a los transectos de velocidad, se realizaron perfiles sincrónicos de salinidad y turbidez a lo largo de la sección transversal del río con un sensor CTD CastAway y un Turbidímetro AQUAlogger 310TY respectivamente (Figura 2.2d).

Durante la campaña se recolectaron muestras de agua en botella a nivel superficial y datos de turbidez de manera sincrónica en la Sección 1; con instrumento CTD - RBR + TU y AQUAlogger 310TY; para calibración CSS-TU asociado a Sección 1 y Sección 2 respectivamente. Posterior a la campaña, estas muestras fueron filtradas en laboratorio con una bomba de vacío, secadas al horno a una temperatura de 60°C durante 24 h y pesadas en una balanza de precisión a la décima de mg. Con el peso y volumen de la muestra, se obtuvo la CSS asociada a cada medición de turbidez (TU).

2.2.1. Comportamiento Estuario Septiembre 2021

En Figura 2.3 se muestra el comportamiento temporal del estuario durante la campaña de mediciones por un periodo aproximado de 4 días. Estas mediciones son registradas en Sección 1 (Figura 2.2b), revelando un comportamiento variable tanto de turbidez (Figura 2.3a) como salinidad (Figura 2.3b), influenciado completamente por los ciclos de marea reflejados en el nivel del estuario (Figura 2.3c). Cuando baja la marea, se observa una $S \approx 0$ (Figura 2.3b) producto de que el estuario drena agua dulce completamente hacia la costa, mientras que la TU incrementa su valor asociado a la mayor turbidez del agua de río (Figura 2.3a). Cuando la marea es alta, ésta llena al estuario con agua salada, lo cual genera un aumento del nivel del estuario (Figura 2.3c), un peak de S tanto a nivel superficial como de fondo, y una disminución de TU debido a la baja concentración de sedimentos que quedan recirculando en el estuario producto del agua de mar que ingresa al sistema, la cual a la vez posee menor turbidez, siendo bastante más clara según lo observado en terreno. En este intervalo de tiempo se observa que la columna de agua pasa a ser completamente salada, por tanto el sensor de turbidez presente en la superficie captura agua de mar con baja turbidez. Al analizar en más detalle el comportamiento de la salinidad (Figura 2.3b), observamos que la S superficial posee el mismo comportamiento que la S en el fondo, aunque esta última presenta un leve desfase temporal con la S superficial, y a medida que baja el nivel del estuario, la disminución de S de fondo no es tan abrupta en comparación con la S a nivel superficial. Esta situación se puede entender mediante la descripción detallada de la física estuarina proporcionada por MacCready y Geyer, 2010, quien explora en profundidad el comportamiento de estuarios parcial y completamente estratificados, además de las fases de flujo y refujo. MacCready y Geyer, 2010 explica que cuando comienza a bajar la marea, el flujo de agua dulce proveniente del río intenta salir del estuario hacia la costa y es bloqueado por la capa de agua salada presente de la pleamar anterior. En este

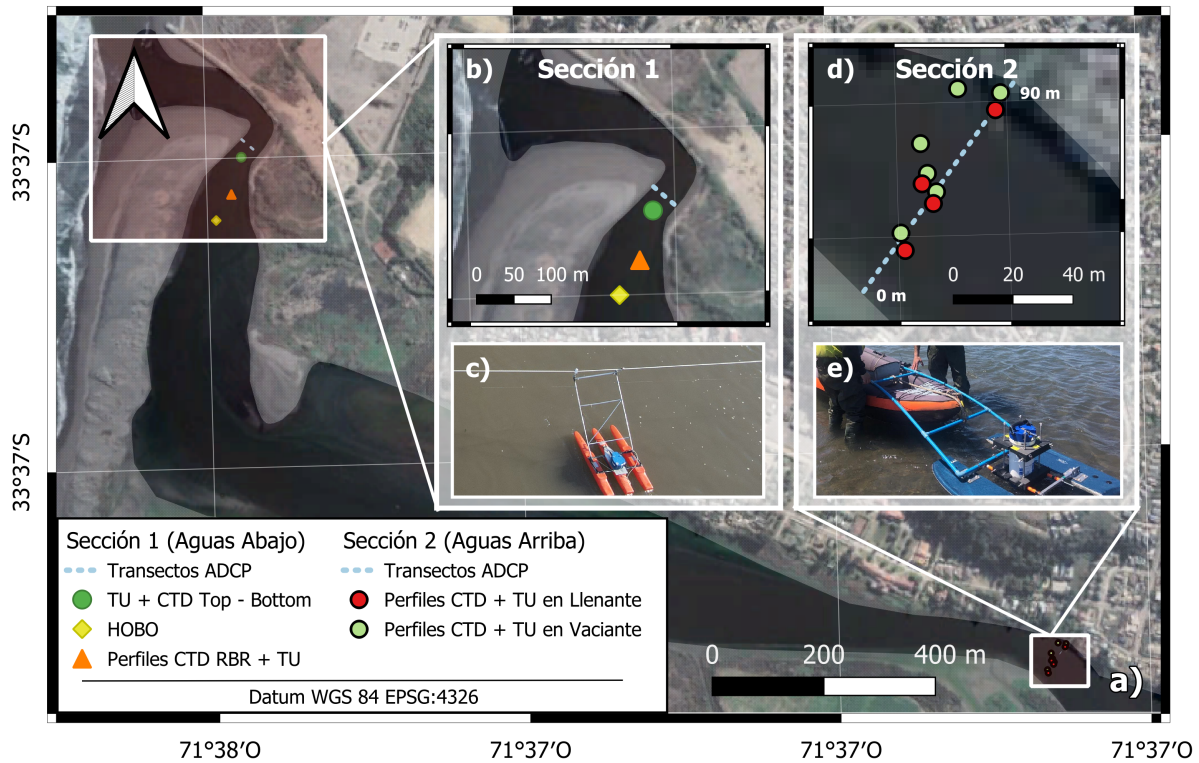


Figura 2.2: Campaña de medición Septiembre 2021 en Estuario del Río Maipo. (a) Imagen satelital del Estuario del Río Maipo extraída mediante Google Earth durante el día 01-08-2021. (b) Distribución de instrumentos utilizados en zona cercana a desembocadura (Sección 1). Círculo verde indica la posición del instrumento de turbidez y sensores CTD a nivel superficial y de fondo, el rombo amarillo indica la posición del sensor de presión HOBO mientras que el triángulo anaranjado muestra la posición de extracción de los perfiles CTD + TU con el instrumento RBR. (c) Sistema de medición con instrumento ADCP en Sección 1 (b). (d) Mediciones realizadas a 2.5 km de la desembocadura (Sección 2). Círculos de color rojo y verde indican los perfiles CTD-TU realizados a lo largo de la sección transversal del río en régimen llenante y vaciante respectivamente. (e) Sistema de medición con instrumento ADCP en Sección 2 (d). Línea punteada de color celeste en (b) y (d) indica la zona de transectos realizados por el ADCP.

momento, dado que el agua salada presenta una densidad mayor a la de agua dulce, se genera una cuña salina (MacCready y Geyer, 2010), dejando en evidencia la clara estratificación presente en el estuario (Figura 2.3).

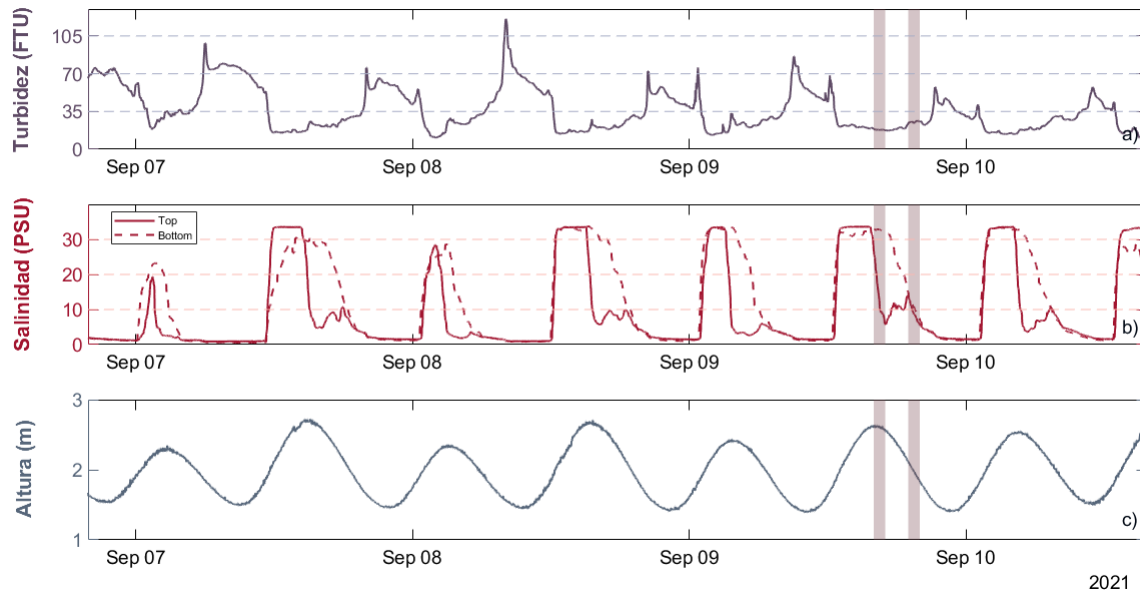


Figura 2.3: Comportamiento Estuario Septiembre 2021. (a) Medición superficial de turbidez (Posición círculo verde en Figura 2.2a). (b) Medición de salinidad Superficial y en fondo (Posición círculo verde en Figura 2.2a). (c) Nivel del estuario (Posición rombo amarillo en Figura 2.2a). Franjas achuradas de color burdeo en (a), (b), (c) indican la ventana temporal en que se realizaron los transectos de velocidad en régimen llenante y vaciante.

2.3. Campaña de Medición Octubre 2022

La segunda campaña de mediciones se llevó a cabo entre los días 20 y 27 de octubre de 2022. Esta campaña fue bastante similar a la de septiembre 2021, abordando mediciones de velocidad de flujo, turbidez, conductividad, temperatura y nivel del estuario únicamente en la zona cercana a la desembocadura (Sección 1) (Figura 2.4) y se logró filtrar una mayor cantidad de muestras de agua para calibración CSS-TU.

La velocidad de flujo fue medida con un ADCP RDI Sentinel Workhorse de 1200 kHz durante los días 21, 22, 24 y 26 de octubre, optando esta vez por un enfoque de análisis euleriano. El ADCP fue colocado en un punto fijo a nivel superficial en el estuario (Figura 2.4c), registrando únicamente las variaciones de velocidad en la columna de agua y en el tiempo, no así en la sección transversal de este (Figura 2.4b). La salinidad fue obtenida mediante dos sensores CTD marca YSI, modelo 600LS a nivel superficial y en el fondo, mientras que el nivel del estuario se registró mediante un sensor de presión HOBO (Figura 2.4b). Estas últimas dos mediciones se registraron mediante series temporales durante toda la campaña de terreno. Además, se utilizó el Turbidímetro AQUAlogger 310TY junto a los sensores de presión y CTD (Figura 2.4b) para registrar turbidez de manera temporal, sin embargo, este sensor presentó fallas durante la campaña, perdiendo información relevante de la medición en el estuario. También durante la campaña se posicionó un sensor de presión RBR cercano a la desembocadura (Figura 2.4) y se fijó un ADV (Acoustic Doppler Velocity) en conjunto con un sensor CTD marca Solinst sobre una estructura metálica (frame) posicionada en la zona curva del estuario (Figura 2.4b). Dado que los instrumentos fijados en el frame se encontraban a una altura aproximada de 1 m, estos registraron datos únicamente en fase de marea llenante. Si bien la información dada por estos últimos sensores (Sensor de presión RBR, ADV, CTD Solinst) es sumamente relevante para el

estudio de la circulación estuarina en este tipo de sistemas, se consideró que estos no serían relevantes para cumplir el objetivo de este estudio, descartando el análisis de estos.

Por otro lado, al igual que la campaña anterior, se realizó una gran cantidad de perfiles de turbidez y salinidad con un CTD RBR-TU de manera sincrónica a las muestras de agua extraídas y cercano al instrumento ADCP (Figura 2.4c). Esto con el fin de lograr una calibración más fiable y representativa que la obtenida en septiembre 2021, además de obtener una mayor concordancia en cuanto a la velocidad de flujo y CSS para estimar el flujo de sedimentos en suspensión.

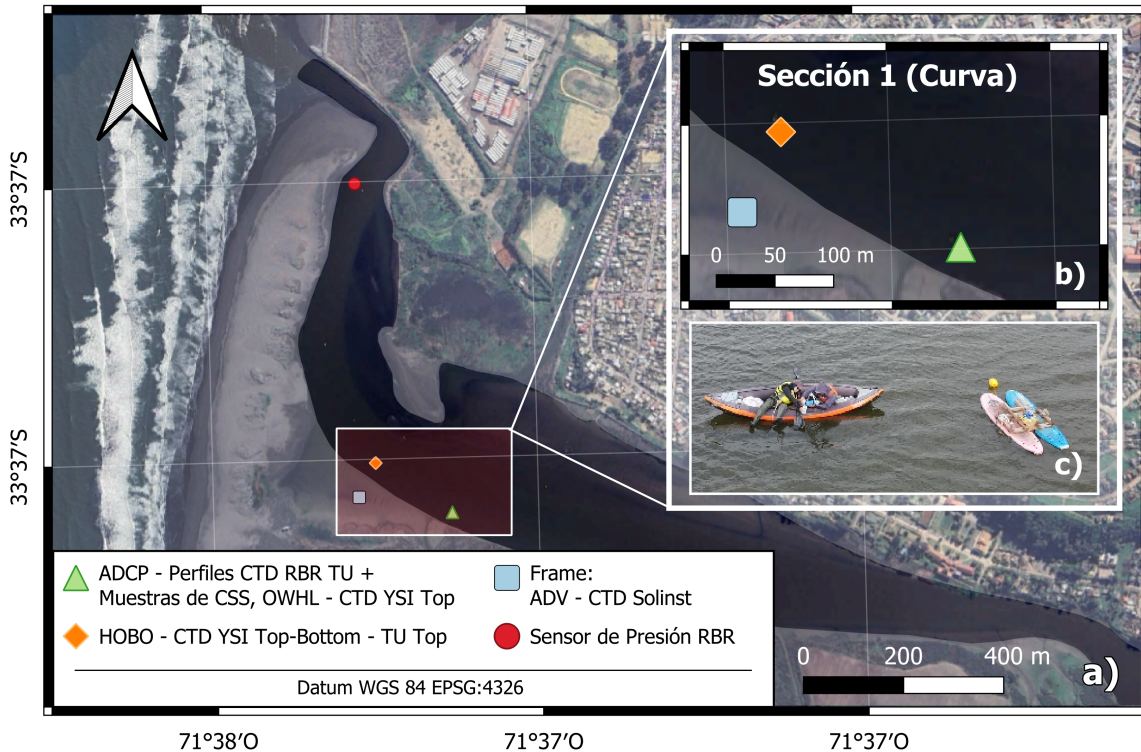


Figura 2.4: Campaña de medición Octubre 2022 en Estuario del Río Maipo. (a) Imagen satelital del Estuario del Río Maipo extraída mediante Google Earth durante el día 19-08-2022. (b) Distribución de instrumentos utilizados en zona cercana a desembocadura (Sección 1). Rombo anaranjado corresponde a la posición del sensor de presión HOBO y el sensor CTD (Conductivity-Temperature-Depth) colocado tanto a nivel superficial como en el fondo. Triángulo de color verde corresponde a la ubicación del instrumento ADCP, además de indicar la zona en donde se realizaron los perfiles CTD y recolección de muestras de agua. Cuadrado celeste indica la posición del frame, el cual contiene un ADV y un CTD Solinst. Círculo rojo muestra la ubicación de un sensor de presión RBR. (c) Sistema de medición (tablas de surf con boya amarilla) con instrumento ADCP fijo en Sección 1, Zona Curva (b). A su lado se presenta un Kayak con dos investigadores encargados de la recolección de muestras de agua y perfiles CTD-TU con perfilador RBR.

2.3.1. Comportamiento Estuario Octubre 2022

Al igual que en Capítulo 2.2.1, en Figura 2.5 se describe el comportamiento del estuario en cuanto a mediciones de turbidez, salinidad y nivel del estuario. Este comportamiento es bastante similar al estudiado en septiembre 2021 (Figura 2.3), visualizando cierto comportamiento variable de la TU y S en función de los cambios del nivel de marea. Sin embargo, a diferencia del año anterior (Figura 2.3a) se presenta una baja considerable

de TU (Figura 2.5a) reduciendo su valor máximo en casi un 80%. En cuanto a la salinidad (Figura 2.5b), se ve que desde el día 21 a 23 de octubre se tiene una S de fondo prácticamente constante en el tiempo, presentando un rango de valores entre 30-36 PSU, la cual está asociada a agua de mar. Además, durante el día 23 el comportamiento de S superficial y de fondo representa el fallo de uno de los sistemas de flotabilidad, sumergiendo ambos instrumentos CTD al fondo y registrando únicamente agua salada. Sin embargo, a partir del día 25 de octubre la S de fondo se alinea con el comportamiento de la S superficial (Figura 2.5b) y entre ambas no se genera el desfase temporal visualizado en la campaña anterior (Figura 2.3b). Además, en Figura 2.5c se presentan los instantes de tiempo en que fueron extraídas las muestras de agua para calibración CSS-TU, mayoritariamente en régimen vaciante con el fin de registrar valores de TU más altos.

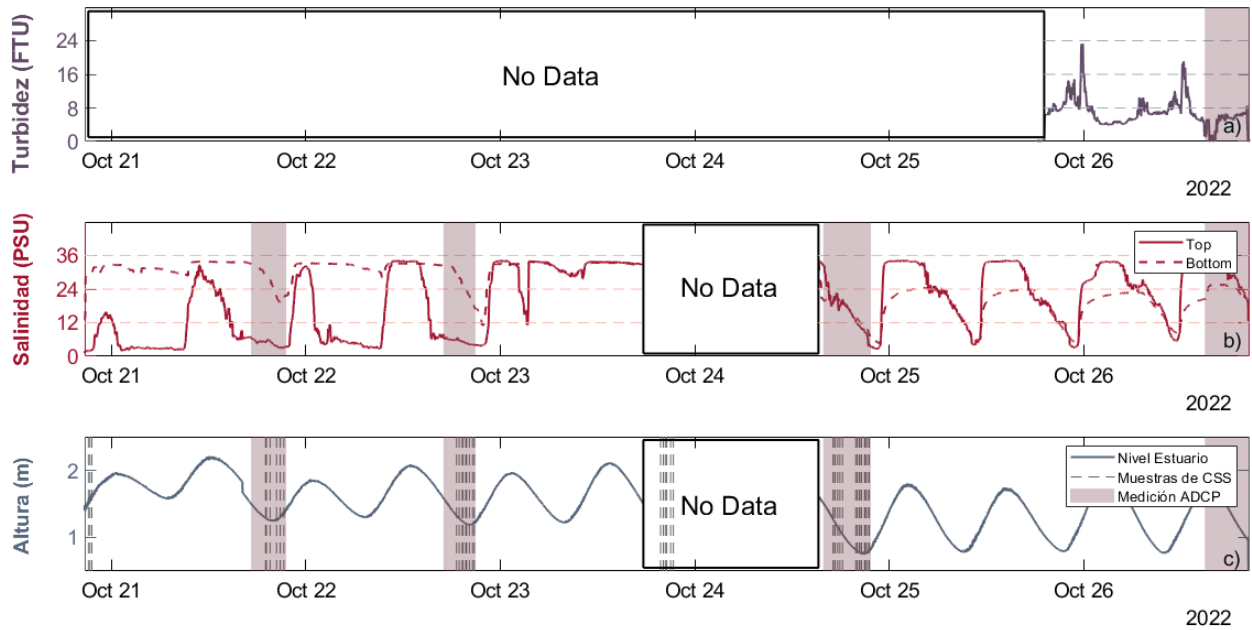


Figura 2.5: Comportamiento Estuario Octubre 2022. (a) Medición de turbidez (Posición Triangulo verde en Figura 2.4a). (b) Medición de salinidad (Posición rombo anaranjado Figura 2.4a). (c) Nivel del estuario (Posición rombo anaranjado Figura 2.4a). Franjas achuradas de color burdeo en (a), (b), (c) indican la ventana temporal en que el ADCP registró mediciones de velocidad (Figura 2.4a). Línea vertical punteada en (c) indica las muestras de agua extraídas en la zona cercana al ADCP (Figura 2.4a) para calibración CSS-TU. Secciones “No Data” corresponden a los periodos cuando los instrumentos no registraron datos.

2.4. Calibración CSS-TU

La calibración de CSS-TU se realiza en base a mediciones sincrónicas de turbidez del instrumento óptico en conjunto con muestras de agua, obteniendo generalmente una relación lineal (Y. H. Kim y Voulgaris, 2003; Merten et al., 2014; Wang et al., 2020). La expresión utilizada para efectuar esta calibración tiene la forma de la Ecuación 2.1

$$CSS = mTU + C, \quad (2.1)$$

donde CSS corresponde a la concentración de sedimentos (variable dependiente) en dimensiones de masa partido en volumen y unidades de mg/l, TU a la turbidez del agua (variable independiente) medida en FTU, m la pendiente de la recta (mg/l/FTU) y C el intercepto (mg/l). Es un método simple de aplicar dado la respuesta lineal que posee la turbidez frente a la concentración sedimentos (Guillén et al., 2000; Minella et al., 2008).

Las muestras de agua extraídas en terreno son filtradas, secadas a 60°C y pesadas en una balanza con precisión a la décima de mg. A partir de la CSS obtenida se correlacionan los datos de TU medidos de manera sincrónica a la extracción de muestras, logrando una calibración CSS-TU de la forma de Ecuación 2.1 para cada campaña de medición.

El perfil de CSS en la campaña de septiembre 2021 se obtiene a partir de los perfiles de TU extraídos cercano a la zona de los transectos (Figura 2.2b; Figura 2.2d). Para ambos casos, debido a la falta de información, se asume un perfil de TU constante a nivel transversal para cada zona, el cual es calculado como la media temporal de los perfiles registrados en Sección 1 (Figura 2.2b) y la media transversal de los perfiles de TU realizados en la Sección 2 (Figura 2.2d). Finalmente, teniendo un perfil de TU variable en la profundidad pero constante en la transversal, se obtiene la $CSS_{(TU)}$ para cada profundidad mediante Ecuación 2.1.

En la campaña de octubre 2022 se realiza el mismo procedimiento que en septiembre 2021 Sección 1, calculando un promedio temporal de los perfiles de TU cercanos al instrumento ADCP (Figura 2.4a) para cada día de medición. Luego, nuevamente con Ecuación 2.1 se obtiene un perfil de $CSS_{(TU)}$ variable en la profundidad representativo a la ventana de tiempo medida por el ADCP.

2.5. Procesamiento de Velocidad

2.5.1. Septiembre 2021

Sección 1

El instrumento ADCP mide la velocidad del flujo a cierta frecuencia de muestreo en dirección Este (E) – Norte (N) en función de la profundidad de la columna de agua. El ADCP utilizado en Sección 1 (Figura 2.2c) se configura en un inicio con una discretización vertical de 0.08 m comenzando la medición a partir de una profundidad de 0.13 m y una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Al realizar los transectos a través de la sección transversal del río mediante el ADCP, este se encuentra en movimiento mientras se registra la medición, por lo que la velocidad medida por el ADCP no corresponde a la velocidad del flujo, y debe ser corregida. El instrumento registra la velocidad a la que este se está moviendo respecto al fondo, por lo que mediante la Ecuación 2.2 se obtiene la velocidad del flujo como la suma directa entre la velocidad del flotador (sistema inercial) y la velocidad aparente medida por el ADCP en direcciones EN,

$$V_{\text{flujo } i} = V_{\text{sistema inercial } i} + V_{\text{aparente } i}, \quad (2.2)$$

donde i corresponde a la dirección analizada (EN).

La velocidad de flujo en dirección paralela al estuario es calculada como la suma de las proyecciones de las componentes EN, utilizando un ángulo medio de $\theta = 45^\circ$, medido en sentido antihorario desde la dirección de transectos transversal al río (Sur-Este) y la dirección Este horizontal (Figura 2.2b). Este ángulo fue estimado como la media de la dirección de velocidad de flujo para cada registro tanto temporal como en la profundidad

a partir las componentes EN, y luego fue corroborado geoméricamente a partir del trazado realizado por el instrumento en el estuario. Finalmente, con la velocidad del flotador respecto al fondo y el tiempo entre las mediciones, se obtiene mediante diferencias finitas la posición del ADCP en la sección transversal asociada a cada registro. Con el fin de reducir el ruido en las mediciones se promedian los valores de velocidad en función de la posición, con una ventana espacial $\Delta x = 1$ m. En total se realizaron 20 transectos (ida-vuelta), sin embargo, para lo anterior únicamente se utilizaron 10 transectos asociados a los tramos de ida, de Sur-Este a Nor-Oeste. Esto producto de que no se logró asociar los datos de velocidad a una posición de vuelta.

Sección 2

Para los transectos realizados en Sección 2 (Figura 2.2d); 2.5 km aguas arriba de la desembocadura; se utiliza otro ADCP (Figura 2.2e) el cual se configura en un inicio con la mayor discretización posible en la vertical (0.25 m), además de ajustar una frecuencia de muestreo de 2 Hz. En comparación con los transectos realizados en la Sección 1 (Figura 2.2b), estos se llevan a cabo en condición llenante y vaciante del estuario, presentando la misma complicación anterior referente a la obtención de la velocidad absoluta de flujo en dirección del río debido al movimiento del ADCP mediante un kayak (Figura 2.2e). La corrección de velocidad se logra usando el sonar presente en el kayak, ya que se conoce su desplazamiento (posición y tiempo). Haciendo la conversión de posición en latitud-longitud a coordenadas UTM y aplicando el método de diferencias finitas con la posición y tiempo, se obtiene la velocidad media a la que se mueve el kayak en cada variación de tiempo (Δt). Posterior a esto, dado que el sonar medía a una frecuencia de 0.5 Hz ($\Delta t = 2$ s), es necesario interpolar los datos de velocidad del kayak a la frecuencia de medición del ADCP (2 Hz) para que ambas velocidades tengan la misma variación temporal. Con lo anterior, mediante la Ecuación 2.2 se obtiene la velocidad del flujo como la suma directa entre la velocidad de kayak (sistema inercial) y la velocidad aparente medida por el ADCP en direcciones EN. Una vez teniendo las velocidades de flujo en dirección EN, se realiza el mismo procedimiento que en la Sección 1 para obtener la velocidad de flujo en dirección paralela al río. En este caso, se utiliza un ángulo $\theta = 35^\circ$ medido en sentido antihorario desde la dirección de transectos transversal al río (Nor-Este) y la vertical en dirección Norte (Figura 2.2d). La discretización espacial utilizada para la posición fue $\Delta x = 1$ m y se utilizaron todos los transectos realizados (ida-vuelta) tanto en llenante (10) como vaciante (8).

Con el procedimiento anterior, se tiene una velocidad de flujo entrante/saliente en la dirección principal del río a lo largo de la secciones transversales analizadas (Sección 1 y Sección 2), por lo que se define la velocidad de flujo positiva cuando esta es entrante al estuario, y velocidad de flujo negativa cuando esta sale hacia la costa. En secciones posteriores, la velocidad positiva y negativa estarán definidas con las tonalidades de rojo y azul respectivamente.

Finalmente, el ADCP registra mediciones válidas hasta que la señal acústica siente el fondo. Posterior a eso, refleja datos erróneos en las siguientes celdas de profundidad, los cuales son eliminados. Esta identificación del fondo se realiza mediante la señal de backscatter (retrodispersión acústica), la cual posee la misma discretización en la vertical y frecuencia que la velocidad en Sección 1 y Sección 2, pudiendo definir la línea de fondo al notar cambios abruptos de backscatter entre una celda de profundidad y otra a medida que aumenta o disminuye el nivel del estuario.

2.5.2. Octubre 2022

A diferencia de la campaña de septiembre 2021, en octubre 2022 no se realizaron transectos de velocidad. En esta ocasión el ADCP fue colocado de manera fija en el estuario a nivel superficial (Figura 2.4c), siendo

configurado con una frecuencia de medición de 1 Hz y una discretización de 0.25 m en la vertical, comenzando la medición a los 0.67 m desde la superficie libre de agua. Con el fin de reducir el ruido en las mediciones, las velocidades en dirección EN son promediadas temporalmente cada un minuto, y dado que el ADCP se posicionó en la curva del estuario (Figura 2.4b) no se tiene una dirección clara del flujo (entrante/saliente). A partir de lo anterior, en la posición del instrumento (Figura 2.4) se traza una perpendicular a la tangente de la curva del estuario con el fin de caracterizar la dirección del flujo del estuario. El ángulo que forma la perpendicular (transversal al estuario) en sentido horario respecto a la horizontal en dirección Este es de $\theta = 45^\circ$, con el cual mediante trigonometría se proyectan las componentes de velocidad EN en la dirección paralela al flujo del estuario para toda la columna de agua, con una componente positiva en dirección entrante al estuario y una negativa saliente del mismo. Este procedimiento es similar al realizado en septiembre 2021 (Capítulo 2.5.1) y al igual que la identificación de fondo en el periodo anterior, en esta ocasión se realiza mediante los registros de backscatter acústico, definiendo el fondo del estuario variable en el tiempo gracias a los regímenes de marea.

2.6. Estimación de Caudal y Flujo de Sedimentos

2.6.1. Septiembre 2021

Con la velocidad discretizada en la profundidad y a la vez a lo largo de la posición transversal del río tanto en Sección 1 como en Sección 2, se obtiene el caudal mediante la Ecuación 2.3,

$$Q_{\text{Estuario(Sep}_{2021})} = \int V_{\text{flujo}_R} dA = \int_{-H}^0 \int_0^{LR} V_{\text{flujo}_R}(x, z) dx dz, \quad (2.3)$$

donde $V_{\text{flujo}_R}(x, z)$ es la velocidad de flujo en la dirección principal del río en función de la posición transversal del estuario (x) y la profundidad del mismo (z) en dimensiones de $[L \cdot T^{-1}]$, y los límites de integración corresponden a la profundidad total del estuario (H) y el largo del río (LR).

Por otro lado, la estimación del flujo de sedimentos requiere de la velocidad en la columna de agua (perfil o medición puntual), y del perfil de CSS en la misma. En base a lo anterior, el flujo de sedimentos es suspensión (F_s) para la campaña de septiembre 2021 se obtiene según la Ecuación 2.4,

$$F_{s(\text{Sep}_{2021})} = \int_{-H}^0 \int_0^{LR} \text{CSS}_{(\text{TU})} V_{\text{flujo}_R}(x, z) dx dz, \quad (2.4)$$

donde $\text{CSS}_{(\text{TU})}$ es la concentración de sedimentos en suspensión obtenida a partir de la turbidez, variable en la profundidad y asociada a cada profundidad representativa del ADCP, con dimensiones de $[M \cdot L^{-3}]$.

2.6.2. Octubre 2022

Dado que el ADCP se mantuvo fijo en el estuario (Figura 2.4a), no se posee la dimensión de ancho para estimar caudal, y por ende la integración de este se realiza únicamente en la profundidad, obteniendo un caudal medio en el tiempo mediante Ecuación 2.5. La velocidad de flujo en octubre fue calculada de igual manera que en septiembre 2021, por lo que el signo de esta (\pm), y por tanto de Q y F_s determinarán la

dirección entrante o saliente de flujo mediante el criterio planteado en Capítulo 2.5.2. Con lo anterior se logra un caudal medio en el tiempo por unidad de ancho,

$$\bar{Q}_{\text{Estuario(Oct2022)}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \int_{-H}^0 V_{\text{flujoR}}(t, z) dz, \quad (2.5)$$

donde $V_{\text{flujoR}}(t, z)$ es la velocidad de flujo en la dirección principal del río en función de la profundidad (z) y el tiempo (t), en dimensiones de $[\text{L} \cdot \text{T}^{-1}]$, y n es la cantidad de datos de velocidad registrados en el tiempo (velocidad media para cada minuto) por el ADCP para cada día de estudio. Por consiguiente, el caudal obtenido $\bar{Q}_{\text{Estuario(Oct2022)}}$ presenta dimensiones de $[\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}]$.

El flujo de sedimentos se estima de manera similar que el caudal (Ecuación 2.5), con la distinción que este debe ser multiplicado por la $\text{CSS}_{(\text{TU})}$. El flujo medio en el tiempo por unidad de ancho se calcula mediante la Ecuación 2.6,

$$\bar{F}_{s(\text{Oct2022})} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \int_{-H}^0 \text{CSS}_{(\text{TU})} V_{\text{flujoR}}(t, z) dz, \quad (2.6)$$

donde $F_{s(\text{Oct2022})}$ se encuentra en dimensiones de $[\text{M} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}]$.

Capítulo 3

Resultados

3.1. Calibración de CSS-TU

3.1.1. Septiembre 2021

La Figura 3.1 muestra el resultado de la calibración CSS-TU para septiembre 2021. La calibración utilizada para estimar el F_s en Sección 1 (Figura 2.2b) se presenta en Figura 3.1a, con la cual se obtiene una pendiente $m = 1.0141$ (mg/l/FTU) y un intercepto $C = -8.88$ (mg/l). Además cuenta con un análisis de dispersión mediante la distribución t-Student con un 95 % de confiabilidad, generando un intervalo de confianza del conjunto de datos. En base a esto se puede ver que la totalidad de los datos se encuentran dentro de este intervalo, respaldando así la baja dispersión y correcto ajuste de los datos respecto a la regresión lineal estimada. Por otro lado, las muestras de agua para obtener CSS fueron extraídas durante toda la campaña de terreno a lo largo del estuario en la zona cercana a la desembocadura (Figura 2.2b) únicamente en condición vaciante. Estas fueron tomadas a nivel superficial y muestran una clara tendencia lineal con los datos sincrónicos de TU, presentando un rango de CSS entre 10 a 70 mg/l.

La calibración CSS-TU para estimar el F_s en Sección 2 (Figura 2.2d) se presenta en Figura 3.1b, la cual cuenta con una pendiente $m = 1.0558$ (mg/l/FTU) e intercepto $C = 1.771$ (mg/l). Esta calibración posee 2 mediciones tomadas en régimen vaciante el día 06 de septiembre y 1 medición en régimen llenante el día 10 de septiembre. Al igual que la calibración realizada en Sección 1 (Figura 3.1a), las 3 mediciones fueron tomadas a nivel superficial y a lo largo del estuario. Dada la insuficiencia de datos producto de la complejidad de tomar y filtrar muestras de sedimentos de manera representativa, se decide realizar la calibración asociada a la Sección 2 únicamente con estos 3 puntos y por la misma razón no se aplica un análisis de dispersión de datos. Se puede observar además que la CSS en llenante es baja (alrededor de 12 mg/l), en comparación con las mediciones de CSS en vaciante (entre 60-80 mg/l). Todas estas mediciones (calibración en Sección 1 y Sección 2) fueron obtenidas en la misma zona cercana a la desembocadura (Figura 2.2b), donde el cambio de TU y CSS entre el régimen llenante y vaciante es notorio (Figura 2.3). Sin embargo, en los ítems posteriores se verá que los perfiles de TU y CSS realizados en Sección 2 no presentan mayores diferencias entre cada régimen.

Finalmente, en Figura 3.2 se presentan fotografías de los filtros utilizados durante el proceso de filtrado de muestras de agua. Estos contienen sedimento seco en suspensión de muestras extraídas de manera superficial

en el estuario (Figura 2.2b), y al visualizar las fotografías se corrobora lo mencionado anteriormente acerca de la baja CSS para el régimen llenante (Figura 3.2a) respecto a las mediciones de CSS registradas en régimen vaciante (Figura 3.2b). Según los registros del filtrado de muestras, la Figura 3.2a extraída en régimen llenante contiene 21.25 mg/l, mientras que los filtros de Figura 3.2b en vaciante contienen 74.24 mg/l. Es relevante mencionar que estas muestras son extraídas en días y zonas diferentes, por lo que no son totalmente comparables, no obstante el aumento de CSS en régimen vaciante es significativo respecto al de llenante.

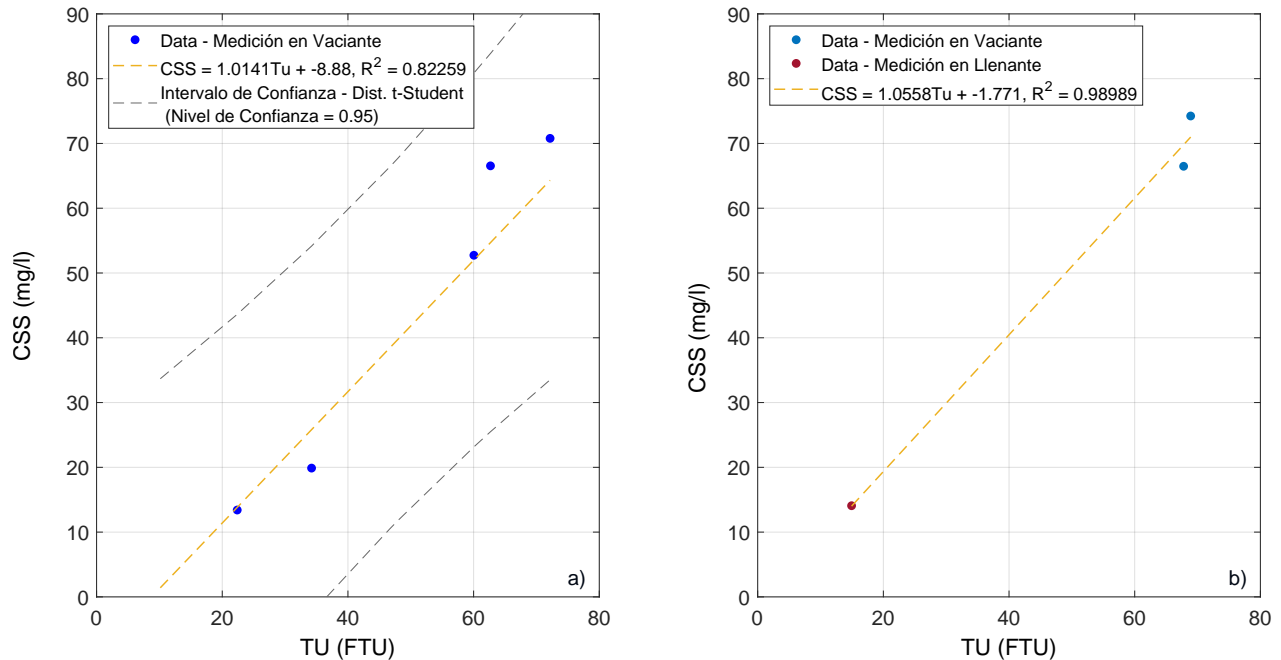


Figura 3.1: Calibración CSS-TU Septiembre 2021. (a) Calibración realizada para F_s en Sección 1, con CTD RBR + TU (Figura 2.2b). (b) Calibración realizada para F_s en Sección 2, con turbidímetro AQUAlogger 310TY (Figura 2.2d). Línea segmentada de color amarillo en (a) y (b) representa la regresión lineal más representativa para cada conjunto de datos. Líneas segmentadas de color gris representan los intervalos de confianza del conjunto de datos mediante la distribución t-Student con un 95 % de confiabilidad.

3.1.2. Octubre 2022

La campaña de octubre 2022 se enfocó en gran medida en la toma de muestras de agua en conjunto de perfiles de turbidez (CTD RBR + TU). Estas fueron extraídas a nivel superficial (Figura 2.4c) cercanas al ADCP (Figura 2.4b) durante los días 21, 22, 24 y 26 de octubre, obteniendo la calibración CSS-TU presente en Figura 3.3, con una pendiente $m = 0.72001$ (mg/l/FTU) e intercepto $C = 1.3178$ (mg/l).

A pesar de haber extraído una gran cantidad de muestras de CSS, el bajo caudal medio mensual del río presente en octubre 2022 ($\bar{Q}_{Cabimbao2022} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$; DGA, 2022); prácticamente 50 % menos que en septiembre 2021 ($\bar{Q}_{Cabimbao2021} = 25.5 \text{ m}^3/\text{s}$; DGA, 2021); puede haber afectado en gran medida a la turbidez en el estuario, y por ende a la CSS. Gracias al registro de los filtros secos de CSS se puede observar una baja considerable de CSS-TU y tamaño de partículas en régimen vaciante (Figura 3.4) en comparación con la CSS del año anterior (Figura 3.2b), siendo esta última 7 veces mayor a lo presenciado en octubre 2022. Esto causó además una mayor variabilidad entre las muestras de CSS extraídas producto del complejo proceso de filtrado, con CSS muy pequeñas (0-20 mg/l). En base a lo anterior, y dado que el factor de determinación (R^2) no es

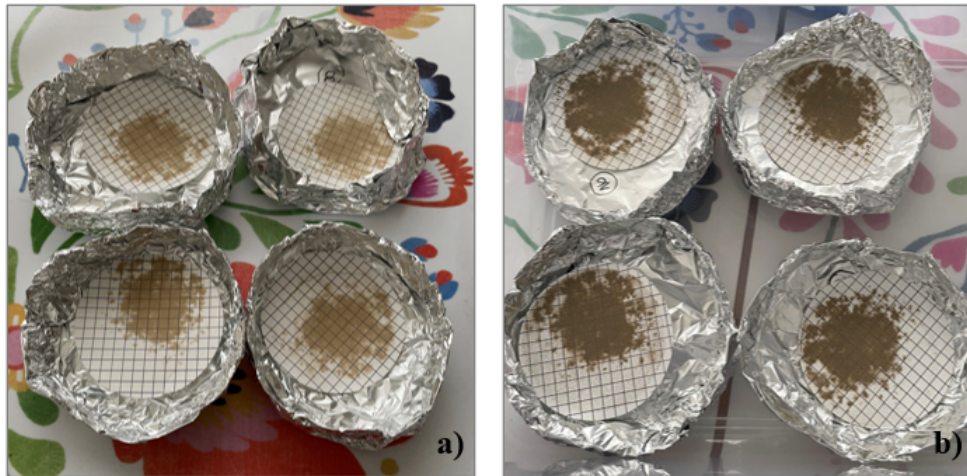


Figura 3.2: (a) Filtro de muestra de CSS a nivel superficial seco en régimen llenante durante la campaña de septiembre 2021. Contiene una CSS estimada de 21.25 mg/l. (b) Filtro de muestra de CSS a nivel superficial seco en régimen vaciante durante la campaña de septiembre 2021. Contiene una CSS estimada de 74.24 mg/l.

tan alto (Figura 3.3), se realizó un análisis de dispersión de las muestras de CSS y datos de TU, representando en este mismo gráfico (Figura 3.3) los intervalos de confianza superior e inferior asociados a la distribución t-Student con un 95 % de confiabilidad. Con lo anterior se visualiza casi la totalidad de datos dentro de estos intervalos, lo que reduce la incertidumbre del ajuste y por tanto entrega una mayor confiabilidad del mismo.

Finalmente, es relevante señalar que según lo observado en ambas campañas de medición a través de las fotografías de filtros de CSS (Figura 3.2; Figura 3.4) y durante el proceso de filtrado de muestras de agua, el sedimento en suspensión presente en la misma estaba constituido en gran medida por material fino cohesivo, siendo este a la vez más fino en octubre 2022 que en septiembre 2021.

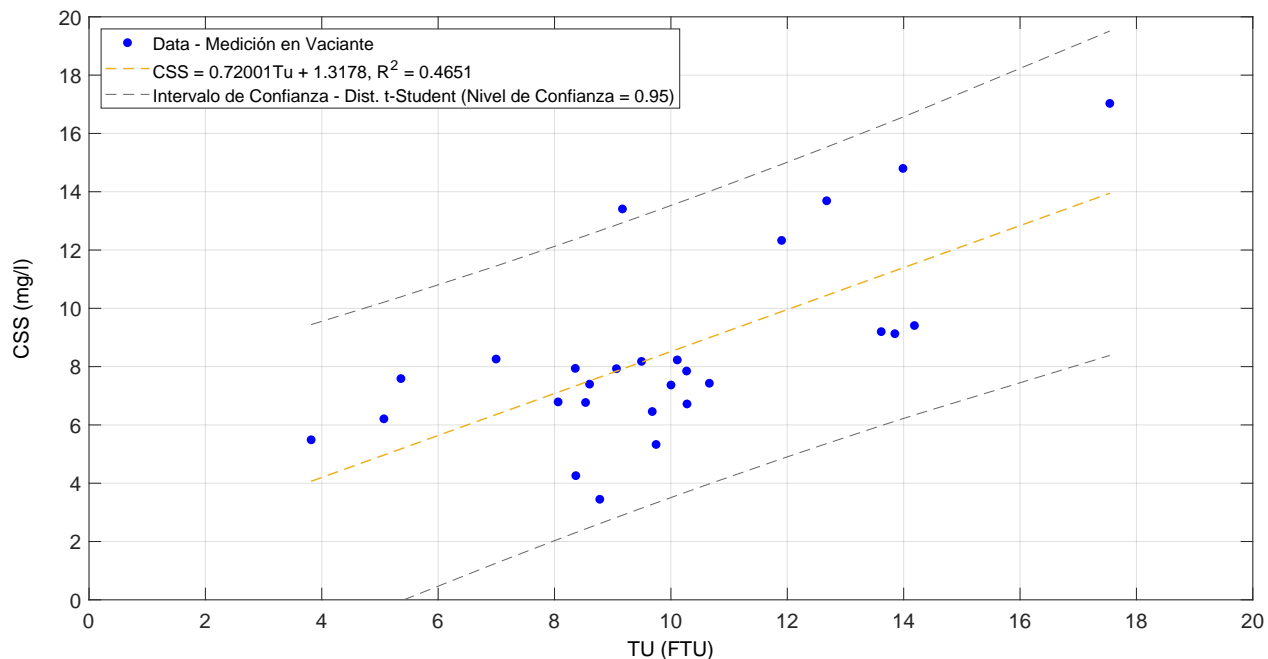


Figura 3.3: Calibración CSS-TU Octubre 2022, con CTD RBR + TU. Línea segmentada color amarillo representa la regresión lineal más representativa para el conjunto de datos. Líneas segmentadas de color gris representan los intervalos de confianza del conjunto de datos mediante la distribución t-Student con un 95% de confiabilidad

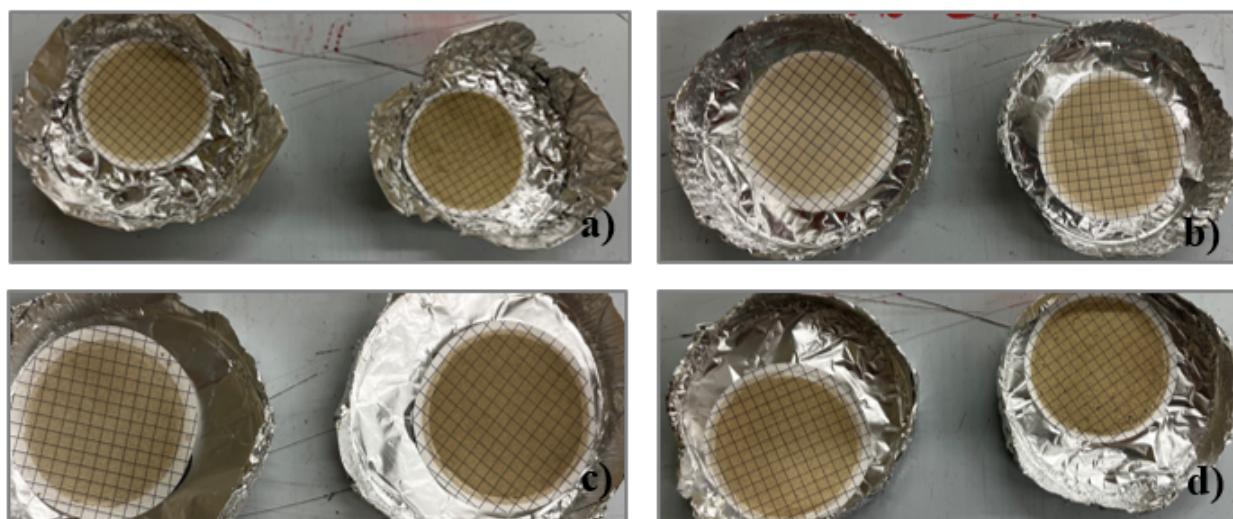


Figura 3.4: (a) Filtro de CSS seco día 21-oct (css = 17 mg/l). (b) Filtro de CSS seco día 22-oct (css = 5 mg/l). (c) Filtro de CSS seco día 24-oct (css = 9.1 mg/l). (d) Filtro de CSS seco día 26-oct (css = 16.85 mg/l). (a), (b), (c), (d) son extraídas a nivel superficial

3.2. Perfil de Velocidad - TU - S - CSS - F_s

3.2.1. Septiembre 2021

Sección 1

Los transectos en Sección 1 fueron realizados en régimen vaciante (Figura 3.5c), por lo que mediante el criterio definido en Capítulo 2.5.1, se tiene que tanto la velocidad de flujo del río (V_{flujo_R}) como el flujo de sedimentos (F_s) son negativos (saliente hacia la costa). Estos transectos dieron a conocer un ancho de sección transversal del estuario de aproximadamente 26 m y una profundidad máxima de 2.4 m (Figura 3.5a), además de evidenciar una velocidad y F_s máximo a nivel superficial (Figura 3.5a,b). Integrando el perfil de velocidad (Figura 3.5a) y F_s (Figura 3.5b) en la profundidad y sección transversal del estuario mediante la Ecuación 2.3 y Ecuación 2.4 respectivamente, se estima un caudal $Q_{\text{Estuario}} = 32.35 \text{ (m}^3/\text{s)}$ y un flujo de sedimentos en suspensión $F_s = 1.56 \text{ (kg/s)}$, ambos en dirección hacia el océano.

Por otro lado, los perfiles de TU y S extraídos con el instrumento CTD - RBR + TU (Figura 3.5d) en la Sección 1 (zona cercana a desembocadura) (Figura 2.2b) son promediados de manera temporal en la ventana de tiempo de medición del ADCP. Estos indican un perfil lineal creciente de turbidez hasta los 0.5 m de profundidad, para luego permanecer constante con un valor aproximado de 60 FTU, mientras que la salinidad permanece constante en la columna de agua con un valor bastante cercano a 0 PSU. Lo anterior se debe al régimen analizado (vaciante, Figura 2.3c), obteniendo una columna de flujo totalmente de agua dulce, lo que conlleva a lo mencionado sobre los perfiles de TU y S. Por último, en Figura 3.5e se muestra la comparación entre el perfil de TU y de $\text{CSS}_{(TU)}$ calculado mediante la correlación CSS-TU presentada en Figura 3.1a. Respecto a esto, se ve que el perfil de CSS es bastante similar al de TU ($m \approx 1$), por lo que para este caso se puede tener una idea del comportamiento de la CSS observando únicamente el perfil de TU.

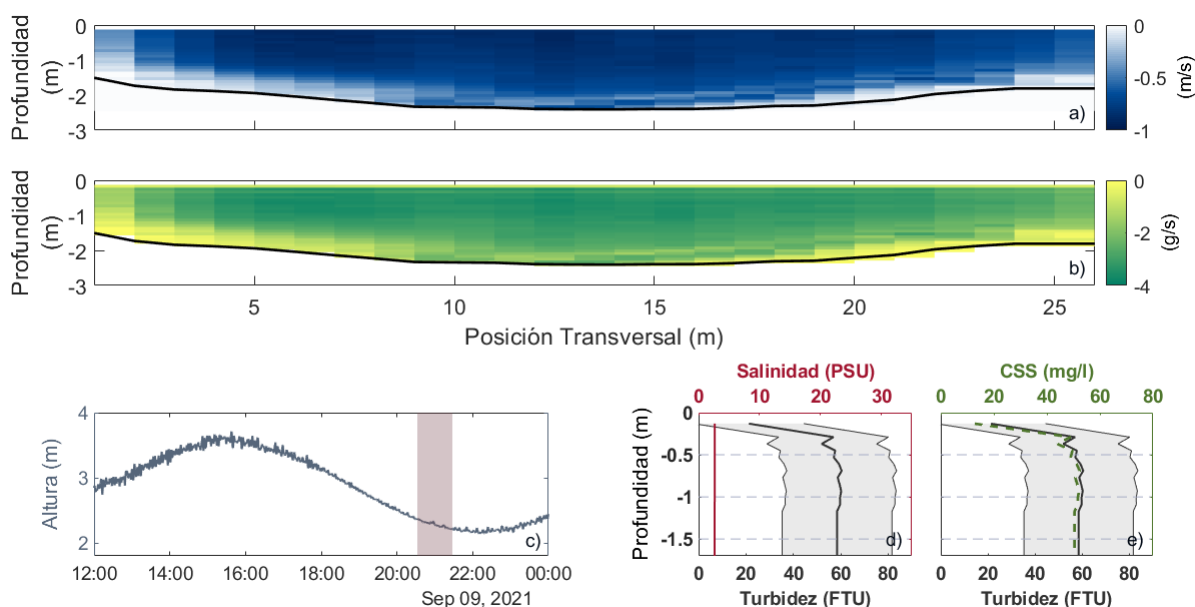


Figura 3.5: (a) Perfil de velocidad a nivel transversal en Sección 1 (Figura 2.2b) durante régimen vaciante para día 09 de septiembre 2021. Color azul negativo indica la dirección saliente de flujo. (b) Perfil de F_s a nivel transversal en Sección 1 (Figura 2.2b) durante régimen vaciante para día 09 de septiembre 2021. Color verde negativo indica la dirección saliente de F_s . (c) Nivel del estuario registrada por sensor de presión HOBBO (Figura 2.2b), sección achurada de color burdeo indica la ventana temporal en que se realizaron los transectos. (d) Perfil de TU y S en zona cercana a transectos (Figura 2.2b). (e) Perfil de TU y $CSS_{(TU)}$ en zona cercana a transectos (Figura 2.2b). Línea de fondo color negra en (a) y (b) indican el fondo del estuario. Sección gris achurada en (d)-(e) corresponde a la desviación estandar respecto del promedio de datos de TU para cada profundidad representativa asociada al ADCP.

Sección 2

Respecto a las mediciones realizadas en Sección 2 (Figura 2.4), la Figura 3.6 muestra la velocidad media de flujo en la columna de agua en la dirección principal del río, asociada a una frecuencia de 2 Hz durante el periodo de tiempo en que se realizaron los transectos. Este procedimiento se realiza para el régimen en llenante (Figura 3.6a) y vaciante (Figura 3.6b), pudiendo apreciar grandes diferencias de magnitud y sentido de la velocidad en cada régimen. Al estar a 2.5 km de la desembocadura, durante el régimen llenante (Figura 3.6a) el agua salada llega a la Sección 2 en dirección entrante y con una velocidad oscilando en un rango de 0-0.2 m/s (color rojo). Durante el régimen vaciante (Figura 3.6b) se observa una velocidad de río en dirección hacia la desembocadura mayor que la velocidad entrante (entre 0.6-0.8 m/s; color azul). Además, los transectos en régimen vaciante (Figura 3.6b) presentan cambios de velocidad en los extremos de la posición transversal (en los puntos 0 y 90 m aproximadamente), lo cual se debe a que el ADCP no se encontraba totalmente fijo al kayak, produciendo estos desfases de velocidad al momento de cambiar de dirección en cada ida-vuelta.

La velocidad media a lo largo de los transectos asociada a cada posición transversal y variable en la profundidad, además de los perfiles de salinidad y turbidez realizados sincrónicamente (Figura 2.2d; Figura 2.2e), se muestran en la Figura 3.7 y Figura 3.8, para condiciones de estuario llenante y vaciante, respectivamente. En las mediciones realizadas en régimen de marea llenante (Figura 3.7f), se observa que el río cuenta con un ancho de 90 m y una profundidad máxima de 4 m (Figura 3.7a), pudiendo apreciar además una capa de agua salada a profundidades mayores a 1 m producto de la cuña de intrusión salina (Figura 3.7b-e). Esto último indica que el agua de mar llegó hasta la zona de mediciones, lo que es ratificado mediante velocidades entrantes

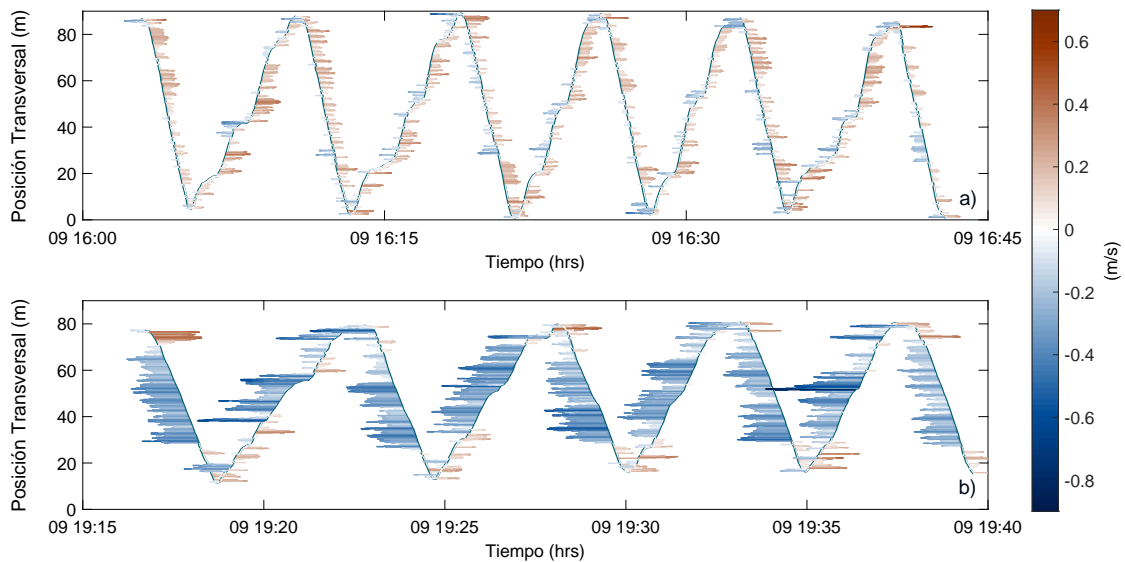


Figura 3.6: Velocidad media en la columna de agua a lo largo del desplazamiento del ADCP a nivel transversal del río, desde el SO al NE (Figura 2.2d) en función del tiempo (UTC-0) para el día 09 de septiembre 2021. (a) Transectos realizados en régimen llenante. (b) Transectos realizados en régimen vaciante. En ambos gráficos (a)-(b) se presenta el sentido y magnitud de velocidad, donde la velocidad positiva es entrante al estuario (color rojo) y la negativa saliente hacia la costa (color azul).

(positivas) al río provenientes desde aguas abajo (Figura 3.7a). Además, este perfil de velocidad responde de buena manera a lo que es la circulación estuarina (MacCready y Geyer, 2010), caracterizada principalmente por el flujo de intercambio entre capas de agua salada y dulce, dando paso a la intrusión salina hasta aguas arriba (Sección 2) durante un régimen de marea llenante. También se realizaron mediciones en régimen de marea vaciante (Figura 3.8h), con la diferencia que en este periodo de tiempo se aprecia una disminución importante de salinidad en toda la columna de agua ($S \approx 0$ PSU) (Figura 3.8b-g) producto del régimen de marea en el que se encuentra (bajamar), y por consiguiente un aumento de agua dulce en la zona representada por un alza de turbidez (Figura 3.8b-g). Por otro lado, en el perfil de velocidad no se ve señales de flujo de intercambio (Figura 3.8a) como en el régimen llenante (Figura 3.7a), ya que en este caso el agua de mar no llega hasta esta zona debido a la baja cantidad de movimiento lineal impulsado por la marea, dominando de esta manera el flujo de río hacia la costa mediante el caudal de descarga. Respecto a las mediciones de salinidad y turbidez, diversos estudios (J. W. Gartner, 2004; MacCready y Geyer, 2010; Horner-Devine et al., 2015) indican que el comportamiento de la salinidad en la columna de agua es opuesto a los registros de turbidez, es decir, cuando se tiene una turbidez alta, la salinidad es baja y viceversa. Este comportamiento puede apreciarse para el régimen vaciante en Figura 3.8b-g, presentando una turbidez constante en la columna de agua de alrededor 20 FTU. Sin embargo, para el régimen llenante (Figura 3.7b-e) no se cumple el mismo criterio, teniendo aumentos de salinidad a partir de 1 metro de profundidad con una turbidez similar a régimen vaciante (Figura 3.8b-g). Finalmente, si se compara la profundidad que alcanzan los perfiles de turbidez y salinidad con el perfil de velocidad en llenante y vaciante (Figura 3.7a-e; Figura 3.8a-g), estos no coinciden completamente con el fondo demarcado en Figura 3.7a y Figura 3.8a. Lo anterior ocurre producto que las mediciones de turbidez y salinidad son registros puntuales, mientras que el perfil de velocidad es obtenido como la media espacial de todos los transectos realizados en cada régimen.

De los perfiles de velocidad presentados en Figura 3.7a y Figura 3.8a, mediante la Ecuación 2.3 se obtiene el caudal neto de entrada y salida del estuario en régimen llenante y vaciante respectivamente. Estos caudales

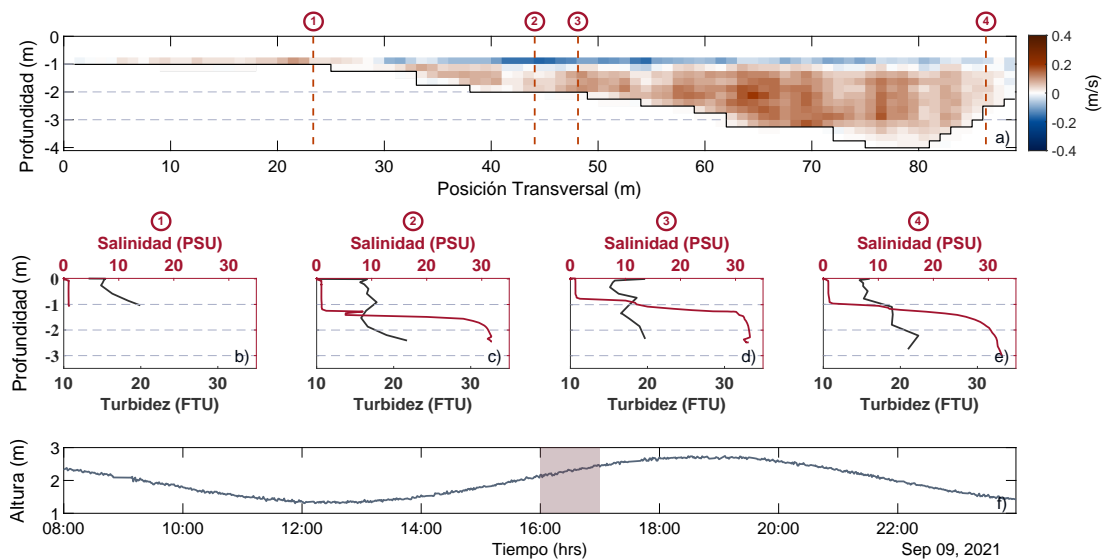


Figura 3.7: (a) Perfil de velocidad en dirección del flujo en régimen llenante a lo largo de la sección transversal del río desde el SO al NE (Figura 2.2d). La intensidad de los pixeles está asociado a la magnitud y sentido de la velocidad. El color rojo corresponde a la velocidad en sentido entrante al río (+), mientras que el color azul indica la velocidad saliente del río (-). (b)-(e) Perfiles de salinidad y turbidez. Líneas rojas punteadas en gráfico (a) indican el posicionamiento a nivel espacial de izquierda a derecha de los perfiles (b)-(e). (f) Nivel mareal del día 09 de septiembre, la sección achurada color burdeo indica la ventana temporal (UTC-0) asociada a las mediciones de gráficos (a)-(e). Línea negra demarcada en el borde inferior de (a) indica el fondo del estuario escalonado producto de la baja discretización vertical entre las celdas de medición del ADCP (0.25 m).

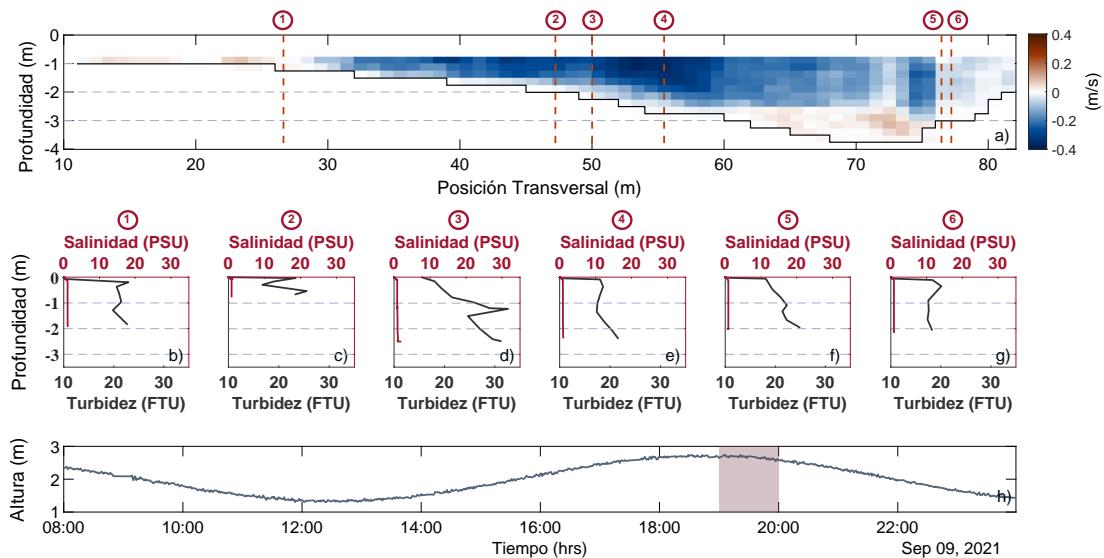


Figura 3.8: (a) Perfil de velocidad en dirección del flujo en régimen vaciante a lo largo de la sección transversal del río desde el SO al NE (Figura 2.2d). La intensidad de los pixeles está asociado a la magnitud y sentido de la velocidad. El color rojo corresponde a la velocidad en sentido entrante al río (+), mientras que el color azul indica la velocidad saliente al río (-). (b)-(g) Perfiles de salinidad y turbidez. Líneas rojas punteadas en gráfico (a) indican el posicionamiento a nivel espacial de izquierda a derecha de los perfiles (b)-(g). (h) Nivel mareal del día 09 de septiembre, la sección achurada color burdeo indica la ventana temporal (UTC-0) asociada a las mediciones de gráficos (a)-(g). Línea negra demarcada en el borde inferior de (a) indica el fondo del estuario escalonado producto de la baja discretización vertical entre las celdas de medición del ADCP (0.25 m).

($Q_{Estuario}$) dan valores aproximados de 5.3 y 11.7 m³/s respectivamente. El caudal medio diario de descarga registrado el día 09 de septiembre 2021 por la Estación Fluviométrica Río Maipo en Cabimbao es de $Q_{Cabimbao2021} = 20.4$ m³/s, siendo este último prácticamente el doble que el caudal obtenido en régimen vaciante ($Q_{Estuario} = 11.7$ m³/s). Sin embargo, a lo largo del tramo de río entre la Sección 2 (2.5 km aguas arriba de la desembocadura) y la estación de Cabimbao (20 km aguas arriba de la desembocadura) pueden estar ocurriendo varios procesos naturales y/o efectos antrópicos que afectan a la reducción del caudal registrado en Sección 2, como lo es la extracción de agua para uso agrícola, bocatomas, evapotranspiración e infiltración. Además recordar que el $Q_{Cabimbao2021}$ comparado es un caudal medio diario, mientras que los resultados obtenidos son representativos para una ventana de tiempo en particular, por lo que la comparación no es muy directa. También señalar que el ADCP utilizado en Sección 2 no registra la primera capa de flujo (0-0.76 m) perdiendo información respecto a estas velocidades superficiales.

El F_s es estimado en base a la velocidad de flujo y CSS. Para estimar la CSS a partir de los perfiles de turbidez presentes en Figura 3.7b-e y Figura 3.8b-g, y considerando que no existe gran variabilidad de la turbidez a nivel transversal del estuario, se calcula un valor medio de turbidez asociado a la sección transversal del río (SO a NE) pero variable en la profundidad. La información anterior se ingresa como input a la Ecuación 2.1, estimando de esta manera un perfil medio de CSS (Figura 3.9a,c). Multiplicando este perfil (Figura 3.9b,d) con las secciones transversales de velocidad (Figura 3.7a; Figura 3.8a), se obtiene el perfil de F_s (Figura 3.9b,d) con la misma distribución espacial y dirección que la velocidad de flujo (Figura 3.7a; Figura 3.8a). Este F_s es integrado en la profundidad y posición mediante Ecuación 2.4, resultando en un transporte de sedimentos en suspensión de 0.10 y 0.23 kg/s entrante y saliente del estuario para la condición de marea llenante y vaciante respectivamente, y por ende un flujo neto de sedimentos en suspensión hacia la costa de 0.13 kg/s. Este resultado corresponde únicamente a lo que está ocurriendo en la Sección 2 (Figura 2.2d) para el día 09 de septiembre de 2021 durante la ventana de tiempo entre las 16:00 - 20:00 hrs (UTC-0).

A continuación, a modo resumen se presenta en Tabla 3.1 los resultados de Q y F_s obtenidos durante el día 09 de septiembre 2021 tanto en Sección 1 como Sección 2. El signo del Q y F_s está determinado por la dirección de flujo, positivo para un flujo en régimen llenante y negativo para régimen vaciante.

Tabla 3.1: Caudal y Flujo de Sedimentos total neto para campaña de septiembre 2021

Zona de Análisis - 09-Sep 2021	Hora (UTC-0)	Llenante		Vaciante		Neto	
		Q (m ³ /s)	F _s (kg/s)	Q (m ³ /s)	F _s (kg/s)	Q (m ³ /s)	F _s (kg/s)
Sección 1	20:30 - 21:30	-	-	-32.35	-1.56	-32.35	-1.56
Sección 2	16:00 - 20:00	5.70	0.10	-11.70	-0.23	-6.00	-0.13

Comparando los resultados de F_s presentes en la Tabla 3.1, se extrae que aún cuando el análisis de la Sección 1 en régimen vaciante se efectuó una hora posterior al análisis de la Sección 2 (vaciante), este último presenta un F_s inferior en gran medida (0.23 kg/s) en comparación con el obtenido en Sección 1 (1.56 kg/s).

3.2.2. Octubre 2022

La Figura 3.10 detalla los resultados obtenidos en la campaña de medición para los días 21, 22, 24, 26 de octubre 2022, presentando registros de velocidad de flujo, F_s , y a la vez los perfiles de TU-S-CSS, sumado de las ventanas de tiempo en que se realizaron estas mediciones para cada día y el instante temporal en que se extrajeron las muestras de agua para calibración CSS-TU.

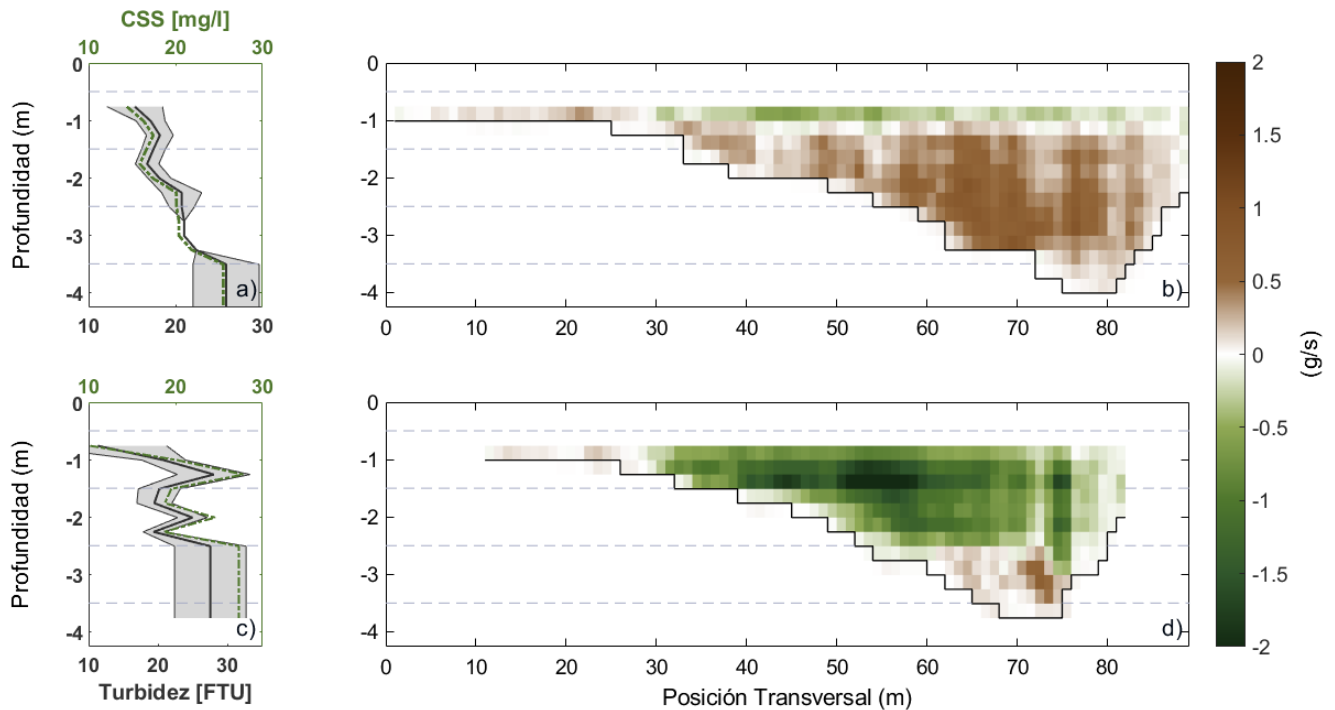


Figura 3.9: (a)-(b) Perfil promedio de $TU-CSS_{(TU)}$ y perfil de flujo de sedimentos (F_s) para régimen llenante. (c)-(d) Perfil promedio de $TU-CSS_{(TU)}$ y perfil de flujo de sedimentos (F_s) para régimen vaciante. Sección achurada de color gris en (a) y (c) corresponde a la desviación estandar respecto del promedio de datos de TU para cada altura representativa asociada al ADCP. La intensidad de los pixeles está asociado a la magnitud y sentido de F_s . El color marrón corresponde al F_s en sentido entrante al río (+), mientras que el color verde indica el F_s saliente del río en dirección hacia la costa (-). Línea negra demarcada en el borde inferior de (a) indica el fondo del estuario escalonado producto de la baja discretización vertical entre las celdas de medición del ADCP (0.25 m).

La velocidad de flujo se muestra en Figura 3.10a-d para los días 21, 22, 24, 26 de octubre 2022 respectivamente. En los 4 días se puede ver un flujo de dos capas con diferente dirección (entrante color rojo, saliente color azul), además de una disminución de la velocidad en ambas capas a medida que se acercan a la interfaz, donde la velocidad debería ser 0 (eg., MacCready y Geyer, 2010). El perfil de velocidad del día 24 (Figura 3.10c) presenta un peak de velocidad entrante en el fondo debido a que el agua de mar busca entrar al estuario a medida que sube la marea, pero la cantidad de momento lineal del río es más fuerte en esta fase. Esto indica que el día 24 de octubre el flujo de agua dulce está saliendo en su totalidad, corroborado además por la baja de S en Figura 3.10k respecto a los demás días (Figura 3.10 i, j, l).

Dado que el F_s es dependiente de la velocidad de flujo y de la $CSS_{(TU)}$ (Ecuación 2.6), a partir de los perfiles de TU extraídos cercanos al ADCP (Figura 2.4b) se calcula una media temporal de los mismos para cada día de análisis durante la ventana de tiempo de medición del ADCP. Estos perfiles de TU, y por ende de $CSS_{(TU)}$ se presentan en Figura 3.10m-p, con los cuales sumado al perfil de velocidad de flujo (Figura 3.10a-d) se obtiene el F_s para los días 21, 22, 24, 26 de octubre (Figura 3.10e-h).

También, se visualiza que tanto la velocidad de flujo como el F_s presentan un flujo de intercambio entre dos capas (entrante-saliente), en donde la dirección entrante/saliente está totalmente ligada a la salinidad del estuario (Figura 3.10i-l), mediante la cual se presencia una notable estratificación en la columna de agua, entre agua dulce ($S \approx 0$ PSU) desde la superficie hasta 1 m de profundidad, y agua salada ($S \approx 25-30$ PSU)

desde 1 m de profundidad hasta el fondo del estuario. Cuyo comportamiento es seguido por el cambio de dirección en la velocidad de flujo (rojo-azul) y F_s (marrón-verde), indicando un cambio de dirección de flujo aproximadamente a la misma profundidad que el cambio de salinidad. Por ende, para el F_s la sección de color verde corresponde a un flujo saliente, y la sección marrón a un flujo entrante al estuario. En base a lo anterior, al igual que la campaña de septiembre 2021, se esperaría que los perfiles de TU (Figura 3.10i-l) fueran contrarios al de salinidad, es decir cuando la salinidad es baja, se tenga un aumento de turbidez y viceversa. Sin embargo, los perfiles indican una turbidez prácticamente constante en la columna de agua.

Finalmente, utilizando la Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6 con los datos presentes en Figura 3.10, se estima un Q y F_s por unidad de ancho (Tabla 3.2) para cada día de análisis de octubre 2022 según la dirección de flujo (entrante-saliente), donde entrante hace referencia al flujo que entra al estuario en dirección Sur-Este (agua salada) y saliente a lo que sale del estuario en dirección Nor-Oeste (agua dulce) (Figura 2.4).

Tabla 3.2: Caudal y Flujo de Sedimentos por unidad de ancho para campaña de octubre 2022

Fecha	Hora (UTC-0)	Entrante		Saliente	
		Q (m ² /s)	F _s (g/s/m)	Q (m ² /s)	F _s (g/s/m)
21-Oct-2022	18:45 - 21:00	0.023	0.18	-0.14	-1.09
22-Oct-2022	20:00 - 21:00	0.024	0.17	-0.07	-0.50
24-Oct-2022	20:50 - 21:30	0.027	0.31	-0.12	-1.31
26-Oct-2022	18:25 - 19:55	0.014	0.11	-0.29	-3.03

Midiendo un ancho de la sección transversal del estuario de $b = 150$ m mediante Google Earth en posición del ADCP (Figura 2.4) y asumiendo que las condiciones de Q y F_s por unidad de ancho se mantienen constantes en la transversal; es decir misma velocidad y perfil de TU en toda la sección transversal del estuario; se obtiene un Q y F_s neto a lo largo de la sección presentados en Tabla 3.3,

Tabla 3.3: Caudal y Flujo de Sedimentos total neto para campaña de octubre 2022

Fecha	Hora (UTC-0)	Entrante		Saliente		Neto	
		Q (m ³ /s)	F _s (g/s)	Q (m ³ /s)	F _s (g/s)	Q (m ³ /s)	F _s (g/s)
21-Oct-2022	18:45 - 21:00	3.44	26.56	-20.46	-162.93	-17.2	-136.37
22-Oct-2022	20:00 - 21:00	3.57	25.97	-10.21	-75.47	-6.64	-49.50
24-Oct-2022	20:50 - 21:30	4.05	45.82	-17.90	-197.56	-13.85	-151.74
26-Oct-2022	18:25 - 19:55	2.11	16.85	-42.82	-454.59	-40.71	-437.73

donde se observan días que presentan caudales netos altos (26 de octubre, 2022) en dirección hacia la costa durante la ventana de tiempo analizada. Si bien el Q medio mensual registrado para octubre 2022 en la estación fluviométrica Río Maipo en Cabimbao (20 km aguas arriba de la desembocadura) es de 11.69 m³/s (DGA, 2022), se cree que los Q altos estimados, además de la notable variación entre los días se deben al fuerte supuesto de extrapolar el perfil de velocidad registrado en un punto espacial para toda la sección transversal del estuario, aún sabiendo que las velocidades (en magnitud y dirección) y batimetría del estuario no son las mismas en todos los puntos. Aún así, es importante destacar que los Q fueron estimados a partir de la velocidad media registrada durante la ventana de tiempo analizada (1 hora aproximadamente para cada día), por lo que no es totalmente válido comparar estos Q estimados con el Q medio mensual de la Estación Fluviométrica de Cabimbao.

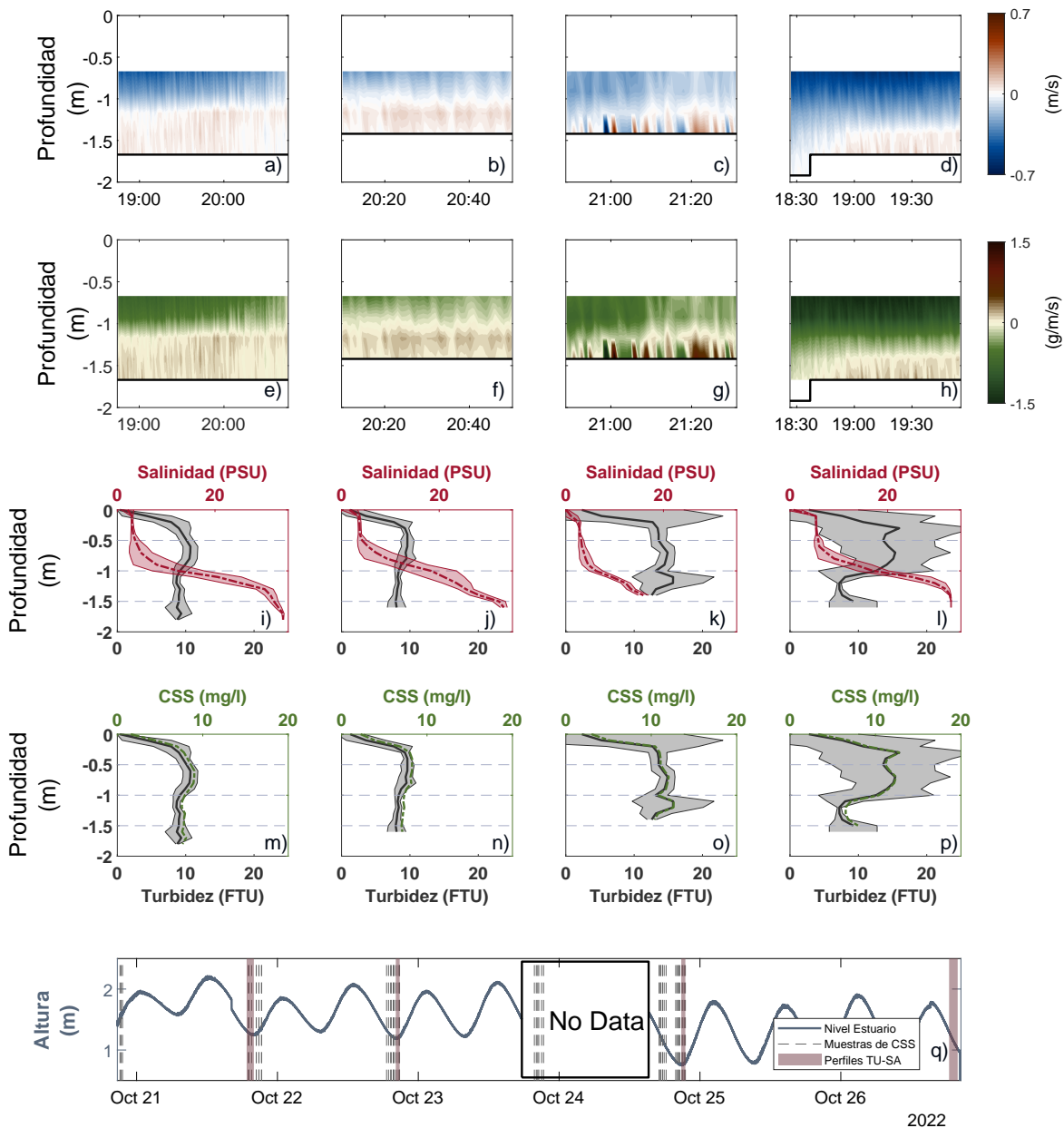


Figura 3.10: (a)-(d): Medición temporal de velocidad en la columna de agua con ADCP (Figura 2.4) para día 21-22-24-26 octubre. Color rojo y azul corresponde a una velocidad entrante (+) y saliente (-) del estuario respectivamente. (e)-(h) Flujo de sedimentos (F_s) estimado en la columna de agua para día 21-22-24-26 octubre. Color marrón y verde corresponde a un F_s entrante (+) y saliente (-) del estuario respectivamente. (i)-(l): Perfil de TU y S medio en el tiempo asociado a cada profundidad durante los registros de ADCP para día 21-22-24-26 octubre. El contorno gris y rojo corresponde a la desviación estándar de la media de datos de TU y S respectivamente para cada altura representativa asociada al ADCP. (m)-(p): Perfil de TU medio en el tiempo y asociado a cada profundidad durante los registros de ADCP para día 21-22-24-26 octubre, se incluye perfil de $CSS_{(TU)}$ obtenido a partir de Ecuación 2.1 utilizando los parámetros m y C de Figura 3.3. (q) Nivel del estuario dado por sensor de presión HOBO (Figura 2.4b). Franjas achuradas de color burdeo indican la ventana temporal en que el ADCP registró mediciones de velocidad en conjunto con los perfiles de TU-S (CTD - RBR + TU) (Figura 2.4c). Línea vertical punteada indica las muestras de agua extraídas en la zona cercana al ADCP (Figura 2.4c) para calibración CSS-TU). Sección "No Data" corresponde al periodo cuando el instrumento de presión no registró datos. Línea negra presente en el borde inferior de (a)-(h) indica el fondo del estuario escalonado en el tiempo producto de la baja discretización de las celdas de medición del ADCP (0.25 m).

3.3. Síntesis de Resultados Septiembre 2021 - Octubre 2022

3.3.1. Calibración CSS-TU

Los resultados de la calibración CSS-TU obtenidos para los periodos de septiembre 2021 y octubre 2022 se presentan en Tabla 3.4. En ella se puede observar que para septiembre 2021, la calibración realizada con el turbidímetro AQUAlogger 310TY (Figura 3.1b) posee una pendiente similar a la realizada con el instrumento CTD RBR + TU (Figura 3.1a; Figura 3.3), cercana a 1, sin embargo, el intercepto varía dependiendo el tipo de sedimento extraído en Sección 1 y Sección 2 durante ambos periodos de estudio (Figura 3.2a; Figura 3.4), además de leves variaciones de registro entre instrumentos. También se tiene el factor de determinación (R^2), el cual únicamente se presenta para la calibración CSS-TU en Sección 1 (CTD RBR + TU) con un valor alto. Para la calibración CSS-TU en Sección 2 (Turbidímetro AQUAlogger 310TY) no se presenta R^2 ya que únicamente se utilizaron 3 puntos, perdiendo sentido este coeficiente.

En octubre 2022 solo se realizó la calibración con el instrumento CTD RBR + TU, la cual da una pendiente inferior que en septiembre 2021 y un factor de determinación bastante bajo en comparación con el año anterior. En Capítulo 3.2.2 se vió que este valor disminuyó producto de la baja CSS registrada mediante el proceso de filtrado, induciendo una mayor dispersión de los datos.

Tabla 3.4: Parámetros de calibración correlación CSS-TU para periodos analizados

Periodo	Turbidímetro AQUAlogger 310TY			CTD RBR + TU		
	Pendiente (m)	Intercepto (C)	R^2	Pendiente (m)	Intercepto (C)	R^2
Septiembre 2021	1.0558	-1.771	-	1.0141	-8.88	0.82259
Octubre 2022	-	-	-	0.72001	1.3178	0.4651

3.3.2. Síntesis de Caudal y Flujo de Sedimentos

En Tabla 3.5 se presenta una síntesis de lo que fue la estimación de caudal y flujo de sedimentos para los periodos septiembre 2021 y octubre 2022, en régimen llenante y vaciante, pudiendo obtener un total neto como la suma directa entre los datos en régimen vaciante (negativo) y régimen llenante (positivo).

Tabla 3.5: Caudal y Flujo de Sedimentos para periodos analizados

Periodo	Hora (UTC-0)	Llenante		Vaciante		Neto	
		Q (m^3/s)	F_s (kg/s)	Q (m^3/s)	F_s (kg/s)	Q (m^3/s)	F_s (kg/s)
09-Sep-2021 Sección 1	20:30 - 21:30	-	-	-32.35	-1.56	-32.35	-1.56
09-Sep-2021 Sección 2	16:00 - 20:00	5.7	0.10	-11.70	-0.23	-6.00	-0.13
21-Oct-2022 Sección 1	18:45 - 21:00	3.44	0.026	-20.46	-0.162	-17.2	-0.136
22-Oct-2022 Sección 1	20:00 - 21:00	3.57	0.025	-10.21	-0.075	-6.64	-0.049
24-Oct-2022 Sección 1	20:50 - 21:30	4.05	0.045	-17.90	-0.197	-13.85	-0.151
26-Oct-2022 Sección 1	18:25 - 19:55	2.11	0.016	-42.82	-0.454	-40.71	-0.437

Capítulo 4

Discusión

4.1. Calibración CSS-TU

Las calibraciones de septiembre 2021 y octubre 2022 difieren bastante entre si, producto de la disminución del tamaño de partículas (Figura 3.2; Figura 3.4), mayor dispersión en los datos, además de la cantidad de puntos utilizados en cada periodo (Figura 3.1; Figura 3.3). Para septiembre 2021 se utilizaron 5 y 3 pares de puntos para la calibración CSS-TU en Sección 1 y Sección 2 respectivamente (Figura 3.1a,b). En este caso, a pesar de que se utilizaron pocos puntos para estimar la relación de CSS en base a TU, y se reconoce que son pocos, varios estudios indican una relación lineal de este tipo (Guillén et al., 2000; Y. H. Kim y Voulgaris, 2003; Wang et al., 2020). Por otro lado, si bien en octubre 2022 se obtiene una mayor cantidad de puntos para calibración CSS-TU, la CSS registrada disminuyó bastante respecto a la campaña anterior (Figura 3.1; Figura 3.3), produciendo una mayor dispersión de datos y por ende una disminución en el factor de determinación respecto al periodo septiembre 2021.

Respecto a los instrumentos de medición utilizados para la calibración CSS-TU, Downing, 2006 realiza un análisis sobre las ventajas y desventajas acerca de los instrumentos ópticos para registrar CSS a partir de la turbidez. El autor menciona que una de las cualidades de este tipo de instrumentos es la linealidad entre los registros de CSS y las mediciones de TU, lo que se condice con los resultados obtenidos de calibración CSS-TU (Figura 3.1; Figura 3.3). Sin embargo, también menciona que esta relación varía bastante en función del tamaño, forma y composición (agregación/floculación) de las partículas en suspensión, además de las burbujas y la contaminación química/biológica presentes en el cuerpo de agua (Downing, 2006). Si bien estos factores afectan (en mayor o menor medida dependiendo el caso), en este estudio se imposibilitó registrar estos parámetros debido a la falta de instrumentación necesaria, por lo que se asume que las variaciones de pendiente m e intercepto C entre las calibraciones realizadas (Figura 3.1; Figura 3.3) son producto de estos factores.

De igual manera que Downing, 2006, Guillén et al., 2000 llevó a cabo diversas calibraciones de CSS-TU para diferentes campañas de medición, sugiriendo que la relación entre CSS-TU (con pendiente m e intercepto C) varía significativamente con el tamaño de las partículas. Este hallazgo coincide con el autor Downing, 2006 y con nuestras observaciones asociadas a las diferencias en el tamaño de las partículas durante las campañas de septiembre de 2021 y octubre de 2022 (Figura 3.2; Figura 3.4), así como cambios considerables en la relación entre CSS-TU (Figura 3.1; Figura 3.3). Además, tanto Guillén et al., 2000 como Williamson y Crawford, 2011 presentan calibraciones de CSS-TU en lugares con bajos niveles de CSS (0-10 mg/l), lo que genera un

problema similar al nuestro relacionado con una dispersión elevada de los datos para valores bajos de CSS (Figura 3.3). Finalmente, concluyen que existe un alto potencial de errores al intentar estimar CSS a partir de TU con valores bajos cercanos a 0 (Williamson y Crawford, 2011).

En base a lo anterior, es relevante señalar que el régimen de marea y el caudal del río son determinantes en el comportamiento de la CSS. Si bien casi la totalidad de puntos presentes en la calibración CSS-TU en septiembre 2021 y octubre 2022 fueron extraídos en régimen vaciante, en Figura 3.1b se presenta un punto en régimen llenante (color rojo), el cual es bastante inferior a las demás mediciones de TU en régimen vaciante (color azul) para la misma campaña. Además, al comparar el caudal medio mensual del río que llega al estuario mediante la estación fluviométrica de Cabimbao de septiembre 2021 ($\bar{Q}_{Cabimbao2021} = 25.5 \text{ m}^3/\text{s}$) con el de octubre 2022 ($\bar{Q}_{Cabimbao2022} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$) es prácticamente el 50 % menos. En ese sentido, Voulgaris y Meyers, 2004 realizan un estudio donde señalan que el régimen de marea alta logra establecer cierto equilibrio constante de sedimentos en el estuario, mientras que para marea baja estos sedimentos son liberados al sistema costero producto de la cantidad de movimiento lineal presente en el caudal del río. Por otro lado Vercruyssen et al., 2017 señala una cierta relación ascendente en cuanto al aumento de caudal de río en conjunto con la CSS transportada a lo largo del mismo. Este comportamiento se condice con nuestro caso y respalda en cierta medida la baja de CSS producto de la disminución de caudal en octubre 2022 respecto al de septiembre 2021.

En conclusión, aunque las calibraciones lograron establecer una relación aparentemente lineal y generar baja dispersión de los datos durante al menos el período de septiembre de 2021 (Figura 3.1), es importante destacar las precauciones sugeridas por investigaciones anteriores (Guillén et al., 2000; Williamson y Crawford, 2011) al utilizar este tipo de calibraciones en condiciones no ideales. Estas pueden presentar cierto grado de error debido a los factores mencionados anteriormente, especialmente cuando se trabaja con concentraciones de sedimentos en suspensión (CSS) pequeñas, particularmente en el rango de 0-10 mg/l.

4.2. Perfil de Velocidad - TU - S - CSS - F_s

4.2.1. Septiembre 2021

Sección 1

Los transectos de velocidad realizados en Sección 1 (Figura 3.5a) presentan un flujo de agua totalmente saliente hacia la costa, lo que coincide con el régimen de marea (vaciante) en que se realizaron estas mediciones (Figura 3.5c). Además, se presenta el perfil de S-TU-CSS (Figura 3.5d; Figura 3.5e) cuyo comportamiento coincide también con la ventana de tiempo de medición (Figura 3.5c). La salinidad es prácticamente 0 PSU producto del incremento de agua dulce saliendo del estuario, pero el perfil de turbidez es constante en la profundidad, lo que discrepa de los estudios referentes al comportamiento de la turbidez en la columna de agua para un régimen vaciante (Kineke y Sternberg, 1992; Orton y Kineke, 2001; Y. H. Kim y Voulgaris, 2003; MacCready y Geyer, 2010; Li et al., 2019). Un estudio realizado por Orton y Kineke, 2001 en un estuario más profundo que el del Río Maipo (profundidad $\approx 10 \text{ m}$) se registra un perfil de turbidez creciente en la profundidad, sin embargo Li et al., 2019 menciona que la distribución vertical de turbidez, o bien CSS, está influenciado en gran medida por la estratificación de densidad causada por la interacción entre el agua dulce proveniente del río y la intrusión salina del mar. En base a lo anterior, Li et al., 2019 define que en el momento en que no hay intrusión salina al estuario (el caso de septiembre 2021 - Sección 1), la distribución de turbidez debiese ser lineal creciente en la profundidad. No obstante, se debe tomar en cuenta que el estuario en estudio

es somero (profundidad ≈ 3 m), los niveles de velocidad permanecen casi constantes en la profundidad (Figura 3.5a) y además, según lo mencionado en Capítulo 3.1, el sedimento en suspensión presente en la misma está constituido en gran medida por material fino, lo que hace posible una resuspensión constante de sedimentos en la pequeña columna de agua (Dyer, 1988; Ruhl y Schoellhamer, 2004). La explicación previa aborda la consistencia observada en el comportamiento de la turbidez en la profundidad para septiembre 2021 - Sección 1 en régimen vaciante. Finalmente, dado que el perfil de CSS es constante en la profundidad (Figura 3.5e), el F_s queda determinado netamente por el perfil de velocidad, obteniendo un F_s total en dirección hacia la costa. Para este periodo en Sección 1 únicamente se realizó la estimación de $Q_{Estuario}$ y F_s en régimen vaciante, obteniendo valores de $32.35 \text{ m}^3/\text{s}$ y 1.56 kg/s respectivamente. Lamentablemente no se posee punto de comparación para el F_s en Chile (primera aproximación), sin embargo el Q estimado ($Q_{Estuario}$) es comparado con el Q instantáneo horario para el día 09 de septiembre durante la ventana de análisis (20:00 - 21:00 hrs UTC-0) registrado por la Estación Fluviométrica de Cabimbao, a una distancia de 20 km aguas arriba de la desembocadura ($Q_{Cabimbao2021} = 20.5 \text{ m}^3/\text{s}$) otorgado por DGA, 2021. El $Q_{Estuario}$ es prácticamente 50 % mayor que el $Q_{Cabimbao2021}$, sin embargo no son comparables directamente debido a que el $Q_{Cabimbao2021}$ de descarga está registrado en una posición espacial diferente que el estimado en Sección 1. Además, existe cierto desfase temporal entre el $Q_{Cabimbao2021}$ 20 km aguas arriba y el registrado aguas abajo cercano a la desembocadura (Sección 1) (Figura 2.2b). A pesar de lo anterior, ambos caudales poseen el mismo orden de magnitud, lo que entrega cierto grado de confiabilidad en los resultados y que este valor ($Q_{Estuario}$) no se escapa del rango de caudales esperados para este sistema.

Sección 2

En la Sección 2, el perfil de velocidad en régimen llenante (Figura 3.7a) presenta una dinámica estuarina bastante marcada por el flujo de intercambio entre capas, presenciando una fuerte cuña de intrusión salina en la mayor parte de la columna de agua. De esta manera se visualiza el comportamiento esperado de un estuario (MacCready y Geyer, 2010) a 2.5 km de la desembocadura con un gradiente de salinidad en la vertical bastante similar entre los puntos de la sección transversal analizada (Figura 3.7b-e). Estos perfiles muestran una estratificación fuerte, lo que concuerda con el comportamiento observado por Li et al., 2019. Su estudio describe un perfil de turbidez de dos capas, donde la turbidez es constante en la primera capa superficial y aumenta linealmente en la segunda capa. Este comportamiento se puede apreciar claramente en el Perfil 2, 3 y 4 (Figura 3.7c-e), teniendo un peak de turbidez en los niveles profundos. En el Perfil 1 (Figura 3.7b) este comportamiento no es directo, dado que no se tiene la profundidad suficiente para concluir algo de manera precisa.

En cuanto a los perfiles de TU-S 1-6 para régimen vaciante (Figura 3.8b-g), estos indican una condición de flujo bien mezclada, similares a los presentes en Sección 1 (Capítulo 2.5.1, Figura 3.5d), con salinidad ≈ 0 PSU y un perfil de turbidez lineal creciente en la profundidad (Li et al., 2019).

Por otro lado, el $Q_{Estuario}$ obtenido tanto para régimen de llenante y vaciante es comparado con el caudal instantáneo horario registrado en la Estación de Cabimbao ($Q_{Cabimbao2021}$) para el día 09 de septiembre, 2021. Esta estación registró un $Q_{Cabimbao2021}$ de $19.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $20.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para régimen de llenante y vaciante respectivamente (DGA, 2021), siendo esta vez el $Q_{Cabimbao2021}$ mayor a los $Q_{Estuario}$ obtenidos para cada régimen. Estos últimos pueden ser inferiores al $Q_{Cabimbao2021}$ debido a las posibles intervenciones en el río entre la estación fluviométrica y la zona de estudio, además de que el instrumento ADCP comienza a medir desde los 0.76 m de profundidad, perdiendo información relevante sobre esta primera capa de flujo, y se debe considerar también el desfase de tiempo entre lo registrado a 20 km de la desembocadura (Estación Fluviométrica Río Maipo en Cabimbao) y a 2.5 km de la misma (Sección 2). Sin embargo, no se posee total

información al respecto de cuanto porcentaje de $Q_{Estuario}$ está asociado al río y cuanto está asociado a la marea, debido a que al integrar la velocidad en la sección transversal mediante la Ecuación 2.3 hay cierto porcentaje de caudal que va en dirección contraria (particularmente en régimen llenante), además de una cierta acumulación de agua de mar en cada régimen llenante, la cual es descargada en conjunto con el agua de río en el posterior régimen vaciante. A pesar de esto, para el régimen vaciante, viendo el perfil de velocidad (Figura 3.8a) y los perfiles de salinidad (Figura 3.8b-g) se puede asumir que el $Q_{Estuario}$ corresponde en su totalidad al aportante por el río, no viéndose afectado por la marea. De esta manera se valida la comparación del $Q_{Estuario}$ en base al $Q_{Cabimbao_{2021}}$, los cuales si bien no coinciden en su totalidad ($Q_{Estuario} = 11.7 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{Cabimbao_{2021}} = 20.5 \text{ m}^3/\text{s}$), la diferencia entre ambos puede deberse, además de las razones ya mencionadas, a que las mediciones de velocidad para integrar el $Q_{Estuario}$ fueron extraídas en un rango de tiempo de solo 1 hora y la falta de información de posibles extracciones y/o pérdidas del recurso hídrico entre la estación de Cabimbao y la Sección 2, ubicadas a 20 y 2.5 km aguas arriba de la desembocadura respectivamente. Con respecto al F_s , visualizando los resultados de Tabla 3.1 se concluye que durante la ventana de tiempo analizada (16:00 - 20:00 hrs (UTC-0)) el flujo neto de sedimentos en suspensión liberado hacia el sistema costero es de $F_s = 0.13 \text{ kg/s}$. Este flujo fue obtenido considerando el F_s que entra en régimen llenante y el F_s liberado hacia el sistema costero en régimen vaciante. Si bien el agua de mar llega a zonas lejanas aguas arriba (2.5 km de la desembocadura), este flujo entrante pierde cantidad de momentum lineal, por lo que, gracias al caudal de descarga, el F_s liberado en régimen vaciante supera al flujo entrante, obteniendo un flujo neto de sedimentos en suspensión con dirección hacia la costa.

Como se mencionó anteriormente, las mediciones en Sección 1 y Sección 2 son en zonas y temporalidades diferentes, sin embargo las mediciones en régimen vaciante fueron realizadas entre las 19:00 - 20:00 hrs y 20:00 - 21:00 hrs del mismo día en Sección 1 y Sección 2 respectivamente (Figura 3.5c; Figura 3.8h). A modo de comparación, si bien las mediciones fueron realizadas con un desfase de 1 hora, los resultados (Capítulo 3.1.1, Figura 3.1) presentan diferencias significativas en cuanto al $Q_{Estuario}$ y F_s registrados que llega aguas arriba en Sección 2 y el que descarga aguas abajo en Sección 1. Esto demuestra la rapidéz en que cambia el sistema durante una ventana de tiempo pequeña (1 hora), considerando de igual manera las diferencias espaciales de cada zona. Además, se puede ver la diferencia de magnitudes en cuanto a las velocidades, teniendo velocidades cercanas a 1 m/s en Sección 1 (Figura 3.5a), y velocidades de 0.2-0.4 m/s en Sección 2 para régimen vaciante (Figura 3.8a). Estas velocidades están sujetas tanto al caudal de descarga como a la sección transversal cada zona de estudio. Adicionalmente, el aumento de este F_s está influenciado por el incremento del perfil de CSS, teniendo registros de CSS en Sección 1 (Figura 3.5e) que son prácticamente el doble que en Sección 2 (Figura 3.9c). El análisis anterior indica que, si bien el perfil de CSS influye en la estimación de F_s , el aumento de F_s está determinado en gran medida por la velocidad de flujo, la cual en parte es superior en Sección 1 en comparación con la Sección 2 a causa del ancho de la sección transversal (26 y 90 m respectivamente), además de verse disminuido producto de la disipación de cantidad de movimiento presente en el flujo de agua de mar entrante a lo largo del estuario. Los efectos anteriores conllevan un transporte de sedimentos en suspensión mayor en Sección 1 que en Sección 2, y a la vez condicionan que este flujo sea en dirección hacia la costa.

Finalmente, a modo de validación, no se posee información preliminar acerca del F_s histórico entregado por el Río Maipo hacia el sistema costero, pero el F_s estimado en Sección 2 durante septiembre 2021 indica que la concentración de sedimentos en suspensión entrante al estuario es menor que la saliente en al sistema costero, generando de esta manera un flujo neto de sedimentos en suspensión hacia la costa (Tabla 3.5), influenciado principalmente por la cantidad de agua dulce liberada en régimen vaciante.

4.2.2. Octubre 2022

Los registros de velocidad (Figura 3.10a-d) fueron extraídos en régimen de marea vaciante y presentan un flujo de intercambio entre una capa de agua dulce saliente hacia la costa (superior) y una de agua salada entrante al estuario (inferior). También, se ve que la magnitud de la velocidad entrante y saliente varía entre los días de análisis, lo cual puede deberse al caudal variable entregado por el río cada día o bien a la variación mareal. Este rango mareal varía cada día haciendo que el gradiente hidráulico aumente o disminuya influenciando así las velocidades. También se observa que las velocidades de octubre 2022 (Figura 3.10a-d) son inferiores a la registrada en septiembre 2021 (Figura 3.5a); posiblemente por la diferencia del caudal medio mensual de descarga registrado por la Estación Fluviométrica de Cabimbao durante el periodo de septiembre 2021 y octubre 2022 ($\bar{Q}_{Cabimbao_{2021}} = 25.5 \text{ m}^3/\text{s}$; $\bar{Q}_{Cabimbao_{2022}} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente), además del aumento de la sección transversal en octubre 2022 respecto a septiembre 2021 (Figura 2.2b; Figura 2.4b). Sin embargo, es importante señalar que si bien ambas mediciones son realizadas en régimen vaciante en la Sección 1 (zona cercana a la desembocadura), los instrumentos no se situaron exactamente en la misma posición entre la campaña de septiembre 2021 (Figura 2.2b) y octubre 2022 (Figura 2.4b). Para septiembre 2021 se puede ver en Figura 2.2b que los instrumentos están posicionados en una zona con laderas paralelas y rectas, en comparación a octubre 2022 cuya ubicación de los instrumentos corresponde a una curva (Figura 2.4b), registrando la velocidad únicamente en un punto y extrapolando esta a lo largo de toda la sección transversal curva. Lo anterior da paso a posibles errores en la estimación del caudal al asumir que toda la sección transversal posee las mismas características batimétricas y condiciones de flujo, aún sabiendo que no es así.

Los perfiles de salinidad (Figura 3.10i-l) difieren a los obtenidos en Sección 1 durante la campaña de septiembre 2021 para régimen vaciante (Figura 3.5). Dado el régimen vaciante y la cercanía a la desembocadura, los estudios acerca de la física estuarina realizados por MacCready y Geyer, 2010; además de lo presenciado en septiembre 2021 (Figura 3.5d); indican que se debiese esperar un flujo neto totalmente saliente con agua dulce en la columna de agua y una salinidad prácticamente de 0 PSU en la vertical (MacCready y Geyer, 2010; Figura 3.5d). En base a esto, lo registrado para octubre 2022 puede deberse al bajo caudal proveniente del río ($Q_{Cabimbao} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$), y además a la zona curva en la que se posicionaron los instrumentos, causando un estancamiento y recirculación del agua de mar originado por el régimen llenante anterior, dando paso así a una estratificación de flujo en la columna de agua (Figura 3.10). Priya et al., 2015 detalla el fenómeno anterior, asociado a la baja velocidad de sedimentación, y por ende a la suspensión constante de partículas una vez que la salinidad en la columna de agua alcanza valores altos asociados a agua de mar ($S > 15 \text{ PSU}$). Además, la situación anterior en cuanto a la diferencia de la distribución vertical de salinidad durante septiembre 2021 (Figura 3.5d; $S \approx 0 \text{ PSU}$) y octubre 2022 (Figura 3.10i-l; $S \approx 0\text{-}20 \text{ PSU}$) concuerda con el estudio desarrollado por Becker et al., 2010 el cual explica que el caudal de descarga en un estuario dado por la estacionalidad del evento influye en gran medida; además del régimen de mareas; a la intensidad de la estratificación y distancia desde la costa hacia aguas arriba que adquiere terreno la cuña salina.

Por otro lado, a pesar de que para el régimen de marea vaciante en Sección 1 el rango de turbidez entre los perfiles extraídos en octubre 2022 (Figura 3.10m-p) es inferior respecto al de septiembre 2021 (Figura 3.5e), el comportamiento que poseen ambos es similar, con un crecimiento prácticamente lineal hasta los 0.5 m de profundidad para luego permanecer constantes en la profundidad. Este comportamiento fue discutido en Capítulo 4.2.1 para septiembre 2021 (Figura 3.5e), y para el periodo de octubre 2022 la recirculación de sedimentos en suspensión podría ser más significativa debido a la disminución de la CSS (Figura 3.10m-p) y, al mismo tiempo, a las variaciones en el tamaño de partícula respecto a las evidenciadas en septiembre 2021 (Figura 3.2; Figura 3.4) (Dyer, 1988; Ruhl y Schoellhamer, 2004).

También es relevante señalar que, a pesar de que los perfiles de CSS oscilan en un rango de valores muy pequeño (0-10 mg/l), los perfiles correspondientes a los días 24 y 26 de octubre (Figura 3.10k,l) poseen una mayor desviación estándar respecto al promedio de los datos (zona achurada color gris), lo cual indica una mayor variabilidad de turbidez en estos perfiles. Este fenómeno se debe posiblemente al aumento de velocidad de flujo en dirección saliente justo antes de cambiar de fase de marea (Figura 3.10c,d), perturbando de cierta manera la suspensión y resuspensión de las partículas de sedimento (Dyer, 1988; Ruhl y Schoellhamer, 2004; Becker et al., 2010). Lo anterior genera una retención de los sedimentos en suspensión del régimen vaciante que se ve influenciada por el agua de mar entrante al sistema.

En cuanto a los resultados obtenidos de $\bar{Q}_{Estuario}$ y \bar{F}_s , se debe recordar que fueron estimados para 4 días de análisis en una ventana de tiempo cercana a 1 hora (Tabla 3.5). En ese sentido, no resulta totalmente viable comparar los valores de Q estimados ($\bar{Q}_{Estuario}$) con el Q medio mensual registrado en la Estación Fluviométrica de Cabimbao ($\bar{Q}_{Cabimbao2022} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$) dada la gran variación temporal del registro, además de no poseer información acerca del Q instantáneo horario durante los días de análisis como en septiembre 2021. Por otro lado, al igual que en septiembre 2021, no se poseen registros históricos del F_s durante el mes de octubre 2022 para tener puntos de comparación. A pesar de lo anterior, si se observa la Tabla 3.5, los valores de Q asociados a octubre 2022 son de 17.2, 6.64, 13.85 y 40.71 m^3/s . Asumiendo que el $\bar{Q}_{Cabimbao2022} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$ es un reflejo claro de lo que ocurrió en el estuario durante todo el mes de octubre, se podría decir que todos los valores de Q estimados ($\bar{Q}_{Estuario}$); menos el del día 26 de octubre (Tabla 3.5); se asemejan bastante al $\bar{Q}_{Cabimbao2022}$. Respecto a esto, no olvidar que hay un vacío de información entre la zona de medición (Figura 2.4) y la Estación Fluviométrica de Cabimbao, es decir, se posee un tramo de aproximadamente 20 km entre Cabimbao y la desembocadura (Figura 2.1b) en donde no se posee conocimiento del comportamiento del Q de descarga del río. Además, a diferencia de septiembre 2021, el procedimiento realizado para obtener el $\bar{Q}_{Estuario}$ y \bar{F}_s fue posicionando el ADCP de manera fija, por lo que en octubre 2022 no se tuvo registros ni de velocidad ni de perfiles de S-TU-CSS a lo largo del estuario, teniendo que recurrir a un fuerte supuesto el cuál asume que tanto las mediciones de velocidad como los perfiles de S-TU-CSS realizadas en un único punto son similares a lo largo de toda la sección transversal, introduciendo posibles fuentes de error y dispersión en los resultados obtenidos. En conclusión, en base a lo anterior, los Q estimados ($\bar{Q}_{Estuario}$) no son comparables con el $\bar{Q}_{Cabimbao2022}$, dada las variaciones locales y temporales entre los días del mes de octubre 2022, sin embargo este último es útil en primera instancia como punto de comparación y verificación.

Finalmente, dada la naturaleza de los perfiles de turbidez, constantes al igual que en septiembre 2021, el F_s presente en Figura 3.10e-h queda totalmente dominado por el comportamiento de la velocidad de flujo. Además, a modo de corroboración, los perfiles puntuales registrados y presentados en el Capítulo siguiente para todos los días de análisis (Figura 4.1; Figura 4.2; Figura 4.3; Figura 4.4) respaldan la premisa anterior.

4.2.2.1. Análisis de Resultados Octubre 2022

Si bien en Capítulo 3.2.2 se presentan los resultados de $\bar{Q}_{Estuario}$ y \bar{F}_s , en Figura 3.10 no se logra comprender totalmente que variable es más influyente en la estimación de F_s . Por lo mismo, de la Figura 3.10 se extraen perfiles promediados temporalmente de velocidad, CSS, S y F_s con una ventana de tiempo pequeña (5-15 min) para los 4 días de análisis (Figura 4.1; Figura 4.2; Figura 4.3; Figura 4.4), con el fin de esclarecer si es más relevante el perfil de velocidad o el de CSS a la hora de estimar el F_s .

En los 4 días de análisis, se puede observar como la salinidad (Figura 4.1 b, e, h, k; Figura 4.2 b, e, h, k; Figura 4.3 b, e, h, k; Figura 4.4 b, e, h, k) responde de manera congruente a la dirección de velocidad (Figura 4.1 a, d, g, i; Figura 4.2 a, d, g, i; Figura 4.3 a, d, g, i; Figura 4.4 a, d, g, i), teniendo S altas (> 15 PSU) con una dirección de velocidad positiva y $S \approx 0$ PSU con direcciones de velocidad negativas. También se ve que los perfiles de CSS son relativamente constantes en la profundidad (Figura 4.1 b, e, h, k; Figura 4.2 b, e, h, k; Figura 4.3 b, e, h, k; Figura 4.4 b, e, h, k) por lo que el F_s (Figura 4.1 c, f, i, l; Figura 4.2 c, f, i, l; Figura 4.3 c, f, i, l; Figura 4.4 c, f, i, l) presenta la misma distribución vertical que el perfil de velocidad, resultando prácticamente en una amplificación de ésta por parte de la CSS. Además se ve que para los días en donde el nivel del estuario es superior a 1.2 m (Figura 4.1m, Figura 4.2m, Figura 4.4m), los perfiles de velocidad asociados a estos días poseen un comportamiento similar, y los perfil de S presentan una transición suave entre el flujo de dulce (capa superficial) y el de agua salada (capa inferior), a diferencia del día 24 de octubre que presenta un nivel de estuario menor cercano a 0.6 m (Figura 4.3m) y la transición de S entre una capa y otro es más abrupta tipo escalón (Figura 4.3 b,e,h,k). Este comportamiento se condice con lo mencionado en capítulos anteriores sobre la estratificación de capas en un estuario somero, en donde mientras más somero sea el estuario, menos profundidad tendrá el flujo para generar la transición entre la capa dulce y salada (MacCready y Geyer, 2010). También, multiplicando el perfil de salinidad con el de velocidad de flujo se obtuvo un flujo de salinidad en unidades de PSU m/s (Figura 4.1 c, f, i, l; Figura 4.2 c, f, i, l; Figura 4.3 c, f, i, l; Figura 4.4 c, f, i, l), el cual indica cuantos PSU de salinidad están fluyendo en 1 segundo a lo largo de un metro longitudinal para cada profundidad representativa de análisis. En la mayoría de los casos, el comportamiento del F_s y flujo de salinidad coinciden, y por tanto también el comportamiento de este último en conjunto con el perfil de velocidad respectivo. Esto indica que, aún cuando el perfil de salinidad es creciente en la profundidad, la velocidad continúa influyendo en este último. Como se vió en Ecuación 2.6, el \bar{F}_s se obtiene a partir de la velocidad y la CSS, sin embargo el análisis anterior respecto del F_s , sumado del comportamiento del flujo de salinidad, indican que para las ventanas de tiempo en las cuales se registraron datos durante el periodo de octubre 2022, la velocidad es por sobre la CSS el factor dominante a la hora de estimar el \bar{F}_s .

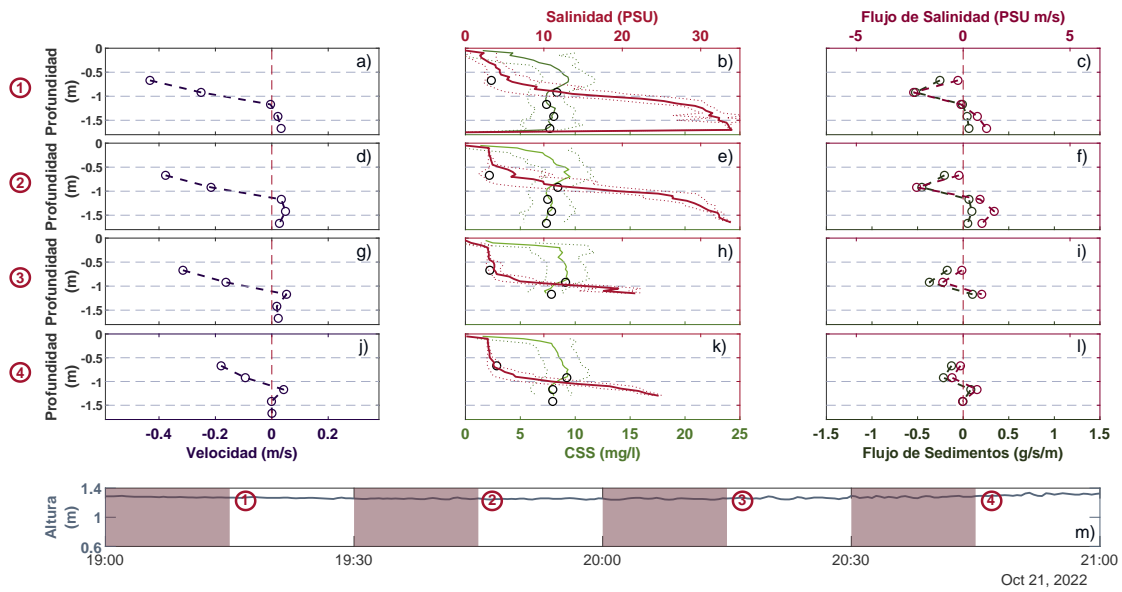


Figura 4.1: Perfiles promediados temporalmente de velocidad, CSS-S y F_s para día 21 de octubre. (a), (d), (g), (j): Perfil medio de velocidad. (b), (e), (h), (k): Perfil medio de CSS-S. Círculos negros corresponden al valor medio de CSS utilizado para F_s en cada profundidad. Franjas punteadas en perfiles de CSS-S corresponden a la desviación estándar de los perfiles analizados. (c), (f), (i), (l): Perfil medio de F_s (Color verde) y Flujo de Salinidad (Color rojo). (m): Nivel de estuario día 21 octubre. Franjas achuradas de color burdeo indican la ventana de tiempo en que se extrajeron los perfiles (1), (2), (3), (4). Línea vertical segmentada de color rojo en perfiles de velocidad, F_s y Flujo de Salinidad indican el cambio de dirección de negativo (saliente) a positivo (entrante).

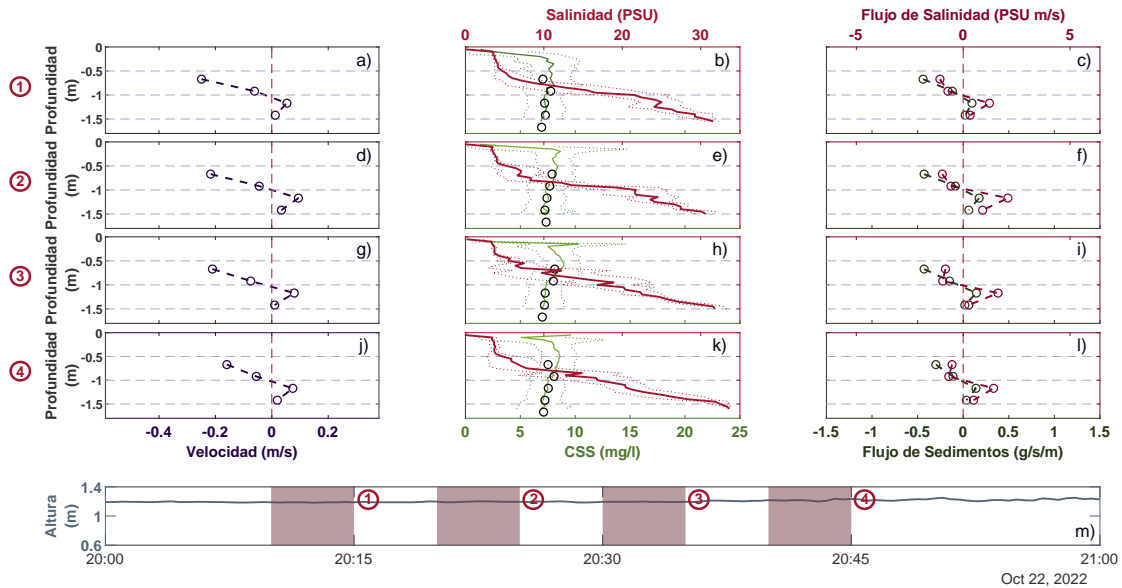


Figura 4.2: Perfiles promediados temporalmente de velocidad, CSS-S y F_s para día 22 de octubre. (a), (d), (g), (j): Perfil medio de velocidad. (b), (e), (h), (k): Perfil medio de CSS-S. Círculos negros corresponden al valor medio de CSS utilizado para F_s en cada profundidad. Franjas punteadas en perfiles de CSS-S corresponden a la desviación estándar de los perfiles analizados. (c), (f), (i), (l): Perfil medio de F_s (Color verde) y Flujo de Salinidad (Color rojo). (m): Nivel de estuario día 22 octubre. Franjas achuradas de color burdeo indican la ventana de tiempo en que se extrajeron los perfiles (1), (2), (3), (4). Línea vertical segmentada de color rojo en perfiles de velocidad, F_s y Flujo de Salinidad indican el cambio de dirección de negativo (saliente) a positivo (entrante).

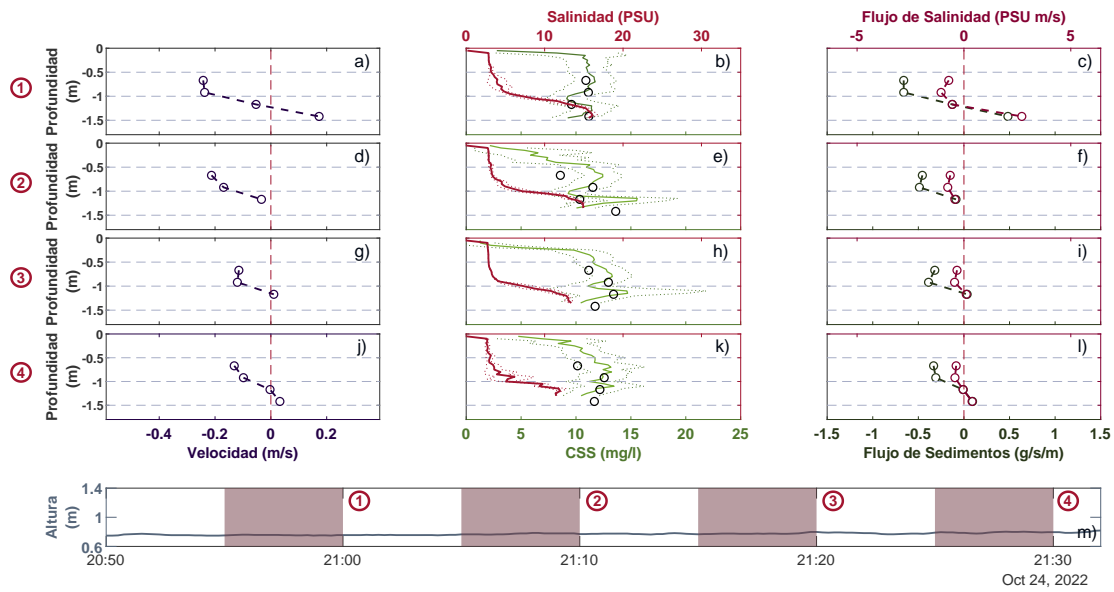


Figura 4.3: Perfiles promediados temporalmente de velocidad, CSS-S y F_s para día 24 de octubre. (a), (d), (g), (j): Perfil medio de velocidad. (b), (e), (h), (k): Perfil medio de CSS-S. Círculos negros corresponden al valor medio de CSS utilizado para F_s en cada profundidad. Franjas punteadas en perfiles de CSS-S corresponden a la desviación estándar de los perfiles analizados. (c), (f), (i), (l): Perfil medio de F_s (Color verde) y Flujo de Salinidad (Color rojo). (m): Nivel de estuario día 24 octubre. Franjas achuradas de color burdeo indican la ventana de tiempo en que se extrajeron los perfiles (1), (2), (3), (4). Línea vertical segmentada de color rojo en perfiles de velocidad, F_s y Flujo de Salinidad indican el cambio de dirección de negativo (saliente) a positivo (entrante).

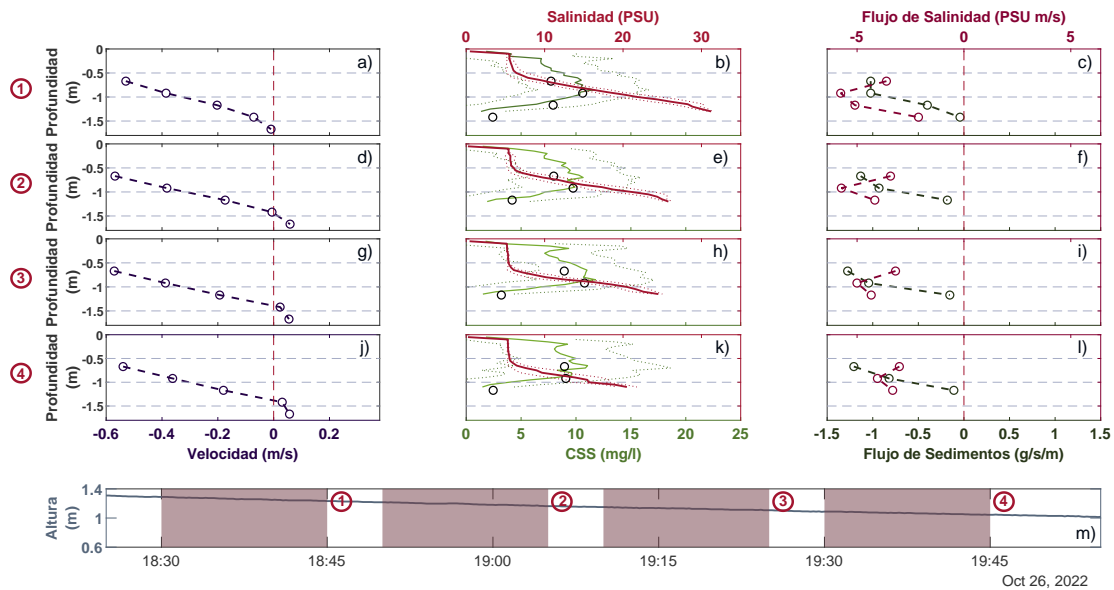


Figura 4.4: Perfiles promediados temporalmente de velocidad, CSS-S y F_s para día 26 de octubre. (a), (d), (g), (j): Perfil medio de velocidad. (b), (e), (h), (k): Perfil medio de CSS-S. Círculos negros corresponden al valor medio de CSS utilizado para F_s en cada profundidad. Franjas punteadas en perfiles de CSS-S corresponden a la desviación estándar de los perfiles analizados. (c), (f), (i), (l): Perfil medio de F_s (Color verde) y Flujo de Salinidad (Color rojo). (m): Nivel de estuario día 26 octubre. Franjas achuradas de color burdeo indican la ventana de tiempo en que se extrajeron los perfiles (1), (2), (3), (4). Línea vertical segmentada de color rojo en perfiles de velocidad, F_s y Flujo de Salinidad indican el cambio de dirección de negativo (saliente) a positivo (entrante).

4.3. Discusión Final

La tecnología utilizada en este estudio para estimar la CSS corresponde a principios ópticos mediante instrumentos de este tipo. Wren et al., 2000 detalla que estos instrumentos son sencillos de utilizar, y poseen una buena resolución temporal, lo que permite un despliegue remoto y registro de datos continuos. A pesar de esto, presentan ciertas desventajas en la medición, como lo es la fuerte dependencia del tamaño de partícula (Ludwig y Hanes, 1990; Conner y De Visser, 1992; Kineke y Sternberg, 1992; Green y Boon III, 1993; Black y Rosenberg, 1994; Xu, 1997), la intrusión por parte del instrumento hacia el flujo de agua, además de permitir realizar solo mediciones puntuales, pudiendo presentar a la vez posibles obstrucciones en el sensor de medición (Wren et al., 2000). Referente a la dependencia del tamaño de partículas, Conner y De Visser, 1992 menciona que los instrumentos ópticos funcionan bien cuando se trata de registrar CSS que contengan partículas homogéneas y J. W. Gartner y Cheng, 2001 en conjunto con J. Gartner, 2002 mencionan que el instrumento óptico es más sensible a partículas finas.

Como se mencionó anteriormente en Capítulo 3.1, las partículas de sedimento observadas en ambas campañas al filtrar las muestras de agua corresponde a material fino cohesivo (Figura 3.2; Figura 3.4), y además la gran mayoría de perfiles de TU presentados poseen una distribución prácticamente homogénea en la profundidad. En base a lo anterior, y poniendo en contexto la resuspensión de sedimentos para partículas finas (Dyer, 1988; Ruhl y Schoellhamer, 2004), se puede decir que en este caso el instrumento óptico registró debidamente los datos, otorgando su mayor grado de precisión en las mediciones (Downing, 2006).

La obtención de Q y F_s tanto para la campaña de septiembre 2021 como para octubre 2022 entrega una valiosa primera estimación de los flujos de uno de los ríos más importantes de Chile (DGA, 2004a; DGA, 2004b). No obstante, no hay puntos de comparación sobre los valores de Q y F_s obtenidos para cada periodo. Siguiendo la tendencia de megasequía en Chile central estudiada por Garreaud et al., 2017, se observa una clara disminución tanto de Q como de F_s entre la temporalidad solo de un año (septiembre 2021 - octubre 2022). En la Sección 1 (zona cercana a la desembocadura), el Q y F_s registrado en septiembre 2021 fue de $32.35 \text{ m}^3/\text{s}$ y 1.56 kg/s , mientras que en la misma zona en octubre 2022 se registró un Q y F_s medio en los días de análisis de $19.6 \text{ m}^3/\text{s}$ y 0.19 kg/s respectivamente, viendose reducido en un 40 % el Q , y un 87 % el F_s . Hasta ahora, los resultados de F_s no poseen de significado, no obstante si nos situamos en un escenario desfavorable, en el cual se asume que el F_s estimado en Sección 1 durante los periodos de septiembre 2021 y octubre 2022 permanece constante durante toda la fase de marea (5-6 hrs), la cuantificación másica de sedimentos que llega a la costa en régimen vaciante es de 28 y 0.34 Ton respectivamente. Ahora bien, para la Sección 2, según la ventana de tiempo analizada (16:00 - 20:00) se estimó una tasa de sedimentos en suspensión hacia la costa equivalente a 0.13 kg/s , lo que evaluado en la misma condición anterior equivale a 0.23 Ton de sedimentos liberados hacia la costa durante una ventana de tiempo definida. Finalmente, este sedimento en suspensión liberado hacia la costa entra a formar parte de otros procesos de transporte de sedimentos reflejado a través de la pluma de río, dominando este fenómeno procesos de disipación, mezcla, efectos de viento y oleaje, entre otros (Horner-Devine et al., 2015). Lo anterior pone en evidencia la gran cantidad de masa sedimentaria que es liberada hacia el sistema costero, presentando un claro argumento para el constante estudio y monitoreo de este tipo de sistemas.

También es relevante señalar, que la disminución de CSS entre un periodo y otro pudo haber sido producto de la colocación de un dique aguas arriba de la Sección 2 por parte de la empresa sanitaria a cargo de la zona durante los meses de verano (Diciembre 2021 - Febrero 2022) para evitar salinidad en el agua dulce extraída por la empresa. Un Dique, o bien represa estuarina posicionada varios km aguas arriba de la desembocadura es capaz de alterar la marea y el flujo del río, influyendo a la vez en la estratificación, circulación, flujo de

sedimentos en suspensión y las profundidades del estuario en cuestión (Vörösmarty et al., 2003; D. E. Walling, 2012; Frings et al., 2019; Figueroa, Son et al., 2022). Figueroa, Lee, Chang y Jung, 2022 en su estudio modelan un estuario bajo la presencia de represa y sin ella, y señalan que los estuarios que presentan este tipo de intervención tienden a ser de tipo cuña salina fuertemente estratificados, similar al comportamiento evidenciado en octubre 2022 (Figura 3.10). Además, para su caso de estudio mencionan que los máximos de turbidez se registraron cercanos a la costa y que las CSS tienden a disminuir debido a la acumulación de sedimentos en la represa estuarina, causando a la vez erosión del estuario aguas abajo. Para nuestro estudio, aunque la represa no estaba instalada en octubre 2022, las condiciones mencionadas previamente modifican toda la morfología del estuario-río, viéndose afectado por procesos a largo plazo como depositación, erosión y transporte de sedimentos a lo largo del estuario (Dyer, 1988; Syvitski et al., 2005; Van Proosdij et al., 2009; Milliman y Farnsworth, 2013; J. R. Williams et al., 2013; J. Williams et al., 2014; Figueroa et al., 2020; van der Spek y Elias, 2021).

Por otra parte, en secciones anteriores se menciona que la velocidad, y por tanto el caudal son determinantes para la estimación de F_s . Comparando ambas campañas de medición, se desprende que la velocidad de flujo, además de influir en la distribución vertical y comportamiento del F_s , también afecta en la densidad y distribución vertical de la concentración de sedimentos presentes en la columna de agua (Becker et al., 2010), cuyo comportamiento repercute nuevamente en el F_s . La velocidad registrada en la Sección 1 en septiembre 2021 es superior a 1 m/s, mientras que para octubre 2022 es del rango de 0-0.5 m/s, (prácticamente la mitad) aunque es importante señalar que si bien las mediciones de velocidad a comparar fueron realizadas en Sección 1 (zona cercana a la desembocadura), los instrumentos de octubre fueron posicionados en una zona curva más ancha (Figura 2.4b) que los instrumentos en septiembre 2021 (Figura 2.2b), siendo el área de la sección una determinante en cuanto a la magnitud y comportamiento de la velocidad. Además, tener en cuenta que la disminución de velocidad se debe de igual manera a que el mes de septiembre presenta un flujo de agua dulce producto de las precipitaciones superior al de octubre, mes en el cual aún no comienzan a aportar del todo los procesos de deshielo (Peña-Guerrero et al., 2020, Aranda et al., 2023). Esto se ve reflejado de igual manera en el caudal medio mensual de la estación fluviométrica de Cabimbao para el periodo de septiembre 2021 y octubre 2022 ($\bar{Q}_{Cabimbao2021} = 25.5 \text{ m}^3/\text{s}$; $\bar{Q}_{Cabimbao2022} = 11.69 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente). En base a lo anterior, y comparando los F_s estimados para septiembre 2021 y octubre 2022 durante el régimen vaciante en Sección 1 ($F_s = 1.56 \text{ kg/s}$; $\bar{F}_{s\text{medio}} = 0.19 \text{ kg/s}$ respectivamente) se podría decir que la velocidad de flujo, en conjunto con el área de la sección transversal son los responsables del F_s , influyendo tanto en el comportamiento (sentido, dirección y distribución vertical), como en la concentración de sedimentos que es arrastrado desde aguas arriba hasta el estuario producto de la erosión de laderas y lecho del río.

Por otro lado, se define la relación de aspecto profundidad-anchura de un estuario como un parámetro clave a la hora de clasificar la dependencia de la circulación estuarina, permitiendo visualizar las contribuciones individuales de la circulación, como lo es la estratificación de mareas, gravedad, advección, entre otras a medida que varía esta relación en un estuario (Schulz et al., 2015). Para el estuario analizado, la relación de aspecto, calculada como profundidad dividido en ancho de estuario es $\alpha \approx 0.02$, considerando una profundidad y ancho representativos de 3.5 m y 150 m respectivamente. Según estudios de diversos estuarios con distinta relación de aspecto, Schulz et al., 2015 clasifica como estuario de tipo estrecho (narrow) todos aquellos que cumplan con una relación de aspecto $\alpha \geq 0.015$, por lo que el estuario del Río Maipo pertenecería a este grupo y la contribución dominante es la advectiva, coincidiendo el comportamiento que tiene este flujo de intercambio entre capas tanto para septiembre 2021 como octubre 2022, con agua salada entrando por el fondo y agua dulce saliendo a nivel superficial.

Ahora bien, es necesario el entendimiento de los resultados obtenidos en un contexto global, y dado que en Chile no hay estudios relacionados al tema de nuestra investigación, ni tampoco estudios de estuarios de pequeña escala, este sistema es comparado con otros sistemas que cumplen con características similares al del Río Maipo.

La Bahía de San Francisco, ubicada en la costa oeste de EEUU, California es un estuario poco profundo (Conomos et al., 1985) el cual drena aproximadamente el 40 % de agua de la ciudad de California a través del Río Sacramento y San Joaquín, desde las montañas Sierra Nevada hasta el océano Pacífico (L. J. McKee et al., 2006), aportando con el 93 % de agua dulce presente en el estuario (L. McKee et al., 2013). La cuenca drenante presenta una gran intervención antropogénica en ambos ríos principales, dado por consumo de agua potable e irrigación agrícola, además de variados embalses río arriba para controlar las inundaciones en la bahía (L. J. McKee et al., 2006). El régimen de caudales presentes en la Bahía es mixto, teniendo precipitaciones durante otoño-invierno, y deshielos por parte de la Sierra Nevada en los meses de primavera-verano (Peterson et al., 1989; L. J. McKee et al., 2006). Además, al calcular la relación de aspecto (profundidad/ancho) de la bahía con los datos presentes de J. W. Gartner, 2004 y L. J. McKee et al., 2006, se obtiene un valor de $\alpha \approx 0.017$, siendo catalogado este según Schulz et al., 2015 como un estuario de tipo estrecho (narrow), al igual que el estuario del Río Maipo.

En base a lo anterior, si bien la Bahía de San Francisco no es el Estuario del Río Maipo, tiene similitudes significativas en cuanto al régimen de caudales, intervención antropogénica, y es catalogado como un estuario somero (Conomos et al., 1985; Peterson et al., 1989; L. J. McKee et al., 2006). A partir de esto, centrandose en el estudio realizado por J. W. Gartner, 2004 en la Bahía de San Francisco, es posible comparar la CSS estimada en la bahía con el estimado en el estuario del Río Maipo mediante instrumentos ópticos, no así los F_s producto de las diferencias significativas de profundidad entre la bahía (16.1 m) y el estuario (3 m).

La CSS registrada por J. W. Gartner, 2004 durante su campaña ronda entre 0 - 300 mg/l, con una media aproximada de 80 mg/l; alcanzando valores cercanos a la CSS de septiembre 2021; y cuyo material particulado, al igual que lo observado para el estuario del Río Maipo durante septiembre 2021 y octubre 2022, está constituido en gran medida por material fino (Conomos et al., 1985; J. W. Gartner, 2004; Schoellhamer et al., 2017). Además, anteriormente se mencionó que la velocidad de flujo estaba fuertemente ligada a la CSS y por tanto a la magnitud, sentido, dirección y distribución de F_s . La velocidad de flujo registrada en la Bahía de San Francisco está en un rango de magnitud 0 a 0.7 m/s, la cual es prácticamente del mismo orden a la presenciada en septiembre 2021 y octubre 2022 en el Estuario del Río Maipo.

También existen otros sistemas de mediana/baja escala que drenan cuencas hidrográficas costeras del Sur de California en un rango de áreas de entre 10-56 km² (J. A. Warrick et al., 2015). Las cuencas en estudio se posicionan en las montañas de Santa Ynez, teniendo un par con topografías empinadas desde la montaña hacia la costa, y otras planas que drenan solo las tierras bajas debajo de la cresta de la montaña. J. A. Warrick et al., 2015 realizó el estudio durante los años 2004 y 2009, con los que obtuvo CSS en un rango de entre 10 a 10.000 mg/l, demostrando cierta correlación con las variaciones de caudal en un rango de 0.10 a 10 m³/s. En general estas curvas de CSS-Q resultan bien en ríos dominados por eventos extremos, escorrentía, precipitación y procesos de deshielo a lo largo de la cuenca (Rodríguez-Blanco et al., 2010), entregando de esta manera buenos resultados sin una influencia mareal (A. Flores et al., 2020; De Girolamo et al., 2023; Slabon y Hoffmann, 2024). Sin embargo en nuestro estudio se intentó realizar una correlación CSS-Q con registros de Q en la estación de Cabimbao y las CSS extraídas en el estuario, no viendo una relación directa entre el Q registrado, posiblemente por el bajo rango de CSS-Q que se poseía, sumado a los procesos estuarinos y acumulaciones debido a circulación residual (MacCready y Geyer, 2010; Harvey et al., 2023). Además indicar que los estudios que logran esta correlación realizan las mediciones por largos y diferentes

periodos temporales con registros de Q y CSS en la misma estación de medición (Rodríguez-Blanco et al., 2010; Bezak et al., 2016; De Girolamo et al., 2023). En base a lo anterior es posible afirmar que durante la campaña de septiembre 2021 no existe correlación alguna entre el $Q_{Cabimbao_{2021}}$ y la CSS extraída a lo largo del estuario. Por otro lado, si bien en el sistema presente por J. A. Warrick et al., 2015 se tiene un mayor rango de CSS, los registros indican que un Q de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ se encuentra asociado a un CSS entre un rango de 100 a 1.000 mg/l , y un F_s de entre 0.5 a 1 kg/s . Estos registros son más similares a los obtenidos en septiembre 2021 que a los de octubre 2022, presentando un grado más de confiabilidad a los resultados estimados de Q y F_s en el estuario del Río Maipo.

J. Warrick et al., 2013 al igual que J. A. Warrick et al., 2015 señalan que si bien hay una débil correlación del caudal de descarga frente a la CSS ($R^2 \approx 0.15-0.20$), los aumentos máximos de CSS se encuentran altamente relacionados con los peaks de caudales estacionales y con las crecidas. Además J. A. Warrick et al., 2015 menciona que en las cuencas de mediana/baja escala como las de su estudio ($\text{área} < 100 \text{ km}^2$) son más propensas a presentar mayores descargas de CSS hacia la costa debido a la influencia del caudal de descarga en áreas más reducidas, y por ende, toma más relevancia el estudio del flujo de sedimentos hacia la costa en este tipo de sistemas. En base a lo anterior, si bien es un estudio más acerca del sistemas de pequeña escala, aporta información sobre lo posiblemente esperado en nuestro estudio, condiciendo de esta manera nuestros resultados y análisis con los presentes en J. Warrick et al., 2013 y J. A. Warrick et al., 2015.

Recapitulando las similitudes entre el Río Maipo y los sistemas presentes en California, y comparando ambos resultados, se puede decir que la CSS estimada mediante instrumentos ópticos en el estuario del Río Maipo es similar a la presentada en otros sistemas con características similares, obteniendo en el estuario para el periodo de septiembre 2021 CSS esperables para este tipo de sistema, no así en octubre 2022, en donde la TU toma valores muy pequeños de CSS ($\text{CSS} \approx 10-20 \text{ mg/l}$), lo cual es ratificado de igual manera al comparar mediante fotografías la CSS presente en el agua entre septiembre 2021 y octubre 2022 (Figura 3.2; Figura 3.4). Esto último, como ya se mencionó anteriormente, se debe en gran medida al déficit de caudal entre un año y otro, y aunque no se poseen datos de precipitación para el periodo establecido en la estación de Cabimbao, la diferencia considerable de caudal medio mensual ($\bar{Q}_{Cabimbao}$) entre un periodo y otro es suficiente para justificar la baja tasa de CSS vista en octubre 2022. Finalmente, es importante destacar que en Chile, en sistemas andinos de régimen mixtos, las diferencias de precipitación y caudal presente en la zona entre los meses de septiembre (invierno) y octubre (primavera) son considerables, teniendo intensas lluvias en el mes de septiembre, y el comienzo gradual del periodo de deshielo en octubre (Peña-Guerrero et al., 2020; Aranda et al., 2023), lo que marca en gran medida el comportamiento ya descrito de los periodos analizados.

Referente al estudio del comportamiento del F_s , no se realizó un análisis de este desde la Sección 1 de medición hacia la costa debido a la imposibilidad de ejecutar este tipo de evaluación. No obstante, J. A. Warrick, 2020 quien presenta un estudio de ríos pequeños en California con cuencas drenantes de entre $800 - 4.200 \text{ km}^2$ señala que el volumen completo de sedimentos descargados por ríos pequeños puede no integrarse totalmente al sistema costero (celda litoral), debido a pérdida de sedimentos más gruesos hacia la plataforma continental. En ese sentido, no se tiene un total control del F_s descargado, pero se tiene en consideración que este queda sujeto a procesos de acreción, deposición y erosión en escalas anuales, con una fuerte dependencia de la dirección e intensidad de las olas oceánicas (J. A. Warrick, 2020). Lo anterior debe tomarse en consideración a futuro si se desea utilizar la información estimada de CSS y F_s para una posible obra hidráulica en la costa del Río Maipo (i.e. puerto marítimo), ya que este estudio está realizado con la intención de entregar una primera aproximación sobre el F_s liberado por el Río Maipo hacia la costa, no así entregar el comportamiento de la interacción río-oleaje producto de los sedimentos que descargan a la costa. Por tanto, en caso de requerir a futuro información más actualizada para cualquier ejecución en este

área se debiese realizar nuevamente este tipo de estudio y evaluar los parámetros relevantes de estudio, debido al dinamismo de un sistema tan variable temporal y espacialmente, incitando a un estudio y monitoreo constante de este tipo de sistemas.

Finalmente, si bien la Bahía de San Francisco y los sistemas presentes en el Sur de California son sistemas de embergaduras superiores al Estuario del Río Maipo, no presentando los mismos caudales, precipitación y eventos extremos en los estudios mencionados, se cree que las condiciones similares expuestas, además de las congruencias de velocidad y CSS, son atribuibles para poder comparar estos sistemas y así establecer un orden de magnitud de los datos y validación de los resultados. No obstante, el flujo de sedimentos no pudo ser comparado, siendo el F_s inferior en gran medida al de los sistemas de EEUU debido a las condiciones morfológicas de los mismos. Añadir también que las mayores similitudes en cuanto a CSS y TU entre el sistema del Río Maipo y los sistemas de California se aprecian durante la campaña de septiembre 2021, no así con octubre 2022 (baja CSS, TU y Q). Si bien hay cierto dinamismo en este tipo de sistemas entre un año y otro, se cree que la condición histórica predominante corresponde al comportamiento presenciado en septiembre 2021, con un alto flujo de agua dulce en la Sección 1 y con flujos de agua salada que llegan hasta más de 2.5 km desde la desembocadura hacia aguas arriba. Esta hipótesis se respalda en base el déficit considerable de caudal durante octubre 2022, además de la ausencia de eventos extremos y presencia de megasequía e intervenciones antropogénicas en estos sistemas de Chile central (DGA, 2004b; DGA, 2004a; CR2, 2015; Garreaud et al., 2017). Sumado a lo anterior y en base a lo detallado en este documento, se reconoce que el procedimiento realizado para septiembre 2021 posee una información más completa asociada a registros de velocidad en toda la sección transversal del estuario, además de perfiles de S-TU-CSS espaciados a lo largo de la misma. Con lo anterior se logra una mejor estimación con un mayor grado de prolijidad acerca de lo que está ocurriendo en la sección transversal del estuario, a diferencia de octubre 2022 en donde se extrapolaron los perfiles de velocidad y S-TU-CSS a lo largo de la sección transversal del estuario con solo un único punto de partida.

Capítulo 5

Conclusión

La estimación de la CSS y más aún del F_s representan un desafío para la sociedad investigadora producto de todas las variables que afectan en su estudio, además de la importancia que poseen estos para la correcta gestión de costas y conocimiento de la interacción río-oleaje. En el presente trabajo se presenta una metodología conceptual para la estimación del F_s en ríos pequeños, aplicado a mediciones realizadas en dos periodos estacionales distintos con años consecutivos (septiembre 2021 - octubre 2022) en el estuario del Río Maipo. En septiembre 2021 se estima el F_s en la zona cercana a la desembocadura del Río Maipo en régimen vaciante y a 2.5 km aguas arriba de la misma, mientras que en octubre 2022 se estima únicamente en la zona cercana a la desembocadura en régimen vaciante pero evidenciando un comportamiento mixto (estratificación de capas). Este F_s está totalmente influenciado de manera directa por la velocidad y estratificación que presenta el estuario (influyendo a la CSS), en particular en régimen llenante donde se tiene un estuario parcialmente mezclado producto de la estratificación. Otras variables relevantes son la morfología de la zona, el caudal (relacionado con la velocidad), las precipitaciones medidas en la cuenca entre periodos analizados (no se presenta información para las fechas de estudio), el régimen de mareas, eventos extremos e intervenciones antropogénicas, como lo es la colocación de estructuras (diques) que afecten el correcto paso del agua aguas arriba para consumo de agua potable, constante contaminación del río y extracción de agua para cultivos. Dado que el esquema de análisis es relativamente sencillo y no es particular para el sistema del Río Maipo, es posible aplicarlo a otros sistemas similares a lo largo de Chile, sin embargo se recomienda calibrar CSS en base a TU con más mediciones, además de realizar transectos de TU con menor espaciamiento transversal, para así obtener una mayor precisión en el perfil de CSS estimado. En cuanto a la calibración CSS-TU, para estudios futuros se propone estimar un flujo de sedimentos a partir de retrodispersión acústica (CSS-Backscatter) ya que el método utilizado (CSS-TU) presenta algunas falencias debido a la falta de información a nivel transversal, no obstante entrega una primera aproximación para este tipo de sistemas, contribuyendo a la generación de nueva información y reducción de la brecha de datos existentes en Chile. También, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos pueden verse afectados producto de la pérdida de información por parte del ADCP en la primera capa de flujo, además de la recolección de datos en ventanas temporales pequeñas (1-2 hrs), no representando en su totalidad las variaciones temporales del sistema. Una arista de investigación a futuro consiste en estimar el flujo de sedimentos mediante retrodispersión acústica y contar con instrumentos que registren el tamaño de partícula (i.e. difractores laser) para tener una mayor validéz en el modelo y poder estimar bajo que tamaño de partícula es más sensible el instrumento óptico y sobre cuál conviene utilizar el instrumento acústico, lo cual es relativo y va a depender de cada sistema de análisis (Wren et al., 2000). Además, sería interesante replicar este estudio en cuanto a la obtención de F_s tanto aguas arriba como en la misma desembocadura, asegurándose de captar estos registros en la misma ventana de

tiempo, pudiendo de esta manera estimar, si es que existe, una acumulación de sedimentos en suspensión en el Estuario del Río Maipo. Por otro lado, es relevante señalar que el año 2023 en Chile se presentó el fenómeno de El Niño (CR2, 2023), el cual produjo eventos extremos producto del deshielo en la cordillera de los Andes, modificando drásticamente nuestro sistema de estudio, incluyendo desbordes de la desembocadura y una gran contribución de sedimentos hacia el sistema costero (CIGIDEN, 2023). Si bien este estudio entrega una primera aproximación del F_s presente en el Estuario del Río Maipo bajo condiciones determinadas para el periodo 2021 - 2022, como se vio durante este estudio además de lo ocurrido el año 2023, dada su gran envergadura y constante intervención antropogénica este tipo de sistemas es sumamente dinámico y susceptible a cambios abruptos durante escalas horarias pequeñas (eventos extremos, grandes crecidas, etc), por lo que debe permanecer en constante monitoreo sumado de una evaluación de su comportamiento en el tiempo. Esto con el fin de tener un mayor control y certidumbre sobre el comportamiento del mismo para futuras investigaciones y proyectos asociados a la costa del Río Maipo.

Bibliografía

- A. Flores, J., Q. Wu, J., O. Stöckle, C., P. Ewing, R., & Yang, X. (2020). Estimating river sediment discharge in the Upper Mississippi River using Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 12(15), 2370.
- Alcayaga, H., Palma, S., Caamaño, D., Mao, L., & Soto-Alvarez, M. (2019). Detecting and quantifying hydromorphology changes in a Chilean river after 50 years of dam operation. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 253-266.
- Aranda, F., Medina, D., Castro, L., Ossandón, Á., Ovalle, R., Flores, R. P., & Bolaño-Ortiz, T. R. (2023). Snow Persistence and Snow Line Elevation Trends in a Snowmelt-Driven Basin in the Central Andes and Their Correlations with Hydroclimatic Variables. *Remote Sensing*, 15(23), 5556.
- Baranya, S., & Józsa, J. (2013). Estimation of suspended sediment concentrations with ADCP in Danube River. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(3), 232.
- Basdurak, N., Largier, J., & Nidzioko, N. (2020). Modeling the dynamics of small-scale river and creek plumes in tidal waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(7), e2019JC015737.
- Becker, M. L., Luettich Jr, R. A., & Mallin, M. A. (2010). Hydrodynamic behavior of the Cape Fear River and estuarine system: A synthesis and observational investigation of discharge–salinity intrusion relationships. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88(3), 407-418.
- Bezák, N., Šraj, M., & Mikoš, M. (2016). Analyses of suspended sediment loads in Slovenian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 61(6), 1094-1108.
- Black, K., & Rosenberg, M. (1994). Suspended sand measurements in a turbulent environment: field comparison of optical and pump sampling techniques. *Coastal Engineering*, 24(1-2), 137-150.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413-421.
- Brand, E., De Sloover, L., De Wulf, A., Montreuil, A.-L., Vos, S., & Chen, M. (2019). Cross-shore suspended sediment transport in relation to topographic changes in the intertidal zone of a macro-tidal beach (Mariakerke, Belgium). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(6), 172.
- Carter, R., Johnston, T., McKenna, J., & Orford, J. (1987). Sea-level, sediment supply and coastal changes: examples from the coast of Ireland. *Progress in Oceanography*, 18(1-4), 79-101.
- CIGIDEN. (2023). *Informe post desastres CIGIDEN: Inundaciones 21-26 junio 2023, Cuenca Río Maipo* [Fecha de acceso: 21-Febrero-2024]. <https://www.cigiden.cl/informe-post-desastres-cigiden-inundaciones-21-26-junio-2023-cuenca-rio-maipo/>
- Conner, C., & De Visser, A. (1992). A laboratory investigation of particle size effects on an optical backscatterance sensor. *Marine Geology*, 108(2), 151-159.
- Conomos, T., Smith, R., & Gartner, J. (1985). Environmental setting of San Francisco Bay. *Temporal dynamics of an estuary: San Francisco Bay*, 1-12.
- CR2. (2015). *Informe a la Nación: La Megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro* [Fecha de acceso: 02-Enero-2024]. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>

- CR2. (2023). *Análisis (CR)2 | ¿Viene El Niño!... Tomemos la noticia con calma* [Fecha de acceso: 21-Febrero-2024]. <https://www.cr2.cl/analisis-cr2-viene-el-nino-tomemos-la-noticia-con-calma/>
- da Silva, A. G. A., Statterger, K., Vital, H., & Schwarzer, K. (2019). Coastline change and offshore suspended sediment dynamics in a naturally developing delta (Parnaíba Delta, NE Brazil). *Marine Geology*, *410*, 1-15.
- De Girolamo, A. M., Ricci, G. F., Abdelwahab, O. M., Lo Porto, A., Milillo, F., Netti, A. M., & Gentile, F. (2023). Suspended sediment transport in Mediterranean streams: Monitoring and load estimation. *Water*, *15*(15), 2715.
- Deines, K. L. (1999). Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers. *Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement (Cat. No. 99CH36331)*, 249-253.
- de Nijs, M. A., Winterwerp, J. C., & Pietrzak, J. D. (2010). The effects of the internal flow structure on SPM entrapment in the Rotterdam Waterway. *Journal of Physical Oceanography*, *40*(11), 2357-2380.
- DGA. (2004a). *DIAGNOSTICO Y CLASIFICACION DE LOS CURSOS Y CUERPOS DE AGUA SEGUN OBJETIVOS DE CALIDAD, CUENCA DEL RÍO MAIPO* [Fecha de acceso: 16-Febrero-2024]. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Maipo.pdf>
- DGA. (2004b). *USOS Y ABUSOS, HUMANIDAD EN LAS CUENCAS, Río Maipo* [Fecha de acceso: 02-Enero-2024]. <https://www.ecosistemas.cl/wp-content/uploads/2021/02/Usos-y-abusos-Humanidad-en-las-cuencas-Rio-Maipo-web.pdf>
- DGA. (2020). *ANÁLISIS CRÍTICO DE LA RED DE SEDIMENTOS DE LA DGA* [Fecha de acceso: 30-Enero-2024]. <https://snia.mop.gob.cl/sad/SED5903.pdf>
- DGA. (2021). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea 2021, DGA* [Fecha de acceso: 02-Enero-2024]. <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- DGA. (2022). *Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea 2022, DGA* [Fecha de acceso: 02-Enero-2024]. <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- Downing, J. (2006). Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*, *26*(17-18), 2299-2318.
- Dyer, K. R. (1988). Fine sediment particle transport in estuaries. En *Physical processes in estuaries* (pp. 295-310). Springer.
- Figueroa, S. M., Lee, G.-h., Chang, J., & Jung, N. W. (2022). Impact of estuarine dams on the estuarine parameter space and sediment flux decomposition: idealized numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *127*(5), e2021JC017829.
- Figueroa, S. M., Son, M., & Lee, G.-h. (2022). Effect of estuarine dam location and discharge interval on estuarine hydrodynamics, sediment dynamics, and morphodynamics. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 1035501.
- Figueroa, S. M., Lee, G.-h., Chang, J., Schieder, N. W., Kim, K., & Kim, S.-Y. (2020). Evaluation of along-channel sediment flux gradients in an anthropocene estuary with an estuarine dam. *Marine Geology*, *429*, 106318.
- Frings, R., Hillebrand, G., Gehres, N., Banhold, K., Schriever, S., & Hoffmann, T. (2019). From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-science reviews*, *196*, 102830.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and earth system sciences*, *21*(12), 6307-6327. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Gartner, J. W. (2004). Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine geology*, *211*(3-4), 169-187.

- Gartner, J. W., & Cheng, R. T. (2001). The promises and pitfalls of estimating total suspended solids based on backscatter intensity from acoustic Doppler current profilers. *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, March, 25*.
- Gartner, J. (2002). Estimation of suspended solids concentrations based on acoustic backscatter intensity: Theoretical background. *Turbidity and other sediment surrogates workshop, 30*.
- Green, M. O., & Boon III, J. D. (1993). The measurement of constituent concentrations in nonhomogeneous sediment suspensions using optical backscatter sensors. *Marine Geology, 110*(1-2), 73-81.
- Guillén, J., Palanques, A., Puig, P., Durrieu de Madron, X., & Nyffeler, F. (2000). Field calibration of optical sensors for measuring suspended sediment concentration in the western Mediterranean.
- Harvey, M. E., Giddings, S. N., Pawlak, G., & Crooks, J. A. (2023). Hydrodynamic variability of an intermittently closed estuary over interannual, seasonal, fortnightly, and tidal timescales. *Estuaries and Coasts, 46*(1), 84-108.
- Horner-Devine, A. R., Hetland, R. D., & MacDonald, D. G. (2015). Mixing and transport in coastal river plumes. *Annual Review of Fluid Mechanics, 47*, 569-594.
- Izett, J. G., & Fennel, K. (2018). Estimating the cross-shelf export of riverine materials: Part 2. Estimates of global freshwater and nutrient export. *Global Biogeochemical Cycles, 32*(2), 176-186.
- Jaramillo, E., Contreras, H., & Quijón, P. A. (2001). Seasonal and inter-annual variability in population abundances of the intertidal macroinfauna of Queule river estuary, South-Central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural, 74*(2), 455-468.
- Kim, H., Gutierrez, B., Nelson, T., Dumars, A., Maza, M., Perales, H., & Voulgaris, G. (2004). Using the acoustic Doppler current profiler (ADCP) to estimate suspended sediment concentration. *Technical Report CPSD, 4*(01).
- Kim, Y. H., & Voulgaris, G. (2003). Estimation of suspended sediment concentration in estuarine environments using acoustic backscatter from an ADCP. *Proceedings of Coastal Sediments, 3*.
- Kineke, G., & Sternberg, R. (1992). Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. *Marine Geology, 108*(3-4), 253-258.
- Largier, J. L. (2023). Recognizing Low-Inflow Estuaries as a Common Estuary Paradigm. *Estuaries and Coasts, 1-22*.
- Li, Z., Jia, J., Wu, Y., Zong, H., Zhang, G., Wang, Y. P., Yang, Y., Zhou, L., & Gao, S. (2019). Vertical distributions of suspended sediment concentrations in the turbidity maximum zone of the periodically and partially stratified Changjiang Estuary. *Estuaries and Coasts, 42*, 1475-1490.
- Livsey, D., Downing-Kunz, M., Schoellhamer, D., & Manning, A. (2020). Suspended sediment flux in the San Francisco Estuary: Part I—Changes in the vertical distribution of suspended sediment and bias in estuarine sediment flux measurements. *Estuaries and Coasts, 43*, 1956-1972.
- Ludwig, K. A., & Hanes, D. M. (1990). A laboratory evaluation of optical backscatterance suspended solids sensors exposed to sand-mud mixtures. *Marine Geology, 94*(1-2), 173-179.
- MacCready, P., & Geyer, W. R. (2010). Advances in estuarine physics. *Annual Review of Marine Science, 2*, 35-58.
- Martinez, C. (2023). *Cierre de desembocaduras de ríos: el colapso de los ecosistemas costeros en Chile* [Fecha de acceso: 30-Enero-2024]. <https://www.elmostrador.cl/noticias/opinion/2023/07/20/cierre-de-desembocaduras-de-rios-el-colapso-de-los-ecosistemas-costeros-en-chile/>
- Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., & Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard? *Ocean & Coastal Management, 156*, 141-155.
- Masselink, G., Russell, P., Rennie, A., Brooks, S., & Spencer, T. (2020). Impacts of climate change on coastal geomorphology and coastal erosion relevant to the coastal and marine environment around the UK. *MCCIP Science Review, 2020*, 158-189.

- McKee, L. J., Ganju, N. K., & Schoellhamer, D. H. (2006). Estimates of suspended sediment entering San Francisco Bay from the Sacramento and San Joaquin Delta, San Francisco Bay, California. *Journal of Hydrology*, 323(1-4), 335-352.
- McKee, L., Lewicki, M., Schoellhamer, D. H., & Ganju, N. K. (2013). Comparison of sediment supply to San Francisco Bay from watersheds draining the Bay Area and the Central Valley of California. *Marine Geology*, 345, 47-62.
- Merten, G. H., Capel, P. D., & Minella, J. P. (2014). Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 1235-1241.
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2013). *River discharge to the coastal ocean: a global synthesis*. Cambridge University Press.
- Minella, J. P., Merten, G. H., Reichert, J. M., & Clarke, R. T. (2008). Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(12), 1819-1830.
- Morehead, M. D., Syvitski, J. P., Hutton, E. W., & Peckham, S. D. (2003). Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins. *Global and Planetary Change*, 39(1-2), 95-110.
- Orton, P., & Kineke, G. (2001). Comparing calculated and observed vertical suspended-sediment distributions from a Hudson River estuary turbidity maximum. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(3), 401-410.
- Parsons, D. R., Jackson, P., Czuba, J. A., Engel, F., Rhoads, B. L., Oberg, K., Best, J. L., Mueller, D., Johnson, K., & Riley, J. (2013). Velocity Mapping Toolbox (VMT): A processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(11), 1244-1260.
- Peña-Guerrero, M. D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L., & Meza, F. (2020). Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 65(6), 1005-1021.
- Peterson, D. H., Cayan, D. R., Festa, J. F., Nichols, F. H., Walters, R. A., Slack, J. V., Hager, S. E., & Schemel, L. E. (1989). Climate variability in an estuary: effects of riverflow on San Francisco Bay. *Aspects of climate variability in the Pacific and the western Americas*, 55, 419-442.
- Priya, K., Jegathambal, P., & James, E. (2015). On the factors affecting the settling velocity of fine suspended sediments in a shallow estuary. *Journal of oceanography*, 71, 163-175.
- Rehman, S. S.-U. (1990). *The development of high-frequency acoustics for the measurement of suspended sediment in the eastern Irish Sea*. (Tesis doctoral). University of East Anglia.
- Richards, S., Heathershaw, A., & Thorne, P. (1996). The effect of suspended particulate matter on sound attenuation in seawater. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 100(3), 1447-1450.
- Rodríguez-Blanco, M., Taboada-Castro, M., Palleiro, L., & Taboada-Castro, M. (2010). Temporal changes in suspended sediment transport in an Atlantic catchment, NW Spain. *Geomorphology*, 123(1-2), 181-188.
- Ruhl, C., & Schoellhamer, D. (2004). Spatial and Temporal Variability of Suspended-Sediment Concentrations in a Shallow Estuarine Environment. *San Francisco Estuary and Watershed Science*, 2. <https://doi.org/10.15447/sfews.2004v2iss2art1>
- Schoellhamer, D. H., Manning, A. J., & Work, P. A. (2017). Erosion characteristics and horizontal variability for small erosion depths in the Sacramento-San Joaquin River Delta, California, USA. *Ocean Dynamics*, 67(6), 799-811.
- Schulz, E., Schuttelaars, H. M., Grawe, U., & Burchard, H. (2015). Impact of the depth-to-width ratio of periodically stratified tidal channels on the estuarine circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 45(8), 2048-2069.
- Slabon, A., & Hoffmann, T. (2024). Uncertainties of annual suspended sediment transport estimates driven by temporal variability. *Water Resources Research*, 60(1), e2022WR032628.

- Syvitski, J. P., Vörösmarty, C. J., Kettner, A. J., & Green, P. (2005). Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *science*, 308(5720), 376-380.
- Teledyne-RDI Instruments. (2016). *StreamPro ADCP, Shallow Streamflow Measurement System* [Fecha de acceso: 02-Enero-2024]. https://www.comm-tec.com/Docs/Brochure/RDI/streampro_datasheet_lr.pdf
- Thorne, P. D., & Hanes, D. M. (2002). A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. *Continental shelf research*, 22(4), 603-632.
- Thorne, P. D., & Hurther, D. (2014). An overview on the use of backscattered sound for measuring suspended particle size and concentration profiles in non-cohesive inorganic sediment transport studies. *Continental Shelf Research*, 73, 97-118.
- van der Spek, A. J., & Elias, E. P. (2021). Half a century of morphological change in the Haringvliet and Grevelingen ebb-tidal deltas (SW Netherlands)-Impacts of large-scale engineering 1964–2015. *Marine Geology*, 432, 106404.
- Van Maren, D., van Kessel, T., Cronin, K., & Sittoni, L. (2015). The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research*, 95, 1-14.
- Van Proosdij, D., Milligan, T., Bugden, G., & Butler, K. (2009). A tale of two macro tidal estuaries: differential morphodynamic response of the intertidal zone to causeway construction. *Journal of Coastal Research*, 772-776.
- Vercruyse, K., Grabowski, R. C., & Rickson, R. J. (2017). Suspended sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation. *Earth-Science Reviews*, 166, 38-52.
- Vericat, D., & Batalla, R. J. (2010). Sediment transport from continuous monitoring in a perennial Mediterranean stream. *Catena*, 82(2), 77-86.
- Vermeulen, B., Sassi, M., & Hoitink, A. (2014). Improved flow velocity estimates from moving-boat ADCP measurements. *Water resources research*, 50(5), 4186-4196.
- Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. (2003). Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and planetary change*, 39(1-2), 169-190.
- Voulgaris, G., & Meyers, S. T. (2004). Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research*, 24(15), 1659-1683.
- Walling, D., & Webb, B. (1985). Estimating the discharge of contaminants to coastal waters by rivers: some cautionary comments. *Marine Pollution Bulletin*, 16(12), 488-492.
- Walling, D. E. (2012). The role of dams in the global sediment budget. *IAHS-AISH publication*, 356, 3-11.
- Walling, D. E. (2009). The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges.
- Wang, Y., Peng, Y., Du, Z., Lin, H., & Yu, Q. (2020). Calibrations of suspended sediment concentrations in high-turbidity waters using different in situ optical instruments. *Water*, 12(11), 3296.
- Warrick, J., Madej, M. A., Goñi, M., & Wheatcroft, R. (2013). Trends in the suspended-sediment yields of coastal rivers of northern California, 1955–2010. *Journal of hydrology*, 489, 108-123.
- Warrick, J. A. (2020). Littoral sediment from rivers: Patterns, rates and processes of river mouth morphodynamics. *Frontiers in Earth Science*, 8, 355.
- Warrick, J. A., Melack, J. M., & Goodridge, B. M. (2015). Sediment yields from small, steep coastal watersheds of California. *Journal of hydrology: Regional studies*, 4, 516-534.
- Williams, J., Dellapenna, T., Lee, G.-h., & Louchouart, P. (2014). Sedimentary impacts of anthropogenic alterations on the Yeongsan Estuary, South Korea. *Marine Geology*, 357, 256-271.
- Williams, J. R., Dellapenna, T. M., & Lee, G.-h. (2013). Shifts in depositional environments as a natural response to anthropogenic alterations: Nakdong Estuary, South Korea. *Marine Geology*, 343, 47-61.

- Williamson, T. N., & Crawford, C. G. (2011). Estimation of Suspended-Sediment Concentration From Total Suspended Solids and Turbidity Data for Kentucky, 1978-1995 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 47(4), 739-749.
- Wren, D., Barkdoll, B., Kuhnle, R., & Derrow, R. (2000). Field techniques for suspended-sediment measurement. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(2), 97-104.
- Xu, J. (1997). Converting near-bottom OBS measurements into suspended sediment concentrations. *Geo-Marine Letters*, 17, 154-161.
- Zhang, H., & Sheng, J. (2015). Examination of extreme sea levels due to storm surges and tides over the northwest Pacific Ocean. *Continental Shelf Research*, 93, 81-97.